OUKA
Osaka University Knowledge Archive

Title	テーブル型ディスプレイにおける協調インタラクションの評価に関する研究
Author(s)	山口, 徳郎
Citation	大阪大学, 2009, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/23486
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

博甲 13562

テーブル型ディスプレイにおける
協調インタラクションの評価に関する研究

2009年1月

山口徳郎

テーブル型ディスプレイにおける
協調インタラクションの評価に関する研究

提出先　　大阪大学大学院情報科学研究科

提出年月　2009 年 1 月

山 口 徳 郎

研 究 業 績 目 録

I. 学術論文

[1] 伊藤雄一, 山口徳郎, 秋信真太郎, 渡邉亮一, 市田浩靖, 北村喜文, 岸野文郎: TSU.MI.KI: 仮想世界と実世界をシームレスに融合するユーザインタフェース; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 11, No. 1, pp. 171–180, Mar. 2006.

[2] Tokuo Yamaguchi, Sriram Subramanian, Yoshifumi Kitamura, and Fumio Kishino: Strategic negotiations in tabletop; *Human Computer Interaction*, pp. 355–370, In-Tech Education and Publishing, Oct. 2008.

[3] 山口徳郎, ミゲル ナセンタ, 櫻井智史, 伊藤雄一, 北村喜文, スリラム サブラマニアン, カール グトウィン, 岸野文郎: 利用者とディスプレイの位置関係を考慮したパースペクティブ表示; 電子情報通信学会論文誌, Vol. J91-D, No. 12, pp. 2746–2754, Dec. 2008.

II. 国際会議

[1] Yoshifumi Kitamura, Wataru Osawa, Tokuo Yamaguchi, Haruo Takemura, and Fumio Kishino: A display table for strategic collaboration preserving private and public information; *Proceedings of IFIP 4th International Conference on Entertainment Computing (ICEC 2005)*, Springer LNCS 3711, pp. 167–179, Sep. 2005.

[2] Yuichi Itoh, Tokuo Yamaguchi, Yoshifumi Kitamura, and Fumio Kishino: A computerized interactive toy: TSU.MI.KI; *Proceedings of IFIP 4th International Conference on Entertainment Computing (ICEC 2005)*, Springer LNCS 3711, pp. 507–510, Sep. 2005.

[3] Tokuo Yamaguchi, Sriram Subramanian, Yoshifumi Kitamura, and Fumio Kishino: Strategic tabletop negotiations; *Proceedings of 11th IFIP TC 13 International Conference on Human-Computer Interaction (INTERACT 2007)*, Springer LNCS 4663, Part II, pp. 169–182, Sep. 2007.

[4] Miguel A. Nacenta, Satoshi Sakurai, Tokuo Yamaguchi, Yohei Miki, Yuichi Itoh, Yoshifumi Kitamura, Sriram Subramanian, and Carl Gutwin: E-conic: a perspective-aware interface for multi-display environments; *Proceedings of the 20th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2007)*, pp. 279–288, Nov. 2007.

[5] Tokuo Yamaguchi, Yoshifumi Kitamura, and Fumio Kishino: Interactive stereoscopic display for multiple users and its applications; *2008 ASIAGRAPH Proceedings*, Vol. 2, No. 1, pp. 145–150, Jun. 2008.

[6] Satoshi Sakurai, Yuichi Itoh, Yoshifumi Kitamura, Miguel A. Nacenta, Tokuo Yamaguchi, Sriram Subramanian, and Fumio Kishino: A middleware for seamless use of multiple displays; *Proceedings of Design, Specification and Verification of Interactive Systems (DSV-IS 2008)*, Springer LNCS 5136, pp. 252–266, Jul. 2008.

[7] Tokuo Yamaguchi, Sriram Subramanian, Yoshifumi Kitamura, and Fumio Kishino: Dynamics of strategic negotiations on SharedWell; *Proceedings of the 4th International Conference on Collaboration Technologies (CollabTech 2008)*, pp. 140–145, Aug. 2008.

[8] Tokuo Yamaguchi, Kazuhiro Asai, Yoshifumi Kitamura, and Fumio Kishino: Interactive multimedia contents in the IllusionHole; *Proceedings of IFIP 7th International Conference on Entertainment Computing (ICEC 2008)*, Springer LNCS 5309, pp. 116–121, Sep. 2008.

[9] Satoshi Sakurai, Tokuo Yamaguchi, Yoshifumi Kitamura, Miguel A. Nacenta, Yuichi Itoh, Ryo Fukazawa, Sriram Subramanian, and Fumio Kishino: M^3: multi-modal interface in multi-display environment for multi-users; *Proceedings of the 1st ACM SIGGRAPH Conference and Exhibition in Asia (SIGGRAPAH Asia 2008)*, p. 45, Dec. 2008.

III. 国内研究会・全国大会

[1] 山口徳郎, 秋信真太郎, 伊藤雄一, 市田浩靖, 北村喜文, 岸野文郎: TSU.MI.KI システムでのアプリケーション作成に関する一検討; 電子情報通信学会総合大会論文集, A-16-39, p. 348, Mar. 2004.

[2] 山口徳郎, スリラム サブラマニアン, 北村喜文, 岸野文郎: テーブル上における戦略的な協調作業に関する一検討; 電子情報通信学会総合大会論文集, A-14-6, p. 275, Mar. 2007.

[3] 山口徳郎, スリラム サブラマニアン, 北村喜文, 岸野文郎: テーブル上における戦略的な協調作業に関する検討; 情報処理学会研究報告 2007-HCI-125, Vol. 2007, No. 99, pp. 47–54, Sep. 2007.

[4] 山口徳郎, 浅井和広, 中島孝司, 北村喜文, 岸野文郎: IllusionHole 上のインタラクティブマルチメディアコンテンツの試作; エンターテインメントコンピューティング 2007 講演論文集, pp. 15–18, Oct. 2007.

[5] 山口徳郎, ミゲル ナセンタ, 櫻井智史, 伊藤雄一, 北村喜文, スリラム サブラマニアン, カール グトウィン, 岸野文郎: 利用者とディスプレイの位置関係を考慮したパースペクティブ表示の評価; 電子情報通信学会技術研究報告, HIP2007-146, Vol. 107, No. 369, pp. 97–102, Dec. 2007.

[6] 藤原正貴, 山口徳郎, 櫻井智史, 北村喜文, アナトール レクイエル, 岸野文郎: 立体画像を用いた協調作業の一検討; 情報処理学会研究報告, 2007-HCI-127, Vol. 2008, No. 11, pp. 45–52, Jan. 2008.

[7] 安田敏宏, 伊藤雄一, 櫻井智史, 山口徳郎, 北村喜文, 岸野文郎: サーバレンダリングを用いた立体映像生成手法に関する検討; 電子情報通信学会 第 19 回データ工学ワークショップ論文集, B1-6, Mar. 2008.

[8] 深澤遼, 山口徳郎, 櫻井智史, 北村喜文, 岸野文郎: 複数ディスプレイ環境における視線情報の活用に関する一検討; 電子情報通信学会総合大会論文集, A-15-35, p. 286, Mar. 2008.

[9] 大野翼, 櫻井智史, 山口徳郎, 北村喜文, 岸野文郎, 國田豊, 磯貝愛, 上野雅浩: 遠隔空間における 3D 実物体共有方法の基礎検討; 電子情報通信学会総合大会論文集, D-6-15, p. 88, Mar. 2008.

[10] 深澤遼, 山口徳郎, 櫻井智史, 北村喜文, 岸野文郎: 複数ディスプレイ環境におけるマルチモーダルインタフェースに関する検討; ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol. 10, No. 2, pp. 19–24, Jun. 2008.

[11] 深澤遼, 山口徳郎, 櫻井智史, 北村喜文, 岸野文郎: 複数ディスプレイ環境におけるマルチモーダルインタフェース M^2; ヒューマンインタフェースシンポジウム 2008 論文集, pp. 531–534, Sep. 2008.

[12] 安田敏宏, 伊藤雄一, 櫻井智史, 山口徳郎, 北村喜文, 岸野文郎: ブラウザ上でのインタラクティブな 3 次元仮想環境を実現するサーバレンダリングに関する検討; ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol. 10, No. 4, pp. 17–20, Nov. 2008.

内 容 梗 概

本論文は，筆者が2004年から現在までに，大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程並びに博士後期課程在学中に行った，テーブル型ディスプレイにおける協調インタラクションの評価に関する研究成果をまとめたものである．

プロジェクタ装置の発展や低価格化に伴って，コンピュータとプロジェクタ装置を基本構成としたテーブル型ディスプレイは数多く提案され，様々な場面で利用されるようになってきている．テーブル型ディスプレイは，大きな文書や絵などの情報を利用者全員で共有することができ，相手の身体動作や表情といったアウェアネス情報などを用いて，自然な形で協調インタラクションをすることができるといった特徴を持っている．協調インタラクションの支援手法も様々に提案され，その有効性が示されることで，テーブル型ディスプレイ設計の際の有用な知見となってきている．しかし，今日人々が取り組むべき問題はより複雑化し，分野が多岐にわたるため，対象とするタスクや表示データ，システムの構成によっては利用者に不必要なインタラクションを強制してしまい，テーブル型システムの特徴を十分に活かせなくなることもありえる．そのため，テーブル型ディスプレイにおける協調作業を効率的に支援するためには，多様化するタスクや表示データ，システムの構成などを考慮した問題範囲の中で，協調する相手とのインタラクションの順序や移り変わりなどといった動的な協調インタラクションの構造について理解し，そしてその構造の中から，どれだけの部分をシステムに組み込み，どの部分を人間の解釈に委ねるのかといった判断が求められる．

そこで本論文では，他の利用者と共有する情報だけではなく，共有するべきではない個人が保有する情報も同時に扱うことが求められる協調作業，複数の利用者が同時に直接指示できる立体映像を用いた協調作業，そしてテーブル型ディスプレイに複数のディスプレイを組み合わせた環境における協調作業を問題範囲と設定し，それぞれの作業においてテーブル型ディスプレイにおける協調インタラクションを検討した結果について述べる．本論文は全6章で構成される．

第1章に序論を述べ，第2章では，これまでのコンピュータ支援による協調作業の分類とそれに基づく協調作業支援システムに関する諸研究について述べる．また，テーブル上における協調作業に着目し，テーブル型ディスプレイとそれらを用いたテーブル上における協調インタラクションの諸技術について述べ，このような協調作業の行動分析やその特

性を調査した研究事例をまとめる．

第3章では，単一ディスプレイ上に複数の利用者の保有情報と共有情報をシームレスに共存させて表示できるテーブル型ディスプレイ “SharedWell” を提案する．また，個人の保有情報と共有情報の両方が必要となるようなタスクを設定し，その際の被験者の行動について評価した結果および考察について述べる．

第4章では，複数の利用者が同時に直接指示できる立体映像を用いた協調作業において，対面型と分散型の環境における利用者間の会話や身体動作などのコミュニケーションの違いが協調作業に与える影響について検討した結果について述べる．また，分散型環境への適用なども議論する．

第5章では，テーブル型ディスプレイに複数のディスプレイを組み合わせた環境において，ディスプレイ上に表示される情報の提示手法として，利用者とディスプレイの位置関係を考慮したパースペクティブ表示を導入し，評価した結果について述べる．また，複数の利用者やウィンドウによる情報提示手法の検討などパースペクティブ表示の課題についても議論する．

第6章では，本研究で得られた成果を結論として要約する．

目 次

1 序論 **1**

1.1 研究の背景 1

1.2 本論文の構成 6

2 コンピュータ支援による協調作業とテーブル型ディスプレイ **7**

2.1 はじめに 7

2.2 コンピュータ支援による協調作業 8

2.2.1 時間的および空間的特性による分類 8

2.2.2 協調作業における作業空間 11

2.3 テーブル型ディスプレイと協調インタラクション 12

2.3.1 テーブル型ディスプレイ 12

2.3.2 テーブル型ディスプレイにおける情報提示手法 13

2.3.3 テーブル型ディスプレイにおける入力手法 15

2.3.4 複数人で共有可能な立体映像を用いた協調インタラクション 17

2.3.5 3次元仮想空間を利用した協調インタラクション 18

2.3.6 複数のディスプレイを組み合わせた協調インタラクション 20

2.4 テーブル上における協調インタラクションの調査と分析 22

2.4.1 テーブル上における協調インタラクションの行動分析 22

2.4.2 競争の側面を持つ協調作業 23

2.5 おわりに 26

3 個人の保有情報と共有情報を共存表示できる協調作業ディスプレイ **29**

3.1 はじめに 29

3.2 SharedWellの提案 31
3.2.1 個人の保有情報と共有情報の共存表示 31
3.2.2 基本原理 31
3.2.3 情報提示領域 32
3.2.4 システム構成 35
3.3 SharedWellにおける協調作業の評価実験 37
3.3.1 目的と概要 37
3.3.2 実験計画と手続き 38
3.3.3 実験環境 39
3.3.4 実験結果 39
3.4 考察 47
3.5 おわりに 48

4 複数人で直接指示可能な立体映像を用いた協調作業 51
4.1 はじめに 51
4.2 複数人で直接指示可能な立体映像を用いた協調作業の評価実験 52
4.2.1 目的と概要 52
4.2.2 実験環境 53
4.2.3 タスクデザイン 55
4.2.4 実験計画 57
4.3 実験結果 59
4.3.1 タスク完了時間 59
4.3.2 エラー回数 59
4.3.3 ビデオ解析 61
4.3.4 主観評価 64
4.4 考察 65
4.4.1 環境の違いによるコミュニケーションへの影響 65
4.4.2 分散型環境における立体映像を用いた協調作業支援 66
4.5 おわりに 67

5 利用者とディスプレイの位置関係を考慮したパースペクティブ表示 69

5.1 はじめに 69
5.2 利用者とディスプレイの位置関係を考慮した情報のパースペクティブ表示 . 71
5.2.1 パースペクティブウィンドウ 72
5.2.2 パースペクティブカーソル 72
5.3 パースペクティブ表示の評価実験 73
5.3.1 目的と概要 73
5.3.2 実験環境 73
5.3.3 実験計画 74
5.3.4 タスクデザイン 75
5.4 実験結果 78
5.4.1 ポインティング 78
5.4.2 ステアリング 78
5.4.3 整列 78
5.4.4 パターンマッチング 79
5.4.5 文章読解 79
5.4.6 主観評価 82
5.5 考察 83
5.5.1 パースペクティブ表示の有効性 83
5.5.2 課題 85
5.6 おわりに 86

6 結論 **87**

謝辞 **91**

参考文献 **93**

第1章

序論

1.1 研究の背景

人間は社会的な動物である．自分1人に閉じた自己完結的な仕事をすることは稀であり，組織に身をおく一員としての活動は本質的に協調作業である．協調作業とは，複数の人が協力することにより，1人では成し得ない，あるいは成すことが非常に困難な新しい価値を創造するプロセスである [1]．特に今日人々が取り組むべき問題はより複雑化し，分野が多岐にわたるため，複数の人が協力してそれらの問題の解決や意志決定に取り組む必要がある．効率的な協調作業のためには，複数の人が，各自の情報と共通の情報を参考にしながら，話し合いによりお互いの意見を調整し，共通の目的に向かって協力することが重要であり，情報の共有，環境の共有，意識の共有が求められる．利用者間で情報を共有する必要性はいうまでもないが，共有された情報に対して利用者が協力して作業できるような環境を構築することが重要である．これが環境の共有である．そして意識の共有とは，共通の目的遂行のために，お互いにコミュニケーションをとり，意識を合わせるためにとる行動のことである [2,3]．本論文では，このように協調作業の際に人がとる一連の行動を協調インタラクションと呼ぶことにする．このような協調インタラクションが可能な作業空間を提供する道具立てとして，サーフェス（面）がある．先史以来，ラスコーやアルタミラにあるように，人間は文字を使い始める以前から洞窟の壁面などを利用して，情報を提示し合い，意識を共有することができる環境を創り出していた．現在ではホワイトボードや掲示板などの形態となって利用されているように，このような環境は現実世界に容易に創り出すことが可能である．さらに，このような環境では，相手の見ているものが

自分の見ているものと同一であるという保証のもと，言語によるコミュニケーションだけではなく，相手の身体動作や表情といった非言語情報によるコミュニケーションも容易である．その中でもテーブルは，一般家庭やオフィス，カフェなどいたる場所にあり，複数の人で意見やアイデアを交換したり，何か重要な決定をする際などには広く用いられてきた．テーブル上における協調作業では，大きな文書や絵などの情報を利用者全員で共有することができ，また，アウェアネス情報 [4] を容易に共有することができるなど，利用者同士が自然に対面しながら協調インタラクションをすることができる．さらに，テーブル上で情報を取り囲むように作業をすることで，人間自体を作業に引き込ませるといった効果もある [5]．このように，テーブルは協調作業環境との親和性が高く，効率的に協調作業をするための最適な道具立ての1つである．

一方で，20世紀最大の発明と言わしめたコンピュータは，わずか60年ほどの間に半導体技術などの様々な要素技術の進歩に伴い，劇的に発展してきた．当初のコンピュータは，大量のデータを誤りなく処理するという特性を生かしたメインフレームによる数値計算を扱うことが多く，事務処理などで用いられることが主流であった．きわめて高価で大型であったため，大抵は複数の人がリソースを分けあう形で利用しており，コンピュータへの入出力手法もカードやラインプリンタなどの貧弱なインタフェースであった．しかし，コンピュータの発展と用途の多様化，そして低価格化に伴い，一般家庭への普及が進み，現在では一家に一台または個人に一台あることも当たり前のものになってきている．そして，その利用者層も科学者や専門家から，子供やお年寄りを含む一般の人々へと変化し，コンピュータ上で扱うことのできるデータも，数値データから文字，音声，静止画，動画，3次元形状モデルなどの様々な形態の情報を統合したマルチメディアコンテンツへと変化してきている．それに伴い，ユーザインタフェースもキーボードを用いてコマンドラインからコマンドを入力するCUI（Character User Interface）から，2次元ディスプレイやマウスなどを用いたGUI（Graphical User Interface）へと進化してきた [6, 7]．また，コンピュータの進化に相まって，電子メールやWWW（World Wide Web）に代表されるようなインターネット環境が整備されることで，人々は時間と空間の壁を越えて，双方向に，そして多方向にコミュニケーションしている．ビジネスやプライベートなコミュニケーションの手段として，インターネットを介したテキストベースのコミュニケーションシステムや3次元仮想環境（ネットワーク仮想空間）上でのコミュニケーションシステムなどが広く利用されるようになっている．

このように，人との直接のインタラクションを通して情報活動を支援するコンピュータと，コミュニケーションのための基盤を提供するネットワークとの有機的な結合によって，コンピュータが人と人との間を取り持ち，コミュニケーションを裏方で支えながら，協調作業を支援するグループウェアという概念が生まれた．これは，組織における人間の活動が本質的に協調作業であることがもたらした正当な進化といえる．Ellis らの定義によれば，グループウェアとは共通の作業や目的のために働く利用者のグループを支援し，共同作業環境のためのインタフェースを提供するコンピュータベースのシステムである [8]．グループウェアは，1968 年に Engelbart らが行った “NLS” のデモンストレーションに端を発する [9]．これは遠隔地における共同作業を支援しようとするシステムで，遠隔会議，対話の記録支援，グループライティング，共用ハイパーテキストなど，今日議論されている多くのコンセプトを実現したものであり，ウィンドウやマウスなどの GUI の基礎をなすものでもあった．1980 年代中頃にはグループウェアだけではなく，組織的，社会的視点までを包含する上位の概念として CSCW（Computer-Supported Cooperative Work）も生まれた．その後 90 年代に入ってからは，マルチメディアを利用したグループウェアとして，リアルタイムビデオ通信をベースとしたグループウェア [10] や仮想現実感（Virtual Reality）技術の協調作業支援への適用 [11] なども提案されている．

また，サーフェスを利用したグループウェアでは，利用者全員が閲覧することのできる電子黒板やプロジェクタによる投影スクリーンのような壁面型ディスプレイを利用した数多くのグループウェアが提案されている [12–17]．これらは，壁面型ディスプレイに表示される情報を操作したり個別に閲覧したりするための個人用ディスプレイと組み合わせることで，利用者間での情報の共有やその情報に対するアクセス手段を提供するとともに，様々な議論支援用ソフトウェアを導入することによって利用者の支援を試みている．特に，利用者同士が容易に協調インタラクションをすることができるテーブル型のディスプレイを用いた事例としては，まず個人用のデスクトップの拡張である “DigitalDesk” [18] があるが，その後，協調作業を支援する目的で多くのテーブル型ディスプレイが提案されている [19–24]．テーブル型システムではテーブル面が映像表示面として利用されるため，テーブルを囲む利用者の間に遮蔽物が存在せず，利用者は自然な形で相手の身体動作や表情といったアウェアネス情報などを用いた協調インタラクションをすることができる．さらに，大きな文書や絵などの情報を表示したり，写真などの大量の情報を一度に表示したりすることも可能であり，こういった情報を操作するためのインタラクション手法は様々

に提案されている [14,25–30]．また，利用者全員が操作したり共有したりする情報だけではなく，場合によっては他の利用者に見せたくない情報があることも考えられ，様々なアプローチから情報を隠すためのインタラクション手法が検討されている [23,31,32]．さらに，テーブル型ディスプレイのやや特殊な事例として，立体映像を表示する立体表示ディスプレイがある．単一ディスプレイ上に立体映像を提示する場合，通常は1人しか正しい立体映像を観察できないが，時間分割や空間分割をうまく利用することで多人数で立体映像を共有することができる [33–36]．テーブル型ディスプレイに複数のディスプレイを組み合わせることで協調作業を支援する研究も行われている [15,37–42]．しかし，このような環境は複数のコンピュータから構成されることが多く，複数のディスプレイへの入力手法やディスプレイ間の情報移動や情報提示などに様々な工夫が求められる．また，テーブル型ディスプレイでは表示される情報の天地問題（orientation problem）もある．

このようにテーブル型ディスプレイを用いた協調作業支援に関する研究は数多く行われているが，拠って立つデザイン指針が様々であるため，対象とするタスクや表示データ，システムの構成によっては利用者に不必要な移動や情報の操作などのインタラクションを強制してしまい，テーブル型システムの特徴を十分に活かせなくなることもありえる．これは支援しようとする協調作業そのものがきわめて広いものであり，1つのアプローチによって解決することは不可能だからである．対象とするタスクとして，他の利用者と共有する情報だけではなく，他の利用者と共有するべきではない個人が保有する情報も同時に扱うことが求められるような作業では，従来までのデザインでは情報の表示位置が乖離していたり，情報同士の関連づけが難しいなどの問題がある．また，表示するデータとして立体映像を用いた場合には，複数の利用者が同時に立体映像を操作する協調作業を検討した例はなく，このような協調作業を検討することは，遠隔地間での医療や工業デザインなどの分野の技術発展に寄与することができる．その他にも，システムの構成として，テーブル型ディスプレイに複数のディスプレイを組み合わせた環境が整いつつあるが，このような環境では，利用者は様々な位置や向きにある複数のディスプレイを見比べ，ときには移動しながら議論をするため，利用者は必ずしもすべてのディスプレイを正対した場所から見ることはできず，従来の単一ディスプレイ環境にはないインタフェースが求められる．テーブル型ディスプレイを用いた有効な協調作業支援のためには，このような多様化するタスクや表示データ，システムの構成などを考慮した問題範囲の中で，テーブル上で行われる人間の動的な協調インタラクションの構造について理解し，そしてその構造の中

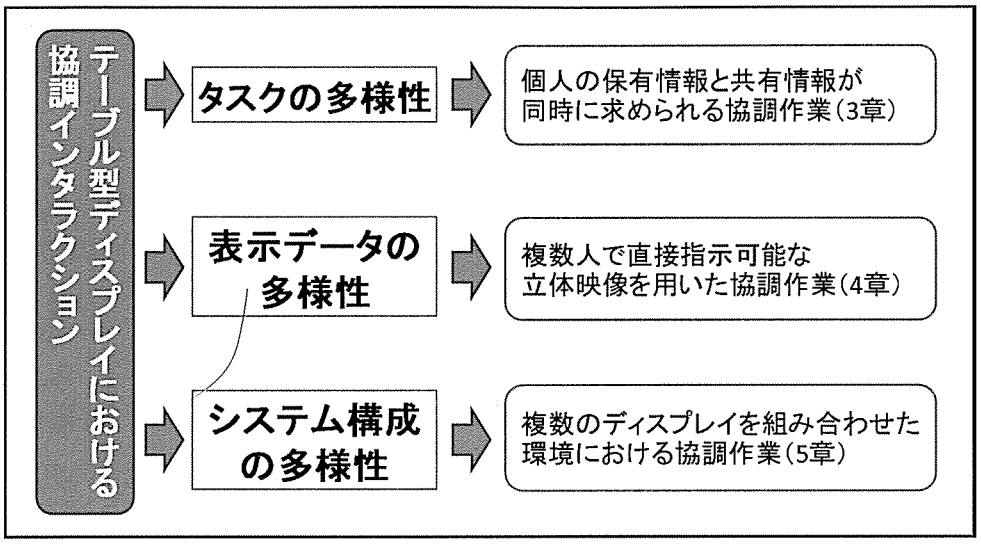


図 1.1: 本研究が対象とする問題範囲と提案内容の位置づけ

から，どれだけの部分をシステムに組み込み，どの部分を人間の解釈に委ねるのかといった判断が求められる．

そこで本研究では，個人の保有情報と共有情報の両方が同時に求められる協調作業，複数の利用者が同時に直接指示できる立体映像を用いた協調作業，そしてテーブル型ディスプレイに複数のディスプレイを組み合わせた環境における協調作業を問題範囲と設定し，それぞれの作業における協調インタラクションを検討する．図 1.1 に本研究が対象とする問題範囲と提案内容の位置づけを示す．個人の保有情報と共有情報が両方が同時に求められる協調作業に関しては，単一ディスプレイ上に複数の利用者が個々に持つ保有情報と共有情報をシームレスに共存させて表示できるテーブル型ディスプレイ “SharedWell” を提案し，評価実験の結果を検討する．複数人で直接指示できる立体映像を用いた協調作業に関しては，テーブル型ディスプレイの特徴の 1 つである利用者間の会話や他の利用者の身体動作などのコミュニケーションの自然な共有に着目し，評価実験を行いそれらの影響に関して議論する．テーブル型ディスプレイに複数のディスプレイを組み合わせた環境における協調作業においては，利用者とディスプレイの位置関係に着目することで，情報提示の問題を解決する表示手法を実現し，協調インタラクションに要する時間や負荷の軽減を目指す．

1.2 本論文の構成

本論文は，全6章で構成される．

第2章では，これまでのコンピュータ支援による協調作業の分類とそれに基づく協調作業支援システムに関する諸研究について述べる．また，テーブル上における協調作業に着目し，テーブル型ディスプレイとそれらを用いたテーブル上における協調インタラクションの諸技術について述べ，このような協調作業の行動分析やその特性を調査した研究事例をまとめる．

第3章では，単一ディスプレイ上に複数の利用者が個々に持つ保有情報と共有情報をシームレスに共存させて表示できるテーブル型ディスプレイ “SharedWell” を提案する．また，個人の保有情報と共有情報の両方が必要となるようなタスクを設定し，その際の被験者の行動について評価した結果および考察について述べる．

第4章では，複数の利用者が同時に直接指示できる立体映像を用いた協調作業において，対面型と分散型の環境における利用者間の会話や身体動作などのコミュニケーションの違いが協調作業に与える影響を調査した結果について述べる．

第5章では，テーブル型ディスプレイに複数のディスプレイを組み合わせた環境において，ディスプレイ上に表示される情報の提示手法として，利用者とディスプレイの位置関係を考慮したパースペクティブ表示を導入し，評価した結果について述べる．

最後に第6章では，本研究で得られた成果を結論として要約する．

なお，第3章は，文献 [43–45] で公表した結果に基づき論述する．第4章は，文献 [46,47] で公表した結果に基づき論述する．第5章は，文献 [48,49] で公表した結果に基づき論述する．

第2章

コンピュータ支援による協調作業とテーブル型ディスプレイ

2.1 はじめに

近年のコンピュータの急速な発展と大画面ディスプレイの普及によって，対面の状況において大画面ディスプレイを用いて協調作業することが可能となった．実際に，会議室などで電子黒板やプロジェクタを利用する状況はもはや当たり前となっている．大画面ディスプレイによって，一度に表示できる情報の量は増大し，ディスプレイ面上や各種センサを用いたインタラクションを介することで，利用者は直感的かつ容易に情報を操作することが可能となった．そのため，このような大画面ディスプレイを用いた環境における協調作業の支援はますます重要になってきている．その中で，特にテーブル型ディスプレイは，壁面型ディスプレイに比べ，対面の協調作業に重要な役割を果たす非言語情報によるコミュニケーションが容易であるため，利用者は自然な形で協調インタラクションをすることができるといった特徴を持っている [50]．そのため，壁面型ディスプレイの延長線上に来る新しいデバイスとして，テーブル型ディスプレイの期待が高まっている．

そこで本章では，まず，コンピュータ支援による協調作業の分類と，それに基づく協調作業支援に関する研究について述べる．次に，テーブル上における協調作業に着目し，テーブル型ディスプレイとそれを用いた協調インタラクションの諸技術に関して述べ，このような協調作業の特性の行動分析やその特性を調査した研究事例をまとめる．

2.2 コンピュータ支援による協調作業

2.2.1 時間的および空間的特性による分類

コンピュータ支援による協調作業に関する研究事例については，これらを時間的特性および空間的特性によって分類することができる [51,52]．時間的特性に関しては，即時性のある情報伝達を必要とするリアルタイム型と，情報が一旦蓄積され即時性を必要としない非リアルタイム型とに分けることができる．空間的特性に関しては，協調作業する相手と同じ場所で作業する対面型と，遠隔地に存在する相手と作業する分散型とに分けることができる．この2つの分類方法を組み合わせることによって，コンピュータ支援による協調作業はリアルタイム・対面型，リアルタイム・分散型，非リアルタイム・対面型，非リアルタイム・分散型の4つに分類することができる．表 2.1 にその分類をまとめたものを示し，以降それぞれについて詳しく述べる．

リアルタイム・対面型

リアルタイム・対面型の協調作業支援システムは，会議室等の多人数が集まる場所においての会議支援等が応用の中心となっている [13–17]．

例えば，LAN（Local Area Network）で結合されたワークステーションなどの電子的なツールが装備された電子会議室の初期の例として，Xerox 社の “Colab” [13] がある．このシステムでは個人用のワークステーションは半円形の机に設置され，タッチ入力できる大型スクリーンを取り囲む形になっており，利用者は個人用と共用のウィンドウを駆使して会議をすることができる (図 2.1)．その際，共有のウィンドウは複数の利用者で同時に編集することができる．また，このシステムを通して，グループウェアの実現に必要な概念として，WYSIWIS（What You See Is What I See）やテレポインタ，操作権制御の考え方が示された．Rekimoto らの “Augmented Surfaces” [15] は，壁掛け型やテーブル型ディスプレイ，ラップトップ PC（Personal Computer）等を1つの作業空間に統合した例である．図 2.2 に示すように，ディスプレイ上の情報とディスプレイデバイスとの連続性に着目し，利用者は “hyperdragging” と呼ばれる手法を用いて，統合されたディスプレイ間で情報をやり取りすることができる．

これらのようなリアルタイム・対面型のシステムでは，複数の利用者がディスプレイに表示される情報や言語情報，そして非言語情報などを共有することによって，協調作業を

表 2.1: 時間的特性と空間的特性によるコンピュータ支援による協調作業の分類

	対面	分散
リアルタイム	電子会議システムなど Colab [13] Augmented Surfaces [15]	遠隔会議システムなど ClearBoard [10] t-Room [53]
非リアルタイム	伝言板システムなど Web Knowledge Forum [54]	電子メールや電子掲示板など BSCW [55] Quilt [56]

効率化することができる．しかし，どの情報を用いて，議論や協調作業そのものに対し有効な支援を提供するかについては慎重な議論が必要である．

リアルタイム・分散型

分散した拠点で活動する複数の利用者が同時に協調作業するためのシステムであり，代表的なものは分散会議システムである [10, 53, 57]．ネットワーク環境が充実するにつれ，この分野の研究は盛んに行われるようになり，ビジネスの分野だけではなく，医療や福祉，教育の方面にも実際に利用され始めている．

この種のシステムには大きく分けて 2 つのタイプがあり，通常のデスクトップモニタの利用を前提とし，ビデオカメラやマイクなどを装着した在席型のシステムと，壁面型ディスプレイなどの特殊なデバイスを用いたシステムがある．後者の研究事例として，石井らの “ClearBoard” [10] がある．このシステムは，図 2.3 のようにハーフミラーを利用し，作業空間に相手の顔を映すことによって，相手との視線の一致だけでなく，相手がどこを見ているのかを理解する “gaze awareness” も実現している．また同様に，NTT の “t-Room” [53] では，遠隔地にいる人々があたかも同じ部屋にいるような感覚「同室感」 [58] をもたらすことを目標としている．全く同じ構成のシステムを複数セット作成し，図 2.4 のようにお互いの様子を部屋の側面のディスプレイに表示することで，利用者は環境内の人物や物体などの情報を共有することができ，在席型のシステムに比べ効率的なコミュニケーションが実現されている．

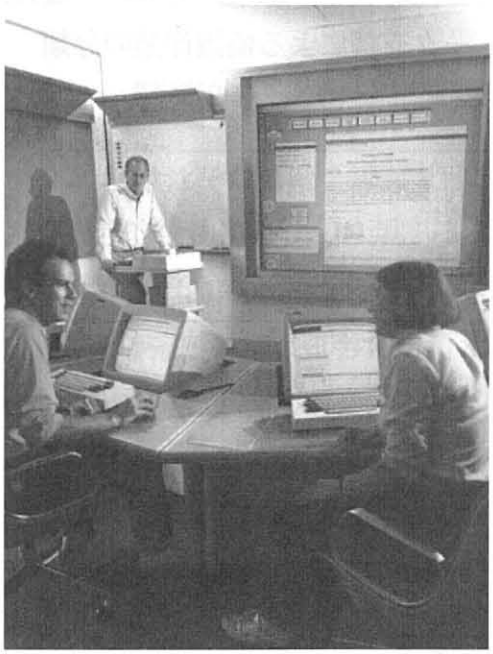


図 2.1: Colab

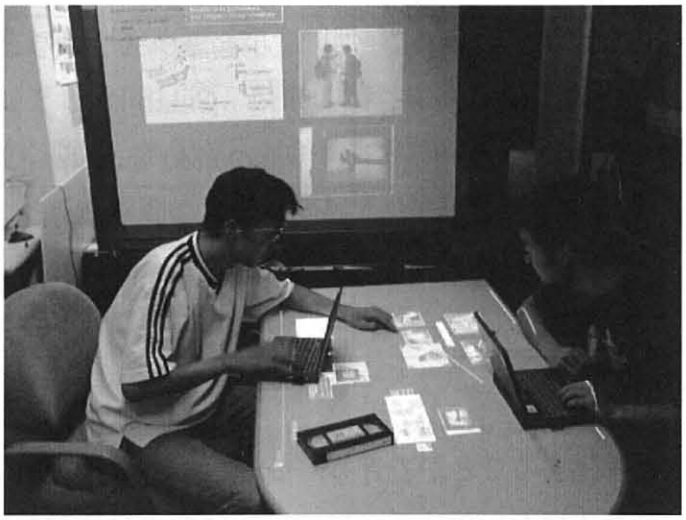


図 2.2: Augmented Surfaces

しかし，実際に対面していることと完全に同じ状況を作り出すことは困難であるため，単に対面型と同じ状況を作り出すことを目標にしたのでは成功は難しい．ネットワークを介した支援機能を提供し，必要な情報を必要な時に遠隔地に送信することが重要である．

非リアルタイム・対面型

非リアルタイムで対面型の協調作業支援システムは，伝言板のような機能を有したシステムが実用的な例として考えられる．複数の利用者が異なった時間に，1つの場所に設置されているディスプレイに情報を書き込むことで，協調作業に必要な情報を蓄えていくといった使用法が考えられる．この分野は，他の分類のものよりも実際に応用されている例は少ない [54].

非リアルタイム・分散型

異なる時間に作業する複数の利用者を支援するシステムである．分散であるということよりも，作業時間が異なっているということが本質であり，国際分業などの時差のある場面において積極的に利用されている．例えば，電子メールなどを用いた数々のシステムや

図 2.3: ClearBoard

図 2.4: t-Room

電子掲示版をベースにした形態のプロジェクト管理システムなどが中心として挙げられ，グループ間の情報の蓄積・共有や作業の調整支援を目的としている．通信は必要であるものの通信の速度はあまり重要でないため，導入のための敷居は低い．主な研究事例として，ドイツの国立研究所GMD-FITの“BSCW” [55]はWWWベースの共有ワークスペース機能をサポートしたシステムである．また，協調執筆支援システムとして，ベル通信研究所の“Quilt” [56]がある．このシステムは，文書へのアノテーションやメールによる意見交換などの機能を提供した．このように，インターネットを介した支援が中心ではあるが，単に電子メールのようなメッセージ交換の機能を提供するだけではなく，その上で行われるグループワークの構造的特徴に即したシステム設計が重要である．

2.2.2 協調作業における作業空間

2.2.1節のように分類される協調作業の中で，本論文ではリアルタイム型の協調作業に着目する．1.1節でも述べたように，人と人が作業空間を共有しながら協調作業をする場合，複数の人が各自の情報と共通の情報を参考にしながら，話し合いによりお互いの意見を調整し，共通の目的に向かって協力する．このとき，言語によるコミュニケーションだけではなく，相手の身体動作や表情といった非言語によるコミュニケーションも重要な要素になる．これらのコミュニケーションが行われている空間は対話空間，対象となる情報が存在する空間は作業空間と呼ばれる．作業空間内には表示される情報の属性によって分

けられる情報空間も存在する．先行研究 [59] によってテーブル上の領域ごとの役割は分類され，また，文献によってその定義や名称は様々であるが、一般的に他の利用者が見ることも操作することもできない秘密の情報を置く領域はプライベート空間，他の利用者が見ることができるが操作することができない情報を提示する領域は個人空間，そして利用者全員で見ることも操作することもできる共有の情報を表示する領域は公共空間，またその中で，特定の利用者とだけ情報を共有する領域は共有空間と呼ばれる．

2.3 テーブル型ディスプレイと協調インタラクション

古くはアーサー王の円卓の例にあるように，人々が集まって重要な決定をする際などには，テーブルを囲み，議論することが多い．今日では，このような協調作業を支援するためのインタラクティブなテーブル型ディスプレイが数多く提案されている．また同時に，これらテーブル型ディスプレイにおいて，様々な協調作業の目的に応じた協調インタラクション手法が提案され，その有効性が示されることで，テーブル型ディスプレイ設計の際の有用な知見となってきている．そこで本節では，様々な研究機関等で行われているテーブル型ディスプレイと協調インタラクションに関する研究について述べる．

2.3.1 テーブル型ディスプレイ

当初は業務用のテレビゲーム機や個人用デスクトップの拡張版 [18,60] であったテーブル型ディスプレイは，現在では対面の状況における協調作業を支援する有効な道具立ての1つである [19–24]．このようなシステムを総称して，Single Display Groupware [61] と呼ばれる．主な研究事例として，MERL（Mitsubishi Electric Research Laboratory）において，図 2.5 や図 2.6 に示すような “DiamondTouch” [20] や “UbiTable” [22] が提案されている．“DiamondTouch” は複数人で操作可能なタッチセンサ付きディスプレイであり，これを利用した “UbiTable” は，ラップトップ PC と併用しプライベート空間と共有空間をシームレスに繋ぐことで，容易な情報移動をサポートしている．

このような複数の空間をサポートするテーブル型ディスプレイは他にもいくつか提案されており，図 2.7 に示すように，Tandler らの “ConnecTables” [19] は，移動可能なテーブル型ディスプレイ同士を物理的に接続することにより，1つの共有空間を持ったディスプレイを作ることができる．利用者は，それぞれのディスプレイの上端へと文書などを移

図 2.5: DiamondTouch

図 2.6: UbiTable

動させることで，共有や交換を可能にしている．さらに，松下らが提案する “Lumisight Table” [23] は，図 2.8 に示すように，Lumisty という特定の方向からの光しか透過しない素材を用いて，各利用者に対して異なる情報を提示することができ，公共空間とそれぞれのプライベート空間を同時に提供している．その光学系を生かし，エンタテインメントやメディアアートなどに展開されている．その他の例は，テーブル型ディスプレイに関する文献 [21, 24] に詳しい．

2.3.2 テーブル型ディスプレイにおける情報提示手法

テーブル型ディスプレイでは，利用者は 1 つのディスプレイを取り囲こむような形で情報を共有するため，大きな文書や絵などの情報を表示したり，写真などの大量の情報を一度に表示したりすることも可能であるが，テーブルを挟んで反対側にいる利用者には情報は逆向きに見えてしまうといった天地問題がある．そのため，表示されているウィンドウやカーソルが操作しにくくなったり，文章や絵などの内容理解が困難になるといった問題が考えられる．このような問題を解決するため，様々なアプローチが採られている [14, 25 30]．まず，利用者が必要に応じてテーブル上に表示される情報の向きを回転させる手法として，Streitz らの “InteracTable” [14] や大和田らの “不思議黒板” [25] などが提案されている．また，そのように利用者が情報オブジェクトを操作する際の有効なインタラクション手法として，Kruger らの提案する “RNT” [26] や Liu らが提案する “TNT” [27]

図 2.7: ConnecTables

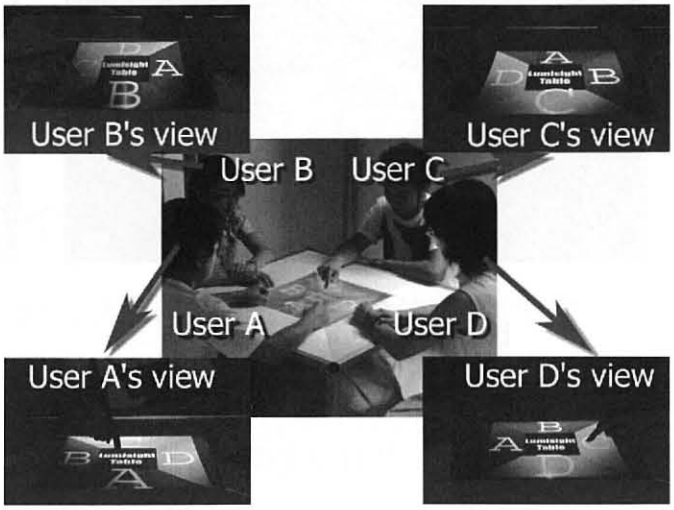


図 2.8: Lumisight Table

がある．これらは，操作しようとする情報オブジェクトの触れた位置によって，そのオブジェクトを回転させるのかや移動させるのかを自動的に切り替える手法である．また，最後にアクセスした利用者に見やすくなるように自動的に情報を回転させる，三浦らの提案する “MediaTable” [28] もある．さらに，Shen らが提案している “Personal Digital Historian” [29,30] では，図 2.9 のように，円形のテーブル型ディスプレイを利用し，テーブル上の情報の位置や利用者の位置に応じて表示方法を変更する手法を採っている．

次に，利用者全員がすべての情報を共有するのではなく，他の利用者から特定の情報を隠すことに着目した手法について述べる [23, 31, 32]．Shoemaker らの “Single Display Privacyware” [31] では，2 人の利用者それぞれのプライベートな情報を時分割に 1 つのディスプレイに表示させ，それに同期させて交互に両眼が同時に開閉する 2 つのシャッター眼鏡を用いることによって，各個人のプライベート空間を実現している．しかし，原理上フリッカが生じるなどの問題があるため，利用人数は 2 人までに限られる．また，眼鏡を外せば他方の利用者に隠している情報が見えてしまう．また，Wu らの “RoomPlanner” [32] は，図 2.10 のように，他の利用者から見られないように手で隠すなどのジェスチャを利

図 2.9: Personal Digital Historian

図 2.10: RoomPlanner

用して，プライベート空間を利用者の手元に生成している．この手法では，利用者は生成されたプライベート空間に表示される情報を他の利用者から見られないように常に気を配らなくてはならない．その他にも，先述した “Lumisight Table” では各利用者に適切なプライベート空間を実現しているが，利用者が席を立ったり，移動したりするといった動的な視点位置の変化には対応していない [23].

2.3.3 テーブル型ディスプレイにおける入力手法

テーブル型ディスプレイに対する入力手法に関しては，複数の利用者で共有しにくいマウスやキーボードではなく，多点入力や同時入力など現実世界と同様の自然なインタラクションができるよう工夫されている [20,62,63]．“DiamondTouch” は，机に埋め込まれたアンテナから送信された信号が，テーブルに触れた利用者の指を通じてその利用者が持つレシーバに到達することで，触れた位置を特定することができる [20]．各利用者がレシーバを持っているため，誰がテーブルに触れたかも特定することができる．また，Rekimotoらの “SmartSkin” [62] は，静電容量の変化を検出することで同時多点認識を実現している．図 2.11 のように，テーブル近くに手を近づけるだけで，触れていなくても検知することができ，手の位置だけでなく，テーブルからの距離も同時に判定することができるため幅広い応用が期待される．さらに，テーブル背後からの映像投影が可能なものとして，図 2.12 に示すように Han らの FTIR（frustrated total internal reflection）現象を利

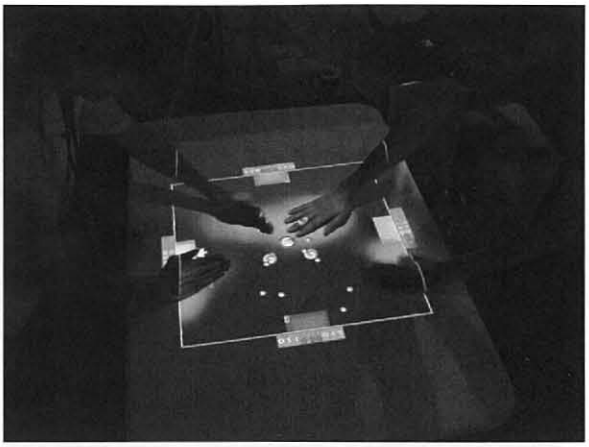


図 2.11: SmartSkin

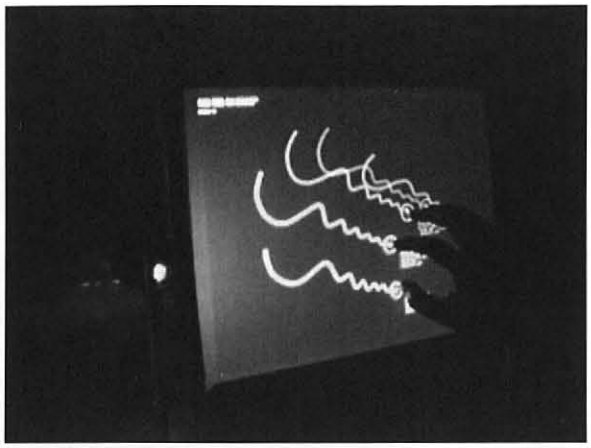


図 2.12: FTIR touch sensing

用した多点認識法がある [63]. アクリル板でできたスクリーンに LED (Light Emitting Diode) を配し，その光がアクリル板内で全反射するように調整しておくと，指が触れた箇所では全反射が起こらなくなるため，その箇所を検知することができる．その他間接指示による入力手法では，Parker らの "TractorBeam" [64] のようなレーザーポインタ型のものがあるが，テーブルからの距離が遠くなるにつれて精度が落ちるなどの問題が指摘されている [65]. 類似研究として，テレポインタやパンタグラフなどのテーブル型ディスプレイ上における様々な入力手法を比較した研究もある [66]. また最近では，テーブル下からの入力をサポートするなどのユニークな研究事例もある [67].

また，ディスプレイ上に表示される仮想世界内の物体に対して実世界内の物体を割り当て，それを操作することで同時に仮想世界内の物体を操作するといったタンジブルユーザインタフェース (TUI) を用いたインタラクションに関する研究が行われている [68,69]. テーブル型システムにおいても，映像表示面が水平であることから，その上に実物体を配置し，実物体と画面内の情報を連携させることができる．そのため，実物体をシステムへの直感的な入力手法や利用者のアウェアネス情報の手かがりとして用いた協調インタラクションに関する様々な研究が行われている [70–73].

TUI を利用した最初の事例として，Ullmer らの "metaDESK" [70] はテーブル上に投影された地図を，建物型のブロックとレンズを用いて，インタラクティブに操作することを可能にした．類似の研究として，Arias らの提案する "EDC" [71] は，建物や木などの形を模した実物体を用いて，都市デザインや都市シミュレーションをすることができるシ

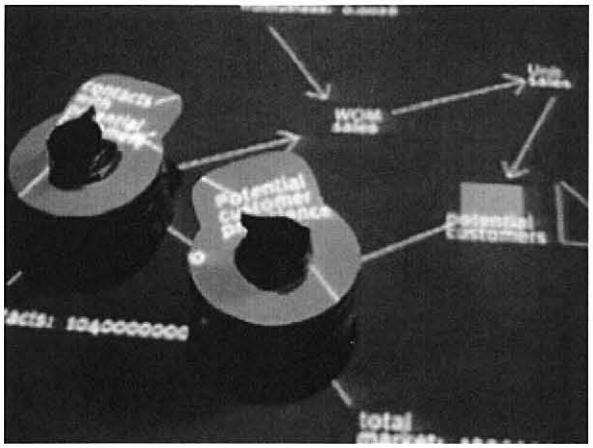


図 2.13: Sensetable

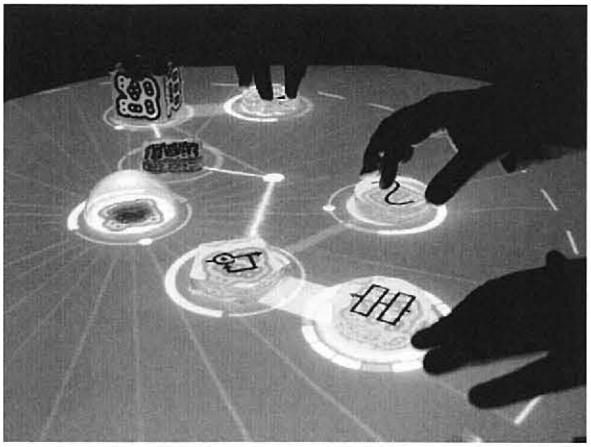


図 2.14: reacTable

ステムである．しかし，細かな設定は横に置かれたディスプレイによって行われるものであった．また，実体のあるものではなく，目には見えないものを扱うためのシステムとして，Patten らの “Sensetable” [72] がある．このシステムは，図 2.13 のように，ダイヤル状の実物体の向きや種類を変えることでネットワーク上のトラフィック量を変化させ，直感的にネットワーク設計を支援することを目指している．さらに，Jorda らの提案する “reacTable” [73] では，発光する円形のテーブル型ディスプレイ上で，複数の実物体を操作することにより，音楽と映像を生み出すことができる．図 2.14 に示すように，複数の人が同時に演奏することができ，他の人の演奏やテーブル上の映像を見ながら，即座に演奏方法を直感的に学習することができる新しい楽器である．

2.3.4 複数人で共有可能な立体映像を用いた協調インタラクション

テーブル型ディスプレイのやや特殊な事例として，テーブル上に立体映像を表示する機構を有した立体表示ディスプレイがある．単一ディスプレイ上に立体映像を提示する場合，通常は 1 人しか正しい立体映像を観察できないが，時間分割や空間分割をうまく利用することにより多人数で立体映像を共有できる．さらに，テーブル型ディスプレイでは，利用者の観察する位置がテーブル面よりも上になる傾向にあり，表示される映像の立体感が強調されるため，そのようなテーブル型ディスプレイは数多く提案されている [33–36].

Agrawala らの “Responsive Workbench” [33] は，テーブル上に利用者数分の左眼用画

像と右眼用画像を時分割で表示することによって，複数の利用者に同時に立体映像を提示することができる．図 2.15 に示すように，医療や工業デザインの分野での応用が考えられているが，利用者数が増えると 1 人あたりの表示周波数が減少し，フリッカが生じてしまうという欠点がある．また，Bimber らが提案した “VirtualShowcase” [34] は，スクリーン上に錐体状の鏡を置き，立体映像が錐体内に見えるようにしたものである．さらに，Favalora らが提案した “Perspecta” [35] は，高速回転するスクリーン面に連続的に物体の断面を表示することによって立体映像を表示するものである．これらの立体表示ディスプレイは，複数の利用者に対して 360 度どの方向からでも同時に立体映像を提示することができるという特徴があるが，立体映像の結像位置が鏡やガラスなどの光学装置によって覆われているため，立体映像を直接指示するなどの自然なインタラクションができないという欠点がある．

一方で，北村らの “IllusionHole” [36] は，図 2.16 のようにディスプレイと穴の開いたマスクという非常に簡単な構成で，複数の利用者にひずみもちらつきもない立体映像を提示している．その原理上，各利用者当たりの描画領域は小さくなってしまうが，利用者のインタラクティブな視点移動にも対応し，また立体映像を直接指示しながら，かつそのような直接指示情報も他の利用者と共有することができることから，自然な協調インタラクションを提供することができる．そのため，学校や博物館などでの教育応用や医療現場での手術シミュレーション，またエンターテイメントへの応用など多くの用途が考えられている [74, 75].

2.3.5 3 次元仮想空間を利用した協調インタラクション

仮想現実感技術や拡張現実感（Augmented Reality）技術を利用して，複数の HMD（Head Mounted Display）などを用いることにより，テーブル上で作業空間を共有し協調作業を支援する方法も提案されている [76–81]．このようなシステムでは，個人の情報と共有の情報を，同時に空間内の自由な位置に提示できるという点で，他のシステムとは大きく異なっている．仮想現実感技術を用いた代表的な例として，図 2.17 に示すように，ATR（Advanced Telecommunications Research Institute International）の岸野らが提案した “臨場感通信会議システム” [76] がある．これは，互いに異なる場所にいる利用者が一堂に会したかのような感覚で会議を行え，利用者の身体動作や表情などを再現したものであり，広範囲な産業分野への応用が期待される．また，人間の周囲を大型のディスプ

図 2.15: Responsive Workbench

図 2.16: IllusionHole

レイで覆う没入ディスプレイ環境においても同様に，遠隔地における会議支援システムとして利用者のアバタをリアルタイムに提示するシステムが提案されている [77]．さらに，3 次元仮想環境におけるインタラクションでは，視覚や聴覚の情報以外にどのような感覚を共有するのかが重要な課題になることが多い．Basdogan らは力覚提示装置が付属したスタイラスを用いたタスクにおいて，力覚フィードバックの有無の影響を調査し，タスクパフォーマンスが向上するという知見を得ている [78]．

また，拡張現実感技術を用いた場合においても，現実空間に仮想物体を重畳表示させることによって，対面型の協調作業空間を生成している．主な研究例として，Daimler Chrysler 社の “MagicMeeting” [79]（図 2.18）や Butz らが提案する “Emmie” [80] などの会議支援システムがある．しかしこれらの場合，HMD を装着するために他の利用者の表情を読み取ることができないなど，非言語情報を用いたコミュニケーションがしにくいといった問題点もある．また，装置が複雑になりがちで，一般的な目的には使い辛く，長時間作業する場合には疲労の原因となってしまう．一方で類似の研究例として，清川らは，HMD を用いた 2 人 1 組の都市デザインタスクにおいて，通常の協調作業と酷似しているという知見を得ている．また，3 種類の異なる HMD を用いた場合には，タスクパフォーマンスと発話過程，主観評価を比較し，HMD の視野角の違いが非言語情報によるコミュニケーションに影響を与えることを示している [81]．

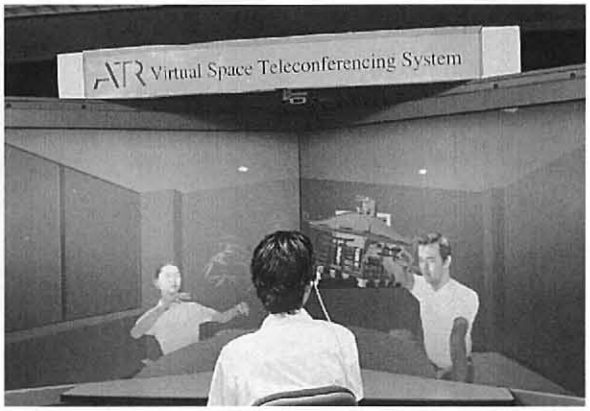


図 2.17: 臨場感通信会議システム

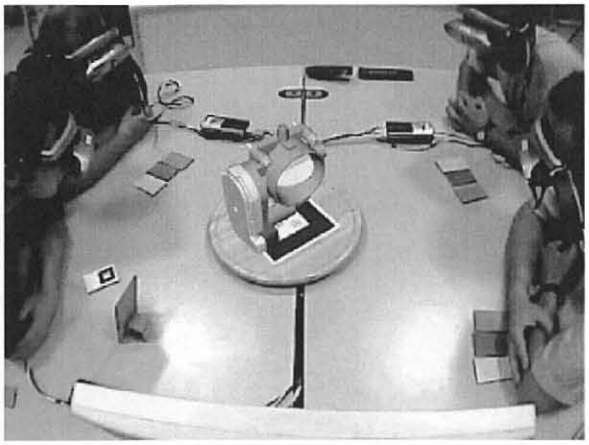


図 2.18: MagicMeeting

2.3.6 複数のディスプレイを組み合わせた協調インタラクション

テーブル型ディスプレイに複数のディスプレイを組み合わせることで協調作業を支援する研究も行われている [15, 37–42, 49]. 複数の利用者が一ヶ所に集まって作業をするだけではなく，それぞれ個人用のディスプレイで作業している人が，必要に応じてテーブル型ディスプレイなどに集まるといったような，利用者同士がディスプレイを選択しながら進める協調作業が見られる．このような環境の場合，複数のコンピュータから構成されることが多く，複数のディスプレイへの入力手法やディスプレイ間の情報移動などの協調インタラクションに工夫が必要である．

複数ディスプレイへの入力手法の一例として，Johanson らの提案する “PointRight” [37] がある．これは，1つのマウスからの入力をネットワークを通じて他のコンピュータに転送することで複数ディスプレイへの容易な入力を実現している．また，Rekimoto の “Pick-and-Drop” [38] のように，コンピュータ間でスタイラスを用いてアイコンなどをドラッグアンドドロップするという直感的なインタフェースも提案されている．さらに，Nacenta らの提案する “Perspective Cursor” [39] では，利用者の視点位置を中心とした仮想球面上を移動するカーソルを提供することで，任意の位置姿勢に設置されたディスプレイ間でもシームレスなカーソル移動を実現している．

また，ディスプレイ間の容易な情報移動に関する事例として，Prante らの提案する “Roomware” [40] がある．図 2.19 に示すように，複数のコンピュータをネットワークで接

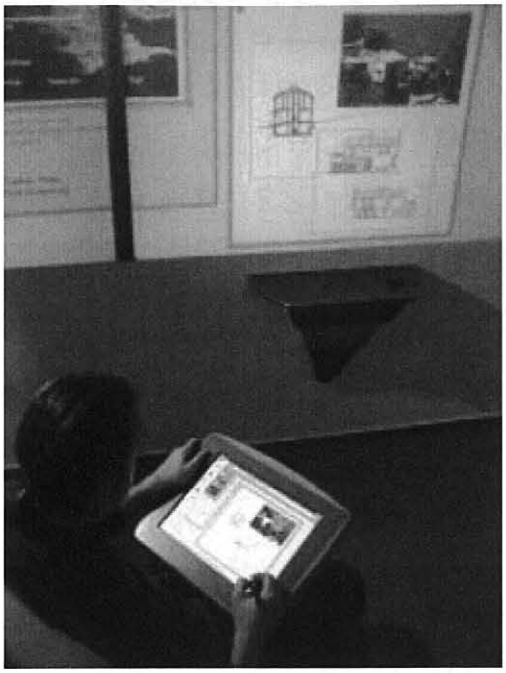


図 2.19: Roomware

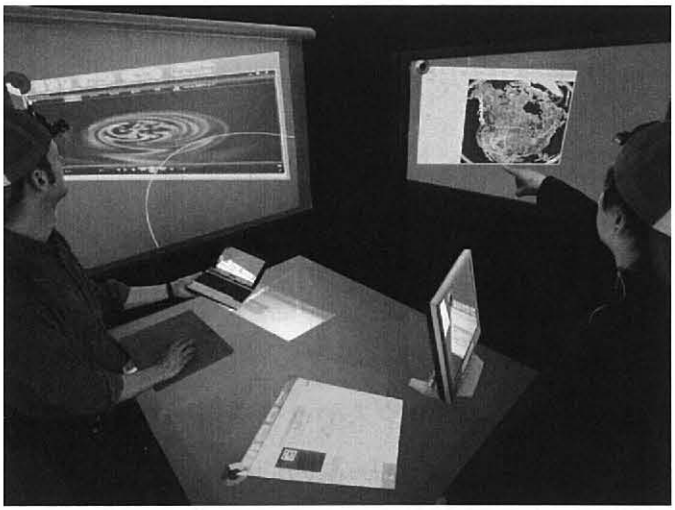


図 2.20: E-conic

続することで，ディスプレイ間でのアプリケーションの移動を実現している．同様の構成で，Biehl らの提案する “ARIS” [41] もある．その他にも，Tan らの “WinCuts” [42] では，個人用のディスプレイ画面の一部を画像としてコピーし，ネットワークを通じて別のディスプレイに表示することでディスプレイ間の容易な情報移動を可能にしている．また，先述した “Augmented Surfaces” [15] では，図 2.2 に示すように，利用者は “hyperdragging” と呼ばれる手法を用いて，統合されたディスプレイ間で情報をやり取りすることができ，個人空間と共有空間の自然な使い分けを実現している．さらに，Nacenta らは透視投影を応用することでシームレスにディスプレイを接続する “E-conic” [49, 82] を提案している．図 2.20 に示すように，利用者の視点に対して垂直な仮想平面上にウィンドウやカーソルといった GUI オブジェクトがあるものとして，これらをディスプレイに投影した位置に表示している．またそれらを操作する手段としてマルチモーダルインタフェースを適用している [83].

2.4 テーブル上における協調インタラクションの調査と分析

グループウェアの登場からすぐにこれらが人間の行動や組織に及ぼす影響に対する関心が高まり，協調インタラクションの分析やその調査も様々に行われてきた．そこで本節では，様々な研究機関等で行われているテーブル上における協調インタラクションの行動分析について述べ，また協調インタラクションの一例として，競争の側面を持つ協調作業について述べる．

2.4.1 テーブル上における協調インタラクションの行動分析

Tang は，3 人程度のグループに対してタスク観察実験を行い，テーブル上での協調作業にはジェスチャやスケッチを用いたインタラクションが重要であることを示唆した．また同時に，コンピュータの使用によって作業が分断されることや情報を提示する向きによる影響などについても考察している [84]．Pinelle らは，タスクワークとチームワークのバランスに着目し，テーブル上における協調作業のための数種類の低次元のアクションを “mechanics of collaboration” としてモデル化した [85]．さらに松田らは，迷路の中で目標を捕まえるタスクを実施し，個人使用の液晶ディスプレイを用いる場合と “Lumisight Table” を用いる場合とを比較し，集団内部の親密さがタスクパフォーマンスに与える影響について報告した [86]．また最近では，Tang らが 2 人組での協調作業には，6 種類の作業スタイルがあることを示している [87]．

テーブル自体の属性やテーブル上の作業空間に着目した研究もある．Ryall らは，テーブルのサイズとグループの人数に着目し，テーブルのサイズはタスクの速さに影響を与えないなどの効率的な協調作業支援のための知見を示している [88]．また，Scott らは，テーブル上の領域が協調作業にどのように影響するかを詳しく検証し，personal，group，storage の 3 種類の領域を提案した [59]．Kruger らは，テーブル上に置かれているオブジェクトの向きが持つ主要な役割として，内容の理解，協調インタラクションの仲介，そしてコミュニケーション確立の手がかりの 3 種類に分類し論じた [89]．その他にも Ringel らは，個人作業とグループ作業の切り替えとして，release，relocate，reorient，resize の 4 種類の行動が重要であると述べている [90]．

また，効率的な協調作業のためには，自分以外の利用者がどのような行動をしているかやどのような考えを持っているかなどのアウェアネス情報を理解する必要がある [91]．

一般にリアルタイム型環境の方が，非言語情報によるコミュニケーションを含むため課題が多く，適切なアウェアネス情報を選択し支援する必要がある．そのため，こういったアウェアネス支援の一例として，Pauchet らは “DiamondTouch” を基にしたシステムを用いて，遠隔地にいる相手の腕とそのジェスチャをテーブル上に重畳表示することによって，分散型環境においても対面型環境と同等のタスクパフォーマンスが得られることを確認している [92,93].

このように，様々なタスク設定において，テーブル上における協調インタラクションの行動分析や評価は行われてきている．次節では，多様なタスクにおける協調インタラクションの一例として，競争の側面を持つ協調作業 [94,95] に着目し，その概要について述べる．

2.4.2 競争の側面を持つ協調作業

様々な場での協調作業を詳しく観察すると，個々に作業をする場面や複数の人での共同作業を求められる場面など多様な状況がある．また目的達成のためには協調するばかりではなく，時には互いに意見を対立させ合うような状況や，自分の利益だけを追求する状況などもありえる．このような例は，ビジネスの場面では多く見ることができるが，身近な例としては，物々交換やオークションなどといった例が挙げられる．友人や家族などとカードゲームやボードゲームなどを楽しむ場合にも，同様の状況は生じると考えられる．

「協調」と「競争」の 2 つの側面を持った協調作業では，参加者は作業全体を注意深く観察し，適切なタイミングで適切な相手と交渉をする必要がある．このような交渉を通じて，参加者は個々の利益を追求すると同時に，グループ全体の利益を高める．このようなプロセスを競争の側面を持つ協調作業と呼ぶが，その効率化のためには，作業の状況に応じた協調と競争のバランスが求められる．しかしながら，こういった種類の協調作業は，ビジネスの分野ではしばしば議論がなされているものの [96,97]，テーブル型ディスプレイ上の話としてはあまり検討されてこなかった．

テーブル上での競争の側面を持つ協調作業

テーブル型ディスプレイ上で競争の側面を持つ協調作業をすることや，こういった作業を支援するシステムを設計することができるかどうかを検討するため，競争的な要素を含むタスクを協調して行う際の人の行動を分析する必要がある．そこで，図 2.21 に示すよ

図 2.21: 競争的な要素を含むタスクの様子

うにテーブル上での作業における画像カードを用いた3種類の交渉タスクについて調査する．その調査結果から，次のような3つの特徴的な行動が示された．

タイミング: 被験者は情報を他の被験者に提示する際には，個人空間や公共空間への情報の提示によって，適切な時期に他者の注意を引きつけ，注目を集めている様子が観察された．このような空間の間の情報の移動によって，被験者は議論やゲームの状況に応じたタイミングを図っていることが示唆された．

Epistemic Action: Epistemic Action [98] とは，人が認知的な負荷やエラーを軽減するためにとるタスクの達成に直接的には関係の無い行動のことである．例として，(1) 画像カードの内容を確認したり，(2) 画像カードを並べ替えたり，(3) 交渉相手に画像カードを差し出すことを躊躇し，変更したりするといった行動がある．このような行動は，交渉の機会を窺い，次の行動を思案するための行動であり，特にプライベート空間にある情報に対する行動として観察され，競争の側面を持つ協調作業にとって重要であることが示唆された．

評価のプロセス: 他の被験者から情報の内容を提示された際には，被験者は提示された情報の価値を2段階のステップで評価していることが観察された．競争の側面を持つ協調作業などの情報の価値に十分に注意を払う必要がある場合には，最初に個人空間などに提示された段階で即座にその情報の価値を評価するステップと，価値が認められた場合に情報を公共空間やプライベート空間へと移動させ，さらに時間をかけて評価するステップの2段階で評価されることが示唆された．

テーブル型ディスプレイ上での競争の側面を持つ協調作業

続いて，図 2.22 に示すように，UbiTable [22] に基づくもの，DiamondTouch [20] に基づくもの，そして，SharedWell の 3 種類のテーブル型ディスプレイ上での行動と比較・検討することから，テーブル型ディスプレイがプライベート空間や個人空間，共有・公共空間をどのように支援するかについて調査する．その調査結果から，競争の側面を持つ協調作業を支援するための新たなテーブル型ディスプレイ設計の指針が次のように示された．

個人空間の生成を支援すること: テーブル上での競争の側面を持った交渉において，個人空間を中心とした情報の移動が重要な要素であることが示唆された．Scott らは，たとえシステム側が個人空間を提供していなくても，利用者は必要に応じて個人空間を生成する [59] としているが，競争の側面を持つ協調作業のためには，テーブル型ディスプレイは明示的に個人空間を提供する必要があり，プライベート空間と個人空間を明確に区別する必要がある．

空間の間の容易な移動を支援すること: 適切な時期を図って情報を移動させたり，空間の間の移動によって評価のきっかけを生んだりと，競争の側面を持つ交渉では空間の間の容易な情報移動が求められる．個人空間を中心とした情報の移動によって，移動された情報は交渉の価値のあるものとして他の利用者に認識させることができ，その反応を得ることができる．現在多くの情報移動を支援するインタラクション手法が提案されているが，我々の結果はこれを再確認するものである．

ジェスチャに敏感であること: テーブルにおけるその他の協調作業でも同様に，競争の側面を持つ協調作業においても，相手の身体動作や表情などのアウェアネス情報に頼っている部分は大きい．それゆえ，テーブル型ディスプレイは，利用者がこういった手がかりを用いて他の利用者のプライバシーを損なわない程度に次の行動を予測し，交渉を有利に進めることを阻害するようなものであってはならず，ジェスチャをうまく利用するべきである．

Epistemic Action を支援すること: 競争の側面を持つ協調作業では，次の交渉について思案するために，Epistemic Action を行う必要がある．テーブル型ディスプレイ上においても，Epistemic Action を明示的に支援するために設計されていたわけではないが，繰り返し Epistemic Action が観察されていた．そのため，テーブル型ディスプレイではこの行動を考慮に入れ，Epistemic Action を十分に行える空間の創出と Epistemic Action を共有するための支援が求められる．

(a) UbiTable-Inspired (b) DiamondTouch-Inspired (c) SharedWell

図 2.22: 3種類のテーブル型ディスプレイ

まとめ

テーブル上での作業における3種類の交渉タスクについて調査し，適切なタイミングを図ることと次の行動を思案するためのEpistemic Action，そして交渉の価値を評価するプロセスの3つの特徴的な行動が示された．続いて，その結果と3種類のテーブル型ディスプレイにおける被験者の行動とを比較・検討することで，競争の側面を持つ協調作業を支援するためのテーブル型ディスプレイ設計の指針が示された．

検討課題として，対象とした競争的な要素を含むタスクは3種類であったが，このようなタスクが実際の場面で見られる競争の側面を持つ協調作業に一般的に拡張可能かどうか検討しなければならない．実際に考えられるタスクは多岐に渡り，様々な形態が存在するが，Steinerのタスク類型 [99] などの観点に着目し，タスク構造に応じた詳細な評価が必要であろうと考えられる．また，集団を形成する参加者の特性にも影響されると考えられ，集団の個性やリーダシップなどの影響 [100,101] を調査する必要もあろうと思われる．

2.5 おわりに

2.3節で述べたように，非常に多くのテーブル型ディスプレイとそれを用いた協調インタラクション手法が提案されており，それぞれの手法が様々な協調作業の支援に寄与している．しかし，対象とするタスクや表示データ，システムの構成によっては利用者に不必要な移動や情報の操作などのインタラクションを強制してしまい，自然な協調インタラクションをすることができるといったテーブル型システムの特徴を十分に活かせなくなるこ

ともありえる.

対象とするタスクとして，2.4.1節で述べたような個人の保有情報と共有情報の両方を同時に扱うことが求められる作業では，これら2種類の情報を同時に操作するインタラクション手法が求められる．2.3.2節で述べたように立体視の原理を応用したものや手などの身体的な動作を用いて情報を隠すものなどが挙げられるが，他の利用者から見られないようにするなど常に気を配る必要がある．そのため，個人が保有する情報は常に隠しながら，共有情報と同等に扱うことができるようなデザインが求められる．

また，表示するデータとして立体映像を用いた場合には，2.3.4節や2.3.5節で述べたように複数の利用者で同時に立体映像を観察することができるテーブル型の立体表示ディスプレイやHMDなどを用いたシステムはいくつか提案されている．このような立体映像を用いた協調作業を検討することは，遠隔地間での医療や工業デザインなどの分野の技術発展に寄与することができると考えられる．しかし，このような協調作業において，利用者間の会話や立体映像を直接指示するなどのコミュニケーションの違いがどのような影響を与えるかについては検討されておらず，伝送するべき情報をどのように選択するかは示されていない.

さらに，2.3.6節で述べたように，テーブル型ディスプレイを単独ではなく，これに複数のディスプレイを組み合わせるといったシステムの構成が多様化する場合には，利用者は様々な位置や向きにある複数のディスプレイを見比べ，ときには移動しながら議論をするため，複数のディスプレイに表示される情報は利用者の視点位置によっては見にくくなる問題も生じる．そのため，利用者と複数のディスプレイの位置情報をうまく利用した，単一のディスプレイ環境にはないインタフェースが求められる.

第3章

個人の保有情報と共有情報を共存表示できる協調作業ディスプレイ

3.1 はじめに

本章では，多様化するタスクのカテゴリの1つとして，他の利用者と共有する情報だけではなく，共有するべきではない個人が保有する情報も同時に扱うことが求められる協調作業に着目する．このような協調作業を支援するテーブル型ディスプレイとして，SharedWellを提案し，評価した結果について述べる [43–45].

グループで意見やアイデアを交換をしたり，協調して何かの作業をしたりする際には，テーブルを用いることが多く，そのような対面型の協調作業を支援するためのテーブル型ディスプレイも多く提案されてきた．このようなテーブル型システムでは，大型のディスプレイを用いるため，利用者全員で共有するべき情報を一度に提示できるが，様々な場での協調作業を詳しく観察すると，他の利用者と共有するべき “共有情報” だけではなく，他の利用者と共有するべきではない “個人の保有情報” も同時に扱えるような仕組みも求められる場合も多い．この分類は静的なものとは限らず，状況に応じて動的に変化する場合もありえる．

一般に，人は，情報を共有し合いながら他人と交渉をしたりする際には，手持ちの情報の内どの範囲までを他人に見せるべきか，または逆に，どの情報は他人に見せるべきではないのかなどについて，常に注意を払う必要がある [102]．重要な決定をする際に，それまで他人と共有していなかった秘密の情報を交渉の材料とすることができ，その情報のイ

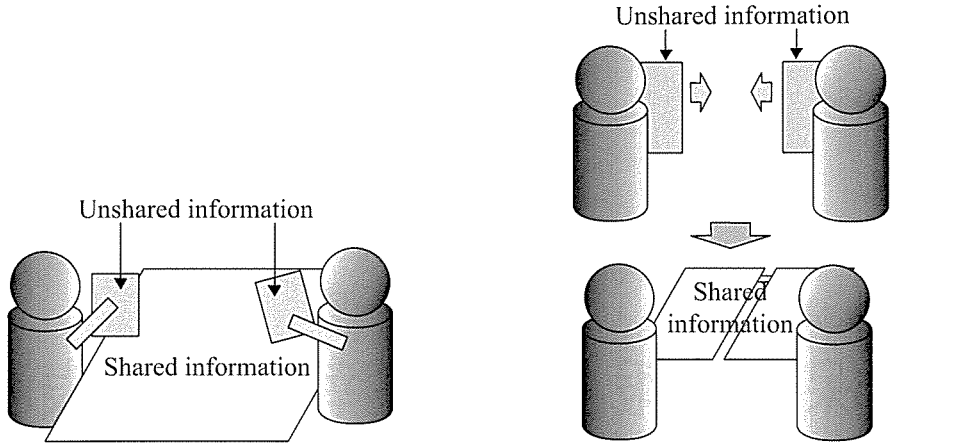


図 3.1: 個人の保有情報と共有情報を利用する典型的な例

ンパクトや価値が最も高まった時点で特定の交渉相手に内容を提示するといった交渉をすることができる．そのため，個人の保有情報と共有情報の両方を同時に扱えるようなテーブル型ディスプレイもいくつか提案されてきた [15,23,31,32]．例えば，図 3.1 (a) に示すように，複数の個人用の小型ディスプレイを用いて，個人の保有情報と共有情報を別々に表示させる形態が考えられる．しかし，この場合，ある情報を他の利用者と共有しようとすると，その情報の所有者は，それを公共のディスプレイ上に移動させるという作業が必要になる．このような作業は，利用者が多くの情報を持っている場合には面倒であるばかりではなく，ディスプレイ上の情報の表示位置が乖離しているため，情報の管理や把握という点でも困難である．また，図 3.1 (b) に示すように，個人用のディスプレイを共有したい相手に直接見せる形態もある．これは最も簡単で直感的ではあるが，自分のディスプレイ上に表示されているすべての情報を共有することになってしまい，ある特定の情報のみを共有して，その他の情報は共有しないといったことができない．

そこで，単一ディスプレイ上に複数の利用者が個々に持つ保有情報と共有情報をシームレスに共存させて表示できるテーブル型ディスプレイ “SharedWell” を提案する．このディスプレイを用いることで，利用者の動きに伴って動的に個人の保有情報と共有情報の提示領域を変更することができ，複数の利用者の中から誰と，どの情報を，どのように共有するかなどをコントロールしながら協調作業を進めることができる．また，SharedWell

において個人の保有情報と共有情報の両方が必要となるようなタスクを設定し，その際の被験者の行動について評価した結果および考察について述べる．

3.2 SharedWellの提案

3.2.1 個人の保有情報と共有情報の共存表示

個人の保有情報と共有情報を同一のディスプレイ上にシームレスに共存表示する方法について述べる．ある利用者が所有する情報の内，他の利用者と共有する共有情報も自分の保有する情報を提示するディスプレイ面の領域の近傍（またはその一部）に表示することができれば，あくまで，その情報を所有者自らの管理下に置くことができる．そして，この情報に興味を持った他の利用者が，この領域を覗き込むことによって共有情報を見ることができれば，このような他の利用者の明示的な動きは，作業上環境の中でのアウェアネス情報としても役に立つと考えられる．また，自分が共有情報として他の利用者に表示したものについて，その後の経過を知ることもできる．そのため，通常は個人の保有情報を提示しているディスプレイ面の一部を，協調作業の状況に応じて他の利用者からも見えるようにし，その場所に共有情報を提示する方法が考えられる．

このような構成において，もし，各利用者の保有情報を提示するディスプレイがそれぞれ離れた場所にあれば，利用者は，表示されている共有情報を探すために，他の利用者の保有情報を提示するディスプレイを１つずつ順番に見て回る必要がある．しかし，大勢の人と協調して作業をしたり交渉をしたりする場合には，これは面倒な作業である．もし，個々の利用者の保有情報が同一のディスプレイ上に配置されれば，利用者は皆，このディスプレイに集中して作業を進めることができる．そのため，単一のディスプレイを共有して利用して，そこに，各利用者の保有情報と複数の利用者で共有すべき共有情報の両方を表示する方法は，数人程度がお互いの顔を見て話し合いながら協調して作業をしたり交渉をしたりする場合に有利である．次節では，この実現方法について述べる．

3.2.2 基本原理

図 3.2 (a) に示すように，一般のディスプレイ装置と，中央部のマスクホール以外はディスプレイを覆い隠すディスプレイマスクから構成される．ディスプレイマスクをディスプ

レイ面から適当な距離だけ離れた位置に設置し，利用者がマスクホールを通してディスプレイを利用することにより，各利用者の視点位置に応じて，それぞれが異なるディスプレイ上の領域を利用することが可能となる．この領域を各利用者の情報提示領域とする．

3人の利用者が同時にこのディスプレイを利用した場合の，各利用者の情報提示領域の一例を図 3.2 (b) に示す．図中の利用者Pの情報提示領域は，ディスプレイマスクに遮られるために，他の利用者（QとR）から見ることのできない領域となっている．すなわち，この領域は利用者Pだけから見ることのできる情報提示領域（プライベート空間）となる．一方，利用者Qと利用者Rのように，お互いの情報提示領域が重なっている場合，その重なっている領域は利用者Qと利用者Rの双方から見ることのできる領域となっている．すなわちこの領域は，利用者Qと利用者Rによって共有された情報提示領域（共有空間）となる．利用者Qと利用者Rの情報提示領域の内，重なった領域以外の部分は，それぞれの利用者のみが見ることができるプライベート空間となる．

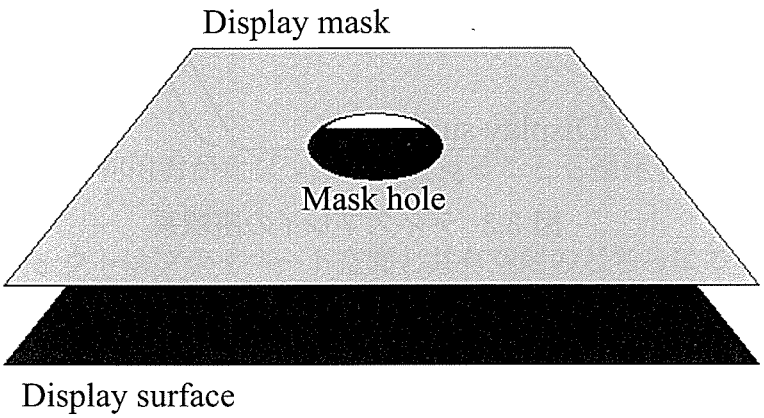
利用者が頭を動かすなどして視点位置が変化した場合には，その変化に応じて情報提示領域を動的に生成する．これにより，利用者は他の利用者との位置関係を変化させることで，自分だけが見ることができるプライベート空間と，特定の利用者と共有して利用できる共有空間を，動的に使い分けることができる．

3.2.3　情報提示領域

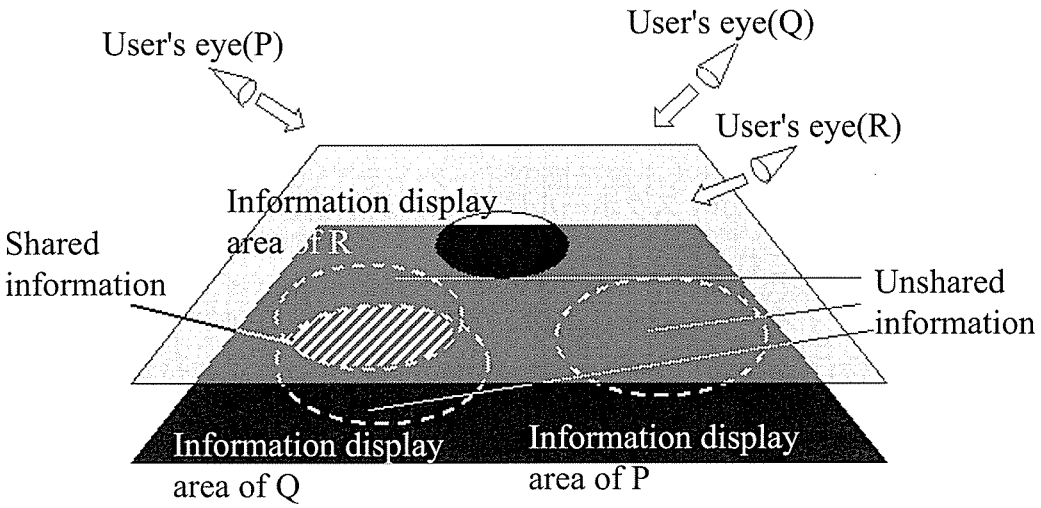
情報提示領域の形状は，マスクホールの形状に依存する．マスクホールの形状は様々なものが考えられ，基本的にはアプリケーションに依存すると考えられる．本構成例のようにディスプレイを水平に利用したテーブル型システムでは，円形とすることで方向性を打ち消すことができる．矩形とすることも考えられるが，本章ではマスクホールの形状は円形であるとする．

情報提示領域の位置は，ディスプレイ面とマスク間の距離 D と，利用者の視点位置 $(x_{eye}, y_{eye}, z_{eye})$ によって決定される．図 3.3 に示すようにディスプレイ面の中心を原点とした座標系をとった場合，情報提示領域の中心位置 $(x_{center}, y_{center}, z_{center})$ は次式のようになる．

$$x_{center} = -x_{eye} \cdot \frac{D}{z_{eye} - D}$$



(a) Display mask and display



(b) Display areas for individual users

図 3.2: ディスプレイの原理

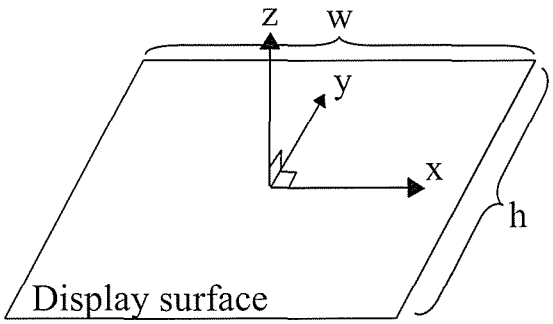


図 3.3: ディスプレイの座標系

$$\begin{aligned} y_{center} &= -y_{eye} \cdot \frac{D}{z_{eye} - D} \\ z_{center} &= 0 \end{aligned} \tag{3.1}$$

また，情報提示領域の半径 r は，利用者の視点位置 z_{eye} とディスプレイ面とマスク間の距離 D，マスクホールの半径 R によって次のように与えられる．

$$r = R \cdot \frac{z_{eye}}{z_{eye} - D} = R + \frac{RD}{z_{eye} - D} \tag{3.2}$$

この 3.2 式より，利用者がマスクホールに近づけば情報提示領域が拡大され，遠ざかれば情報提示領域が縮小されることがわかる．

また，利用者がディスプレイの周りを動いた場合に，どの方向から利用しても常に情報提示領域が利用者の方向を向くように，領域全体を回転させる必要がある．情報提示領域の回転角 θ は，利用者の視点位置 x_{eye}，y_{eye} から次のように求めることができる．

$$\theta = 90 + \tan^{-1} \frac{y_{eye}}{x_{eye}} \tag{3.3}$$

3.1 式と 3.3 式によって，それぞれの利用者に対応する情報提示領域が動的に決定される．

続いて，情報そのものを表すアイコンなどのオブジェクトを表示する場合について述べる．利用者は自分の情報提示領域内にオブジェクトを所有・表示することができ，その領域内において自由に操作する権利を持つ．ここで操作とは，オブジェクトに対して実行・削除・コピー・編集などをすることである．また，各オブジェクトは利用者の操作権限を

表すものとして，次の 3 段階のパーミッションをとり得るものとする．

- Level-1: 所有者以外のどの利用者もオブジェクトを見ることも操作することもできない
- Level-2: 所有者以外の利用者はオブジェクトを見ることができるが操作することはできない
- Level-3: すべての利用者がオブジェクトを見ることも操作することもできる

Level-3 のオブジェクトはプライベート空間と共有空間のどちらにでも置くことができ，すべての利用者はこのオブジェクトを操作することができる．Level-2 のオブジェクトも同様にプライベート空間と共有空間のどちらにでも置くことができるが，オブジェクトが共有空間に置かれている場合でも，所有者以外の利用者が操作することはできない．Level-1 のオブジェクトは所有者のプライベート空間でのみ操作することができる．

各利用者の情報提示領域内の各オブジェクトの配置場所は，基本的にはその利用者が任意に決めることができるが，システム側が制御する方が良い場合もある．例えば，図 3.4 (a) に示すように，利用者 P の情報提示領域内に Level-1 のオブジェクトと Level-2 のオブジェクトが表示されているとする．今，図 3.4 (b) に示すように利用者 Q が利用者 P の方へ接近したとすると，利用者 P のプライベート空間が縮小されるに伴い，共有空間が拡大され，その中に Level-1 と Level-2 のオブジェクトが入ったとする．この場合，Level-2 のオブジェクトは元にあった位置から動くことはないが，Level-1 のオブジェクトは他の利用者から見られないようにする必要がある．このための方法の 1 つとして，図 3.4 (c) に示すように Level-1 のオブジェクトを，共有空間外に表示位置を移動させる方法がある．利用者 Q が利用者 P から十分に離れれば，オブジェクトは元にあったように表示される．またアプリケーションによっては，システム側が積極的にオブジェクトの共有を促進するような場合もあるかもしれない．例えば，わずかに生成された共有空間に，オブジェクトを集めて表示するというようなことも考えられる．

3.2.4 システム構成

システムの構成図を図 3.5 に示す．ディスプレイ筐体は，多人数共有型立体ディスプレイ [103] と同一のものを利用するが，立体視は用いない．ディスプレイ面のサイズは 1,219

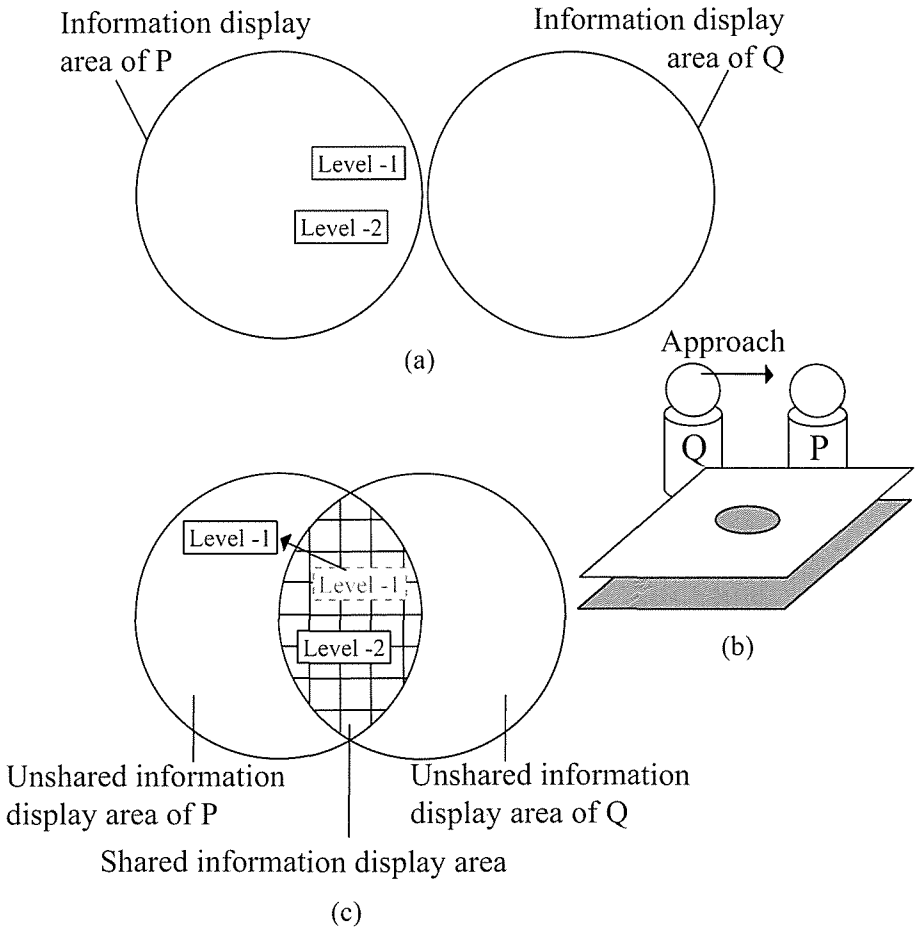


図 3.4: オブジェクトの位置自動変更

× 914 mm であり，ディスプレイ面の高さは 1,000 mm である．ディスプレイマスクはディスプレイ面から 200 mm 離れた位置に設置し，マスクホールの半径は 130 mm である．利用者の視点位置検出方法として超音波式の3次元トラッカ (IS-600 Mark2 SoniDisc, InterSense 社製) を用いる．また，表示したオブジェクトを操作するための入力装置として，ゲームコントローラ (Dualshock2，SONY 社製) を使用する．

試作したシステムに実装しているユーザインタフェースの主な機能を紹介する．利用者は自分が所有しているオブジェクトのパーミッションを自由に変更することができる．試作システムでは，コントローラを用いてポインタを動かし，オブジェクトをクリックすることにより，パーミッションを変えることができる．また，利用者はオブジェクトを自分のプライベート空間と，特定の利用者との共有空間のどちらに置くかによって，他の利用

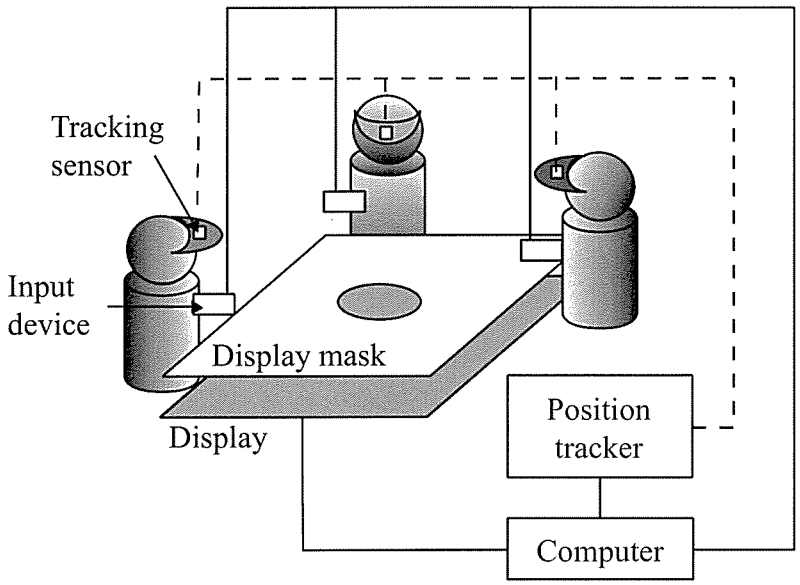


図 3.5: システム構成

者とどの情報を共有するかをコントロールすることができる．例えば，あるプライベート空間内にある共有されていないオブジェクトを，特定の利用者との共有空間内にドラッグアンドドロップすることによって，その利用者と共有することも可能である．この場合，プライベート空間内にあったオブジェクトの持つパーミッションがLevel-1であれば，移動後のパーミッションはLevel-2へと変化する．

また，利用者はオブジェクトをドラッグすることにより，その表示位置を変更することが可能である．さらに，共有空間内に置かれているLevel-3のオブジェクトを自分のプライベート空間内にまでドラッグすることで，所有権を自分に変更することができる．この機能を用いることにより，利用者は，プライベート空間内にあるオブジェクトを，共有空間を通して他の利用者へ受け渡すことが可能である．

3.3 SharedWellにおける協調作業の評価実験

3.3.1 目的と概要

提案した個人の保有情報と共有情報の共存表示できるテーブル型ディスプレイSharedWellにおける協調作業を，被験者同士の行動や情報オブジェクトの移動の違いに関して，

一般に用いられている実際のネットワーク環境の掲示板などを模したラップトップPCを用いた環境と実際のテーブルを用いる環境（実環境と呼ぶ）と比較して評価する．個人の保有情報と共有情報の両方が必要となるようなタスクを設定し，3種類の環境において観察実験を行うことによって，SharedWellにおける協調作業を議論する．

3.3.2　実験計画と手続き

設定するタスクは，Fantasy on Yahoo! Sports [104]を題材としたカードの交換タスクである．これは，利用者が仮想のチームの監督となり，実際のスポーツ選手を用いて自由にチームを編成することができるオンラインゲームである．現実の試合の結果や成績によって各選手にはポイントが割り振られ，利用者は仮想的に所持する選手のポイントの合計を競うというものである．本実験では，ルールを簡略化し，それぞれ異なるポイントを割り振った選手を表すカードを用いて，利用者は自分の所持するカードを他の利用者と交換をしながら，ポイントの合計を競うものとする．選手のカードにはポイント（0〜100）とランク（A〜C）を設け，利用者は所持する選手のカードのポイントを合計したものを個人スコアとする．その際，個人スコアは所持するカードの単純な合計ではなく，カードの組み合わせにより，あるルールによって多少変動する．被験者はこのようなルールの存在は知っているが，その組み合わせの内容は知らされない．例えば，ランクCの選手のカードを4枚集めると100ポイントが追加されるといったものである．また加えて，グループの参加者全員の合計ポイントであるグループスコアを他のグループと競わせることをそのグループ内の目標とする．

日本国籍の大学院生24歳から27歳までの男9人を被験者とし，3人1組の3グループで実験を行う．実験前には，簡単な操作説明と操作に慣れてもらうために3分間の練習時間を設ける．そして，個人スコアだけでなく，グループスコアも高めることが目標であることと実験中には自由にテーブルの周りを動き回って良いことの教示を与える．3種類の環境におけるタスク実行時間は20分間とし，順序による学習効果を相殺するため，実験に用いる選手のカードは環境毎にすべて異なるようにし，カウンタバランスを取る．実験の終了後，個人スコアが一番高かった被験者には粗品を渡すこととし，同様に全グループの実験の終了後，参加者全員の個人スコアの合計が一番高かったグループにも粗品を渡すこととする．

3.3.3 実験環境

実験環境として，SharedWellによる環境と同様の1,219 × 914 mmのサイズのテーブルを用いる．SharedWellによる環境に加えて，一般に用いられている実際のネットワーク環境の掲示板などを模したラップトップPCを用いた環境と実環境を用意した．図3.6にそれぞれの環境における実験の様子を示す．

SharedWellによる環境では，先述したシステム構成を用いる．被験者は，ゲームコントローラを用いてカードを操作し，他の被験者との間に生成される共有空間を用いて交渉し，カードを交換することで目的を達成する．図3.7（左）にディスプレイマスクを外した状態での各被験者の情報提示領域を示す．実験中，自分のプライベート空間の下部に個人スコアが常に表示されており，またカードをゲームコントローラのボタンでクリックすることで各選手のポイントやランクを見ることができる．

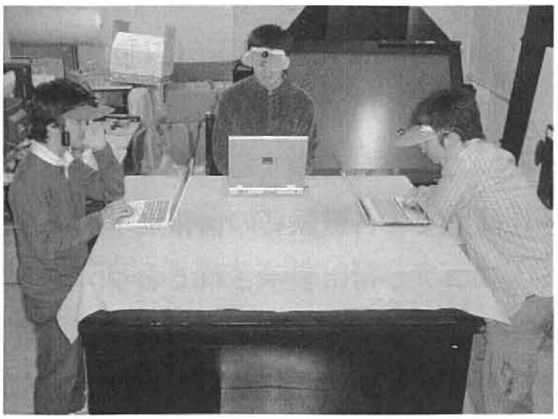
ラップトップPCを用いた環境では，被験者毎にラップトップPCが割り当てられ，図3.7（右）に示すようにそれぞれのスクリーンはプライベート空間と公共空間に分割されている．自分の所持する選手のカードはプライベート空間に置かれ，被験者はカードをプライベート空間から公共空間へと移動させることで他の被験者とカードを交換する．公共空間にカードを移動させると，ただちに他の被験者のスクリーン上の公共空間に表示される．そのカードを自分のプライベート空間へと移動させることで自分のカードとすることができる．個人スコアは，スクリーン下に常に表示されており，またカードをダブルクリックすることで各選手のポイントやランクを見ることができる．

実環境では，各選手のポイントやランクがプリントされた実物のカードを用いる．被験者はトレーディングカードゲームの要領でカードを交換する．自分のスコアを知りたい際には，実験管理者に問い合わせることで確認する．

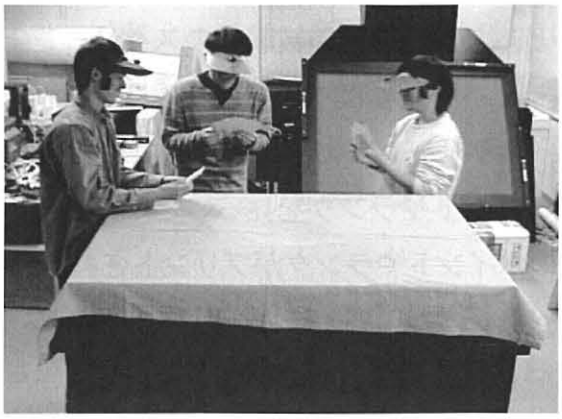
3.3.4 実験結果

3次元トラッカによる被験者の頭部位置，情報オブジェクトの移動データログ，そしてビデオによる解析によって，環境毎の被験者の行動を評価した．しかし，実環境における情報オブジェクトの移動データログについては，その3次元位置をトラッキングしたものではなく，ビデオ解析によるものである．交渉相手との交渉の一連の流れを，(1) 交渉の準備，(2) 交渉の開始と遂行，(3) 交渉の終了と評価の3つの段階に分けて議論する．

(a) SharedWell



(b) Laptop PC



(c) Real-world setting

図 3.6: 各環境における実験の様子

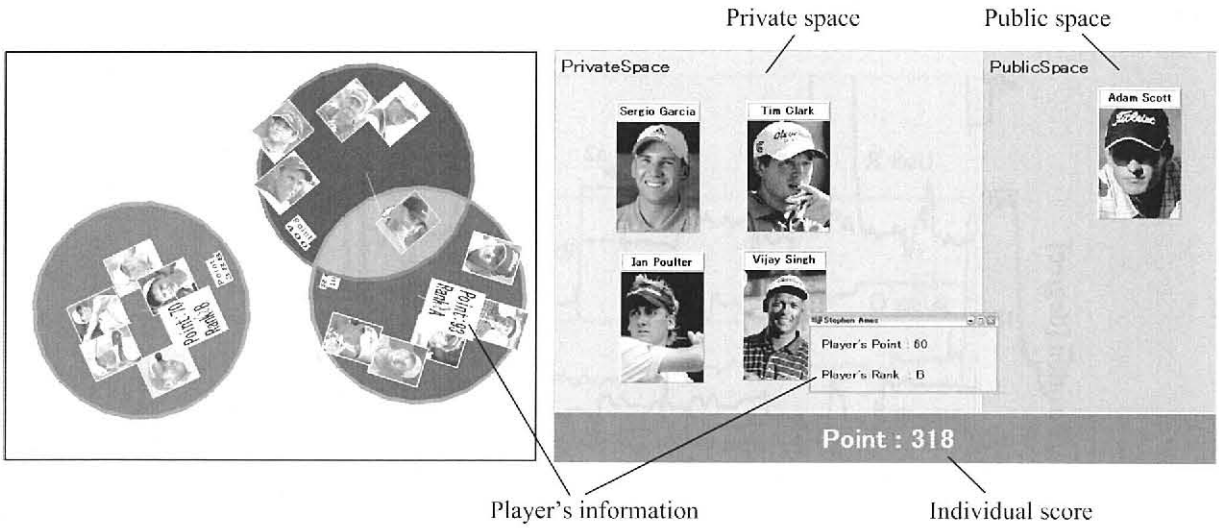
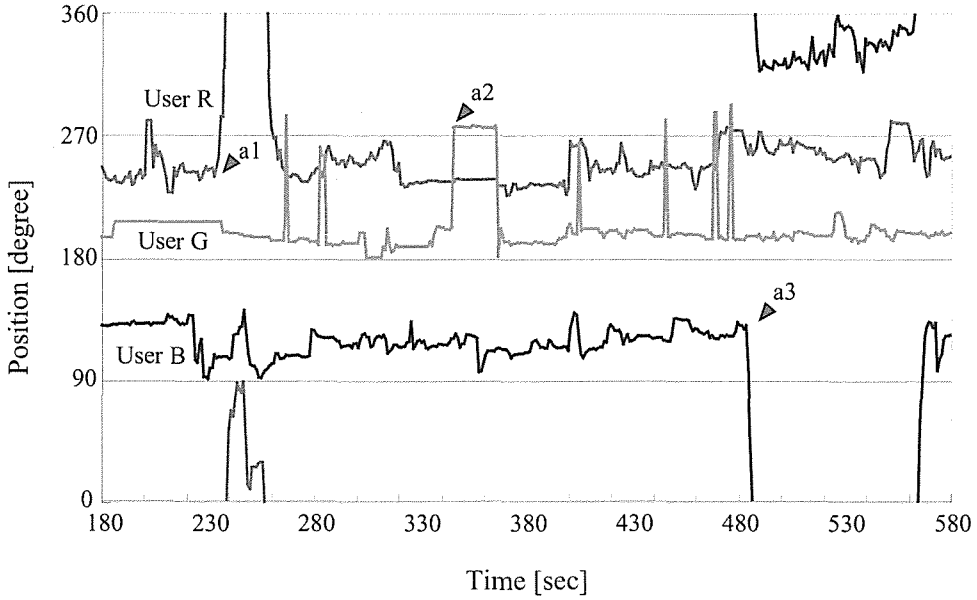


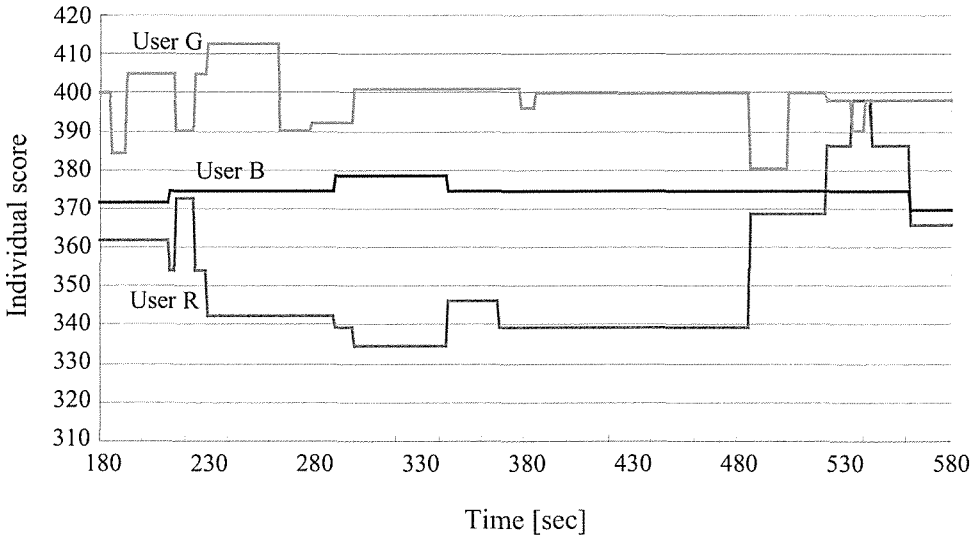
図 3.7: SharedWellによる環境（左）とラップトップPCを用いた環境（右）での表示例

交渉の準備

交渉の準備とは，交渉相手の観察や交換に用いる選手のカードの準備の段階とする．例として，図 3.8〜図 3.10 に SharedWell による環境における各グループ（Group 1，2，3とする）の各被験者（R，G，Bとする）の視点位置の推移とそれに対応する個人スコアの推移を，タスク開始3分後からの6分40秒間について示す．グラフの縦軸には，図 3.11に示すようにディスプレイ面回りの方位角で表した視点位置をとり，横軸には実験の経過時間（秒）をとっている．それぞれのグラフから，SharedWellによる環境では個人スコアが変化する前後において，被験者同士がお互い一定の距離を取り合い，十分なプライベート空間を保持していることがわかる．情報オブジェクトの移動データログも含めると，被験者らはこの空間において，何度も同じ選手のカードのポイントやランクを確認したり，カードを並べ替えたりするといった行動（Epistemic Action）が観察された．一方で，実環境においても同様に，被験者は自分の手元においてこのようなEpistemic Actionを行っている様子を観察できた．しかし，ラップトップPCを用いた環境では，スクリーン上にある自分のプライベート空間や公共空間だけに注目している傾向が高く，特に他の被験者を意識することはなく，プライベート空間においてEpistemic Actionはあまり観察されなかった．

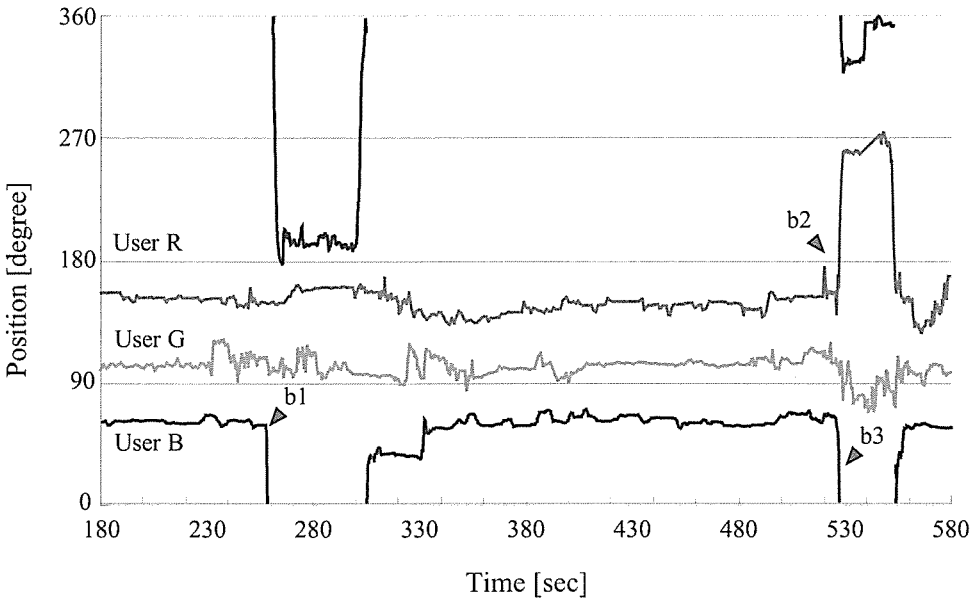


(a) Time-position graph

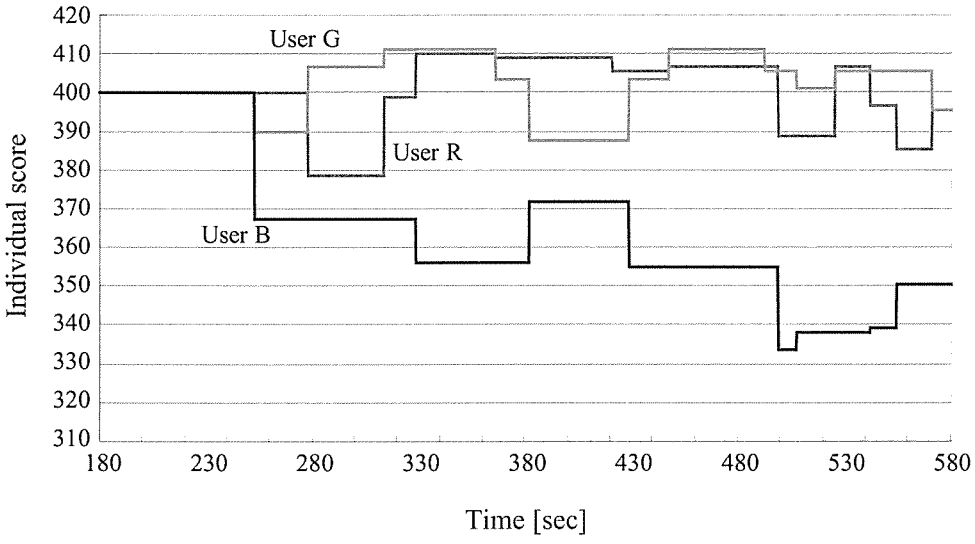


(b) Time-score graph

図 3.8: 時間に対する各被験者の位置と個人スコアの推移（SharedWell，Group 1）

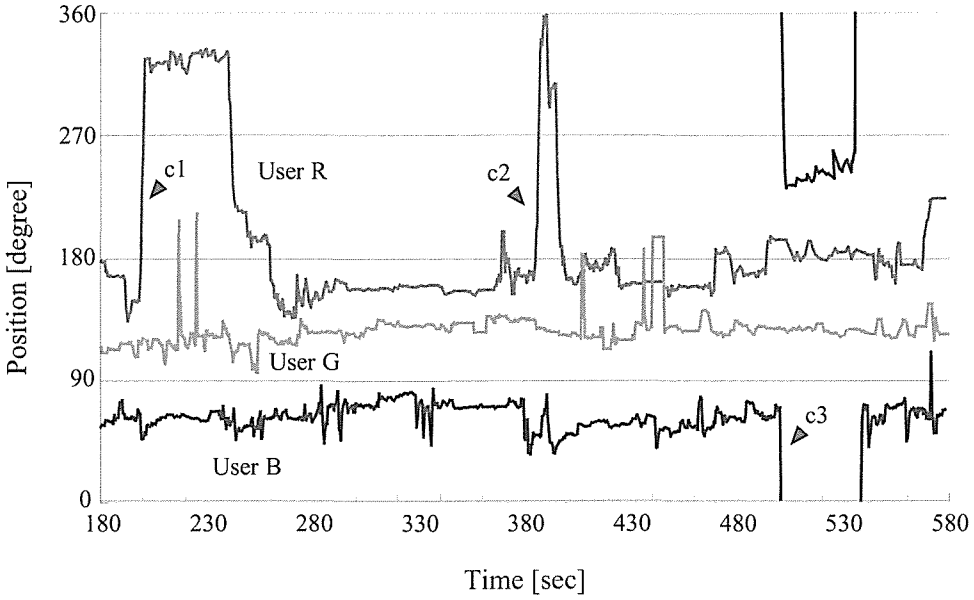


(a) Time-position graph

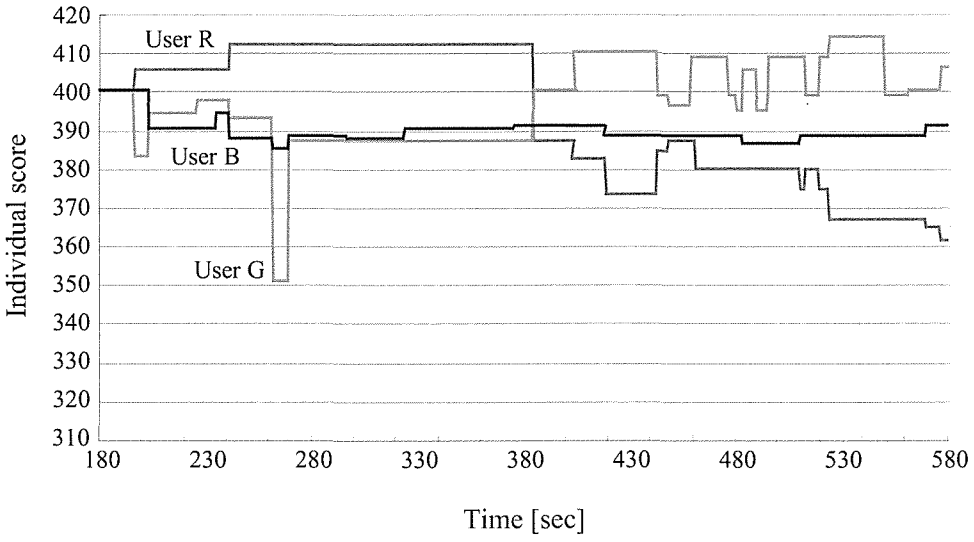


(b) Time-score graph

図 3.9: 時間に対する各被験者の位置と個人スコアの推移（SharedWell，Group 2）



(a) Time-position graph



(b) Time-score graph

図 3.10: 時間に対する各被験者の位置と個人スコアの推移（SharedWell，Group 3）

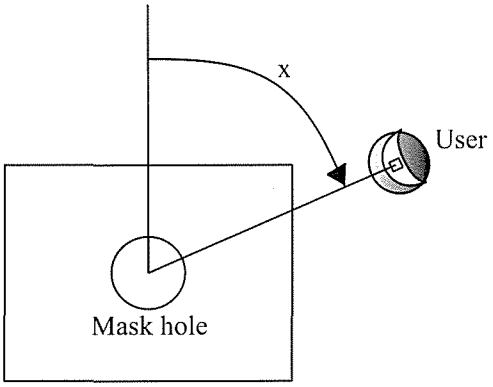


図 3.11: 被験者位置の定義

交渉の開始と遂行

交渉の開始と遂行とは，実際に交渉相手が決定し，交渉をしている段階のこととする．図 3.12 に環境毎の交換のために移動した平均回数を示す．SharedWell による環境では，システムの性質上，交渉を始める際には被験者の移動によるジェスチャを要するため，移動回数は他の環境と比べ多くなっている．例として，図 3.8〜図 3.10 (a) 中の楔形の記号 a1〜a3，b1〜b3，c1〜c3 は，被験者が他の被験者に向かって近づいた場面を示している．交換のために移動しようとする際には，被験者は 3 人同時に動き始めることはなく，1 人ないしは 2 人の被験者がその都度周りを窺い，交換を始めようと動き出し，他方は待っているという様子が見てとれる．これは，移動によるジェスチャが効果的なアウェアネス情報として用いられていると考えることができる．一方で，ラップトップ PC を用いた環境では被験者はスクリーン上を注視していることが多く，誰が公共空間に新たにカードを置いたのかといったことを伝えるために，発話によって相手との交渉のきっかけを作り出していた．そのため，ラップトップ PC を用いた環境では，交渉を開始しようとする際にも特に他の被験者を意識するような様子は見受けられなかった．また，実環境では発話に加えて，手を相手の方に差し出したり，体を交渉相手の方に向けるなどのジェスチャを伴っており，SharedWell による環境と同様に，このようなジェスチャが交渉の開始を伝えるアウェアネス情報として用いられていたと考えられる．

また，図 3.13 に環境毎の平均交換回数を示す．交渉の間には，図 3.13 に示すように，ラップトップ PC を用いた環境では他の環境に比べて非常に多くのカード交換が観察され

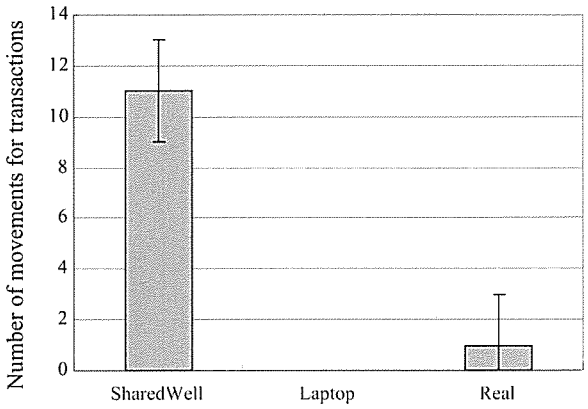


図 3.12: 環境毎の交換のための移動回数

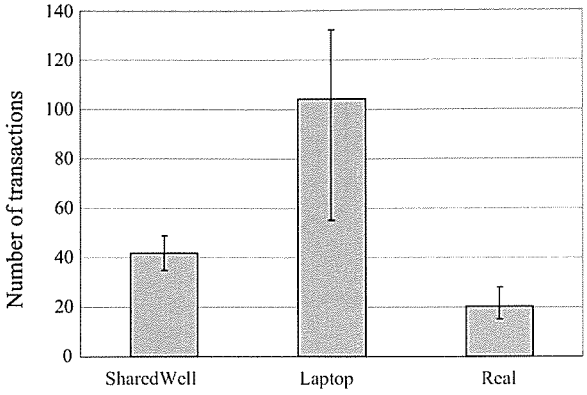


図 3.13: 環境毎の交換回数

た．また図 3.14 に，例としてラップトップ PC を用いた環境におけるあるグループの各被験者の個人スコアの推移を，タスク開始 5 分後からの 12 分間について示す．頻繁にスコアが上下変動を繰り返し，また交換回数も多いことから，この環境では提示されたカードに交換する価値があるかどうかをあまり評価することはせず，トライアンドエラー形式で交換をしていたことがわかる．例として，図中にこのような形式の交換と対応する部分を，楔形の記号 d1〜d3 として表している．一方 SharedWell による環境では，情報オブジェクトの移動データログから，被験者は交渉のための移動の際に，交渉相手との共有空間が生成されるであろう位置にあらかじめカードを移動しており，交渉相手の方が自身のプライベート空間へとカードを移動させることで交換をしていたことがわかった．また，SharedWell による環境ではラップトップ PC を用いた環境に比べて，図 3.13 に示すように交換した回数は少なく，また，図 3.8 (b)〜図 3.10 (b) に示すように個人スコアの推移も上下変動は少なかった．このことは，SharedWell の性質上から，カードの交換に制約があったことも考えられるが，実環境における交換した回数と比べて多かったことから，SharedWell による環境ではカードの交換が，ラップトップ PC を用いた環境に比べて，比較的慎重に行われていたことを示唆しているといえる．

交渉の終了と評価

交渉の終了と評価とは，被験者がある交換を終え，その結果を評価する段階のこととする．交渉が終了した際には，すべての被験者は頻繁に個人スコアを再確認していており，

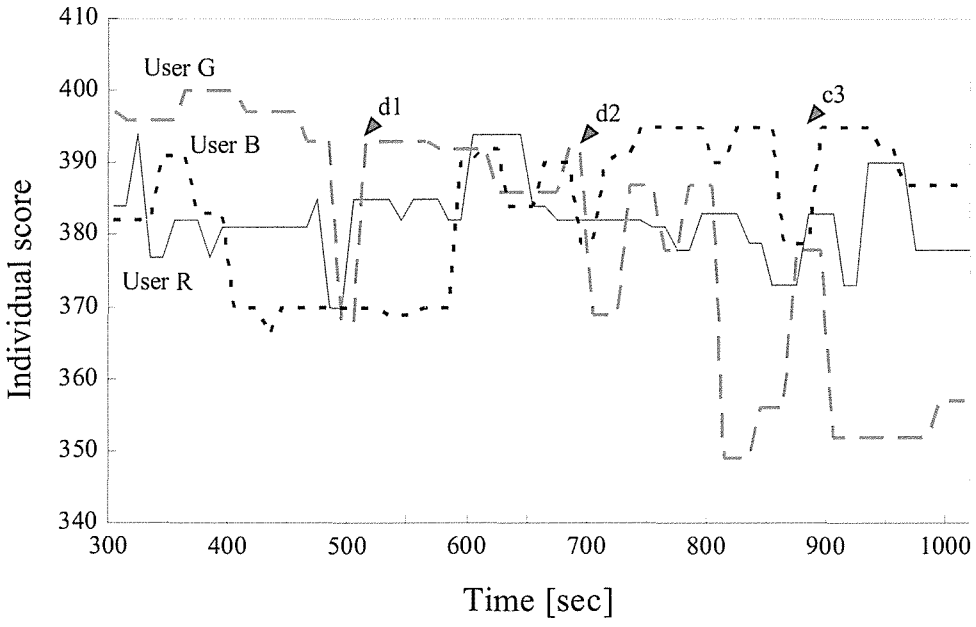


図 3.14: 時間に対する個人スコアの推移（ラップトップ PC を用いた環境）

これはすべての環境において観察できた．SharedWell による環境の場合でも，お互いに距離を取りながら，個人スコアの確認や次の交渉のための準備をしており，このような行動は，他の被験者に交渉が終わったということを伝える大切な役割をしているといえる．図 3.8〜図 3.10 からも，交渉の終了後，被験者は交渉相手から離れ，しばらくすると別の被験者が動きだすといった様子が見てとれる．

3.4 考察

実験結果から，提案システムでは，特定の交渉相手と動的な共有空間を生成し，スムーズに交渉できていることを確認した．また，交渉相手との距離を変えることによって共有する領域の大きさを変化させ，カードを交渉相手に提示できる領域を広げたり，相手から離れることで自分の個人スコアなどを確認しやすくしたりというように，意図的に行動し，交渉をしていたことが窺える．また，複数の利用者が個々に持つ保有情報と共有情報を同一のディスプレイ上に同時に表示できるため，それぞれの情報の関連性を確認しながら作業を進めることができる．さらに各利用者は，他の被験者の顔を見ながら作業をする

ことができるため，会話や移動などのジェスチャによってコミュニケーションのきっかけを作り，自然に交渉をすることができる．このような特徴を活かして，本ディスプレイは利用者が個々に保有する情報や他の利用者と共有するべき情報が動的に変化し，その関連性が重要になるような，例えば物々交換やオークション，カードゲームやボードゲームのようなタスクに利用できると考えられる．また，本ディスプレイでは，他の利用者と共有してこなかった個人の保有情報を，作業の局面に応じて交換・共有することができる．そのため，2.4.2節で述べたような競争の側面を持つ協調作業にも応用できるかもしれない．

また，提案システムにおける問題点の1つとして，情報提示領域の解像度の問題が挙げられる．使用するディスプレイの解像度をより高いものにしたとしても，それぞれの利用者が見る領域はディスプレイ面の一部にすぎない．実際には，本システムは3人程度が利用することを想定して設計しており，それぞれの利用者の領域の大きさは，ディスプレイの1/4から1/5程度である．これはアプリケーションによっては制約となるかもしれないが，本ディスプレイの利点が，解像度が限られるという制約に勝る場合も多くあると考える．また，超高解像度のディスプレイを利用することや，利用者数を2人に限定し，マスクホールを大きくして各利用者の情報提示領域を大きくすることも考えられる．

その他にも，ゲームコントローラを用いたカーソル操作による間接指示環境であることや，被験者が立っている状態で作業していたことが及ぼした影響なども考えられるが，例えば，指示動作や視線などのマルチモーダルな入力を支援し，実環境に近づけることによって，被験者の行動にどのような違いが生じるかなどを調査することも今後の重要な研究課題である．

3.5　おわりに

簡単な構成で，単一ディスプレイ上に複数の利用者が個々に持つ保有情報と共有情報をシームレスに共存させて表示できるテーブル型ディスプレイ “SharedWell” を提案した．評価実験より，提案システムを用いて個人の保有情報と共有情報をシームレスに扱え，利用者の動きによってプライベート空間と共有空間を動的に生成できていることを確認した．利用者はそれによって，誰と交渉をするかを選びながら情報をコントロール可能である．また，作業をする場所を変更した場合でも，単一のディスプレイであることにより，プライベート空間と同様に共有空間を利用できることが確認できた．

今後は，競争の側面を持つ協調作業に着目し，新たな情報提示手法などを含む機能拡張を検討している．例えば，ディスプレイマスクの上面を情報提示領域として利用することで，参加者全体が情報を共有できる公共空間を明示的に作り出すことができる．この公共空間と，動的に生成でき，移動させることが可能なプライベート空間や共有空間とを連携させることで，競争の側面を持つ協調作業に対して有効な協調作業支援システムを提案できると考えている．

第4章

複数人で直接指示可能な立体映像を用いた協調作業

4.1 はじめに

本章では，多様化する表示データの1つとして，複数の利用者が同時に直接指示できる立体映像に着目する．このような立体映像を用いた協調作業において，対面型と分散型の環境における利用者間の会話や身体動作などのコミュニケーションの違いが協調作業に与える影響を調査した結果について述べる [46, 47].

近年，コンピュータの高速化に伴い，仮想現実感に関する技術が急速に発展し，より高度で複雑な3次元仮想環境をリアルタイムに提示することが可能になってきた．このような仮想環境を複数の利用者で同時に3次元情報として観察することができれば，利用者間の共通理解はさらに深まると考えられ，現在までに様々な立体表示ディスプレイの研究・開発が進んでいる．その中でも，立体映像を表示する機構を有したテーブル型ディスプレイでは，利用者は立体映像そのものに加えて，利用者間の会話や身体動作などの非言語情報を共有することができるため，円滑に協調作業をすることができる．そのため，様々なテーブル型の立体表示ディスプレイが提案されている [33–35].

このような背景から，医療や工業デザイン，エンタテインメントなど様々な分野で立体映像がテーブル型ディスプレイを用いて利用されるようになってきている．医療分野では，人体内部を撮影することができるCT（Computed Tomography）やMRI（Magnetic Resonance Imaging）を用いた非侵襲検査によって得られる3次元情報は，ボリュームデー

タとして利用され，最近ではリアルタイムでの可視化処理が可能になってきている．そのため，遠隔地にいる医師と患者または医師同士の間で，ボリュームデータを用いた診断や手術計画などのシミュレーションをするといった応用も期待されている．このような作業では，医師と患者が向かい合って立体映像を観察しながら診断をしたり，医師同士が同時に立体映像を操作しながら手術をするといった場面が考えられる．そのため，複数人で立体映像を共有するような協調作業においては，利用者の立ち位置関係に応じた立体映像の表示や，立体映像の位置まで手や指を伸ばすことができ，かつそれを他の利用者と共有することができる直接指示情報の共有などが重要であると考えられる．

実際に利用されている遠隔地間システムは，テレビ会議システムを主として，遠隔地間での利用者の知覚情報を様々に再現しようと試みているものが多く [76,77,79]，利用者間の会話や身体動作などのコミュニケーションの差異が協調作業にどのような影響を与えるのかということに関心が集まっている．遠隔地間の協調作業を効率的に支援するために，必ずしも高精細な情報伝送は必要ではないことを指摘する研究もあり [92,93]，対象とする作業に応じて伝送するべき情報を慎重に選択する必要がある．

そこで，複数の利用者が同時に直接指示できる立体映像を用いた協調作業について，対面型と分散型の環境における利用者間の会話や身体動作などのコミュニケーションの違いが協調作業に与える影響を調査することで，このような協調作業を円滑にするための要因を検証する．その結果から，分散型の環境において，このような協調作業を支援するために考慮すべき伝送情報について議論する．複数人で立体映像を同じ3次元位置に共有し，同時に直接指示可能な立体表示ディスプレイとしてIllusionHole [36] を用い，対面型の環境と，2台のIllusionHoleをネットワークで結合した分散型の環境を用意し，2人で同時に仮想物体を操作するタスクによる比較実験を行った結果について報告する．

4.2 複数人で直接指示可能な立体映像を用いた協調作業の評価実験

4.2.1 目的と概要

本実験では，複数の利用者が同時に直接指示できる立体映像を用いた協調作業において，利用者間の会話や身体動作などのコミュニケーションの違いによる影響を，タスク

完了時間やエラー回数，会話分析などに関して，対面型の環境と分散型の環境を比較して評価する．そのために，1台のIllusionHoleを用いた対面型の協調作業環境と，2台のIllusionHoleをネットワークで結合した分散型の協調作業環境の2種類の環境において，2人で同時に仮想物体を操作するタスクについて観察実験を行う．また，本実験のユーザ評価のために，それぞれの環境でのタスク終了後には，NASA-TLX [105] に基づいたアンケートにより主観評価を行い，使いやすさなどを議論する．

4.2.2 実験環境

実験環境の概略図を図4.1に示す．環境を構成する立体表示ディスプレイとして，IllusionHoleを用いる．1台のIllusionHoleを用いた対面型環境（Colocated）と，2台のIllusionHoleをネットワークで結合した分散型の環境（Remote）の2種類の環境を用意する．ただし，本実験における分散型の環境では，システム構成の都合上，異なる方式のIllusionHoleを2台用いる．一方はDLPプロジェクタと液晶シャッタメガネを用いたIllusionHole（IH-Aと呼ぶことにする）[106] であり，他方は偏光フィルタを用いたIllusionHole（IH-Pと呼ぶことにする）[103] である．IH-A（1,388 × 1,110 mm, 1,280 × 1,024 pixels）は時分割式の立体視によって立体像を提示し，画面のリフレッシュレートは85 Hzである．IH-P（1,219 × 914 mm, 1,024 × 768 pixels）は円偏光フィルタによって右眼と左眼にそれぞれ視差画像を提示して立体視を実現しており，画面のリフレッシュレートは60 Hzである．IH-AとIH-Pのマスクホールの半径は異なるが，表示される仮想物体のサイズは等しくする．なお，対面型の環境では常にIH-Aのみを用いる．

また，被験者の視点位置取得のために，2種類の超音波式3次元位置トラッカ（ZPS-VK，古河機械金属株式会社製とIS-600 Mark2 SoniDisc，InterSense社製）を用いる．これら2種類のトラッカの実用上の位置計測精度はほぼ等しい．実験中，被験者は視点位置に応じた立体映像を観察するため，これらセンサを取り付けた眼鏡を身につける．対面型環境では，ZPS-VKのタグを2つ用いて，2人の被験者の視点位置をそれぞれ計測する．この際のサンプリング周波数は10 Hzとなる．分散型環境では，ZPS-VKのタグを1つ用いて，一方の被験者の視点位置を計測する．この際のタグあたりのサンプリング周波数は20 Hzとなる．他方の被験者の視点位置の計測には，IS-600 Mark2 SoniDiscを用いる．この際のタグあたりのサンプリング周波数は150 Hzとなる．

被験者がIllusionHole上に表示された立体映像を直接指示する入力デバイスとして，Stick

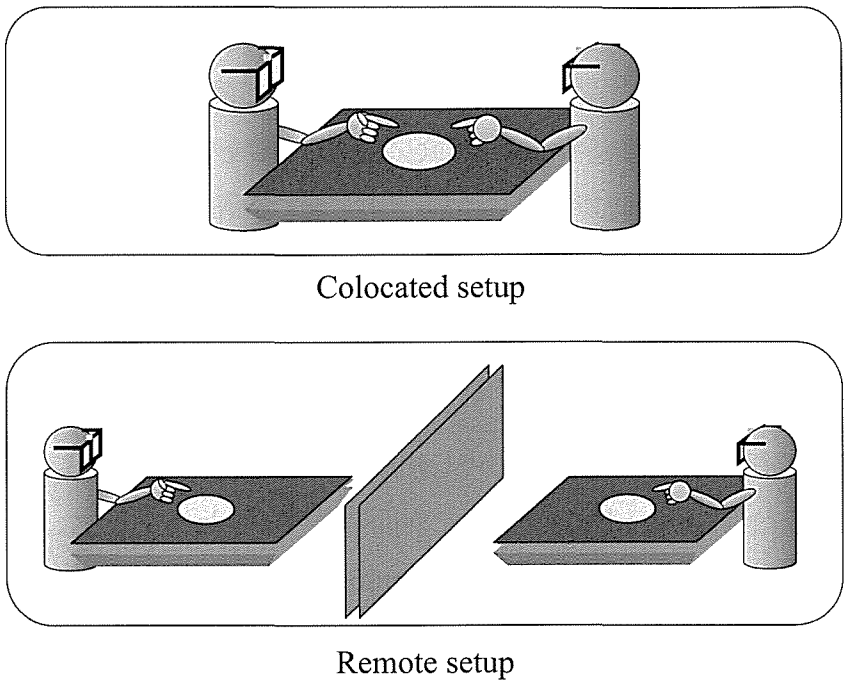


図 4.1: 実験環境の概略図（上：対面型環境，下：分散型環境）

Device を用いる．これは 30 × 2 cm の透明なアクリル板にスポンジの取手とボタン入力が可能なコントローラ，6 自由度位置姿勢測定装置である Polhemus 社の Fastrak のレシーバを取り付けたものである．図 4.2 に Stick Device の構成を示す．透明なアクリル板を用いることで，IllusionHole 上に表示される立体映像を遮ることなく直接指示することができる．実験中は，Fastrak のレシーバによって Stick Device の位置と姿勢を取得し，アクリル板の先端位置に結像するように IllusionHole 上にカーソルを表示する（図 4.3 参照）．カーソルは，分散型の環境においても対面型の環境と同様に表示される．対面型環境では，1 台の Fastrak と 2 つのレシーバを用いて，各被験者の Stick Device の位置と姿勢を計測する．この際のデータ取得頻度は 60 Hz となる．分散型環境では，各 IllusionHole でそれぞれ 1 台の Fastrak を用いて，各被験者の Stick Device の位置と姿勢を計測する．この際のデータ取得頻度は 120 Hz となる．コントローラには十字キーと 4 つのボタンがあるが，本実験においては 4 つのボタンを等価とし，十字キーは用いないものとする．また，実験アプリケーションは Microsoft Visual C++ 2005 を用いて実装し，立体映像の描画には OpenGL を用いる．

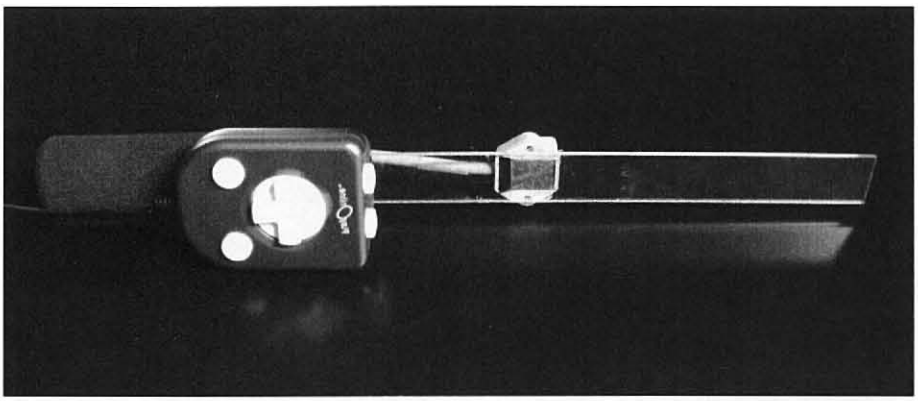


図 4.2: Stick Device の構成

視点位置取得と Stick Device の位置と姿勢の取得を考慮した表示部分のリフレッシュレートは，対面型の環境では約 10 Hz，分散型の環境では，IH-A が約 20 Hz，IH-P が約 30 Hz となる．また，立体視の方式も異なっているが，次節で述べるように設計したタスクでは高速に頭部運動をする必要はなく実験中の使用感の差はほぼない．また，Stick Device の位置と姿勢の取得には，分散型環境でも同一の装置を用いており，操作感に違いはない．ネットワークによる遅延もほぼ一定で約 11 ms と全体としては無視できる値である．これらのことから対面型と分散型の 2 つの環境は，実用上ほぼ等価であると考えて，実験を進める．

4.2.3 タスクデザイン

本実験で用いるタスクについて説明する．3 次元仮想空間上に配置された仮想物体のリングを，2 人 1 組の被験者 2 人で同時に把持し，軌道に沿って一端から他端へと移動させるというタスクを設計する．図 4.3 に表示例を示す．このタスクは，Basdogan らの実験 [78] を参考にし，例えば医療現場での複数の医師による手術などのトレーニングや遠隔地間の診断補助などを意識してデザインしたものである．なお，分散型環境で用いることができる IllusionHole が 2 台であるため，今回の実験では最も基本的な場合として，2 人による協調作業を対象としている．

2 人の被験者の立ち位置関係については様々に考えられるが，本実験では被験者同士が最も会話をしやすく，相手の身体動作などの非言語情報を容易に得ることができるよう

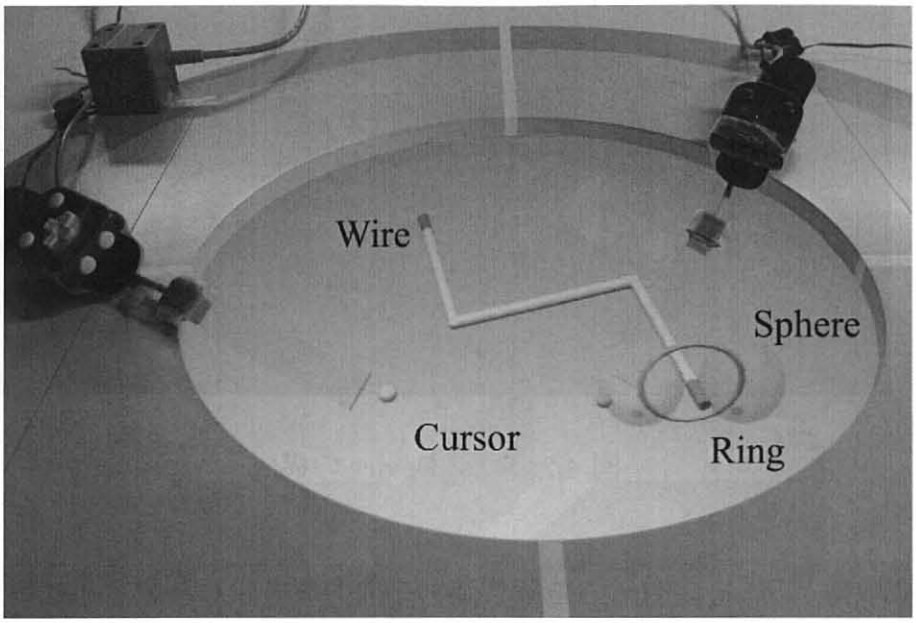


図 4.3: 3次元仮想環境内の軌道，リング，把持領域とカーソルの表示例

に，IllusionHoleを挟んで向かい合った立ち位置関係とする（図 4.4）．分散型環境においても，仮想的に2人が向かい合う立ち位置関係とする．なお，被験者は頭や体などは自由に傾けることはできるが，移動してはならないものとする．タスク中は，Stick Deviceによって，被験者はリングの両端に球形で表示されている把持領域のいずれか一方を直接指示し，Stick Deviceのボタンを押すことによって，リングを把持する．両被験者がリングを把持するとリングは移動可能な状態となる．被験者は軌道に沿って，リングを軌道に衝突させないように注意しながら，できるだけ速く軌道の一端から他端まで移動させる．このとき，リングは2つのStick Deviceの先端の中点がリングの中心となるように移動する．移動の際には，リングは常にディスプレイ面に対して直立しているが，2つのStick Deviceの先端をリングの中心に対して対称に移動させることで，鉛直軸に対しては回転させることができる．リングが軌道に衝突した際には，リングと軌道が触れた位置でリングは停止し，それ以上同じ方向へは移動できない．また，Stick Deviceの先端が把持領域から外れた場合には，カーソルは把持領域から出て，把持状態が解除される．これらの設計は対面型と分散型のいずれの環境でも同じである．

被験者に与える視覚フィードバックとして，黄色く表示される把持領域は，Stick Device

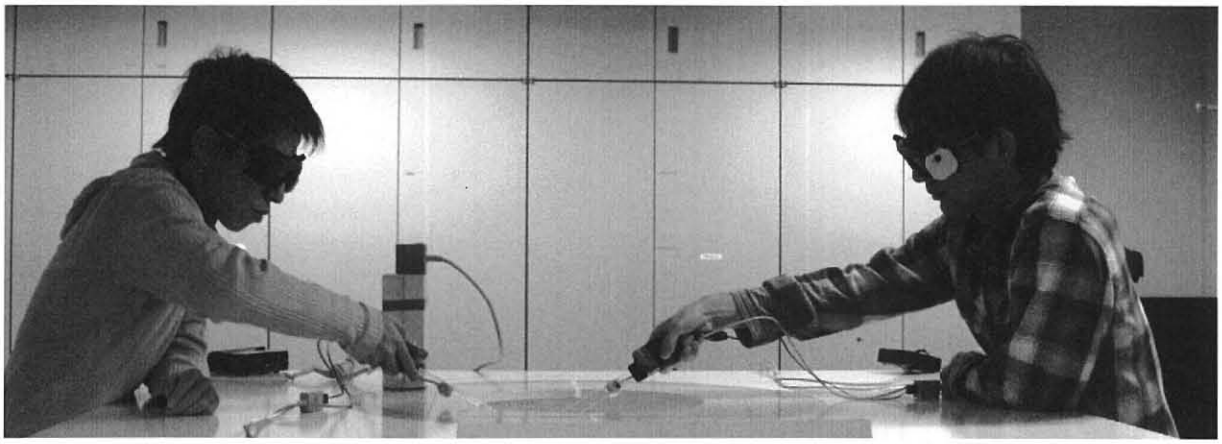


図 4.4: 対面型環境での実験の様子

の先端部が把持領域の内部に入った際には濃く変わり，把持した際には青色に変わる．また，リングが操作可能となった際には，リングの色は青色から緑色へと変わる．リングが軌道と衝突した際には，リングの色は赤色に変わる．

4.2.4 実験計画

実験要因として，環境条件（Colocated-Talking，Colocated-Silence，Remote-Talking，Remote-Silence），軌道経路長（300，600，1,200 mm），リング半径（12，18，27 mm）を考える．全組み合わせは 36 通りとなり，被験者は各条件を 3 回反復するため，計 108 回の試行を行う．実験時間は，環境条件毎に 5 分間の休憩と 5 分間の練習をはさみ，環境条件毎に 30 分程度を要するため，2 種類ずつ 2 日間に分けて行う．順序による学習効果を相殺するため，軌道経路長とリング半径の組み合わせの順序は完全なランダムとし，環境条件はカウンタバランスを取る．21 歳から 25 歳までの大学院生 16 人（男: 15，女: 1）を被験者とし，8 つの組に分けた．被験者は全員右利きであり，会話などが自然に行われるよう，被験者の組はお互いに顔見知りとした．

環境条件は次の 4 種類を用いた．

- Colocated-Talking（条件 CT）: 対面型の環境として，お互いに会話することが可能．
- Colocated-Silence（条件 CS）: 対面型の環境として，お互いに会話することが不可能．

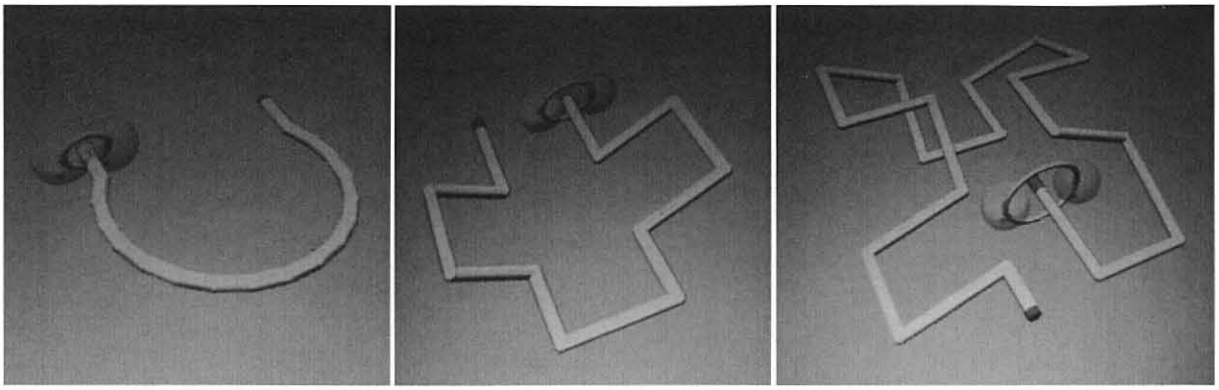


図 4.5: 軌道経路長（300，600，1,200 mm）とリング半径（12，18，27 mm）

- Remote-Talking（条件 RT）：分散型の環境として，お互いに会話することが可能.
- Remote-Silence（条件 RS）：分散型の環境として，お互いに会話することが不可能.

条件 RT については，同一の部屋に仕切りを設けて行うため，視覚情報は制限されているが，聴覚情報は不足なくやりとりすることができる．また，図 4.5 に軌道経路長とリング半径のそれぞれの条件を示す.

被験者は，タスク開始音が鳴ると同時に IllusionHole のマスク上に置かれている Stick Device を手に取り，タスクを開始する．仮想空間上に表示された軌道に沿って，Stick Device を用いて，リングを軌道に衝突させないように注意しながら，できるだけ速く軌道の一端から他端へとリングを移動させる．そして，リングを軌道の端まで移動させ，Stick Device を元の位置に戻す．これを 1 試行として規定回数に達するまで繰り返す．タスク開始音が鳴ってからリングが軌道の他端に達するまでの時間をタスク完了時間として測定し，リングが軌道に衝突した回数をエラー回数として測定する．エラーが起こった際にも被験者はタスクを中断せず，完了するまで続行する．実験中は，被験者の様子をビデオで撮影し，環境条件毎に被験者にアンケートを実施する.

4.3 実験結果

4.3.1 タスク完了時間

三要因分散分析の結果，環境条件（$F(3,21) = 11.182, p < 0.001$），軌道経路長（$F(2,14) = 576.072, p < 0.001$），リング半径（$F(2,14) = 154.895, p < 0.001$）に主効果が認められた．また，環境条件 × 軌道経路長（$F(6,42) = 1.489, p = 0.179 > 0.05$），環境条件 × リング半径（$F(6,42) = 0.711, p = 0.641 > 0.05$）には交互作用に関して有意差が認められず，軌道経路長 × リング半径（$F(4,28) = 8.890, p < 0.001$）の交互作用に関して有意差が認められた．平均のタスク完了時間は，条件 CT と条件 CS ではそれぞれ 30.9 sec（SD: 21.7）と 32.7 sec（SD: 24.5），条件 RT と条件 RS ではそれぞれ 38.5 sec（SD: 27.5）と 35.7 sec（SD: 25.1）であり，条件 CT でのタスク完了時間が最も短く，条件 RT でのタスク完了時間が長くなる傾向にあった（$p < 0.001$）．図 4.6 に軌道経路長に対するタスク完了時間を示し，図 4.7 にリング半径に対するタスク完了時間を示す．

ボンフェローニの多重比較の結果から，図 4.6 では，軌道経路長が 300 mm の場合にはいずれの環境条件においても有意な差は見られなかった．しかし，軌道経路長が 600 mm の場合では，条件 CT と条件 RT，条件 CT と条件 RS，条件 CS と条件 RT，条件 CS と条件 RS の間に差が見られ（すべて $p < 0.001$），軌道経路長が 1,200 mm の最も難易度が高い場合では，条件 CT と条件 RT に差が見られた（$p < 0.05$）．

図 4.7 では，リング半径が 12 mm の場合には条件 CT と条件 RT の間に差があり（$p < 0.001$），リング半径が 27 mm の場合には，条件 CT と条件 RT，条件 CS と条件 RT の間に差が見られなかった．リング半径が 18 mm の場合には，いずれの環境条件においても有意な差が見られなかった．しかし，全環境条件において，リング半径が小さくなるにつれてタスク完了時間は長くなっており，細かな操作を要求される場合にパフォーマンスを維持することは困難であった．

4.3.2 エラー回数

三要因分散分析の結果，環境条件（$F(3,21) = 15.119, p < 0.001$），軌道経路長（$F(2,14) = 502.910, p < 0.001$），リング半径（$F(2,14) = 1029.717, p < 0.001$）に主効果が認められた．また，環境条件 × 軌道経路長（$F(6,42) = 2.798, p < 0.05$），環境条件 × リング半径

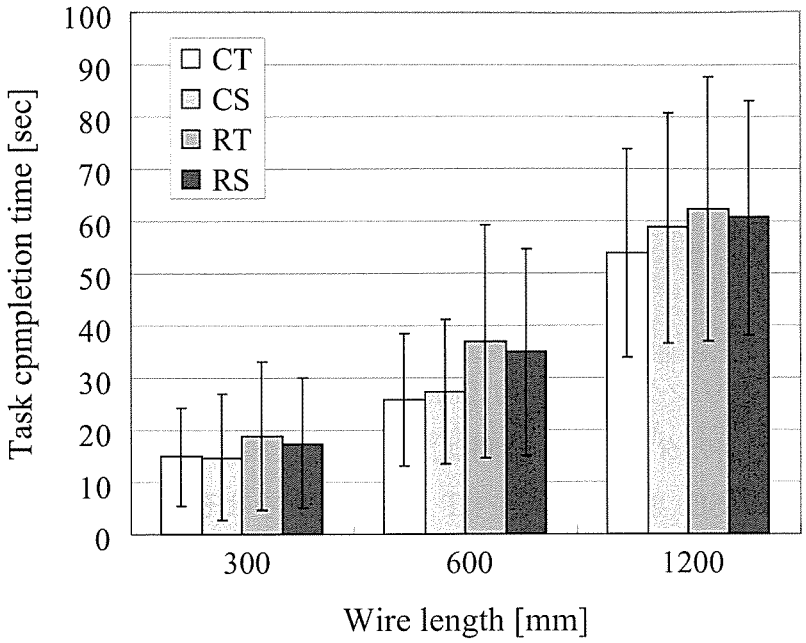


図 4.6: 軌道経路長に対するタスク完了時間

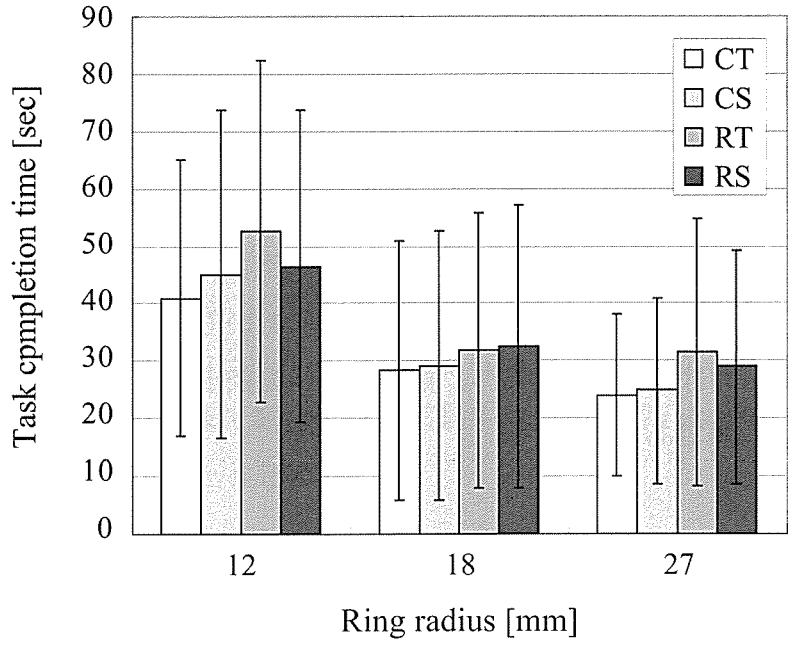


図 4.7: リング半径に対するタスク完了時間

($F(6,42) = 5.743, p < 0.001$)，軌道経路長 × リング半径 ($F(4,28) = 158.521, p < 0.001$) の交互作用に関して有意差が認められた．平均のエラー回数は，条件 CT と条件 CS ではそれぞれ 7.7 回 (SD: 10.6) と 8.91 回 (SD: 11.7)，条件 RT と条件 RS ではそれぞれ 11.26 回 (SD: 15.4) と 9.91 回 (SD: 13.2) であり，条件 RT に比べて条件 CT でのエラー回数が最も少なかった ($p < 0.001$)．図 4.8 に軌道経路長に対するエラー回数を示し，図 4.9 にリング半径に対するエラー回数を示す．

全体的に分散が大きい傾向にあるが，ボンフェローニの多重比較の結果から，図 4.8 では軌道経路長が 600 mm の場合に条件 CT と条件 RT，条件 CT と条件 RS の間に統計的な差が見られた（どちらも $p < 0.001$)．また，軌道経路長 1,200 mm の場合にはさらに条件 CS と条件 RT にも差が見られた ($p < 0.001$)．しかし，300 mm の難易度が低いタスクの場合ではいずれの環境条件の間にも差が見られなかった．全体的に，難易度がある程度高くなると会話の有無に関わらず，対面型と分散型の違いによる影響が大きくなることがわかる．

また図 4.9 からは，リング半径が 27 mm の場合にはいずれの環境条件の間にも有意差が見られなかった．しかし，リング半径が 18 mm の場合には，条件 CT と条件 RS の間に，リング半径が 12 mm の場合には，条件 CT と条件 RT，条件 CT と条件 RS，条件 CS と条件 RT，条件 RT と条件 RS の間にそれぞれ有意差が見られた（すべて $p < 0.001$)．軌道経路長の場合と同様に，タスク難易度が高くなるとエラー回数が増加する傾向にあり，対面型と分散型の違いによる影響が大きくなる．

4.3.3 ビデオ解析

複数の利用者が同時に直接指示できる立体映像を用いた協調作業に着目するため，被験者間の会話解析については特に，指示語を含む・含まない指示に関して定量的に分析する．また，被験者の行動解析についても同様に，立体映像に対する直接指示のようなジェスチャ行為に関して分析する．

まず，ビデオ解析を通じて，被験者間の会話に関して定量的に分析する．表 4.1 に，環境条件別の平均発話回数とタスク当たりの発話頻度を示す．発話回数は，指示語を含む指示（例えば「もっとこっち側へ」,「あのカーブ」)，指示語を含まない指示（例えば「内側の方へ」,「上方向に移動して」）とそれ以外の発話をカウントしたものである．またタスク当たりの発話頻度は，環境条件別に平均発話数をタスク回数で除したものである．条

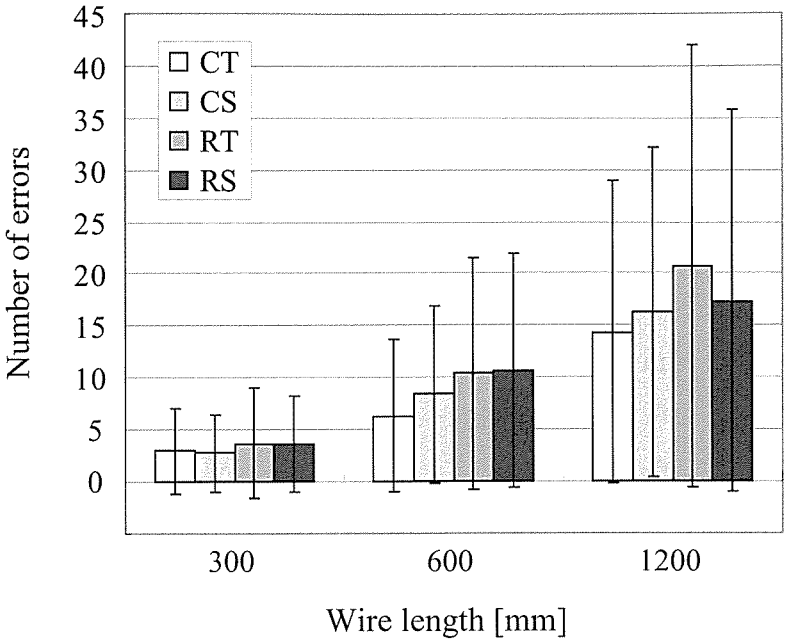


図 4.8: 軌道経路長に対するエラー回数

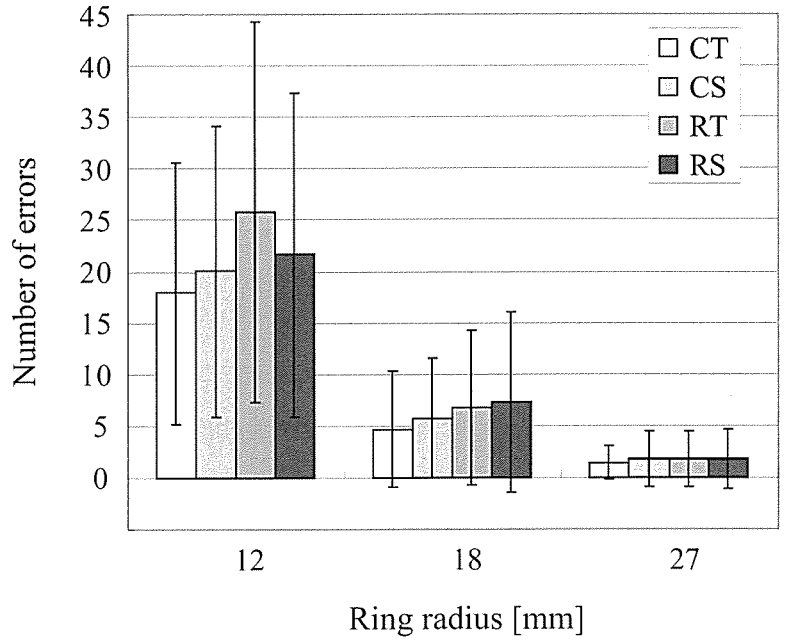


図 4.9: リング半径に対するエラー回数

表 4.1: 平均発話回数とタスク当たりの発話頻度

	平均発話回数（標準偏差）	タスク当たりの発話頻度
条件 CT	120.3 （73.0）	4.45
条件 RT	146.0 （90.9）	5.40

件 CT は条件 RT に比べ，対面型の環境であるため発話回数が少なくなると予想していたが，環境条件間において有意差は見られなかった（$p > 0.1$）．続いて，発話内容に関して図 4.10 に環境条件別の指示語を含む指示，指示語を含まない指示，それ以外の発話の出現頻度の比較を示す．条件 CT は条件 RT に比べ，指示語を含んだ指示の頻度が高いことがわかるが，条件 RT においても指示語を含んだ指示は一定量見ることができた．このような発話は主にタスクの後半に見ることができ，被験者の間にお互いが見ている方向や立ち位置などの共通理解が生まれていたと考えることができる．また，それ以外の発話内容にも興味深い差異が見られた．条件 CT では，例えばタスクの状況を説明する表現（例えば「あともう少し」,「うまく（カーブを）回れた」）や心情の表現（例えば「やった」,「ゴール」）が見られ，被験者はタスク自体を楽しもうとしている様子が観察できた．また条件 RT では，エラーを回避しようとする表現（例えば「もっとゆっくり」,「気をつけて」）や相手を気遣う表現（例えば「ごめん」）が多く見られ，見えない相手との関係を悪化させないように振る舞う様子が確認できた．

次に，ビデオ解析を通じて，被験者の行動に関して分析する．いずれの環境条件においても，Stick Device を持つ右手によるジェスチャ行為が最も多く観察された．条件 CT や条件 RT の会話が許されている環境においては，発話による指示（例えば「こっち」「上の方」「内側へ」）の後，それがうまく相手の被験者に伝わらなかった場合に，Stick Device を移動させたい方向に動かしながら再度発話による指示がなされていた．条件 RT の場合には，仮想空間上に表示されているカーソルを用いて同様の動作がなされていた．このようにジェスチャ行為は会話情報を補足する意味合いで用いられていた．一方，条件 CS や条件 RS の会話が許されていない環境では，初めからジェスチャによって指示している様子が観察できた．また，軌道のカーブ部分などリングを持ち替える必要がある箇所では，条件 CT と条件 CS のように対面型の環境では比較的スムーズにできていたように見受け

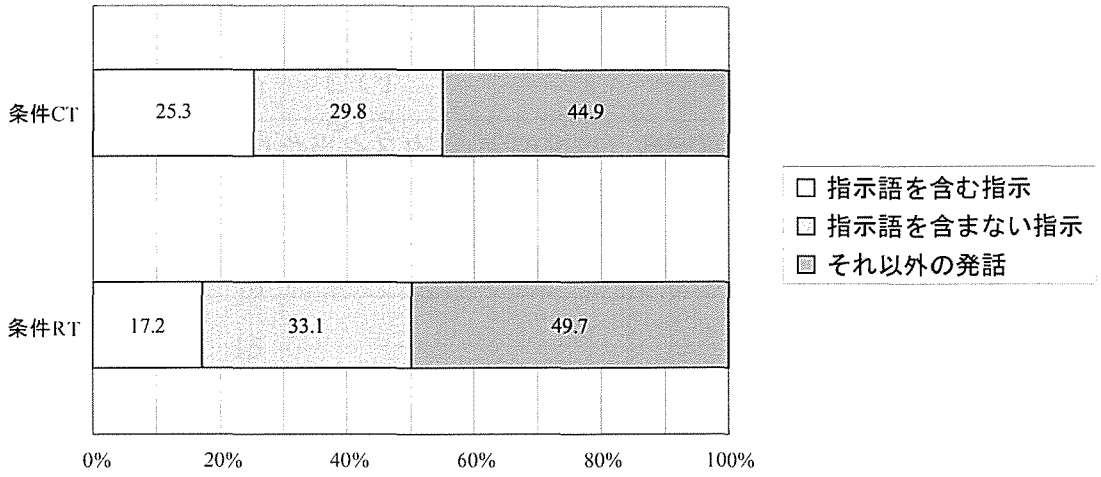


図 4.10: 発話内容における指示語を含む指示，指示語を含まない指示，それ以外の発話の出現頻度の比較

られるが，分散型の環境では，会話に関する分析と同様に被験者の間に共通理解が生まれるまでは，エラー回数が多くなる傾向にあった．

4.3.4 主観評価

各環境条件のタスク終了後に，NASA-TLX による主観評価と自由記述欄を設けたアンケートを実施した．NASA-TLX は，精神的要求，身体的要求，時間的圧迫，作業達成度，努力，不満の 6 つの尺度項目に対する評価を行い，指標間の一対比較の結果から作業負荷の総合評価得点 (WWL: Weighted WorkLoad) を算出する手法である．表 4.2 に全被験者の WWL の結果を示す．環境条件を要因とした分散分析の結果，いずれの尺度項目に対しても環境条件間の有意差は見られなかったが，平均の差として条件 CT や条件 RT が全体的に作業負荷が高い傾向にあった．作業達成度 (OP) の尺度項目では，条件 CT と条件 CS が比較的高い傾向にあり，対面型の環境で相手の被験者の姿が見えることがタスク達成の満足度に影響があることが示唆された．また，条件 RT における不満 (FR) の尺度項目が他の環境条件に比べ高い傾向にあり，相手の姿が見えない状態での発話が被験者のストレスとなっていることも考えられる．

表 4.2: NASA-TLX の結果

	条件 CT	条件 CS	条件 RT	条件 RS
精神的要求 (MD)	64.8	52.7	69.0	61.5
身体的要求 (PD)	59.3	52.7	65.5	44.0
時間的圧迫 (TD)	41.8	50.5	53.6	40.7
作業達成度 (OP)	75.8	72.5	52.4	63.7
努力 (EF)	75.8	64.8	73.8	69.2
不満 (FR)	57.1	45.0	72.6	56.0
総合評価得点 (WWL)	62.5	56.4	64.5	55.9

4.4 考察

4.4.1 環境の違いによるコミュニケーションへの影響

実験結果から，タスク完了時間とエラー回数の双方に関して，タスクの難易度が高くなるにつれて対面型環境に有意な差が見られた．このことから，対面型環境と分散型環境の大きな違いである協調相手の直接指示しようとする手が見えることは，タスクパフォーマンスに影響を与えることがわかる．また，ビデオ解析による被験者の行動分析の結果から，対面型の環境において，協調相手の直接指示する手が見えることによって，会話情報を補足したり，エラーをあらかじめ回避するためのアウェアネス情報として用いている様子が観察されたということも，これを裏付けるものである．分散型の環境においても，被験者はカーソルの位置情報の共有によって，対面型の環境と同様の行動をしている様子が観察できたが，対面型と分散型の環境におけるタスクパフォーマンスに統計的な差が見られることから，カーソルの位置情報の共有だけでは不十分であることがわかる．この結果は，複数の利用者で立体映像に対して自然なインタラクションが可能な IllusionHole による影響が大きいと考えられる．

次に，同一の環境における会話の有無による影響については，タスク完了時間とエラー

回数の双方に関して，リング半径が12 mmの場合を除いて有意な差がなかった．また，ビデオ解析による被験者の会話分析の結果からも，環境条件の違いは発話回数に影響を与えていないことがわかる．しかし，対面型と分散型の双方の環境において，被験者の発話内容に指示語が含まれていたという点に着目すると，被験者は分散型の環境においても対面型の環境と同様に相手が自分の目の前にいるものと考えて作業をしていることが示唆される．このことは，タスク遂行において身体動作などの視覚情報よりも会話等による音声情報の方が影響が大きいことを示唆しているが，一方で，指示語が含まれる発話は実験の後半に多く観察されている．学習効果による影響と見なすこともできるが，実験開始直後の会話内の指示語とそれに対する相手のカーソル位置情報の変化から，被験者間に見ている方向や立ち位置などの共通理解を確立させたとも考えられる．

また，それ以外の発話内容については，分散型の環境では相手との関係を悪化させないように振る舞う様子が確認できた．これは主観評価の不満 (FR) の尺度項目が他の環境条件よりも高い傾向にあり，相手の姿が見えない状態での発話が被験者のストレスとなっていることからもわかる．一方で対面型の環境では，発話内容から被験者はタスク自体を楽しもうとしている様子が確認でき，主観評価の作業達成度 (OP) の尺度項目が高いことと整合的である．

4.4.2 分散型環境における立体映像を用いた協調作業支援

これまでの実験結果と議論から，複数の利用者が同時に直接指示できる立体映像を用いた協調作業における2人で同時に仮想物体を操作するタスクについて，対面型と分散型の環境におけるコミュニケーションの違いによる影響は次のようにまとめられる．

- 協調相手の直接指示する手が見えることはタスクパフォーマンスに影響を与えること．
- 会話の有無はタスクパフォーマンスに影響を与えないこと．
- 環境の違いは発話回数に影響を与えないが，発話内容に影響を与えること．

まず，分散型の環境における立体映像の直接指示情報の共有について，カーソルによる位置情報の共有だけでは不十分であったことが示唆された．本実験で用いたタスクのように，リングを移動させたり回転させたりするといった「方向」に依存するタスクでは，

直接指示情報を共有することが大きな影響を与えると考えられる．そのため,「タイミング」や「順序」などのような異なる要素を含んだタスクによる影響を調査することでさらに詳しい議論ができる．しかし，先行研究 [92,93] では，2 次元の情報オブジェクトを共有する分散型の環境において，腕の形状をテーブル上に重畳表示するだけで対面型環境と同等のパフォーマンスを得ている．これと同様に IllusionHole 上への腕の動作の重畳表示や，その他にも相手の腕の立体表示やロボットアームなどを用いた動作の再現などのように様々なレベルでの直接指示情報の共有手法を比較・検討することで，このような協調作業を効率的に支援するための情報を選択することができると考えられる．

また，会話の有無はタスクパフォーマンスに影響を与えないということが示唆されたが，会話による支援がまったく必要ないというわけではなく，発話内容によって利用者の作業達成度や不満などに影響があることも示唆されている．今後は，利用者同士の立ち位置関係やタスク内容による発話内容の変化や指示語に限定した調査など，会話情報がタスクに寄与する度合を考慮したより詳細な実験を検討している．

4.5 おわりに

複数の利用者が同時に直接指示できる立体映像を用いた協調作業において，対面型と分散型の環境における利用者間の会話や身体動作などのコミュニケーションの違いが協調作業に与える影響について検討した結果について述べた．立体表示ディスプレイとして IllusionHole を用い，対面型の協調作業環境と 2 台をネットワークで結合した分散型の協調作業環境を用意し，2 人で協力して仮想物体を操作するタスクによる比較実験を行った．その結果，協調相手の直接指示する手が見えることはタスクパフォーマンスに影響を与えること，会話の有無はタスクパフォーマンスに影響を与えないこと，そして環境の違いは発話回数に影響を与えないが，発話内容に影響を与えることを明らかにした．

今後は，異なる形態のタスクや被験者の立ち位置を考慮した実験や 3 人以上（3 台以上）による実験など，立体映像を用いた協調作業に影響を与える要因の詳細な検証が考えられる．

第5章

利用者とディスプレイの位置関係を考慮したパースペクティブ表示

5.1 はじめに

本章では，多様化するシステム構成の1つとして，テーブル型ディスプレイに複数のディスプレイを組み合わせた環境に着目する．このような複数ディスプレイ環境での協調作業において，ディスプレイ上に表示される情報の提示手法として，利用者とディスプレイの位置関係を考慮したパースペクティブ表示を導入し，評価した結果について述べる [48,49].

最近のオフィスや会議室には，プロジェクタによる投影スクリーンやプラズマディスプレイなどの壁面型ディスプレイ，机の上のデスクトップPCやラップトップPCなど，種々のディスプレイが設置されている．加えて，商用のテーブル型ディスプレイ [107–109] も登場してきており，これらを複数同時に用いることも当たり前になってきている．このような複数ディスプレイ環境では，Single Display Groupware のように複数の利用者が一ヶ所に集まって作業をするだけではなく，それぞれ個人用のディスプレイで作業している人が，必要に応じてテーブル型ディスプレイなどに集まるといったような，利用者同士がディスプレイを選択しながら進める協調作業が見られ，このような協調作業を支援する研究事例はいくつか報告されている [15,37–42]．しかしながら，複数ディスプレイ環境では，利用者は必ずしもすべてのディスプレイを正対した場所から見ることはできず，見る角度によっては，表示されるウィンドウや文章などの情報が歪んでしまうといった問題が

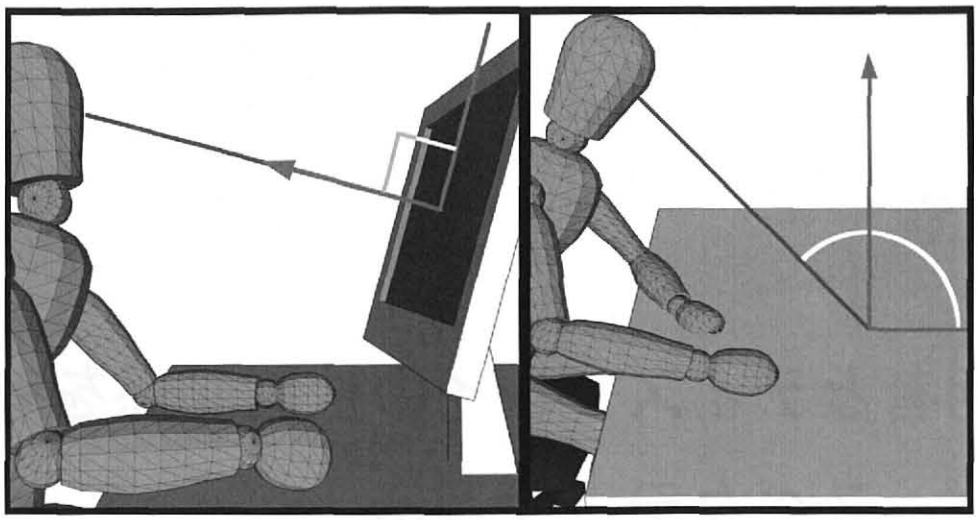


図 5.1: 従来のデスクトップモニタ（左）とテーブル型ディスプレイ（右）のディスプレイ面の正対する方向の違い

ある．例えばテーブル型ディスプレイの場合では，利用者は周囲の様々な角度からのぞき込むことができるが，図 5.1 のようにディスプレイに正対した方向は本来テーブルの真上方向だけであり，この方向から情報を見ることは難しい．また，表示される情報の天地問題もある．同様に壁面型のディスプレイでは，ディスプレイの横に立っている利用者の位置から見た情報は歪んで見えてしまう．そのため，表示されているウィンドウやカーソルが操作しにくくなり，文章や絵などの内容理解が困難になるといった問題が考えられる．こういった問題が人間の知覚に及ぼす影響については古くから調査されており [110–112]，2.3.2 節で述べたように利用者への情報提示の手法は様々に検討されているが，その中の一手法として，遠近法（パースペクティブ）の利用が考えられる．遠近法とは，ある 1 点を視点とし，物体を人間の目に映るのと同様に遠くを小さく，近くを大きく描画する技法であり [113,114]，これを利用した 3 次元インタフェースなども提案されている [115–119]．しかしながら，従来のシステムはいずれも利用者がディスプレイの正面から情報を見ることを前提としたものが多く，利用者の視点位置やディスプレイの位置や方向を考慮した表示はしていない．

そこで，複数ディスプレイ環境における表示インタフェースのための基礎技術として，図 5.2 に示すように必ずしも正対していないディスプレイにおいて，利用者の視点位置か

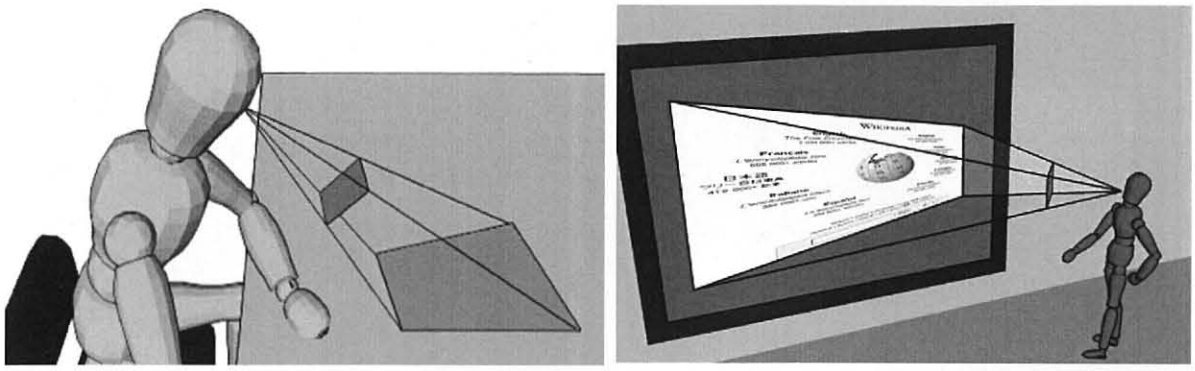


図 5.2: テーブル型ディスプレイおよび壁面型ディスプレイ上における情報のパースペクティブ表示

ら常に正対して見ることができるようにウィンドウなどの情報をパースペクティブに表示する手法（パースペクティブ表示）について検討する．パースペクティブ表示では，利用者とディスプレイの3次元位置と方向を計測し，利用者の視点位置から常に正対して見ることができるように情報を補正して表示することで実現する．

本章では，対象とするパースペクティブ表示の概要と，従来の画面にフラットに表示する手法（フラット表示）との比較実験の結果を報告する．比較実験では，テーブル型ディスプレイ，壁面型ディスプレイ，デスクトップモニタの3種類のディスプレイがある複数ディスプレイ環境におけるポインティング，ステアリング，整列，パターンマッチング，文章読解の5種類の基礎的なタスクについて，被験者実験を行い，本手法の影響を調査する．

5.2 利用者とディスプレイの位置関係を考慮した情報のパースペクティブ表示

本実験では，今日のグラフィカルユーザインタフェースにおいて最も一般的に利用されるウィンドウとカーソルを対象として議論する．そして，これらに対してパースペクティブ表示を適応したものをそれぞれパースペクティブウィンドウとパースペクティブカーソルとする．

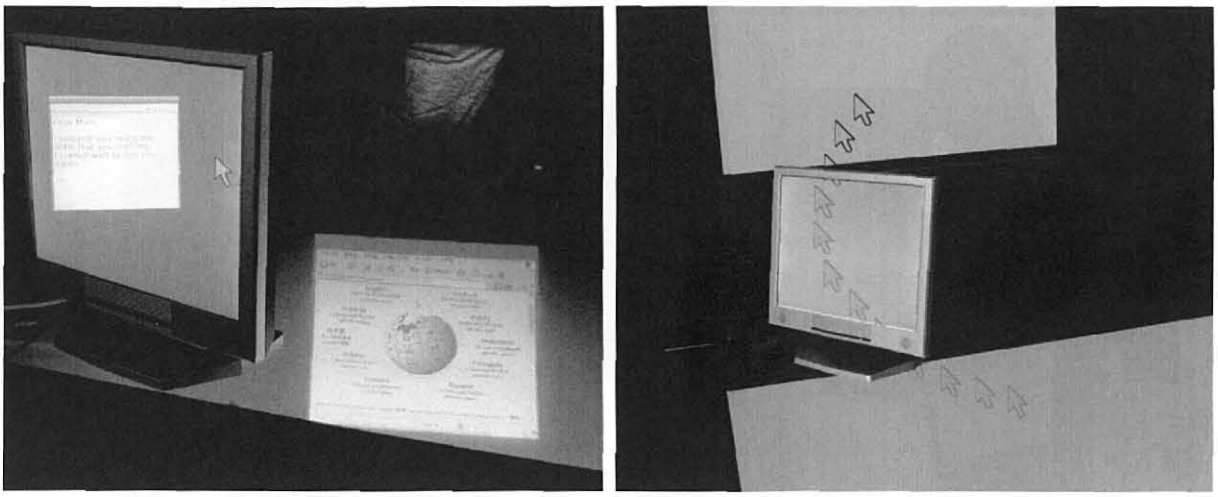


図 5.3: パースペクティブウィンドウ (左) とパースペクティブカーソル（右）

5.2.1 パースペクティブウィンドウ

パースペクティブウィンドウは，利用者の視線に垂直な平面上にウィンドウを表示するために，対象となるディスプレイに表示されるウィンドウの見た目の形状が矩形になるように変形して表示する．このとき，利用者の視線に垂直な仮想平面に対して配置されるウィンドウを，図 5.2 のように対象となるディスプレイへと投影して描画することで実現する．その結果，利用者の視点位置に対して対象となるディスプレイが正対していない場合においても，ディスプレイに表示されるウィンドウは正対しているように見ることができる．図 5.3 左にその様子を示す．また，利用者の視点位置が移動した場合においても，ウィンドウの形状や方向は自動的に変更される．

5.2.2 パースペクティブカーソル

パースペクティブカーソル [39] は，パースペクティブウィンドウと同様に，利用者とディスプレイの位置を計測し，その位置関係からカーソルの方向とサイズを変形させて表示する（図 5.3 右）．カーソルを移動させる際には，利用者の視点を中心とした仮想球面を定義し，この球面上を移動させることで実現する．これにより，利用者から遠い位置にあるディスプレイ上ほどカーソルの移動速度は速くなり，利用者に対するカーソルの見た目の C-D 比（Control-Display ratio）は一定となる．

5.3 パースペクティブ表示の評価実験

5.3.1 目的と概要

本実験では，利用者とディスプレイの位置関係を考慮したパースペクティブ表示を，タスク完了時間やエラーに関して，従来の画面にフラットに表示するフラット表示と比較して評価する．テーブル型ディスプレイ，壁面型ディスプレイ，デスクトップモニタの3種類のディスプレイがある複数ディスプレイ環境におけるポインティング，ステアリング，整列，パターンマッチング，文章読解の5種類の基礎的なタスクについて，パースペクティブウィンドウとパースペクティブカーソルを用いた表示手法の有効性を検証する．また，パースペクティブ表示のユーザ評価のために，それぞれの表示手法でのタスク終了後には，NASA-TLX に基づいたアンケートにより主観評価を行い，使いやすさなどを議論する．

5.3.2 実験環境

実験環境のイメージを図 5.4 に示す．環境を構成する3種類のディスプレイは，テーブル型ディスプレイ（120 × 91 cm, 1,024 × 768 pixels），壁面型ディスプレイ（142 × 106 cm, 1,024 × 768 pixels）とデスクトップモニタ（33 × 27 cm, 1,280 × 1,024 pixels）を用いる．すべてのディスプレイは被験者に対して正対しないように固定して置かれ，デスクトップモニタは，壁面型ディスプレイに対して45 deg傾いた状態で置かれる．椅子は床に固定されており，被験者の肘の高さが机の高さになるように椅子の高さを調節する．このとき，被験者のそれぞれのディスプレイに対する視野角は，被験者の視点位置がニュートラルな位置にある場合に上方向と右方向を正とし，正面の方向を0 degとした場合，テーブル型ディスプレイでは水平方向に −50 degから50 degの間，垂直方向に −45 degから −15 degの間，壁面型ディスプレイでは水平方向に20 degから50 degの間，垂直方向に −30 degから40 degの間，またデスクトップモニタでは水平方向に −30 degから −20 degの間，垂直方向に-50 degから-20 degの間となる．実験中，被験者は上半身は自由に傾けることができるが，椅子から離れてはならないものとする．

被験者は光学式マウスを用いてカーソルを操作することとする．ディスプレイの解像度および表示ウィンドウのサイズは，予備実験から最も高い解像度を必要とするタスクが円滑に行える範囲内で設定する．ウィンドウは各ディスプレイに1つだけ表示し，位置は固

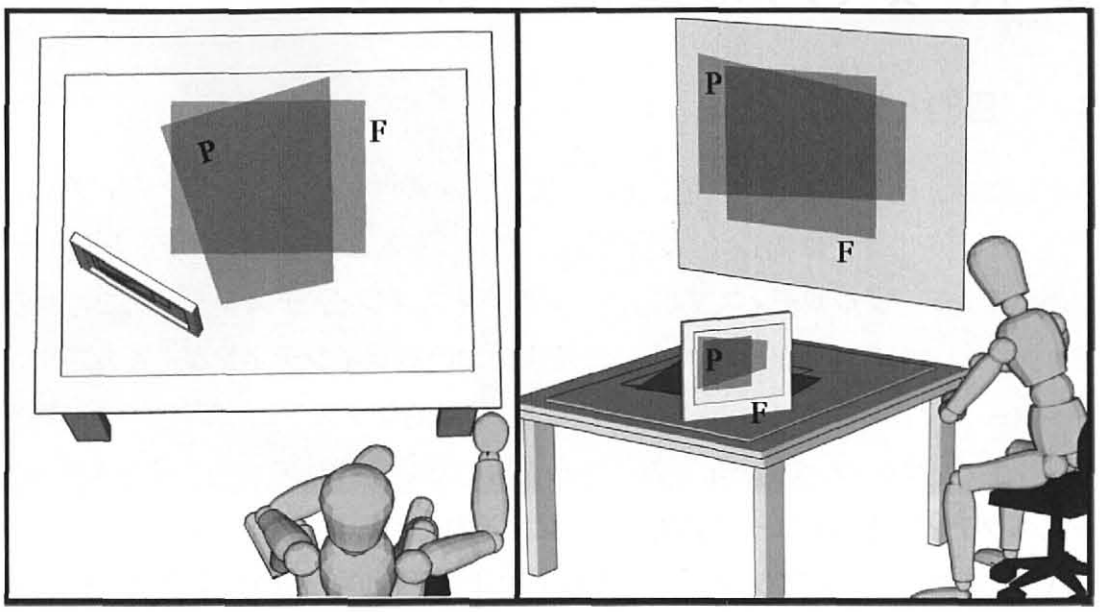


図 5.4: 実験環境の概略図（左：上から見た図，右：横から見た図）

定とし，タイトルバーなどの実験タスクに直接関係ない情報は表示しないものとする．また，ディスプレイのベゼル（枠）や実験室内のその他の物体から影響を受けないようにするため，実験は暗室で行う．

実験アプリケーションは Microsoft Visual C++ 2005 を用いて実装し，ウィンドウの描画には OpenGL を用いた．また，被験者の視点位置取得のために，超音波式の 3 次元位置トラッカ（IS-600 Mark2 SoniDisc, InterSense 社製）を用い，被験者はセンサを取り付けた帽子を身につける．

5.3.3　実験計画

パースペクティブ表示の有効性を示すため，実験要因として用いるウィンドウおよびカーソルの表示条件は，パースペクティブウィンドウとパースペクティブカーソルを用いた条件 PP，フラットウィンドウとフラットカーソルを用いた条件 FF とする．図 5.4 に示すように，実験環境におけるパースペクティブ表示とフラット表示のウィンドウは，それぞれ P と F と書かれたウィンドウに対応している．一方で，パースペクティブカーソル単体では先行研究 [39] によりその有効性が示されているが，パースペクティブ表示の

効果がパースペクティブカーソルだけに起因するものではないことを示すために，比較対象としてフラットウィンドウとパースペクティブカーソルを用いた条件 FP を加える．

それぞれのディスプレイには 1 つのウィンドウしか表示されず，両条件は被験者にほぼ同一サイズで表示される．また，パースペクティブカーソルとフラットカーソルのいずれの場合においても，被験者に対する見た目の C-D 比は実験を通して一定とする．

被験者は，右手でマウスを操作する大学院生 12 人（男: 9，女: 3，22-29 歳）である．各被験者は個別に実験を行い，3 種類のディスプレイに対して，それぞれの表示条件でタスクを行ってもらう．次節で述べる 5 種類のタスクの順番はすべての被験者で同じとするが，ディスプレイ条件や表示条件の提示順は，順序効果を相殺するようにバランスをとっている．また，各表示条件のタスク終了後には，NASA-TLX に基づくアンケートに回答してもらう．

5.3.4 タスクデザイン

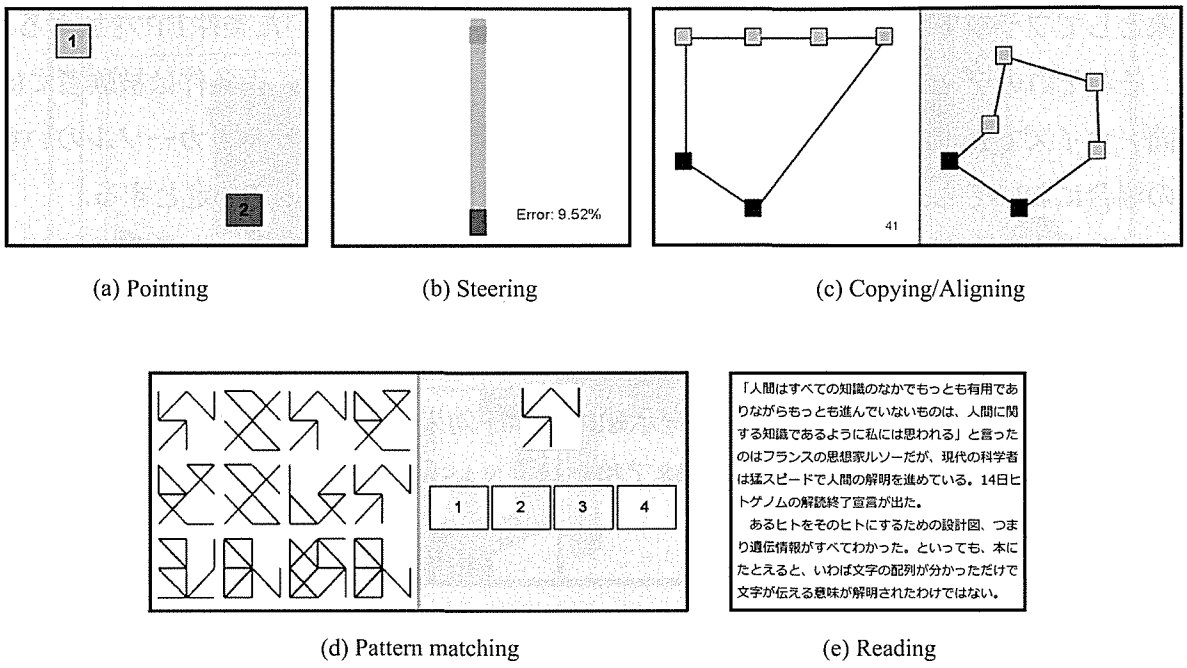
設計した 5 種類のタスクについて説明する．実験で用いるタスクは，今日のグラフィカルユーザインタフェースを用いた作業の中で，最も基礎的なアクションとされるポインティング，ステアリング，整列，パターンマッチング，文章読解の 5 種類を選択する．図 5.5 にそれぞれのタスク中に表示されるウィンドウを示す．

ポインティング

被験者は，ディスプレイに表示された “1” と書かれた緑色のアイコンをクリックしてから，できるだけ早く正確に “2” と書かれた赤色のアイコンをクリックする（図 5.5(a)）．2 種のアイコンの位置は 8 方位のペア（N-S，NE-SW，E-W，SE-NW）の中から選択され，時計回りの順になるように表示される．各試行は各ディスプレイで 3 回ずつ行い，1 回目の試行は練習として切り捨てる．“1” と書かれたアイコンをクリックしてから “2” と書かれたアイコンをクリックするまでの間の時間を測定する．

ステアリング

2 種類の幅（36 pixels と 90 pixels）と 2 種類の方向（水平と垂直）を持った軌道から逸脱しないように軌道の一端から他端までカーソルを動かすタスクである．軌道長は 360



(a) Pointing (b) Steering (c) Copying/Aligning

(d) Pattern matching (e) Reading

図 5.5: それぞれのタスクにおいて表示されるウィンドウ

pixels であり，軌道の入口部分は緑色，出口部分は赤色，軌道内の部分は灰色で表している（図 5.5(b)）．ここで，パースペクティブ表示されるオブジェクトのサイズは見かけ上のサイズとする．軌道から逸脱した場合には警告音を提示し，被験者は成功するまで同じ試行を繰り返すものとする．被験者は失敗しないようにできるだけ早く正確にタスクを行う．なお，ウィンドウ右下には現在のエラー率が目安として表示される．2 種類の幅と 2 種類の方向の軌道について，各ディスプレイおよび表示条件において，6 回の試行の計 216 回の試行（2 種類の幅 × 2 種類の方向 × ディスプレイ 3 種 × 表示条件 3 条件 × 6 回の試行）を行うが，1 回目の試行は練習として切り捨て，計 180 試行を評価対象とする．

整列

図 5.5(c) 右に示す 6 つの正方形ノードからなる図形を参照しながら，同図左に示す図形のノード部分を移動させることで，同図右と同じ図形を作るタスクである．このとき，同図左において動かすことのできるノードは 6 つのうち緑色の 4 つのノードだけである．それぞれの図形は異なるディスプレイに表示され，被験者は 45 秒の間にできるだけ正確

に図形を作る．なお，ウィンドウ右下には残りの秒数が表示される．このタスクは，カーソル操作に注目したタスクではなく，正対していないディスプレイに表示されるオブジェクトの位置によって，オブジェクトのサイズや形が変化することによる影響に注目したタスクである．そのため，パースペクティブウィンドウとフラットウィンドウのみを比較対象とする（条件 PP vs. 条件 FF）．被験者は，初めの 1 回の練習と，それぞれのディスプレイと表示条件の組み合わせに対して，3 回の試行の総計 18 回の試行（ディスプレイの組み合わせ 3 通り × 表示条件 2 条件 × 3 試行）を行う．測定項目として，参照する図形と作成する図形のそれぞれに対応するノード位置の差（Position Error）と，同様にノード間の角度の差（Angular Error）を測定する．

パターンマッチング

ランダムに描かれた 12 個の幾何学図形（図 5.5(d) 左）を参照しながら，同図右上に指示される幾何学図形がいくつあるかを回答するタスクである．被験者は，指示される図形の個数を同図右に示す “1” から “4” までの数字が書かれたボタンを押すことで回答する．整列のタスクと同様に，このタスクもカーソル操作に注目したタスクでないため，パースペクティブウィンドウとフラットウィンドウのみを比較対象とする（条件 PP vs. 条件 FF）．被験者は，初めの 1 回の練習と，それぞれのディスプレイと表示条件の組み合わせに対して，5 回の試行の総計 30 回の試行（ディスプレイ 3 種 × 表示条件 2 条件 × 5 試行）を行う．測定項目は，ディスプレイに図形が表示されてから，被験者が回答の数字ボタンを押すまでの間の時間を対象とする．

文章読解

このタスクは，200 字程度の文章を被験者に実際に声に出して読んでもらうタスクである．各ディスプレイには図 5.5(e) に示すような分量の文章が表示され，表示条件としてパースペクティブウィンドウとフラットウィンドウを用いる．文章は日本語で，実験中に用いる文章がある特定の文意を持たないように，複数の文から取り出した文章をランダムに表示する．1 回の練習と 2 回の試行を行い，試行回数は総計 12 回である．測定する項目は，被験者が文章を読み始めてから，最後の単語を読み終わるまでの時間である．

5.4 実験結果

5.4.1 ポインティング

タスク完了時間について，表示条件とディスプレイを要因とした分散分析を行った結果，表示条件による主効果が見られた（$F(2,22) = 45.9, p < 0.001$）．図 5.6 にディスプレイ条件毎のタスク完了時間を示す．また，多重比較の結果，すべての表示条件間に有意差が見られた（すべて $p < 0.001$）．

平均のタスク完了時間は条件 PP では 1,098 ms だったのに対し，条件 FP では 1,162 ms，条件 FF では 1,383 ms であった．条件 PP は条件 FP と条件 FF に比べて，それぞれ 5 %および 26 %程度速くタスクを完了できていた．

5.4.2 ステアリング

ポインティングタスクと同様に，タスク完了時間について，表示条件とディスプレイを要因とした分散分析を行った結果，表示条件による主効果が見られた（$F(2,22) = 31.0, p < 0.001$）．図 5.7 にディスプレイ条件毎のタスク完了時間を示す．また，多重比較の結果，条件 PP とその他の条件の間に有意差が見られたが（$p < 0.001$），条件 FP と条件 FF の間には有意差は見られなかった（$p > 0.1$）．

平均のタスク完了時間は，条件 PP では 848 ms，条件 FP と条件 FF ではそれぞれ 1,408 ms と 1,323 ms であった．条件 PP は条件 FP と条件 FF に比べて，それぞれ 66 %および 56 %程度短い時間でタスクを完了できていた．

5.4.3 整列

参照する図形と作成する図形のそれぞれに対応するノード位置の差とノード間の角度の差の両方について，表示条件とディスプレイを要因とした分散分析を行った結果，表示条件による主効果が見られた（$F(1,11) = 21.4, p < 0.01$ および $F(1,11) = 29.2, p < 0.01$）．図 5.8 にディスプレイ条件毎のノード位置の差を示す．参照する図形とのノード位置の差は，条件 PP に比べて条件 FF の方が大きかった（150 pixels vs. 201 pixels）．また，図 5.9 にディスプレイ条件毎のノード間の角度の差を示す．同様にノード間の角度の差においても，条件 PP に比べて条件 FF の方が大きい結果であった（0.73 rad vs. 0.98 rad）．それ

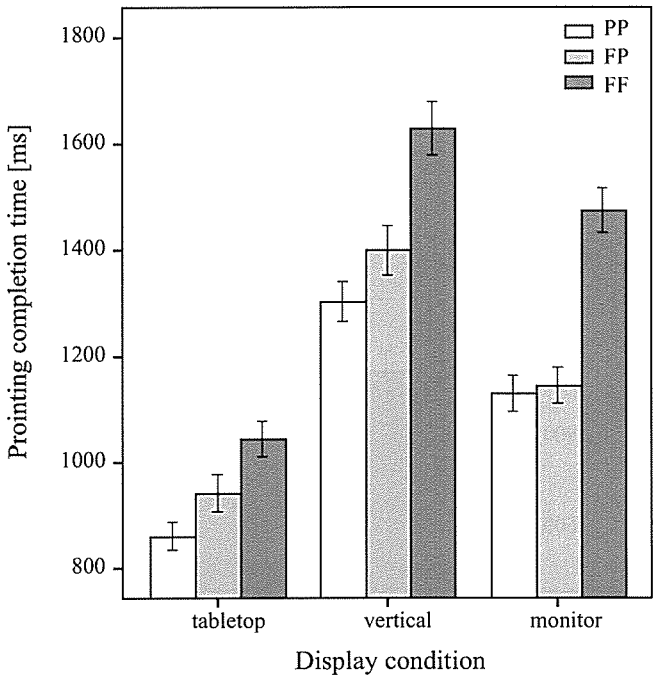


図 5.6: ディスプレイ条件 vs. タスク完了時間（ポインティング）

ぞれ，条件 PP と条件 FF の間に 34 %程度の違いが見られた．

5.4.4 パターンマッチング

タスク完了時間について，表示条件とディスプレイを要因とした分散分析を行った結果，表示条件による主効果が見られた（$F(1,11) = 8.85, p < 0.05$）．図 5.10 にディスプレイ条件毎のタスク完了時間を示す．回答までに要する平均の時間は，条件 PP では 7.6 秒，条件 FF では 9.0 秒であり，16 %程度の速度の向上が見られた．

5.4.5 文章読解

タスク完了時間について，表示条件とディスプレイを要因とした分散分析を行った結果，表示条件による主効果が見られた（$F(1,11) = 17.56, p < 0.01$）．図 5.11 にディスプレイ条件毎のタスク完了時間を示す．文章を読むのに要する平均の時間は，条件 PP は 31.9 秒だったのに比べ，条件 FF では 34.4 秒であり，7.8 %程度の違いであった．

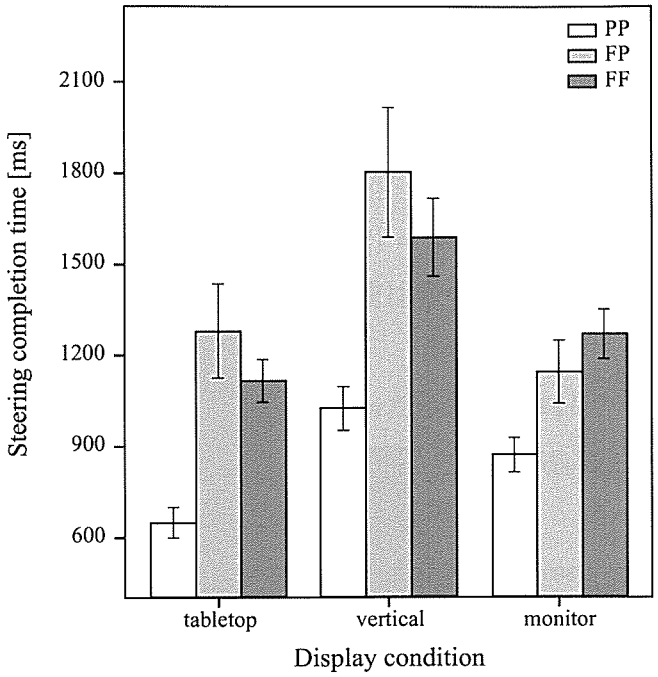


図 5.7: ディスプレイ条件 vs. タスク完了時間（ステアリング）

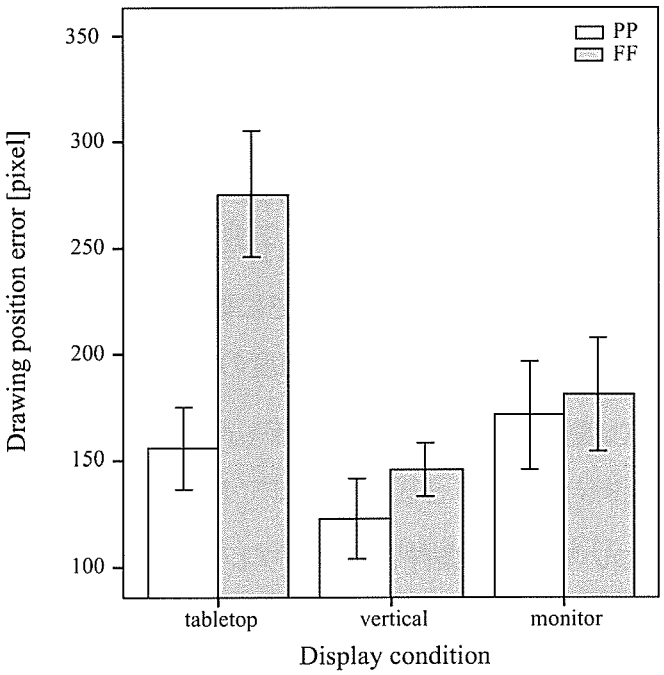


図 5.8: ディスプレイ条件 vs. ノード位置の差（整列）

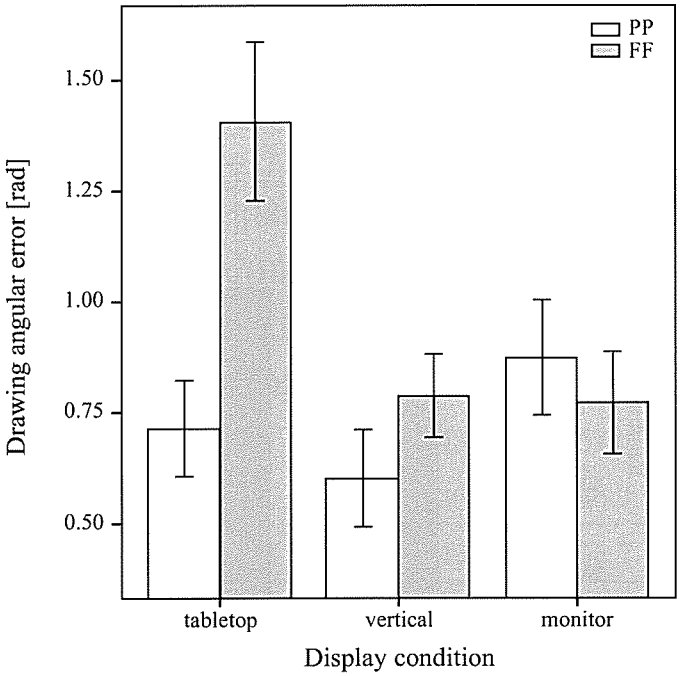


図 5.9: ディスプレイ条件 vs. ノード間の角度の差（整列）

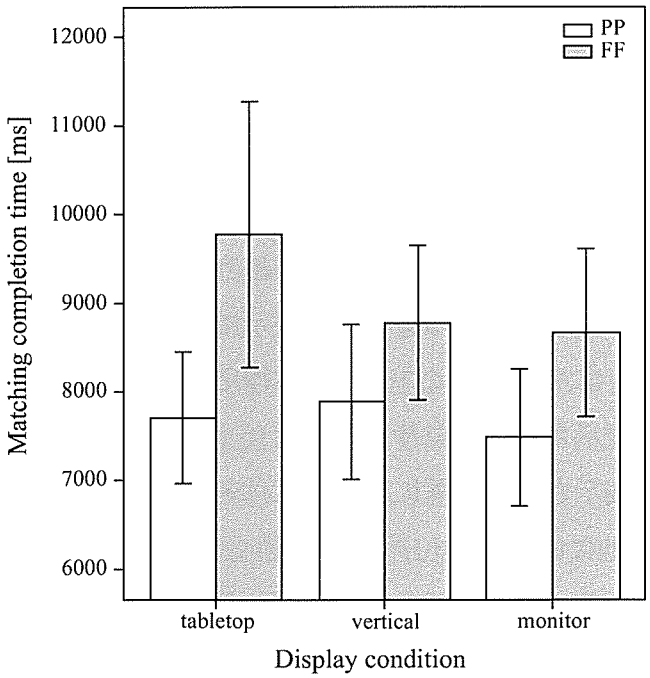


図 5.10: ディスプレイ条件 vs. タスク完了時間（パターンマッチング）

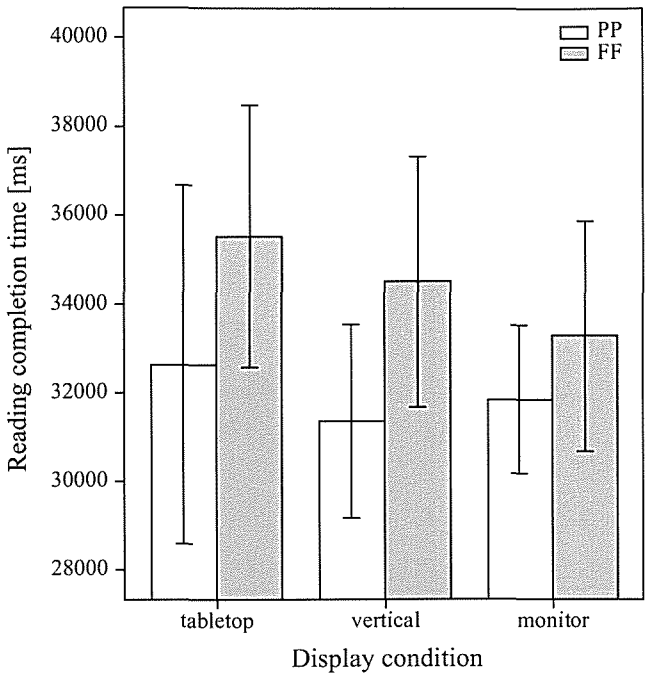


図 5.11: ディスプレイ条件 vs. タスク完了時間（文章読解）

5.4.6 主観評価

各表示条件におけるタスク終了後，条件 PP と条件 FF の 2 種類の表示条件において，被験者に NASA-TLX に基づくアンケートを実施した．表 5.1 に全被験者の WWL の結果を示す．条件 FF に比べて条件 PP の方が，全体的負荷は小さかったが，分散が大きく，条件 PP と条件 FF の表示条件間には尺度項目ごとの有意差は見られなかった．このことから，パースペクティブ表示と従来のフラット表示において，被験者の作業負荷の上昇がなかったことがわかる．また，同時にユーザから得られた意見として，傾いたディスプレイにパースペクティブ表示された文章や図形などが十分理解できたことや，フラット表示ではディスプレイ上の表示される位置によっては体を大きく動かす必要があったといった意見が得られた．その他には，頭の位置が少し動くだけでウィンドウが表示される向きが変わってしまい，パースペクティブ表示では細かな作業をする際には障害になってしまうといった意見も得られた．しかしながら，全体として，利用者とディスプレイの位置関係によってディスプレイ上の情報をパースペクティブに変換して表示することは，被験者にとって大きな作業負荷をかけるものではなく，表示される情報を容易に理解できるもので

表 5.1: NASA-TLX の結果

	条件 PP	条件 FF
精神的要求 (MD)	47.9	58.3
身体的要求 (PD)	45.8	51.0
時間的圧迫 (TD)	42.7	53.1
作業達成度 (OP)	32.3	38.5
努力 (EF)	43.8	57.3
不満 (FR)	36.5	46.9
総合評価得点 (WWL)	46.3	55.7

あったと思われる.

5.5 考察

5.5.1 パースペクティブ表示の有効性

比較実験の結果から，今回設計した5種類の基礎的なタスクにおいて，暗室内で利用者とディスプレイの位置関係を考慮したパースペクティブ表示の有効性が確認することができた．タスク完了時間の短縮およびエラー率の低下から，パースペクティブ表示による視認性の向上が確認できた．また，ポインティングやステアリングのタスクにおいて，条件 PP に対してその他の条件に有意差が見られたことから，パースペクティブ表示の有効性はパースペクティブカーソルだけに起因するものではなく，パースペクティブウィンドウとパースペクティブカーソルの組み合わせによるものだと考えられる．

ポインティングタスクでは，全体の傾向として，各ディスプレイ条件に対しても条件 PP，条件 FP，条件 FF の順にタスク完了時間が長くなっていた．条件 PP と条件 FP の平均時間は 5 %程度の違いしか見られなかったことに対し，条件 PP と条件 FF の平均時間は 26 %程度見られたことから，2 つのターゲット間を移動する際のカーソル移動に要する時間が大きく影響することがわかる．また，ディスプレイ条件の観点からは，どの表

示条件でも壁面型ディスプレイとデスクトップモニタのタスク完了時間がテーブル型ディスプレイよりも大きい傾向にあり，被験者は正対していない縦置きのディスプレイに対してカーソル操作が難しかったことが示唆される．これは，先行研究である [120] の結果を支持するものである．このように，ディスプレイの位置だけではなく，回転方向や角度などによっても影響を受けると考えられ，より有効なパースペクティブ表示を提供するためには，表示するために最適なディスプレイの条件をより詳細な実験で明らかにする必要がある．

ステアリングタスクでは，ポインティングタスクに比べ，条件 PP に対するその他の条件でのタスク完了時間が長い傾向にあり，条件 FF よりも条件 FP の方がタスクの完了に時間がかかっている．これは，条件 FP の場合，軌道がディスプレイに平行して直線的に見えるのに対して，カーソルが曲線的な動作をするため，タスク中の視覚フィードバックの影響が大きく，タスクの完了に時間がかかっていたと推測される．実際に，被験者は思い通りの操作をすることができず，何度もマウスをクラッチングする様子などが見受けられた．ディスプレイ条件の観点からは，テーブル型ディスプレイや壁面型ディスプレイに対してこのような傾向が見られ，パースペクティブ表示の有効性を確認できた．

整列のタスクでは，ノード位置の差とノード間の角度の差については異なる傾向は見受けられなかったが，テーブル型ディスプレイにおいて顕著にパースペクティブ表示の効果が見られた．今回用いた図形の位置関係を把握するようなタスクには，ウィンドウの奥行き感が大きな影響を与えると考えられ，これが原因でフラット表示の際に体を動かそうとしてしまったなどの意見も多くあった．また，整列のタスクとパターンマッチングのタスクの結果からは，複数のディスプレイを同時に用いる場合でも，ウィンドウのパースペクティブ表示による視認性の向上が確認された．利用者からも複数のディスプレイが 1 枚の大きなディスプレイのように見ることができたといった意見も得られ，複数のディスプレイ上で違和感なく操作できていたことがわかる．しかしながら，最適なディスプレイの組み合わせや表示させる情報量など複数ディスプレイ環境における表示インタフェースとしては依然大きな課題がある．

文章読解のタスクでは，フラット表示に比べ，パースペクティブ表示の方が文章が読みにくく感じたといった意見や，特にテーブル型ディスプレイにおいては，机の上に紙を置いたまま読む方が自然ではないかといった否定的な意見も得られた．しかしながら，他のタスクに比べ 7.8 %程度と小さいが，パースペクティブ表示による視認性の向上は確認で

きている．そのため，文章読解のタスクにおいては特に紙のメタファを考慮し，ディスプレイの傾きに応じたパースペクティブ表示とフラット表示の自動切り替えなどの工夫を取り入れていきたい．

主観評価では，複数ディスプレイ環境での基礎的なタスクにおいて，パースペクティブ表示とフラット表示間では被験者が感じた負荷に差はなく，パースペクティブ表示による被験者の作業負荷の上昇は見られなかった．また，フラット表示よりもパースペクティブ表示を好むと回答した利用者の方が多かった（12 人中 9 人）．

これまでの議論から，実際のオフィスや会議室などの電子黒板やプロジェクタなどの複数の大型ディスプレイや個人用のラップトップ PC などがある環境において，利用者が必ずしも操作しようとするディスプレイに正対していないような場合でも，本手法は有効であるという可能性が考えられ，作業効率の向上や複数の利用者での協調作業支援への応用も期待できる．しかし，本実験が暗室であることやディスプレイのベゼル，部屋の背景による影響に関しては十分な議論が必要である．次節では，このような課題について詳細に述べる．

5.5.2 課題

本実験においては，ディスプレイの位置や性能などの条件はあらかじめ決められたものであり，また，ディスプレイに表示するウィンドウの位置やサイズなどの条件も固定であった．実際のオフィスや会議室での利用を考えると，用いられるディスプレイの種類は様々であり，表示する情報の種類も多岐にわたる．そのため，ディスプレイの種類や個数，解像度や輝度などのディスプレイの性能に加え，ウィンドウのデザインなども実験要因としたより詳細な実験が必要であると考えられる．その他にも，5.5.1 節で述べたようにディスプレイの位置や角度によって特定の操作に影響がある可能性も考えられ，先行研究 [120] などを参考に詳細な実験が必要である．また，本実験はディスプレイ周辺の物体やディスプレイのベゼルなどの影響を小さくするため暗室で行ったが，主観評価において，パースペクティブ表示では表示されるウィンドウがディスプレイに対して浮かんで見えるように感じたという意見もあり，ウィンドウの 3D 表示との比較やベゼルの有無による影響の調査など認知的な側面からの実験も必要である．

次に，本実験は利用者を 1 人と限定した環境で行っているため，複数の利用者による検証やウィンドウの増減やディスプレイをまたいだ移動，表示される情報の種類なども考慮

に入れた情報提示手法を検討する必要がある．その際には，利用者とディスプレイの位置関係によって，情報のパースペクティブ表示とフラット表示を自動的に切り替えることや，表示される情報の種類に応じて，高解像度のディスプレイへ自動的に移動させることなども考えられる．また，複数の利用者に対して同時に情報を提示する手法については，それぞれの利用者が最も見やすいディスプレイにウィンドウを自動的に移動させることや，両者の視点の中間の位置に視点があると仮定したパースペクティブ表示をすることなど，解決すべき問題も多く，今後の課題である．

5.6 おわりに

複数のディスプレイ環境における表示インタフェースのための基礎技術として，必ずしも正対していないディスプレイにおいて，利用者の視点位置から常に正対して見ることができるようにウィンドウなどの情報をパースペクティブに表示する手法（パースペクティブ表示）について検討し，従来の画面にフラットに表示する手法と比較実験を暗室内で行った．テーブル型ディスプレイ，壁面型ディスプレイ，デスクトップモニタの3種類のディスプレイがある複数ディスプレイ環境でのポインティング，ステアリング，整列，パターンマッチング，文章読解の5種類の基礎的なタスクにおいて，パースペクティブウィンドウとパースペクティブカーソルを用いた表示手法の有効性を検証した．その結果，パースペクティブ表示が，フラット表示に対して8 %から60 %程度の高い視認性の向上が確認された．また主観評価によって，パースペクティブ表示とフラット表示間では被験者が感じた負荷に差はなく，パースペクティブ表示による被験者の作業負荷の上昇は見られなかったことを確認した．これにより，暗室内では，複数のディスプレイ環境における表示インタフェースとして，利用者とディスプレイの位置関係を考慮したパースペクティブ表示は有効であることがわかった．

今後は，5.5.2節で述べたようにより高度なタスクによる実験やディスプレイの解像度や輝度などの影響を詳細に調査することで，既存の複数ディスプレイ環境へのパースペクティブ表示の適用や，複数の利用者による複数ディスプレイ環境における協調作業支援の検討が考えられる．

第6章

結論

本論文では，多様化するタスクや表示データ，システムの構成などを考慮した問題範囲の中で，個人の保有情報と共有情報の両方が同時に求められる協調作業，複数の利用者が同時に直接指示できる立体映像を用いた協調作業，そしてテーブル型ディスプレイに複数のディスプレイを組み合わせた環境における協調作業を問題範囲と設定し，それぞれの作業においてテーブル型ディスプレイにおける協調インタラクションを検討した．個人の保有情報と共有情報の両方が同時に求められる協調作業に関しては，単一ディスプレイ上に複数の利用者が個々に持つ保有情報と共有情報をシームレスに共存させて表示できるテーブル型ディスプレイ “SharedWell” を提案し，評価実験の結果を検討した．また，複数人で直接指示できる立体映像を用いた協調作業に関して，テーブル型ディスプレイの特徴の1つである利用者間の会話や他の利用者の身体動作などのコミュニケーションの自然な共有に着目した評価実験を行い，それらの影響に関して議論した．さらに，テーブル型ディスプレイに複数のディスプレイを組み合わせた環境における協調作業において，利用者とディスプレイの位置関係に着目し，情報提示の問題を解決する表示手法を導入することで，協調インタラクションに要する時間や負荷の軽減を実現した．以下では，本論文の内容を要約し，今後の展望についてまとめる．

第2章では，これまでのコンピュータ支援による協調作業を時間特性と空間特性によって分類し，それに基づき協調作業支援システムに関する諸研究について紹介した．また，テーブル上における協調作業に着目し，近年盛んに行われているテーブル型ディスプレイとそれらを用いたテーブル上における協調インタラクションの諸技術について述べ，このような協調作業の行動分析やその特性を調査した研究事例をまとめた．

第3章では，簡単な構成で，単一ディスプレイ上に複数の利用者が個々に持つ保有情報と共有情報をシームレスに共存させて表示できるテーブル型ディスプレイ“SharedWell”を提案した．個人の保有情報と共有情報の両方が必要となるようなタスクを設定し，評価実験より，提案システムを用いて個人の保有情報と共有情報をシームレスに扱え，利用者の動きによってプライベート空間と共有空間を動的に生成できていることを確認した．利用者はそれによって，誰と交渉をするかを選びながら情報をコントロール可能である．また，作業をする場所を変更した場合でも，単一のディスプレイであることにより，プライベート空間と同様に共有空間を利用できることが確認できた．

第4章では，複数の利用者で直接指示できる立体映像を用いた協調作業において，対面型と分散型の環境における利用者間の会話や身体動作などのコミュニケーションの違いが協調作業に与える影響について検討した結果について述べた．立体表示ディスプレイとしてIllusionHoleを用い，対面型の協調作業環境と2台をネットワークで結合した分散型の協調作業環境を用意し，2人で協力して仮想物体を操作するタスクによる比較実験を行い，タスクパフォーマンスや会話分析，行動分析に関して議論した．その結果，協調相手の直接指示する手が見えることはタスクパフォーマンスに影響を与えること，会話の有無はタスクパフォーマンスに影響を与えないこと，そして環境の違いは発話回数に影響を与えないが，発話内容に影響を与えることを明らかにした．また．これらの結果を踏まえて，複数の利用者で直接指示できる立体映像を用いた協調作業の分散型環境への適用と，異なる形態のタスクや被験者の立ち位置を考慮した，より詳細な検証などの検討事項を議論した．

第5章では，複数のディスプレイ環境における表示インタフェースのための基礎技術として，必ずしも正対していないディスプレイに対して，利用者の視点位置から常に正対して見ることができるパースペクティブ表示について検討した結果について述べた．パースペクティブ表示では，ウィンドウとカーソルを対象とし，それぞれをパースペクティブウィンドウとパースペクティブカーソルとして用い，テーブル型ディスプレイ，壁面型ディスプレイ，デスクトップモニタの3種類のディスプレイがある複数ディスプレイ環境でのポインティング，ステアリング，整列，パターンマッチング，文章読解の5種類の基礎的なタスクにおいて，暗室内で，従来の画面にフラットに表示する手法と比較実験を行い，その有効性を検証した．その結果，パースペクティブ表示がフラット表示に対して，8 %から60 %程度のタスク完了時間の短縮およびエラー率の低下が見られ，高い視認性

の向上が確認できた．また主観評価によって，パースペクティブ表示とフラット表示間では被験者が感じた負荷に差はなく，パースペクティブ表示による被験者の作業負荷の上昇は見られなかったことを確認した．これらの結果を踏まえて，ディスプレイの属性や表示する情報の内容などを要因とした影響の調査や，複数の利用者やウィンドウによる情報提示手法の検討などパースペクティブ表示の課題についても論じた．

テーブル型ディスプレイやそれを用いた協調作業支援に関する研究はまだまだ発展段階にあると言える．しかし，問題解決や意志決定を支援し，複数の人が協力することによって新たな価値を創造していくための協調作業の場として，テーブル型ディスプレイの果たすべき役割は大きいと期待される．当然，キラーアプリケーションは必要ではあるが，テーブルの長い歴史に鑑みれば，可能性は無限に広がっている．近い将来，リビングやオフィスなどにあるテーブルを含めたあらゆる面がディスプレイとなることが十分に考えられる．空間全体がディスプレイとなることで，各人の状態に応じて必要な情報を自動的に表示したり，協調作業の形態に合わせて表示される情報を動的に変化させたりするといった協調インタラクションが考えられる．また，実世界と仮想世界にまたがる境界が取り払われ，人間の直感，感性，空間性等を最大限に利用した新たな協調インタラクションの構造も生まれるであろう．このようにテーブル型ディスプレイの枠を越えて，協調作業支援技術がどこまで拡がるのか興味は尽きない．本研究が今後，新たなライフスタイルやビジネススタイルを支える技術の一助となることを期待したい．

謝辞

本研究の全過程を通じて，研究に対する視点の持ち方，研究を進める上で背景となる技術動向の捉え方，研究の展望などについて懇切なる御指導，御支援を賜わりました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 岸野 文郎 教授に深く感謝申し上げます.

本研究を推進するにあたり，直接の御指導，御助言，御討論を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 北村 喜文 准教授に心より感謝申し上げます.

本論文をまとめるにあたり，貴重なお時間を割いて頂き，懇切なる御指導と有益な御助言を賜りました，大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 薦田 憲久 教授，大阪大学大学院人間科学研究科人間科学専攻 大坊 郁夫 教授，大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 西尾 章治郎 教授，藤原 融 教授，大阪大学サイバーメディアセンター 竹村 治雄 教授に心より感謝致します.

本研究を推進するにあたり，惜しみない御討論を頂きました大阪大学ウェブデザインユニット 伊藤 雄一 准教授に心より感謝申し上げます.

競争の側面を持つ協調作業に関して，有益な御助力，御助言を頂き，またサスカチュワン大学滞在中に大変お世話になりましたブリストル大学 Sriram Subramanian 博士，立体映像を用いた協調作業に関して，数々の御助言を頂きましたフランス国立情報処理自動化研究所 Anatole Lecuyer 博士，複数ディスプレイ環境における表示インタフェースの構築に御協力頂きましたサスカチュワン大学 Carl Gutwin 博士，同大学 Miguel A. Nacenta 氏に深く感謝申し上げます.

研究，私生活を通じ，惜しみない御指導，御助言，御協力を頂きました大阪電気通信大学 大西 克彦 准教授，トヨタ自動車株式会社 市田 浩靖 博士，シャープ株式会社 吉本 良治 博士，三菱電機株式会社 渡邉 亮一 博士，株式会社日立製作所 小田 琢也 博士，株式会社ユニティ 村上 礼繁 氏に深く感謝の意を表します.

本研究を進めるにあたって，多大なる御支援を頂きましたヤマハ株式会社 中山 智量 氏，シャープ株式会社 中島 孝司 氏，三菱電機株式会社 三木 洋平 氏，三菱電機情報ネットワーク株式会社 藤原 正貴 氏，大阪大学大学院国際公共政策研究科 高嶋 和毅 助教，大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻岸野研究室 櫻井 智史 氏，Sandeva Goonetilleke 氏，丹羽 真隆 氏，北岡 伸也 氏，坂本 龍哉 氏，築谷 喬之 氏に心より感謝致します．また，著者の所属する研究チームの大野 翼 氏，安田 敏宏 氏，菊川 哲也 氏，高本 恵介 氏，深澤 遼 氏，三枝 知史 氏にも研究を進める上で有益な御討論を頂いたことに感謝の意を表します．

研究，私生活を通じ，多数の貴重な御助言，御支援を頂いた，大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻岸野研究室の諸氏に心から感謝致します．

最後に，研究生活を送る上で，暖かい御支援と多大なる御理解を頂いた，両親を始めとする家族，そして横井 紀子 氏に心から感謝と御礼を申し上げます．

参考文献

[1] 松下温, 岡田謙一. コラボレーションとコミュニケーション. 共立出版, 1995.

[2] 西尾章治郎, 岸野文郎, 塚本昌彦, 山本修一郎, 石田亨, 川田隆雄. 相互の理解. 岩波講座 マルチメディア情報学, 第12巻, 岩波書店, 1999.

[3] 大坊郁夫. 社会的スキル向上を目指す対人コミュニケーション. ナカニシヤ出版, 2005.

[4] P. Dourish and V. Bellotti. Awareness and coordination in shared workspaces. *Proc. of ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW '92)*, pp. 107–114, 1992.

[5] E. T. Hall. *The hidden dimension.* Doubleday, 1966.

[6] 田村博（編）. ヒューマンインタフェース. オーム社, 1998.

[7] B. Shneiderman. *Designing the user interface: strategies for effective human-computer interaction.* Addison-Wesley, fourth edition, 2004.

[8] C. A. Ellis, S. J. Gibbs, and G. L. Rein. Groupware: some issues and experiences. *Communications of the ACM*, Vol. 34, No. 1, pp. 39–58, 1991.

[9] D. C. Englebert and W. K. English. A research center for augmenting human intellect. *Proc. of the AFIPS Fall Joint Computer Conference (FJCC '68)*, Vol. 33, No. 1, pp. 395–410, 1968.

[10] H. Ishii, M. Kobayashi, and J. Grudin. Integration of inter-personal space and shared workspace: ClearBoard design and experiments. *Proc. of ACM Conference*

on Computer Supported Cooperative Work (CSCW '92), pp. 33–42, 1992.

[11] H. Takemura and F. Kishino. Cooperative work environment using virtual workspace. *Proc. of ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW '92)*, pp. 226–232, 1992.

[12] R. A. Bolt. *The human interface.* Lifetime Learning Publications, 1984.

[13] M. Stefix, G. Foster, D. G. Bobrow, K. Kahn, S. Lanning, and L. Suchman. Beyond the chalkboard: computer support for collaboration and problem solving in meetings. *Communications of the ACM*, Vol. 30, No. 1, pp. 32–47, 1987.

[14] N. A. Streitz, J. Geissler, T. Holmer, S. Konomi, C. Muller-Tomfelde, W. Reischl, P. Rexroth, P. Seitz, and R. Steinmetz. i-LAND: an interactive landscape for creativity and innovation. *Proc. of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '99)*, pp. 120–127, 1999.

[15] J. Rekimoto and M. Saitoh. Augmented Surfaces: a spatially continuous work space for hybrid computing environments. *Proc. of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '99)*, pp. 378–385, 1999.

[16] A. Fox, B. Johanson, P. Hanrahan, and T. Winograd. Integrating information appliances into an interactive workspace. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 20, No. 3, pp. 54–65, 2000.

[17] S. Izadi, H. Brignull, T. Rodden, Y. Rogers, and M. Underwood. Dynamo: a public interactive surface supporting the cooperative sharing and exchange of media. *Proc. of ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '03)*, pp. 159–168, 2003.

[18] P. Wellner. Interacting with paper on the DigitalDesk. *Communications of the ACM*, Vol. 36, No. 7, pp. 87–96, 1993.

[19] P. Tandler, T. Prante, C. Muller-Tomfelde, N. Streitz, and R. Steinmetz. ConnecTables: dynamic coupling of displays for the flexible creation of shared workspaces.

Proc. of ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '01), pp. 11–20, 2001.

[20] P. Dietz and D. Leigh. DiamondTouch: a multi-user touch technology. *Proc. of ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '01)*, pp. 219–226, 2001.

[21] S. Scott, K. D. Grant, and R. L. Mandryk. System guidelines for co-located, collaborative work on a tabletop display. *Proc. of European Conference on Computer-Supported Cooperative Work (ECSCW '03)*, pp. 159–178, 2003.

[22] C. Shen, K. Everitt, and K. Ryall. UbiTable: impromptu face-to-face collaboration on horizontal interactive surfaces. *Proc. of International Conference on Ubiquitous Computing (Ubicomp '03)*, pp. 281–288, 2003.

[23] M. Matsushita, M. Iida, T. Ohguro, Y. Shirai, Y. Kakehi, and T. Naemura. Lumisight table: a face-to-face collaboration support system that optimizes direction of projected information to each stakeholder. *Proc. of ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW '04)*, pp. 274–283, 2004.

[24] 松下光範, 土方嘉徳, 杉原敏昭（編）. 技術展望（小特集）「テーブル型システムの現状」. ヒューマンインタフェース学会誌, Vol. 9, No. 1, pp. 35–58, 2007.

[25] 大和田龍夫, 中村竜也, 亀井剛次, 桑原和宏, 須永剛司, 鶴巻文子, 徳村篤志. コラボレーションシステムデザインの評価–大型共有画面の方向性の影響. 日本デザイン学会第 48 回秋季研究発表大会概要集, pp. 240–241, 2001.

[26] R. Kruger, S. Carpendale, S. D. Scott, and A. Tang. Fluid integration of rotation and translation. *Proc. of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '05)*, pp. 601–610, 2005.

[27] J. Liu, D. Pinelle, S. Sallam, S. Subramanian, and C. Gutwin. TNT: improved rotation and translation on digital tables. *Proc. of Graphics Interface (GI '06)*, pp. 25–32, 2006.

[28] 三浦純子, 土屋健一, 吉川健一. MediaTable: 方向性を持たない円形の情報システム. インタラクティブシステムとソフトウェア IX, 近代科学社, pp. 173–178, 2001.

[29] C. Shen, N. B. Lesh, F. Vernier, C. Forlines, and J. Frost. Sharing and building digital group histories. *Proc. of ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW '02)*, pp. 324–333, 2002.

[30] F. Vernier, N. Lesh, and C. Shen. Visualization techniques for circular tabletop interfaces. *Proc. of Working Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI '02)*, pp. 257–263, 2002.

[31] G. Shoemaker and K. Inkpen. Single display privacyware: augmenting public displays with private information. *Proc. of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '01)*, pp. 522–529, 2001.

[32] M. Wu and R. Balakrishnan. Multi-finger and whole hand gestural interaction techniques for multi-user tabletop displays. *Proc. of ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '03)*, pp. 193–202, 2003.

[33] M. Agrawala, A. C. Beers, B. Frohlich, P. Hanrahan, I. MacDowall, and M. Bolas. The two-user responsive workbench: support for collaboration through individual views of a shared space. *Proc. of International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '97)*, pp. 327–332, 1997.

[34] O. Bimber, F. Dieter, D. Schmalstieg, and L. M. Encarnacao. The VirtualShowcase. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 21, No. 6, pp. 48–55, 2001.

[35] G. Favalora, R. Dorval, D. Hall, M. Giovinco, and J. Napoli. Volumetric three-dimensional display system with rasterization hardware. *Proc. of SPIE*, Vol. 4297, pp. 227–235, 2001.

[36] Y. Kitamura, T. Konishi, S. Yamamoto, and F. Kishino. Interactive stereoscopic display for three or more users. *Proc. of International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '01)*, pp. 231–239, 2001.

[37] B. Johanson, G. Hutchins, T. Winograd, and M. Stone. PointRight: experience with flexible input redirection in interactive workspaces. *Proc. of ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '02)*, pp. 227–234, 2002.

[38] J. Rekimoto. Pick-and-Drop: a direct manipulation technique for multiple computer environments. *Proc. of ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '97)*, pp. 31–39, 1997.

[39] M. A. Nacenta, S. Sallam, B. Champoux, S. Subramanian, and C. Gutwin. Perspective cursor: perspective-based interaction for multi-display environments. *Proc. of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '06)*, pp. 289–298, 2006.

[40] T. Prante, N. A. Streitz, and P. Tandler. Roomware: computers disappear and interaction evolves. *Computer*, Vol. 37, No. 12, pp. 47–54, 2004.

[41] J. T. Biehl and B. P. Bailey. ARIS: an interface for application relocation in an interactive space. *Proc. of Graphics Interface (GI '04)*, pp. 107–116, 2004.

[42] D. S. Tan, B. Meyers, and M. Czerwinski. WinCuts: manipulating arbitrary window regions for more effective use of screen space. *Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI '04)*, pp. 1525–1528, 2004.

[43] T. Yamaguchi, S. Subramanian, Y. Kitamura, and F. Kishino. Strategic negotiations in tabletop. *Human Computer Interaction*, pp. 355–370, In-Tech Education and Publishing, 2008.

[44] Y. Kitamura, W. Osawa, T. Yamaguchi, H. Takemura, and F. Kishino. A display table for strategic collaboration preserving private and public information. *Proc. of IFIP International Conference on Entertainment Computing (ICEC '05)*, pp. 167–179, 2005.

[45] T. Yamaguchi, S. Subramanian, Y. Kitamura, and F. Kishino. Dynamics of strategic negotiations on SharedWell. *Proc. of International Conference on Collaboration Technologies (CollabTech '08)*, pp. 140–145, 2008.

[46] 山口徳郎, 藤原正貴, 三枝知史, 北村喜文, アナトールレクイエル, 岸野文郎. 複数人で直接指示可能な立体映像を表示できるテーブル型ディスプレイを用いた対面型と分散型の協調作業の比較. 電子情報通信学会論文誌 (査読中).

[47] 藤原正貴, 山口徳郎, 櫻井智史, 北村喜文, アナトールレクイエル, 岸野文郎. 立体画像を用いた協調作業の一検討. 情報処理学会研究報告, 2007-HCI-127, Vol. 2008, No. 11, pp. 45–52, 2008.

[48] 山口徳郎, ミゲルナセンタ, 櫻井智史, 伊藤雄一, 北村喜文, スリラムサブラマニアン, カールグトウィン, 岸野文郎. 利用者とディスプレイの位置関係を考慮したパースペクティブ表示. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J91-D, No. 12, pp. 2746–2754, 2008.

[49] M. A. Nacenta, S. Sakurai, T. Yamaguchi, Y. Miki, Y. Itoh, Y. Kitamura, S. Subramanian, and C. Gutwin. E-conic: a perspective-aware interface for multi-display environments. *Proc. of ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '07)*, pp. 279–288, 2007.

[50] Y. Rogers and S. Lindley. Collaborating around vertical and horizontal large interactive displays: which way is best? *Interacting with Computers*, Vol. 16, No. 6, pp. 1133–1152, 2004.

[51] 石井裕. グループウェアのデザイン. 情報フロンティアシリーズ, 共立出版, 1994.

[52] 垂水浩幸. グループウェアとその応用. ソフトウェアテクノロジーシリーズ, 共立出版, 2000.

[53] K. Hirata, Y. Harada, T. Takada, S. Aoyagi, Y. Shirai, N. Yamashita, and J. Yamato. The t-Room: toward the future phone. *NTT Technical Review*, Vol. 4, No. 12, pp. 26–33, 2006.

[54] 竹中真希子, 稲垣成哲, 山口悦司, 大島純, 大島律子, 村山功, 中山迅, 山本智一. Web knowledge forum に支援されたアナロジーと概念変化：動物の発生と成長をテーマとした小学校の理科授業を事例にして. 日本科学教育学会研究会研究報告, Vol. 29, No. 1, pp. 25–38, 2005.

[55] R. Bently, U. Applet, E. Hinrichs, D. Kerr, K. Sikkel, J. Trevor, and G. Woetzel. Basic support for cooperative work on the world wide web. *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 46, No. 6, pp. 827–846, 1997.

[56] M. D. P. Leland, R. S. Fish, and R. E. Kraut. Collaborative document production using quilt. *Proc. of ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW '88)*, pp. 206–215, 1988.

[57] Y. Ichikawa, K. Okada, G. Jeong, S. Tanaka, and Y. Matsushita. MAJIC video-conferencing system: experiments, evaluation and improvement. *Proc. of European Conference on Computer-Supported Cooperative Work (ECSCW '95)*, pp. 279–292, 1995.

[58] J. Short, E. Williams, and B. Christie. *The social psychology of telecommunications.* John Wiley & Sons, 1976.

[59] S. Scott, T. Carpendale, and K. M. Inkpen. Territoriality in collaborative tabletop workspaces. *Proc. of ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW '04)*, pp. 294–303, 2004.

[60] H. Koike and Y. Sato. Integrating paper and digital information on Enhanced-Desk: a method for realtime finger tracking on an augmented desk system. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, Vol. 8, No. 4, pp. 307–322, 2001.

[61] J. Stewart, B. B. Bederson, and A. Druin. Single display groupware: a model for co-present collaboration. *Proc. of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '99)*, pp. 286–293, 1999.

[62] J. Rekimoto. SmartSkin: an infrastructure for freehand manipulations on interactive surfaces. *Proc. of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '02)*, pp. 113–120, 2002.

[63] J. Y. Han. Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection. *Proc. of ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '05)*, pp. 115–118, 2005.

[64] J. Parker, R. Mandryke, and K. Inkpen. TractorBeam: seamless integration of local and remote pointing for tabletop displays. *Proc. of Graphics Interface (GI '05)*, pp. 33–40, 2005.

[65] B. Myers, R. Bhatnagar, J. Nichols, C. Peck, D. Kong, R. Miller, and A. Long. Interacting at a distance: measuring the performance of laser pointers and other devices. *Proc. of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '02)*, pp. 33–40, 2002.

[66] M. A. Nacenta, D. Pinelle, D. Stuckel, and C. Gutwin. The effects of interaction technique on coordination in tabletop groupware. *Proc. of Graphics Interface (GI '07)*, pp. 191–198, 2007.

[67] D. Wigdor, D. Leigh, C. Forlines, S. Shipman, J. Barnwell, R. Balakrishnan, and C. Shen. Under the table interaction. *Proc. of ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '06)*, pp. 259–268, 2006.

[68] Y. Itoh, T. Yamaguchi, Y. Kitamura, and F. Kishino. A computerized interactive toy: TSU.MI.KI. *Proc. of IFIP International Conference on Entertainment Computing (ICEC '05)*, pp. 507–510, 2005.

[69] 伊藤雄一, 山口徳郎, 秋信真太郎, 渡邉亮一, 市田浩靖, 北村喜文, 岸野文郎. TSU.MI.KI:仮想世界と実世界をシームレスに融合するユーザインタフェース. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 11, No. 1, pp. 171–180, 2006.

[70] B. Ullmer and H. Ishii. The metaDESK: models and prototypes for tangible user interfaces. *Proc. of ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '97)*, pp. 223–232, 1997.

[71] E. G. Arias, H. Eden, and G. Fischer. Enhancing communication, facilitating shared understanding, and creating better artifacts by integrating physical and computational media for design. *Proc. of Conference on Designing Interactive Systems (DIS '97)*, pp. 1–12, 1997.

[72] J. Patten, H. Ishii, J. Hines, and G. Pangaro. Sensetable: a wireless object tracking platform for tangible user interfaces. *Proc. of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '01)*, pp. 253–260, 2001.

[73] S. Jorda, G. Geiger, M. Alonso, and M. Kaltenbrunner. The reacTable: exploring the synergy between live music performance and tabletop tangible interfaces. *Proc. of International Conference on Tangible and Embedded Interaction (TEI '07)*, pp. 139–146, 2007.

[74] T. Yamaguchi, Y. Kitamura, and F. Kishino. Interactive stereoscopic display for multiple users and its applications. *2008 ASIAGRAPH Proceedings*, Vol. 2, No. 1, pp. 145–150, 2008.

[75] T. Yamaguchi, K. Asai, Y. Kitamura, and F. Kishino. Interactive multimedia contents in the IllusionHole. *Proc. of IFIP International Conference on Entertainment Computing (ICEC '08)*, pp. 116–121, 2008.

[76] 岸野文郎. バーチャルリアリティ技術（小特集）「臨場感通信」. テレビジョン学会誌, Vol. 46, No. 6, pp. 698–702, 1992.

[77] S. M. Rhee, R. Ziegler, J. Park, M. Naef, M. Gross, and M. H. Kim. Low-cost telepresence for collaborative virtual environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 13, No. 1, pp. 156–166, 2007.

[78] C. Basdogan, C. Ho, M. A. Srinivasan, and M. Slater. An experimental study on the role of touch in shared virtual environment. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, Vol. 7, No. 4, pp. 443–460, 2000.

[79] H. T. Regenbrecht, M. Wagner, and G. Baratoff. MagicMeeting: a collaborative tangible augmented reality system. *Virtual Reality*, Vol. 6, No. 3, pp. 151–166, 2002.

[80] A. Butz, T. Hollerer, S. Feiner, B. MacIntyre, and C. Beshers. Enveloping users and computers in a collaborative 3D augmented reality. *Proc. of IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR '99)*, pp. 35–44, 1999.

[81] 清川清, マークビリングハースト, ダニエルベルチャ, アルナブグプタ. 拡張現実感インタフェースを用いた対面協調作業のコミュニケーション過程. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 2, pp. 159–168, 2002.

[82] S. Sakurai, Y. Itoh, Y. Kitamura, M. A. Nacenta, T. Yamaguchi, S. Subramanian, and F. Kishino. A middleware for seamless use of multiple displays. *Proc. of Design, Specification and Verification of Interactive Systems (DSV-IS '08)*, pp. 252–266, 2008.

[83] S. Sakurai, T. Yamaguchi, Y. Kitamura, M. A. Nacenta, Y. Itoh, R. Fukazawa, S. Subramanian, and F. Kishino. M^3: multi-modal interface in multi-display environment for multi-users. *Proc. of ACM SIGGRAPH Conference and Exhibition in Asia (SIGGRAPAH Asia '08)*, p. 45, 2008.

[84] J. C. Tang. Findings from observational studies of collaborative work. *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 34, No. 2, pp. 143–160, 1991.

[85] D. Pinelle, C. Gutwin, and S. Greenberg. Task analysis for groupware usability evaluation: modeling shared-workspace tasks with the mechanics of collaboration. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, Vol. 10, No. 4, pp. 281–311, 2003.

[86] 松田昌史, 松下光範, 苗村健. 分散認知環境における集団課題達成: Lumisight Tableを用いた迷路ゲーム実験. 電子情報通信学会技術研究報告, HCS2005-34, Vol. 105, pp. 37–42, 2005.

[87] A. Tang, M. Tory, B. Po, P. Neumann, and S. Carpendale. Collaborative coupling over tabletop displays. *Proc. of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '06)*, pp. 1181–1190, 2006.

[88] K. Ryall, C. Forlines, C. Shen, and M. R. Morris. Exploring the effects of group size and table size on interactions with tabletop shared-display groupware. *Proc. of ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW '04)*, pp. 284–293, 2004.

[89] R. Kruger, S. Carpendale, S. D. Scott, and S. Greenberg. Roles of orientation in tabletop collaboration: comprehension, coordination and communication. *Computer Supported Cooperative Work*, Vol. 13, No. 5–6, pp. 501–537, 2004.

[90] M. Ringel, K. Ryall, C. Shen, C. Forlines, and F. Vernier. Release, relocate, reorient, resize: fluid techniques for document sharing on multi-user interactive tables. *Proc. of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '04)*, pp. 1441–1444, 2004.

[91] C. Gutwin and S. Greenberg. A descriptive framework of workspace awareness for real-time groupware. *Computer Supported Cooperative Work*, Vol. 11, No. 3–4, pp. 411–446, 2002.

[92] A. Pauchet, F. Coldefy, S. Picard, A. Bouguet, L. Perron, J. Guerin, D. Corvaisier, and M. Collobert. Mutual awareness in collocated and distant collaborative tasks using shared interfaces. *Proc. of IFIP International Conference on Human-Computer Interaction (INTERACT '07)*, pp. 59–73, 2007.

[93] A. Pauchet, F. Coldefy, L. Lefebvre, S. Picard, L. Perron, A. Bouguet, M. Collobert, J. Guerin, and D. Corvaisier. Tabletops: worthwhile experiences of collocated and remote collaboration. *Proc. of IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (TABLETOP '07)*, pp. 27–34, 2007.

[94] 山口徳郎, スリラムサブラマニアン, 北村喜文, 大坊郁夫, 岸野文郎. テーブル上における競争の側面を持つ協調作業. ヒューマンインタフェース学会論文誌 (査読中).

[95] T. Yamaguchi, S. Subramanian, Y. Kitamura, and F. Kishino. Strategic tabletop negotiations. *Proc. of IFIP International Conference on Human-Computer Interaction (INTERACT '07)*, pp. 169–182, 2007.

[96] J. Lim. A conceptual framework on the adoption of negotiation support systems. *Information and Software Technology*, Vol. 45, No. 8, pp. 469–477, 2003.

[97] B. Dietmeyer and R. Kaplan. *Strategic negotiation: a breakthrough four-step process for effective business negotiation.* Kaplan Business, 2004.

[98] D. Kirsh and P. Maglio. On distinguishing epistemic from pragmatic action. *Cognitive Science*, Vol. 18, No. 4, pp. 513–549, 1994.

[99] I. D. Steiner. *Group Process and Productivity.* Academic Press, 1972.

[100] T. R. Tyler and S. L. Blader. *Cooperation in groups: procedural justice, social identity and behavioral engagement.* Psychology Press, 2000.

[101] 松田昌史, 松下光範, 苗村健. 社会的分散認知環境における集団課題達成の促進要因: 集団成員間の親密さの影響. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J90-D, No. 4, pp. 1043–1054, 2007.

[102] M. Elwart-Keys, D. Halonen, M. Horton, R. Kass, and P. Scott. User interface requirements for face to face groupware. *Proc. of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '90)*, pp. 295–301, 1990.

[103] 北村喜文, 中山智量, 中島孝司, 山本澄彦. 偏光フィルタを用いた多人数共有型立体表示装置. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J90-D, No. 10, pp. 2893–2902, 2007.

[104] Fantasy on Yahoo! Sports.
http://sports.yahoo.com/fantasy.

[105] S. G. Hart and L. E. Staveland. Development of NASA-TLX: results of empirical and theoretical research. *P. A. Hancock and N. Meshkati(ed.), Human Mental Workload*, pp. 139–183, 1988.

[106] Y. Kitamura, T. Nakashima, K. Tanaka, and T. Johkoh. The IllusionHole for medical applications. *Proc. of IEEE Virtual Reality (IEEE VR '07)*, pp. 231–234, 2007.

[107] SmartBoard.
http://smarttech.com/.

[108] Entertaible.
http://www.philips.com/.

[109] Microsoft Surface.
http://www.microsoft.com/surface/.

[110] E. Huey. Preliminary experiments in the physiology and psychology of reading. *The American Journal of Psychology*, Vol. 9, No. 4, pp. 575–586, 1898.

[111] D. Wigdor and R. Balakrishnan. Empirical investigation into the effect of orientation on text readability in tabletop displays. *Proc. of European Conference on Computer-Supported Cooperative Work (ECSCW '05)*, pp. 205–224, 2005.

[112] D. Wigdor, C. Shen, C. Forlines, and R. Balakrishnan. Perception of elementary graphical elements in tabletop and multi-surface environments. *Proc. of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '07)*, pp. 473–482, 2007.

[113] M. E. Brener. *Vanishing Points: three dimensional perspective in art and history.* McFarland & Co., 2004.

[114] M. H. Pirenne. *Optics, painting & photography.* Cambridge University Press, 1970.

[115] J. D. Mackinlay, G. G. Robertson, and S. K. Card. The Perspective Wall: detail and context smoothly integrated. *Proc. of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '91)*, pp. 173–176, 1991.

[116] Y. Guiard, O. Chapuis, Y. Du, and M. Beaudouin-Lafon. Allowing camera tilts for document navigation in the standard GUI. *Proc. of Working Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI '06)*, pp. 241–244, 2006.

[117] O. Chapuis and N. Roussel. Metisse is not a 3D desktop! *Proc. of ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '05)*, pp. 13–22, 2005.

[118] G. Robertson, M. van Dantzich, D. Robbins, M. Czerwinski, K. Hinckley, K. Risden, D. Thiel, and V. Gorokhovsky. The Task Gallery: a 3D window manager. *Proc. of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '00)*, pp. 494–501, 2000.

[119] D. Larimer and D. A. Bowman. VEWL: a framework for building a windowing interface in a virtual environment. *Proc. of IFIP International Conference on Human-Computer Interaction (INTERACT '03)*, pp. 809–812, 2003.

[120] R. E. Su and B. P. Bailey. Put them where? towards guidelines for positioning large displays in interactive workspaces. *Proc. of IFIP International Conference on Human-Computer Interaction (INTERACT '05)*, pp. 337–349, 2005.