

博士論文

遠隔地間における実空間共有型 MR システムの構築

南 広一

2004 年 2 月 6 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報処理学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
博士(工学) 授与の要件として提出した博士論文である。

論文番号： NAIST-IS-DT0161033

提出者： 南 広一

審査委員： 千原 國宏 教授
横矢 直和 教授
眞鍋 佳嗣 助教授

提出日： 2004年 2月 6日

遠隔地間における実空間共有型 MR システムの構築*

南 広一

内容梗概

バーチャルリアリティ(Virtual Reality:VR)技術の発達に伴い,コンピュータ内に仮想空間を構築し,複数のユーザがその空間の中でコミュニケーションを行えるシステムが数多く提案されるようになった.しかし,従来のシステムは,ユーザのアクセス可能な範囲が仮想空間内に限られているため,シミュレーションや,コミュニケーションなどの用途にしか用いられておらず,現実的な問題の解決に用いることはできない.

近年,P.Milgramにより,複合現実感(Mixed Reality:MR)技術が提唱され,システムがユーザに,現実と仮想をシームレスに融合させた形で提示するという研究が活発に行われるようになった.一方,コンピュータの小型化・高性能化により,携帯型情報端末(PDA)や携帯電話にも高速な処理能力が備わり,現在ではウェアラブルコンピュータと呼ばれる常時装着するコンピュータと,その応用に関する研究が世界中で活発に行われるようになった.

MR技術を用いた空間共有システムとして,CABIN間通信に代表されるいくつかのシステムが提案されている.しかし,これらのシステムでは,ユーザが作業を行える空間が従来の三次元空間共有と同じく仮想空間に限定されており,実空間における問題の解決に用いることはできない.

本研究では,MR技術とウェアラブルコンピュータ技術を用いることで,実空間を遠隔地間で共有する実空間共有型MRシステムの構築を目指す.本研究で目指す実空間共有型MRシステムは,ある現実の空間上にMR空間を構築し,構

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報処理学専攻 博士論文, NAIST-IS-DT0161033, 2004年2月6日.

築した MR 空間を遠隔地と共有するものである．具体的には，現場にいるウェアラブルコンピュータと，遠隔地の没入型ディスプレイ装置との間をネットワークで接続し，現場のユーザには現実空間に仮想空間が重畳された空間を提示し，遠隔地のユーザには現場のユーザ周辺を映した実画像に仮想空間が重畳された空間を提示し，双方のユーザに公平なコラボレーション環境を提供する．MR 技術とウェアラブルコンピュータを用いることで，“今すぐ”，“今ここで”，遠隔地の協調作業者ととも現実に起こっている出来事に即座に対応することができる．

本研究で提案する実空間共有型 MR システムの構築のためには，様々な問題を解決する必要がある．中でも，遠隔地間で MR 空間を共有する際の情報共有をどのように行うかという問題と，現場の空間を遠隔地と共有するために実空間をどのように計測するかという問題は重要な問題である．

本論文では，上に述べた問題の解決方法として，遅延の大きな環境においてもユーザに快適なオブジェクト操作を提供し，かつ，現実空間と仮想空間との間でオブジェクトの一貫性を管理するための手法，“複製 - 選択プロトコル (Duplication-Selection-Protocol: DSP)” ，および，ウェアラブルコンピュータと持ち運び可能な全方位カメラシステムを用いて，屋内の三次元モデルの作成と修正をインタラクティブに行える空間モデリング手法，“ポンチ 3D” を提案した．

本論文では，“複製 - 選択プロトコル”，“ポンチ 3D” の動作の検証と効果の検証のための基礎実験と，プロトタイプシステムとして構築した共有 MR インテリアデザインシステムを用いた空間共有実験を行い，“複製 - 選択プロトコル” および “ポンチ 3D” の効果についての評価を行い，提案技術の有用性について考察を行った．

キーワード

MR 空間共有, 実空間共有型 MR, 一貫性制御, 空間モデリング, ウェアラブルコンピュータ, 没入型ディスプレイ

Development of Distributed MR System for Real Space Sharing*

Koichi Minami

Abstract

Recently, many distributed VR systems have been proposed. These systems enable mutual communication among distributed users in a VR space as if they are in the same VR space. However, these systems do not allow the users to access any real space which virtual space produced by the systems cannot include.

Mixed Reality (MR) technology defined by P. Milgram is a technology to enable user to experience the composed real and virtual space simultaneously. On the other hand, research on wearable computer which is computers worn by users any time as cloths undergoes around the world and computational performance of small devices such as Personal Data Assistant (PDA) and cellular phones are rapidly increasing.

There are systems realizing shared MR space between remote places. However, foregoing systems do not allow the users to perform practical task because these systems allow the users to communicate in only virtual space constructed artificially.

This study aims to develop advanced practical collaborative system. This study proposes a framework “MR for Real Space Sharing” using MR and wearable computing technology. The proposed framework produces a collaborative MR space shared among a user wearing wearable computer in a real site and other

*Doctor's Thesis, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DT0161033, February 6, 2004.

users in a remote immersive VR site, and allows the all users to access the real space and the VR space impartially. By using a wearable computer, the user in real site can start collaboration anytime anywhere and he/she can solve an actual problem with remote collaborators.

To realize the proposed system, the problems about managing data for MR space between remote places and measuring the real field to share the information between distributed places are important. This paper proposes two technologies for these problems 1) A “Duplication-Selection-Protocol (DSP)” and 2) a “Punch3D” technology. The “DSP” manages the consistency among remote sites consisting of real and virtual objects and enables users to manipulate objects comfortably even via information network with large latency. The “Punch3D” provides environment modeling method for an indoor space to enable interactive modeling easily and interactive correction the error of the model using collaborative wearable computer and portable omni-directional camera.

This study has developed the shared MR interior design system as a prototype system using “DSP” and “Punch3D” technologies, and performed experiments on these technologies and usability using the shared MR interior design system. The experiments showed the “DSP” could solve inconsistency when the multiple user handled same object simultaneously and when the user handled the virtual object which is a substitution of real object in remote real space. The experimental results showed the “Punch3D” could make a model of the real environment as simplified model and the user can correct the model in real-time.

Keywords:

Shared Mixed Reality, Mixed Reality for Real Space Sharing, Consistency Control, Environment Modeling, Wearable Computer, Immersive Environment

目次

1	序論	3
1.1.	情報の共有	3
1.2.	バーチャルリアリティと三次元空間共有	4
1.3.	VRとMR	6
1.4.	VR,MRの視覚情報の提示手法	7
1.4.1	頭部装着型ディスプレイ	7
1.4.2	没入型ディスプレイ	9
1.4.3	ウェアラブルコンピュータ	10
1.5.	協調作業支援	11
1.6.	三次元空間共有と協調作業の可能性	11
1.7.	本論文の構成	12
2	空間共有の試み	13
2.1.	分散仮想環境システム	13
2.2.	MRを取り入れた空間共有システム	17
3	実空間共有型MRシステム	23
3.1.	実空間共有型MRの定義	24
3.2.	実空間共有型MRのありかた	25
3.3.	実空間共有型MRシステムのための構成技術	28
3.3.1	MR空間関連技術	29
3.3.2	プラットフォーム関連技術	30
3.3.3	MRのための空間管理技術	31
3.3.4	実空間計測・モデリング技術	34

目次

4	MRのための空間管理手法	37
4.1.	一貫性制御	37
4.2.	複製 - 選択プロトコルの概要	39
4.3.	複製 - 選択プロトコルの実装	40
4.3.1	空間の表現形式	40
4.3.2	通信モデル	44
4.3.3	一貫性制御	45
4.4.	複製 - 選択プロトコルの評価実験	51
4.4.1	通信量評価	52
4.4.2	メッセージ量の論理的比較	52
4.4.3	操作性評価	54
4.4.4	実験システム	55
4.4.5	操作性評価実験	57
4.4.6	実験結果	59
4.4.7	二つの没入型ディスプレイを用いた空間共有実験	61
4.4.8	ウェアラブルコンピュータを用いた空間共有実験	66
4.5.	考察	69
4.6.	結論	73
5	協調作業のための実空間モデリング手法	75
5.1.	ポンチ 3D の概要	78
5.2.	初期モデルの生成	79
5.3.	ユーザ歩行追跡による初期モデルの修正	82
5.4.	モデリング結果の伝送	83
5.5.	実験	84
5.5.1	足元位置精度評価実験	84
5.5.2	歩行追跡実験	86
5.5.3	モデル構築実験 1	87
5.5.4	モデル構築実験 2	91
5.6.	インテリアデザイン実験	97

5.6.1	実験環境	97
5.6.2	実験	99
5.7.	考察	104
5.8.	結論	106
6	考察	109
7	結論	113
	謝辞	123
	付録	125
	研究業績	127

目 次

1.1	Mixed Reality の俯瞰図	6
1.2	MicroOptical 社の HMD	8
1.3	ソリッドレイ研究所で開発された曲面スクリーン	9
2.1	SIMNET	14
2.2	DIVE	15
2.3	電話とテレビ電話のコミュニケーション形態	16
2.4	仮想空間共有システムのコミュニケーション形態	17
2.5	VLEGOII	18
2.6	WearCom	19
2.7	CABIN 間通信	20
3.1	実空間共有型 MR	24
3.2	提案フレームワークの一実装方法	25
3.3	実空間共有型 MR における空間の構成	26
3.4	MR 空間共有システムの分類	27
4.1	従来の一貫性制御手法と「複製 - 選択プロトコル」	40
4.2	空間の表現	42
4.3	バージョン番号と最終更新者名の更新	43
4.4	通信モデル	44
4.5	競合の検出とノードの複製	46
4.6	ノードの複製	49
4.7	ノード ID の変換	50
4.8	ノード ID 変換テーブルの実装例	51

図目次

4.9	従来手法を用いた作業例	53
4.10	提案手法を用いた作業例	53
4.11	実験システム	55
4.12	タスク 1 における初期状態	57
4.13	タスク 2 における初期状態	58
4.14	タスク 3 における初期状態	59
4.15	没入型ディスプレイを用いた DSP の評価実験環境	62
4.16	没入型ディスプレイを用いた DSP の評価実験風景	63
4.17	没入型ディスプレイの構成	65
4.18	ウェアラブルコンピュータと没入型ディスプレイを用いた DSP の 評価実験環境	67
4.19	ウェアラブルコンピュータと没入型ディスプレイを用いた DSP の 評価実験風景	68
4.20	ウェアラブルコンピュータの HMD からの視野	68
4.21	一方が現実物体であるオブジェクトの操作	69
5.1	協調作業の開始	78
5.2	歩行によるモデルの修正	79
5.3	全方位画像からパノラマ画像への変換	80
5.4	初期モデルの生成	81
5.5	床面上における足元のカメラからの距離	84
5.6	カメラからの距離と 1 ピクセルに対応する距離に含まれる最大誤 差の関係	85
5.7	歩行により構築された部屋形状	86
5.8	エレベータホール俯瞰図とユーザの歩行軌跡	88
5.9	モデル修正前のエレベータホール	89
5.10	モデル修正後のエレベータホール	90
5.11	セミナー室の俯瞰図と歩行軌跡	91
5.12	モデル修正前のセミナー室	92
5.13	モデル修正後のセミナー室	93

5.14	モデル修正前のセミナー室(鳥瞰図)	94
5.15	モデル修正後のセミナー室(鳥瞰図)	95
5.16	ユーザの歩行軌跡	96
5.17	共有 MR インテリアデザインシステムの構成	97
5.18	セミナー室の様子	100
5.19	没入型ディスプレイ内の様子	100
5.20	ポンチ 3D によってモデリングされたセミナー室	101
5.21	セミナー室におけるシステムの配置	102
5.22	協調作業の様子(ウェアラブルコンピュータシステム側)	103
5.23	協調作業の様子(没入型ディスプレイシステム側)	103

表目次

4.1	メッセージ定義	54
4.2	クライアント用PCのスペック	56
4.3	サーバ用PCのスペック	56
4.4	音声通信用WSのスペック	57
4.5	アンケート結果	60
4.6	ポリゴン数と平均フレームレート	66
5.1	ウェアラブルコンピュータシステムのスペック	98
5.2	没入型ディスプレイシステムのスペック	98
5.3	ポンチ 3D システムのスペック	99

第1章

序論

人間が相手の所に直接出向き、一緒に作業を行うという協調作業の形態は、最も基本的で、かつ理想的な形態の一つだろう。しかし、現実には、距離的、時間的な隔たりによって、一緒に作業を行うことが困難な場合がある。例えば、数分を争うような問題が地球の裏側で起こっている場合、現在の人類の科学をもってしても、数分という時間では地球の裏側へ到着することはできない。

映画や小説の中など、架空の物語上では、自分自身の身体を遠隔地に転送し、遠くの人と協調作業を行うという場面をよく見ることができる。例えば、“スタートレック”[1]では、宇宙船から惑星表面に降り立ち探検や調査を行うために、物質転送装置が用いられている。また、“ドラえもん”[2]では、どこでもドアという、ドアを通じて遠隔地へと一瞬で移動できる道具が登場する。しかし、このような便利な道具が発明されるのは、まだまだ未来のことだと考えられる。

現代に住む我々は、相手との時間的、空間的な隔たりが大きい場合には、実際に現地に移動するという手段の代わりに、電話やインターネットなどを用いて、遠隔地の人間と情報を交換するという手段をとるしかない。

本章では、情報の交換から情報の共有までの歴史について述べ、次世代の情報共有手段である三次元空間共有と、三次元空間共有に必要な技術について述べる。

1.1. 情報の共有

遠隔地へ実際に行くことが困難であるという問題に対し、人類はこれまで情報を伝送する様々な手法を開発してきた。まだ電気がなかった時代、人類は“太鼓

の音”，“手旗信号”，“のろし”といった手段で単純な信号を遠隔地へ伝送していた。その後，電気通信技術の発達により“電信”，“電話”が生まれ，文字，音声情報を遠隔地に伝達することが可能となった。現在では，インターネットによる通信網が世界中に張り巡らされ，さらに光ファイバや通信衛星など広帯域の伝送路が用いられるようになり，文字情報から動画像情報まで，幅広い種類の情報の伝送が可能となった。

一方，電気通信技術の発達によって通信の双方向性が高まり，相手に情報に送り，その答えを送ってもらうという一方向的な情報伝達から，あたかも自分と相手が同時に会話をしているように，通信相手と“情報を共有する”ことが可能になった。

情報の共有の元祖とも言えるものは，“電話”を用いた音声（一次元）情報の共有である。この音声情報の共有は，現在最も多く用いられている情報の共有であると考えられる。音声情報の共有の次に来るものが“テレビ電話”などの画像（二次元）情報の共有である。現在，高速なインターネット接続が可能な携帯電話が登場し，今後テレビ電話を用いた情報の共有はますます多く行われると考えられる。さらに，この画像情報の共有の次に来るものは，空間（三次元）情報の共有“三次元空間共有”であるといわれている [3]。“三次元空間共有”とは，コンピュータ上に構築された三次元空間を遠隔地同士で共有し，あたかも相手と同じ場所にいるかのように感じさせる，空間情報を通信することによる情報の共有である。

1.2. バーチャルリアリティと三次元空間共有

三次元空間共有の実現には，バーチャルリアリティ (Virtual Reality:VR) 技術は欠かすことができない重要な技術である。VRは1989年頃から有名になった概念であり，日本では一般に仮想現実感と呼ばれるが，その定義は「実体のない仮想としてのバーチャル」という意味ではなく「見かけや形は現物そのものではないが，本質的あるいは効果としては現実であり，現物であること」，または「現実のエッセンス」であるといわれている。つまり，コンピュータ上に人工的な世界を構築し，その中であたかも現物が存在するようなインタラクションを可

能にする概念である [4] .

また, VR と等しい概念として, テレイグジスタンス (Telexistence) という概念がある. 人間が現在存在する場所とは別の空間に存在していると感じることを, テレイグジスタンスという. VR の観点からは人間の周りに別の空間ができあがると考え, テレイグジスタンスの観点からは人間が別の空間に移動したと考えるが, 本質的には両者は同一の概念であるといわれている [5] .

テレイグジスタンスは, 大きく,

- 実世界へのテレイグジスタンス
- 仮想世界へのテレイグジスタンス

に分けられる. 実世界へのテレイグジスタンスは, ロボットを媒体として, 人間が現在存在しているのとは別に存在する実世界 (Real World) へのテレイグジスタンスであり, 遠隔臨場感覚や遠隔現実 (Tele-Reality) と呼ばれる. 一方, 仮想世界へのテレイグジスタンスとは, コンピュータグラフィックス (Computer Graphics:CG) で作られた, 実際に存在しないが現実感あふれる仮想世界 (Virtual World) へのテレイグジスタンスであり, 狭い意味での VR であるといわれている [6] . 実世界へのテレイグジスタンスは, 宇宙開発の分野などにおいて, 遠隔地のロボットを意のままに制御するという試みとして研究がなされている.

VR を用いた三次元空間共有では, ユーザはコンピュータ上に構築された世界を自由に歩き回ることができる. また, ユーザは他のユーザの姿を CG によって再構成されたアバタ (Avatar) として見ることができ, アバタを介して対話などを行うことができる. VR と三次元空間共有を応用し, 空間情報の共有を可能にすることで, 位置や方向といった空間情報を利用した協調作業を行うことが可能となる.

しかし, 現在提案されている三次元空間共有は狭い意味の VR を用いた空間共有であるため, ユーザはコンピュータ上に作られた空間内に完全に没入してしまい現実空間との接点を失ってしまうという問題がある.

現実空間で起こる問題に対して協調作業を行おうとした場合には, 三次元空間共有に現実世界を取り入れた空間共有を実現する必要がある. すなわち「実世界

への「レイグジスタンス」の実用性を取り入れた三次元空間共有を実現する必要がある。

1.3. VRとMR

VRのリアリティをより高めるアプローチとして、現実世界を取り入れるというアプローチがある。複合現実感 (Mixed Reality:MR)、拡張現実感 (Augmented Reality:AR)、拡張仮想現実 (Augmented Virtuality: AV) と呼ばれる概念である。ARとは、現実世界をベースに、情報を付加することで、現実世界を増強、拡張するものである。AVとは、ARに対置される概念であり、コンピュータ内に構築された仮想世界をベースに、現実世界の情報を用いて仮想世界を補強するものである [7]。MRとは、上述の現実世界 (Real Environment) をベースとしたアプローチ (AR) と、仮想世界 (Virtual Environment) をベースとしたアプローチ (AV) を含む連続体全体を包含する概念である。上述の AR・AVはこの現実と仮想の連続体 (Reality-Virtuality-Continuum) の一部として含まれており、MR技術はこの連続体全体を内包するものであるとされている [7, 8, 9](図 1.1)。

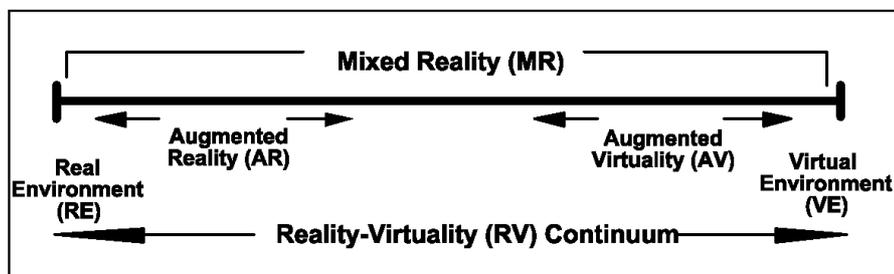


図 1.1 Mixed Reality の俯瞰図 [8]

MRは、広い意味でのVR技術の一部と言われており [9]、現実の情報とCGなどの人工的な情報を融合しようとする技術である。MR技術を用いて三次元空間共有を実現することで、実世界の情報を仮想世界の情報と統合し、現実的な問題に対応可能なシステムが構築できると考えられる。

1.4. VR,MRの視覚情報の提示手法

視覚に限れば，VR,MRで用いられる代表的な提示手法として以下の二つがあげられる．

- 頭部装着型ディスプレイ (Head Mounted Display:HMD)
- 没入型ディスプレイ (Immersive Projection Technology:IPT)

また，MRに用いることが可能なプラットフォームとして，近年研究が盛んになっている

- ウェアラブルコンピュータ

というコンピューティング形態がある．

以下に，それぞれの特徴を述べる．

1.4.1 頭部装着型ディスプレイ

頭部装着型ディスプレイ (HMD) は，ユーザが眼鏡型のディスプレイを装着し，目の前にある小型ディスプレイに映像を描画することで，仮想空間をユーザに提示するものである．HMDは，VRの分野では古くから用いられ，最初のHMDの原型ができたのは1950年代だといわれている [4] ．

HMDは初期のものは巨大で重量が大きいものであったが，年々そのサイズは小型化しており，さらに，ウェアラブルコンピュータの研究が盛んになるにつれ，現在はほとんど眼鏡と変わらないサイズのものが一般の市場に出回るようになった (図 1.2) ．



図 1.2 MicroOptical 社の HMD[10]

HMDには、完全に視界を覆ってしまう遮蔽型のHMDと、ハーフミラーやHMDに取り付けられたカメラを用いて、背後の景色とHMDに入力された映像を同時に見ることが可能な透過型のHMDがある。

MR空間の提示にもVR空間と同様の提示装置が用いられるが、VRで用いられた遮蔽型のHMDではなく透過型のHMDを用いるなど、現実世界と仮想世界とを重畳させて表示させるための工夫が必要である。

また、MRでは特に重要な要素として、現実世界と仮想世界との整合性をとる技術が必要である。この整合性は、幾何学的整合性、光学的整合性、時間的整合性に分けられる。幾何学的整合性とは、現実世界と仮想世界との位置的なずれのことであり、光学的整合性とは、現実世界と仮想世界とのコントラスト、色調、陰影など画質的なずれのことであり、時間的整合性とは、現実世界の変化による仮想世界の変化の遅れによるずれのことであり、これらの整合性をとることは、違和感のないMR空間の構築のために重要である [7]。

1.4.2 没入型ディスプレイ

HMDがユーザの目の前にディスプレイを置くものであるのに対し，没入型ディスプレイ (IPT) は，ユーザの周りを大型のディスプレイ装置で取り囲み，臨場感の高い仮想空間を提示するものである [11, 12] .

もっとも有名な没入型ディスプレイ装置として，1993年にSIGGRAPH'93で発表されたイリノイ大学のCAVEがある [4, 13] . CAVEにおいては，ユーザは正面，床面，側面がディスプレイでできた小部屋に入り，液晶シャッター式のメガネをかけることで，立体映像を見ることができる．このCAVE型のシステムは，現在では世界中で使われるようになった．近年開発されたCAVE型のシステムとして，スクリーンを5面用いた東京大学のCABINや，スクリーンを6面用いた岐阜VRテクノセンターのCOSMOSがある [14] .

また，多面型スクリーンだけではなく，曲面スクリーンを用いたものとして，ソリッドレイ研究所で開発された曲面スクリーンを用いた没入型ディスプレイ (図 1.3) など，様々な形のスクリーンが存在する．

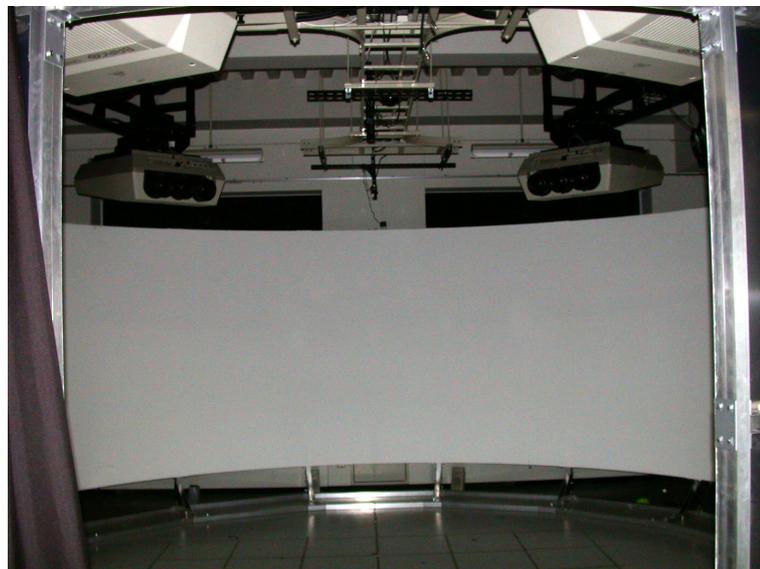


図 1.3 ソリッドレイ研究所で開発された曲面スクリーン

1.4.3 ウェアラブルコンピュータ

ウェアラブルコンピュータとは、コンピュータを衣服のように常時体に身に付けるという、近年研究が盛んになった概念である。

AR や MR といった現実空間をベースにした情報の提示には、ウェアラブルコンピュータが今後有望なプラットフォームになると考えられる。例えば、ナビゲーションにおけるアノテーションの表示などにウェアラブルコンピュータを用いる研究 [15] や、作業支援のインストラクションにウェアラブルコンピュータを用いる研究 [16] がある。

ウェアラブルコンピュータ発祥の地と言われる MIT メディアラボの研究グループによれば、ウェアラブルコンピュータは以下のような特徴を持つものであるとされている [17, 18]。

- 使用中に持ち運びが可能 (Portable while operational)
歩行中や移動中でも用いることができる。
- ハンズフリーで使用できる (Hands-free use)
ユーザの手によるタイピングを極力少なくするようなユーザインタフェースを備える。
- センサを持つ (Sensors)
物理環境を知覚する機能を持つ。また、コミュニケーション機能を備える。
- 能動的である (Attention-getting)
ユーザが意識していなくても情報をユーザに伝えることができる。
- 常に動作している (Always on)
意図的に電源を入れなくてもよい。

現在販売されているウェアラブルコンピュータは、上の特徴を完全には満たしていない。しかし、実現すれば、ウェアラブルコンピュータは“いつでもどこでも”三次元空間共有を行うための理想的なプラットフォームになり得ると考えられる。

1.5. 協調作業支援

コンピュータを用いて人間の協調作業を支援する CSCW(Computer Supported Collaborative Work) という研究分野がある。CSCW の CS は「コンピュータ支援」、CW は「協調活動」という意味であり、コンピュータや通信などの工学的な視点 (CS) と、人間・社会・仕事などの人類学、社会心理学、認知心理学からの視点 (CW) という二つの側面を持つ。

CSCW の工学的な視点から生まれたシステムは「グループウェア」と呼ばれ、「グループウェア」はグループワークを支援するために設計されたアプリケーションシステム群であり、狭義にはグループワークを支援するコンピュータソフトウェア、広義にはハードウェアや通信システムまでを含んでいるといわれている [19]。

本研究の目的とするシステムもグループワークを対象とするものであり、CSCW の観点からはグループウェアに含まれる。

1.6. 三次元空間共有と協調作業の可能性

三次元空間共有を用いることによって、これまでの音声、画像、文字だけでは遂行が困難な、空間的な情報を用いた作業を行うことが可能となる。また、VR(テレプレゼンス) 技術によって、あたかもその場にいるような感覚をユーザに与えることができる。

例えば、VR 空間内に構築された教室で、遠隔地にいる教師が学生と授業を行ったり、本物のショッピングモール内で商品を見ているかのように、VR 空間内に構築されたショッピングモール内で買い物をするといったことが可能になる。また、冒頭で述べた、地球の裏側の人間と何かの作業を行うといった場合でも、ユーザは VR 空間内に作業現場を作りその中で一緒に作業を行うといったことが可能となる。

さらに一歩進んで、MR 技術を用いることで現実空間の情報を取り入れた空間共有が可能となる。この MR 技術を用いた空間共有によって、ユーザは協調作業中に現実空間の情報を取り入れることができるようになり、より現実的な空間共有・協調作業が行えるようになると考えられる。

また，ウェアラブルコンピュータというプラットフォームを用いることで，“いつでもどこでも”遠隔地の人と協調作業が行える環境が実現すると考えられる．現在までに，ウェアラブルコンピュータと没入型ディスプレイ装置を用いてMR空間を共有するというシステムは実現されていないが，本研究で提案するウェアラブルコンピュータ - 没入型ディスプレイ間におけるMR空間共有システムが実用化されれば，映画や小説に登場するような遠隔地に一瞬で移動できるような装置の代替として用いることができると考えられる．具体的には，没入型ディスプレイ装置の中にユーザが入り，遠隔地にいるウェアラブルコンピュータを装着したユーザとMR空間を共有することで，没入型ディスプレイ装置の中のユーザは，あたかも遠隔地のウェアラブルコンピュータを装着したユーザのいる場所に転送されたかのように感じさせることができる．さらに，遠隔地にいるユーザ同士で自由にコミュニケーションが行え，協調して仮想・現実を問わず様々なオブジェクトに自由にアクセスできるようになると，実際に遠隔地に移動したのと等価な協調作業が実現できると考えられる．

1.7. 本論文の構成

本論文では，まず第2章でこれまでに提案されたVRとMR技術を用いた空間共有の試みを紹介しそれらの比較を行う．第3章では本研究で提案する実空間共有型MRシステムのフレームワークについて定義し，その解説を行い，実空間共有型MRシステムの実現に必要な技術を挙げる．第4章では，実空間共有型MRシステムで必要となる一貫性制御技術として「複製-選択プロトコル」(Duplication-Selection-Protocol:DSP)を提案する．第5章では，実空間共有型MRシステムで必要となる実空間のモデリング手法として「ポンチ3D」(Punch3D)を提案し，適用実験結果についての考察を行う．第6章では実空間共有型MRシステムと要素技術について考察を行い，第7章で本論文をまとめる．

第2章

空間共有の試み

現在までに三次元空間をネットワークにより共有し、コミュニケーションを行うという研究が多く行われてきた。本章では、これらの研究を紹介し、問題点について議論する。

2.1. 分散仮想環境システム

ネットワークを介してCGで構築された三次元空間を共有し、ユーザ同士でコミュニケーションを実現するという試みは古くから行われてきた。この概念は分散仮想環境 (Distributed Virtual Environments : DVE または Networked Virtual Environments : net-VE) と呼ばれ、多くの研究がされている [20]。

DVEの中でも有名なものの一つとして、米陸軍と米国防総省高等研究局 (DARPA) が 1980 年代に共同で開発した SIMNET (SIMulation NETworking)[21](図 2.1) がある。SIMNET は、VR を用いて戦闘時における訓練をシミュレーションできるかを検証するために開発された。SIMNET ではユーザは VR 空間内でヘリや戦車などに乗り込み、戦闘訓練を行うことができる。



図 2.1 SIMNET [22]

カナダのアルバータ大学で 1990 年代初めに開発された MR Toolkit Peer Package [23] は、バーチャルリアリティ環境 (VE) のためツールキットである MR Toolkit をネットワーク対応にするためのパッケージである。このツールキットでは、どれだけインタラクティブ性を損なわず、ネットワークコミュニケーションが可能であるかに重点が置かれた。

上述のもの以外にも、多くの VR 空間共有を実現するためのツールキットが開発されている。その中で有名であるものが、Swedish Institute of Computer Science(SICS) によって開発された、Distributed Interactive Virtual Environment (DIVE) (図 2.2)[24, 25] と Illinois 大学を筆頭とする CAVE Research Network (CAVERN) [26] によって開発された CAVERNsoft[27, 28] である。これらのツールキットを用いて、現在までに教育、医療、工業製品のプロトタイプングといった多くのアプリケーションが作成されている。



図 2.2 DIVE [25]

現在では、株式会社スリーディによって開発された、ユーザが仮想空間を共有し協調作業を行うためのシステムである WORK SHOP[29] や、NRI 野村総合研究所によって開発された仮想空間共有技術を用いた遠隔教育システムである 3D-IES[30] といったシステムなど、様々なシステムが活発に開発されるようになった。また、ウルティマオンライン、ファイナルファンタジー XI といった、MMO (Massive Multiplayer Online) ゲームと呼ばれる形で、DVE システムはより洗練された形で一般の人々の目に触れるようになってきている。

ところで、上述の DVE システムをはじめとする三次元空間共有システムでは、仮想空間や登場するもの全てが CG で表現されており、前もって準備されたものである。そのため、DVE システムは、ユーザが行える作業が前もって用意された仮想空間を用いたシミュレーションやプロトタイプングに限られ、現実の問題の解決のために直接用いることができない。具体的には、“いま、医者が協調作業し現実に病気である患者の治療にあたる” ということは、DVE システムでは実現

第2章 空間共有の試み

できない。

現在提案されている三次元空間共有システムは、コンピュータ内に仮想空間を構築し、ユーザがその仮想空間内に没入し、その中でコミュニケーションを行うというものである。このような三次元空間共有システムは、従来の電話やテレビ電話、テレビ会議システムのように現実にとこった問題に対してすぐに対応するといった用途に用いることはできない。

電話やテレビ電話、テレビ会議システムでは、ユーザは音声や画像による仮想的にコミュニケーション空間をつくり、その中でコミュニケーションを行っていると考えられる(図2.3)。電話やテレビ電話、テレビ会議システムでは、ユーザ自身は現実空間に存在し仮想空間に完全に没入しない。そのためユーザは現実空間で起こるイベントを即座に仮想的なコミュニケーション空間内に取り入れ、コミュニケーションやコラボレーションに用いることができる。

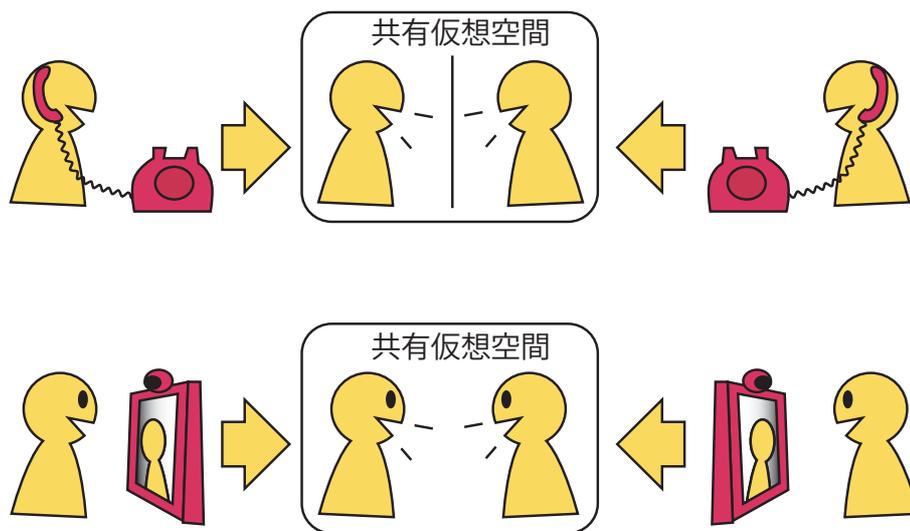


図 2.3 電話とテレビ電話のコミュニケーション形態

一方、三次元空間共有システムでは、ユーザは仮想空間内に完全にアバタとして没入してしまうため、電話やテレビ電話、テレビ会議システムのように、ユーザは現実空間で起こるイベントを取り入れることはできない(図2.4)。

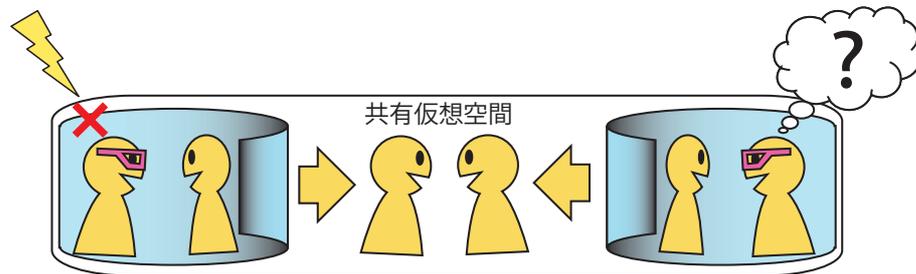


図 2.4 仮想空間共有システムのコミュニケーション形態

つまり，コンピュータ上に仮想空間を構築し，その中でコミュニケーションを行う従来の三次元空間共有システムでは，協調作業の舞台となる空間がコンピュータ上で作られた仮想の空間であり現実の空間ではない．そのため，ユーザが行えることは仮想空間内で対話すること，仮想空間内のオブジェクトを操作することに限られ，作業の合間に今現在ユーザのいる現実世界で起こったイベントに対応することはできない．

2.2. MR を取り入れた空間共有システム

MR を取り入れることで，ユーザは現実空間の情報を取り入れた空間共有を行うことができる．これまで MR を用いて空間共有を実現するシステムがいくつか提案されている．MR を用いて空間共有を実現するシステムには，複数のユーザが同一の場所において空間共有を行うものと，複数のユーザが異なる場所において空間共有を行うものがある．複数のユーザが同一の場所において空間共有を行うシステムは，本研究で目指す遠隔地間における空間共有とは目的が異なるが，比較のために紹介する．

以下に複数のユーザが同一の場所において空間共有を行うシステムを紹介する．

清川らによって提案された VLEGOII[31] は，現実物体であるテーブルの上を作業空間として，二人のユーザが実物のテーブルを挟み一つの MR 空間を共有し，テー

第 2 章 空間共有の試み

ブルの上で CG によって表現された仮想のブロックを二人で協調して組むことができるシステムである (図 2.5) . また , 暦本らによって提案された TransVision[32] は , ユーザが実物体であるテーブルを挟み , そのテーブルの上で CG によって作られたオブジェクトを移動させたり回転させたりすることで観察することができるシステムである . 竹村らによって提案された協調型複合現実環境 [33] では , ユーザが装着した HMD によって失われる表情や視線情報を CG により復元し , 互いに提示することで快適な協調作業の実現を目指している . MR システム研究所で提案された AR² ホッケー [34] は , 二人のユーザが実物体であるホッケー台の上で , 実物体であるマレットを操作し , 仮想物体であるパックを打ち合うという MR 技術を用いた対戦型のゲームである .



図 2.5 VLEGOII [31]

複数のユーザが同一の場所におり空間共有を行うタイプのシステムでは , ユーザは現実空間である協調作業空間を共有でき , 目の前に座っている相手の姿を直接見ることができる .

これらのシステムでは , 全てのユーザには共通の現実空間とユーザごとに生成

2.2. MRを取り入れた空間共有システム

される仮想空間が融合したMR空間が提示される。ユーザは共通の現実空間を協調作業空間として用いることができるため、現実物体と仮想物体との位置関係などを利用した空間的な協調作業を行うことが可能となる。

一方、ユーザが異なる地点にいる場合は、ユーザは共通の現実空間を共有できないため、現実空間の情報を用いた協調作業の実現は難しくなる。

Mark Billinghurstらによって提案された、WearCom[35](図2.6)は、デスクトップPCを用いたユーザと、ウェアラブルコンピュータを用いたユーザとの間でコミュニケーションを行えるシステムである。ウェアラブルコンピュータを装着したユーザは、空中に浮かんだユーザの顔として表現される(図2.6)。



図 2.6 WearCom [35]

また、大型のディスプレイや没入型ディスプレイを用いて遠隔地間で空間共有を行うというシステムが提案されており、ATRの臨場感通信会議システム[36]や、通信放送機構ぎふMVLリサーチセンター・東京大学IMLによるCABIN間通信[37](図2.7)が有名である。臨場感通信会議システムは、複数のユーザが一つの仮想空間に介し、CGのオブジェクト等を操作しながら協調作業が実施できる

第2章 空間共有の試み

システムである。このシステムでは、センサで計測されたユーザの体の動きや表情を、仮想空間のアバタに反映させることができる。CABIN 間通信では、東京大学 IML の CABIN、岐阜 VR テクノセンターの COSMOS、メディア教育開発センターの TEELex といった様々な没入型ディスプレイ間が高速ネットワークで接続され空間共有実験が行われた。このシステムでは、ユーザの姿を実画像のアバタとして仮想空間に取り込みリアリティのある空間共有を実現している。



図 2.7 CABIN 間通信 [37]

また、プロジェクタで壁面の一部に遠隔地の様子を投影し、遠隔地同士でオフィス空間を共有することを目指しているノースカロライナ大学の The Office of the Future [38] という研究がある。このシステムでは、あたかもオフィスの一部が遠隔地のオフィスとつながっているように見せることができ、複数の人間による会議を実現することを目的としている。

WearCom は、作業空間はウェアラブルコンピュータを装着したユーザのいる現実空間であり、遠隔地のデスクトップ PC からこの現実空間を共有することができる。このシステムでは、ユーザは位置情報を交えた対話を行うことができる。

臨場感通信会議や CABIN 間通信では、MR を用いた空間共有を行っているとい

えるが、協調作業の舞台は従来の DVE システムと同様に、コンピュータ上に構築された仮想空間である。そのため、ユーザが操作可能であるものはコンピュータ上に構築された仮想空間に限定される。また、The Office of the Future や WearCom においては、協調作業の舞台は現実空間であるが、行える作業は対話のみに限られている。

コンピュータ内に作られた仮想空間にユーザが完全に没入する DVE システムでは、協調作業空間が仮想空間内で閉じているため、現実の問題に対応することができない。一方、MR を用いた空間共有システムでは、現実空間の情報を取り入れた空間共有が可能である。複数のユーザが同一の場所におり空間を共有するタイプのシステムについては、ユーザが共通の現実空間を共有し、現実空間と仮想空間が融合した MR 空間の中で協調作業を行うことが可能である。しかし、複数のユーザが異なる場所におり空間を共有するタイプのシステムについては、ユーザが行えるのは対話のみで空間的な協調作業は行えないか、協調作業を行えるとしても、コンピュータ上で作られた仮想空間上でのみ行えるにとどまる。そのため、これまで提案されてきたシステムを用いて実現可能なアプリケーションは、前もって用意された仮想空間内においてのシミュレーションやプロトタイピングに限られるか、テレビ会議システムと同様の対話のみの用途に限られてしまう。

つまり、従来のシステムは、本論文で想定しているような、ある現実の地点で発生した現実的な問題を、空間的に分散したユーザが協調して解決するような場合に適用することはできない。

次章では、現実の空間を、異なる場所にいるユーザ間で共有し、ユーザが現実空間に対して操作を行うことも考慮した実空間共有型 MR のフレームワークを提案する。

第3章

実空間共有型MRシステム

MR空間共有の形には、ユーザが同一の場所において空間共有を行うものと、ユーザが異なる場所において空間共有を行うものがあるということを2章では述べた。また、ユーザが異なる場所において空間共有を行うものは、共有できる空間はコンピュータ上に作られたVR空間に限られてしまうという問題があることを述べた。この問題は、遠隔地間でMR空間共有を行う際に、ユーザ同士が遠隔地にいる場合、どちらのユーザ側の現実空間を協調作業空間として用いるかという問題を解決する難しさに起因する。

ユーザ同士が同一の場所にいる場合は、どちらのユーザも共通の現実空間に存在するため、現実空間にある現実物体を移動させたとしても両者に提示される現実空間の一貫性は壊れない。しかし、遠隔地同士で空間を共有する場合、両者は互いに異なる場所にいるため、現実空間にある現実物体を移動させたときには、その移動を遠隔地に伝えなければ双方の空間の一貫性が壊れてしまう。従来の遠隔地間でMR空間共有を行うシステムの多くは、協調作業空間をコンピュータ上に構築された仮想空間の中に作り、ユーザ自身の姿をこの仮想空間に取り込むという形でMR空間共有を実現している。しかし、この方法では、協調作業空間そのものはVR空間であり、上で述べた一貫性が壊れてしまうという問題は発生しないが、従来のDVEシステムのようなコンピュータ上で仮想空間を作る三次元空間共有システムと同様に、シミュレーションかプロトタイピングといった用途にしか用いることができない。

本研究では、現実空間と仮想空間が混在した協調作業空間を一方のユーザ側に構築し、その空間を遠隔地でVR空間を用いて共有するという形のMR空間共有

のフレームワーク，“実空間共有型 MR”を提案する。

本章では，本研究で提案する実空間共有型 MR のフレームワークについて定義し，実空間共有型 MR のありかたについて述べ，必要な要素技術を検討する。

3.1. 実空間共有型 MR の定義

本研究では，没入型ディスプレイ装置をはじめとする VR 空間提示装置とウェアラブルコンピュータをはじめとする MR 空間提示装置を用いて，MR 空間提示装置を装着したユーザ周辺に構築される現実空間と仮想空間が融合した空間 (MR 空間) を，遠隔地の VR 空間提示装置と共有し，協調作業を行うというフレームワークを提案する (図 3.1)。

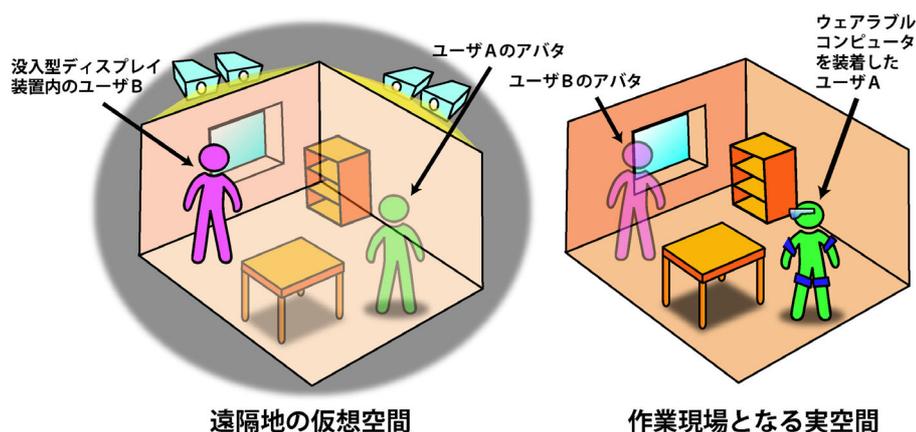


図 3.1 実空間共有型 MR

図 3.1 に提案フレームワークの例を示す。左図は，遠隔地の VR 空間提示装置 (没入型ディスプレイ装置) とその中のユーザを表している。右図は，現実空間とその中のユーザを表している。このように提案フレームワークでは，右図のような現実物体と仮想物体からなる MR 空間を，左図のような別の場所の VR 空間提示装置によって共有し，協調作業を実現する。つまり，MR 空間と VR 空間との間の MR 空間共有を実現する。

3.2. 実空間共有型 MR のありかた

現実世界側にいるユーザ A は、実空間と CG の仮想オブジェクトが合成された MR 空間を見る。一方、VR 空間提示装置側にいるユーザ B は、遠隔地の実空間の映像に CG の仮想オブジェクトが合成された MR 空間を見る。また、ユーザ A とユーザ B は、アバタによって互いの姿を見ることができる。つまり、両者には、同じ MR 空間が提示される。

ユーザ A とユーザ B は、あたかも現場に一緒にいるかのように、仮想のオブジェクトと現実存在するオブジェクトの区別なく操作することができるものとする。

システムの一実装方法を図 3.2 に示す。

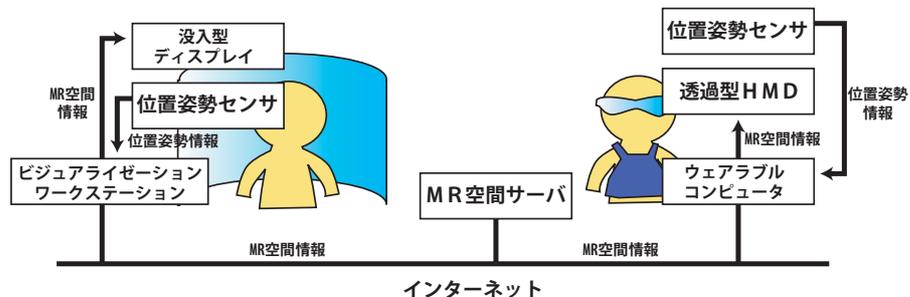


図 3.2 提案フレームワークの一実装方法

3.2. 実空間共有型 MR のありかた

本研究で提案する実空間共有型 MR システムのフレームワークとは、一方は現実世界と仮想世界が混在した空間、他方は遠隔地の現実世界が仮想化された空間と仮想空間が混在した空間という形で遠隔地のユーザ同士が空間を共有するものである。双方に提示される空間は以下のような形となる (図 3.3)。

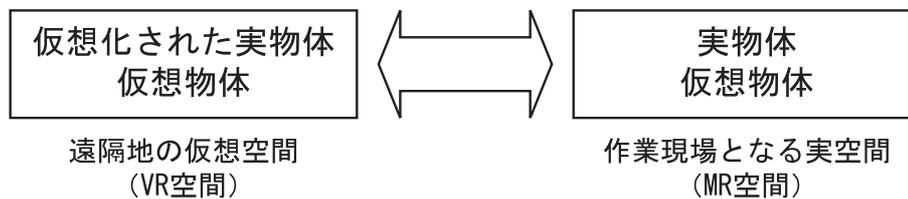


図 3.3 実空間共有型 MR における空間の構成

実空間共有型 MR システムは、一方の空間は現実世界をベースに仮想世界の情報を取り入れた空間、他方の空間は仮想世界をベースに遠隔地の現実世界の情報を取り入れた空間として空間の共有を行うものであり、AR-AV 間での空間共有であると考えられる。この実空間共有型 MR では現実世界に存在する現実物体は遠隔地の仮想化された現実物体に対応し、仮想物体は遠隔地の仮想物体に直接対応する。

MR 空間共有システムには、視覚的なリアリティの向上のために現実世界を単純に協調作業空間の背景として用いるものから、現実世界の変化によって仮想世界の様子を変えることができるものまでいくつかの段階があると考えられる。本研究ではこの段階を、現実世界と仮想世界の融合度として表し、現実世界と仮想世界とがどの程度インタラクションしているかを示す指標として用いた。現実世界と仮想世界の融合度が低いシステムは、現実世界と仮想世界が互いに影響を及ぼさないものを含む。例えば、WearCom では実画像は仮想世界とは切り離されており、実世界と仮想世界が相互にインタラクションすることはできない。現実世界と仮想世界の融合度が低いシステムによって可能となる作業は、プロトタイプングやシミュレーションに限られる。一方、現実世界と仮想世界の融合度が高いシステムは、現実世界の情報を用いて仮想世界を操作するものや、逆に仮想物体を用いて現実の物体を操作するものを含む。例えば AR² ホッケーでは、実物体であるマレットによって仮想物体であるパックを操作するという、現実世界と仮想世界とのインタラクションが可能である。この現実世界と仮想世界との融合度が高いシステムは、より現実的な作業に用いることができる。

また、MR 空間共有システムは、TransVision, VLEGOII のような複数のユー

ザが同一の現実世界におり空間共有を行うものと、WearCom, 臨場感通信会議システムのような複数のユーザが各々遠隔地におり空間共有を行うものに分けられる。複数のユーザが同一の現実世界におり空間共有を行うシステムでは、ユーザは共通の現実世界を共有し、実世界を交えた空間共有を比較的容易に実現することができる、しかし、行える作業は同一の場所で行えるものに限定されてしまう。一方、複数のユーザが各々遠隔地におり空間共有を行うシステムでは、現実世界の様子を計測し、遠隔地に伝え、現実世界と仮想世界との一貫性をとるなどの技術が必要となり、様々な問題を解決する必要があるが、ユーザはどこでも遠隔地間で協調作業を行えるようになる。

図 3.4 に、上記の指標に沿った従来の MR 空間共有システムの分類を示す。

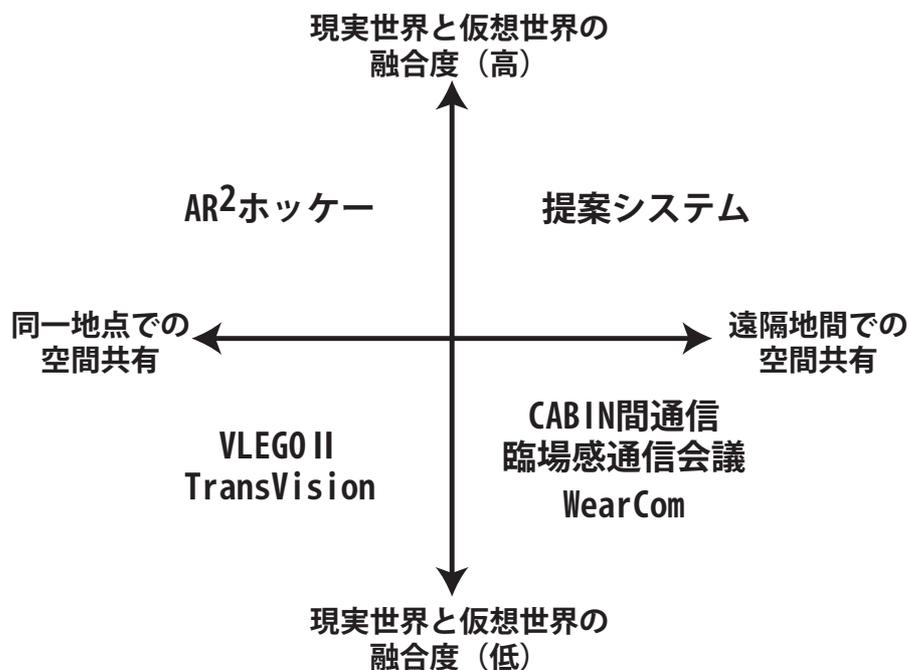


図 3.4 MR 空間共有システムの分類

本研究で提案する実空間共有型 MR システムの位置づけは、遠隔地間における空間共有を実現し、現実世界と仮想世界の融合度が高い空間共有を実現することができるものである。

本研究で提案する実空間共有型 MR システムが実現することによって、様々なアプリケーションが実現可能となる。例えば、雪山などでウェアラブルコンピュータを装着したユーザが遭難者の救助活動を行う場合、遠隔地の基地にある地形や搜索対象地点などの情報と、ウェアラブルコンピュータによる現場の情報を双方のユーザ間で共有することで、現場のユーザはあたかも遠隔地の基地の人間と一緒に搜索しているように作業を行うことができ、より迅速なレスキュー活動が可能になると考えられる。

また、遠隔地で病気になった患者を、現地の医者がウェアラブルコンピュータを装着し治療にあたるといった場合、遠隔地の主治医と空間を共有することで、主治医のみが持つ情報と、現場の状況といった情報を互いに交換でき、より効果的な治療が行えるようになると思われる。

より一般的な使い方として、テレビやビデオといった電化製品のケーブル接続作業に実空間共有型 MR システムを用いることで、遠隔地のユーザは的確に現場のユーザの作業に加わることが可能となる。

3.3. 実空間共有型 MR システムのための構成技術

実空間共有型 MR システムのために必要な構成技術として、次の2つの技術が必要であると考えられる。

- MR 空間関連技術
- プラットフォーム関連技術

MR 空間関連技術とは、現実物体と仮想物体が混在する MR 空間を扱う上で発生する問題に対応するための技術である。MR 空間を遠隔地間で共有する場合、従来の三次元空間共有で用いられた技術に加え、現実物体の存在によって発生する新たな問題を解決する必要がある。

プラットフォーム関連技術とは、本研究で提案する実空間共有型 MR システムのプラットフォームに依存する技術である。実空間共有型 MR システムは、プラットフォームとしてウェアラブルコンピュータ、没入型ディスプレイシステムを想

定しており、これらのプラットフォームを用いることによって発生する問題を解決する必要がある。

3.3.1 MR 空間関連技術

MR 空間関連技術には次の 2 つの技術が含まれる。以下にこの 2 つの技術の概要と、それぞれの技術を取り上げた理由を示す。

- MR のための空間管理技術
- 実空間計測・モデリング技術

複数のユーザ間で空間を共有する際に重要となる要素として空間管理技術がある。空間管理技術は、ネットワークモデル、一貫性制御手法、データベース管理などを含み、複数のユーザ間で情報を共有するために必要な技術である。本研究で提案する実空間共有型 MR システムは、現実的な作業に用いられることを目標にしており、現実空間における物体の操作と同様、試行錯誤を行う際でもユーザに不快感を与えないよう、遅延を抑えたインタラクション性の高い操作感覚を提供する必要がある。さらに、本研究で提案する実空間共有型 MR システムでは、現実物体と仮想物体からなる MR 空間を遠隔地の VR 空間と共有するものである。MR 空間には、現実物体と仮想物体が含まれ、VR 空間には、MR 空間の現実物体が仮想化された物体と仮想物体が含まれる。この空間を管理するためには、従来の仮想物体のみからなる空間管理手法では不十分であり、現実物体の存在も考慮した空間管理技術が必要となる。例えば、VR 空間側に存在する仮想物体には、現場の MR 空間側では現実物体である場合と、現場の MR 空間側でも仮想物体である場合がある。もし VR 空間側の仮想物体が、現場の MR 空間側では現実物体である場合、ユーザが VR 空間側で仮想物体を仮に移動させたとしても対応する現実物体は自動的に移動しない。つまり、VR 空間側と MR 空間側との間で競合状態に陥ってしまい、一貫性が保たれなくなってしまう。この問題を解決するための技術が必要となる。以上のように、インタラクション性の高い操作感覚を提供でき、遠隔地で仮想物体を操作したときに現場の実物体が動かない問題に対応できる空間管理技術「MR のための空間管理技術」が必要となる。

また、実空間共有型 MR システムは従来の三次元空間共有と異なり、コンピュータ上に前もって作られた仮想空間が作業空間となるのではなく、MR 空間側のユーザがいる実空間が作業現場の舞台となる。そのため、協調作業中に実空間の様子を計測・モデリングし遠隔地の VR 空間で再構成する必要がある。また、実空間側のユーザが現場の実物体を操作した場合に、その物体の状態をリアルタイムで計測し遠隔地の仮想物体に伝える必要がある。これらの問題を解決するための技術として「実空間計測・モデリング技術」が必要となる。

3.3.2 プラットフォーム関連技術

プラットフォーム関連技術は多くの技術を含むが、ここではシステムの実現のために特に重要な技術を挙げる、

- MR 空間提示技術
- インタフェース技術
- 位置・姿勢計測技術
- ウェアラブルコンピュータ化技術

MR 空間提示技術として、透過型頭部装着型ディスプレイが多く用いられる。この頭部装着型ディスプレイには、現実空間と仮想空間が重畳されて表示されるが、このとき、現実空間と仮想空間の間の位置的なずれを減らす、時間的遅れを減らす、照明状況を一致させるといったことが重要である。つまり、幾何学的整合性、時間的整合性、光学的整合性がとられた映像を提示する必要がある。また、本研究で提案する実空間共有型 MR システムでは、ウェアラブルコンピュータと没入型ディスプレイシステムという、異なるプラットフォームで同じ空間を提示する。ウェアラブルコンピュータ側のユーザは、透過型頭部装着型ディスプレイによって現実空間と仮想空間が混在した空間を見る。一方、没入型ディスプレイには、遠隔地の MR 空間が VR 空間として提示される。このとき、二つの異なる提示装置を用いた二人のユーザに同じ作業空間にいると感じさせる必要がある。

特に、現実空間中における仮想物体の位置関係は空間的な協調作業では重要な要素となるため、異なるプラットフォームにおける位置関係を正しく再現できることが重要である。

インタフェース技術については、本研究では没入型ディスプレイとウェアラブルコンピュータという異なるプラットフォームを用いているため、それぞれに適した操作方法を提供する必要がある。例えば、家具を室内に配置する場合など、MR 空間において空間的な協調作業を行う際には、家具の位置を指示する必要がある。位置の指示方法についても適切なインタフェースが提供される必要がある。

また、それぞれのプラットフォームにおいて位置や姿勢の計測は重要な要素である。特に、ウェアラブルコンピュータ側においては、いかに拘束感を抑え位置や姿勢の計測を行うかは重要な課題である。ウェアラブルコンピュータを用いていつでもどこでも協調作業を開始できるようにするためには、システムはポータブルである必要がある。つまり、現場に持っていきすぐに作業を開始できる必要がある。

ウェアラブルコンピュータ化技術は、ウェアラブルコンピュータをどのように設計するかに関する技術である。ウェアラブルコンピュータは小型軽量で、ユーザに拘束感を与えないものである必要があるため、積載可能な機能は必然的に限定されてしまう。このような状況で、協調作業を実現する上で必要な機能を選択する必要がある。

本論文では、上述の要素技術のうち、MR 空間関連技術である「MR のための空間管理技術」および「実空間計測・モデリング技術」に対し焦点を当てる。以下に、これらの要素技術の現状について述べる。プラットフォーム関連技術も MR 空間を実現する上で重要であるが、本研究では既存の技術を用いるものとする。

3.3.3 MR のための空間管理技術

MR 空間管理技術とは、ネットワークモデル、プロトコル、空間データベース管理など、遠隔地間で空間データを共有するための仕組みを提供する技術である。DVE の分野では、いかに多くのユーザが空間を共有できるか、また、いかに通信

の遅延を減らすかに重点が置かれている。例えば、通信速度を優先させるためにネットワークプロトコルとして UDP [39] を使う、Dead-Reckoning アルゴリズム (後述) を用いてパケットロスが起こってもすぐに復帰を可能にするなどの試みがある。以下に、SIMNET と、MR Toolkit Peer Package について、具体的な例を紹介する。

SIMNET [20, 21]

SIMNET は、初期に開発されたものにもかかわらず、優れた手法を提案している。

- オブジェクト・イベントベースのネットワークモデル

空間中の全ての物体がイベントをブロードキャストし、物体は自律的にイベントを受信して自分自身の振る舞いを決定する。物体は、その状態が変化したときのみイベントをブロードキャストする。

- Dead-Reckoning アルゴリズム

オブジェクトの現在の状態 (位置・方向など) を前回の状態から外挿・推定することで決定する。本来のオブジェクトの状態と外挿された状態のずれは、そのずれが大きくなる前に新たなイベントを受信することで補正する。SIMNET では、LAN または、リアルタイム通信が可能な WAN をネットワークとして用いることを前提としている。

SIMNET における VR 空間は、(tank や vehicle といった) オブジェクトの集合で表現される。SIMNET はサーバをせず、各々のオブジェクトがネットワークを介して他の全てのオブジェクトと接続されるという完全グラフ形式で接続されている、また、全てのオブジェクトはネットワークにメッセージを配信 (ブロードキャスト) することで他のオブジェクトとインタラクションを行う。SIMNET におけるオブジェクトは、他のオブジェクトからブロードキャストされたイベントを受け取り、自律的に状態を変化させる。SIMNET はサーバを用いないため、何らかのエラーが起こった場合でも、システムのダウンは発生しない。

SIMNET では、オブジェクトの状態の変化は即座にネットワーク上の全てのオブジェクトに配信される。そのため、ユーザの数が増えると、ネットワークや CPU の負荷を高めてしまい、快適なシミュレーションが行えなくなってしまう。この問題を解決するために、SIMNET では、objects and ghosts パラダイムが考案された。これは、各システムが全てのオブジェクトのコピー (ghost) を持ち、その ghost の現在の状態パラメータ (位置と方向、速度) を、最後に報告されたメッセージから Dead-Reckoning アルゴリズムによって推定するというものである。この概念によって、自分のオブジェクトの状態パラメータが他のオブジェクトにとって推定できる場合のみメッセージを送ればよくなるため、通信量を減らすことができる。

また、Dead-Reckoning アルゴリズムによって、更新メッセージから推定されたパラメータを補正することで通信量を減らし、かつ大きな一貫性の破綻も防いでいる。しかし、更新メッセージの間隔があまりに広い場合や、オブジェクトの速度が速い場合、オブジェクトが瞬時に別の場所に移動してしまうという現象が起こる。

MR Toolkit Peer Package [23]

本来の MR Toolkit は、頭部装着型ディスプレイ (Head Mounted Display:HMD) を用いて VR 空間内中でのリアルタイムインタラクションを実現するために開発されたツールキットである。MR Toolkit Peer Package は、MR Toolkit を拡張し、異なるホスト間で MR Toolkit のプロセス間の通信を可能する拡張パッケージである。

SIMNET と同じく、MR Toolkit Peer Package ではサーバとなるものは存在せず、全てのホスト (Peer) は完全グラフ形式で接続され、全ての Peer は他の全ての Peer にユニキャストで UDP メッセージを送信することで互いの状態の更新を行う。MR Toolkit Peer Package では、ローカルエリアでの通信では、パケットロスの問題や、パケットの順序が逆転してしまう問題はあまり起こらないとし、UDP を採用している。

MR Toolkit Peer Package の開発過程では、デモアプリケーションとしてハン

ドボールゲームが作成され、これを用いた実験が行われた。遅延の大きい場合の実験では、手にボールが当たったにもかかわらず、一貫性が保持できず、ミスしてしまうという現象が起こると述べられている。また、UDP のパケット到着時間の変動によって、ボールの動きがぎくしゃくしてしまうことが述べられている [23]。

このハンドボールアプリケーションでは、UDP を用いてシミュレーションのオーナーシップをラウンドロビン形式で次々と変更しているが、実験では、オーナーシップメッセージのパケットをロストしてしまったためにプログラムがデッドロックに陥ったと述べられている。

DVE システムのように、複数の操作者がある資源を同時操作する可能性がある場合、その資源は管理されなくてはならない。具体的には、複数の操作者が一つの資源に同時にアクセスした場合、データが予期しない結果になるのを防ぐため、同期を取る必要がある。分散環境における資源管理は、分散ファイルシステム、データベースなどでも用いられる重要な技術である。[40, 41]

空間共有アプリケーションにおいて、ネットワーク上に存在するホストが各々、対象とする空間のコピーを持つことは、クライアントがサーバのファイルのコピーを持つ分散ファイルシステムと同じ一貫性の問題が発生する。

空間共有システムで用いられる手法は、大きくロックを用いる方法とロックを用いない手法とに分けることができる。多くの空間共有システムは、インタラクティブ性を重要視しており、ロックを用いない手法を採用している。

第4章では、本研究で提案する、クライアント - サーバモデルとロックを用いない一貫性制御に基づく MR 空間にも適用可能な一貫性制御手法「Duplication-Selection-Protocol(DSP)」について述べる。

3.3.4 実空間計測・モデリング技術

実空間計測技術とは、屋内環境のモデリングや、実環境の変化の計測など、実空間の様子を計測する技術である。

空間を三次元でモデリングする技術は、コンピュータビジョンの分野では古く

から行われており [42]，イメージに基づく手法とモデルに基づく手法の二種類がある．

イメージに基づく手法は，あらかじめ必要となる画像を蓄積しておき，提示時に適切な画像を選択して表示する，“見た目”を重視した手法である [43]．イメージに基づく手法では，あらかじめ必要な画像を撮影しておく必要があるため，対象が動的に変化するようなオブジェクトに対応することは難しい．また，使用時に必要となる全ての視点からの画像を撮影し蓄積しておく必要があるため，データ量が膨大なものになってしまうという問題がある．

モデルに基づく手法は，対象を三次元計測し，三次元モデルを生成する手法である．三次元モデルを生成する手法には以下のようなものがある．

- ステレオ視による三角測量によって距離を測る手法

複数のカメラを用いるか，または，カメラを移動させて複数の地点から撮影した画像列から三角測量によって，対象までの距離を測る．この手法を用いたもので全方位を計測できるシステムはいくつか提案されている [44]．

- レーザなどを用いて対象までの距離を測る手法

レーザなどを対象に放射して，光の反射してくるまでの時間を計る，または，光が照射された部分を別方向からカメラなどで撮影し，三角測量を用いて距離を測る．この方式で計測を行うものとして，ミノルタの Vivid[45] が有名である．また，空間を三次元のメッシュ情報として取得できるトータルステーション [46] や，空間を高精度でモデリング可能なレーザー 3D スキャナー装置 [47] も近年登場している．

モデルに基づく手法では，隠蔽によって計測できなかった部分をどのように補間するのが問題となる．また，精密にモデルを計測しようとするとき，頂点数が増加してデータ量が膨大になり，計測に時間がかかってしまうという問題が発生する．例えば，現在販売されている装置を用いると正確で緻密なモデルを生成することができるが，計測に時間がかかりデータが膨大な量になるため，リアルタイムで取り扱うことが難しくなってしまう．

第3章 実空間共有型 MR システム

本研究では、いつでもどこでも協調作業を行える環境の構築を目指している。本研究で必要な空間計測技術に求められる要件として次のものが重要であると考えられる。

- 対象空間の“臨場感”を再現可能

対象空間の“臨場感”とは、ユーザがあたかも対象空間にいると感じることである。“臨場感”を再現するための情報として、対象空間の広さと現時点での様子が必要である。また、空間的な協調作業を行うためには、一部分の精密な形状ではなく、対象空間全体の大まかな特徴を計測できることが必要である。

- リアルタイムでデータを伝送・再構築可能

いつでもどこでも協調作業を行うためには、現在の対象空間の臨場感を遠隔地にリアルタイムで伝える必要がある。そのためには、素早く空間を計測でき、簡素な形で空間を表現できることが必要である。

上の要件から、本研究では、協調作業のために必要な空間計測技術として、モデルに基づく手法とイメージに基づく手法を組み合わせ、作業現場となる実空間の特徴を捉え、簡素なモデルを生成できる手法が必要であると考えられる。

第5章では、本研究で提案する三次元モデリング手法「ポンチ 3D(Punch3D)」について述べる

第4章

MRのための空間管理手法

MR空間共有におけるMR空間には実物体と仮想物体が存在する。そのため、従来の仮想物体のみを扱うVR空間共有とは異なり、実物体を考慮した空間の記述方法や、物体へのアクセス方法が必要となる。また、MR空間共有においても従来のDVEシステムと同様、ユーザからのオブジェクトへのアクセスが快適に行えるインタラクション性が重要である。

本章では、空間共有における一貫性制御に着目し、複数のユーザによるオブジェクトへのアクセスが快適に行え、かつ、実物体と仮想物体が混在したMR空間を管理できる空間管理手法を提案する。

4.1. 一貫性制御

空間を共有する場合、ホスト間でどのように空間を管理するのは重要な問題である [48]。中でも、複数の空間の間でのデータの一貫性を維持するための方法である一貫性制御の問題は、最も重要な問題の一つである。たとえば、一方のホストを利用している参加者が空間に何か操作を加えた場合、その操作は即座に他の参加者にも反映される必要がある。しかし、一貫性が確保されていなければ、一方の参加者の操作が他の参加者に正しく伝わらず、協調作業が成り立たない。

一貫性制御は、分散システムにおける分散ファイルシステムにおいて、いかに効率よく安全に共有されたリソースにアクセスを行うかという問題として研究されている。分散システムにおける一貫性制御手法では、一システムがある資源にアクセスする際に、他のシステムがその資源にアクセスできないようにロックを

かける手法が多く用いられる。この一貫性制御手法は多くのシステムにも応用可能であり、DVEシステムでも広く用いられている。

しかし、ロックによって一貫性制御を行う「ロックを用いる手法」では、ユーザがオブジェクトを操作する際、ユーザ側のホストは対象オブジェクトが現在操作中であるかどうかをロック情報の管理をしているホストに問い合わせる必要がある。この問い合わせにはメッセージがサーバまで往復するための待ち時間が必要である。従って、遅延の大きいネットワークを介した協調作業においては、この待ち時間によって全体の操作性が悪化してしまい、インタラクティブ性が悪くなるという問題がある。また、あるユーザがオブジェクトをロックしている間は、他のユーザはそのオブジェクトを操作できないという問題がある..

ロックによる一貫性制御より厳密さを弱めた手法として、オブジェクト操作を単純に受理し、競合が起きた場合にはその競合を後で補正することで一貫性を保持する「ロックを用いない手法」がある。「ロックを用いない手法」ではロックのための待ちを発生させないため、よりインタラクティブ性を高めることができるという利点があり、DVEシステムでも多く用いられている [24, 25, 26, 49]。しかし、複数のユーザが同じオブジェクトを同時に操作した場合、競合によりオブジェクトの奪い合いが起こり、オブジェクトが二人のユーザの操作を交互に反映することによるジャンプ現象が起きることが報告されている [26]。

一貫性制御手法には厳密さと速度の間にトレードオフの関係があり、厳密に一貫性を保持しようとすると同期にかかる時間が増え、パフォーマンスを改善するためには厳密さを弱めなければならない。

従来の一貫性制御手法は、いずれも最終的には一人の参加者の操作のみを受理し、他の参加者の操作は無視するという考えに基づいて設計されており、操作が無視された参加者に不快感を与えてしまうという問題がある (図 4.1 左)。

ネットワークの遅延が大きい遠隔地間で空間を共有する場合、通信遅延による操作性の悪化と、複数のユーザが同時に同じオブジェクトを操作した場合などに起こる、一貫性の破綻の問題は避けることができない。複数のユーザが頻繁にオブジェクトを操作するようなアプリケーションを実現する場合には、特にユーザ

に不快感を与えないようこれらの問題は解決されなければならない。

たとえば共同でインテリアデザインを遠隔地間で行おうとした場合、ユーザは頻繁に試行錯誤を行い、最適な家具の配置を決定する。この場合、ネットワークの遅延やユーザ間の操作の競合はシステムの操作性を悪化させ、その結果ユーザの感性を阻害しデザインに影響を与える恐れがある。

これまで提案されている空間共有システムは、コミュニケーションを中心とする用途に応用することを目的としており、デザイン作業における試行錯誤など、複数のユーザによるオブジェクト操作が頻繁、かつ、同時に発生する作業に適しているとはいえない。上で述べた問題を解決するために、本章では新しい一貫性制御手法である「複製 選択プロトコル (Duplication-Selection-Protocol:DSP)」を提案する。

4.2. 複製 - 選択プロトコルの概要

「複製 - 選択プロトコル」における一貫性制御では、複数の参加者から同じオブジェクトへの操作があり競合が発生すると、そのオブジェクトは複製され、それぞれ二人の参加者の要求した場所に提示される。参加者達は複製されたオブジェクトを参考に、話し合いによってどちらの操作が良いか議論し、一方を消すかまたは両方残すかを選択することで競合を解決する (図 4.1 右)。

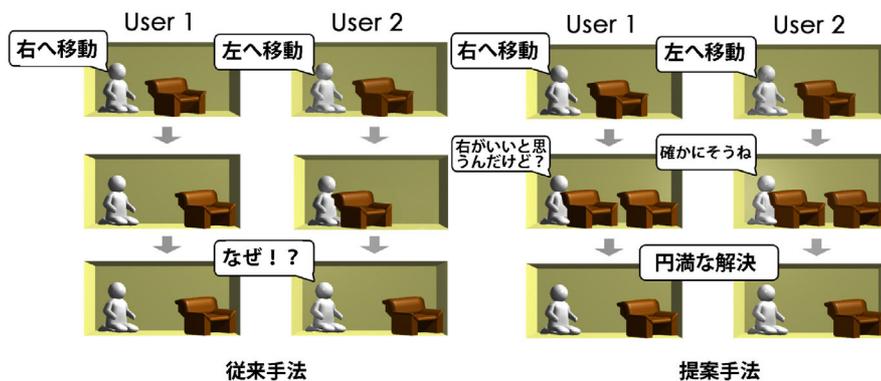


図 4.1 従来の一貫性制御手法と「複製 - 選択プロトコル」

競合時のオブジェクトの「複製」と、話し合いによる「選択」を取り入れることで、すべての参加者は、自らの操作が無視されることなく快適な操作を行える。また、ユーザの操作に対してロックを用いないため、ネットワークによる遅延による問題を解消できる。さらに提案プロトコルは、遠隔地から操作することができない実オブジェクトを操作する際も、「複製」により現実世界に仮想のオブジェクトを複製し追加することで矛盾を解消する。

次節では、まず、提案プロトコルで前提とするデータ構造である、オブジェクトの木構造について述べる。次に、ユーザアプリケーションによる木構造への操作がどのようにネットワークを介して伝送されるか、および、一貫性の保持がどのようにして行われているかについて述べる。

4.3. 複製 - 選択プロトコルの実装

4.3.1 空間の表現形式

「複製 選択プロトコル」は、TCP/IP のような順序とデータの正当性が保障されるネットワークでの利用を前提とする。また、本プロトコルは、クライアント - サーバモデルを採用する [39]。

本プロトコルでは、サーバ上の空間データをネットワークで接続された複数のクライアント間で共有する。空間データは木構造で表現され、クライアントは、サーバの木構造のコピーを持つ。クライアントが自身のノードを更新した後、サーバへメッセージを送ることで、サーバのノードが更新される。以下に、本プロトコルの構成要素であるノードとオブジェクトについて述べる。

本章ではノードという用語を、木構造の各ノードという意味で用いる。また、オブジェクトという用語を 3D 形状オブジェクトの意味で用いる。

ノード

木構造中の各ノードは、ノード識別のためのノード ID、オブジェクトの見え方に関連する、オブジェクト形状名、位置、姿勢などの情報、一貫性制御のために用いられるバージョン番号（論理時計）、および、最終更新者名を持つ。また、そのオブジェクトが現実オブジェクトに対応づけられているかどうかを表すための現実オブジェクトフラグを持つ（図 4.2）。ユーザはオブジェクトの見え方に関連する情報のみを変更することができる

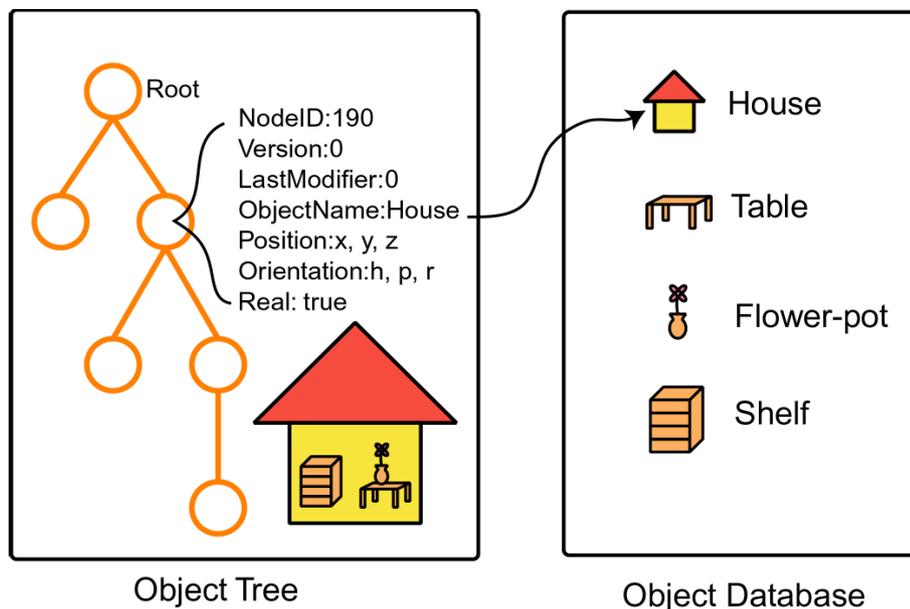


図 4.2 空間の表現

ノード ID は、ユーザアプリケーションがオブジェクトを操作する際に、ノードを識別するために用いられ、サーバ内、またはクライアント内で常に一意である。

位置と姿勢は、上位ノードからの相対座標と相対角度で与えられる。ノードが参加者またはネットワークを介した他の参加者によって操作されたときには、バージョン番号が増加し、最終更新者名は操作したクライアント名に更新される。バージョン番号と最終更新者名の更新は、操作対象となったノードだけでなく、そのノードと、そのノードのすべての子、およびそのノードからルートノードまでのパス上のすべてのノードについて行われる。

図4.3は、参加者 (ClientID=1) が机 (NodeID=192) を操作した場合のバージョン番号と最終更新者名の更新の様子を示したものである。参加者が机に操作を加えると、木構造中の机より下にある花瓶 (NodeID=193) と、上にある家 (NodeID=190) のバージョンが一つ増加される。同時に最終更新者名も操作した操作者である 1 に更新されている。ここで、机より下のオブジェクトについては全てのオブジェクトが更新の対象になるが、机より上のオブジェクトについては、机から木のルー

トまでのパス上のノードのみが更新の対象となる．オブジェクト形状名は，ノードの形状を表す名前である．現実オブジェクトフラグは，現場の参加者にとっては現実のオブジェクトであり，かつ遠隔地からの参加者にとってはCGで表現されるオブジェクトに対しセットされる．

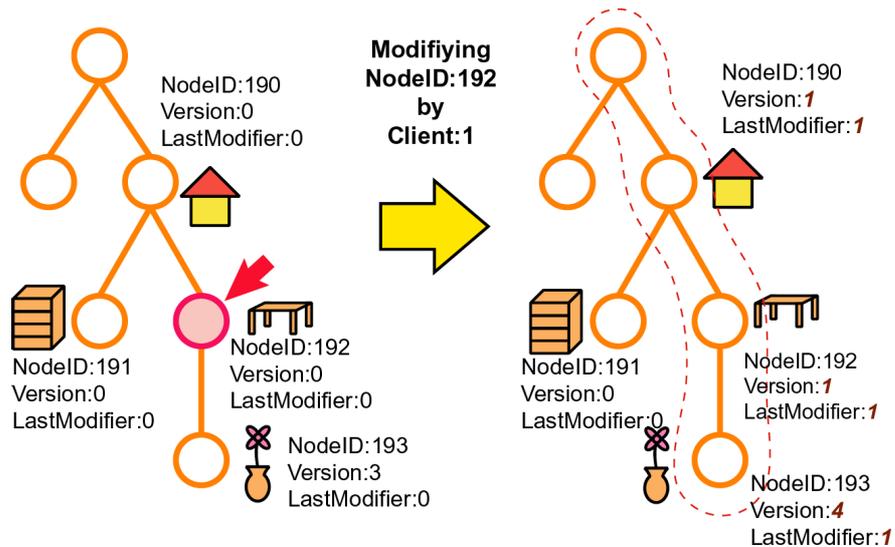


図 4.3 バージョン番号と最終更新者名の更新

オブジェクト

本プロトコルでは，上述の木構造中のノードをオブジェクトのインスタンスを表すために用いており，実際ユーザが目にする幾何学的形状や材質のような外観情報は，別にローカルのディスクなどに保存されているものとする．用いられるすべてのオブジェクトは，オブジェクト形状名（ファイル名など）をキーとするデータベースとして，クライアント，および，サーバ内に保存される．

サーバまたはクライアントがノードを表示する必要があるときには，オブジェクト形状名で実形状をデータベースから取り出し表示する．

4.3.2 通信モデル

提案プロトコルでは，通信の信頼性と順序が保証される環境を前提とし，クライアント - サーバモデルを採用する [39](図 4.4)．クライアントは，サーバの木構造のコピーを持ち，参加者に対してインタフェースを提供する．サーバはマスターとなる木構造の管理と一貫性制御を行う．クライアントとサーバは共に空間に関する現在の情報を木構造として保持する．

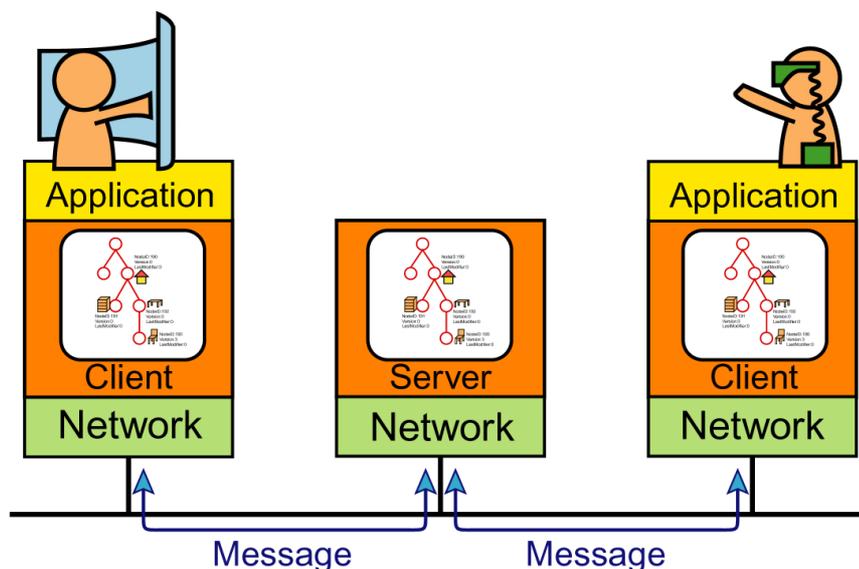


図 4.4 通信モデル

クライアントは，オブジェクトの生成，移動，回転，削除などの操作をユーザに提供する．ユーザがオブジェクトを操作すると，クライアントは自身のノードを更新すると共に，操作の種類，対象ノード ID，操作に必要なパラメータ，前提とするバージョン番号，前提とする最終更新者名などの情報を“操作メッセージ”としてサーバに送信する．

サーバはクライアントの管理，クライアントへの操作メッセージの分配，一貫性制御を行う．サーバがクライアントからの操作メッセージを受け取ると，サーバはその操作を自身のノードに反映し，他のクライアントにその操作メッセージ

を配信する。また、サーバはノード ID 変換テーブルをクライアント毎に持つ。このノード変換テーブルは、サーバがメッセージを送受信する際にノード ID を付け替える (4.3.3 項) ためのもので、一貫性制御によりオブジェクトが複製されたときに更新される。各クライアントはサーバから配信された他のユーザの操作メッセージを受け取ると、その操作メッセージに従い自身のノードを更新する。

4.3.3 一貫性制御

ここでは、本プロトコルがどのようにクライアントからの要求に対し競合を検出し、解決するかについて述べる。

競合の検出

競合を検出するために、クライアントとサーバ間で交換される操作メッセージは、操作対象とするノードの操作前のバージョン番号と最終更新者名を含む。操作メッセージを受け取ったクライアントまたはサーバは、操作メッセージに含まれるバージョン番号と最終更新者名を、自分自身が持つ現在の空間の対応するノードの情報と比較する。操作メッセージに含まれるバージョン番号と最終更新者名をサーバ内の情報と比較することにより、メッセージの最初の送信者がメッセージを送信して以来、そのノードが他のクライアントまたはサーバによって操作されたかどうかを知ることができ、競合を検出できる。また、サーバは操作メッセージを受け取ると、オブジェクトの現実オブジェクトフラグを参照する。操作メッセージに現実オブジェクトフラグがセットされているオブジェクトの場合には、サーバはバージョン番号と最終更新者名に関わらず競合と認識する。この処理により、遠隔地のユーザがオブジェクトを移動させたとしても、そのオブジェクトに対応づけられている現実のオブジェクトと一緒に移動できないという問題を解決できる。

例えば、現場には現実物体である椅子があり、遠隔地にはその椅子が CG によって表現されているとすると、この椅子には現実オブジェクトフラグが設定される。遠隔地の参加者が CG の椅子を移動させたとき、椅子が複製され、現場の

第4章 MRのための空間管理手法

参加者には現実物体である椅子と、遠隔地からの参加者が移動させた結果の椅子が提示されることで、遠隔地の参加者が現実の椅子を動かしたことを知ることができる。

図4.5は、提案プロトコルにおける競合検出の様子である。参加者である Client1 と Client2 が同じ花瓶に対し操作を行ったとき、Client1 および Client2 はサーバに操作前の花瓶のバージョン番号 (Ver=0) と最終更新者名 (Mod=0) を操作メッセージとして送信する。

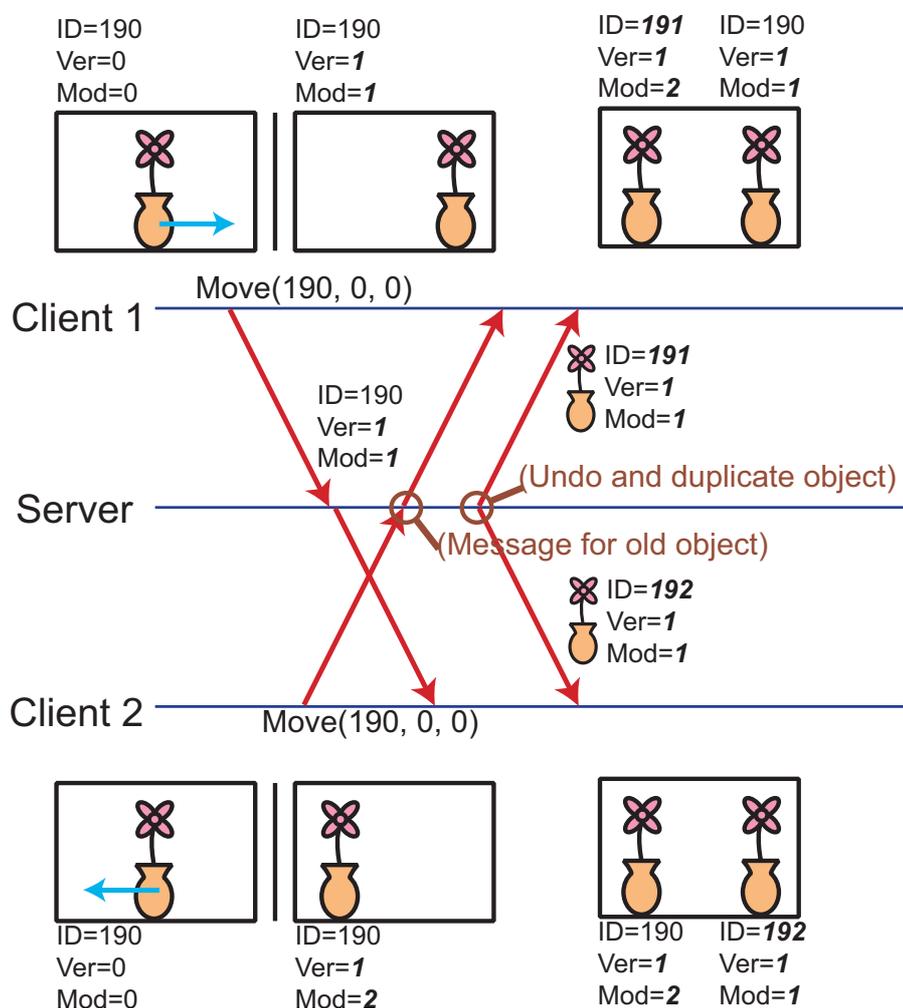


図 4.5 競合の検出とノードの複製

サーバは操作メッセージを到着順 (ここでは Client1 と Client2 の順) に処理するものとする。Client2 の処理の段階で、サーバは Client2 の操作メッセージに含まれるバージョン番号 (Ver=0) と最終更新者名 (Mod=0) が、サーバ内の対応するノードのバージョン (Ver=1) と最終更新者名 (Mod=1) と一致しないことを知り、競合が発生したと認識する。

競合を認識したサーバは、競合した花瓶を次節で示す方法で複製し、Client1 には Client2 の要求した状態の花瓶、Client2 には Client1 の要求した状態の花瓶を生成するための情報を送信する。結果として、Client1 と Client2 には、双方の要求する状態の花瓶両方が出現する。

競合の検出は、サーバとクライアント両方で行われるが、競合が検出されたときに行われる処理はサーバとクライアントで異なる。サーバが競合を検出すると、サーバはノードの複製操作に移行する。一方、クライアントが競合を検出すると、クライアントはその操作メッセージを無効なものとして破棄する。

ノードの複製

サーバ内では木構造への全ての操作の履歴が保存されており、木構造は常に過去の状態に戻す (Undo) ことが可能となっている。サーバが競合を検出すると、木構造中の指定されたノードのメッセージ中のバージョン番号と最終更新者名がそれぞれメッセージ中で指定されたバージョン番号と最終更新者名に一致するまで、空間全体の状態に戻す (Undo)。Undo 操作により、メッセージによって要求されたノードの存在が保証される。

次にサーバはノードを複製する。ノードの複製は操作対象となったノードだけではなく、そのノードとそのノードのすべての子、およびそのノードからルートまでのパス上のすべてのノードに対して行われる (図 4.6)。これは、たとえば現場の参加者側には花瓶が乗ったテーブルがあり、現場の参加者と遠隔地の参加者が同時にテーブルを操作したとき、テーブルだけではなく上に乗る花瓶ごと複製されるようにするためである。そして、複製された全てのノードには新たな ID が設定される。

ノードが複製されると、サーバは複製されたノードについて競合を検出したク

第4章 MRのための空間管理手法

クライアントの要求を実行する。次に、サーバは複製された部分木以外の木構造をUndo 前の状態に戻す。この時点で、複製元と複製先である二つの部分木は、二人のクライアントの要求する状態となる。

ノードの複製が完了し、ノード ID の更新が終了すると、サーバは複製された部分木を各クライアントに送信する。クライアントはこの差分を受け取ると、現在の木に新たに受信した部分を追加する。以上のようにして競合の解決は完了する。

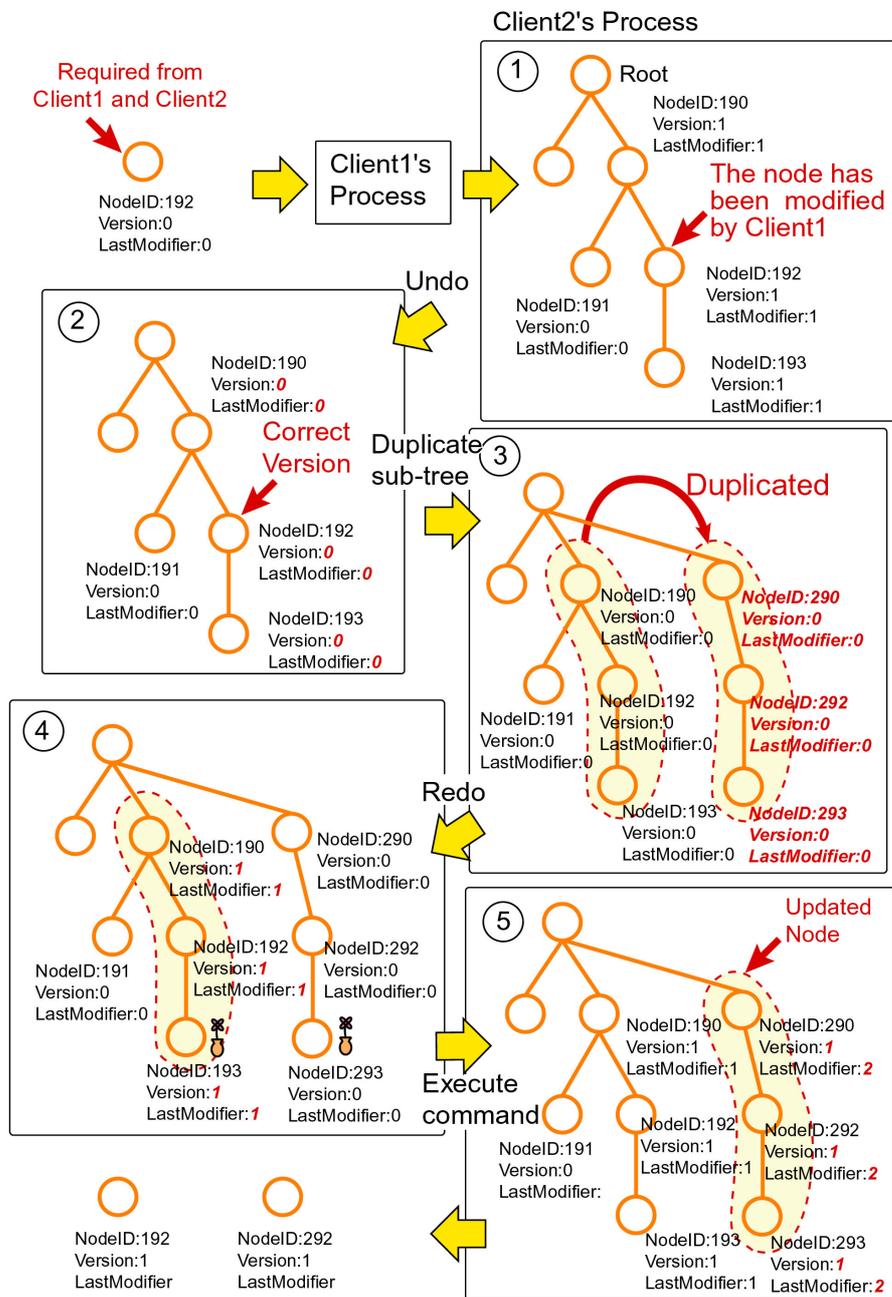


図 4.6 ノードの複製

ノード変換テーブル

ノードが複製される時、複製されるノードには、新しい番号が割り当てられる。これは、木構造内のノード ID の一貫性を保つために必要な処理であるが、この処理によって、一方のクライアントにとっては操作中のノード ID が複製によって変化してしまうことになる。従って、ノード複製後は、両方のクライアントからのオリジナルのノード ID をサーバ内の各クライアントに対応する複製後のノード ID に読み替える必要がある。たとえば図 4.7 に示すように、ノードの複製が行われ、その結果 2 つの机が出現したとき、Client1 にとっては左の机のノード ID が 190 として、Client2 にとっては右の机の ID が 190 として見える必要がある。

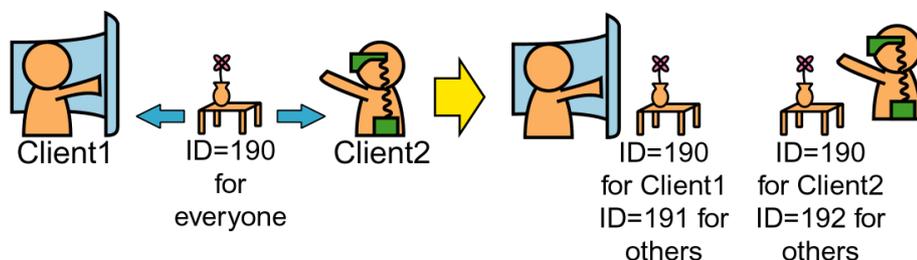


図 4.7 ノード ID の変換

複製前のノード ID をクライアントごとに違うノード ID に読み替えられるようにするために、提案プロトコルでは、サーバにノード ID 変換テーブルをクライアントの数だけ持たせている。サーバはクライアントからのノード ID を受け取ったとき、そのクライアントに対応するノード ID 変換テーブルを参照し、ノード ID を変換する。サーバがクライアントにノード ID を送信する際には同様にノード ID を逆変換する (図 4.8) 。

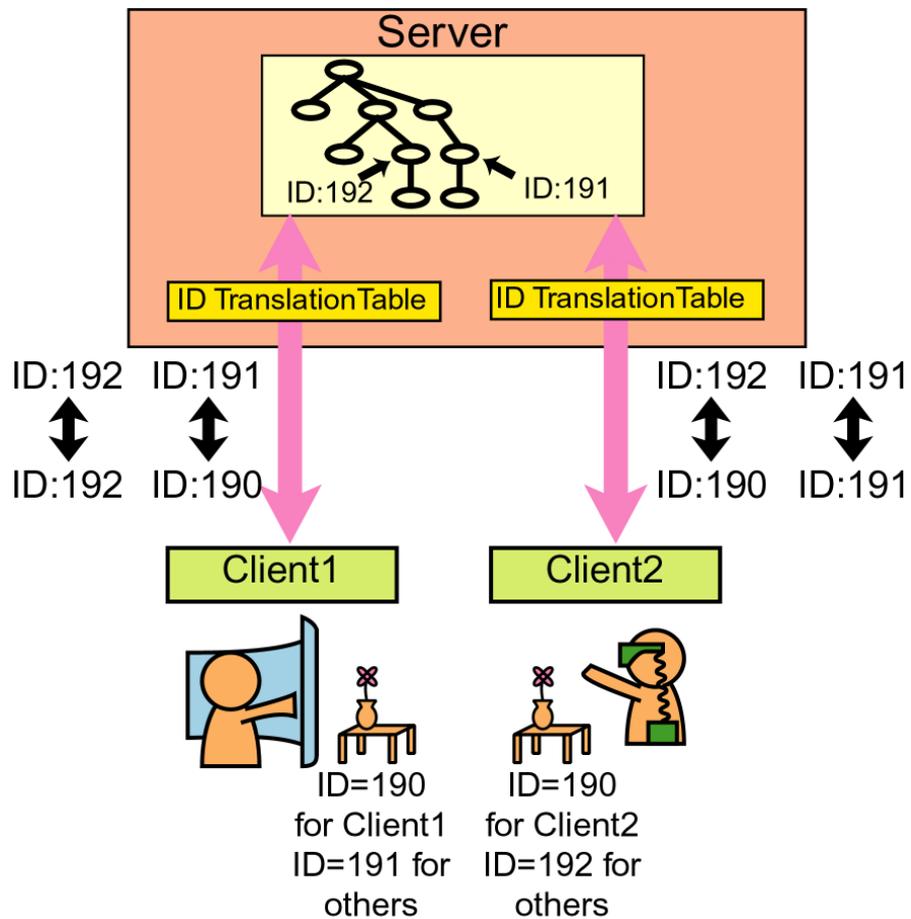


図 4.8 ノード ID 変換テーブルの実装例

4.4. 複製 - 選択プロトコルの評価実験

本節では，提案プロトコルの評価として，以下の二つの実験を行う．

- 通信量評価
- 操作性評価

また，二つの没入型ディスプレイ装置間および，没入型ディスプレイ装置とウェアラブルコンピュータを用いた，

- 空間共有実験

について紹介する．

通信量評価では，提案プロトコルを用いたときの通信量を，従来の一貫性制御を用いるプロトコルと論理的に比較する．操作性評価では，提案プロトコルの評価のために作成した協調インテリアデザインシステムを用いて与えられたタスクをユーザに行ってもらい，その作業をもとに主観的に評価する．

4.4.1 通信量評価

ここでは「二人でのデザイン作業において競合が起こったと仮定し，それが解決されるまでに必要な通信量の違い」について評価する．評価は，従来手法と提案手法を用いた場合に送受信されるデータ量を論理的に比較することで行う．

4.4.2 メッセージ量の論理的比較

ひとつのオブジェクトに対して違う意見を持った二人のユーザが，議論の結果そのオブジェクトの配置を決定するというタスクを行った場合に，最も議論が円滑に進んだときの最終的な意思決定までに必要となる通信量を比較する．比較は「常に後の操作メッセージが受理される」従来の一貫性制御手法と提案手法について行う．

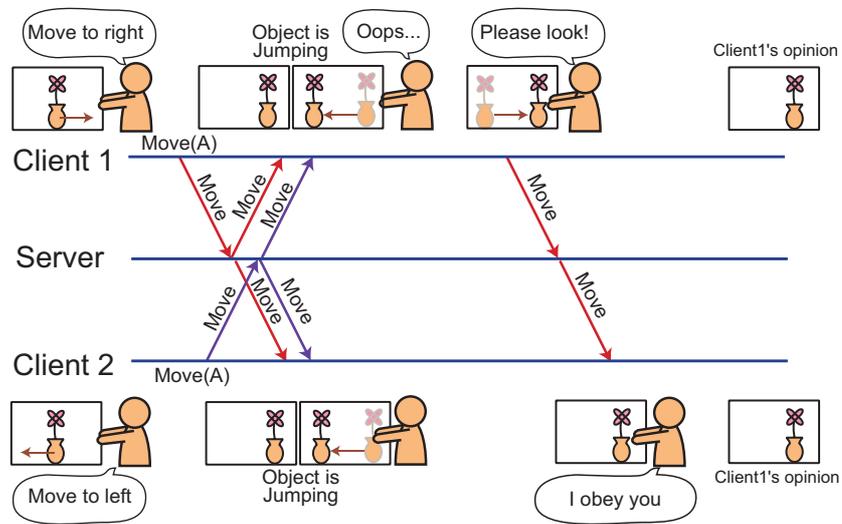


図 4.9 従来手法を用いた作業例

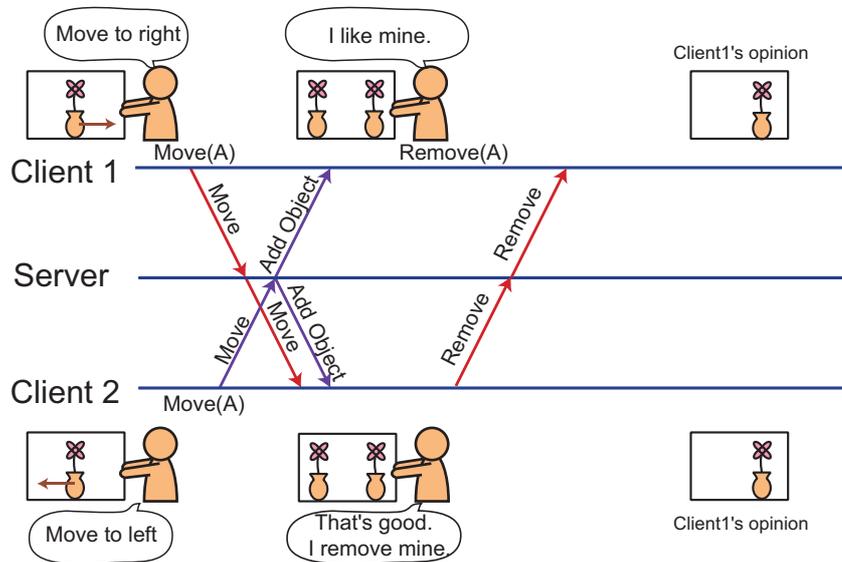


図 4.10 提案手法を用いた作業例

図 4.9 , 図 4.10 中の矢印はメッセージを表し , 矢印に併記されているラベルは ,

第4章 MRのための空間管理手法

クライアントとサーバ間で交換されるメッセージの種類を表す。Move, Removeはユーザからの要求によって送信されるメッセージである。Move(A)は、オブジェクト A へのユーザからの移動要求を表す。さらに提案手法では、これらの他にオブジェクト生成を要求するための、Add Object メッセージがある。各手法において送受信されるメッセージは、対象となる処理のために最低限必要となる表 4.1 のような情報を持つものと仮定する。

表 4.1 メッセージ定義

	従来手法		提案手法			
	Move		Move	Add Object	Remove	
	1		1	1	1	コマンド名
	1		1	1	1	ノードID
	3		3	3		位置
			1	1	1	バージョン番号
			1	1	1	最終更新者
				1		挿入先ノードID
				1		現実オブジェクトフラグ
	5		7	9	4	合計

送受信されるメッセージ数については、図 4.9, 図 4.10 より、従来手法では 8 回、提案手法では 7 回発生している。作業全体で送受信されるデータ量は、遅延一貫性制御では 40words, 提案手法では 47words となっており、提案手法ではメッセージ数は少なくなるが、送受信されるデータ量が多くなる。

4.4.3 操作性評価

操作性評価では、実験システムを用いて以下の二点について検証する。情報科学研究科の学生 5 組 10 名の参加者にインテリアデザインを行ってもらい、付録

A に示すアンケートにより操作性を評価した。

- 競合が発生したときに，その競合を話し合いによって解決するという方法が，従来の一貫性制御手法を用いた方法と比べて円滑な協調作業を可能にするかどうか
- 一方の参加者が MR 空間，他方が VR 空間であると想定したとき，遠隔地のユーザによる現場のオブジェクトに対する操作をオブジェクトの複製によって可能にすることで，参加者は違和感なくオブジェクト操作を行えるかどうか

学習効果を緩和するため，実験に先立って参加者に数分間システムを使用してもらい，操作に習熟してもらった．実験中参加者は音声による対話を自由に行うことができるものとした．

4.4.4 実験システム

提案プロトコルの評価用システムとして，図 4.11 に示す協調インテリアデザインシステムを作成した．

本章における評価用システムでは，現実空間はあらかじめ三次元モデリングソフトウェアによって手作業でモデル化されたものを用いた．



図 4.11 実験システム

第4章 MRのための空間管理手法

本協調インテリアデザインシステムでは、ユーザは通常のディスプレイ上で家具を追加、移動、回転させ部屋のインテリアデザインを行うことができる。また、ユーザは空間内を自由に動き回ることができ、他のユーザは別のユーザをアバターとして認識できる。

実験は、インテリアデザインシステム本体動作として3台（クライアント2台、サーバ1台）のPC/AT 互換機、音声通信用には2台のSGI社のO2ワークステーション上で行った。2台のクライアントPC、サーバ、音声通信用のO2はEthernetで接続されている。クライアント用PC、サーバ用PC、音声通信用ワークステーションのスペックをそれぞれ表4.2、表4.3、表4.4に示す。

また、実際の運用を想定し遅延のある環境を再現するため、インテリアデザインシステムのクライアントとサーバのデータ送信部に2秒分のバッファを設け、全ての操作に約2秒の遅延が生じるように設定した。なお、音声の遅延は設けないものとした。

表 4.2 クライアント用PCのスペック

CPU	AMD Duron 600MHz
Memory	128MB
Graphics	nVIDIA GeForce2MX

表 4.3 サーバ用PCのスペック

CPU	Intel PentiumII 300MHz
Memory	128MB
Graphics	nVIDIA GeForce2MX

表 4.4 音声通信用 WS のスペック

CPU	MIPS R5000 180MHz
Memory	96MB

4.4.5 操作性評価実験

従来プロトコルを用いた場合

参加者は互いに議論しながら図 4.12 の配置からテレビを最適だと思える位置まで移動させる。このタスクでは従来プロトコルとして、操作が競合した場合には一方の操作のみが受理されるプロトコルを用いたときの操作性を評価する。



図 4.12 タスク 1 における初期状態

提案プロトコルを用いた場合

参加者は図4.12の配置からテレビを最適だと思う位置まで移動させる。このタスクでは、提案プロトコルを用いた場合における操作性を評価する。この実験において、従来プロトコルと提案プロトコルで異なる配置をユーザに与えたのは、同一のユーザに対し、従来プロトコルと提案プロトコルの両方に対する実験を行ってもらう際に起こる、学習効果を抑制するためである。



図 4.13 タスク2における初期状態

現実物体の操作性評価実験

タスク3では、双方の参加者が現場と遠隔地側にいるものと想定し、参加者は現実空間を想定した図4.14に示す配置から、仮想のベッドを追加したレイアウトを構築する。このタスクでは、遠隔地からの現実オブジェクトの操作が参加者にとって違和感なく行われるかどうかを評価する。

初期状態(図 4.13)から配置されているオブジェクトは全て現実オブジェクトである。つまり、図中の家具は、現場の参加者にとっては現実オブジェクトであり、遠隔地のユーザにとっては仮想のオブジェクトとなる。参加者は現実と仮想の区別なくオブジェクト移動を試みることができるが、遠隔地側からの現実オブジェクトの操作は、オブジェクト複製によって実現され、実際の現実オブジェクトの移動は、遠隔地側から現実側の参加者に音声で依頼することでなされる。



図 4.14 タスク 3 における初期状態

現場側の参加者には仮想オブジェクトが半透明で提示され、現実オブジェクトとの区別が行えるようにした。遠隔地側の参加者には、現実オブジェクトと仮想オブジェクトは区別できないよう提示した。

4.4.6 実験結果

アンケートの結果を表 4.5 に示す。

表 4.5 アンケート結果

質問	平均	最大値	最小値
タスク 1 相手と意見が食い違ったときにスムーズに解決できましたか (1:できない — 5:できた)	2.9	4	2
相手に自分の求める配置をうまく伝えることはできましたか (1:できない — 5:できた)	4	5	2
タスク 2 相手と意見が食い違ったときにスムーズに解決できましたか (1:できない — 5:できた)	4.25	5	3
相手に自分の求める配置をうまく伝えることはできましたか (1:できない — 5:できた)	4.3	5	4
タスク 1 と 2 の比較 相手と意見が食い違ったときのオブジェクトの複製に違和感を感じましたか (1:感じない — 5:感じた)	2.3	5	1
どちらの実験の方が快適にデザイン作業が行えましたか (1:従来手法 — 5:提案手法)	3.95	5	3
タスク 3 相手に自分の求める配置をうまく伝えることはできましたか (1:できない — 5:できた)	4.4	5	4
快適にデザイン作業ができましたか (1:できない — 5:できた)	3.9	5	2

実験中，観察された参加者の行動は次のとおりであった．

1. 音声で発言してからオブジェクトを操作する (全体)
2. 音声が便利で競合が起きない (全体)
3. 移動中のオブジェクトをつかむのが難しい (タスク 1)
4. 競合することを伝えてオブジェクトをわざと複製させる (タスク 2,3)

また，実験後，参加者から得られた意見は次のとおりであった．

1. 相手がどのオブジェクトを操作しているのかわからない (全体)
2. 自分が操作しているオブジェクトなのか相手が操作しているオブジェクトなのかわかりづらい (全体)

3. オブジェクトの位置の指し示しがわかりづらい(全体)
4. 今どのオブジェクトについて議論しているのか分からない(全体)
5. オブジェクトをとられたという感覚があった(タスク1)
6. 複製されたオブジェクトに気づかないことがあった(タスク2)
7. 複製されたオブジェクトがすべて同じように見えるため、いつ複製されたものかわからない(タスク2,3)
8. 複製されたオブジェクトが元のオブジェクトと重なって分かりづらい(タスク3)
9. 無限にオブジェクトが増えてしまい、画面が煩雑になる(タスク3)
10. どれが現実オブジェクトか仮想オブジェクトかわかりづらい(タスク3)

4.4.7 二つの没入型ディスプレイを用いた空間共有実験

互いに離れた建物に設置されている二つの没入型ディスプレイ環境において、本プロトコルの運用実験を行った。

本実験で用いた装置として、高速ネットワークで接続された、没入型多面スクリーンシステム、没入型円筒スクリーンシステムを用いた。実験環境を図 4.15 に示す。没入型多面スクリーンは、前と左右と足元に合計 4 面のスクリーンを持ち、各々のスクリーンには 2 台の映像提示用 PC とプロジェクタによって映像が投影され、偏光グラスを用いたステレオ表示が可能である。没入型円筒スクリーンは、330°の視野角を持ち、ONYX2 システムに接続された 6 つのプロジェクタによって映像がシームレスに投影される。没入型円筒スクリーンでは、液晶シャッタグラスを用いた時分割方式のステレオ表示が可能である。

各装置の設置されている実験設備棟間は、150Mbps の赤外線無線通信路によって結ばれており、このネットワークに没入型多面スクリーンの映像提示用 PC と、没入型円筒スクリーンの映像提示用の ONYX2 システムが接続されている。

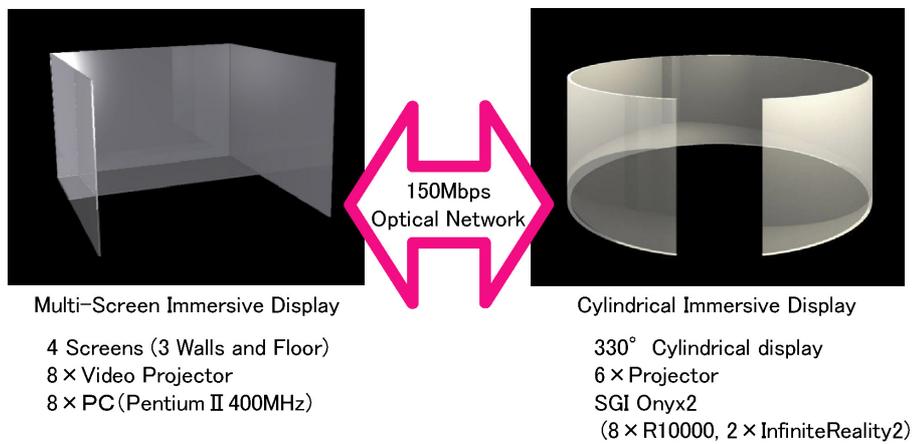


図 4.15 没入型ディスプレイを用いた DSP の評価実験環境

実験システムでは，双方のユーザはジョイスティックを用いて操作を行う．双方のユーザは空間中の移動をジョイスティックのレバー操作により行うことができ，カタログからの家具の選択と設置，移動，回転，削除といった操作をジョイスティックのボタン操作により行うことができる．また，ユーザ同士は Microsoft NetMeeting を用いた音声による対話を行うことができる．

実験では，双方のユーザにあらかじめ決められたタスクを行ってもらい，その様子を観察した．図 4.16 に双方の実験環境の様子を示す．

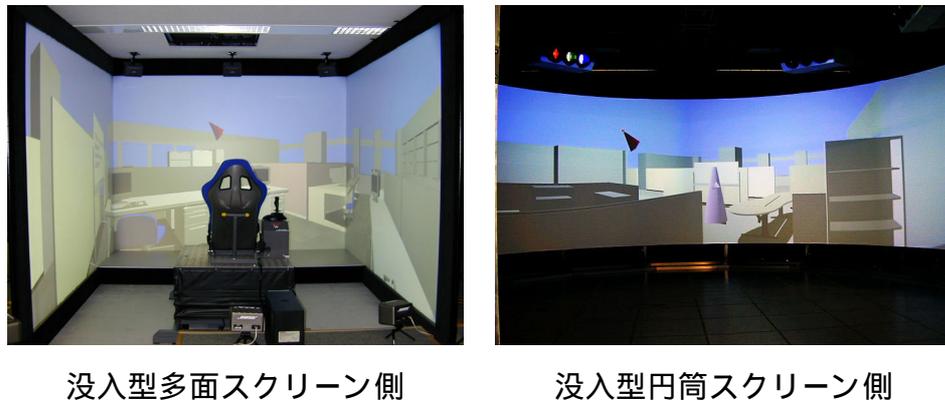


図 4.16 没入型ディスプレイを用いた DSP の評価実験風景

行われたタスクを以下に示す．ユーザ A は没入型多面スクリーン側のユーザで，ユーザ B は没入型円筒スクリーン側のユーザである．

1. ユーザ A が本棚を設置
2. ユーザ B が机を設置
3. ユーザ A が机の上にディスプレイを設置
4. ユーザ B が机の上のディスプレイの向きを整える（競合の発生）
5. ユーザ A がディスプレイを削除
6. ユーザ B がキーボードをテーブルの上に設置
7. ユーザ A が椅子を設置
8. ユーザ B がホワイトボードを設置
9. ユーザ B がテーブルを設置
10. ユーザ A が椅子をテーブルの横に設置
11. ユーザ B が椅子をテーブルの横に設置

この実験では、二つの没入型ディスプレイシステム間は高速なネットワークで結ばれており、かつネットワークの遅延が極めて少ないため、双方のユーザは円滑な協調作業を行うことができた。

この実験ではタスクがあらかじめ決められていたため、ユーザは音声を使わず、相手のオブジェクト操作を確認してから自分のオブジェクト操作を行うといった作業になった。しかし、1箇所競合が必ず発生するようになっており、その部分においても双方のユーザの操作が阻害されることなくオブジェクトの複製が行われ、競合を解決することができた。

また、没入型ディスプレイを用いたことで、通常のディスプレイを用いた場合に比べ、ユーザは頻繁に移動を行うことなくインテリアデザインを行えることが確認できた。しかし、没入型円筒スクリーン側のユーザは、垂直方向の視野が狭く足元が見えないため、少し後ろに下がった状態で作業をしなければならないことがわかった。

ところで、没入型環境においては、スクリーンの構成が様々であるため、描画エンジンは様々なスクリーン形態に対応する必要がある。本実験で用いたシステムでは、一つの設定ファイルを書き換えるだけで様々なスクリーン形態に対応可能である [50]。

本実験で用いた没入型多面スクリーンでは、一つのスクリーンに対して、二つ（ステレオ視用）のプロジェクタがあり、各々のプロジェクタに一つずつPCが割り当てられている。また、円筒型没入型スクリーンでは、330°の領域を6分割しONYX2システム一台が6つのスクリーンを描画している。これらのスクリーンの取り扱いの違いを本実験で用いたシステムでは設定ファイルを書き換えることで実現している。具体的には、複数のスクリーンを複数のPCで管理する場合、設定ファイルを書き換えることで、クライアントをインタフェースを担当するMainクライアントと描画のみを担当するHelpクライアントに分ける。各々のクライアントは同じシーンのデータを持ち、MainクライアントからのUDPによって送られる描画情報データグラムにしたがって自らの担当分を描画することで、全てのスクリーンに適切な画像が描画される。一方、ONYX2システムにおいては、一

つのプログラムが6つのスクリーンを描画するが、その設定も設定ファイルを書き換えることのできる(図4.17)。

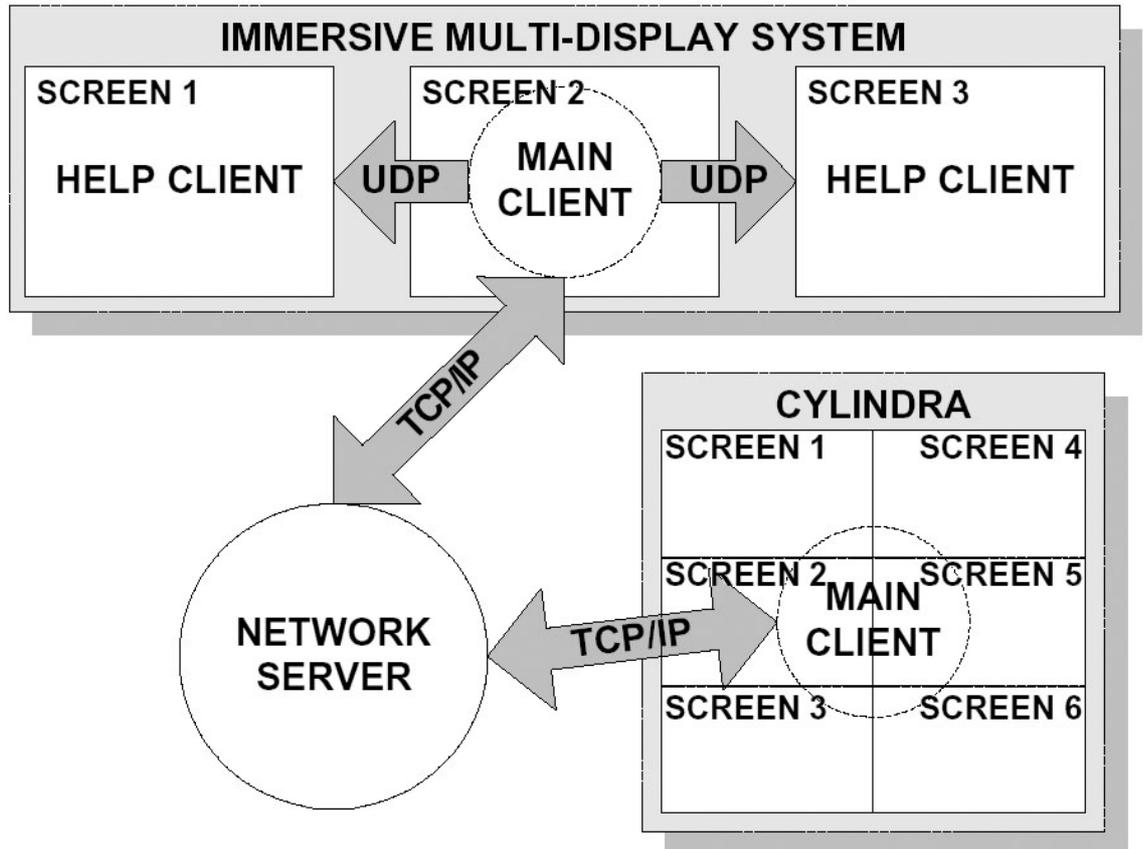


図 4.17 没入型ディスプレイの構成 [50]

また、通常のディスプレイと違い、多面スクリーンの環境では、描画速度や、スクリーン間の描画タイミングも重要な要素である。ポリゴン数における描画速度を表4.6に示す。

表 4.6 ポリゴン数と平均フレームレート (fps)

円筒型没入型スクリーン	100polygons	10000p.	50000p.
1024 × 1024, no textures, no shadows	93.2	91.7	11.9
1024 × 1024, textures, shadows	36.9	25.4	3.5
没入型多面スクリーン	100 polygons	10000 p.	50000 p.
640 × 480, no textures, no shadows	68.2	90.9	26.9
640 × 480, textures, shadows	54.5	46.7	6.2

ポリゴン数が増えるにしたがって、急激にフレームレートが落ちている。また、実験中オブジェクトが多い状態において、スクリーン間の同期がとれなくなる場合が見られた。

4.4.8 ウェアラブルコンピュータを用いた空間共有実験

次に、一方がウェアラブルコンピュータを用い、もう一方が没入型ディスプレイ装置を用いる想定でプロトコル運用実験を行った。

本実験では、MR空間とVR空間という組み合わせで協調作業を行った場合に発生する問題点を確認することを目的とする。また、現実空間側の実際に存在するオブジェクトに対応する遠隔地の仮想オブジェクトを操作した場合の挙動についての確認することを目的とする。

この実験では、ウェアラブルコンピュータ側として小型PC、インタフェースとして磁気式のセンサとトラックボールを用いた。全ての装置を装着することはできないため、本来の意味ではウェアラブルにはなっていないが、ここではウェアラブルコンピュータとして扱う。また、没入型ディスプレイ装置として、没入型円筒スクリーンを用いた。

本実験では、没入型ディスプレイシステムとウェアラブルコンピュータシステムを100Mbpsの有線ネットワークで接続した。実験システムの構成を図4.18に示す。

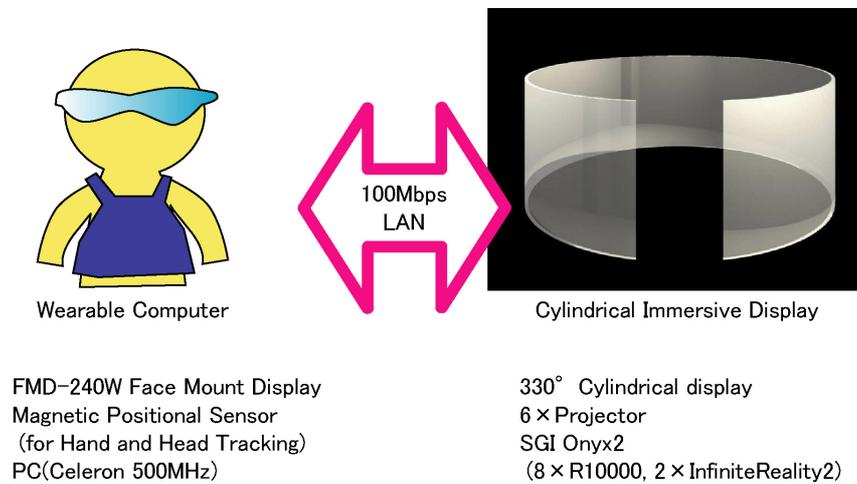


図 4.18 ウェアラブルコンピュータと没入型ディスプレイを用いた DSP の評価実験環境

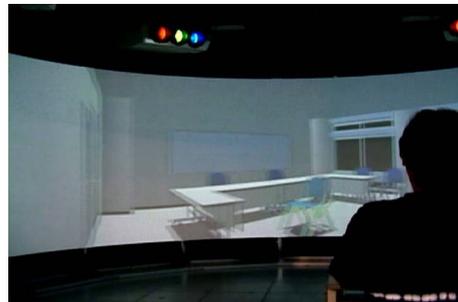
実験の様子を図 4.19 に示す。左図がウェアラブルコンピュータを装着したユーザで、右図が没入型ディスプレイとその中にいるユーザである。ウェアラブルコンピュータを装着したユーザは現実空間に相手のアバタや仮想物体が重畳された形で MR 空間を見ることができる(図 4.20)。没入型ディスプレイ側のユーザは、ウェアラブルコンピュータ側のユーザのいる部屋を CG で描かれた空間として見ることができる。没入型ディスプレイ側のユーザは、ジョイスティックを用いてオブジェクトを操作することができる。また、ウェアラブルコンピュータ側のユーザは、磁気式位置センサを用いてオブジェクトを操作することができる。具体的には、小型トラックボールに磁気式位置センサを取り付け、この小型トラックボール自身を動かすことによって、画面内のカーソルを動かす、オブジェクトをポインティングすることができる。また、トラックボールの右ボタンによって、モードをオブジェクト生成、移動、回転、削除と変更することができ、左ボタンによって、ポインティングされたオブジェクトを現在のモードに従って操作することができる。

本実験では、部屋の中央に椅子を置き、その椅子を双方のユーザに操作しても

らい、オブジェクトの競合とその解決を行うというタスクを行ってもらった。



ウェアラブルコンピュータ側



没入型ディスプレイ側

図 4.19 ウェアラブルコンピュータと没入型ディスプレイを用いた DSP の評価実験風景



相手のアバタ (左端)



重畳された椅子

図 4.20 ウェアラブルコンピュータの HMD からの視野

実験の結果、オブジェクトの競合が起ころても、自分の行っている作業を妨げられることなく作業を続けることができた。また、実空間と仮想物体との調和もとれている。

次に、ウェアラブルコンピュータ側では現実の物体である机を、遠隔地の没入型ディスプレイ装置側から操作するという実験を試みた (図 4.21)。

図 4.21 では，没入型ディスプレイ装置のユーザは，奥のテーブルを回転させている．回転させた瞬間，現実のオブジェクトは回転できないため，即座に競合状態となり，オブジェクトが複製される．左図では，回転させたテーブルと元のテーブルが同時に表示されている．

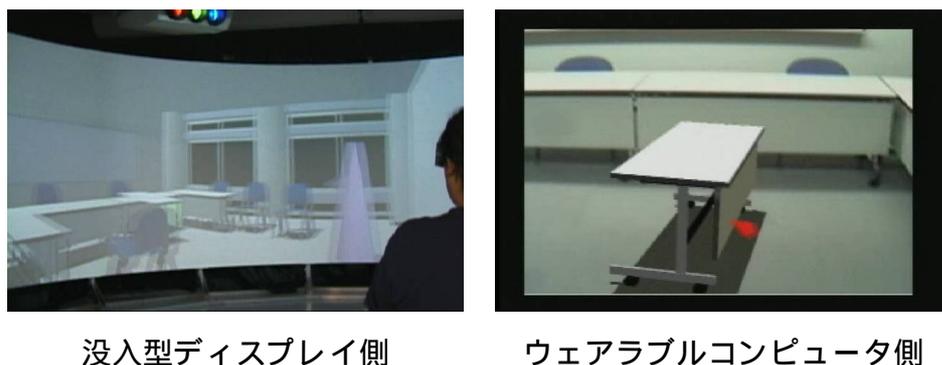


図 4.21 一方が現実物体であるオブジェクトの操作

一方，ウェアラブルコンピュータ側では，図 4.21 のように，現実の机が仮想物体として複製され出現しており，一貫性が保たれていることが分かる．

しかし，複製によって新たに出現したオブジェクトは本来の位置から多少ずれた場所に出現している．

4.5. 考察

通信量評価

通信量を比較すると，提案プロトコルは従来プロトコルに比べ，データ量では全体で多くなっている．特に，競合したときに新規に追加される複製後オブジェクトの情報が大きい．しかし，従来手法では参加者が他の参加者の要求を互いに把握するため，各々が意思提示のためのオブジェクト移動メッセージを送る必要がある．この例では，二人の参加者のみで協調作業を行う例で比較したが，より多くの参加者間で競合が起った場合には，競合後に (参加者数-1) 人分の移動メッ

セージが送信されなくてはならない。

一方、提案手法では、複数人で協調作業を行う場合においても、競合発生時に人数分のオブジェクトが複製によって一度に提示されるため、メッセージ数の増加は押さえられ、結果として通信量も少なく抑えることができる。

また、メッセージの送受信にはパケットのヘッダなどの情報が付加されるため、一つのメッセージに含まれるデータ量よりも、送受信されるメッセージ数の方が通信量に影響する。そのため、一つのメッセージに含まれるデータ量が多くとも、メッセージ数を減らすことができる提案手法は、通信量の観点から有用であると考えられる。

操作性評価

実験全体の傾向を見ると、音声によるコミュニケーションが円滑に進みすぎて競合があまり起こらない場面があった。たとえばあるグループでは、最初に操作する順番を音声によって決め、その順番でデザイン作業を行うという協調作業が見られた。しかし、音声で順序を決めていたグループにおいても、競合が数回発生しており、その時には参加者の操作しているオブジェクトが動かない、ジャンプするといった現象が見られた。

参加者からの意見を見ると、プロトコルに対する意見よりも、評価システムのユーザインタフェースに関する意見が多く得られた。たとえばオブジェクトが今だれが操作しているのかが分からない、複製されたオブジェクトが区別しにくい、相手が指し示しているオブジェクトが分かりにくいなど、オブジェクトの表示方法に関する意見が多かった。

タスク1とタスク2のアンケートの結果を比較すると、相手と意見が食い違ったときにスムーズに解決できたかどうかという質問については、提案プロトコルを用いたタスク2の方が高得点を得ており、競合が起きた場合にはオブジェクト複製が行われ、参加者同士の競合の解決が円滑に進んでいることが明らかになった。このデータに対して、2集団分散が等しくないと仮定したt検定を用いて両側検定を実施した結果、帰無仮説「2集団の平均値に差がない」が棄却される確率は0.003712となり、この結果は危険率5%で有意であることがわかった。また、

相手に自分の求める配置をうまく伝えることができたかどうかの質問についての回答では、タスク 1 とタスク 2 の得点がそれぞれ 4 と 4.3 とタスク 2 の方がわずかに高い得点が得られている。このデータに対して、上と同じく t 検定を用いた両側検定を実施した結果、有意確率が 0.487225 となり、この差は有意ではないことがわかった。しかし、競合発生時には、複製されたオブジェクトが有効に使われていることが観察できた。

従来手法と提案手法でどちらが快適にデザイン作業が行えたかどうかの質問については、3.95 とやや提案手法が快適という結果となっている。この質問については、参加者からの意見を見ても、オブジェクトの見せ方に関する意見が多いことから、プロトコルの問題よりも、評価用システムのインタフェース設計が強く影響しているようである。オブジェクトの複製に違和感を覚えたかどうかについては、2.3 と違和感をあまり覚えないという結果となっている。違和感があると答えた参加者の意見として「いつ複製がおこったのかわからない」「複製が多くなりすぎて分かりづらい」という意見があった。これらの意見についても、複製されたオブジェクトをいかに分かりやすく表示するのかといったインタフェースの影響が大きいと考えられる。

また、仮想的な現実物体を含めたタスク 2 については、相手に自分の求める配置をうまく伝えることができたかという質問について高得点が得られており、現実オブジェクトの移動を仮想化されたオブジェクトの移動により行うという方法が、円滑な操作性を実現しているといえる。快適にデザイン作業ができたかどうかについては、3.9 という得点が得られているが、参加者からは複製されたオブジェクトが増えすぎて、画面が煩雑になるとの意見があり、この点が得点を低くしている原因だと考えられる。これもオブジェクトの見せ方に関係する部分であり、やはりインタフェースの影響が大きいようである。本実験では、評価用システムを用いてプロトコルの評価を行ったが、その結果にはプロトコルそのものよりも、評価用システム全体のユーザインタフェースが大きく影響することが分かった。しかしながら、競合が起った場合には提案プロトコルを用いた場合に競合の解決が円滑に行えるとの結果が得られ、現実オブジェクトの操作をオブジェクト複製によって行うという方法も、オブジェクトの複製が多く起りすぎると画面が

煩雑になるという欠点はあるものの、相手に自分の求める配置をうまく伝えられていると考えられる。

二つの没入型ディスプレイを用いた空間共有実験

二つの没入型ディスプレイ装置間をネットワークで結び、空間を共有する実験では、高速ネットワークを用いておりネットワークの遅延が極めて少ないため、双方のユーザは円滑な協調作業を行うことができることを確認できた。また、競合発生時には複製されたオブジェクトが両者に提示されることで、円滑な解決が行えることを確認した。しかし、没入型円筒スクリーンシステムでは、垂直方向の視野が狭く、オブジェクトに近づくと足元が見えなくなってしまうため、ある程度遠くからオブジェクトを操作しなければいけないという問題があることを確認できた。一方、没入型多面スクリーンでは、足元までスクリーンがあり縦方向の視野を広くとることができるため、オブジェクトに十分近づいた状態でもオブジェクトの操作が可能であった。

ウェアラブルコンピュータを用いた空間共有実験

実験により、遠隔地からの現実物体への操作によって起こる一貫性の破綻が、オブジェクトの複製により解決できることが確認できた。しかし、図4.21右の仮想オブジェクトの机が本来ならば奥の机と同じ場所に出現するはずが、若干ずれた場所に表示されている。この現象の原因として、部屋の磁場の変動により磁気式位置センサが誤った値を出力しているからと考えられる。この問題については、磁気式位置センサのキャリブレーションを厳密に行うことである程度緩和することができると考えられるが、いつでもどこでも用いることができるウェアラブルコンピュータという性質上、そのつど時間をかけて厳密なキャリブレーションを行うことは望ましくないとする。ウェアラブルコンピュータという性質上、様々な環境で用られると考えられるため、より環境の変化にも強い、自律的な位置センサが求められる。

また、重要な問題として、この実験では没入型ディスプレイ側のユーザが遠隔

地では現実物体であるオブジェクトを操作したが、この競合を没入型ディスプレイ装置側のユーザの案を採用することで解決した場合、ウェアラブルコンピュータ側のユーザは、手作業で没入型ディスプレイ側のユーザの示す位置にオブジェクトを移動させなくてはならない。

もう一つの重要な問題として、ウェアラブルコンピュータ側のユーザが現実オブジェクトを操作したとき、どのようにしてその結果を没入型ディスプレイ側の対応する仮想オブジェクトに反映させるかという問題がある。この問題については何らかの実物体の計測方法が必要である。

また、本章で作成したインテリアデザインシステムでは、作業領域となる部屋は事前に三次元モデリングソフトウェアを用いて手作業でモデリングされたものである。いつでもどこでも協調作業を行うためには、その場で即座に実環境をモデリングできる手法が必要である。

4.6. 結論

本章では、仮想物体と現実物体が混在した実空間共有型 MR システムにおいてユーザに快適で公平な協調作業環境を提供する「複製 - 選択プロトコル」を提案した。提案プロトコルは、二人のユーザが同時にオブジェクトを操作した場合や、遠隔地側の VR 空間から MR 空間側の現実オブジェクトを操作した場合に起こるオブジェクトの状態の矛盾を、複製とユーザ間の対話により解決することで、快適な協調作業環境を実現できる。実験では、プロトタイプシステムを用いた場合のユーザの操作性および、通信量を従来手法と比較し、提案プロトコルがユーザに円滑な操作性を提供できることが示された。また、二つの異なる没入型ディスプレイを用いた場合の実験では、インテリアデザインというアプリケーションでは、没入型ディスプレイの形状による足元が見えるかどうかというインタフェース的な側面が重要な要素であることが分かった。没入型ディスプレイ装置とウェアラブルコンピュータを用いた環境においては、遠隔地からの実物体への操作がオブジェクトの複製によって一貫性を壊すことなく行えることが示された。提案プロトコルを用いることで、競合発生時に複製により競合が解決できることが実験に

第4章 MRのための空間管理手法

より示された。しかし、提案プロトコルを用いたアプリケーションのユーザインタフェースの設計もプロトコルが有用なものになる上で重要な要素であることが示され、今後本プロトコルは、空間管理手法だけではなく、ユーザインタフェースも含めて評価される必要がある。

また、実験で用いた協調インテリアデザインシステムでは、作業領域となる部屋は事前に手作業でモデリングされたものである。そのため、いつでもどこでも協調作業を行いたい場合には向いていない。いつでもどこでも協調作業を始められるようにするためには、実環境のリアルタイムモデリング手法が必要である。現実物体を操作した場合に、どのようにその操作を遠隔地の仮想物体に反映させるかという問題点を解決する手法についても検討が必要である。また、遠隔地では現実物体である仮想物体を操作した場合に、遠隔地の現実物体は自動的に動かない問題の解決方法についてもさらなる検討が必要である。

第5章

協調作業のための実空間モデリング手法

本研究で提案する，ウェアラブルコンピュータと没入型ディスプレイ間における実空間共有型 MR では，作業対象となる空間はウェアラブルコンピュータを装着したユーザのいる現実空間である．この現実空間を遠隔地の没入型ディスプレイと共有するためには，この現実空間の様子を計測し，遠隔地に伝送する必要がある．本章では，現実空間の様子をモデリングする手法について述べる．

実空間を計測し提示する手法は大きく，モデルに基づいた手法と，画像（イメージ）に基づいた手法の二つに分けられる．モデルに基づく手法は，図面や実画像を用いて三次元空間をモデリングし，それを用いて提示するものである．画像に基づく手法は，多視点からの実画像を蓄積しておき，再生時に適切な画像を選択して提示するものである [43] ．

モデルに基づいて空間をモデリングする手法はこれまで数多く提案されており，建築図面などをもとに CAD ソフトウェアなどを用いて，手作業で三次元モデルを作成するものが一般的である．また，各種計測装置を用いて自動的にモデルを構築する研究も行われている．

自動的に三次元モデルを作成する手法には，全方位カメラを複数個用いてステレオ視によって三次元情報を獲得するもの [51, 52] や，全方位カメラをロボットに搭載し移動させることで三次元情報を獲得するものがある [53] ．また，カメラを回転させることで，全方位のステレオイメージを得るもの [54] や，複数台のカメラを全方位をカバーするように配置し全方位の距離計測を行える装置も存在す

る [55]。測量の分野では，空間のある範囲を三次元メッシュとして精密にモデリングできる機能を持つトータルステーション [46] や，空間を高精度でモデリング可能なレーザー 3D スキャナー装置 [47] も近年登場している。

これらの手法を用いれば，全方位の距離情報を得ることは可能であり，その情報から，実空間の三次元モデルを生成することもできる。しかし，上述の手法では，隠蔽などにより計測できない部分が発生してしまうという問題がある。従来の手法では，計測できた部分に関しては正確だが，全体としてみた場合，計測できなかった部分が残り欠落部分として残ってしまう。そのため，自然な空間の三次元モデルを作成するためには，計測できなかった部分をなんらかの方法によって補間する必要がある。また，これらの手法は，高精度な計測を行える半面，出力されるデータ量が膨大なものになってしまうため，データをリアルタイムで取り扱うことは難しい。

一方，全方位画像から手作業で特徴を指定し，簡単に部屋の様子の三次元モデルを構築するという研究がある [56]。しかし，これらの手法では，ユーザが事前に特徴を手作業で入力してやらなければならないため，すぐに協調作業を始めたい場合には適していない。

第3.3章で述べたように，本研究では，いつでもどこでも協調作業を行える環境の構築を目指している。本研究で必要な空間計測技術に求められる要件として，

- 対象空間の“臨場感”を再現可能であること

ユーザがあたかも対象空間にいると感じるためには，対象空間の広さと現時点での様子が把握できることが必要である。また，一部分の精密な形状ではなく，対象空間全体の大まかな特徴を計測できることが必要である。

- リアルタイムでデータを伝送・再構築可能であること

いつでもどこでも協調作業を行うためには，現在の対象空間の臨場感を遠隔地にリアルタイムで伝える必要がある。そのためには，素早く空間を計測でき，簡素な形で空間を表現できることが必要である。

すなわち，空間全体の特徴を捉え，空間全体を簡素な形でモデル化することができれば，上の条件を満たすことができると考えられる。

ポンチ絵という表現手法がある。ポンチ絵では、線など単純なプリミティブの集合で対象の特徴が表現される。本研究では、実空間を、“単純だが、リアリティがある”，ポンチ絵のようにモデル化することを目指し、インタラクティブな実空間モデリング手法「ポンチ 3D(Punch3D)」を提案する。

5.1. ポンチ 3D の概要

上述のように，実空間を計測しモデリングする試みはこれまで盛んに行なわれてきている．しかし，従来の手法では，緻密なモデリングが可能である反面，生成されるデータが膨大なものとなり，処理に多くの計算コストがかかる．また，データの欠落した部分があり補間の必要が生じた場合に，空間を共有して協調作業をしている途中にモデルを修正することは困難である．

「ポンチ 3D」は，作業対象空間に設置された全方位カメラシステムと，ユーザの装着するウェアラブルコンピュータを協調させ（図 5.1），屋内空間のインタラクティブなモデリングを実現する手法である．

「ポンチ 3D」で提案するモデリングプロセスは，全方位カメラによる実空間の大まかな計測（初期モデルの生成），ウェアラブルコンピュータを装着したユーザが作業中必要に応じて行うモデル修正（モデルの修正），の二段階で行われる（図 5.1，図 5.2）．この二段階のプロセスを，実際の作業中に切り替えつつインタラクティブに踏むことで，効率の良い空間のモデリングが可能となる．

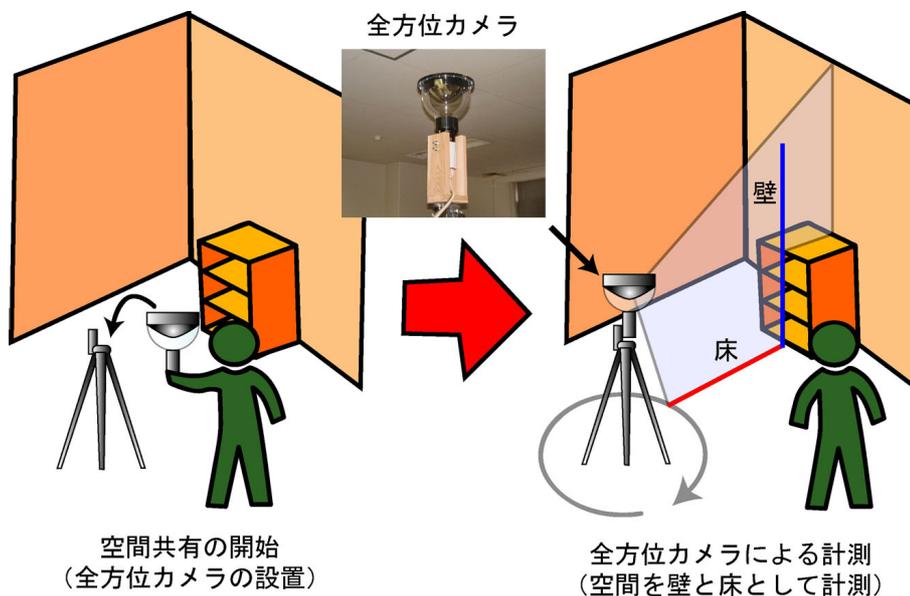


図 5.1 協調作業の開始

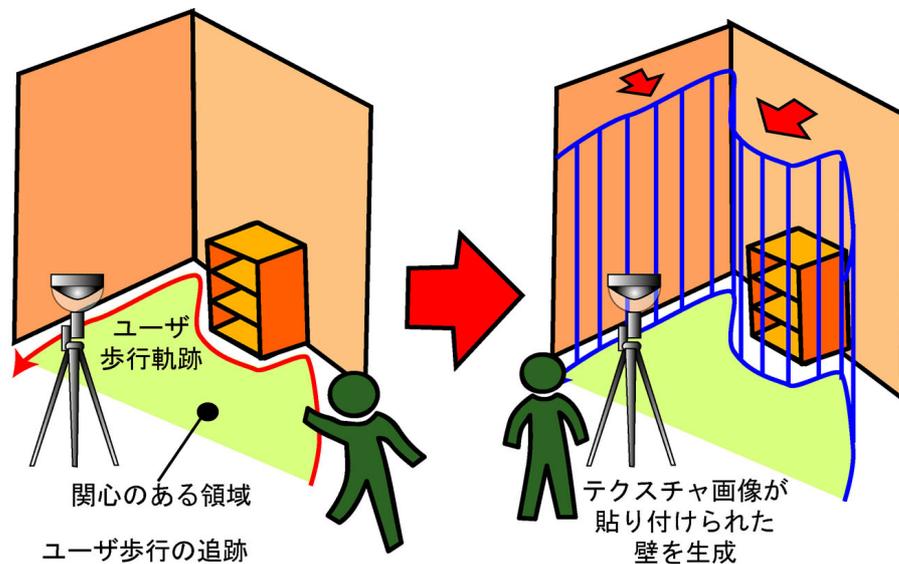


図 5.2 歩行によるモデルの修正

以下に各段階についての詳細を述べる．

5.2. 初期モデルの生成

協調作業を始める際に，ユーザは全方位カメラシステムを屋内の適当な位置に設置する．このとき，カメラは水平で，高さ H は既知とする．次に，ユーザは「床色代表点」を全方位カメラシステムに与える．この色は，後で床領域の抽出のために用いられる．

まず，全方位カメラシステムは，得られた全方位画像を，式 5.1, 式 5.2 を用いて横軸が方位角，縦軸が俯角 に対応する画像（以下パノラマ画像とする）に変換する．変換は，双曲面の焦点を中心とする半径 1 の仮想球面を仮定し，双曲面焦点からの光景をその仮想球面上にマッピングし，この球面を平面に展開することで行う（図 5.3）．

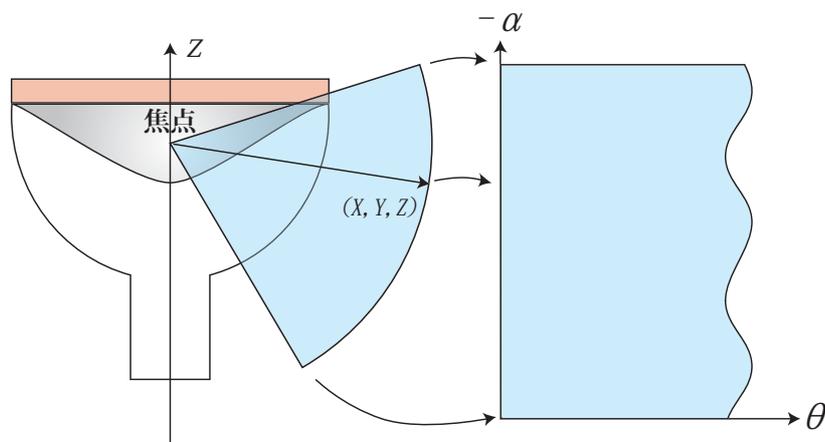


図 5.3 全方位画像からパノラマ画像への変換

$$x = X \times f \times \frac{(b^2 - c^2)}{(b^2 + c^2)Z - 2bc \times 1.0} \quad (5.1)$$

$$y = Y \times f \times \frac{(b^2 - c^2)}{(b^2 + c^2)Z - 2bc \times 1.0} \quad (5.2)$$

式中 X, Y, Z は双曲面焦点を原点とする仮想球面上の座標, b, c は双曲面のパラメータ, f は撮像面からカメラ焦点までの距離である。式 5.1, 式 5.2 を用いて, 双曲面ミラー焦点を原点とする仮想球面上の座標 X, Y, Z から, パノラマ画像上の座標 x, y を計算する。次に, 得られたパノラマ画像について, 床領域の抽出を行う。パノラマ画像の各方位 θ について最大俯角から上に向かって走査し, 各位置のピクセルの色と床色代表点色との間での距離を計算する。この距離が与えられた閾値以下である点を床の候補とし, 床の候補が与えられた長さ以上連続する場合, その上端の位置を床と壁との境界とする (図 5.4)。次に, 上で得られたパノラマ画像上の境界の座標を, 実空間での座標に変換する。全方位カメラの高さ H と, 画像中の点の俯角 α を用いて, 全方位ミラーの双曲面の焦点座標から俯角 α 方向に伸ばした直線と床との交点を計算し, 床と壁の境界の座標を計算する。

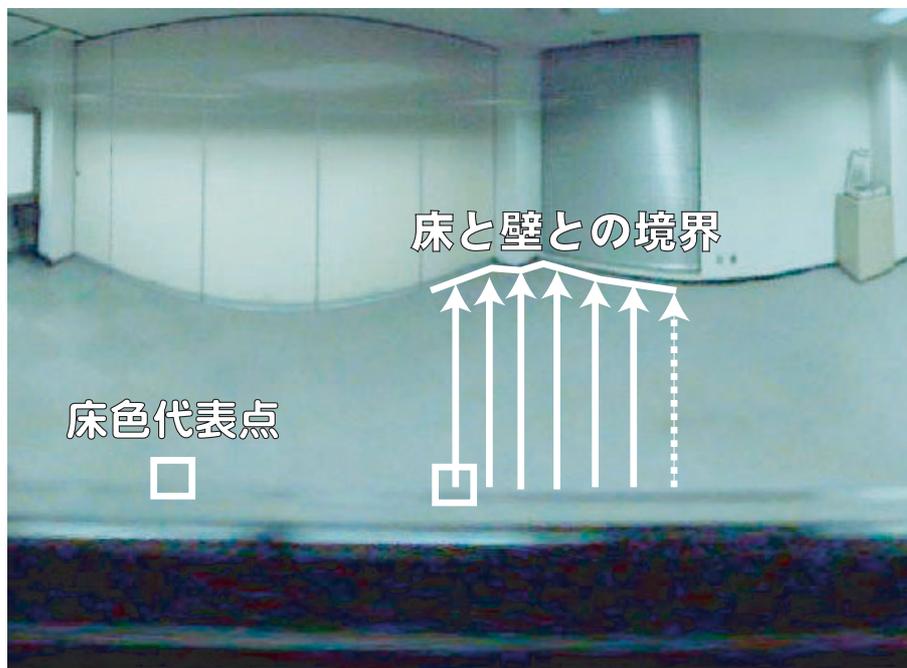


図 5.4 初期モデルの生成

以上の計算を全方位に対して行い，得られた床と壁との境界から，全方位画像の中心から放射状に広がる床領域を決定する．この床領域を水平な床，それ以外を垂直な壁とみなし，床と壁のみからなる簡略化された初期モデルを生成する（図 5.2 右）．

この初期モデルに対して，カメラから得られた画像をもとに逆透視投影変換によって得られた床と壁のテクスチャ画像を貼る．

しかし，このような単純な方法で得られた初期モデルでは，床色代表点や，床色決定のための閾値の選び方によって，正しく床領域が抽出されない場合がある．さらに，光沢のある床への照明の映り込みや，床と壁との色にそれほど差がない場合など，多くの場合にエラーが発生する．

このエラーを，次節に述べるユーザの歩行によって修正する．

5.3. ユーザ歩行追跡による初期モデルの修正

本手法では，“ユーザが歩き回ることができる領域は常に床”であると仮定し，初期モデルのエラーをユーザが歩き回ることによって修正する，インタラクティブなエラー修正を実現する（図 5.2）。

具体的には，本手法によって構築されたモデルを遠隔地に送信し，空間を共有して協調作業を行う際，受信されたモデルの一部にエラーがあり正しく形状が再現できていない場合など，モデルの修正が必要とされた場合，ユーザは全方位カメラシステムを計測モードに切替え，ユーザの足元位置を計測しながらインタラクティブなモデルの修正を開始する．モデルの修正が終わると，ユーザは全方位カメラシステムを通常モード（協調作業モード）に切り替える．モードの切り替えは，ウェアラブルコンピュータを用いることにより，協調作業中いつでも行うことができる．ウェアラブルコンピュータと全方位カメラシステムを，無線 LAN によって接続し，ウェアラブルコンピュータからモード切替えのコマンドを送信することで，全方位カメラシステムのモードを切り替える．このようにして，ユーザは修正モードと協調作業モードを随時切替えながら協調作業を行う．

全方位カメラシステムは，床面におけるユーザの足元位置を，与えられた全方位カメラの高さと画像中のユーザの足元位置から計算し，その位置によって床領域を更新する．

ユーザの足元の追跡方法は，次のように行う．

1. 事前に取得しておいた背景画像と，現在の画像との差分を取る．
2. 適当な閾値で 2 値化，ノイズ除去，ラベリングを行う．
3. ラベリング結果から最も大きな領域をユーザの存在する領域とみなし，その領域の俯角が最も大きくなる点をもとに，床面座標系におけるユーザの足元位置を決定する．

このようにして，ユーザの歩行によって，あたかも床を足で踏み固めているような感覚で，床領域を協調作業の合間に逐次決定することができる．

全方位カメラを用いて人物の位置を推定する試みはこれまでもなされており，特に複数台の全方位カメラを用いて人物位置を推定する手法が存在する [57]．こ

これらの手法は、複数のセンサを用いるため安定した計測が可能であるが、本研究では、ウェアラブルと共に持ち歩くことを想定しポータビリティを優先しているため、カメラ1台での計測手法を用いた。

5.4. モデリング結果の伝送

“ポンチ 3D”によってモデリングされた空間は、形状モデルとテクスチャ画像データとして表現される。

形状モデルは、壁床範囲と壁床傾斜角の情報を含むレコード（傾斜レコード）の集合である。一つの傾斜レコードは一つの連続する床または壁を表現するため、一つの方位につき、床と壁に対応する二つの傾斜レコードが存在する。壁床範囲とは、ある方位において、全方位カメラから見たときの連続する床（壁）の存在する範囲を角度で表したものである。この壁床範囲は、全方位カメラが撮影可能な最大俯角から上方向にとられる。壁床傾斜角は、対応する壁床範囲に存在する領域の傾斜角を表す。傾斜レコードは全ての方位につき用意され、形状モデルとして用いられる。この形状モデルと、形状モデルとともに送られる全方位カメラの高さ情報を用いて、没入型ディスプレイシステムは対象空間を復元する。

テクスチャ画像データは、形状モデルに貼り付けられるテクスチャ画像である。テクスチャ画像は、形状モデルに含まれる壁床範囲と壁床傾斜角によってパノラマ画像を逆透視投影変換することにより生成される。テクスチャ画像データは、JPEG 圧縮され伝送される。

形状モデルの更新は、初期モデルの構築時とユーザの歩行時に行われ、テクスチャ画像の更新はリアルタイムに行われる。このようにして生成された形状モデルとテクスチャ画像データは、遠隔地の没入型ディスプレイシステムなどに伝送され、ユーザに提示される。

5.5. 実験

本節では，足元位置の追跡に関する実験と，二つの実空間におけるモデル構築実験を行い，その結果について述べる．全方位カメラシステムには，双曲面ミラーが装着された高解像度カメラ (PULNIX TMC-1000CL, 1004 × 1016 Pixel, 15 フレーム/秒) を用いた．また，歩行追跡実験，モデル構築実験，インテリアデザイン実験で用いる，全方位画像から変換されるパノラマ画像のサイズは，1024 × 512 Pixel とした．

5.5.1 足元位置精度評価実験

高解像度全方位カメラによる足元位置の抽出精度について実験を行った．被験者に，全方位カメラ真下床面から，1m から 17m まで 1m 刻みの位置に足のつま先を合わせてカメラの方向を向いた状態で静止してもらい，足元つま先位置の計測を試みた．計測は，全方位カメラの高さ (床から双曲面焦点までの高さ) を，137.5cm, 174cm, 196cm と変えて実施した (図 5.5) ．

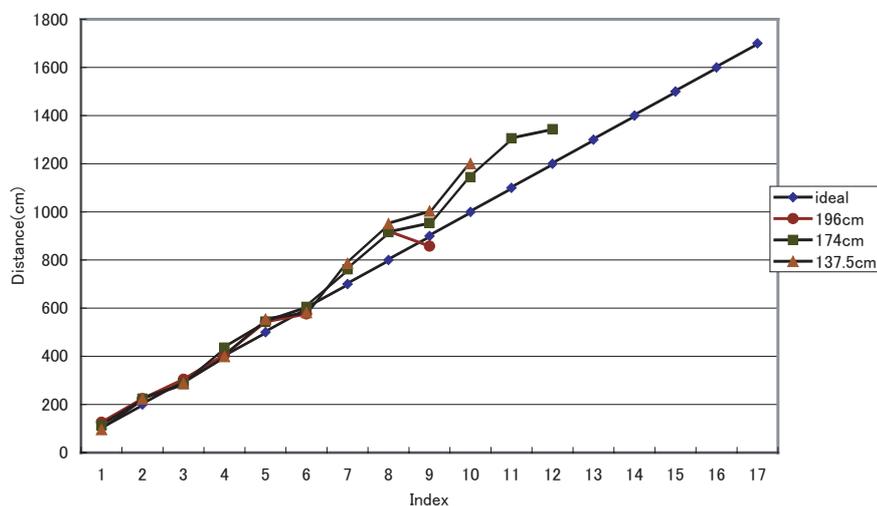


図 5.5 床面上における足元のカメラからの距離

実験の結果、8m までの距離であれば、3 種類の高さによる大きな差は見られない。しかし、6m を超えると、計測された距離と理想値との差が次第に大きくなり、9m を超える距離では距離が計算できなくなる場合があることがわかる。

6m を超えると距離に含まれる誤差が大きくなっている理由として、図 5.6 のように、カメラからの距離が離れるにしたがって、1 ピクセルに対応する距離に含まれるの最大誤差が急激に大きくなるため、照明条件やカメラのぼけなどの影響などの要因によってカメラ画像中の足元座標が僅かに変動した場合に、その変動が大きな距離の差として現れるからである。また、9m を超えた距離の場合に距離が計算できない理由は、カメラと人物との距離が離れすぎ、人物とノイズの区別がつかなくなるためであると考えられる。

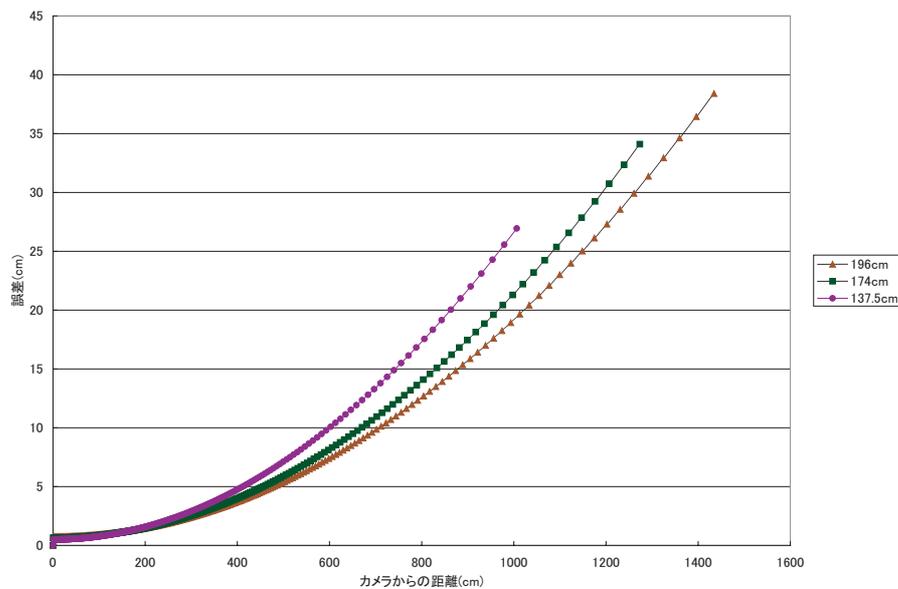


図 5.6 カメラからの距離と 1 ピクセルに対応する距離に含まれる最大誤差の関係

5.5.2 歩行追跡実験

本節では，実際の部屋の輪郭と歩行追跡により生成された部屋の輪郭との比較を試みた．

実験は，まず部屋の実寸をメジャーで測り，次に，被験者に部屋の淵にできるかぎり沿って歩行してもらった．全方位カメラの高さは174cm，図の+印の地点に設置した．実験の結果を図5.7に示す．グリッドの単位は10cmで，赤い線が実際の部屋の形状を示す．黒い線が歩行して構築された部屋の形状である．部屋の大きさは図の左右方向で最大666.5cm，上下方向で最大617cmである．

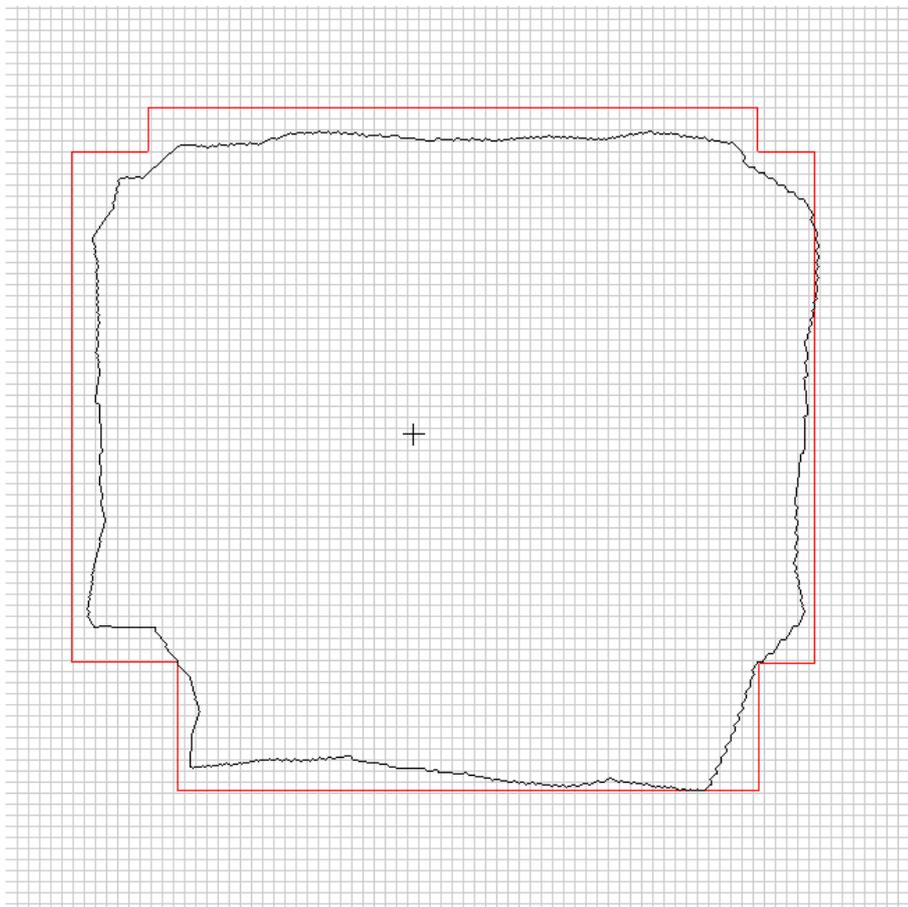


図 5.7 歩行により構築された部屋形状

図を見ると、おおまかには部屋の形（四角形）は再現されているが、部屋の淵の柱がある凸部分はやや曲線になってしまい再現されていない。これは、人物追跡速度が約 1.3fps と遅いため、人物の動きに位置追跡が間に合っていないことが考えられる、また、もう一つの理由として、部屋の凹部分では、被験者の両側に壁があるために、角に近づくことができないことが考えられる。

また、生成された軌跡をみると、全体として約 20cm 程内側に生成されている。これは、被験者が部屋の淵に沿って歩く際に、体の大きさにより、壁にあまり近づくことができないためであると考えられる。一方、右側の壁と、下の壁の一部は、壁にかなり接近している。これは、全方位カメラを部屋の中央より左上側に置いたため、人物の足の部分の照明条件が、他の場所と異なるからだと考えられる。

いずれにしても、人の足の大きさが約 20-30cm であることを考えると、20cm 程内側に足元の位置が来るとは理にかなっている。アプリケーションによっては、この精度で十分であるものもあるかもしれないが、より正確な計測のためには、ユーザの姿勢と距離をもとに、足の大きさを考慮した距離補正を行う必要があると考えられる。

5.5.3 モデル構築実験 1

ユーザの歩行の追跡により、部屋の形状のモデリングがどの程度行えるかについて実験を行った。

研究科エレベータホールに全方位カメラシステムを設置し、初期モデルの取得とユーザの歩行追跡によるモデルの修正実験を行った。ユーザには、部屋の淵に沿って普通に歩行してもらった。

全方位カメラの高さ（双曲面ミラーの焦点の高さ）は 173.3cm とした。



図 5.8 エレベータホール俯瞰図とユーザの歩行軌跡

まず，初期モデルを生成し，ユーザに壁に沿って歩いてもらい，初期モデルの修正を行った．図 5.8 中の破線がユーザの歩行した軌跡である．

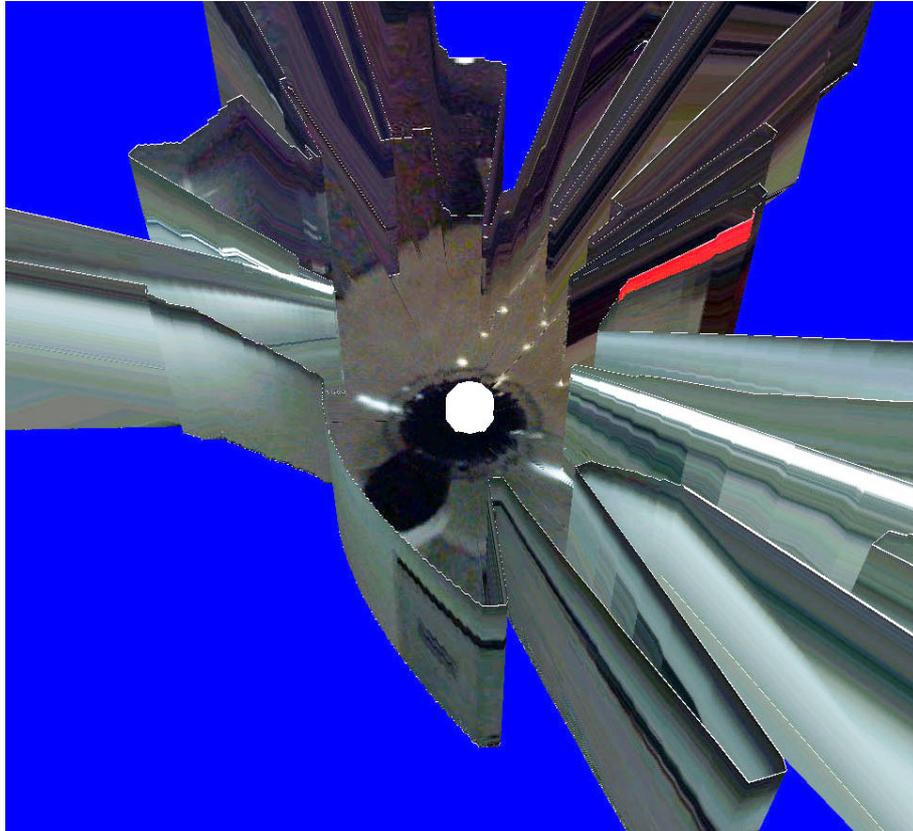


図 5.9 モデル修正前のエレベータホール

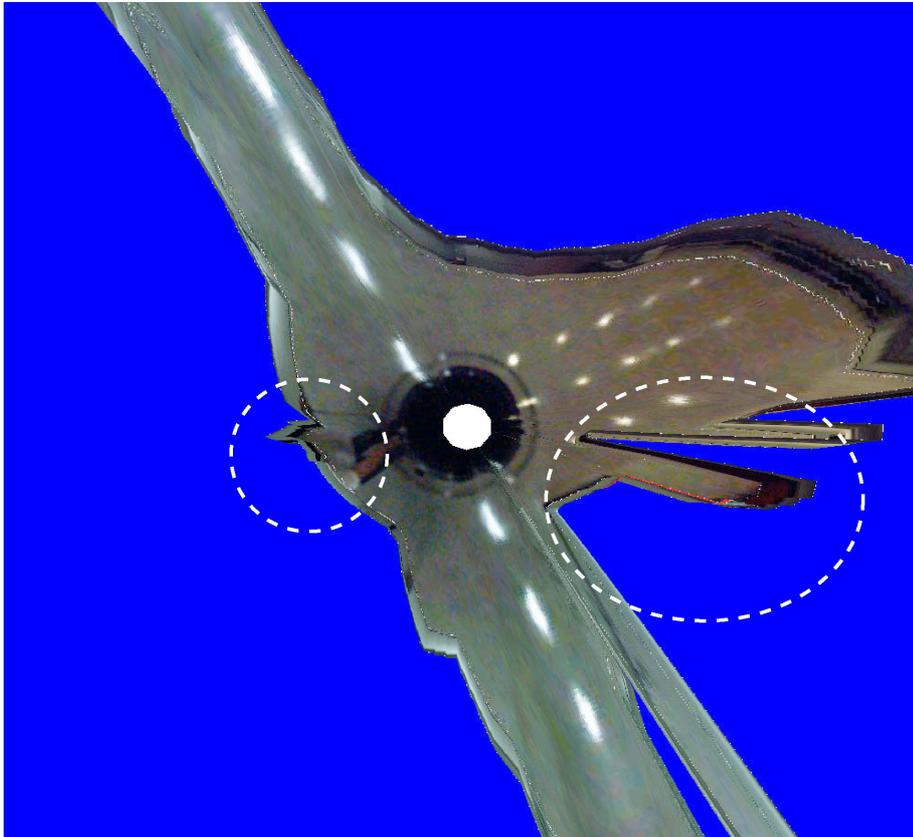


図 5.10 モデル修正後のエレベータホール

図 5.9 は、歩行によって修正される前、図 5.10 は修正後のモデルである。エレベータホールでは、床に照明が反射しており、正しく初期モデルが生成されていない。しかし、ユーザ歩行によるエラー修正後では、ユーザが歩行した部分については、エレベータホールの構造が修正されていることがわかる。修正後の写真中、右側の丸で囲んだ部分については、歩行を行っておらず、まだエラーが残っている。

また、左側の丸で囲んだ部分に切欠きのような破綻が見られる。この原因としては、ユーザの領域をパノラマ画像から抽出する際に、カメラの近くでは歩行による足の動作によって、足元位置の計測結果が大きく変化してしまうことがあげられる。

5.5.4 モデル構築実験2

次に，研究科のセミナー室のモデリングを同様に行った．

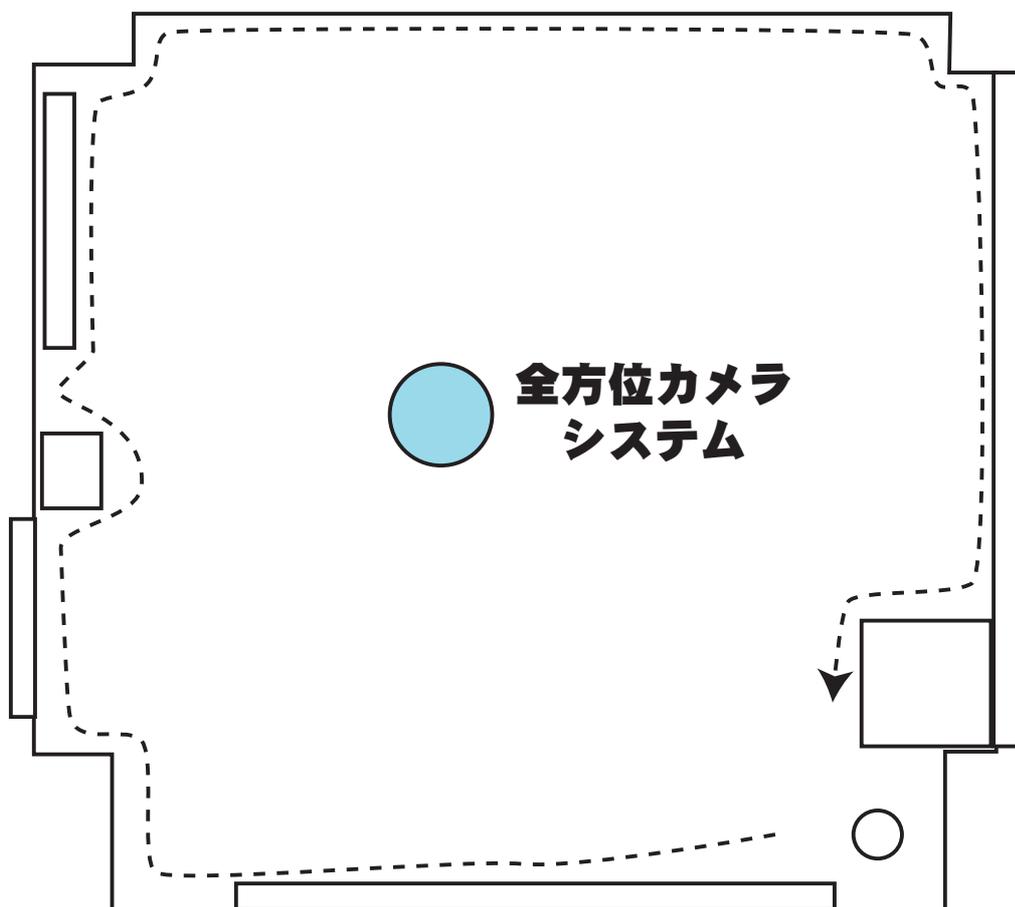


図 5.11 セミナー室の俯瞰図と歩行軌跡

図 5.11 のように，研究科セミナー室に全方位カメラシステムを設置しモデリング実験を行った．全方位カメラシステムには，双曲面ミラーが装着された高解像度カメラを用いた．全方位カメラの高さはエレベータホールの実験と同様，173.3cm とした．破線がユーザの歩行した軌跡である．



図 5.12 モデル修正前のセミナー室

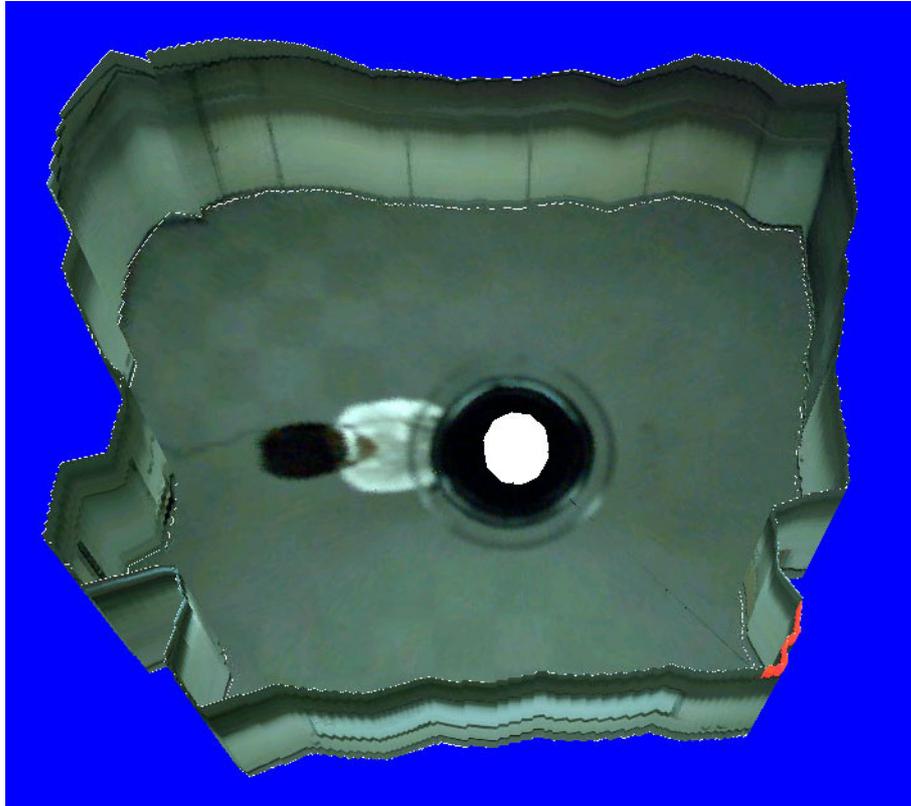


図 5.13 モデル修正後のセミナー室

図 5.12 は得られた初期モデル，図 5.13 は歩行によって修正されたモデルである．初期モデルでは，図上部のパーティションの部分や図左下のドアの部分など，床と色が近い壁が床領域として誤認識されている．そして，ユーザの歩行による修正後ではこのエラーが修正されていることがわかる．

図 5.14, 図 5.15 は，得られた形状と実際の部屋の形状との比較を行ったものである．

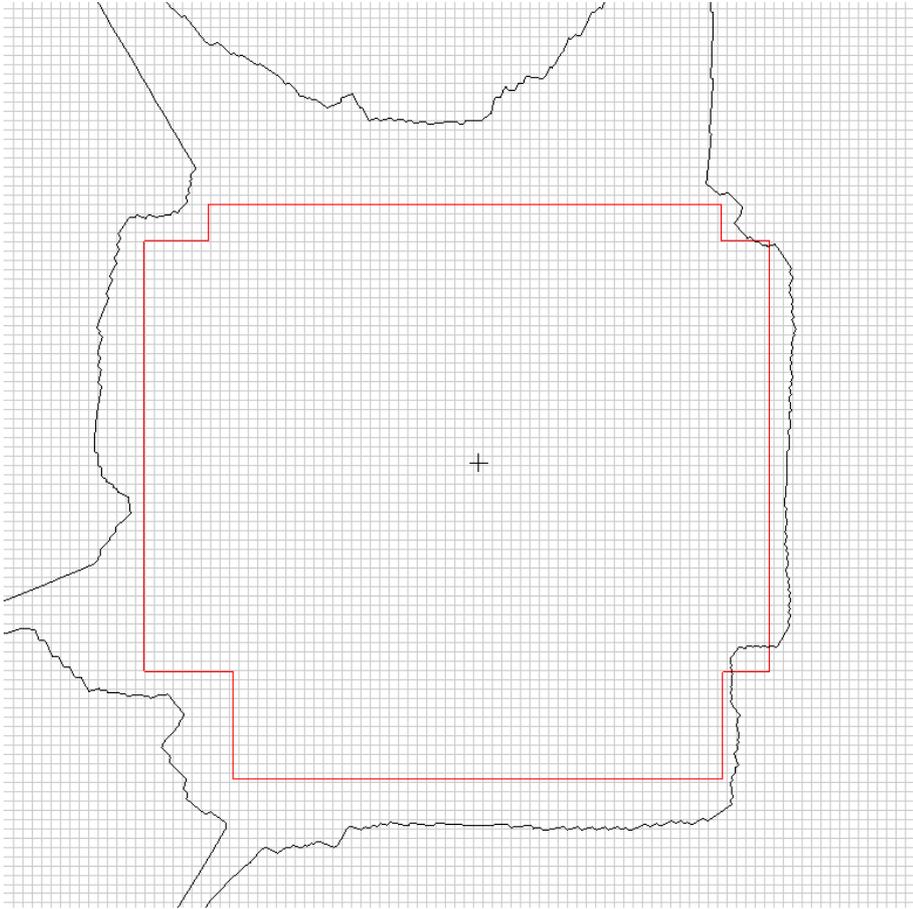


図 5.14 モデル修正前のセミナー室（鳥瞰図）

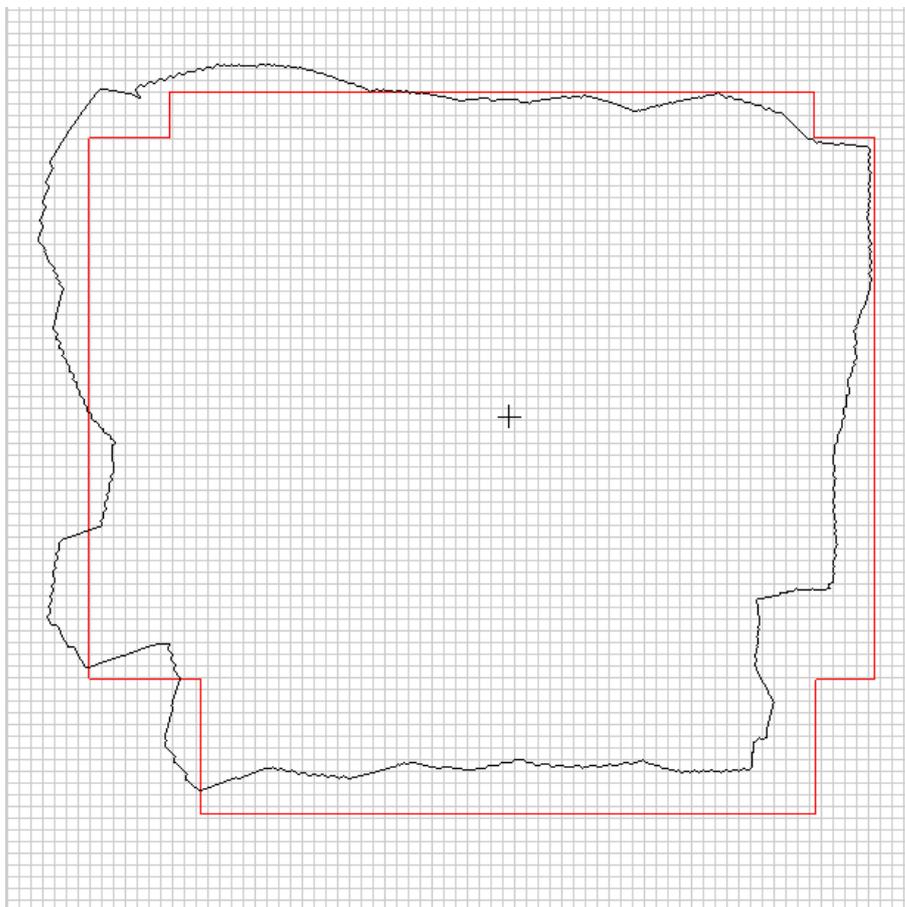


図 5.15 モデル修正後のセミナー室（鳥瞰図）

モデル修正前(図 5.14)では、正しく色により境界の抽出が行われているように見える部分でも、部屋が 20-40cm 程度大きくモデリングされている。これは、部屋の境界を抽出する際に、カメラのぼけによって境界があいまいになり、固定された閾値を用いて二値化した際にピクセルの境界位置が奥方向にずれてしまうため起こったものと考えられる。本実験で用いた全方位カメラでは、高さが 173.3cm のとき、画像中の俯角方向での 1 ピクセルのずれに対する実際の床面での距離のずれは、3m のときに約 2.5cm、4m のときに約 4cm、5m のときに約 6cm となる。本実験においては、カメラから壁までの距離は約 3m であるので、約 10pixel 程の

第5章 協調作業のための実空間モデリング手法

境界抽出誤差から，約 25cm の距離の違いが生じることになる．

次に，モデル修正後 (図 5.15) を見ると，右側と下側は実際の部屋よりも小さくモデリングされ，左側と上側が実際の部屋より若干大きくモデリングされており全体が左上に偏っているように見える．これは，ユーザの位置による照明条件の違いや，カメラのぼけによる影響から，足元位置の推定位置が場所によって異なったものと考えられる．図 5.16 に，推定された歩行軌跡を示す．ユーザは壁に沿って歩いたにもかかわらず，壁から離れた位置に軌跡が表示されている部分や，歩行できないような壁の近くにも軌跡ができていることがわかる．



図 5.16 ユーザの歩行軌跡

実験全体の結果をみると，実験で得られたモデルは，ユーザは壁に沿って歩いたにもかかわらず，軌跡が曲線を描くような形になっている．この原因として，ユーザはあまり壁に接近できないことや，高解像度画像を用いた画像処理を行わなければならないため人物抽出速度が間に合わないことがあげられる．

この実験に用いたシステムでは，歩行追跡時のフレームレートは約 1.3fps 程度である．そのため，ユーザの細かい移動が正しく追跡できていないと考えられる．この問題については，画像のメモリ間転送を減らす，テーブルを用いて各種変換を行うなどのチューニングにより解決できると考えられる．ユーザが壁にあまり接近できないという問題については，ユーザの足の大きさを利用し，抽出された

足元位置から壁の位置を推定することで解決できると考えられる。

5.6. インテリアデザイン実験

本章では，“ポンチ 3D” によってモデリングされた空間を用いたアプリケーションとして共有 MR インテリアデザインシステムを開発した。

5.6.1 実験環境

本章で紹介する共有 MR インテリアデザインシステムは，ウェアラブルコンピュータを装着したユーザがいる部屋を“ポンチ 3D” によってモデリングし，モデリングされた部屋を遠隔地の没入型ディスプレイ装置と共有し，ウェアラブルコンピュータを装着したユーザと没入型ディスプレイの中にいるユーザとの間でインテリアデザインシステムを行えるものである。

システムの構成を図 5.17 に示す。

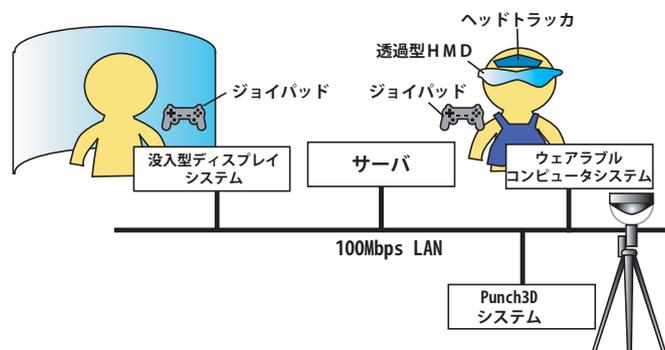


図 5.17 共有 MR インテリアデザインシステムの構成

ウェアラブルコンピュータシステムと没入型ディスプレイシステム，ポンチ 3D システムは互いに 100Mbps の LAN によって接続される。ウェアラブルコンピュータシステム，没入型ディスプレイシステム，ポンチ 3D システムのスペックを各々表 5.1, 表 5.2, 表 5.3 に示す。

表 5.1 ウェアラブルコンピュータシステムのスペック

CPU	Intel Pentium4 1.7GHz
Memory	1GB
Graphics	nVidia GeForce2MX
Display	Olympus FMD-240W
Camera	Watec WAT-240R
Head Tracker	InterSense InterTrax ²
Interface	SK-Net SmartJoyPAD3 + SONY PlayStation Joy-Pad

表 5.2 没入型ディスプレイシステムのスペック

CPU	SGI Onyx3800 28CPU(R14000 500MHz)
Memory	28GB
Graphics	6×InfiniteReality3
Display	没入型円筒スクリーン (6screens×1024×768pixels)
Interface	SK-Net SmartJoyPAD3 + SONY PlayStation Joy-Pad

表 5.3 ポンチ 3D システムのスペック

CPU	Intel PentiumIII 1.26GHz
Memory	1GB
Graphics	VIA ProSavage
Camera Interface	Euresys GrabLink Value
Omni-directional Camera	Pulnix TMC-1000CL + 未陰産業 双曲面ミラー

5.6.2 実験

実験は、同じ建物内にある情報科学研究科セミナー室と、没入型ディスプレイシステムとの間で行った。図 5.18 にウェアラブルコンピュータシステムとポンチ 3D システムが設置されたセミナー室の様子を示す。図 5.19 に没入型ディスプレイ内の様子を示す。セミナー室と没入型ディスプレイ内とは Microsoft NetMeeting による音声通話が行える。

この実験では、ウェアラブルコンピュータシステム側と没入型ディスプレイシステム側のユーザは、ジョイパッドを用いてポインタの移動、オブジェクトの生成、移動、回転、削除を行うことができる。没入型ディスプレイ側のユーザはジョイパッドを用いて視点の位置を移動させることができる。なお、ウェアラブルコンピュータシステム側のユーザは移動できないものとした。



図 5.18 セミナー室の様子



図 5.19 没入型ディスプレイ内の様子

協調作業を始める前に、部屋の中をユーザに歩いてもらい、屋内のモデルを構築した。構築されたモデルを図 5.20 に示す。本実験では、部屋内にウェアラブル

コンピュータシステムに用いる装置が設置された台車や、音声通信用の装置が設置されたテーブルが置いてあり、ユーザはその部分は歩行できないため、部屋の一部がくびれた形にモデリングされている。しかし、本実験では、ウェアラブルコンピュータ側のユーザの位置は固定し、協調作業を行う空間を図 5.20 における上部に限定しており、図中下部は用いなかった。そのため、モデルのくびれによる問題は生じない。図 5.21 にセミナー室におけるウェアラブルコンピュータシステムを装着したユーザとポンチ 3D システムの配置を示す。



図 5.20 ポンチ 3D によってモデリングされたセミナー室

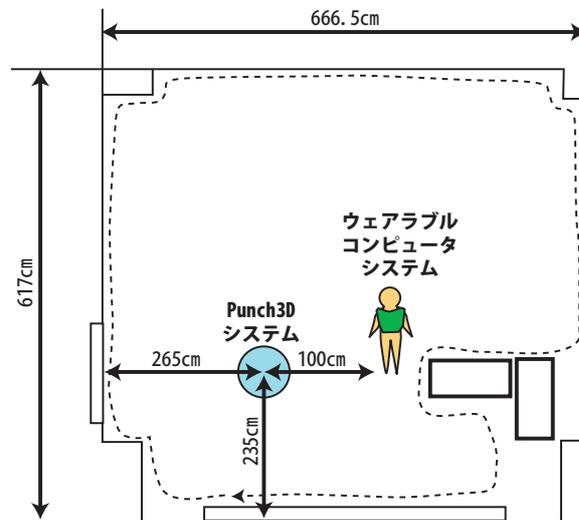


図 5.21 セミナー室におけるシステムの配置

次に、ウェアラブルコンピュータシステムを装着したユーザに図 5.21 に示す位置に立ってもらい、図中上部の空間を用いて協調作業を開始してもらった。協調作業の様子を図 5.22、図 5.23 に示す。

本実験では、ユーザに自由にインテリアデザインを行ってもらい、その結果を観察した。ユーザにはタスクとして、部屋の一角のインテリアデザインを行ってもらった。

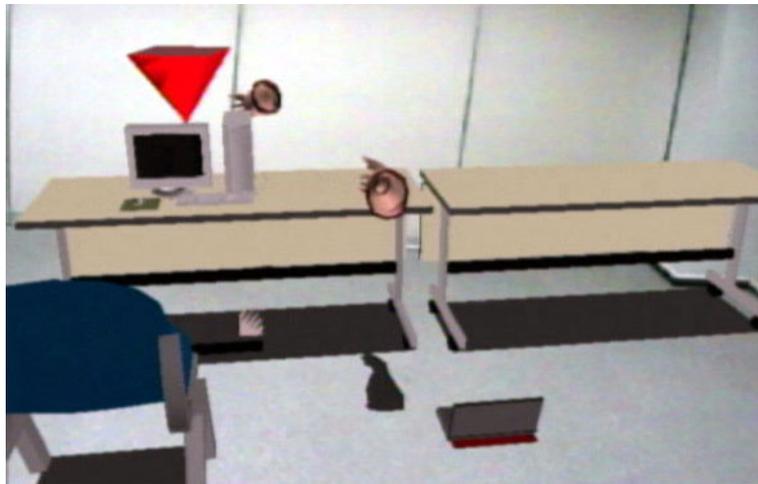


図 5.22 協調作業の様子 (ウェアラブルコンピュータシステム側)



図 5.23 協調作業の様子 (没入型ディスプレイシステム側)

図 5.22, 図 5.23 からわかるように, 現場の実際の部屋とそこに置かれた仮想物体である机の位置関係が, 遠隔地の没入型ディスプレイにおいて「ポンチ

3D」によってモデリングされた部屋とその中に置かれた仮想物体である机の位置関係と一致していることが確認できた。

しかし，没入型ディスプレイシステム側で配置したオブジェクトが，ウェアラブルコンピュータシステム側でユーザの目の前に出現してしまい，視界が覆われてしまうという，ウェアラブルコンピュータシステム側のユーザと，没入型ディスプレイシステム側のユーザが感じる距離感が異なっていると思われる現象が見られた．この問題の原因として，ウェアラブルコンピュータで用いた頭部装着型ディスプレイの視野角が小さすぎることが主な原因であると考えられる．また，没入型ディスプレイ側でステレオ視を行う際に，ユーザ毎に異なる視差の設定を行うことが難しいという問題があり，視差が適切ではなかったことも原因の一つと考えられる．

5.7. 考察

「ポンチ 3D」に関して，ユーザの足元位置推定結果の精度評価および，実際の部屋を用いたモデリング実験を行った．全方位カメラから得られた画像からユーザの足元座標を推定する実験では，カメラから 6m までの距離であれば床領域における足元位置の推定が行えることを確認した．カメラから 6m という距離は，部屋の中央にカメラを置いた場合，一辺 12m の部屋まで測れることになる．一辺 12m の広さは京間では 79 畳，江戸間では 93.2 畳であり，一般的な屋内環境においては十分実用的な計測可能範囲であると考えられる．

また，実際の部屋を用いた現場における実験をもとに，ユーザの歩行から壁と床からなるモデルを生成する実験を行い，初期モデルの構築と，インタラクティブな初期モデル修正によって，現場の実空間をインタラクティブにモデリングできることを確認した．

しかし，実験の結果，モデル修正時において足元の追跡速度が遅いため部屋のディテールを取りこぼしてしまうという問題があること，ユーザがあまり壁に近づくことができないために実際の部屋よりも小さくモデリングされてしまうという問題があること，ユーザがカメラに近づいたときにはユーザの足の動きが軌

跡に影響を与えること、カメラと対象までの位置関係によって、モデリングされた壁と床との境界位置が揺らぐことがあることがわかった。最後の問題については、照明条件やカメラのぼけがモデリング精度に大きな影響を与えていると考えられる。

足元の追跡速度が遅いことについては、演算をテーブルを用いて行う、ウェアラブルコンピュータになんらかの位置センサを取り付け、その情報を用いて足元探索範囲を絞るなどの改善策が考えられる。ユーザの足の動きが軌跡に影響を与えているという問題についても、ウェアラブルコンピュータの位置センサによって位置を補正することで解決できると考えられる。また、実際の部屋より小さくモデリングされてしまうという問題については、ユーザの姿勢と距離をもとに、足の大きさを考慮した距離補正を行うことで解決できると考えられる。カメラのぼけについては、より被写界深度の深いカメラを使うことで解決できると考えられる。

また、インテリアデザインシステムを用いた実験では、現場における実際の部屋と追加された仮想物体との位置関係が、遠隔地の没入型ディスプレイシステム側における「ポンチ 3D」によってモデリングされた空間と仮想物体との位置関係と一致していることが示され、「ポンチ 3D」でモデリングされた空間の中で空間的な協調作業が行えることを確認できた。しかし、ユーザが感じる距離感が、ウェアラブルコンピュータシステム側と没入型ディスプレイシステム側との間で異なっていると思われる現象が見られた。この問題については、頭部装着型ディスプレイの視野角が狭いことと、没入型ディスプレイのステレオ表示時における視差の設定が適切ではなかったことが原因であると考えられる。

本論文における「ポンチ 3D」のモデル構築実験では、モデリング対象空間には家具などの物体が存在しない状況を想定していた。対象空間に物体が存在する場合においては、物体の周りを歩行しモデルを修正することにより、部屋の淵にある物体については壁とみなして大まかなモデリングを行うことは可能である。しかし、このようにしてモデリングされた物体は、対象空間の壁と同一の物体であるとみなされ、ユーザの操作対象にすることはできない。作業空間中に協調作

業中に操作したい物体が存在する場合は，対象空間と，対象空間に存在する物体を分離するためのセグメンテーションの問題が発生する．

「ポンチ 3D」では，対象空間を壁と床からなるモデルでモデリングするが，現在は一方向において壁は一つのみ存在すると仮定してモデリングしている．この壁の枚数を複数個存在することを許すことで，対象空間に物体が存在する場合でも，物体をビルボードのようなテクスチャ画像が貼り付けられた板によって表現することが可能となると考えられる．このビルボードをどのようにして作るかというセグメンテーションの問題については，今後解決していかなければならない課題であるが，解決方法の一つとして，歩行によるモデル修正のメカニズムを応用し，ユーザが物体の周りを歩き回り，その様子を全方位カメラシステムが追跡し，システムが歩行軌跡から物体の存在領域を確定しビルボードとして分離するという方法を用いることができると考えられる．

4章で提案したプロトコルとともに用いる場合，対象空間に存在する物体の位置と姿勢を検出する必要がある．この問題については，石川らによる立体マーカ [58] など，オブジェクトの識別情報と姿勢をカメラにより撮影されたマーカ画像によって得ることができる技術を「ポンチ 3D」に応用することで，物体の位置や姿勢などを実時間で取得でき協調作業に用いることができると考えられる．具体的には，協調作業中に操作対象となりうる物体全てにマーカを貼り付け「ポンチ 3D」で用いている全方位カメラを用いてマーカを撮影することで実物体の位置や回転の検出を行うことができると考えられる．

5.8. 結論

本章では，ウェアラブルコンピュータを用いた実用的な空間共有のための，屋内空間のモデリング手法「ポンチ 3D」を提案した．本手法は，ユーザが歩き回ることによってインタラクティブに協調作業に必要な場所のモデリングを行うという「計測・モデリングプロセスにユーザが自由に介入できる」という特徴をもつ．

実験では，ユーザの足元位置推定結果の精度評価を行い，6m までの距離であれば，実用的な足元位置の推定が行えることが示された．また，実際の部屋にお

けるモデリング実験では、初期モデルの生成と、インタラクティブなモデル修正という二つのステップにより、現場の空間を大まかに再現できるモデルを生成できることが示された。

一方、いくつかの問題点が明らかになった。モデル修正ステップにおいて、ユーザの足元位置の追跡速度が遅いため部屋のディテールが再現できないという問題がある。また、生成されたモデルについても、ユーザがあまり壁に接近できないため、部屋がやや小さくモデリングされてしまうという問題がある。さらに、方位によって足元追跡精度に揺らぎがあることがわかった。

現在の「ポンチ3D」では、全方位カメラによる画像のみから足元位置を測定している。しかし、上で考察した問題を解決し、より高速な足元追跡のためには、ウェアラブルコンピュータの位置センサなどの情報を用いるという手法も検討すべきことであると考えられる。

ウェアラブルコンピュータを用いた位置計測については、ウェアラブルコンピュータに全方位カメラを取り付けユーザの位置を推定する手法 [59] や、加速度センサにより歩数を計ることによってユーザの位置を推定する手法 [60]、ウェアラブルコンピュータに取り付けられたカメラ、加速度計、歩数計、傾斜計などの複数のセンサを組み合わせるユーザ位置を推定する手法 [61] などがこれまで提案されており、これらの手法は「ポンチ3D」でも用いることができると考えられる。

第6章

考察

実空間共有型 MR システムの構築に際して、本研究では、二つの技術「複製 - 選択プロトコル」および「ポンチ 3D」の提案・実装を行った。この二つの技術に共通することは、テクノロジーによってコンピュータが全ての作業を行ってくれるのではなく、人間がほんの少しの手助けをコンピュータに対して行うことで、これまで困難とされてきた問題を、劇的に単純化できるということである。

「複製 - 選択プロトコル」は、仮想空間と現実空間が混在した環境でユーザに快適で公平な協調作業環境を提供することを目的として、二人のユーザが同時にオブジェクトを操作した場合や、遠隔地側から現場の現実オブジェクトを操作した場合に起こるオブジェクトの状態の矛盾を、複製とユーザ間の対話により解決することで、快適な協調作業環境を実現できる。プロトタイプシステムを用いた場合のユーザの操作性および、従来手法との通信量の比較から、提案プロトコルは少ない通信量でユーザに円滑な操作性を提供できることが示された。一方、提案プロトコルを実装したアプリケーションを用いた実験から、ユーザインタフェースの設計もプロトコルの評価のために重要な要素であることが示され、今後本プロトコルは、空間管理手法だけではなく、ユーザインタフェースも含めて評価される必要があることが明らかになった。また、本プロトコルが使用しているクライアント - サーバモデルはサーバに負荷が集中するためスケーラビリティに欠けるという問題があるため、最近の仮想空間共有システムでは用いられていない。しかし、本プロトコルの特徴である参加者の操作が必ず受理されるという特性は、分散環境に拡張が容易である。提案プロトコルは、仮想空間と現実空間が混在した環境で協調作業する場合における、情報共有の一つの実現例である。

「ポンチ 3D」は、ユーザが歩き回ることによってインタラクティブに協調作業に必要な場所のモデリングを行うという「計測・モデリングプロセスにユーザが自由に介入できる」という特徴をもち、環境を壁と床からなる簡素なモデルで計測・モデリングできる。実験の結果、足元の追跡速度が遅いため部屋のディテールを取りこぼしてしまうという問題、ユーザがカメラに近づきすぎた場合、ユーザの足の動きがモデル構築に影響してしまうという問題、ユーザがあまり壁に近づくことができないために実際の部屋よりも小さくモデリングされてしまうという問題があることがわかった。また、画像から足元の位置や壁の境界が正しく抽出されている場合においても、正しくモデリングできない場合があることがわかった。これは、カメラのぼけや、人物の足の位置における照明条件による影響がモデリング精度に影響を与えていると考えられる。しかし、環境を実時間でモデリングし、歩行により修正できることが実験により示され、いつでもどこでも環境を計測・モデリングでき、遠隔地に伝送できることが示された。「ポンチ 3D」によって構築されたモデルによって、現実空間と仮想空間の位置関係を用いた協調作業を遠隔地間で行えることが示された。

本論文で提案した実空間共有型 MR を用いたフレームワークには、未だ開発すべき技術がいくつか存在する。

現在の「ポンチ 3D」では、対象空間とその中に置かれている実物体を区別することなく、環境を壁と床からなるモデルとしてモデリングする。そのため、実物体を交えた協調作業に用いる場合には、物体のセグメンテーションや、物体の移動や回転などを検出する必要がある。現実物体のセグメンテーションの問題については、ユーザが家具の周りを歩行し全方位カメラシステムが歩行を追跡することで、ユーザの歩行軌跡から物体の床面における存在位置を決定し、物体をビルボードとして分離するなどの手法が考えられる。また、実物体の移動や回転などを検出するためには、石川らによる立体マーカ [58] など、識別情報と位置、姿勢情報を取り出すことができるマーカを実物体に取り付け、カメラでそのマーカを追跡することで、実物体の移動を追跡できると考えられる。

現実空間側における現実オブジェクトの操作を遠隔地に伝送するために必要となる技術として、現実オブジェクトの移動を検出する方法がある。この方法につ

いては、上述の立体マーカを家具に付加し、全方位カメラでマーカ位置を検出し位置を同定する手法を用いることで実現できると考えられる。また、現在ユビキタスコンピューティング環境のインフラが整備されつつあり、将来は小型のコンピュータが対象オブジェクトに埋め込まれ、それらのオブジェクトが位置情報を出力できるようにすることも、解決策の一つであると考えられる。

遠隔地の現実オブジェクトに対応する仮想オブジェクトを移動させたとき、遠隔地の現実オブジェクトが移動しないという問題があるが、本論文では、操作対象の現実オブジェクトを仮想オブジェクトとして複製し、遠隔地の人間が、複製された仮想オブジェクトを見ながら、現実オブジェクトを指定された位置まで動かすという方法でこの問題を解決している。この問題に対しては、最終的に何らかの手法を用いてオブジェクトを移動させる手段があれば解決できると考えられる。

また、“いつでもどこでも” 協調作業を行うためのウェアラブルコンピュータの実現に関する技術、人間の位置と姿勢の検出技術、および、インタフェース技術は重要である。論文中では、位置と姿勢の検出には磁気式のセンサと方位センサを用い、インタフェースにはマウスやジョイパッドを用いたが、ユーザの体に全てを装着することはできていないため、システムはウェアラブルであるとはいえない。ウェアラブルコンピュータの実現に関する問題は、本研究で提案する実空間型 MR システムの評価にも大きく影響を与える問題であり、重要な問題である。この問題については、より拘束感の少ない超小型センサの開発や、人体の計測技術の研究によって、近い将来解決できるようになるだろう。拘束感の少ないインタフェースの実現のためには、上で述べた石川らによる立体マーカを実際の家具の代わりに用いることも有効な手段であると考えられる。また、現在のウェアラブルコンピュータは、小型軽量化を第一の目標にしているが、MR 空間の共有というアプリケーションの実現には、より高い計算能力を持っていることが望ましい。小型軽量化の問題と計算能力の問題を両立させることは難しいが、現在、高度に発達している無線ネットワーク技術を用いて、計算能力をネットワークを介して分散させることで小型軽量化と計算能力の向上を両立できるようになると考えられる。

第7章

結論

本研究では、小説や映画の中で登場するような、自分自身の体を遠隔地に転送し、遠くの人と協調作業を行える物質転送装置を目指し、現在の技術で同等の効果をもたらすために、仮想現実感 (Virtual Reality: VR)、拡張現実感 (Augmented Reality: AR)、拡張仮想現実 (Augmented Virtuality: AV) 技術、複合現実感 (Mixed Reality: MR) 技術、没入型環境提示技術 (Immersive Projection Technology: IPT)、および、ウェアラブルコンピュータ技術 (Wearable Computer) を用いて、現実空間のウェアラブルコンピュータユーザと遠隔地の没入型ディスプレイ装置との間で MR 空間を共有するという実空間共有型 MR を提案した。

実空間共有型 MR は、従来の三次元空間共有システムや遠隔地間の MR 空間共有システムで問題となる、ユーザが実空間で起こる問題に対して即座に対応できないという問題を解決できるフレームワークである。

現在、あらゆる情報がコンピュータの中に取り込まれ仮想化されつつある。協調作業の本質を考えると、コンピュータの中に必要な情報を全て取り込んでおけば、人間は遠隔地に直接赴く必要もないだろう。しかし、コンピュータの中に取り込むことができない情報もまだ存在し、また、人間が遠隔地に直接移動し、遠隔地の人間とともに一緒に作業を行う必要性も、まだなくなることはないだろう。本研究で提案した実空間共有型 MR は、従来の三次元空間共有システムや、遠隔地間の MR 空間共有のように、コンピュータ内部だけで完結する作業だけではなく、人間が実空間で実際に作業を行うことを前提に、その作業を支援できるものとして考案したものである。

実空間共有型 MR を実現するために、“複製 - 選択プロトコル”、および、“ポン

チ3D”という二つの新しい技術を開発した。“複製 - 選択プロトコル”によって、複数のユーザが協調作業を行う際に発生するオブジェクト操作の競合問題を、オブジェクト複製によって解決することが可能となった。さらに、MR空間を共有するにあたって問題となる、遠隔地では現実物体である仮想物体を操作した際に起こる競合をも複製によって解決することが可能となった。“ポンチ3D”によって、作業環境となる現実空間を遠隔地と共有する際に必要となる、現実空間の簡素かつインタラクティブなモデル化が可能となった。

本論文で提案された実空間共有型MRシステムを実現するための技術は、人と人の中で“協調作業”を行うために考え出されたものである。これまで数々の研究機関で開発された技術を組み合わせれば、筆者が述べるような空間共有は実現可能かもしれない。しかし、それらの技術の多くは“協調作業”に必ずしも適しているとは限らない。例えば計測技術では、精密に誤差のない測定が行えるかが重要となる、また、ネットワーク技術では、いかに速く間違いなくデータがやり取りできるかが重要である。

協調作業の主役は人間である。もしユーザ同士が“協調作業”を問題なく遂行できるのであれば、それほど厳密な測定は必要ないかもしれない。また、それほど高速なネットワークは必要ないかもしれない。

本研究で提案する各技術は、実用的な協調作業システムの構築に必要な技術である。「ポンチ3D」は、計測のための計測技術ではなく、ユーザが計測のプロセスに介入できる新しい“協調作業”のための計測技術である。「複製 - 選択プロトコル」は、複数のユーザ間でのトランザクションの競合に着目し、その競合を円滑に解決できるというものである。

本論文では、上述の技術を元に、共有MRインテリアデザインシステムを構築し、実空間共有型MRシステムと、各技術の有用性について検証した。

現段階では、まだ不足してる技術がいくつかあるが、これらの技術の開発も今後興味深いテーマとなることと考えられる。

この研究をもとに、今後、研究レベルを超えた、より現実的な問題に対処可能な協調作業支援システムの開発が進むことを期待する。

参考文献

- [1] Gene Roddenberry: STAR TREK, Paramount Television, 1966.
- [2] 藤子・F・不二雄: のび太漂流記, ドラえもん第6巻, 小学館, 1975.
- [3] CRL News 3次元空間共有通信 – Internet-3D –:
http://www2.crl.go.jp/kk/e412/CRL_News/0008/internet.html.
- [4] 日高俊明 (編): VR革命-仮想を現実とした技術者たち, オーム社, 2000.
- [5] 舘暲(編): バーチャルリアリティの基礎1人工現実感の基礎, 培風館, 2000.
- [6] 舘暲, 廣瀬通孝 (編): バーチャル・テック・ラボ, 工業調査会, 1992.
- [7] 山本裕之: 複合現実感 – 現実世界の増強と電子化, 日本機械学会誌, Vol. 102, No. 971, pp. 9–11, 1999.
- [8] Paul Milgram and Herman Colquhoun Jr: A Taxonomy of Real and Virtual World Display Integration, In *Mixed Reality - Merging Real and Virtual Worlds*, pp. 1–16, Y.Ohta, H.Tamura, Ohmsha(Tokyo) and Springer Verlag(Berlin), 1999.
- [9] 田村秀行: 複合現実感システムの課題と可能性 ~ 画像センシングの観点から, 第5回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp. 169–178, 1999.
- [10] MicroOptical Corporation:
<http://www.microopticalcorp.com/>.
- [11] 日経コンピュータグラフィックス編: バーチャルリアリティからフルスケールリアリティへ, 日経コンピュータグラフィックス, 1999.

参考文献

- [12] 澤田一哉: 小特集 VR の新たなる展開 2. 高臨情感ディスプレイ 2-1 多様化する降臨情感没入形視覚ディスプレイ, 映像情報メディア学会誌, Vol. 53, No. 7, pp. 927–931, 1999.
- [13] Carolina Cruz-Neira, Daniel J.Sandin, and Thomas A.DeFanti: Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality:The Design and Implementation of the CAVE, *In Proceedings of ACM SIGGRAPH'93*, pp. 135–142, 1993.
- [14] 小木哲朗: 没入型ディスプレイとその応用, 日本機械学会誌, Vol. 102, No. 971, pp. 12–15, 1999.
- [15] Ryuhei Tenmoku, Masayuki Kanbara, and Naokazu Yokoya: A wearable augmented reality system using positioning infrastructure and a pedometer, *In Proceedings of IEEE International Symposium on Wearable Computers*, pp. 110–117, 2003.
- [16] 佐藤宏介: 複合現実感とウェアラブル, 第50回システム制御情報講習会「ウェアラブルコンピュータとその周辺 - 観光から医療まで, その実体と応用」, pp. 35–45, 2001.
- [17] Wearable Computing FAQ:
<http://www.media.mit.edu/wearables/lizzy/FAQ/FAQ.txt>.
- [18] 中井真嗣: ウェアラブル・コンピュータの実現と応用, 日本機械学会誌, Vol. 102, No. 971, pp. 19–22, 1999.
- [19] 石井裕 (編): ヒューマンコミュニケーション工学シリーズ CSCW とグループウェア, オーム社, 1994.
- [20] Sandeep Singhal and Michael Zyda, editors: *Networked Virtual Environments Design and Implementation*, Addison Wesley, 2000.
- [21] James Calvin, Alan Dickens, Bob Gaines, Paul Metzger, Dale Miller, and Dan Owen: THE SIMNET VIRTUAL WORLD ARCHITECTURE, *In Proceedings of the IEEE VRAIS'93*, pp. 450–455, 1993.

-
- [22] PC-Based Technology Invades Army Simulation:
http://www.peostri.army.mil/PRODUCTS/PC_BASED_TECH/.
- [23] Chris Shaw and Mark Green: The MR toolkit peers package and experiment,
In Proceedings of IEEE VRAIS'93, pp. 18–22, 1993.
- [24] Emmanuel Frècon and Mårten Stenius: DIVE: A scalable network architecture for distributed virtual environments, *Distributed Systems Engineering Journal (special issue on Distributed Virtual Environments)*, Vol. 5, No. 3, pp. 91–100, 1998.
- [25] The DIVE Home Page:
<http://www.sics.se/dive/>.
- [26] Jason Leigh and Thomas A. Defanti: CAVERN: A Distributed Architecture for Supporting Scalable Persistence and Interoperability in Collaborative Virtual Environments, *In Virtual Reality: Research, Development and Applications*, Vol. 2.2, pp. 217–237, 1996.
- [27] Jason Leigh, Andrew E, Thomas A. Defanti, and Maxine Brown: A Review of Tele-Immersive Applications in the CAVE Research Network, *In Proceedings of IEEE VR '99*, pp. 180–187, 1999.
- [28] CAVERNsoft generation 2:
<http://www.evl.uic.edu/cavern/cavernG2/>.
- [29] WORK SHOP:
http://www.ddd.co.jp/tech_sol/tech_imaginary_share.htm.
- [30] 3D-IES 製品紹介:
<http://www.3d-ies.com/product/3d-ies.html>.
- [31] 清川清: 共有仮想空間における仮想物体の操作補助手法の研究 – 協調型仮想物体モデラ VLEGO II の開発を通して –, PhD thesis, 奈良先端科学技術大学院大学, 1998, NAIST-IS-DT9661007.

参考文献

- [32] Jun Rekimoto: Transvision: A hand-held augmented reality system for collaborative design, *Virtual Systems and Multi-Media (VSMM)'96*, 1996.
- [33] 竹村雅幸, 大田友一: 協調型複合現実環境のための人物映像加工によるアイコンタクトの復元, *電子情報通信学会 信学技報*, Vol. 102, No. 554, pp. 85–90, 2003.
- [34] 大島登志一, 佐藤清秀, 山本裕之, 田村秀行: AR^2 ホッケー: 協調型複合現実感システムの実現, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 3, No. 2, pp. 55–60, 1999.
- [35] Mark Billinghurst, Jerry Bowskill, and Jason Marphett: WearCom: A Wearable Communication Space, *In Proceedings of CVE'98*, 1998.
- [36] 宮里勉, 岸野文郎, 寺島信義: 臨場感通信会議における参加者の対面状況の保持特性の評価, *電子情報通信学会論文誌 A*, Vol. J79-A, No. 2, pp. 518–526, 1996.
- [37] Tetsuro Ogi, Toshio Yamada, Ken Tamagawa, Makoto Kano, and Michitaka Hirose: Immersive telecommunication using stereo video avatar, *IEEE VR2001*, pp. 45–51, 2001.
- [38] Ramesh Raskar, Greg Welch, Matt Cutts, Adam Lake, Lev Stesin, and Henry Fuchs: The Office of the Future: A Unified Approach to Image-Based Modeling and Spatially Immersive Displays, *In Proceedings of ACM SIGGRAPH'98*, pp. 179–188, 1998.
- [39] W.R. スティーヴンス, 篠田陽一 (編): UNIX ネットワークプログラミング 第2版 Vol.1, ピアソン・エデュケーション, 1999.
- [40] A.S. タネンバウム (編): 分散オペレーティングシステム, プレンティスホール出版, 1996.
- [41] 分散プログラミング:
<http://www.hlla.is.tsukuba.ac.jp/yas/sie/pdsoft-2001/2001-12-20/>.

-
- [42] 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳 (編): コンピュータビジョン, 新技術コミュニケーションズ, 1994.
- [43] Michitaka Hirose, Tomohiro Tanikawa, and Takaaki Endo: Building a virtual world from the real world, In *Mixed Reality (Edited by Y.Ohta)*, pp. 183–197, Ohmsha,Ltd, 2001.
- [44] 八木康史: 全方位ビジョン : センサ開発と応用の最新動向, 情報処理学会論文誌, Vol. 42, No. SIG13(CVIM3), pp. 1–18, 2000.
- [45] コニカミノルタ 計測機器:
<http://www2.konicaminolta.jp/products/industrial/instrument/vivid/index.html>.
- [46] ライカジオシステムズ株式会社:
<http://www.leoca-geosystems.com/>.
- [47] リーグルジャパン株式会社:
<http://www.riegl-japan.co.jp/>.
- [48] Rodger Lea, Pierre Guillaume Raverdy, Yasuhiko Honda, and Kouichi Matsuda: Scaling a shared virtual environment,
<http://www.csl.sony.co.jp/person/rodger/ICDCS/icdcs2.html>.
- [49] Wolfgang Broll: Distributed Virtual Reality for Everyone – a Framework for Networked VR on the Internet, In *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Annual International Symposium 1997*, IEEE Computer Society Press, pp. 121–128, 1997.
- [50] Tomi Korpipää, Koichi Minami, Tomohiro Kuroda, Yoshitsugu Manabe, and Kunihiro Chihara: Shared virtual reality interior design system, *The Tenth International Conference on Artificial Reality and Tele-existence*, pp. 124–131, 2000.

参考文献

- [51] 横矢直和, 茶園篤, 山澤一誠, 竹村治雄: 全方位ステレオ視による3次元情報の獲得, 日本工業出版「画像ラボ」, 第9巻, 第6号, pp. 15-19, 1998.
- [52] 島村潤, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和: 全周実画像とCGモデルの合成による仮想環境の構築, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2000), Vol. 2, pp. 367-372, 2000.
- [53] 長原一: 全方位視覚センサを用いた高解像度3Dモデリング, 情報処理学会論文誌, Vol. 42, No. SIG13(CVIM3), pp. 90-98, 2000.
- [54] Ho-Chao Huang and Yi-Ping Hung: Panoramic Stereo Imaging System with Automatic Disparity, *Graphical Models and Image Processing*, Vol. 60, No. 3, pp. 196-208, 1998.
- [55] 棚橋英樹, 山本和彦, 桑島茂純, 丹羽義典: 全方向ステレオシステムの開発, 第6回画像センシングシンポジウム SSII2000, pp. 145-150, 2000.
- [56] Camillo J. Taylor: VideoPlus: A Method for Capturing the structure and Appearance of Immersive Environments, *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 8, No. 2, pp. 171-182, 2000.
- [57] 寺沢征彦, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和: 複数の全方位画像センサを用いた遠隔監視システムにおける複数移動物体の存在領域推定, 電子情報通信学会信学技報 PRMU2000-195 (2000-02), pp. 17-22, 2001.
- [58] 安室喜弘, 石川悠, 井村誠孝, 南広一, 眞鍋佳嗣, 千原國宏: 立体マーカを用いた実空間における仮想物体の調和的表現～インタラクティブMRインテリアデザイン～, 映像情報メディア学会誌, Vol. 57, No. 10, pp. 1307-1313, 2003.
- [59] Wasinee Rungsarityotin and Thad E.Starner: Finding location using omnidirectional video on a wearable computing platform, *In Proceedings of 4th International Symposium on Wearable Computers*, pp. 61-68, 2000.

- [60] Seon-Woo Lee and Kenji Mase: Incremental Motion-Based Location Recognition, *In Proceedings of 5th International Symposium on Wearable Computers*, pp. 123–130, 2001.
- [61] 興梠正克, 蔵田武志: ウェアラブルカメラと慣性センサ群のデータ統合に基づくパーソナルポジショニング, 電子情報通信学会 信学技報 第12回複合現実感研究会, PRMU2002-180, pp. 67–72, 2003.

謝 辞

奈良先端科学技術大学院大学において研究活動に携わるきっかけを与えてくださり、さらに本研究を進めるにあたり終始多大なるご指導をいただきました、情報科学研究科 千原 國宏 教授に深く感謝御礼申し上げます。また、本研究を遂行するにあたり、副指導教官として数多くの貴重なご助言をいただきました情報科学研究科 横矢 直和 教授に深く感謝御礼申し上げます。また、日頃より多大なご指導およびご助言をいただきました情報科学研究科 眞鍋 佳嗣 助教授に深く感謝御礼申し上げます。研究発表や日頃の研究活動において多くの有益なご助言をいただきました前情報科学研究科 大城 理 助教授(現・大阪大学 基礎工学研究科 教授)に深く感謝御礼申し上げます。

研究者としての生き方を身を持って示していただき、日ごろから数多くのご助言をいただきました、前奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 黒田 知宏 助手(現・京都大学附属病院 医療情報科 講師)、前情報科学研究科 土居 元紀 助手(現・大阪電気通信大学 講師)、前情報科学研究科 金谷 一郎 助手(現・大阪大学 基礎工学部)に厚く感謝御礼申し上げます。大変多忙であるにもかかわらず、多くの時間を費やし本研究に協力していただきました。情報科学研究科 井村 誠孝 助手、安室 喜弘 助手に感謝御礼申し上げます。また、様々な知識を授けていただき、数多くの機会に貴重な助言をいただきました、情報科学研究科の先生方に感謝いたします。

研究活動中、多くのご支援をいただきました、奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 佐々木 博史 氏、増田 泰 氏、末永 貴俊 氏、田畑 慶人 氏(現・京都医療技術短期大学)をはじめとする先輩方、共に楽しく有意義な学校生活を送らせていただきました、小塚 淳氏(現・大阪大学)、井村 誠孝 氏、村上 満佳子 氏、鎌田 久美 氏、守随 辰也 氏(現・デジタル・メディア・ラボ)、須田 淳一 氏(現・

謝 辞

シャープ)をはじめとする同僚の方々に深く感謝いたします。また、ミーティング、研究発表練習、実験などで多くのご協力をいただきました小島 佳幸氏(現・パナソニックモバイルコミュニケーションズ)、藤本 昌宏氏、William Rieken氏をはじめとする像情報処理学講座の方々に深く感謝いたします。像情報処理学講座において、日頃から暖かい心配りをしていただきました、櫛本 季子 元秘書、川本 桂子 秘書に深く感謝いたします。

人生の先輩として、様々な貴重な体験をさせていただく機会を与えていただき、数多くの手本を示していただきました、石橋 伸之氏、三洋電機 村田 治彦氏に感謝御礼申し上げます。共同研究者として、システムを完成させるにあたり多大な協力をいただきました VTT Electronics Tomi Korpipää氏(現・NOKIA)、石川 悠氏(現・松下ソフトリサーチ)、通信・放送機構 清原 聡氏、桑田 貴徳氏、佐藤 弘之氏に深く感謝いたします。

奈良先端科学技術大学院大学への進学を志す上で、大学院で必要な多くの基礎知識、助言をいただきました、倉敷芸術科学大学産業科学技術学部ソフトウェア学科(現・コンピュータ情報学科)の梶浦 文夫 助教授、小林 和真 教授をはじめとする先生方に深く感謝いたします。

最後に、長きにわたる学生生活を送るにあたり、数え切れないほどの支援をいただきました家族に厚く御礼申し上げます。

付録

アンケート 質問項目

質問1

- 相手と意見が食ったときにスムーズに解決できましたか？
(できない 1 2 3 4 5 できた)
- 相手に自分の求める配置をうまく伝えることはできましたか？
(できない 1 2 3 4 5 できた)

質問2

- 相手と意見が食ったときにスムーズに解決できましたか？
(できない 1 2 3 4 5 できた)
- 相手に自分の求める配置をうまく伝えることはできましたか？
(できない 1 2 3 4 5 できた)
- 相手と意見が食い違ったときのオブジェクトの複製に違和感は感じましたか？
(大丈夫 1 2 3 4 5 感じた)
- どちらの実験の方が快適にデザイン作業ができましたか？
(実験1 1 2 3 4 5 実験2)

質問3

- 相手に自分の求める配置をうまく伝えることができましたか？
(できない 1 2 3 4 5 できた)
- 快適にデザイン作業ができましたか？
(できない 1 2 3 4 5 できた)

研究業績

論文

1. 南広一, Tomi Korpipää, 黒田知宏, 眞鍋佳嗣, 千原國宏: 分散デザイン作業支援のための空間管理手法, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.4, No.3, pp.159-165, 2002. (4章)
2. 安室喜弘, 石川悠, 井村誠孝, 南広一, 眞鍋佳嗣, 千原國宏: 立体マーカを用いた実空間における仮想物体の調和的表現 ~ インタラクティブ MR インテリアデザイン, 映像情報メディア学会誌, Vol.53, No.10, pp.1307-1313, 2003.

国際発表

1. Koichi Minami, Yoshihiro Yasumuro, Masataka Imura, Tomohiro Kuroda, Yoshitsugu Manabe and Kunihiro Chihara: Shared MR Space Construction with Wearable PC Users, 2nd CREST Workshop on Advanced Computing and Communicating Techniques for Wearable Information Playing, pp.66-71, 2003. (3章, 4章, 5章)
2. Koichi Minami, Tomi Korpipää, Masataka Imura, Yoshihiro Yasumuro, Tomohiro Kuroda, Yoshitsugu Manabe and Kunihiro Chihara: A Distributed MR Transporter for Networked Collaboration, International Workshop on Entertainment Computing Workshop Note, pp.487-494, 2002. (3章, 4章, 5章)
3. Koichi Minami, Tomi Korpipää, Tatsuya Shuzui, Tomohiro Kuroda, Yoshitsugu Manabe and Kunihiro Chihara: Collaborative Work Support on Networked Heterogeneous Platforms - Shared Augmented Interior Design Space -, Proceedings of HCI International 2001, Vol.1, pp.524-527, 2001. (3章, 4章)
4. Koichi Minami, Tomi Korpipää, Tomohiro Kuroda, Yoshitsugu Manabe

- and Kunihiro Chihara: An Interior Design System on Shared AR Space -A lock-free Communication Protocol for Smooth Interaction-, Proceedings of the International Symposium on Mixed Reality, pp.137-138, 2001. (3章, 4章)
5. Tomi Korpipää, Koichi Minami, Tomohiro Kuroda, Yoshitsugu Manabe and Kunihiro Chihara: Shared Virtual Reality Interior Design System, The Tenth International Conference on Artificial Reality and Tele-existence, pp.124-131, 2000. (4章)
 6. Tomohiro Kuroda, Takatoshi Suenaga, Koichi Minami, Tomi Korpipää, Hiroshi Sasaki, Yoshitsugu Manabe, Osamu Oshiro and Kunihiro Chihara: Shared Augmented Reality for Remote Work Support, In Proceedings of IFAC-MIM 2000 Symposium on Manufacturing, Modeling, Management and Control, pp.339-343, 2000. (3章, 4章)
 7. Osamu Oshiro, Junichi Suda, Koichi Minami, Mikio Suga, Kotaro Minato and Kunihiro Chihara: 3D Brain Vessel Visualization on an Immersive Projection System, Proceeding of 6th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia, pp.498-506, 2000.

国内発表

1. 南広一, 井村誠孝, 安室喜弘, 黒田知宏, 眞鍋佳嗣, 千原國宏: Punch3D - 屋内環境のインタラクティブモデリング手法, 第47回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp.291-292, 2003. (3章, 5章)
2. 南広一, 井村誠孝, 安室喜弘, 眞鍋佳嗣, 千原國宏: 全方位カメラと装着型計算機の協調による実時間環境モデリング手法, 平成14年度情報処理学会関西支部大会講演論文集, pp.27-30, 2002. (3章, 5章)
3. 南広一, 井村誠孝, 安室喜弘, 黒田知宏, 眞鍋佳嗣, 千原國宏: 空間共有のための全方位画像センサを用いた実空間即時モデル化手法, 第46回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp.349-350, 2002. (3章, 5章)
4. 南広一, 佐々木博史, 黒田知宏, 眞鍋佳嗣, 千原國宏: 共有AR空間における協調作業のための一貫性制御プロトコル, 第45回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp.291-292, 2001. (3章, 4章)
5. 南広一, Tomi Korpipää, 黒田知宏, 眞鍋佳嗣, 千原國宏: 共有AR空間を用いた分散協調作業支援-Shared Augmented Interior Design Space-, 日本バーチャリアリティ学会第5回大会論文集, pp.323-326, 2000. (3章, 4章)

6. 南広一, 佐々木博史, 黒田知宏, 眞鍋佳嗣, 千原國宏: 共有 AR 空間を用いたインテリアデザインシステムの提案, 第 44 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp.435-436, 2000. (3 章, 4 章)

その他

1. 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 像情報処理学講座 戦国チーム (小塚淳, 南広一, 守随辰也, 田畑慶人, 井村誠孝): 騎馬^式武者^式~きばきばむしゃむしゃ~, 第 8 回学生対抗手作りバーチャルリアリティコンテスト 岐阜 VR 大賞, 2000.

