The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	共有空間でのユーザ指向型ディスプレイ環境に関する研究
Author(s)	櫻井, 智史
Citation	大阪大学, 2009, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/587
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

共有空間でのユーザ指向型
ディスプレイ環境に関する研究

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

櫻 井　智 史

研 究 業 績 目 録

I. 学術論文

[1] 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, カールガトウィン, 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.

[2] 櫻井智史, 北村喜文, 伊藤雄一, ミゲルナセンタ, スリラムサブラマニアン, 岸野文郎: 複数のディスプレイをシームレスに利用する環境の構築; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, ウェアラブル・ユビキタス技術の実用展開特集, Vol. 13, No. 4, pp. 451–460, Dec. 2008.

[3] 櫻井智史, 北村喜文, スリラムサブラマニアン, 岸野文郎: 回転偏光フィルタにより情報の可視性を制御するテーブルトップ型ディスプレイ; 情報処理学会論文誌, 日常生活におけるコラボレーション支援技術特集, Vol. 50, No. 1, pp. 332–343, Jan. 2009.

[4] 櫻井智史, 北村喜文, スリラムサブラマニアン, 岸野文郎: 回転する直線偏光板を用いた情報可視性の制御手法; ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 11, No. 1, Feb. 2009. (掲載決定)

II. 国際会議

[1] 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)*, pp. 279–288, ACM Press, Oct. 2007.

[2] 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 15th International Workshop on the Design, Specification and Verification of Interactive Systems (DSV-IS)*, Springer LNCS 5136, pp. 252–266, Jul. 2008.

[3] Satoshi Sakurai, Yoshifumi Kitamura, Sriram Subramanian, and Fumio Kishino: Visibility Control using Revolving Polarizer; *Proceedings of the 3rd Annual IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (TABLETOP)*, pp. 173–180, Oct. 2008.

III. 国内研究会・全国大会

[1] 櫻井智史, 大西克彦, 村上礼繁, 北村喜文, 岸野文郎: 相互干渉を考慮した樹木モデル群のインタラクティブな生成手法に関する一検討; 日本バーチャルリアリティ学会第 9 回大会論文集, pp. 245–248, Sep. 2004.

[2] 池田剛, 櫻井智史, 大西克彦, 北村喜文, 岸野文郎: インタラクティブな気候制御による樹木モデルの生成手法; 電子情報通信学会 2005 年総合大会 情報・システムソサイエティ総合大会特別号, p.45, Mar. 2005.

[3] 櫻井智史, 大西克彦, 村上礼繁, 北村喜文, 岸野文郎: PDA による 2 次元 GUI を用いた 3 次元仮想樹木群生成に関する一検討; 日本バーチャルリアリティ学会第 10 回大会論文集, pp. 85–88, Sep. 2005.

[4] 櫻井智史, 北村喜文, スリラムサブラマニアン, 岸野文郎: 回転偏光フィルタによる情報可視性制御 (1) 〜 原理提案と試作システム構築; ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp. 259–264, Sep. 2007.

[5] 櫻井智史, 北村喜文, スリラムサブラマニアン, 岸野文郎: 回転偏光フィルタによる情報可視性制御 (2) 〜テーブルトップ型試作システムにおけるアプリケーション; ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp. 265–270, Sep. 2007.

[6] 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, カールガトウィン, 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.

[7] 藤原正貴, 山口徳郎, 櫻井智史, 北村喜文, アナトールレクリエル, 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.

[8] 櫻井智史, 伊藤雄一, 北村喜文, ミゲルナセンタ, スリラムサブラマニアン, 岸野文郎: 複数のディスプレイをシームレスに利用するためのミドルウェアの構築; 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, D8-3, Mar. 2008.

[9] 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.

[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, A-15-35, p. 286, Mar. 2008.

[11] 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, D-6-15, p. 88, Mar. 2008.

[12] 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.

[13] 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.

IV. デモンストレーション発表

[1] 村上礼繁, 大西克彦, 櫻井智史, 北村喜文, 岸野文郎: 3 次元ジェスチャを用いた樹木モデルの形状生成システム; インタラクション論文集, pp. 241–242, Mar. 2006.

[2] 櫻井智史, 北村喜文, 浅井和広, 岸野文郎: MysteriousPOND; エンタテインメントコンピューティング 2007 論文集, pp. 273–274, Oct. 2007.

[3] 櫻井智史, 北村喜文, 浅井和広, 岸野文郎: MysteriousPOND; ENTERTAINMENT MEDIA COMPLEX OSAKA, ホテルニューオータニ大阪, Oct. 2007.

[4] 櫻井智史, 北村喜文, 浅井和広, 岸野文郎: MysteriousPOND; 「メディアアートで創る大阪の未来」シンポジウム, 大阪市中央公会堂, Dec. 2007.

[5] 複数ディスプレイのシームレスな統合環境; 技術革新フェア, 大阪産業創造館, Jan. 2008.

[6] 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論文集, pp. 531–534, Sep. 2008.

[7] 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 (SIGGRAPH Asia)*, p. 45, Dec. 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，共有空間でのユーザ指向型ディスプレイ環境に関する研究成果をまとめたものである．

近年，人々が一所に集まって行う話し合いや共同作業は，電子ディスプレイに表示された情報を共有しながら進められることが一般的になりつつある．このような場では，参加者全員にとって有効な共有情報に加えて，特定の利用者やグループのみにとって有効な個人情報を扱う必要がある．しかし，他の利用者に対して個人情報を隠しておきたい場合や，ある利用者の個人情報が他の利用者にとって邪魔な場合もあるため，これらを単純に共有ディスプレイに表示することは不適切なことも多い．そのため，共有情報と個人情報を同時に扱うためのディスプレイや環境が多数提案されている．これらは，特殊な単一のディスプレイを用いる手法と，複数のディスプレイを用いる手法に分類され，状況によって使い分けられる．

特殊な単一のディスプレイを用いる手法は，全員が近くで同じ場所を見て作業することで，身振りなどの非言語情報を有効に使いながら作業できる．また，全ての情報が単一のディスプレイ面上にあるため，情報同士の位置関係がわかりやすい．しかし，従来の手法では，限られた視点位置からディスプレイを見る必要があったり，利用できるディスプレイ面がある一部分に限定されていたりと，制限が大きかった．そこで，本論文ではこれらの制限を無くし，複数人に各々異なる情報を柔軟に提供できる情報提示手法と，それを用いたテーブル型ディスプレイを提案する．

一方，複数のディスプレイを用いる手法では，個人用のディスプレイを他者から見えない位置に配置して利用することで，プライベートな情報を見られる心配なく作業できるようにすることができる．また，ディスプレイを複数利用することで作業領域を広くとることができるので，これらを有効に利用して作業することが期待される．しかし，ディスプレイ同士が物理的に離れていることや，複数のディスプレイがさまざまな位置や向きに配置されていることから，表示情報の把握や操作が直感的にできないことが多い．そのため，いくつかのインタフェースが提案されているが，それらを現実的な環境で利用するためにはさまざまな問題が残っている．そこで，本論文では複数のディスプレイをシームレスに利用できるインタフェースを統合し，既存の一般的なアプリケーションを使って作業

できる環境として実現する手法を提案する．

本論文は，全5章で構成される．

第1章にて序論を述べ，第2章と第3章では，単一のディスプレイ面上を用いて個人情報を扱うディスプレイに注目する．まず，第2章では，単一ディスプレイ面上で，複数人に対して異なる情報を提示する従来の手法の問題点を明確にし，それらを解決するための手法として，回転する直線偏光板を用いた可視性の制御手法を提案する．また，その光学特性を測定し，利用可能性を議論する．次に，第3章では，第2章で提案した手法を応用したテーブルトップ型ディスプレイを提案し，その利用法について述べる．そして，被験者実験を通して情報の見え方を実際に確認し，応用分野や拡張構成を検討する．

第4章では，複数のディスプレイを有効に利用するためのインタフェースについて紹介し，これらを統合したシームレスな複数ディスプレイ環境について述べる．さらに，既存の一般的なアプリケーションを利用できる現実的な作業空間として実現するために必要な要件を議論し，アーキテクチャやデータフローなどを含めた総合的な実現手法を提案する．そして，実装した環境のパフォーマンスを測定し，設計の妥当性や拡張性を検討した結果について述べる．

最後に第5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 共有情報と個人情報を併用できる環境 3

1.2.1 情報の可視性を制御できる単一のディスプレイを用いる手法 4

1.2.2 複数のディスプレイを利用する手法 5

1.3 本論文の構成 6

2 回転する直線偏光板を用いた情報可視性制御 **7**

2.1 まえがき 7

2.2 関連研究 8

2.3 提案手法の原理 11

2.4 試作および輝度特性測定 13

2.4.1 試作装置の実装 13

2.4.2 輝度特性の測定 15

2.4.3 測定結果 16

2.5 外乱を用いた情報漏れの隠蔽手法 19

2.5.1 輝度特性と情報可視性 19

2.5.2 外乱の重畳 20

2.6 考察 22

2.6.1 テーブル型ディスプレイへの適用 22

2.6.2 応用構成の検討 23

2.6.3 応用分野の検討 25

2.6.4 壁型ディスプレイへの適用 26

2.7 むすび 26

3 利用者ごとに異なる情報を与えるテーブル型ディスプレイ 27

3.1 まえがき 27
3.2 関連研究 28
3.3 提案ディスプレイ概要 31
3.4 複数の利用者への情報提示例 32
3.4.1 特定の利用者に対する情報の開示と隠蔽の制御 32
3.4.2 特定利用者に対する情報分類の可視化 36
3.5 情報の隠蔽性の検証 40
3.5.1 輝度減衰を用いた情報隠蔽 40
3.5.2 外乱画像を用いた情報隠蔽 42
3.6 考察 42
3.6.1 実験結果 42
3.6.2 応用 45
3.6.3 構成の拡張 51
3.7 むすび 54

4 複数のディスプレイをシームレスに統合利用する環境 57

4.1 まえがき 57
4.2 関連研究 58
4.3 サーバクライアント型のアーキテクチャ 62
4.3.1 アーキテクチャの検討 63
4.3.2 通信方式の検討 64
4.4 3 次元空間上での GUI オブジェクトの管理 65
4.4.1 複数ディスプレイ上でのシームレスな情報表示 66
4.4.2 複数ディスプレイ上でのシームレスな操作 70
4.5 試作環境 72
4.5.1 実装 72
4.5.2 実行例 73
4.5.3 レスポンス時間の測定 74

4.5.4 処理負荷の測定 77
4.6 考察 80
4.6.1 遅延の影響 80
4.6.2 各コンポーネントでの処理負荷 82
4.6.3 アーキテクチャの拡張 83
4.6.4 インタフェースの拡張 84
4.6.5 ユーザビリティ 84
4.6.6 各利用者に対する最適な情報提示の実現 85
4.7 むすび 85

5 結論 **87**

謝辞 **91**

参考文献 **93**

第1章

序論

1.1 研究の背景

人は日常的に他人とコミュニケーションを取りながら生活している．コミュニケーションには多様な形態があり，声や表情だけで感情を伝えるプリミティブなものから，会議のように高度な知能活動を必要とするものまで，社会の発展と共にさまざまな形態が生み出されてきた．これらには，参加者が対等に意見を出して行う議論や，個人ないしは少数人のグループが多人数に対して情報を伝達するプレゼンテーション，複数人が協力して何らかの目的を達する協調作業，参加者間でスコアを競い合うゲームなどがある．さらには，これらが組み合わされることや，流動的に移り変わることもある．

このように，コミュニケーションは非常に複雑かつ高度になっているが，いずれの場合にも，参加者は共通認識となる情報を共有することが重要である．これらの情報には，議論で問題としている対象や結果のアイデアなどが含まれる．しかしながら，高度なコミュニケーションでは扱われる情報量が多いことに対して，人間が作業をする際に利用できる作業記憶の量は多くはない [1,2] ため，それらの情報を何らかの媒体に記録して表示する必要がある．そのため，コミュニケーションの場においては，壁や机の上などの全員が見える場所に，黒板や紙，カードなどのさまざまな媒体を配置して利用することが一般に行われてきた．複数人が同じ情報を見ることの必要性は，WYSIWIS(What You See Is What I See) として，コンピュータを用いたグループウェアに必要な要素ともなっている [3].

また，複数人でのコミュニケーションでは，ネゴシエーションやゲームのように相手と

利害関係があるものも多い．このような状況では，共通認識となる情報を全員が同様に共有するだけでなく，ある特定の利用者やグループのみに保有され，他の利用者に対しては隠されるべき情報を扱う必要がある．さらに，他の利用者に見られても良い情報であっても，相手にとって邪魔になるものもある．例えば，個人的なメモを黒板などの共有の領域に書き込んでしまうと，それらは他の利用者にとっては無意味で紛らわしい情報となる．そのため，これらの情報は共有の領域から切り離し，個人的なノートなどに記録して用いられることが多い．なお，本論文では，これら他人に見られたくない情報や見せない方が良い情報を個人情報と呼び，全利用者に対して有益であり，観察されるべき情報を共有情報と呼ぶこととする．すなわち，高度なコミュニケーションでは，共有情報と個人情報が必要に応じて記録され，表示されながら進行していくと言える．

コミュニケーションの多様化と高度化に伴い，情報を記録して表示する道具も歴史と共に進歩してきた．中でも，19 世紀末に発明されたブラウン管から始まった電子ディスプレイは，高速な表示情報の切り替えを可能にし，アニメーションも利用できるようにした．また，1940 年代に発明されたコンピュータと組み合わせて利用することにより，1970 年代には表示情報に対して利用者がインタラクションを行う事が可能となった [4]．そのため，これらの情報記録と表示能力をコミュニケーション支援に用いる研究がなされ始めた．

初期のコミュニケーション支援環境として，共有情報を利用するための大画面スクリーンと，各利用者用の個人情報用にワークステーションを備えた電子会議室 (Colab [5]，CO-GENT [6] など) が提案された．さらに，コンピュータやディスプレイの低価格化や高性能化に伴い，より自由度の高い環境が実現されている．例えば，個人用のコンピュータがより小型化されたことで，各利用者が個人用のディスプレイを持って自由に動き回れるもの [7] や，複数の共有ディスプレイを含み，テーブル型や壁型，ノート PC(Personal Compuer) といったさまざまなディスプレイを組み合わせた環境 [8] などが提案されている．

一方で，大型のプラズマディスプレイ (PDP: Plasma Display Panel) や液晶ディスプレイ (LCD: Liquid Crystal Display) などが低価格化によって普及してきており，複数のディスプレイの代わりに 1 つの大画面のみを用いてコミュニケーションを行う研究も多くなされている．これらは，利用者同士が常に同じディスプレイを見ているため，アイコンタクトやジェスチャによる意思疎通を図りやすいといったメリットがあり，他の利用者に隠すべき情報が少ない協調作業に多く用いられている．例えば，壁に設置した大画面ディスプレイを用いたものとして，複数人からの同時アクセスや容易な情報交換を行えるシス

テム [9] や，RFID(Radio Frequency IDentification) を用いて利用者を判別できるシステム [10] などが提案されている．また，利用者の立ち位置を計測し，利用者がディスプレイに接近したときに個人情報を表示するシステム [11,12] も提案されている．さらに，このような共有ディスプレイを用いたグループウェアの設計指針に関する研究 [13,14] もなされており，利用者が一所に集まって行う協調作業などに利用されている．

近年では，壁型のディスプレイだけでなく，利用者同士が対面して対等な位置で話し合いを行えることなどから，テーブル型の共有ディスプレイも注目を集めている [15]．そのため，多くのテーブル型システムが提案されており [16–25]，これらを利用する利用者の認知や振る舞いに関する調査 [26–29] もなされている．さらには，システム設計やビジュアライゼーションのガイドライン [30–33] や，開発用のツールキット [34] なども提案されている．

このような環境では，複数人が同時に同一のディスプレイに対してインタラクションするため，入力インタフェースに関する研究も数多くなされている．例えば，ソフトウェアに関して，複数のデバイスからの同時入力に対応するためのフレームワークが検討されている [35]．ハードウェアに関しては，単純に人数分のマウスやキーボードをコンピュータに接続することも考えられるが，近年は複数人からの入力を同時に検出できるマルチタッチディスプレイ [20,36–42] やタンジブルインタフェース [43,44] が注目されている．これらは，操作対象に直接触れることで，直感的にインタラクションできることや，利用者同士がお互いの入力動作を直接見られることから，協調作業に必要なアウェアネス情報を持つため有効である．

このように，1 つの大画面を用いて作業を行う環境では，多くのディスプレイとコンピュータを配した環境とは異なる部分でメリットがある．ただし，通常のディスプレイでは個人情報を扱うことができないため，表示した情報の可視性を制御したり，ディスプレイ面のうち各利用者から見える領域を制限したりすることで，単一のディスプレイ面を用いながらも個人情報を扱うことができるようになってきている．

1.2 共有情報と個人情報を併用できる環境

前節で述べたように，複数人で行うコミュニケーションには，全利用者にとって有益な共有情報に加えて，特定の利用者やグループにのみ有効な個人情報を必要とするものが多

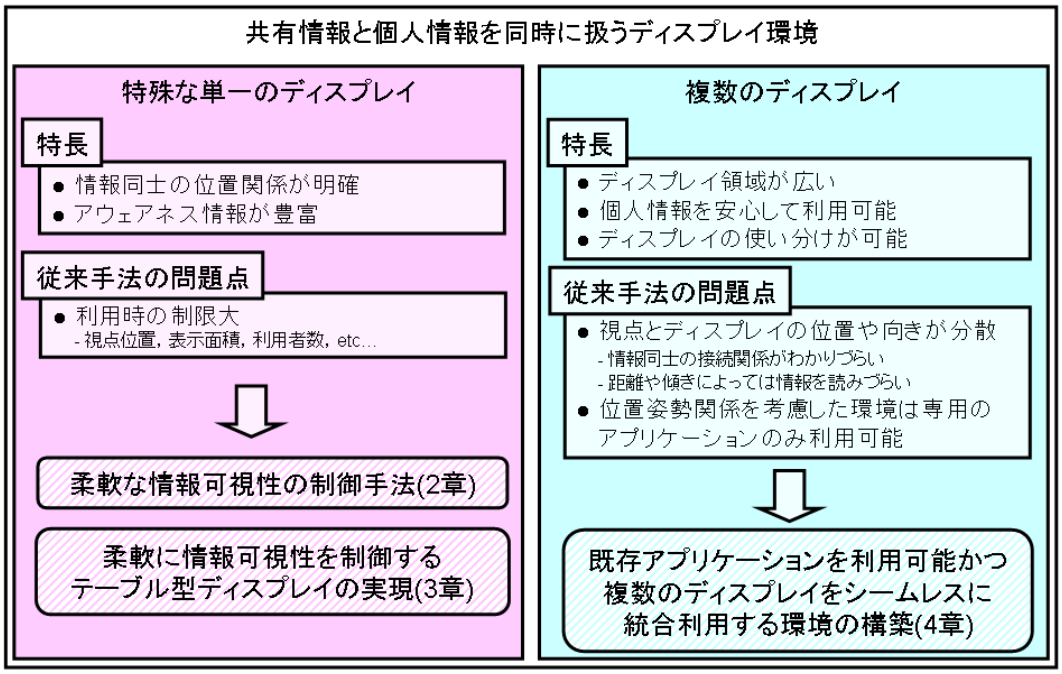


図 1.1: 本研究が対象とする問題と提案内容の位置づけ

い．そのため，これらの情報を同時に扱うことができるシステムや手法が多く提案されている．各々の詳細については 2 章，3 章，4 章の関連研究に関する節で述べるが，これらは大きく分けて 2 つのカテゴリに分類される．一方は特殊な単一のディスプレイを用いる手法であり，他方は複数のディスプレイを利用する手法である．前者のカテゴリは，単一のディスプレイ面のみを用いながらも，複数の利用者に対して異なる情報を提供するものである．また，後者のカテゴリは，共有のディスプレイに加え，個人用のディスプレイなどを併用することで，共有情報と個人情報を各ディスプレイに割り当てる．両カテゴリの手法には，各々の長所があり，状況に合わせて使い分けられる．以下，各々の手法の特徴と従来の手法の問題点を述べ，本論文が対象とする問題を明確にする．図 1.1 は本研究が対象とする領域と従来の手法の問題点，提案内容の位置づけを示している．

1.2.1 情報の可視性を制御できる単一のディスプレイを用いる手法

単一のディスプレイ面を用いながらも，複数の利用者に対して異なる情報を提示できる手法やディスプレイがいくつか提案されている (例えば，[45–48])．これらは，特殊な光学

特性を持つディスプレイ面や眼鏡などを用いることで，各利用者に対する表示情報の可視性を変化させることや，マスクによってディスプレイの一部分を遮ることで，一部の利用者のみが観察できる領域を作り出すことで実現される．そのため，これらの手法では，全ての情報を1つのディスプレイ上に表示しておくことができ，情報同士の位置関係が重要な場合には特に有効である．例えば，地図や絵の一部を特定の利用者に対して隠したい場合は，その部分を別のディスプレイなどに移動してしまうと，位置関係がわかりづらくなる．これに対して，該当部の可視性を変化させ，その利用者に対してのみ見えなくできれば，情報を移動させる必要が無く，情報間の位置関係が保たれる．また，ディスプレイ面が1つであるため，全利用者がディスプレイに対して手の届く範囲に集まることができ，直接タッチやタンジブルなインタフェースを有効に活用できる．

しかし，従来のシステムでは，利用者の視点が移動できる範囲や，利用できるディスプレイ領域などにさまざまな制限がある．そのため，これらの制限が無く，可視性をフレキシブルに制御できるディスプレイが求められている．

1.2.2 複数のディスプレイを利用する手法

一方，共有情報を表示するためのディスプレイに加えて，個人情報を表示するためのディスプレイを併用する手法も提案されている ([6,7,49,50] など)．これらの手法では，各利用者は個人情報を表示するディスプレイを他の利用者から見えない位置で利用することで，他の利用者に対して個人情報を確実に隠し，機密度の高い情報を安心して扱うことができる．また，複数のディスプレイを用いることによって，作業領域を広くとることができる．さらに，壁型やテーブル型，モバイル型など，さまざまな形態のディスプレイを用途ごとに使い分けることもできる．

しかし，ディスプレイごとにマウスやキーボードなどのインタフェースを用意する必要があり，異なるディスプレイを操作する際にはこれらを持ち替える必要がある．また，利用者に対してディスプレイがさまざまな位置や向きにあるため，同じ情報が違うものに見えたり，ディスプレイ同士の接続関係を把握しづらいといった問題がある．そうした問題を解決するため，いくつかのインタフェースが提案されているが，これらを既存の一般的なアプリケーションに対して適用し，実際に利用できる環境として実現するには多くの問題が残されている．そのため，これらを統合し，実際に作業を行える環境として実現する必要がある．

1.3 本論文の構成

本論文は，全 5 章で構成される．

第 2 章，第 3 章では，利用者ごとに異なる情報を提示する手法の 1 つとして，単一のディスプレイ面上で情報の可視性を制御するディスプレイに注目する．

第 2 章では，単一ディスプレイ面上で異なる情報を提示する従来の手法を紹介し，それらの問題点を明確に述べる．そして，解決するための手法として，回転する直線偏光板による可視性の制御手法を提案する．また，その光学特性を測定し，利用可能性を検討する．

第 3 章では，第 2 章で提案した手法を応用したテーブル型ディスプレイを提案し，その利用法について述べる．また，被験者実験を通して情報の見え方を実際に確認し，応用分野や拡張構成を議論する．

第 4 章では，複数の利用者に異なる情報を与えるもう 1 つの手法として，複数のディスプレイを用いる手法に注目し，従来の研究を紹介する．そして，これらを統合し，利用者が現実的な作業を行える環境として，シームレスな複数ディスプレイ環境について述べる．さらに，これを実現するためのアーキテクチャやデータフローなどを議論し，総合的な実現手法として提案する．そして，実装した環境のパフォーマンスを測定し，設計の妥当性や拡張性を検討した結果について述べる．

最後に第 5 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 2 章では文献 [51–53] で公表した結果に基づいて論述し，第 3 章では文献 [54–56] で公表した結果に基づき論述する．第 5 章は文献 [57–59] で公表した結果に基づき論述する．

第2章

回転する直線偏光板を用いた情報可視性制御

1.2 節で述べたように，全利用者にとって有用な共有情報に加え，特定の個人やグループのみに有効な個人情報を同時に用いるための手法として，特殊な単一のディスプレイ面を用い，各利用者に対する表示情報の可視性を制御する手法がある．ただし，本論文において,「情報の可視性」とは，可視または不可視の 2 値のみだけでなく，輝度などに応じて連続的に変化する情報の見え方を表すこととする．本章では，このようなディスプレイを実現する手法について注目し，従来の手法とその問題点について述べる．そして，それら問題点を解決するため，回転する直線偏光板を用いて情報の可視性を制御する手法を提案し，その応用可能性などについて議論した結果について述べる [51–53]．なお，現実的なディスプレイ装置としての実現は 3 章で行う．

2.1 まえがき

複数人が同一場所に集まり，大画面ディスプレイなどを見ながら協力して作業を進める機会が増えている．このような場では，ディスプレイに表示された情報に加え，言葉やジェスチャ，アイコンタクトなどを他の利用者と直接交わしながら話し合うことで，効率的に作業を進めることができる．

そのため，協調作業の場で参加者全員に共有されるディスプレイについては，利用者ごとのタスクや注目対象に応じた適切な情報の提示や，所有権などに応じた明示的な情報

分類など，さまざまな要求を満たすための情報表示法に関する研究が多数行われている．しかし，一般のディスプレイ装置に表示された情報は，全利用者から同様に観察されるため，一部の情報を特定の利用者のみに強調して提示することや，ある利用者に提示している情報を他の利用者に隠すことが要求された場合に対応することが難しい．そのため，共有されたディスプレイ上において，利用者ごとに異なる可視性で情報を提供できれば，これらの要求を満たす強力なインタフェースを構築できると考えられる．これまでにもいくつかの先行研究があるが，利用者の視点が固定されたり，情報の可視と不可視の 2 状態を切り替えるだけであったりと，柔軟性に乏しかった．また，これらの 2 状態だけでなく，情報の部分ごとに輝度や彩度，シャープネスなどの連続的な値を用いて利用者ごとの可視性を制御できれば，重要な部分だけを特定の利用者だけに強調して提示するといった利用法も実現でき，より柔軟なインタフェースとなりうると考えられる．

そこで本章では，回転する直線偏光板を用いて，スクリーン上に投影された情報の観察輝度を視点位置などに応じて変化させ，各利用者に対する可視性を制御する手法を提案する．また，提案手法から試作したディスプレイ装置の輝度特性を測定することで原理の有効性を確認し，実際の光学特性と原理との誤差から生じる問題の解決法も提案する．そして，より効果的な拡張構成やその可能性などについて検討する．

2.2 関連研究

本節では，単一のディスプレイ面を用い，観察条件に応じて複数の利用者にそれぞれ異なる情報を提示する従来の手法を紹介し，その問題点について議論する．図 2.1 に示す Lumisight [45] は，ルミスティーと呼ばれる視界制御フィルムをスクリーンとして用い，複数の方向から映像を投影することで，異なる方角から観察する複数の利用者に対して，それぞれ異なる映像を同時に提示できる．また，デュアルビュー液晶や図 2.2 に示すトリプルビュー液晶 [60] は，視差バリアを液晶画面の前方に置き，異なる方向から観察する複数の利用者に異なるピクセルを観察させることで，それぞれ異なる情報を提示することができる．しかし，これらの手法では，利用者はあらかじめ決められた視点位置からディスプレイを見る必要があり，視点位置が動くと，他の利用者の情報が重なって視認されてしまう．プライバシーフィルタ [61] は，マイクロルーバーと呼ばれる微細な立て板構造を用い，ディスプレイを正面から観察した時と斜めから観察した時の可視性を切り替えてい

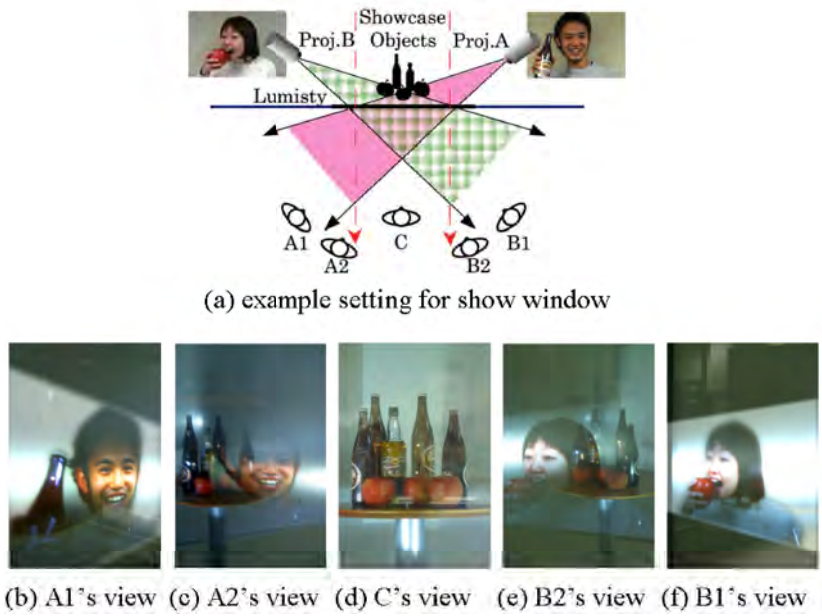


図 2.1: Lumisight [45]

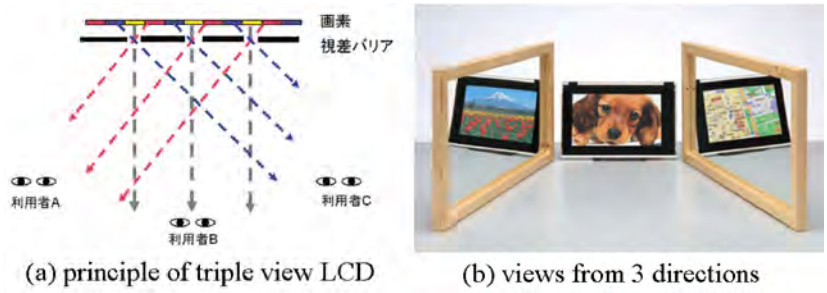


図 2.2: トリプルビュー液晶 [60]

ると言えるが，斜めから観察する利用者に対して情報を提示することができない．

視点を固定せずに利用できるシステムとして，図 2.3 に示す手法 [62] では，再帰性反射フィルムで覆われた面に頭部装着型プロジェクタから情報を投影する．これにより，各利用者は，自身の頭部に設置したプロジェクタから投影された映像のみを観察できることになるが，利用者の頭部への負担が大きい．pico projector [63] などの小型のプロジェクタも近年は提案されているが，電力供給のため有線となってしまう．また，ディスプレイの上方に穴の開いたマスクを設置することで，複数の利用者にディスプレイの異なる部分を観察させるシステム [47] も提案されているが，利用できるディスプレイ領域は広くない．

他にも，図 2.4 に示すシステムなどでは，ディスプレイが高速に情報を切り替えて表示

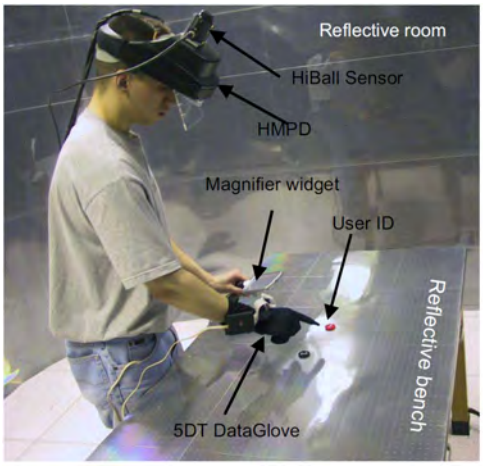


図 2.3: 再帰性反射フィルムと頭部装着型プロジェクタを用いた可視性の制御 [62]

(a) system in use (b) observed image

図 2.4: 液晶シャッタ眼鏡を利用した可視性の制御

し，それに同期して開閉するシャッタ眼鏡を用いて，利用者が観察できる情報を制御する [48,64]．しかし，これらは眼鏡が比較的重いことや，同期信号を遮断されやすいことなどが問題となる．赤外線プロジェクタや高速プロジェクタを用いて人間の目には視認できない情報を表示し，カメラなどを通して観察するシステム [65,66] も提案されているが，これらの機器を手に持って観る必要があるため手間がかかる．

これら従来の手法には，利用者の視点位置や，ディスプレイ面の利用可能な領域，情報を視認するための条件などに制限があることがわかる．これを解決するため，本章では回転する偏光板によって情報の可視性を制御する手法を提案する．なお，過去にも左右の目に視差画像を与えるため [67] や，テーブル上でオブジェクト認識の精度を上げるため [68,69] にも偏光は利用されている．また，偏光で映像を表示し，偏光眼鏡などを通し

た場合のみ映像を観察できるシステム [70, 71] も提案されているが，利用者ごとに異なる可視性を与えるためには利用されておらず，システムが回転機構によって動的に可視性を制御するものはまだ無い．

2.3 提案手法の原理

本節では，ディスプレイ面の全体を用い，任意の視点位置からディスプレイを観察する複数の利用者に対して，異なる可視性で情報を提示できる手法を提案する．

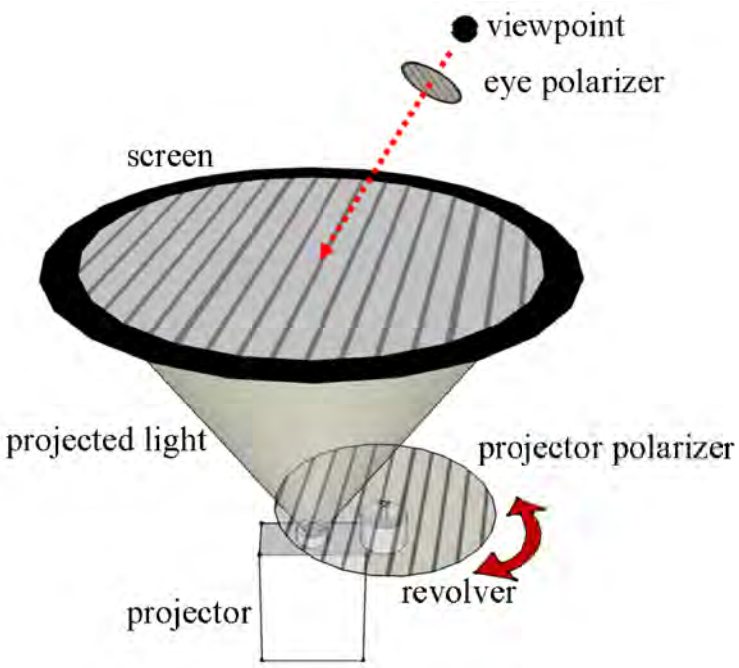


図 2.5: 提案手法の原理

まず，図 2.5 のように，プロジェクタの前方に，投光方向に対して垂直となるように直線偏光板を設置し，これをプロジェクタ偏光板とする．さらに，プロジェクタの投光方向を軸として，回転角度を任意に制御できる回転機構をプロジェクタ偏光板に取り付ける．そして，投影光の偏光特性が変化しないスクリーンを用意し，プロジェクタからプロジェクタ偏光板を通して情報を投影する．なお，図 2.5 では，偏光板および投影光の偏光軸をストライプとして表示しているが，実際には人間の目で認識されることはない．ここで，

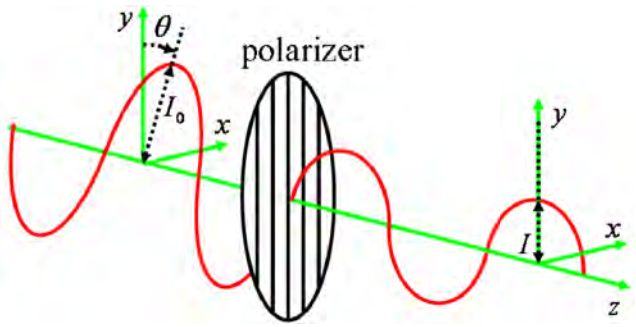
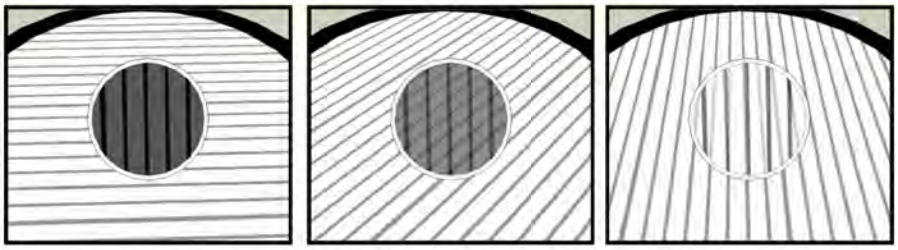


図 2.6: マリュスの法則



(a) $\theta = 90$ deg (b) $\theta = 45$ deg (c) $\theta = 0$ deg

図 2.7: 投影情報と視点偏光板の偏光軸の相対角度に応じた輝度変化のイメージ

スクリーンと視点の間に新たな直線偏光板を設け，視点偏光板とする．この際，視点から観察される投影情報の輝度は，投影情報と視点偏光板の偏光軸の相対角度 θ に応じて変化する．

一般に，図 2.6 のように光の進行方向に対して垂直な偏光軸 (図 2.6 では y 軸方向) を持つ理想的な直線偏光板に対し，θ 傾いた偏光が輝度 I_0 で入射した際，偏光板を通過した偏光の輝度 I は，

$$I = I_0 cos^2\theta \tag{2.1}$$

という式で与えられる．これはマリュスの法則 [72] として知られている．提案手法においても，プロジェクタから投光された情報の輝度は，プロジェクタ偏光板と視点偏光板を通過する際に，それぞれ (2.1) 式に従う．図 2.7 は提案手法を用いて均一な白色光を投影した際に，各画像中央に置かれた視点偏光板と投影光の偏光軸の相対角度 θ に応じて，観察輝度が変化する様子のイメージ図である．理論的には，投影される光は $\theta = 90\ deg$ のときに，視点偏光板により図 2.7(a) のように遮断され，$\theta = 0\ deg$ では図 2.7(c) のように完全に透過することとなる．そのため，視点偏光板を通過する投影情報の輝度は，プロジェ

クタ偏光板を回転させることにより，任意に制御することができる．または，逆に視点偏光板を回転させても同様の効果を得ることができる．

2.4 試作および輝度特性測定

提案手法では，2 枚の偏光板の相対角度が観察輝度を決定するため，複数の利用者に異なる輝度で情報を提供するためには，この相対角度を利用者ごとに異なるようにする必要がある．そこで，その実現手法の 1 つとして，提案手法をテーブル型ディスプレイに適用した装置を試作する．テーブルを囲んで立つ数人の利用者を想定すると，テーブル面に投影された情報の偏光軸が，スクリーンに対する利用者の視点位置によって異なるため，本提案手法の理想的な設置形態の 1 つであると言える．たとえば，眼鏡などの形態で実装された視点偏光板を装着した 2 人の利用者がいる場合に，どちらか 1 人に対して投影情報の観察輝度を低くすることで，その利用者に情報を隠しつつ，もう一方の利用者には高い輝度で情報を提示するといった表示法を実現できると考えられる．ただし，ディスプレイ面における偏光の崩れなどから，実際に観察される輝度は理論上の値との誤差があると考えられるため，情報隠蔽などの妨げとなる可能性がある．そこで，テーブル型ディスプレイを試作し，実際の輝度特性を測定する．

2.4.1 試作装置の実装

輝度測定のため試作したディスプレイの構成とプロジェクタ周辺の写真を図 2.8 および図 2.9 に示す．本試作ディスプレイは，水平に設置したプロジェクタから PC で生成された映像情報を投光し，プロジェクタ偏光板を通過させた後，鏡で反射させて水平面上に設置した透過型スクリーンに投影する．床面からスクリーン面までの高さは 900 mm であり，スクリーンサイズは $1,200\ mm \times 900\ mm$ である．また，モータドライバが PC からの制御信号を受け取ってモータの回転を制御し，プロジェクタ偏光板を回転させることで，投影情報の偏光軸を制御する．

プロジェクタは東芝製 TDP-TW350(J) (光出力: $3,500\ lumen$，解像度: $1,600 \times 1,200\ pixels$）を用い，スクリーンは偏光による立体視に一般的に利用される Stewart 社製 Techplex 200 を用いる．そして，モータには 2 相ユニポーラ方式，単位角度 7.5 deg のステッピングモータを用い，モータドライバと PC の通信には RS232C を利用する．また，プロ

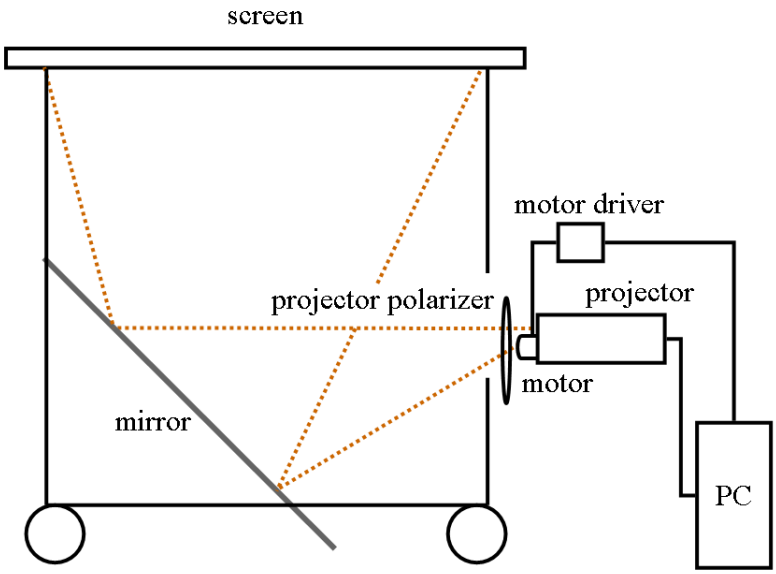


図 2.8: 試作ディスプレイの構成

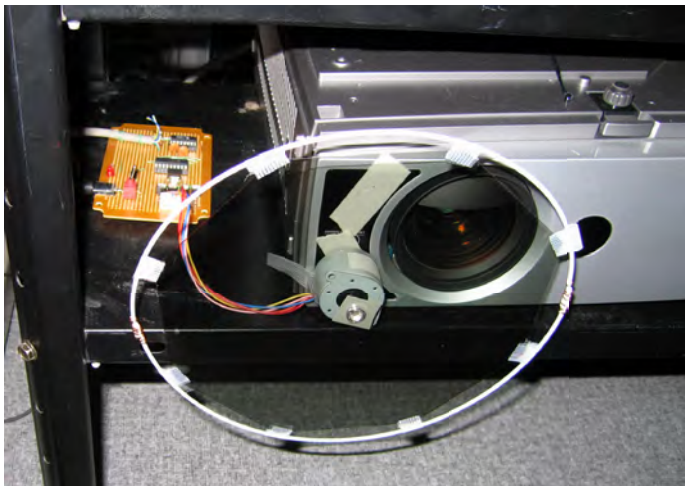


図 2.9: プロジェクタ周辺部

ジェクタ偏光板および視点偏光板には，共に LN-1804P(単体平均透過率: 38.00 ± 2.5%, 偏光度: 95.0% 以上 (実測値は 99.9% 以上)) を用いる．

2.4.2 輝度特性の測定

試作ディスプレイ上で実際に表示される情報の輝度特性を測定するため，スクリーン中心部に均一な白色円を投影する．そして，プロジェクタ偏光板によって決定される白色円の偏光軸と，視点偏光板の偏光軸の相対角度に応じた観察輝度の変化を，次の 2 つの条件で測定する．

1. プロジェクタ偏光板を固定して白色円の偏光軸を固定し，観察方位を変化させる場合
2. 観察方位を固定し，プロジェクタ偏光板を回転させて白色円の偏光軸を変化させる場合

なお，観察方位とは，白色円中心から観察位置への方位を指すものとする．

図 2.10(a) は条件 1 での測定における機器配置を鉛直上方から描いた図である．白色円の偏光軸は x 軸方向とし，視点偏光板の偏光軸は鉛直方向とする．そして図 2.10(c) に示すように，ディスプレイ面から高さ 700 mm（地面から 1,600 mm），白色円の中心から上方へ 45 deg の位置に色彩輝度計 (コニカミノルタ製 CS-100A) を設置し，白色円の中心の輝度を測定する．これは，平均的な身長の日本人がディスプレイ長辺の端から立位でスクリーン中心を観察する時の目の高さと角度にほぼ一致する．

以上の環境で，y 軸と観察方位との角度差 α を 15 deg ごとに変化させながら，視点偏光板を設置した場合の観察輝度 $I_{filter}(\alpha)$ と，設置しない場合の観察輝度 $I_{nofilter}(\alpha)$ を測定する．そして，その比率を

$$r = \frac{I_{filter}(\alpha)}{I_{nofilter}(\alpha)} \tag{2.2}$$

として算出する．この時，$\alpha - 90$ は (2.1) 式における θ に相当し，理想的には，

$$r = cos^2(\alpha - 90) \tag{2.3}$$

となる．

条件 2 では，図 2.10(b) に示すように観察方位を y 軸方向とし，プロジェクタ偏光板によって決定される白色円の偏光軸と x 軸との相対角度 β を 15 deg ごとに変化させて測定

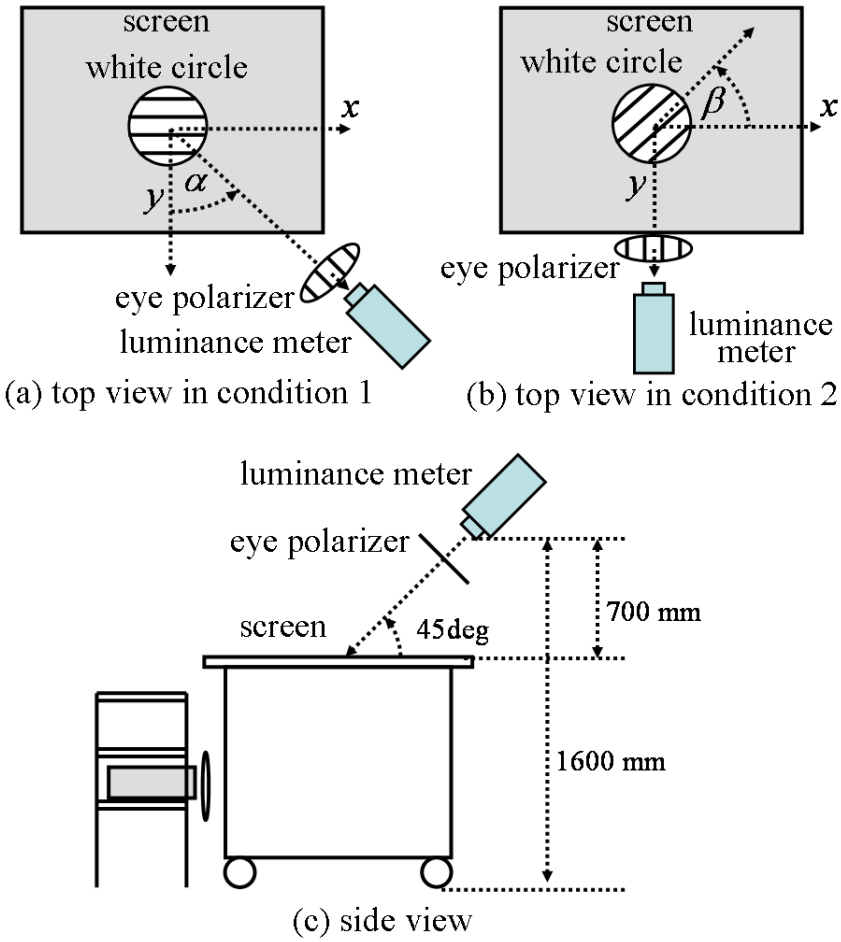


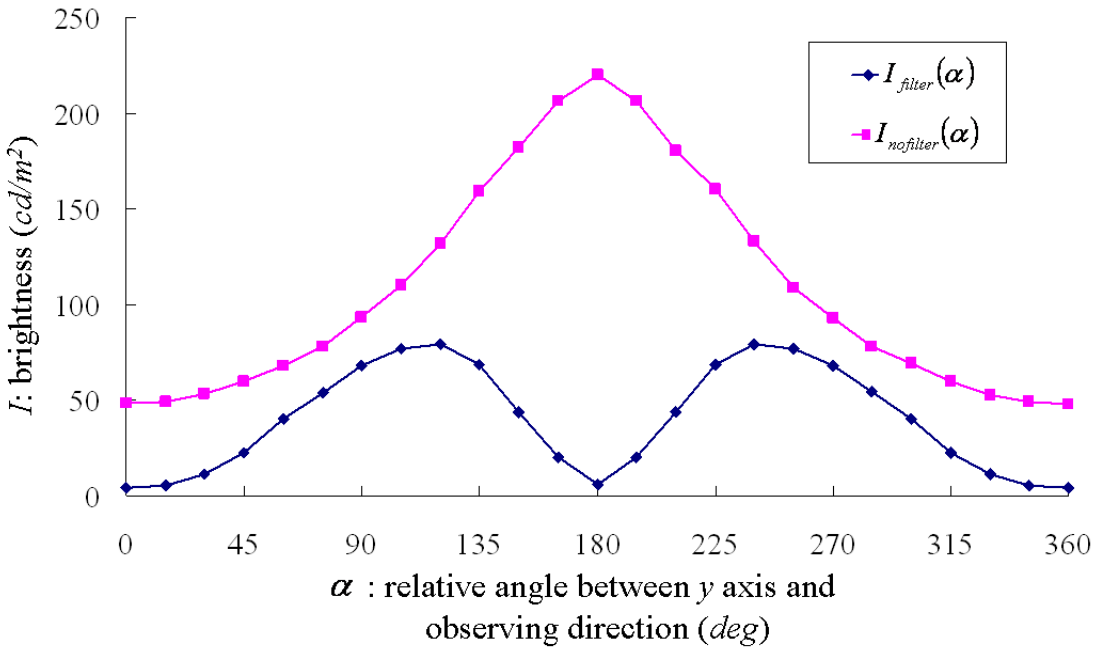
図 2.10: 測定時における機器配置

する．色彩輝度計の高さと向き，および視点偏光板の向きは，条件 1 での測定時と同様である．輝度比率 r は，(2.2) 式の α を β と置き換えて算出する．

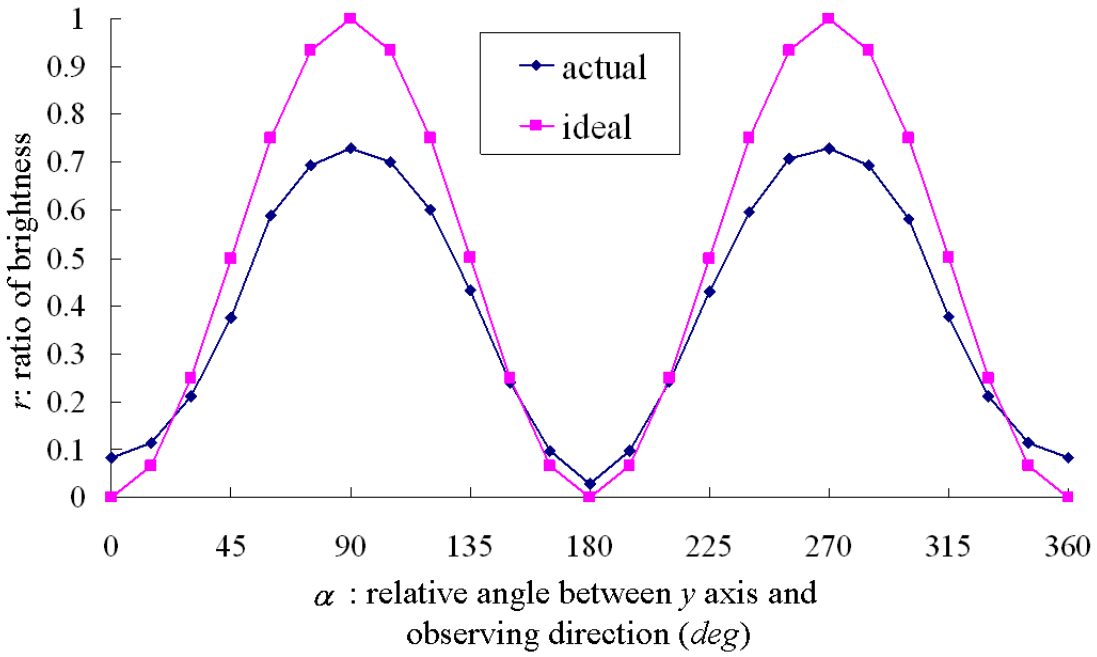
2.4.3 測定結果

測定結果を図 2.11 および図 2.12 に示す．図 2.11(a) は条件 1 における α と輝度 I の関係を表し，図 2.11(b) は α と輝度比率 r の関係を表している．また，図 2.12(a)(b) は条件 2 における β と輝度 I および輝度比率 r の関係を表している．

また，これらの結果を視覚的に確認するため，α および β をそれぞれ 0 deg，45 deg，90 deg とした条件でスクリーンに画像を投影し，カメラで視点偏光板を通して撮影した

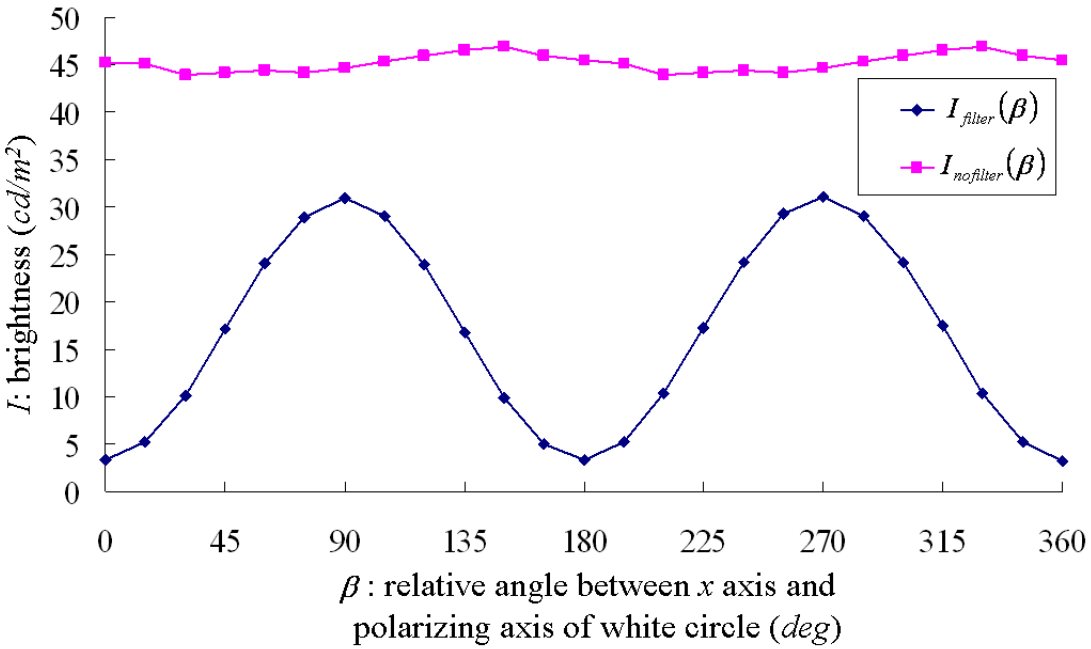


(a) α and I

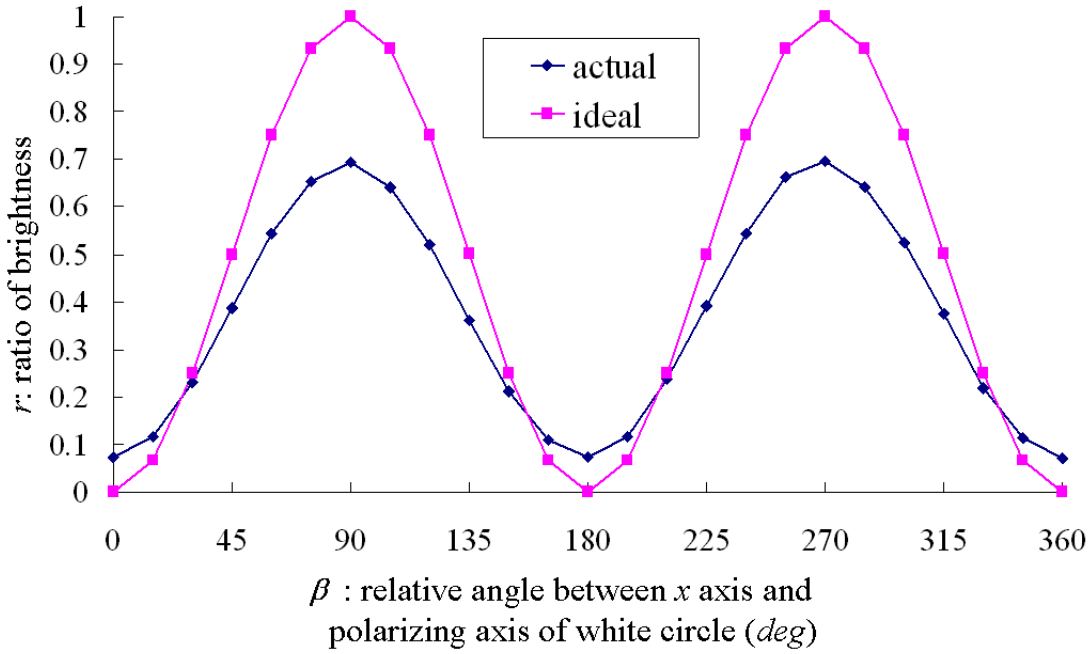


(b) α and r

図 2.11: α に対する輝度 I および輝度比率 r



(a) β and I



(b) β and r

図 2.12: β に対する輝度 I および輝度比率 r

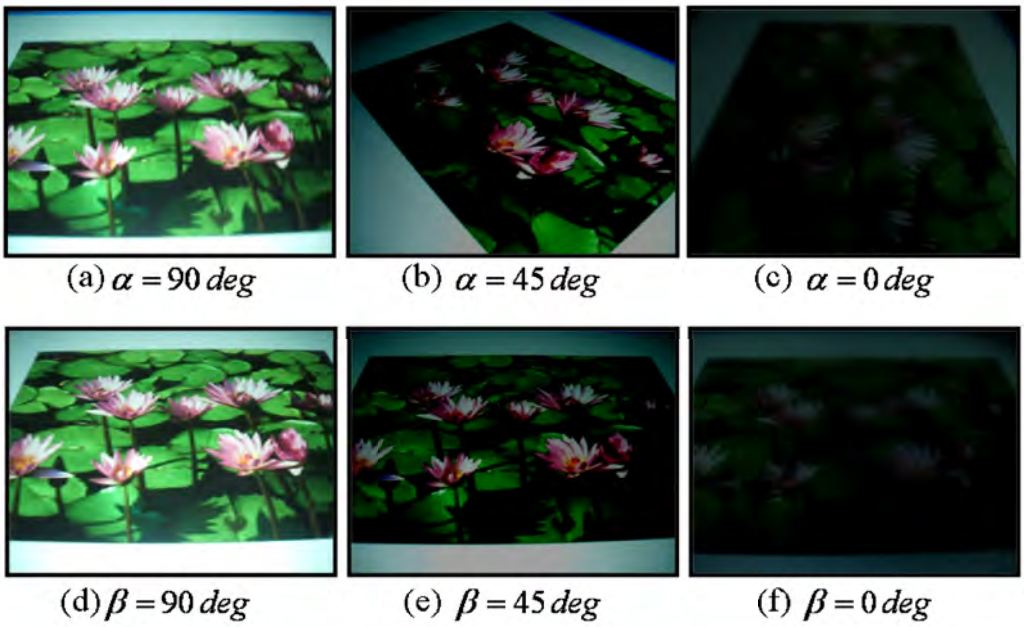


図 2.13: 画像を投影した際の α および β と観察画像

結果を図 2.13 に示す．なお，本論文においてスクリーンを撮影した写真は，すべて実際に人間が目でスクリーンを観察した見え方に近くなるように，カメラの感度や露出などを設定して撮影したものである．

2.5 外乱を用いた情報漏れの隠蔽手法

本節では，前節で実現した試作ディスプレイの輝度特性を測定した結果と，原理との誤差による問題について述べ，その解決方法を提案する．

2.5.1 輝度特性と情報可視性

図 2.11(b) と図 2.12(b) から，投影光が視点偏光板を通過する際の輝度の変化は，ほぼ (2.1) 式に即した正弦的な形状となっていることがわかる．ただし，理想的な値と完全には一致しておらず，誤差が確認できる．たとえば，α，$\beta = 0\ deg$ である図 2.13(c)(f) の画像においても，理論上は投影情報が完全に遮断されるが，画像が微かに漏れて観察さ

れることがある．α，$\beta = 0,\ 180\ deg$ において，最小値が 0.0 とならず　0.070 から 0.075 となっている原因を確認するため，プロジェクタ偏光板を外してスクリーン面上に置き，$\alpha = 0\ deg$ かつ $\beta = 0\ deg$ として前節と同様の測定を行った．その結果，視点偏光板が無い場合の輝度 $I = 45.5\ cd/m^2$，ある場合の輝度 $I = 0.23\ cd/m^2$ であり，輝度比率 $r = 0.0051$ であった．このことから，前節の実験において，投影光の偏光がスクリーン面で部分的に崩れ，視点偏光板を通過していたことが原因と考えられる．一方，α，$\beta = 90,\ 270\ deg$ において，最大値が 1.0 とならず 0.69 から 0.70 となっている原因として，投影光が視点偏光板を通過する際に α や β に依らず一定の割合で減衰をしていることが考えられる．理想的な偏光板の単体透過率である 50% に対して，利用した偏光板の単体透過率は約 38% であることから，偏光板に対して偏光軸が平行な光も約 76% に減衰すると考えられる．加えて，スクリーン面での偏光崩れも考慮すると実測値にほぼ一致する．観察輝度の減衰効果を利用して，特定の利用者に情報を隠蔽することができれば，協調作業などの場において個人情報を利用する際に有効と考えられるため，α，$\beta = 0\ deg$ の状態における誤差は特に重要であり，適切に対処しなければならない．そこで，投影した映像に外乱を重畳することで，減衰した映像を隠蔽することを提案する．

2.5.2 外乱の重畳

2.3 節で提案した手法を実際に用いる環境では，室内照明や壁面での拡散反射などが外乱としてスクリーンに入射することが多いため，輝度比率が理論値である 0.0 とならなくとも隠蔽は可能である．図 2.14 は視点偏光板によって減衰した画像に対する室内照明の影響を示している．図 2.14(a) は投影する画像であり，図 2.14(b)(c) は $\theta = 90\ deg$ となる条件下で，それぞれ通常の室内照明を消灯および点灯した状態で，視点偏光板を通してスクリーンを撮影した写真である．なお，室内照明によるスクリーンの輝度は 20 cd/m^2 程度であった．ここでは，輝度が低くなった場合でもエッジを観察しやすい白黒 2 値画像を用いたが，室内照明が点灯している場合には，図 2.14(c) のように投影情報を認識することができない．そのため，2.3 節の手法は現実的な場において，輝度の減衰効果を用いて情報を隠蔽することが可能であると言える．また，図 2.14(d) は室内照明を点灯した状態で偏光板を通さずに撮影した写真であり，投影した情報を十分に認識できていることがわかる．

ただし，環境光の強さは環境ごとに異なるため，必要な外乱の強さについて議論する．

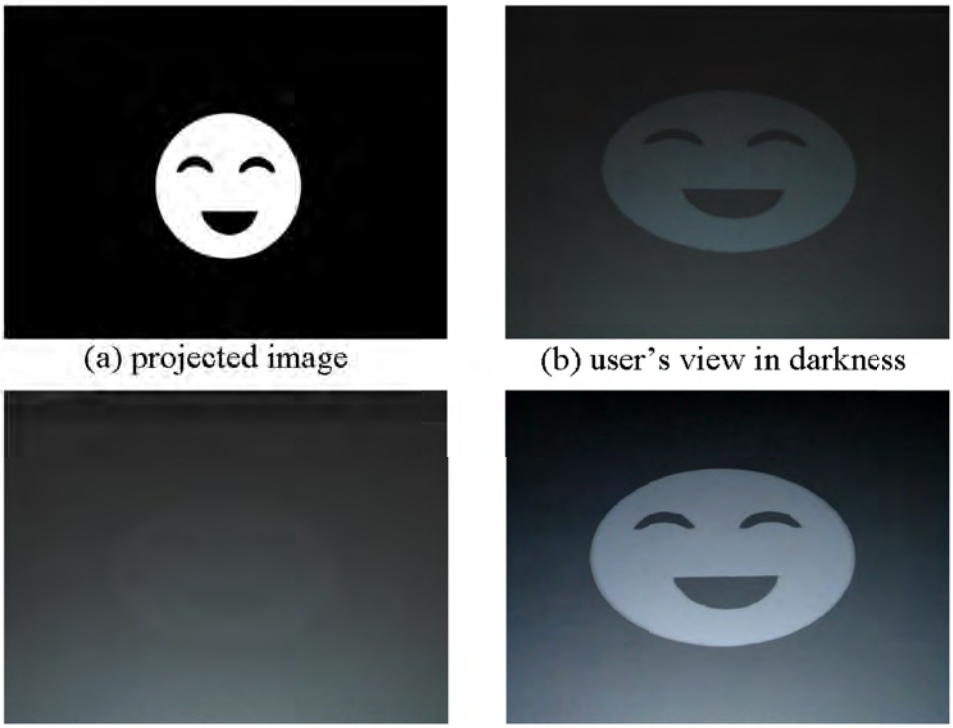


図 2.14: 外乱の効果

Weber の法則によると，刺激強度 I の外乱がある環境において，人間が認識できる刺激強度差の閾値 ΔI は次式で与えられる．

$$\frac{\Delta I}{I} = k \qquad (k: \ constant). \tag{2.4}$$

この関係を用いれば，必要な外乱 I の値を算出して室内照明を調整することで，理想的な環境でディスプレイを利用することができる．さらに，環境光以外にも，任意の輝度で投光できる投光装置などを用いれば，外乱を意図的に与えることができる．ここで，比較的強い外乱を与えた場合，プロジェクタ偏光板と視点偏光板の偏光軸の相対角度が 90 deg から少しずれた場合でも，情報は観察されなくなる．これは，テーブル型のディスプレイにおいては，情報を隠蔽できる観察方位の幅が広くなることに相当する．そのため，外乱の強度を制御することで，情報を認識できる立ち位置の領域と，認識できない立ち位置の領域の広さをある程度制御できる．

一方，実装したディスプレイではプロジェクタ光の入射角がスクリーンに対して垂直で

はないため，図 2.11(a) のように観察される輝度が観察方位によっても大きく異なっていることがわかる．このことから，視点偏光板を通して観察される輝度の絶対値は観察方位によって異なり，情報隠蔽に必要な外乱の強さも観察方位によって異なるが，観察方位に対する輝度特性をプロジェクタ光と外乱の間で一致させることで対処できる．具体的には，プロジェクタと同様の輝度特性で投光できる外乱の投光装置を用意し，プロジェクタの近くに配置することで実現できる．このような外乱を意図的に与えるディスプレイについては，3 章で実現して検証する．

2.6 考察

本章では，提案手法の応用や拡張構成などについて考察する．

2.6.1 テーブル型ディスプレイへの適用

図 2.13 からわかるように，テーブル型の試作ディスプレイは，単一のスクリーン面に投影された情報を，異なる観察方位にいる利用者に対して異なる輝度で同時に観察させることができる．この際，システムがプロジェクタ偏光板を回転させ，投影情報の偏光軸を変更することで，輝度が最大または最小となる観察方位を任意に作り出すことができる．これを利用して，ある観察方位にいる利用者に対して，情報の観察輝度を低くして情報を隠蔽するのと同時に，別の利用者に対して同じ情報を開示することが可能である．また，情報を強調したい利用者に対しては明るく，そうでない利用者に対しては比較的暗く情報を提示するといった利用法も考えられる．

なお，実装したディスプレイでは，プロジェクタ偏光板を回転させるモータの最大回転速度は 360 deg/s 程度であった，これに対し，テーブルの周りの利用者の移動速度は，走った場合でも最大 180 deg/s 程度であり，利用者の移動に対して十分な回転速度を有している．一方，モータのステップ角が 7.5 deg であるため，投影情報の偏光軸が目的の方向から最大で 3.75 deg ずれることとなる．そのため，視点偏光板に対する投影情報の偏光軸が 90 deg となるようプロジェクタ偏光板を回転させる時，視点偏光板を通過してしまう情報の輝度がずれによって大きくなる．しかし，提案手法の輝度特性は (2.1) 式に示すとおり正弦的であるため，輝度が最小となる $\theta = 90$ deg の周辺では，ずれに対する輝度の変化は小さい．具体的には，3.75 deg ずれた場合でも $I_0 cos^2(93.75) = 0.0043 I_0$ 程度

となる．また，ステップ角の小さいステッピングモータやサーボモータを用いることで改善も可能である．

2.6.2 応用構成の検討

提案手法は，試作した構成だけでなく，さまざまな拡張構成を実現することにより，多様で柔軟な可視性制御を実現できる．まず，プロジェクタを増設した構成について検討する．図 2.15(a) は，図 2.5 の基本構成にプロジェクタを 1 台追加した場合の構成例の概念図である．この例では，一方のプロジェクタ (プロジェクタ 1) にはプロジェクタ偏光板を設置しているが，もう一方 (プロジェクタ 2) には設置していない．この場合，プロジェクタ 1 から投影された情報は，プロジェクタ偏光板と視点偏光板により，試作ディスプレイと同様に観察輝度が変化する．一方，プロジェクタ 2 から投影された情報はあらゆる方向の偏光成分を持つため，視点偏光板で輝度が一定の減衰をするものの，観察方位に依存せず同様に観察される．この構成を用いれば，プロジェクタ 2 から投影された情報を全員に平等に認識させ，同時に，プロジェクタ 1 から投影された情報をある利用者に対しては明るく，ある利用者に対しては比較的暗く認識させることができる．すなわち，特定の利用者に情報の一部をハイライトして提示することができると考えられる．また，プロジェクタ 1 から投影される情報は，利用者から認識できない程度に輝度を減衰させることもできるため，プロジェクタ 1 から一部の利用者だけに観察されるべき情報を投影し，プロジェクタ 2 からは全利用者に観察されるべき共有情報を投影するといったことも可能である．

さらに，図 2.15(a) の構成では，各プロジェクタから投影される情報を重畳して利用することができる．そのため，プロジェクタ 2 を 2.5.2 項で述べた投光装置として利用することができる．ある情報を利用者に対して隠蔽したい場合，投影情報の観察輝度を視点偏光板で大幅に減衰させることはできるものの，完全に遮断することはできない．そこで，(2.4) 式から導かれる輝度以上で白色光などをプロジェクタ 2 から投影すれば，輝度の減衰した情報を利用者が認識できなくなると考えられる．この時，輝度が減衰した情報の反転画像と白色光を混ぜ合わせて投影する手法 [73] を併用することも有効と考えられる．また，プロジェクタ 2 から比較的輝度の低い情報を投影し，プロジェクタ 1 から輝度の高い光を投影することが考えられる．この場合，プロジェクタ 1 からの光を視点偏光板によって遮断した利用者のみが，プロジェクタ 2 からの情報を認識できる．そのため，視点偏光板を装着しない利用者を含め，それ以外の利用者が情報を認識できない状況となり，特定

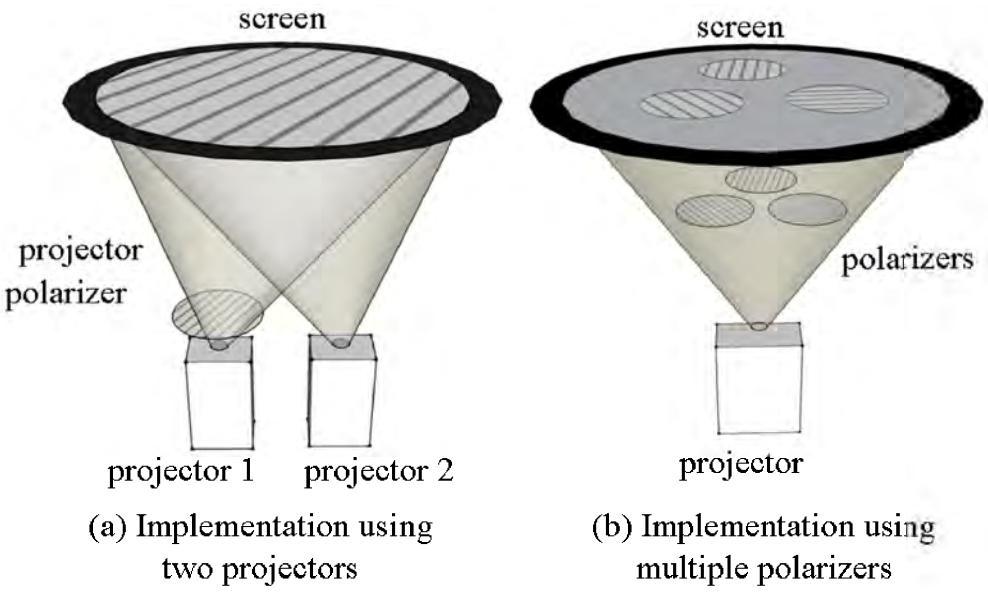


図 2.15: 拡張構成の概念図

の利用者だけが表示されている情報を認識できるプライベートな情報を実現できると考えられる．

プロジェクタだけでなく，プロジェクタ偏光板を増設することも考えられる．プロジェクタに対して 1 枚のプロジェクタ偏光板を設置する代わりに，図 2.15(b) のように小型の偏光板を複数設置し，独立して回転制御することで，領域ごとに異なる偏光軸を与えることができる．領域ごとの偏光軸を少しずつ変え，視点偏光板を通した場合，領域ごとに輝度で認識される．これにより，ある利用者に対して，情報の重要度に応じて多段階に輝度が階調分けされたような表現を与えることができる．また，観察方位が 90 deg 異なる 2 人の利用者に別々の個人情報を与えることができると考えられる．図では複数のプロジェクタ偏光板間に隙間があるが，隙間を無くし，より小さな領域ごとに偏光軸を制御する方法として，液晶ディスプレイに用いられている液晶パネルを応用することが考えられる．液晶ディスプレイは，2 枚の偏光板間に液晶パネルを挟んだ構成をしており，一方の偏光板によって偏光した光を液晶パネルがピクセルごとに独立して回転させることで，もう一枚の偏光板を通過する光量を制御している．そこで，プロジェクタ偏光板からモータを外して固定し，スクリーンとの間に液晶パネルを配置することで，プロジェクタ偏光板を通過した光の偏光軸を，液晶パネルのピクセルごとに独立して回転させることができると考

えられる．

一方，各利用者の視点偏光板を同一の偏光軸で固定して実装し，ある利用者に対する観察輝度をプロジェクタ偏光板の回転で決定した場合，他の利用者に対する観察輝度を任意に制御することはできない．たとえば，テーブルを挟んで対面に位置した利用者同士は，必ず，同じ情報を同じ輝度で観察することとなる．しかし，利用者に装着する視点偏光板も回転制御機構を有すれば，対面の利用者に異なる可視性を与えたり，逆に，直交に位置する利用者同士に対して同様の情報可視性を与えたりといった制御も可能である．ただし，この場合は視点偏光板に制御機構などを搭載する必要があり，偏光軸によっては相手の目を見ることができない可能性がある．そのため，投影情報の指向性を制御する技術 [45] や，物理的に遮る技術 [60] を併用することが有効となる可能性もある．

また，何らかのセンサを用いて視点偏光板の位置や傾きを検知し，偏光板の軸の相対角度をこの動きに連動させれば，自由に移動する利用者を対象にした観察輝度制御を行うことができる．たとえば，ある利用者の視点偏光板の位置と傾きを追従するようにプロジェクタ偏光板を回転させれば，その利用者がテーブルの周りのどの位置にいても常に特定の輝度で情報を認識させることや，常に情報を隠すことが可能である．なお，これには眼鏡の重さによる負荷を増やさないため，サイズの小さいセンサや，スクリーン端に設置するタッチセンサ，光学的なトラッカなどを用いることが重要である．

2.6.3 応用分野の検討

提案手法を利用したディスプレイは，ボードゲームや協調作業において，相手に隠したい情報がある場合に有効であると言える．例えば，テーブルの周りにいる全利用者から観察される情報と，特定の利用者からは観察できない情報，特定の利用者からのみ観察できる情報を同時に表示できる．そのため，ある利用者に対して情報を隠して推理させたり，ある利用者だけが知り得る情報を表示したりするゲームを容易に実現できる．また，前節で述べた応用構成を用いれば，2 名の利用者に対して別々の個人情報を提供することで，相手から手札を隠して行うカードゲームなども可能である．協調作業の場においても，ある利用者だけに必要な情報を，他の利用者に対して隠蔽しておくことで，相手を妨害することなく作業させることができる．

さらに，複数の利用者が同じ場所に異なるものを見るという現象は日常に起こることが少ないため，見る者に強い印象を与えることができると考えられる．そのため，提案手法

はアートや宣伝などにおける情報表現としての利用も期待される．

2.6.4 壁型ディスプレイへの適用

提案手法は，テーブル型ディスプレイだけでなく，壁型ディスプレイなどにも適用可能である．ただし，この場合，投影された情報の偏光軸は視点位置に依存しないため，視点位置によって観察輝度は変化しない．そのため，視点偏光板の偏光軸が異なる複数の眼鏡を利用することが考えられる．そして，前項で述べた応用構成を用い，部分ごとに偏光方向が異なる情報を表示することで，立場が異なるいくつかの聴衆のグループに対して，異なる部分を強調したプレゼンテーションなどを行うことができると考えられる．

2.7 むすび

本章では，利用者ごとに異なる情報を提示する手法の 1 つとして，単一のディスプレイ面を用いる従来の手法とその問題点を述べた．そして，それらの問題を解決するため，回転制御された直線偏光板を利用し，スクリーンに投影される情報の偏光軸を制御することで，別の直線偏光板を通して観察される輝度を制御する情報表示手法を提案した．また，基本的な構成で試作ディスプレイを実装し，その輝度特性を計測した．そして，外乱を用いて誤差による情報漏れを隠蔽する手法を提案した．さらに，提案原理の利用可能性および実装の拡張による展望について議論した．本提案手法を基にしたテーブル型ディスプレイへの応用は次章で述べるが，次章では扱わない壁型ディスプレイへの応用や拡張構成の実現，評価などの研究が今後進められることを期待したい．

第3章

利用者ごとに異なる情報を与えるテーブル型ディスプレイ

前章では，回転する直線偏光板を利用した情報可視性の制御手法について述べ，特にテーブル型ディスプレイに対して適用することが有効であることを述べた．そこで本章では，前述の手法を応用したテーブル型ディスプレイを試作し，実装したディスプレイを用いた複数人に対する情報提示例を示す．また，被験者実験を通して情報の見え方を実際に確認し，利用可能性について考察した結果について述べる [52, 54–56].

3.1 まえがき

テーブル型ディスプレイは，複数の人が一堂に集まり，顔を合わせて行う協調作業の場で重要な役割を果たす要素技術として注目を集めている．このようなディスプレイを囲んだ利用者は，テーブルトップ面に表示された情報に対して対等にアクセスでき [74]，電子的な情報だけでなく，利用者間のジェスチャや相手の存在感などを生かした形での作業をすることができる．そのため，多くの情報提示技術やインタフェースが研究されている [15].

一方，複数人が場を同じくして協調作業などを行う際には，すべての情報を全利用者間で共有するだけでなく，一部の情報を特定の利用者やグループ間だけで保有することが同時に要求されることも多い [75]．しかし，通常のディスプレイ上に表示された情報は全利用者に平等に提示されるため，特定の利用者に限定して情報を提示することが難しい．

そのため，いくつかの方法が提案されているが，利用者の視点移動が限定されたり，ディスプレイ面の一部しか利用できなかったりといった制約が大きかった．これの問題を解決するため，筆者らは前章で回転偏光フィルタを用いた情報可視性制御手法 [51] を提案し，その可能性を検証した．

本章では，回転偏光フィルタを用いた情報可視性制御手法を応用することで，複数の利用者に異なる可視性で情報を提示するテーブル型ディスプレイを提案する．これにより，利用者の立ち位置などに応じて，表示情報を異なる可視性で認識させることができる．以下，提案ディスプレイの構成と，提案ディスプレイを用いて特定利用者に対する情報の開示と隠蔽の制御，および情報分類の可視化を実現する方法について述べ，実装したディスプレイを用いてその実現性を確認する．さらに，エンタテインメントへの応用例の 1 つである「MysteriousPOND」について述べ，より実用的な場面での応用や今後の課題などについて検討する．

3.2 関連研究

単一のディスプレイ面を用いながらも，表示された情報の可視性を観察条件に応じて変化させることで，複数の利用者に対して異なる情報を提示できる協調作業用テーブル型ディスプレイがいくつか提案されている．本節では，それらを紹介し，問題点などを議論する．

図 3.1 に示す Lumisight Table [76] は，方向によって光の透過特性が異なるフィルムをスクリーンとして用いたテーブル型ディスプレイで，テーブル四方に着座した各利用者に各々異なる情報を提示できる．しかし，利用者の視点位置が動くと，他の利用者の情報が重なって表示されてしまう．また，決められた視点位置から観察する 4 名以外の第三者に情報を提示することもできない．

図 3.2 に示す SharedWell [47] では，テーブル型ディスプレイの上方に穴の開いたマスクを設置し，各利用者の視点が移動することで，個人的な領域と共有された領域を動的に作り出して利用できるが，利用できるディスプレイ領域は広くはない．同様に，ディスプレイに空いた穴を利用するシステムとして，virtual panel を用いたテーブル型ディスプレイ [46] がある．これは，テーブル面の一部が透明なアクリルとなっており，特定の方向から見る利用者に対してのみ，テーブル内部に設置された液晶ディスプレイ上の情報を提示

図 3.1: Lumisight Table

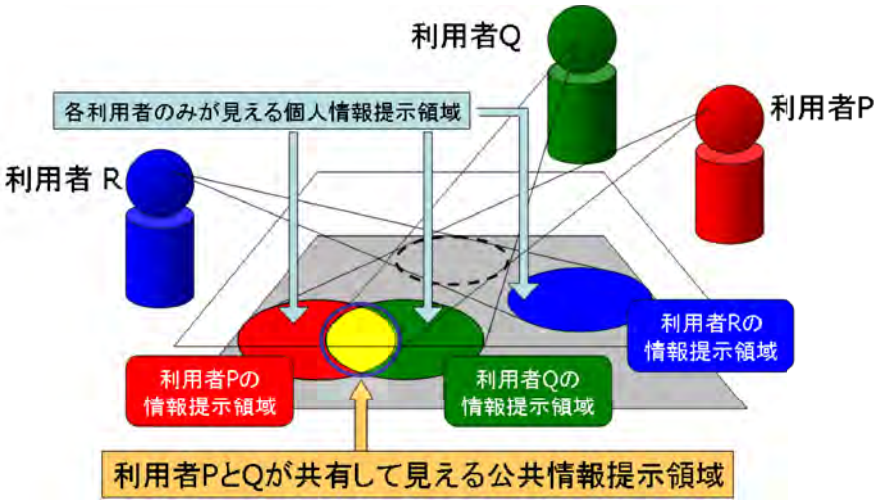


図 3.2: SharedWell

する．また，テーブル面にも情報を表示することで，公共の情報と個人的な情報を同時に扱うことができる．しかし，利用者は視点を移動することができず，テーブル面のうち個人的な情報を表示する領域は固定されている．

図 3.3 に示す two-user responsive workbench [77] は，2 人の利用者の左右眼用の情報をテーブル面に高速で順次表示し，それに同期して開閉する液晶シャッタ眼鏡をかけた 2 人の利用者に異なる方向から見た立体映像を提示する．しかし，これは眼鏡が電気的な機構を持つため比較的重くなり，利用者への負担が大きい．また，眼鏡に対して有線方式の同期信号を用いた場合は利用者への負担となり，赤外線を用いた無線方式の場合は，利用者の手などさまざまな原因で信号が遮られやすい．

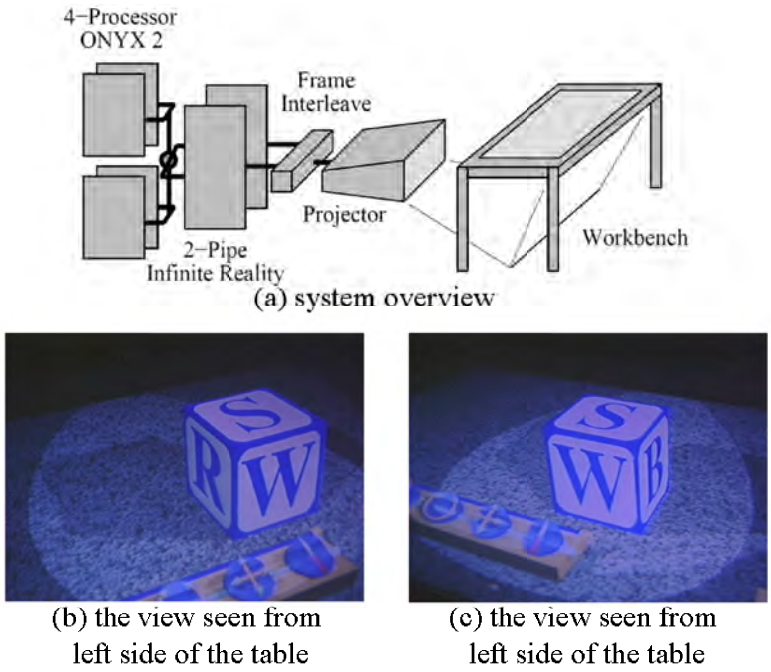


図 3.3: Two-user responsive workbench

一方，ディスプレイに多数の情報が表示されている場合，利用者の作業を支援するため，情報の所有者や属性に応じて，位置や向きで分類して表示することが有効となることが多い [78, 79]．しかし，複数の利用者が共有ディスプレイ上で異なる意図を持って作業をしている場合に，ある利用者が情報を探すために共有情報の配置や向きを変えると，他の利用者の作業を妨害してしまう可能性が大きい．そのため，このような一時的な情報分類を特定の利用者またはグループのみに対して可視化できれば，単一のディスプレイ面上で複数人が異なるタスクを行う場などで有効なインタフェースとなり得ると考えられる．そこで，可視と不可視の 2 値的な制御だけでなく，表示情報の可視性を段階的に制御し，特定の利用者のみに差異を認識させることができれば，このような情報分類も実現できると考えられる．

これらのことから，単一のディスプレイ面で共有情報と個人情報を同時に扱う場合は，以下の要件を満たすディスプレイが実現できれば，上記のような問題を解決でき，新たな展開を期待することができる．

- 利用者の視点位置を限定しない

- 利用者の頭への負荷が小さい
- 2 名以上の利用者に対して異なる可視性で情報を同時に提示する
- ディスプレイ面全体を利用し，部分ごとに情報の可視性を制御する
- 表示情報の可視性を段階的に制御する

従来のディスプレイには，これらを全て満たすものはまだない．これらを実現するため，回転する偏光フィルタを用いた可視性制御を，テーブル型ディスプレイに適用する．

3.3 提案ディスプレイ概要

本節では，前章で提案した回転偏光フィルタを用いた情報可視性制御手法を応用したテーブル型ディスプレイの概要について述べる．

回転偏光フィルタを用いた情報可視性制御は，光が 2 枚の偏光板を通過する際に，偏光板同士の相対角度に依存して減衰するマリュスの法則を応用し，複数の利用者に異なる輝度で情報を認識させるものである．図 3.4 は提案ディスプレイの概略図であり，テーブル内部に水平に設置した 2 台のプロジェクタから PC で生成された映像情報を投光し，鏡で反射させてテーブルトップ面に投影する．このうち 1 台のプロジェクタ (プロジェクタ 1) の前方には，PC からの信号で任意に回転を制御できる回転機構と偏光板を設置する．これは，回転偏光フィルタによる可視性制御におけるプロジェクタ偏光板に相当する．また，位置センサを取り付けた眼鏡のフレームに偏光軸が鉛直方向となるよう偏光板を設置することで，視点偏光板とする．もう一方のプロジェクタ (プロジェクタ 2) には何も設置せず，直接情報をディスプレイ面へ投影する．底面からスクリーンまでの高さは 900 mm，スクリーンサイズは $1,200\ mm \times 900\ mm$ である．

なお，プロジェクタは東芝製プロジェクタ TDP-TW350(J)(光出力: $3,500\ lumen$，解像度: $1,600 \times 1,200\ pixel$）を用い，スクリーンは偏光による立体視に利用される Stewart 社製 Techplex 200 を用いる．また，モータには 2 相ユニポーラ方式，単位角度 7.5 deg のステッピングモータを用い，モータドライバと PC の通信には RS232C を利用する．位置センサには InterSense 社製 IS-600 Mark II SoniDisc(更新レート: 180 Hz，精度: 7.0 mm，遅延: $4 - 10\ msec$) を用いる．

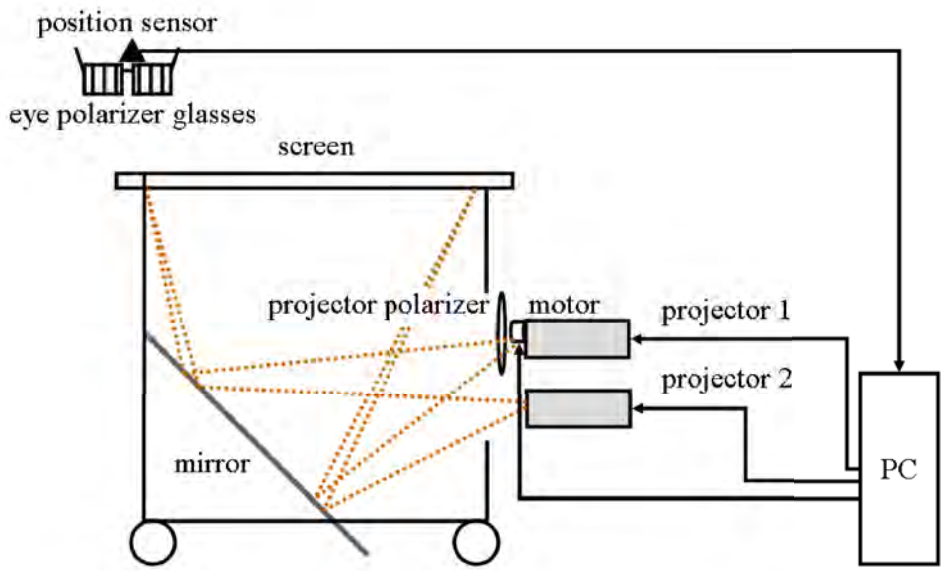


図 3.4: 実装ディスプレイ概観

3.4 複数の利用者への情報提示例

本節では，提案ディスプレイを用いた情報提示例として，特定利用者に対する情報の開示と隠蔽の制御，および動的な分類の可視化について述べる．

3.4.1 特定の利用者に対する情報の開示と隠蔽の制御

輝度減衰を利用した情報の隠蔽

提案ディスプレイは，投影した情報の部分的な開示または隠蔽を制御することができる．その最も単純な例を図 3.5 に示す．この例では，視点偏光板を装着した 2 人の利用者が，図 3.5(a)(b) に示すように互いに直交する位置に立っている．また，プロジェクタ 1 は，プロジェクタ偏光板を通して図 3.5(a) に示すストライプと同方向の偏光軸で情報をスクリーン右半面へ投影しており，プロジェクタ偏光板を持たないプロジェクタ 2 は，左半面へ情報を投影している．この時，利用者 1 の位置からは，プロジェクタ 1 からの投影情報と視点偏光板の偏光軸が平行であるため，図 3.5(c) のようにプロジェクタ 1 に投影された部分を鮮明に観察できる．しかし，利用者 2 の位置からは，プロジェクタ 1 からの投影

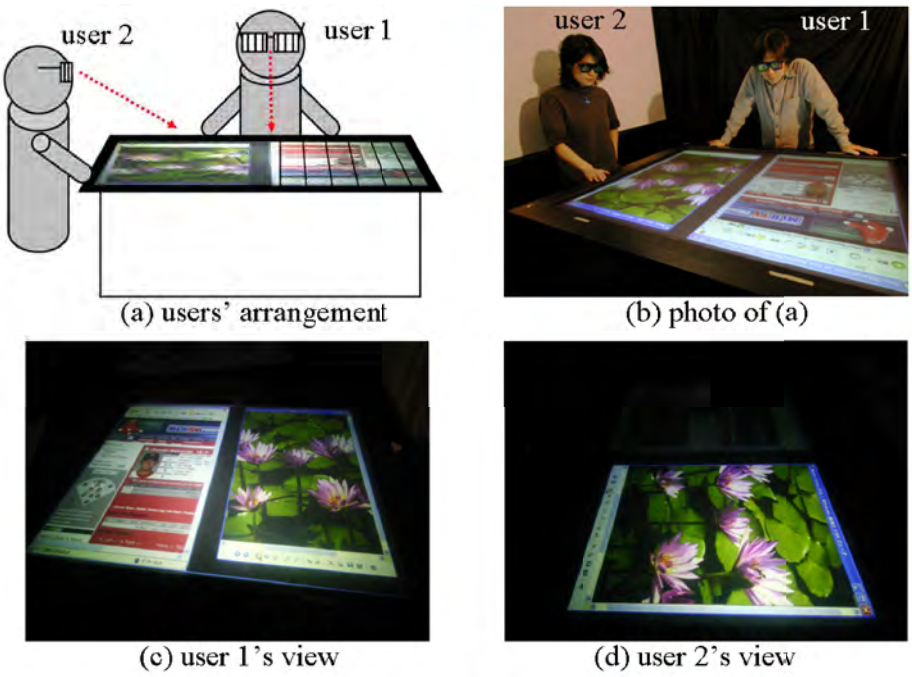


図 3.5: 特定の利用者に対する情報の開示と隠蔽の制御

情報と視点偏光板の偏光軸が垂直であるため，視点偏光板に遮断され，図 3.5(d) のようにプロジェクタ 1 からの情報 (写真における奥側の半面) は隠蔽されている．また，プロジェクタ 2 から投影された情報はあらゆる偏光成分を持つため，視点偏光板で輝度が半減するものの，観察位置に依存せず平等に認識できる．ここで，プロジェクタ偏光板を左または右方向に 90 deg 回転させれば，開示と隠蔽の関係を反転させることができる．すなわち，利用者 2 はプロジェクタ 1 の情報を観察できるようになり，反対に，利用者 1 は観察できなくなる．これは，一部の情報を特定の利用者に対して開示すると同時に，他の利用者に対して隠蔽していると言える．また，この例では，偏光眼鏡をかけない利用者は全ての情報を観察することができる．そのため，利用者が作業に不要な情報を隠しておき，全体を見たいときに偏光眼鏡を外すといったことができる．なお，図 3.5(a) では偏光軸の説明のためストライプを描いているが，実際にはこれらは人間の目からは認識されない．

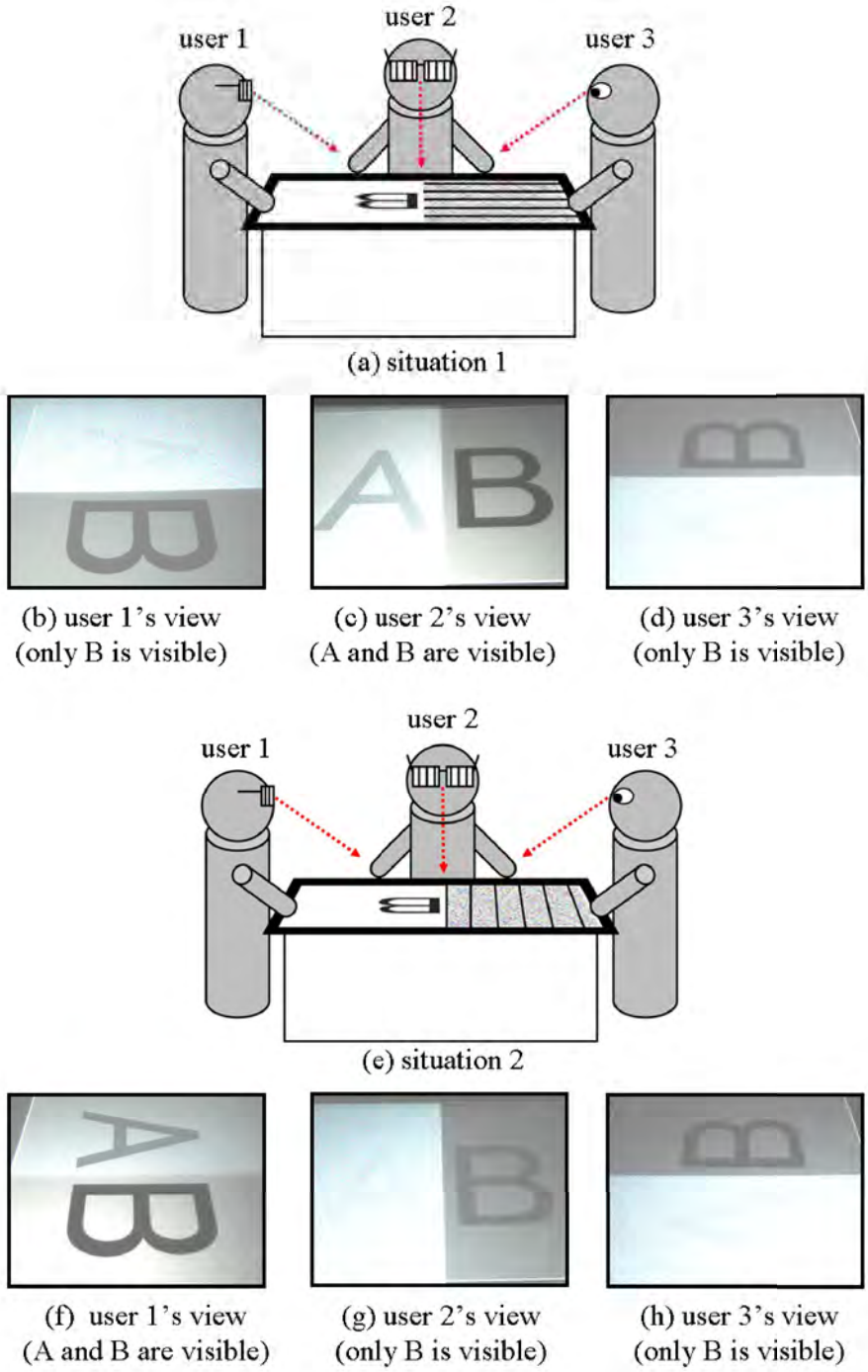


図 3.6: 外乱画像を利用した情報隠蔽の例

(a) noise image (b) main image

図 3.7: 外乱画像と本画像

外乱画像を利用した情報の隠蔽

提案ディスプレイは，偏光眼鏡をかけた特定の利用者に対して情報を隠蔽するだけでなく，2 台のプロジェクタから投光する画像を重畳することで，裸眼の利用者に対して情報を隠蔽することもできる．図 3.6 は，視点偏光板を装着した利用者 1 および 2 と，裸眼の利用者 3 が互いに直行する位置からスクリーンを観察している状況で，図 3.7(a) に示す半面の外乱画像と図 3.7(b) に示す本画像を，プロジェクタ 1 と 2 からそれぞれ投影した時の結果である．図 3.6(a) の状況では，プロジェクタ 1 から投影された外乱画像の偏光軸が利用者 1 の視点偏光板に対して平行になっており，各利用者からは図 3.6(b)(c)(d) のように観察される．外乱画像と視点偏光板の偏光軸が平行である利用者 1 および裸眼の利用者 3 は，外乱画像に隠された文字 A を観察できない．一方，外乱画像と視点偏光板の偏光軸が垂直となる利用者 2 の視点偏光板において，文字 A の輝度は半減するだけであるのに対し，外乱画像はほぼ遮断される．そのため，利用者 2 だけがプロジェクタ 2 から投影された文字 A を観察できる．文字 B には外乱画像が重畳されていないため，全利用者から観察できる．ここで，プロジェクタ偏光板を右または左に 90 deg 回転させると図 3.6(e) に示す状況となり，投影情報は各利用者から図 3.6(f)(g)(h) のように観察される．この状況では，外乱画像の偏光軸が 90 deg 回転しており，利用者 1 は文字 A を観察できるが，利用者 2 と利用者 3 は観察できない．文字 B に関しては，変わらず全利用者から観察されている．なお，図 3.6 では，外乱画像を重畳した部分がつぶれて単色に見えているが，実際にスクリーンを見た場合は図 3.7(a) のような外乱画像として認識できる．

利用者の視点位置情報を利用した制御

提案ディスプレイは，利用者の視点位置を計測する位置センサからの情報を利用することで，テーブルの周りを移動する利用者に対して常に情報を開示または隠蔽するといった制御ができる．図3.8は視点偏光板を装着した3人の利用者1から3がいる状況で，利用者2の視点偏光板に対して，投影情報の偏光軸が常に平行となるようにプロジェクタ偏光板を制御した場合の観察結果である．なお，利用者2の頭部の▲印は位置センサを示す．また，この例ではプロジェクタ1からのみ情報を投影している．利用者が図3.8(a)(b)のような位置関係の時，図3.8(c)(d)(e)に示すように，利用者2とその隣に立つ利用者3は投影情報を鮮明に認識することができるが，彼らと直交する位置にいる利用者1は，投影情報を認識することができない．ここで，静止している利用者1と3の間を利用者2が図3.8(f)(g)に示す位置に移動すると，投影情報の偏光軸が利用者2を追うように回転する．この時，図3.8(h)(i)(j)のように利用者2は変わらず鮮明に情報を認識できるが，静止していた利用者1と3は輝度の低い情報を認識することとなる．さらに，利用者2が図3.8(k)(l)に示す位置まで移動すると，図3.8(m)(n)(o)のように利用者2と1は鮮明に情報を認識でき，利用者3は情報を認識できない状態となる．

図3.8の例とは反対に，投影情報の偏光軸を利用者2の視点偏光板に対して常に垂直になるようにプロジェクタ偏光板を制御すれば，利用者2は常に情報を隠蔽された状態となる．この場合，利用者1と3は利用者2の対面または近くにいれば情報を認識することができず，利用者2に対して直交する位置にいれば情報を鮮明に認識することできる．なお，2.6.1項で述べたように，プロジェクタ偏光板を回転させるモータは，利用者の移動に対して十分な回転速度を有している．

3.4.2 特定利用者に対する情報分類の可視化

提案ディスプレイは，特定の利用者に対して，プロジェクタ1と2の投影情報の間に輝度差が生じるようプロジェクタ偏光板を制御することで，情報の分類を可視化することができる．

図3.9(a)のように，視点偏光板を装着した利用者1と2および裸眼の利用者3が互いに直行する位置でスクリーンを観察している状況での例を示す．今，図3.9(b)に示す2種類の文字AまたはBが刻印されたオブジェクトが散在した状況を考える．オブジェクトの形

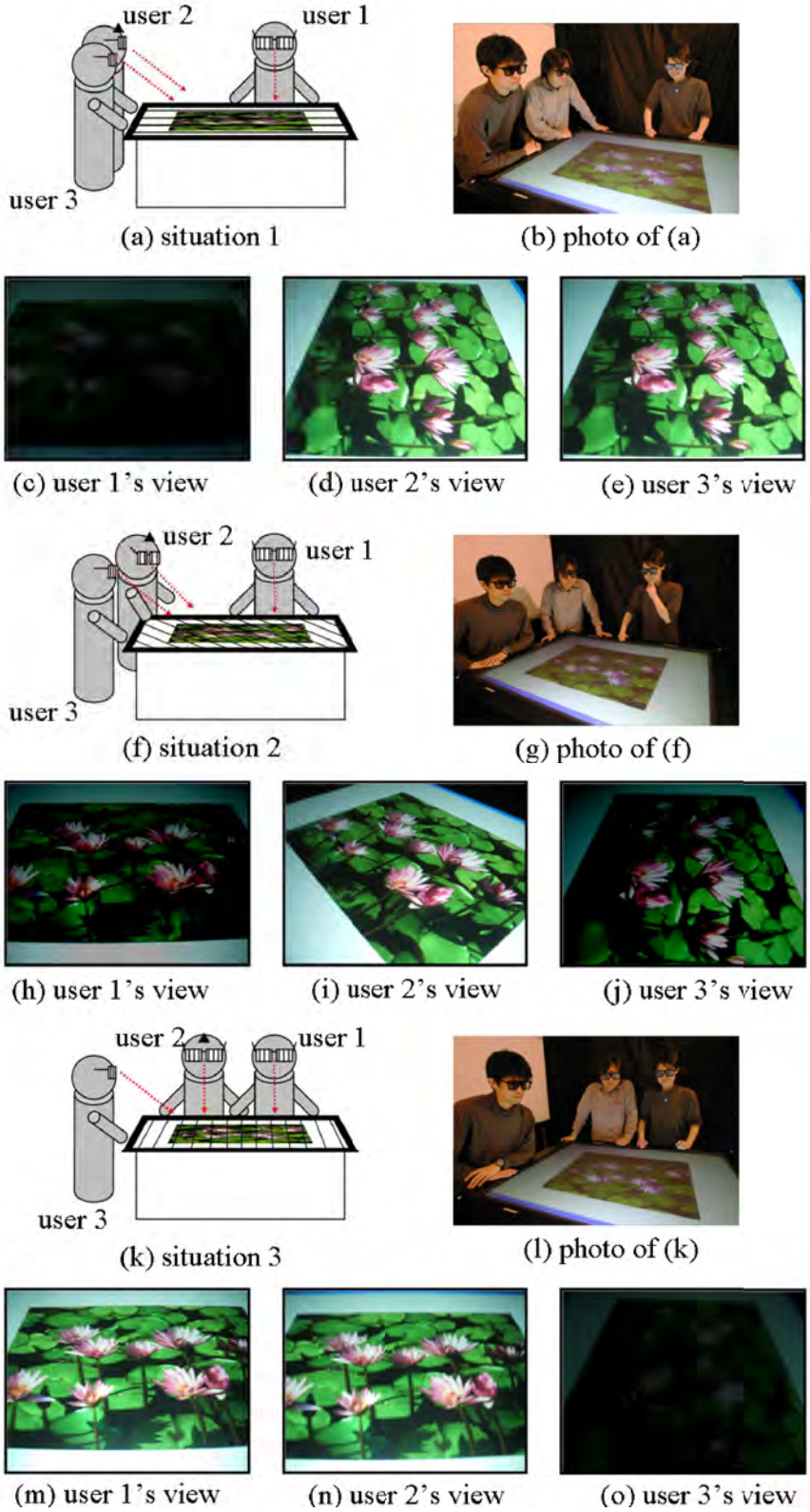


図 3.8: 位置センサを併用した例

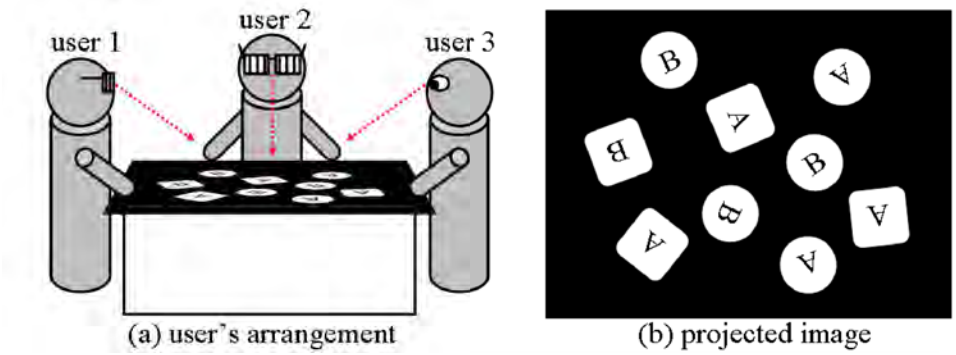


図 3.9: 情報分類の例における利用者配置と投影される画像

状は円と角が丸くなった正方形の 2 種類であるが，これらの文字または形状ごとに集合として一瞬で見分けることは難しい．そこで，これらの情報を，特定の利用者からのみ一見して分類されているように認識させる．図 3.10 に各プロジェクタへ入力する画像とスクリーンに投影される映像のイメージ，および各利用者からの見え方を示す．図 3.10(a)(b) のような部分画像をそれぞれプロジェクタ 1 と 2 へ入力し，プロジェクタ偏光板を利用者 1 の視点偏光板に対して 82.5 deg(90 deg からモータを 1 ステップ動かした状態) に設定した場合，図 3.10(c) のような画像が投影される．この際，各利用者からは図 3.10(d)(e)(f) のように観察される．利用者 1 からは視点偏光板によって A と刻印されたオブジェクトの輝度が大きく減少する一方，B と刻印されたオブジェクトの輝度は 50% 程度となるため，これらの間に輝度差が生じ，明るい部分と暗い部分とに分類されて認識される．しかし，利用者 2 からは A と刻印されたオブジェクトも視点偏光板を減衰せずに透過するため，全てのオブジェクトがほぼ同様に認識されている．視点偏光板を装着していない利用者 3 からも全オブジェクトが同様に認識されている．なお，投影情報の輝度は，プロジェクタ偏光板を通過した際 50% に減衰するため，裸眼の利用者に対してプロジェクタ 1 と 2 から投影された映像の間には輝度差が生じる．しかし，ウェーバー・フェヒナーの法則 [80] が示すように，人間は刺激強度を対数的に感知するため，この輝度差は非常に小さなものと認識される．

次に，図 3.10(g)(h) をプロジェクタ 1 および 2 へ入力し，プロジェクタ偏光板を利用者 2 の視点偏光板に対して 82.5 deg とした場合，図 3.10(i) のような投影映像および図 3.10(j)(k)(l) のような観察結果が得られる．すなわち，利用者 1 と 3 からは全オブジェク

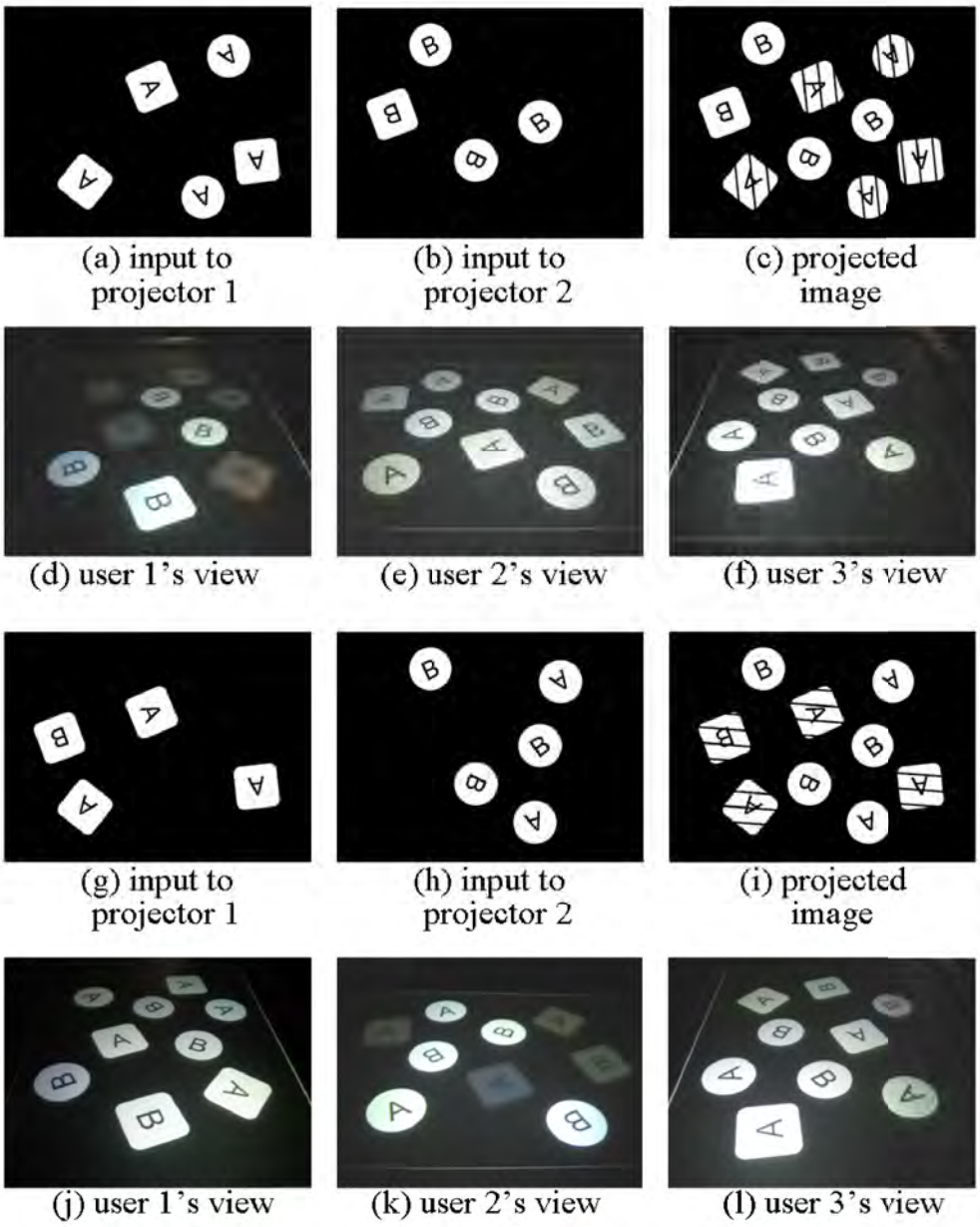


図 3.10: 情報分類の例における入力画像と投影画像，および観察結果

トが同様に認識され，利用者2からは円形のオブジェクトだけが明るく強調されて認識される．

3.5 情報の隠蔽性の検証

3.4.1節では，ディスプレイ面に表示された情報の輝度を偏光眼鏡で減衰させることで隠蔽する例を示したが，実際には位置センサの誤差や偏光眼鏡の傾きなどから情報が漏れ，隠蔽できなくなる可能性がある．この場合は，偏光板を設置しないプロジェクタから外乱を与えることで，隠蔽性を向上できると考えられる [51] が，必要な外乱の輝度などを実際に検証する必要がある．また，外乱画像を用いた隠蔽において，隠蔽情報に対する相対的な外乱画像の輝度に関しても同様である．そこで，本節では，実装したディスプレイ上において，各プロジェクタから投影される映像の輝度に対する情報の隠蔽性を測定する．

3.5.1 輝度減衰を用いた情報隠蔽

まず，輝度減衰による情報隠蔽における外乱の強さと隠蔽性の関係を測定する．そのため，PCからRGB値で (255, 255, 255) の白色のリングをプロジェクタ1へ出力し，ディスプレイの中心に表示する．また，リングが白黒2値画像であるため，リングのエッジを目立たなくできると考えられる白黒2値の砂嵐画像を外乱として用い，プロジェクタ2からディスプレイ全体に投影する．砂嵐画像は $1,024 \times 768$ $pixel$ とし，RGB値で (I, I, I) もしくは (0, 0, 0) のどちらかの色を50%の確率で各ピクセルに割り振って生成する．ここでは，2つの同型のプロジェクタを用いた際に，PC側が出力として調整できる範囲内で情報を隠蔽できるかどうかが重要であるため，実際の輝度ではなくプロジェクタへの出力値Iを外乱の強さとして用いる．次に，被験者は偏光眼鏡を外した状態でリングを認識できることを確認した後，偏光眼鏡をかけ，リングが隠蔽されていることを確認する．そして，投影されたリングと偏光眼鏡の相対角度を90 deg とし，リングを隠蔽した状態から相対角度を変化させる．この時，被験者がリングを見えるようになった時点で申告することで，可視と不可視の境界となる相対角度を測定する．なお，ここで「見える」とはわずかにでもリングの存在を認識できる状態を指している．2枚の偏光板の相対角度は，次の2つの条件で測定する．

1. プロジェクタ前方の偏光板を固定し，被験者が移動した場合

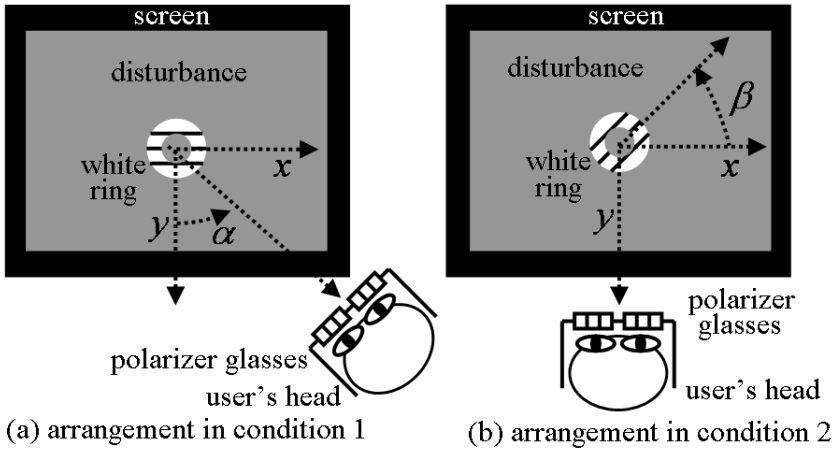


図 3.11: 実験時の機器および被験者の配置

2. 被験者は移動せず，プロジェクタ前方の偏光板を回転させた場合

1 の条件において，鉛直上方から見た機器と被験者の配置を図 3.11(a) に示す．リングの偏光軸は x 軸方向に平行であり，被験者は y 軸と観察方位の差 $\alpha = 0\ deg$ となる位置から反時計周りに移動する．被験者の視点のディスプレイからの距離および高さは固定せず，被験者がディスプレイの縁に自然に立った状態とする．また，α はディスプレイの縁に 5 deg 刻みで目盛りを表示し，被験者がリングを見えるようになったと宣告した時の立ち位置に最も近い目盛りを測定値とする．

次に，2 の条件での機器と被験者の配置を図 3.11(b) に示す．被験者はディスプレイ中心から y 軸方向に立ち，リングの偏光軸を x 軸方向から逆時計回りに回転させ，その変化量 β を測定する．実装したディスプレイでは，リングの偏光軸は 7.5 deg 刻みで回転するため，リングが見えない最大の β を測定値とする．

これら測定を 5 名の被験者に対して行った．被験者は男性 3 名と女性 2 名で，矯正視力が 0.7 から 1.0 の正常色覚，視点の高さが 155 から 170 cm(ディスプレイ面からの高さ 65 cm から 80 cm) であった．条件 1 および 2 での結果を図 3.12(a) および (b) に示す．なお，折れ線は，各輝度における利用者間平均と，利用者間の最大値および最小値を表している．また，3 本の折れ線の上部 (α が大きい値) が偏光眼鏡をかけた状態でリングが可視となっており，下部 (α が小さい値) が偏光眼鏡をかけた状態で不可視となっていることを示す．グラフに表示されていない横軸の範囲は，外乱が弱すぎるため，$\alpha = 0\ deg$ の場合

でもリングを隠蔽できない状態を示している．

3.5.2 外乱画像を用いた情報隠蔽

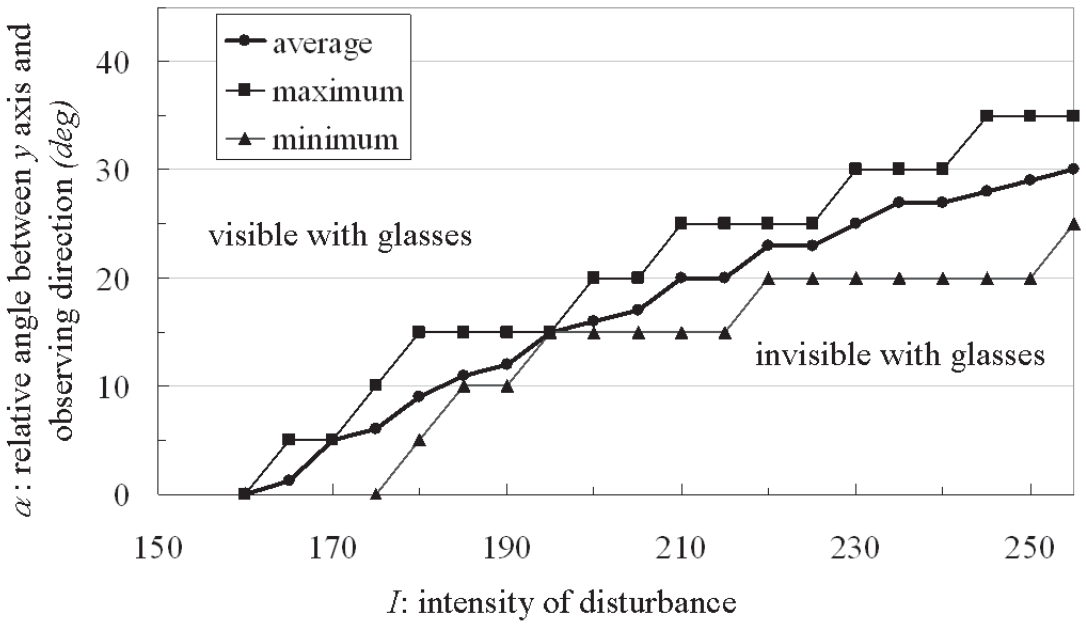
次に，外乱画像を用いた情報隠蔽における隠蔽性を測定する．これには，PC で RGB 値が (255, 255, 255) および (0, 0, 0) の白黒 2 値の砂嵐画像を外乱画像として生成し，プロジェクタ 1 へ出力してディスプレイ全体に表示する．また，RGB 値で (I, I, I) のグレースケールのリングをプロジェクタ 2 へ出力し，ディスプレイの中心に表示する．それ以外の機器配置，測定条件および被験者は前項と同様である．ただし，本実験で被験者は，まず偏光眼鏡を外してリングが見えないことを確認した後，偏光眼鏡をかける．また，α および β が 0 deg の状態でリングが被験者に見える状態であるため，リングが見えなくなった角度を測定する．図 3.13 は，各輝度における利用者間の平均と，最大値および最小値を表している．また，3 本の折れ線の上部 (α が大きい値) が偏光眼鏡をかけた状態でリングが不可視となっており，下部 (α が小さい値) が偏光眼鏡をかけた状態で可視となっていることを示す．グラフに表示されていない横軸の範囲は，リングの輝度が強く，偏光眼鏡を外しても隠蔽されていない状態と，リングの輝度が弱く，α および β が 0 deg の状態でも見えない状態を示している．

3.6 考察

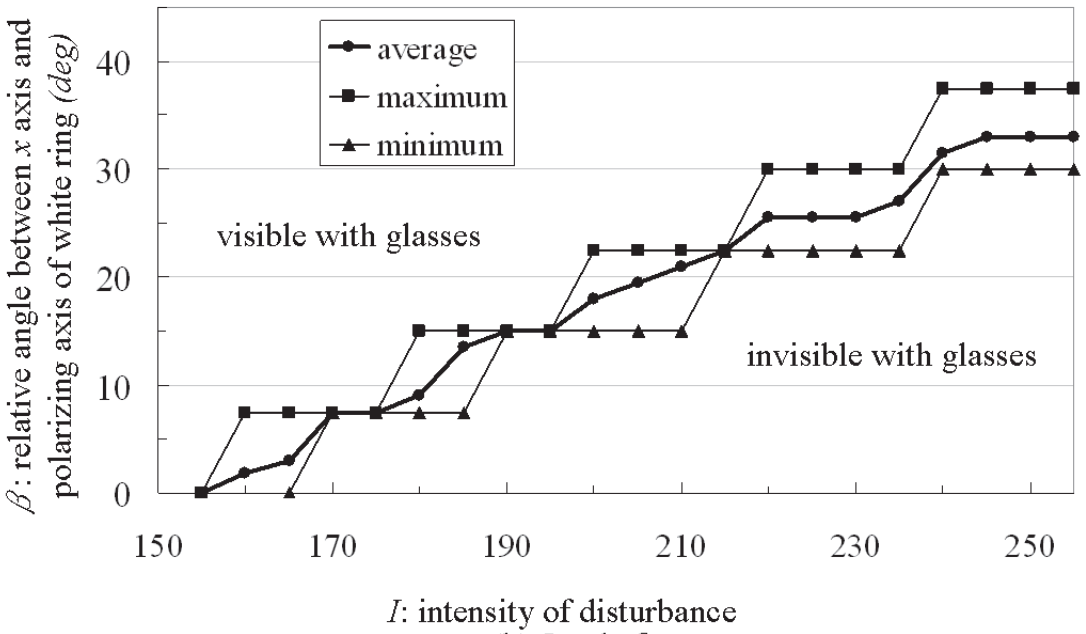
本節では，前節での実験結果について考察し，さらに提案ディスプレイの応用や拡張などを検討する．

3.6.1 実験結果

図 3.12 において，同型の 2 台のプロジェクタを利用した場合，個人差はあるものの，PC で制御できる範囲内の外乱により，表示情報を隠蔽できていることがわかる．また，I=200 以上の場合，全被験者に対して α および β が 15 deg 以下で情報を隠蔽できていることがわかる．一方，実装したディスプレイでは，位置センサの誤差は最大で 1 cm 程度であり，観察方位にして 1 deg 未満である．また，プロジェクタ偏光板を回転させるモータの 1 ステップの回転角度は 7.5 deg であり，利用者の観察方位に合わせて制御した場合の誤差は

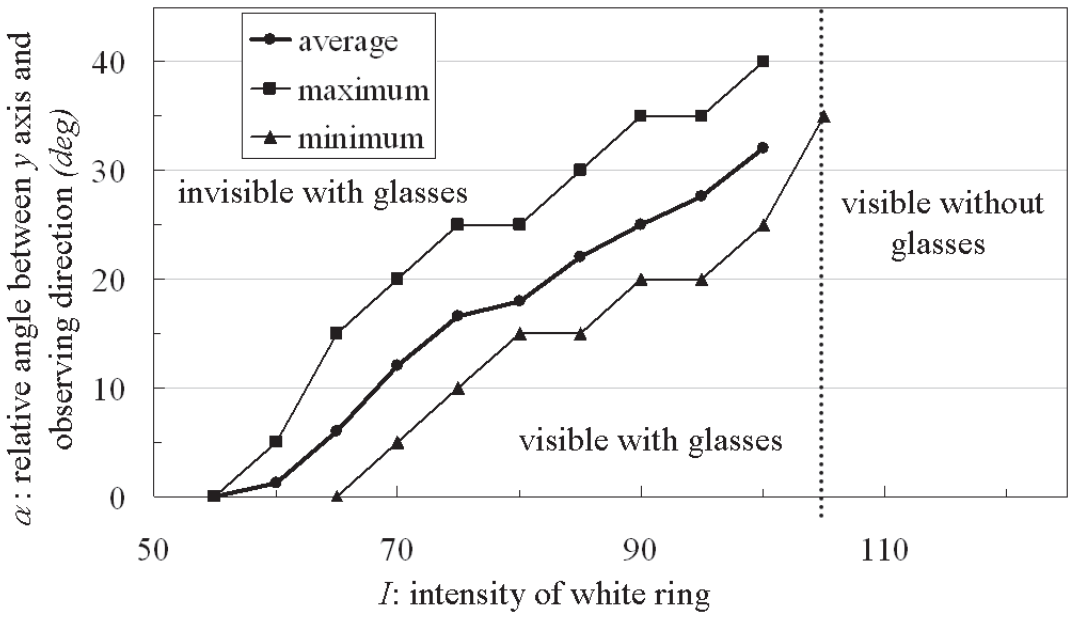


(a) I and α

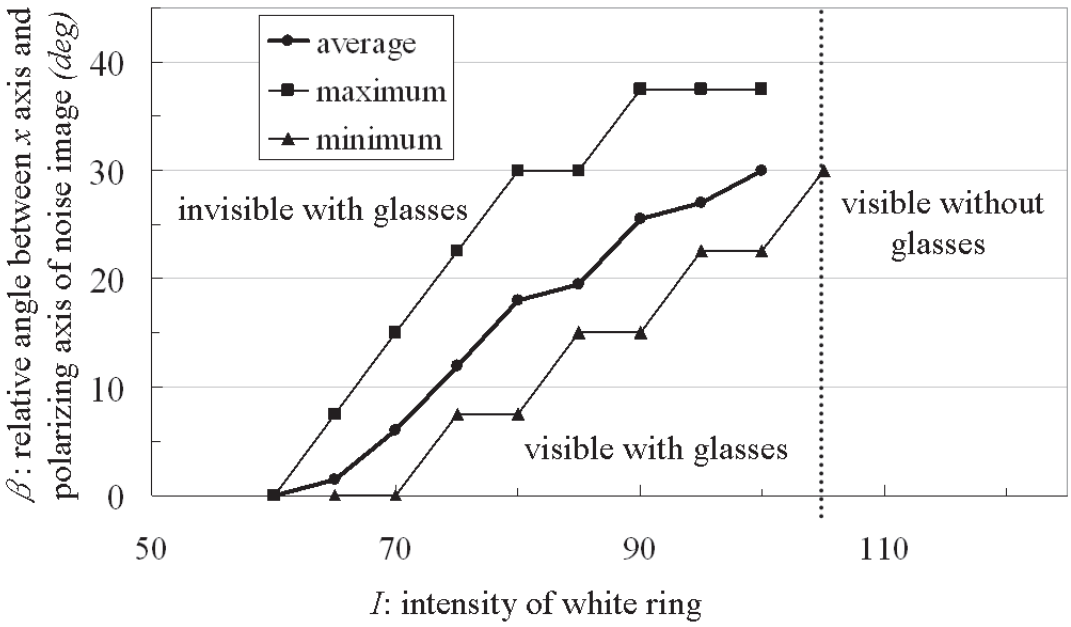


(b) I and β

図 3.12: 外乱の強さと隠蔽性の関係



(a) I and α



(b) I and β

図 3.13: 隠蔽情報の強さと隠蔽性の関係

最大 3.75 deg である．さらに，利用者が意図的に頭を傾けない限り，視点偏光板の傾きは 5 deg 以下程度と考えられる．そのため，これらの誤差がある場合でも，実装したディスプレイは利用者に対して情報を隠蔽できると言える．利用者が意図的に頭を傾けて視点偏光板を傾けた場合も，傾きセンサなどを用いれば対処は可能である．

また，図 3.13 から，利用した外乱画像に対して，I=85 から 95 の範囲内では，偏光眼鏡をかけた状態で α および β が 15 deg 以下であれば隠蔽情報が認識されていることがわかる．また，折れ線がプロットされている I の範囲では，偏光眼鏡を外した状態で隠蔽情報を認識できないことを実験時に確認しているため，実装したディスプレイはセンサやモータの誤差，視点偏光板の傾きを考慮しても実用可能であると考えられる．

実験結果には個人差が含まれているが，これは 2 台のプロジェクタからスクリーンへの光路が異なるため，被験者の視点の高さとディスプレイからの距離の違いによって，プロジェクタ間の輝度比が異なることが理由の 1 つとして考えられる．そこで，図 3.11(b) の方位から，高さ 170 cm および 155 cm の位置に色彩輝度計を設置し，各プロジェクタから白色光を投影してスクリーン中心の輝度を測定した．なお，ディスプレイの端から視点への水平距離は 15 cm とした．この結果，プロジェクタ 1 および 2 からの輝度は，高さ 170 cm の場合に 25 cd および 80 cd であり，高さ 155 cm の場合に 20 cd および 55 cd であった．そのため，プロジェクタ 1 に対するプロジェクタ 2 の輝度比は高さ 170 cm で 3.2，高さ 155 cm で 2.75 となり，投影情報の可視性に違いを生じていると考えられる．応用分野によっては，これらが問題となる可能性もあるため，pico projector [63] などの小型のプロジェクタをお互い近くに並べて用いることで光路差を小さくすることや，ハーフミラーなどを用いて光路を一致させる手法を検討する必要がある．

3.6.2 応用

応用分野

提案ディスプレイは，特定の利用者に対して投影情報の部分的な開示と隠蔽を制御することで，共有情報と個人情報を単一のディスプレイ面上で表示できる．これは，複数のプレイヤが状況や役割に応じて異なる情報を利用するゲームや，個人情報と共有情報を同時に利用するグループウェアを実現する際に有用と考えられる．また，全利用者の視点偏光板の偏光軸が同じであれば，隣または対面に位置する利用者同士は投影情報を等しく観察

することとなるため，これらをチームとした対戦ゲームなども考えられる．

情報の開示および隠蔽の制御は，利用者に対して情報を隠すだけでなく，特定の利用者のみに追加情報を与える際にも利用できる．例えば，複数の利用者が1つのディスプレイ上で異なる意図を持ったタスクをしている場合，共有の領域に情報が突然追加されると全員の注意を引きつけてしまうが，情報を他利用者に対して隠蔽した状態で追加することで，タスクを妨害しないよう共有領域に情報を追加することができる．

外乱画像を用いた例では，外乱画像を本画像に重畳することで，視点偏光板を装着した利用者だけでなく，裸眼の利用者に対しても情報を隠蔽できることを示したが，隠蔽されるべき情報がわずかに漏れて観察される場合もある．これは情報の秘匿性が重視される応用分野においては問題となるが，いくつかの改善法が考えられる．本章では外乱画像としてRGB値をランダムに割り振った単純な画像を用いたが，隠蔽情報に近い色彩で構成される画像や，隠蔽情報の反転画像と別の画像を加算した画像などを外乱画像として用いれば，隠蔽情報の秘匿性は改善されると考えられる．また，より輝度の高い外乱画像を利用することや，隠蔽画像のエッジを少しぼかして認識されにくくすることも解決策として挙げられる．

位置センサを用いた例では，視点偏光板の移動に合わせてプロジェクタ偏光板を制御することで，投影された情報を特定の利用者に対して常に提示，または逆に隠蔽できることを示した．これを用いれば，トラッキングされた利用者が他の利用者に対して情報を隠蔽するように動くことで機密情報を守るゲームなども実現できる．ただし，視点偏光板が単純な偏光眼鏡によって実現されている場合，偏光眼鏡の縁外からスクリーンを見たり，頭を傾けたりすることで隠蔽された情報が覗かれてしまう可能性もある．しかし，これは外乱画像による隠蔽や姿勢センサを併用することで改善可能である．

また，投影情報と視点偏光板の偏光軸の相対角度が0 degと90 degの間となる利用者からは，投影情報が薄暗く観察されており，比較的コントラストの小さな部分は認識しづらくなっている．そのため，投影情報のコントラストを制御することで，情報を認知可能な観察方位と認知不可能な観察方位の幅をある程度制御できるシステムを構築できると考えられる．このことは外乱画像を用いた例においても同様である．

一方，情報の分類の例では，視点偏光板を装着した特定の利用者に対して，プロジェクタへの入力画像およびプロジェクタ偏光板を制御することで，投影情報に輝度差を生じさせて動的な情報の分類を可視化した．これは，多くの表示情報を用いて複数人が異なる作

業をする状況で，特定の利用者だけが一時的に情報をフィルタリングする際などに有効と考えられる．例えば，ある利用者が特定のデータだけに注目して作業を行ったり，異なるタスクを行っている他の利用者の注意を引きつけないように絞込みを行ったりできる．また，ゲームなどで特定の利用者だけに良い手を強調することでハンディキャップを与えるといった応用も考えられる．

また，情報分類の例において，プロジェクタ偏光板を回転させることで，輝度差が観察される観察方位を任意に制御できる．そのため，位置センサを用いたモータの制御は情報分類の例に対しても有効であると言える．ただし，分類を認識できる利用者が移動する時に，分類を認識させたくない利用者に対する観察輝度も変化する場合があるため，各プロジェクタからの出力輝度とプロジェクタ偏光板を適切に制御する必要がある．

表現の拡張と限界

提案ディスプレイは，3.2 節で述べた要件を全て満たしているが，いくつかの制限があるため，柔軟性と拡張性およびその限界について考察する．本章における提案ディスプレイでは，全利用者が同じ偏光軸を持つ偏光眼鏡をかけている場合，すぐ隣にいる利用者同士，またはディスプレイを挟んで対面にいる利用者同士に異なる可視性で情報を提供することができない．そのため，異なる可視性を与えたい利用者同士は対面せず，なおかつ観察方位がある程度異なる位置にいる必要がある．2 名および 3 名の偏光眼鏡をかけた利用者がいる場合では，図 3.14 のような配置が考えられる．なお，図 3.14 は鉛直方向の偏光軸を持つ偏光眼鏡をかけた利用者と円形のテーブルを鉛直真上方向から見たイメージ図である．また，2.6.2 節で述べたような拡張構成などを用い，テーブル面の部分ごとに異なる偏光軸を持つ画像を投影している．この時，各利用者からは，数字が対応する画像のみがカットされて認識される．そのため，各画像を外乱画像として利用すれば，各利用者それぞれだけに観察可能な個人情報を提供することができると考えられる．

さらに，偏光眼鏡をかけた利用者が 4 名以上の場合において，利用者同士が対面せず，利用者間が隣り合わない利用者の配置として，テーブルを鉛直上方から見た奇数角形の頂点位置に利用者を配置することが考えられる．そして，テーブル面の部分ごとに偏光軸を制御した外乱画像を利用することで，各利用者にそれぞれの個人情報を提供できると考えられる．しかし，図 3.14(b) において，利用者 2 と 3 の偏光眼鏡は，投影画像 1 に対して偏光軸の差 θ が 30 deg であり，画像の輝度を理論値で 75% に減衰させる．同様

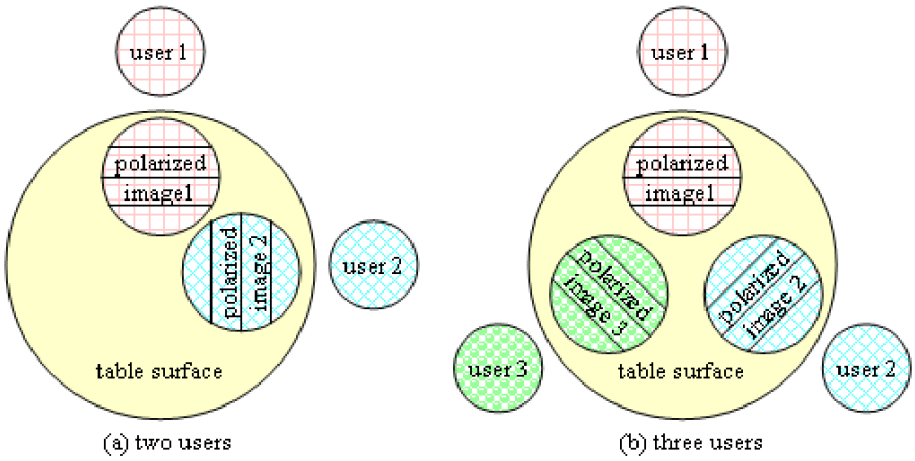


図 3.14: それぞれ異なる個人情報を提供するための利用者の配置例

に，5 人の利用者が正 5 角形の頂点位置から観察する場合では，ある利用者の偏光眼鏡に対して $\theta = 90\ deg$ の画像は，他の利用者からは $\theta = 18\ deg$ または $54\ deg$ となり，輝度が約 90% または 35% に減衰する．そのため，人数の増加につれて，減衰を必要としない利用者に対して減衰が生じ，外乱として用いることが難しくなる．実際に，図 3.13 の結果からは，$\alpha, \beta = 40\ deg$ 程度で外乱画像に隠蔽された画像を認識できている．ここで，$\theta = 90 - \beta, 90 - \alpha$ であることから，$\theta = 50\ deg$ 以上では，隠蔽された画像が他の利用者に認識できるようになり，情報が漏れることとなる．隠蔽する画像の輝度を下げることで隠蔽性は向上するものの，各利用者が移動しない場合でも視点位置や頭の傾きは完全に一定でないことから，おのおの異なる個人情報を提供できる人数は 3 から 5 名程度と考えられる．また，方形のディスプレイでは，$90\ deg$ ごとに利用者が位置するのが自然であるため，2 名が限界と考えられる．ただし，特定のゲームでの親など，特別な 1 人の利用者のみが知り得る情報だけが必要な場合には，他の利用者が偏光眼鏡を外しておくことで，観察方位に制限無く個人情報を利用できる．

利用者が自由に移動する場合は，各利用者の位置を検知し，ある利用者の対面または近くに他の利用者がいない時のみ個人情報を表示するといった制御が必要となる．逆に，ある利用者同士が対面または近くにいる場合に共有情報を表示するといった利用方法も可能である．

提案ディスプレイでは，外乱画像の形状および位置は自由に決めることができるため，

共有している情報の一部分だけに外乱を重畳することで，その領域を個人情報として利用できる．そのため，個人情報と共有情報の表示領域を混在させることができる．また，ある利用者の個人的な情報の上に，それ以外の利用者に共有される情報を外乱画像として重畳表示することで，共有情報と個人情報を重ねて表示できる．しかし，この場合は共有される情報が個人情報を完全に覆い，なおかつ外乱として十分な輝度を持っていることが条件となる．

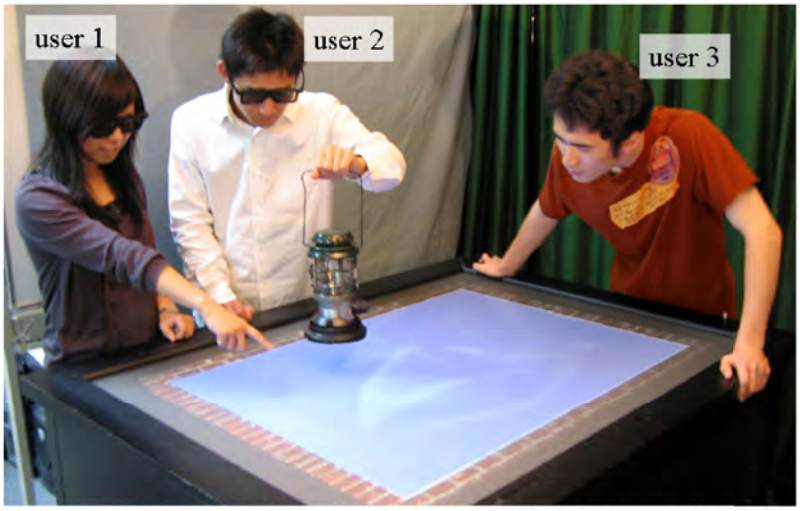
情報分類の例においては，ある利用者に対して暗く設定した部分を，対面またはすぐ隣に位置する利用者以外に対して暗く設定することができない．そのため，完全に独立した情報分類を同時に実現することはできず，ある特定の利用者のみに必要とされるハンディキャップや，一時的に必要とされる情報の絞り込みなどに利用することが有効と考えられる．

偏光眼鏡をかけた利用者が 3 名以上いる場合は，情報隠蔽の場合と同様に奇数角形の頂点に利用者を配置することで，情報分類を実現できると考えられるが，同時に複数人に対して任意の分類を表現することはできない．また，偏光眼鏡をかけた利用者の人数が増えるにつれて，不適切な利用者に対して画像の輝度が減衰する．そのため，本例においても偏光眼鏡をかけた利用者の人数は 3 から 5 名程度が限界と考えられる．ただし，どの程度の輝度差で情報が分類されているように認識されるかについては実際に検証する必要がある．

エンタテインメントへの応用例

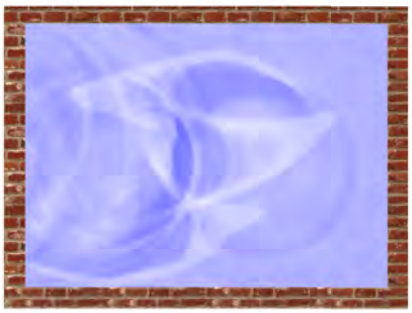
情報の隠蔽と開示の制御を応用した例として，メディアアート作品の「MysteriousPOND」[56] を試作した．図 3.15(a) は 3 人の利用者が MysteriousPOND を楽しんでいる様子である．ディスプレイ上には波打つ水面の映像が表示されており，利用者は，偏光眼鏡をかけてランタンで水面を照らすことで，図 3.15(b) のように，水面に隠された水中に泳ぐ魚の映像を覗き見ることができる．ただし，ランタンを持たない利用者は，ランタンを持つ利用者のすぐ近くか対面から，偏光眼鏡をかけて水面を見たときのみ水中を見ることができるが，それ以外の場所では図 3.15(c) のように水中を見ることができない．また，偏光眼鏡をかけない利用者は，立ち位置に関係なく，図 3.15(c) のように水中を見ることができない．

これは，提案ディスプレイに加え，位置センサを取り付けたランタンを用いて実現され

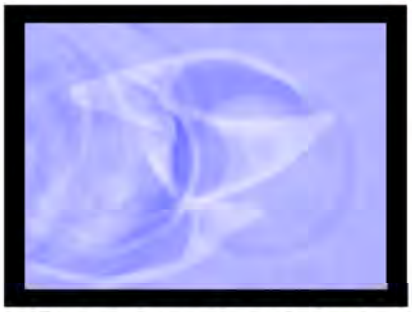


(a) a scenery where three users playing with MysteriousPOND

(b) observed image from user 1 and 2



(c) observed image from user 3



(d) input image to projector 1

(e) input image to projector 2

図 3.15: MysteriousPOND

る．まず，水中を泳ぐ魚と，魚が生成する波の動きをPCがシミュレーションする．そして，図3.15(d)に示すような水面の映像をプロジェクタ1へ出力し，また，位置センサから取得したランタンの位置を用いて，ランタンの周辺のみ水中の映像を図3.15(e)のように生成してプロジェクタ2へ出力する．同時に，ランタンから最も近くにある偏光眼鏡の位置をランタンの所有者の視点位置として，この偏光眼鏡の偏光板が水面の映像を遮断するように，プロジェクタの前に置かれた偏光板を回転するモータを制御する．これらの処理により，前述のような体験を利用者に与えることができる．

筆者らは，これをメディアアート作品として3度デモ展示した [56, 81, 82]．その結果，各々好評を博し，不思議で面白い，偏光をこのように応用する発想が良い，といった意見を頂いた．特に，[56] の展示ではカンテーレ賞を受賞するなど，後援企業からも高い評価を得た．また，ランタンの裏側を見て光源を探そうとする参加者も多くいたことから，参加者の好奇心を誘うことができたと考えられる．一方，より良くする為の意見として，利用者が行えるインタラクションが少ない，利用者同士に何らかの関係がほしい，何らかのゲーム性がほしいといった意見を頂いた．そのため，今後は，スクリーン面への直接タッチなどを用いた魚へのインタラクションや，ランタンを持つ利用者と持たない利用者に役割を持たせた協力作業などを盛り込むことで，より完成度の高いコンテンツとなる可能性があると言える．

3.6.3 構成の拡張

本ディスプレイは，さまざまな構成の拡張 [51] を適用することで，より複雑な可視性の制御を実現できる．また，多人数に対する情報の開示または隠蔽の制御や，複数階調をもった情報の分類など，より発展的な情報提示を実現できる．また，これらを用いることで，図3.14のような情報の表示方法も可能となり，各利用者ごとにプライベートな個人情報を提示することも可能と考えられる．

さらに，テーブルトップ面に手で直接操作できる偏光板を設置することで，タンジブルなインタフェースとして，より直感的に表示情報の可視性を制御できると考えられる．図3.16(a)は，偏光眼鏡をかけた利用者1および2が，お互い垂直となる位置からディスプレイを観察している状態で，ディスプレイ上に実際に手で回せる円形の直線偏光板を3つ (tp 1, tp 2, tp 3) 設置した様子を示している．また，ディスプレイ面に表示されている情報は，偏光板を設置しないプロジェクタから投影されたものであり，tp 1およびtp 3

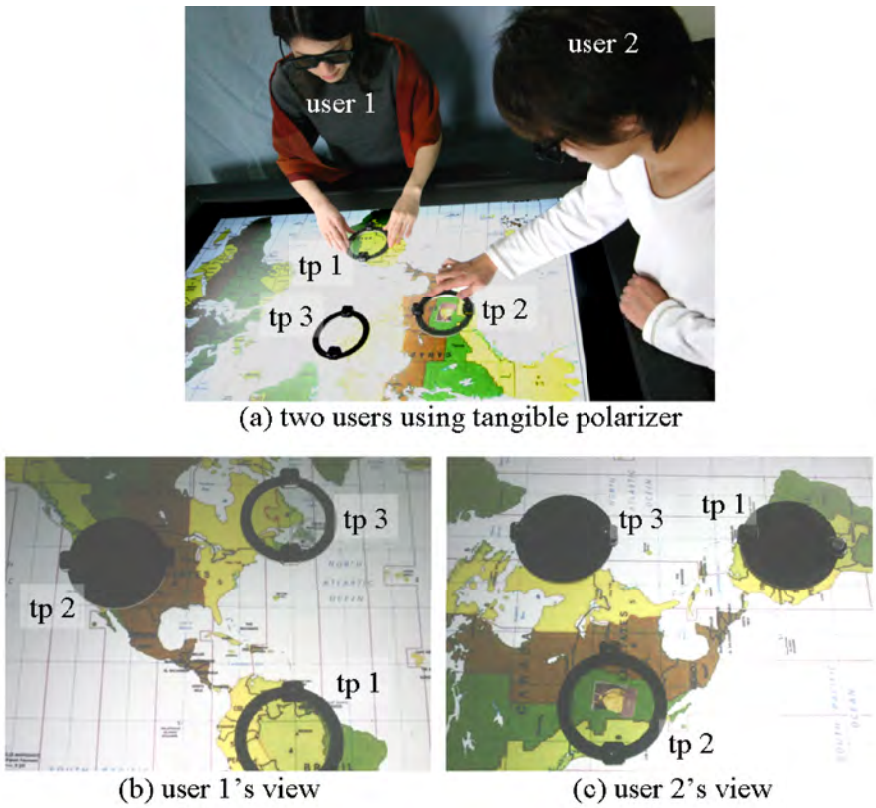


図 3.16: タンジブルな偏光板による可視性制御

の偏光軸は利用者 2 の偏光眼鏡に対して垂直に，tp 2 の偏光軸は利用者 1 の偏光眼鏡に対して垂直になっている．この時，利用者 1 からディスプレイ面は図 3.16(b) のように観察され，tp 1 と tp 3 の内部を見ることはできるが，tp 2 の内部を見ることができない．一方，利用者 2 からは図 3.16(c) のように観察され，tp 1 と tp 3 の内部を見ることができない．このように，各偏光板は図 3.4 におけるプロジェクタ偏光板の代替として働くこととなる．利用者は，これら偏光板を直接手で回し，移動させることによって，ディスプレイ面の可視性を部分ごとに操作することができる．さらに，各偏光板の位置や向きをセンサによって取得すれば，それらに応じて表示情報を変化させることができる．例えば，伏せられたカードをディスプレイに表示し，その上に tp を置いたときだけカードの中身を表示すれば，一方の利用者だけが中身を確認することができる．また，偏光板に小型の回転機構や移動機構を設置することで，利用者の手動操作に加え，システム側から制御することもできる考えられる．

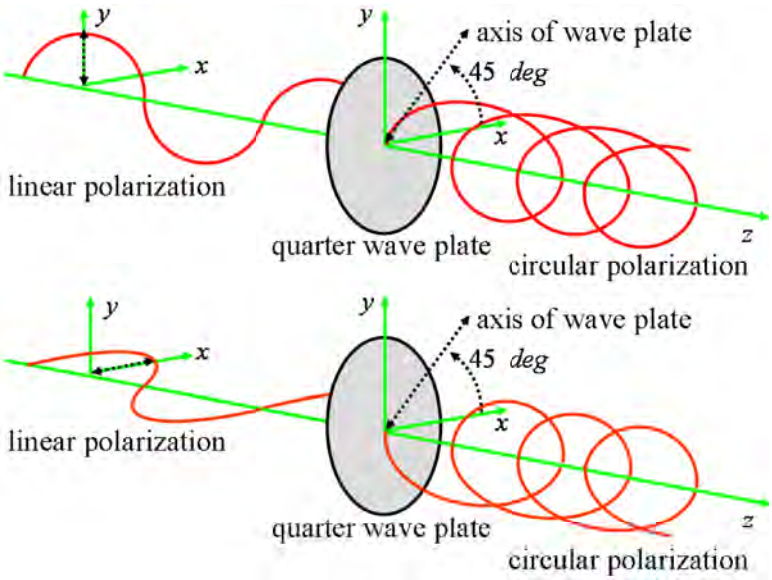


図 3.17: 1/4 波長板の特性

しかし，偏光板をディスプレイ面上に置いた場合，3.4.1 項で示したような，偏光した情報と偏光していない情報を組み合わせた利用方法は実現できない．そこで，タンジブルな直線偏光板の代わりにタンジブルな 1/4 波長板を利用することが考えられる．一般に，図 3.17 に示すように，1/4 波長板の光軸に対して 45 deg または -45 deg 傾いた偏光軸を持つ直線偏光を 1/4 波長板に入射すると，それぞれ右回りまたは左回りの円偏光に変換される．逆に，右回りまたは左回りの円偏光を 1/4 波長板に入射すると，1/4 波長板の光軸に対して，それぞれ 45 deg または -45 deg 傾いた偏光軸を持つ直線偏光に変換される [83]．そのため，2 台のプロジェクタから回転方向の異なる円偏光で情報を投影し，ディスプレイ上に 1/4 波長板を置いて通過させれば，お互いに垂直となる偏光軸を持つ直線偏光に変換される．また，直線偏光に変換された光の偏光軸は 1/4 波長板の光軸に依存するため，1/4 波長板を回転させて向きを変えることで，直線偏光となった投影光の偏光軸も同様に変化させることができる．これらの原理を利用し，一方のプロジェクタから円偏光で外乱画像を投影し，隠蔽したい情報をもう一方から逆回りの円偏光で投影すれば，3.4.1 項と同様に，外乱画像による情報隠蔽が実現できると考えられる．なお，この場合は隠蔽される情報も 1/4 波長板を通過した時点で偏光しているが，外乱画像と偏光眼鏡の偏光軸を垂直にして外乱画像をカットした時に，隠蔽されている情報の偏光軸は偏光眼鏡と平行となっ

て観察できるため問題とはならない．むしろ，隠蔽されている情報が偏光眼鏡で減衰しないため，より可視性制御が容易になる可能性もある．ただし，1/4 波長板の特性は通過する光の波長にも依存することが多いため，実際に試作して見え方を検証する必要がある．

一方，実装したディスプレイでは，視点偏光板の観察方位を得るために 3 次元位置センサを用いたが，テーブル型ディスプレイの周りの方位角のみを計測できれば良いため，安価なタッチセンサやフット圧力センサ，カメラベースのトラッカなどで代用することもできる．特に,「MysteriousPOND」では，ランタンの位置と視点の位置からランタンの所有者を推定していたため，所有者を誤認識することもあったが，カメラを利用したトラッカなどを用いて認識率を向上できれば，より質の高いコンテンツとすることができると考えられる．

また，本章で紹介した利用例では，利用者の位置などを元に偏光板の回転を制御しているが，利用者が直感的に操作できるハンドルを用意することも考えられる．たとえば，矢印などの方位を指し示す実物体をディスプレイ上に設置し，これに連動するようにモータを制御すれば，利用者が手で向きを変えることで，隠れた情報を観察できる立ち位置を容易に操作することができる．

これらの他にも，利用者ごとに視覚以外の情報を適切に提示するデバイスや手法を組み合わせることも有効と考えられる．本章では視覚的な情報のみを対象としているが，コンピュータが提示できる情報は音や触感など多岐に渡る．中でも，視覚に次いで重要とされている聴覚については，通常のコンピュータ環境で利用できるのが一般的であり，複数人での作業においても重要であると考えられる．また，協調作業などで利用者ごとに適切な音声を提供する有効性に関する研究 [84,85] や，テーブル型ディスプレイと組み合わせたエンタテインメントコンテンツ [86,87] などが提案されており，その有効性が示されている．そのため，これらで用いられている手法を提案ディスプレイと組み合わせた環境も考えられる．

3.7 むすび

本章では，テーブルの周りにいる複数の利用者に対して，異なる見せ方で情報を提示することができるテーブル型ディスプレイを提案した．これは，回転偏光フィルタによる可視性制御を応用することで，テーブル面に表示された情報の可視性を制御し，複数の利用

者に異なる輝度で提供する．また，提案ディスプレイを実装し，複数人への情報提示例として，特定利用者に対する情報の開示と隠蔽の制御，および動的な情報分類の可視化を実現した．さらに，被験者実験を通して表示情報の見え方を確認し，より現実的な状況における有用性を議論した．最後に，エンタテインメントへの応用例を示し，今後の展望などについて検討した．今後は，提案したディスプレイを用いたさまざまな応用法が検討され，さらにそれらを用いた際の利用者の振る舞いや作業形態の変化に関する研究が進められることを期待したい．

第4章

複数のディスプレイをシームレスに統合利用する環境

2章と3章では，ディスプレイに表示された情報の可視性を変化させることで複数の利用者に異なる情報を与える手法について述べた．一方，1.2.2項で述べたように，個人的な情報の機密度が高い場合などには，公共のディスプレイに加え，個人的なディスプレイを併用することが有効と言える．そこで，本章では，このような複数ディスプレイ環境を有効利用するための従来の研究と，その問題点について述べる．そして，それらの問題を解決するため，複数のディスプレイをシームレスに統合利用する環境を構築する手法を提案し，その利用可能性を検討した結果について述べる [57–59].

4.1 まえがき

複数のディスプレイを机上に置いての作業や，大画面ディスプレイを備えた部屋でノートPCやタブレットPCなどを併用しての会議など，複数のディスプレイを同時に利用する機会が増えている．このような状況では，共有情報を大型のディスプレイに表示し，個人情報を自身のディスプレイに表示するなど，ディスプレイごとに役割を割り当てて利用することができる．また，広いディスプレイ領域を用いて多くの情報を同時に表示したり，ディスプレイ間をシームレスに接続して利用することにより，さまざまなアプリケーションを用いての協調作業を効率的に行うことが期待されている．

複数のディスプレイを複数人で利用して作業を行う場合は，情報を他の利用者に開示し

たり，ディスプレイ間で情報を見比べたりするため，アプリケーション画面を他のディスプレイに直感的に移動できることが有効である [88]．筆者らも，複数のディスプレイがあちこちに配置された3次元環境で，表示情報が利用者の視点に対して正対するよう補正することで，情報の視認性が向上することを確認している [89]．さらに，入力に対するカーソルの移動も利用者の視点に対して正対させ，ディスプレイ間をシームレスに接続することも有効である [90]．また，カーソルがディスプレイ間を渡る場合には，マウスなどを持ち替えず，単一のデバイスで操作できることも重要である [91]．このように，複数のディスプレイを有効に扱う手法はさまざまに提案されているものの，これらの要件を全て満足し，複数の既存のアプリケーションを用いて現実的な作業を行うことができる複数ディスプレイ環境は，これまでに実現されていない．

そこで本章では，空間に配置された複数のディスプレイを利用者の視点位置から見てシームレスに接続し，複数の既存のアプリケーションを用いて現実的な作業を行うことができる複数ディスプレイ環境の実現方法を提案する．そして，実装した環境のパフォーマンスを測定し，設計の妥当性や遅延がタスクに与える影響，利用可能性などについて考察した結果を報告する．

4.2 関連研究

本節では，複数のディスプレイを有効に利用するための従来の研究を紹介する．また，複数ディスプレイ環境を有効利用するために必要な要素と，理想的なインタフェース環境について議論する．

複数のディスプレイがある環境は複数のコンピュータから構成されることが多い．そのため，利用者がマウスやキーボードを持ち替えることなく複数のディスプレイを利用するためには，全ての入力を適切なコンピュータに転送し，反映する必要がある．そのため，ネットワークを通じて入力を他のコンピュータに転送することで，1つのマウスから複数のコンピュータを操作できる PointRight [92] や mighty mouse [91]，EasyLiving の Mouse Anywhere [93] などが提案されている．

また，このような環境では，情報を見比べたり他人に見せたりするため，ディスプレイ間での容易な情報移動が有効である．ARIS [88] や Gaia [94]，i-Land [95] などは，複数のコンピュータをネットワークで接続し，異なるコンピュータに接続されたディスプ

図 4.1: Wincuts

レイ間でアプリケーションを移動することができる．一方，図 4.1 示す Wincuts [96] や IMPROMPTU [97] 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できる．また，Pick-and-Drop [98] のように，スタイラスを用いてコンピュータ間でアイコンなどをドラッグアンドドロップするというインタフェースも提案されている．

さらに，ディスプレイ同士をシームレスに接続することで，より直感的に情報を認識し，操作することができる．例えば，Distributed Multihead X [99] は，X window system [100] を拡張し，ネットワークを介して描画命令を転送することで，アレイ状に並べたディスプレイを 1 つの巨大なディスプレイとして動作させることができる．Augmented Surface の HyperDragging [101] は，図 4.2 に示すように，物理的に近くにある複数のディスプレイのディスプレイ空間を動的かつシームレスに接続することで，情報をスムーズに移動できる．また，Steerable camera-projectors [102] は，環境内の任意の平面をインタラクティブなスクリーンとし，Augmented Surface と同様にディスプレイ同士を連携して利用できる．

筆者らも，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 Perspective Window [89] を提案している．これは，図 4.3(a) のように，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(Graphical User Interface) 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する．これにより，視点位置と同じ位置からプロジェクタで情報を投影する PHMD(Projective Head Mounted Display) [103] を仮想的に実現していると言える．そのため，情報が複数のディスプレイ

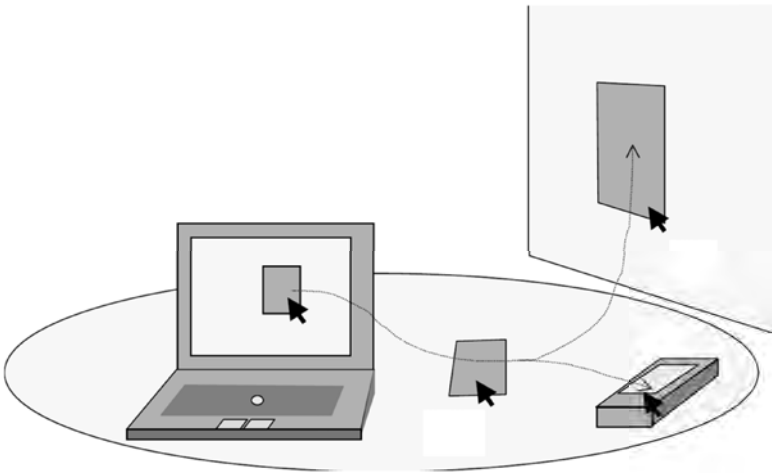


図 4.2: Hyperdragging

にまたがる場合でも，利用者の視点からは図 4.3(b) のように正しく繋がって認識される．

一方，一般的な GUI はディスプレイが利用者の視点に対して正対しているという前提で設計されており，ディスプレイが利用者に対して傾いている場合は表示情報の視認性が低下する．Perspective Window は，このような場合でも利用者の視点からは表示情報が正対して観察される．さらに，利用者の視点やディスプレイの位置姿勢をセンサで検出することで，利用者の視点とディスプレイの位置姿勢が動的に変化しても適切に対応できる．なお，この手法では両眼視差や輻輳を考慮していないため，利用者はウィンドウが 3 次元空間上ではなく，ディスプレイ上にあることがわかり，ウィンドウの形状も完全な矩形として認識できない．しかし，被験者実験により，Perspective Window に表示されたテキストの可読性や，2 次元的な図形の形状・位置関係の把握し易さなどが，通常のウィンドウに比べて向上することは確認されている [104, 105].

情報の操作方法に関しては，複数ディスプレイ環境では直接手の届かないディスプレイもあるため，間接ポインティングが適している．また，情報ウィンドウの表示と同様にディスプレイ間でのシームレスなカーソル移動が有効である．Mouse ether [106] は，グラフィックカードに接続された複数のディスプレイ間の解像度やサイズの差を吸収し，シームレスなカーソル操作ができる．Perspective Cursor [90] 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にカーソルを移動できる．図 4.3(c) は，ディスプレイ間を移動

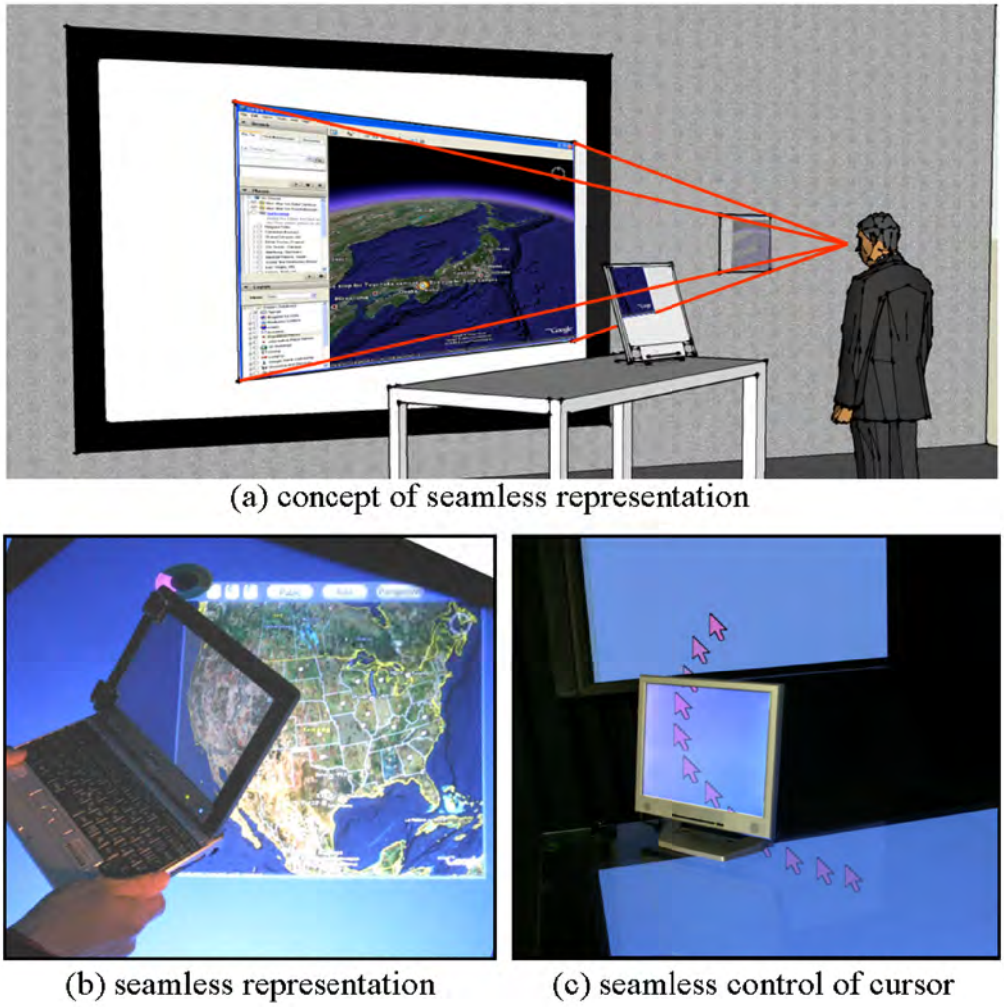


図 4.3: 複数のディスプレイをシームレスに利用する環境

するカーソルを利用者の視点位置から見た図である．また，ディスプレイの位置姿勢に依存せず，デバイスとカーソルの移動方向が一致し，見かけ上一定の C-D(Control-Display) 比でカーソルを操作することができる．なお，ディスプレイ同士の接続関係に無関係にポインティングできるレーザーポインタ [107] も有効と考えられるが，精度が低いことや，本章で実現する環境では主に既存のデスクトップアプリケーションを利用することから，Perspective Cursor を利用する．

これら技術を現実的な場面で利用するためには，実験や特定の環境に特化された専用のアプリケーションだけでなく，一般的な既存のアプリケーションを利用できることも重要

である [97].

しかし，これらの要素を全て同時に包含したシステムはまだ実現されていない．また，ユビキタスコンピューティングの領域では複数のコンピュータを効率的に扱うため，多くのシステムアーキテクチャやフレームワークが提案されている [108] が，本研究のように利用者とディスプレイの位置情報から動的にディスプレイ同士をシームレスに結合した環境を実現できるものはまだ無い．

4.3 サーバクライアント型のアーキテクチャ

本節では，前節で述べた要素を全て満足する環境を実現するために必要なアーキテクチャおよびコンポーネント間の通信方式について議論する．

まず，上記の要素を全て満足する環境に必要な要件を次の 5 点にまとめる．

- ネットワークで接続された複数のコンピュータ上での実現
  複数のディスプレイを扱うためには，環境内の複数のコンピュータを連携して用いる必要がある．なお，利用者が可搬型のノート PC などを個人情報用のディスプレイとして用いることも多いため，比較的性能の高くないコンピュータも含まれると想定する．

- 環境全体での整合性を持った 3 次元位置姿勢管理
  Perspective Window と Perspective Cursor によってシームレスな情報表示と操作を実現するため，移動する利用者の視点とディスプレイの 3 次元位置姿勢を計測し，ウィンドウとカーソルの位置姿勢を算出する必要がある．また，環境全体で整合性を持ってこれらの情報を管理する必要がある．

- 入出力の適切な転送
  複数の利用者が現実的な作業を行うため，各コンピュータで行われた入力を適切なコンピュータに転送し，計算結果を適切なコンピュータへ出力する必要がある．

- 既存のアプリケーションの利用
  一般的なタスクを行うためには，エディタやウェブブラウザといった既存のアプリケーションを利用できることが重要である．

- 適切なネットワーク通信
  ネットワークの遅延によってレスポンス速度が低下しないように，各コンピュータ間で通信されるデータに合わせた適切な通信を行う必要がある．

以下，これらを実現するためのアーキテクチャおよび通信方式について議論する．

4.3.1 アーキテクチャの検討

複数のコンピュータを接続するネットワークにはサーバクライアント型と P2P 型があるが，3 次元位置姿勢情報やアプリケーション画面は，環境全体で整合性を持って管理される必要があるため，前者を用いてサーバマシンでこれらの情報を一元管理する．また，ディスプレイに接続されたクライアントマシンは，性能の高くない PC でも実行できるよう入力を全てサーバへ転送し，結果を受け取ってレンダリングのみを行う．これらを行うソフトウェアをクライアントソフトと呼ぶことにする．

一方，サーバマシンにおいて実行するアプリケーションによっては，処理量が非常に多くなる場合がある．そのため，3 次元位置姿勢情報の管理とアプリケーションの実行を 2 つの専用サーバマシンに分散させ，それぞれ 3D サーバマシンおよびアプリケーションサーバマシンとする．3D サーバマシンは，利用者とディスプレイの位置姿勢をセンサで動的に検知して保有する．そして，GUI オブジェクトの 3 次元位置姿勢と，それらがディスプレイ上に投影された位置姿勢を算出する．また，クライアントソフトからの入力やセンサの変化に対して，GUI オブジェクトの位置姿勢を更新した後，適切なクライアントソフトに情報を通知する．この時，カーソルがウィンドウ上にある場合は，入力をさらにアプリケーションサーバへ転送する．これらの処理を行うソフトウェアを 3D サーバソフトと呼ぶことにする．なお，3D サーバマシン内における GUI オブジェクトの位置姿勢の管理方法は 4.4 節にて詳述する．

アプリケーションサーバマシンは，エディタやウェブブラウザといった既存の一般的なアプリケーションを実行し，実行画面のみをクライアントソフトへ送信する．実行画面を遠隔のコンピュータ上で再現するには，X Window System [100] のように描画命令を送信する手法と画像として送信する手法が考えられる．一般に描画命令を送信する方が高速に通信できるが，X Window System に対応したアプリケーションしか利用できないため，本章では実行画面を画像として送信する手法を採る．また，3D サーバソフトからの入力

をアプリケーションに転送し，実行画面へ反映させる．これらの機能を持つソフトウェアをアプリケーションサーバソフトと呼ぶことにする．この時，アプリケーションサーバソフトは，リモートデスクトップ環境を提供する VNC(Virtual Network Computing) [109] サーバを用いて実装できるため，VNC サーバを実行できるコンピュータであれば OS に依存せずにアプリケーションサーバマシンとして利用できる．

これらを総合したアーキテクチャを図 4.4 に示す．クライアントソフトはディスプレイと 1 対 1 に対応しており，各クライアントマシン上でディスプレイの数だけ実行される．また，各サーバソフトから GUI オブジェクトの座標とアプリケーション画面を受信し，レンダリングと入力の転送を行う．3D サーバソフトは，環境内に 1 台だけ用意した 3D サーバマシンで実行される．これは，利用者の視点やディスプレイの 3 次元位置姿勢をセンサで計測して一括して保持し，仮想平面上のウィンドウとカーソルの 3 次元位置姿勢を算出する．また，クライアントソフトから受信した入力を処理し，必要に応じてアプリケーションサーバソフトへ転送する．アプリケーションサーバソフトは，環境内に 1 つだけ用意したアプリケーションサーバマシン上でアプリケーションとともに実行される．これは，3D サーバソフトから受信した入力をアプリケーションに反映させ，アプリケーション画面をデスクトップ画面ごとクライアントソフトへ送信する．

4.3.2 通信方式の検討

3D サーバソフト-クライアントソフト間: クライアントソフトから 3D サーバソフトへは，カーソルとキーボード入力が送信される．一方，3D サーバソフトからクライアントソフトへは，ウィンドウやカーソルの位置姿勢情報や，色などの属性に関する情報，削除の通知が主に送信される．これらのうち，位置姿勢に関する通信は，利用者の視点とディスプレイの位置姿勢が動いた際や，カーソルを移動する際に送信され続ける．そのため，データの一部がロスしても直ちに次のデータが送られ，ロスの影響は小さい．また，受信の確認が行われるプロトコルでは，データをロスした際に再送し，受信が確認されるまで次のデータが送信されないため，リアルタイムなインタラクションが阻害される可能性が高い．これらのことから，位置姿勢に関するデータ通信は，UDP(User Datagram Protocol) のように，受信の確認や再送を行わない高速な方式が適していると考えられる．一方，その他の通信は，環境全体の整合性のために，再送などによってパケットの到着とその到着順を保証する TCP(Transmission Control Protocol) のような方式が適している．

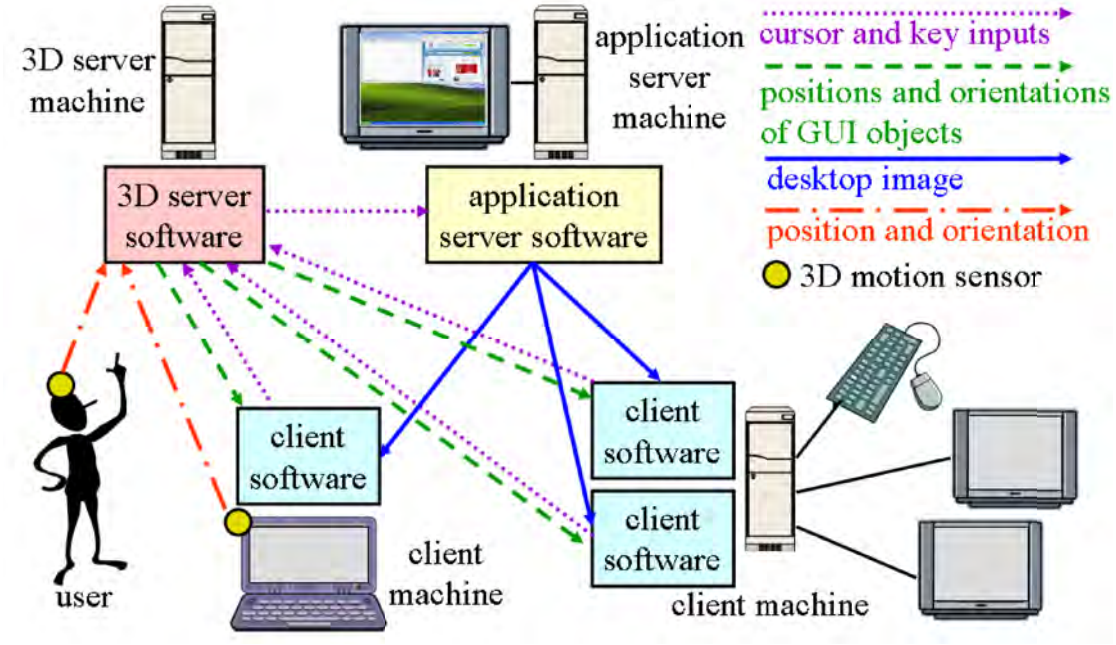


図 4.4: アーキテクチャの概念図

アプリケーションサーバソフト-クライアントソフト間: アプリケーションサーバソフトからクライアントソフトへは，アプリケーションサーバマシンのデスクトップ画面が変化した際に，該当部分を画像として送信する．これは，VNC サーバの機能により適切に圧縮され，送信される．

3D サーバソフト-アプリケーションサーバソフト間: 3D サーバソフトからアプリケーションサーバソフトへはカーソルとキーボード入力が転送される．これは，VNC 接続によって適切に行われる．

4.4 3次元空間上での GUI オブジェクトの管理

本節では，3次元空間内での GUI オブジェクトの管理方法と，ディスプレイへのレンダリング方法について議論する．

複数ディスプレイ上でのシームレスな GUI 環境は，複数の座標系間で適切に GUI オブジェクトの座標を変換し，処理する必要がある．特に重要な座標系として，利用者やディスプレイがある実空間の座標系を G とする．また，クライアントソフトでの座標変換を

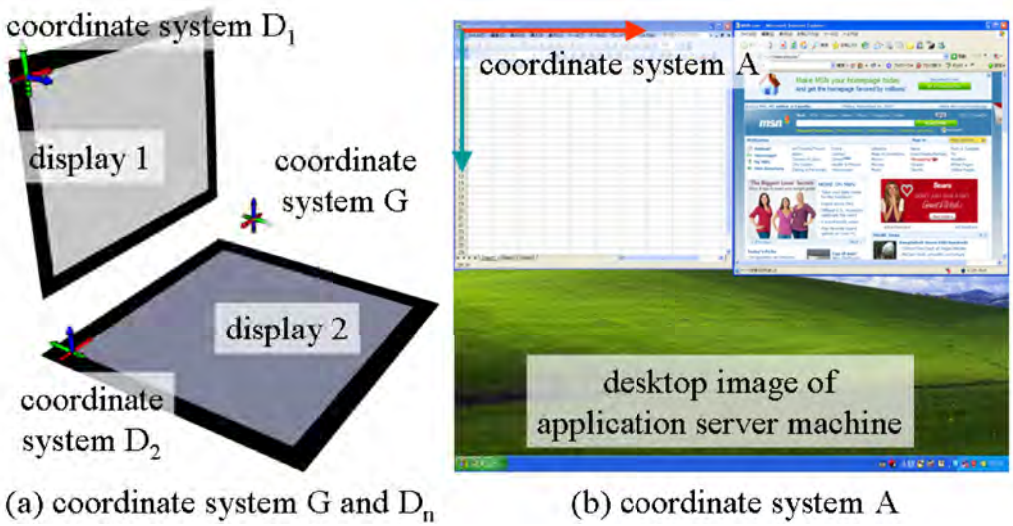


図 4.5: 提案環境で利用される重要な座標系

簡略化するため，各ディスプレイの左上端を原点とした 3 次元座標系を $D_n(n = 1, 2, \cdots)$ として定義する．図 4.5(a) はディスプレイが 2 つ存在する環境での座標系 G および D_n を示している．また，図 4.5(b) に示すように，アプリケーションサーバマシンのデスクトップ画面のピクセル座標系を A とする．

4.4.1 複数ディスプレイ上でのシームレスな情報表示

3D サーバソフト内での座標計算

まず，3D サーバソフトは，実空間内にある利用者の視点とディスプレイの位置姿勢から，仮想的なウィンドウとカーソルの位置姿勢を算出する．そのため，3D サーバソフトは実空間座標系 G における利用者の視点とディスプレイの 3 次元位置姿勢をセンサから取得し続ける．ディスプレイサイズは本試作で実装しているセンサで取得されないため，利用者が入力するものとする．また，固定されたディスプレイの位置姿勢に関しても，初期化時に入力する．これらの情報を用い，3D サーバソフトは利用者の視点と全てのディスプレイの四隅の座標を保持し続ける．

次に，利用者の視点に正対したウィンドウを提示するため，3D サーバソフトは座標系 G 内に，視点に正対した仮想的なウィンドウを作成する．図 4.6(a) は 3D サーバソフト内

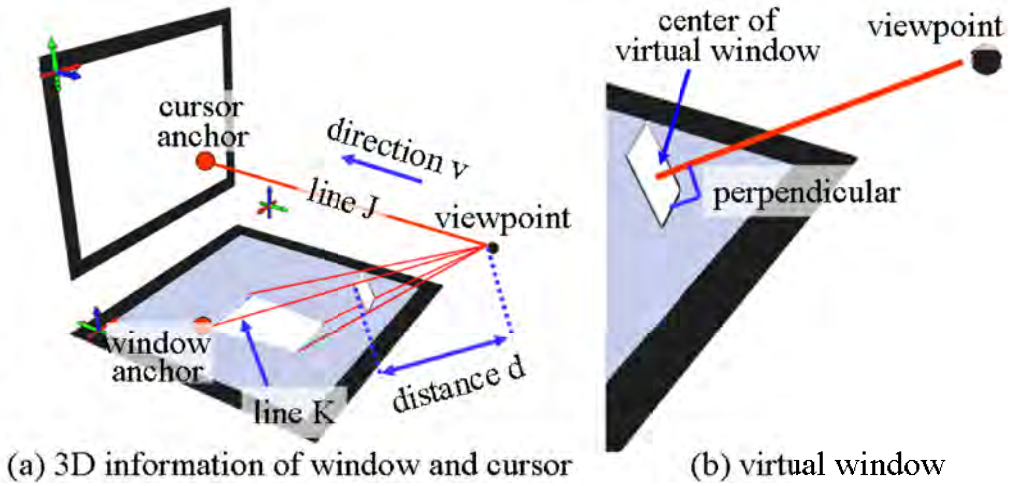


図 4.6: 3D サーバソフト内でのウィンドウとカーソルの位置姿勢情報

で保持されるウィンドウとカーソルに関する情報を示している．3D サーバソフトは，仮想ウィンドウの左上端座標の初期値が与えられると，視点から仮想ウィンドウまでの距離 d と，視点から仮想ウィンドウの左上端を通る直線 K，直線 K とディスプレイの交点をアンカーとして算出する．そして，仮想ウィンドウのサイズと左上端座標，鉛直方向ベクトルから，仮想ウィンドウの中心が視点に対して正対するよう四隅の座標を算出する．図 4.6(b) は仮想ウィンドウ周辺の拡大図である．また，3D サーバソフトは視点から四隅までの線分を延長し，各ディスプレイとの交点を算出することで，ウィンドウが表示されるディスプレイを検出する．

仮想的なウィンドウに加え，3D サーバソフトは仮想的なカーソルを作成する．視点から仮想カーソルへの方向ベクトル v の初期値が与えられると，v を延長した直線 J と，直線 J とディスプレイとの交点をアンカーとして算出する．仮想カーソルに関しては，計算の簡略化のため，3D サーバは方向ベクトル v とアンカーの位置だけを保持し，各頂点の座標を算出しない．そして，カーソルが表示されるディスプレイとして，J と交差するディスプレイを検出する．

利用者の視点位置が移動した場合は，3D サーバソフトはセンサからこれを検知し，直ちに仮想ウィンドウの位置姿勢を更新する．この時，仮想ウィンドウの頂点を 3 次元空間上で固定すると，ディスプレイ上に投影されるウィンドウの位置が移動してしまう．そのため，ディスプレイ上のアンカーを固定し，仮想ウィンドウの位置姿勢を更新する．すな

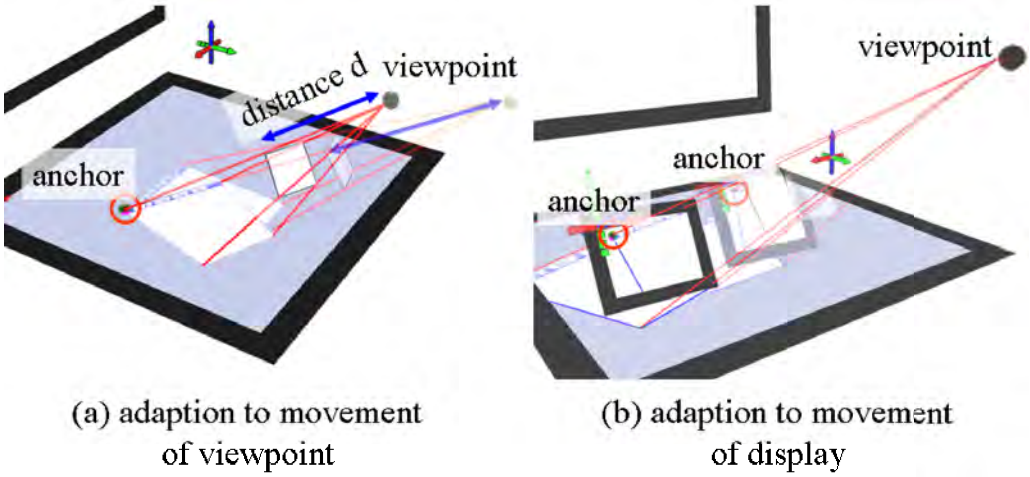


図 4.7: 視点やディスプレイの移動への対応

わち，アンカー位置と移動後の視点位置から，直線 K と仮想ウィンドウの四隅の座標を再び算出し，レンダリングが必要なディスプレイを再検出する．この時，投影されるウィンドウの見かけの大きさを一定に保つため，距離 d は視点が移動する前後で一定とする．視点位置の移動に応じて仮想ウィンドウの位置姿勢が更新される様子を図 4.7(a) に示す．カーソルに関しても，視点移動に対してアンカーを固定し，アンカー位置と移動後の視点位置から方向ベクトル v と直線 J，レンダリングが必要なディスプレイを再計算する．なお，直線 K および J が複数のディスプレイと交差する場合は，視点から最も近い交点をアンカーとする．

一方，ディスプレイが移動した場合は，ウィンドウおよびカーソルのアンカーをディスプレイに固定し，ディスプレイと共に移動させる．図 4.7(b) は仮想ウィンドウがディスプレイと共に移動している様子である．

ディスプレイへのレンダリング

ウィンドウをディスプレイにレンダリングする際には，まず 3D サーバソフトが仮想ウィンドウの左上隅の位置と，左上隅から右上隅および左下隅へのベクトル，視点位置を適切なクライアントソフトへ送信する．この時，3D サーバソフトはクライアントソフトでの処理を簡略化するため，これらのデータをディスプレイのローカル座標系 D_n でのデータに変換して送信する．これらを受信したクライアントソフトは，仮想ウィンドウの内部

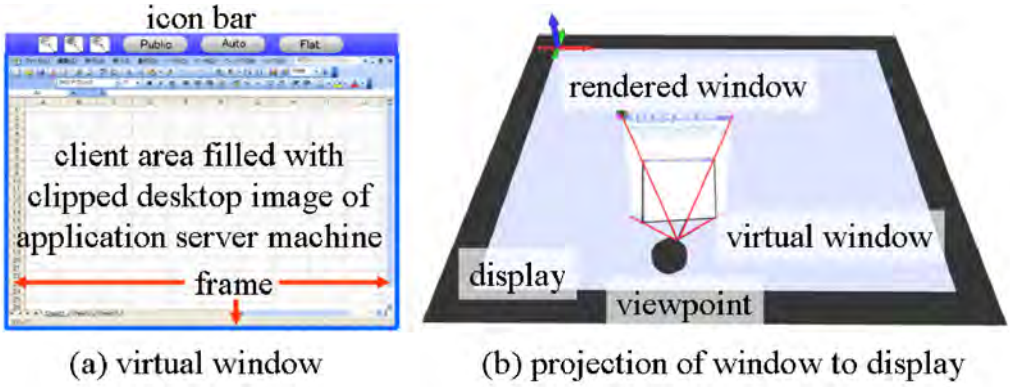


図 4.8: クライアントソフトによるウィンドウの描画

に図 4.8(a) に示すようなアイコンバーとフレーム，クライアント領域を配置する．なお，アイコンバーとフレームの幅と高さ，各アイコンのサイズは環境全体で共通して一定である．また，アプリケーションサーバソフトから送信されるデスクトップ画面からアプリケーション画面を切り取り，クライアント領域に貼り付ける．その後，視点位置に対して仮想ウィンドウをディスプレイに投影して描画する．図 4.8(b) は視点位置と仮想ウィンドウ，描画されたウィンドウの位置関係を示している．

描画時に複数のウィンドウが重なる場合は，仮想ウィンドウの 3 次元位置とは無関係に，優先度が高いウィンドウを前面に描画する．優先度は一般的な GUI と同様に，クリックされたウィンドウが前面に来るよう 3D サーバソフトで管理され，適宜クライアントソフトに送信される．

カーソルを描画する際には，3D サーバソフトが視点位置とカーソルの方向ベクトル v，座標系 G 内での鉛直ベクトルを座標系 D_n におけるデータへと変換した後，クライアントソフトに送信する．これらを受信したクライアントソフトは，図 4.9(a) に示すように，視点から一定の距離 c の位置を先端として仮想カーソルを作成する．仮想カーソルの位置姿勢は，ベクトル v に垂直な平面上に，座標系 G の鉛直ベクトルを基準として決定する．なお，仮想カーソルの形状とサイズ，距離 c は環境全体で共通して一定である．図 4.9(b) は仮想カーソルを拡大した図である．

各サーバはウィンドウとカーソルの移動やアプリケーション画面が変化する度に更新された情報をクライアントソフトへ送信し，クライアントソフトはこれらを受信する度にウィンドウとカーソルを再描画する．ただし，クライアントソフトでの描画は主に 60 Hz

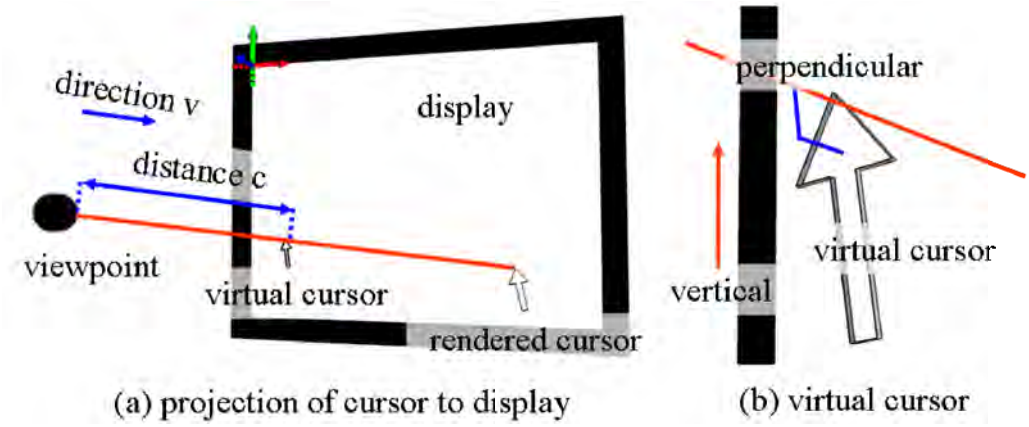


図 4.9: クライアントソフトによるカーソルの描画

で行われるため，各サーバは最大 60 Hz で更新情報を送信する．

4.4.2 複数ディスプレイ上でのシームレスな操作

クライアントマシンに接続されたマウスなどのポインティングデバイスに入力が行われた際，クライアントソフトは「移動」や「クリック」といった入力の種類と x-y 方向への移動量を 3D サーバソフトへ送信する．入力の種類が「移動」である場合，3D サーバソフトは，利用者の視点の周囲に仮想的な球を生成する．そして，マウスの x および y 方向への移動量を，仮想球の経度および緯度方向への回転量に変換し，カーソルの方向ベクトル v を回転させる．また，視点位置と更新後の v から直線 J とアンカー位置を更新する．図 4.10 は 3D サーバソフトがカーソルを移動する様子を示している．これにより，利用者は見かけ上のサイズが一定なカーソルを，一定の C-D 比で操作でき，ディスプレイ間においてもシームレスにカーソルを操作できる．そのため，ディスプレイが利用者に正対していない場合や，ディスプレイ間に間隙がある場合でも高速かつ正確にターゲットをポインティングできる [90]．

カーソルがディスプレイ外に出た場合，3D サーバソフトはアンカーを一時的に削除する．この状態で視点が移動した時は，アンカーが存在しないため，アンカーの代わりにベクトル v を一定に保ち，直線 J を平行移動させる．そして，カーソルがいずれかのディスプレイ上に現れた時にアンカーを再び生成する．

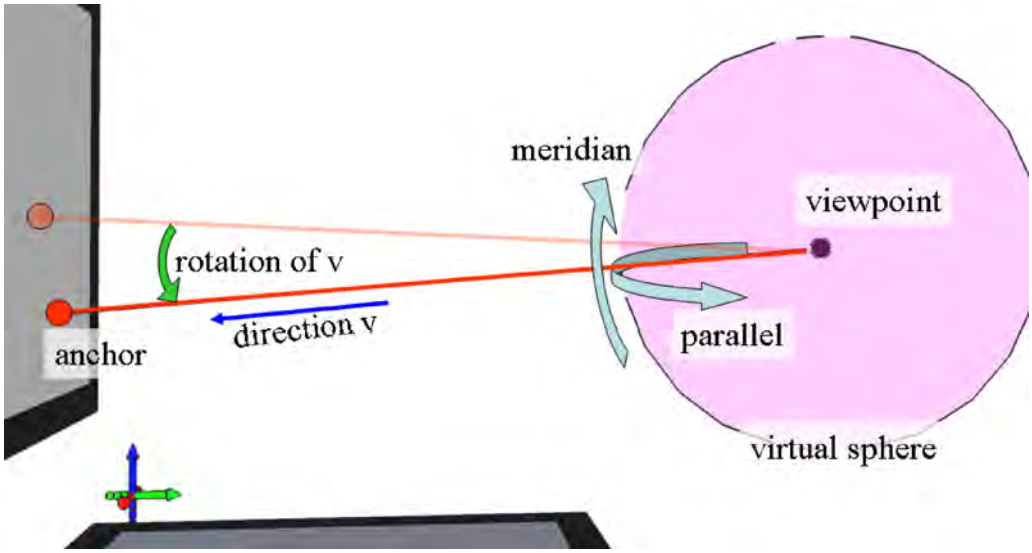


図 4.10: カーソルの移動

なお，Perspective Cursor を移動させる際，仮想的な球面上を移動ではなく利用者に正対する仮想的な平面上で移動させることも考えられる．しかし，[110] では，大画面ディスプレイを利用者の前方に平面上に配置するよりも，利用者の周りに円筒状に配置する方がカーソルの操作性が向上することがわかっている．そのため，本章ではこれを鉛直方向にも拡張した球面上でのカーソル移動方法を用いる．

カーソルがディスプレイ外にある時は，位置の手がかりを示す手法の 1 つである Halo [111] を利用する．Halo はディスプレイに 2 次元空間が表示されている時に，表示領域外にあるオブジェクトを中心とした円弧をディスプレイに表示するものであり，利用者はその曲率からオブジェクト位置を推測できる．本環境では，これを 3 次元空間へ拡張するため，視点を頂点とし，視点からカーソルへの方向を回転軸とした円錐を算出する．そして，回転軸から最も近い位置にあるディスプレイの中心を通るように円錐角を決定し，円錐面とディスプレイとの交線を表示する．図 4.11 は 3 次元に拡張した Halo の概念図を示している．

仮想カーソルの方向ベクトル v が仮想ウィンドウに交差する場合，3D サーバソフトはその交点位置を算出し，入力の種類に応じた処理を行う．アイコンバーとフレーム，クライアント領域の位置は 3D サーバソフトでも算出しており，交点がアイコンバー内にある場合には，クリックやドラッグに応じてウィンドウのサイズ変更や移動などといった各種

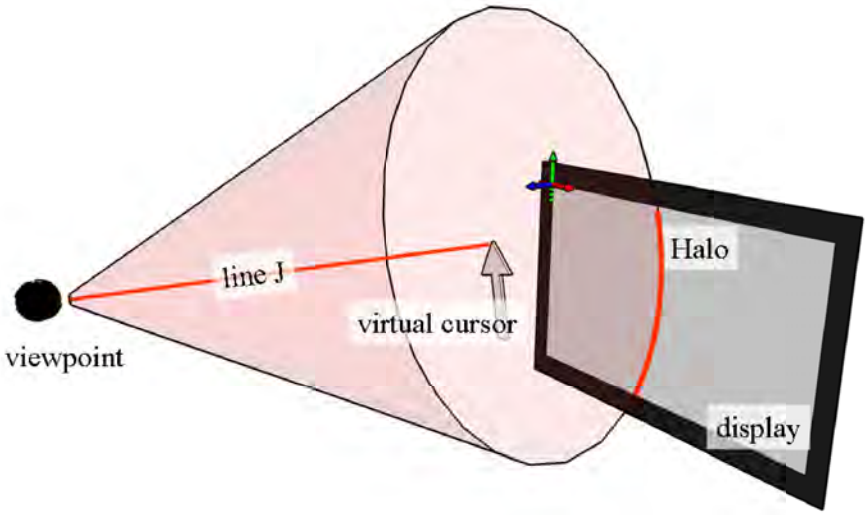


図 4.11: 3 次元へ拡張された Halo

処理を行う．交点がクライアント領域にある場合には，アプリケーションへの入力とし，入力の種類とカーソルの位置をアプリケーションサーバソフトへ送信する．この際，アプリケーションサーバマシンのデスクトップ画面とクライアント領域との対応関係を用い，座標系 G における交点の 3 次元座標を座標系 A におけるピクセル座標へ変換した後に送信する．これを受信したアプリケーションサーバソフトは，入力をアプリケーションへ転送し，アプリケーション画面に変化があった場合には，その領域をクライアントソフトへ送信する．

4.5 試作環境

本章では，4.3 節および 4.4 節で検討した環境を試作した結果について述べる．また，実装環境の有効性や設計の妥当性を検証するため，レスポンス時間と各コンポーネントの負荷を測定した結果について述べる．

4.5.1 実装

アプリケーションサーバソフトには，多くのプラットフォーム用にオープンソースで配布されている RealVNC [112] を利用した．これは，クライアント数に制限が無く，複数の

クライアントを同時に接続することができる．また，クライアントソフトおよび 3D サーバソフトを Microsoft Windows XP SP2 上で Microsoft Visual C++ 2005 を用いて実装した．なお，クライアントソフトの実装には，RealVNC クライアントのソースを改造し，高速な 3D レンダリングが可能な OpenGL [113] を描画に用いた．具体的には，RealVNC クライアントがメモリ上に保持しているデスクトップイメージの一部を，OpenGL でテクスチャとしてウィンドウを描画するよう実現した．これらの間の通信には，4.3.2 節で検討した通信方式を容易に実現できる DirectPlay [114] を利用した．本実装では，クライアントソフトおよび 3D サーバソフトは Windows 上でのみ動作するが，VNC クライアントおよび OpenGL は多くの OS で利用できるため，通信部分を 4.3.2 項で述べたように TCP や UDP によって実現すれば，他の OS へ移植することは難しくない．

また，利用者の視点とディスプレイの 3 次元位置姿勢を計測するセンサとして，Intersense 社の IS-600 Mark II SoniDisc を用いて計測した．センサの計測範囲は，天井に設置したレシーバから鉛直方向に 1.3 m 離れた距離で 3.3 m x 3.3 m であり，利用者の視点と過般型のディスプレイの移動可能範囲はこれに準じる．

4.5.2 実行例

実装環境を用いて 2 人の利用者がエディタとウェブブラウザ，メディアプレイヤ，地図閲覧ソフトを複数のディスプレイ上に自由に配置して利用している様子を図 4.12 に示す．この環境では，各アプリケーションウィンドウが所有者に対して投影変換されて表示されている．また，各利用者はマウスとキーボードを用い，Web ページを見ながらドキュメントを作成するといった一般的な作業を行うことができる．さらに，ディスプレイ間をシームレスに移動するカーソルによって，自由にディスプレイを越えてウィンドウを移動できる．そのため，利用者は手元で操作したいアプリケーションを手元のディスプレイに置き，大きく表示したいアプリケーションを大画面ディスプレイに移動するといったように，各アプリケーションを任意のディスプレイに容易に配置して利用できる．同様に，他の利用者へデータを渡すことや，大画面ディスプレイにウィンドウを移動し，他の利用者と共に推敲や議論をすることも容易である．投影変換表示の ON/OFF や所有者の切り替えなどは，E-conic [89] と同様に，ウィンドウ上部のアイコンバーに配置されたボタンで行われる．

また，図 4.13 は Windows，Mac OS，Linux の各 OS が動作している PC をアプリケー

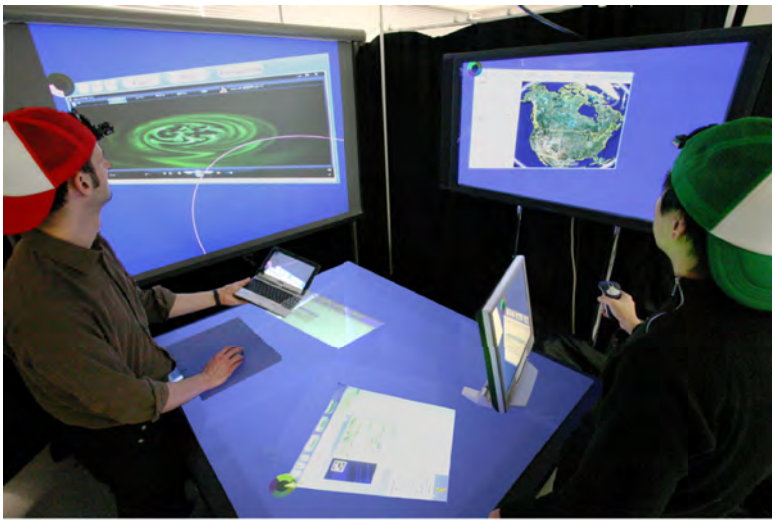


図 4.12: 実装環境の利用風景

(a) Windows XP (b) Mac OS X (c) Fedora Core 6

図 4.13: さまざまな OS 上でアプリケーションサーバソフトを実行した際のクライアントマシンの実行画面

ションサーバマシンとした場合に，あるディスプレイに表示された画面を示している．なお，図 4.13 においては，OS の違いをわかりやすくするため，1 つのアプリケーション画面ではなく，アプリケーションサーバソフトから送信されたデスクトップ画面全体を 1 つのウィンドウに表示している．

4.5.3 レスポンス時間の測定

提案したアーキテクチャでは，入出力がネットワークを介して行われるため，常に遅延が発生する．入出力のレスポンス速度は作業の効率に影響を及ぼすため，これらの遅延を

測定することで，実装環境の有効性を検証する．リアルタイムなインタラクションにおいて特に重要な遅延として，クライアントマシンへの入力に対してディスプレイ上のカーソル位置が更新されるまでの時間と，アプリケーション画面が更新されるまでの時間を測定する．

測定環境

測定環境として，アプリケーションサーバソフトおよび3Dサーバソフトを2台のデスクトップPC (CPU: Xeon 2.8 GHz，Mem: 2.0 GB，OS: Windows XP SP2) 上でそれぞれ実行した．クライアントソフトは測定条件に応じてデスクトップPC (CPU: Xeon 2.2 GHz，Mem: 2.0 GB，OS: Windows 2000 SP4) 上で1台につき1つまたは2つ実行し，ノートPC (CPU: Core Duo 1.66 GHz，Mem: 1.0 GB，OS: Windows XP SP2) 上で1台に1つ実行した．また，ハブを中心としたスター型トポロジのネットワーク上に，デスクトップPCを有線 (1000 BASE-T) で接続し，ノートPCを無線 (IEEE 802.11g) で接続した．

カーソル位置の更新時間

クライアントマシンでマウス入力を行ってから，3Dサーバソフトでカーソル位置が更新され，クライアントソフトへ通知されるまでの時間を測定した．クライアントの接続形態として，ネットワーク速度に対するレスポンス時間の変化を確認するため，有線および無線の2種類で測定した．また，これはLAN内に有線で接続されたデスクトップと，無線で接続されたノートPCを利用することを想定している．さらに，クライアント数に対する変化を確認するため，有線で接続したクライアント数を1から4まで変化させ，各クライアントから異なるカーソルを同時に動かした．なお，クライアントソフトの数が1つまたは2つの時は1台のPCを用い，3つまたは4つの時は2台のPCを用いた．また，各クライアントは等価であるため，その内の1つのクライアントソフトでのみ計測を行った．図4.14はクライアントソフトの数と接続形態ごとに100回ずつ計測した平均と標準偏差を示している．図中のG1からG4は，デスクトップPCでクライアントソフトをそれぞれ1から4つ実行した際の結果を表している．また，W1はノートPC上でクライアントソフトを1つ実行した際の結果である．ただし，クライアントソフトのレンダリングは全ての条件において60 Hz(16 $msec/frame$) で行われていたため，ディスプレイへの表示が完了するまでの遅延はグラフに8 $msec$ 程度加えたものとなる．

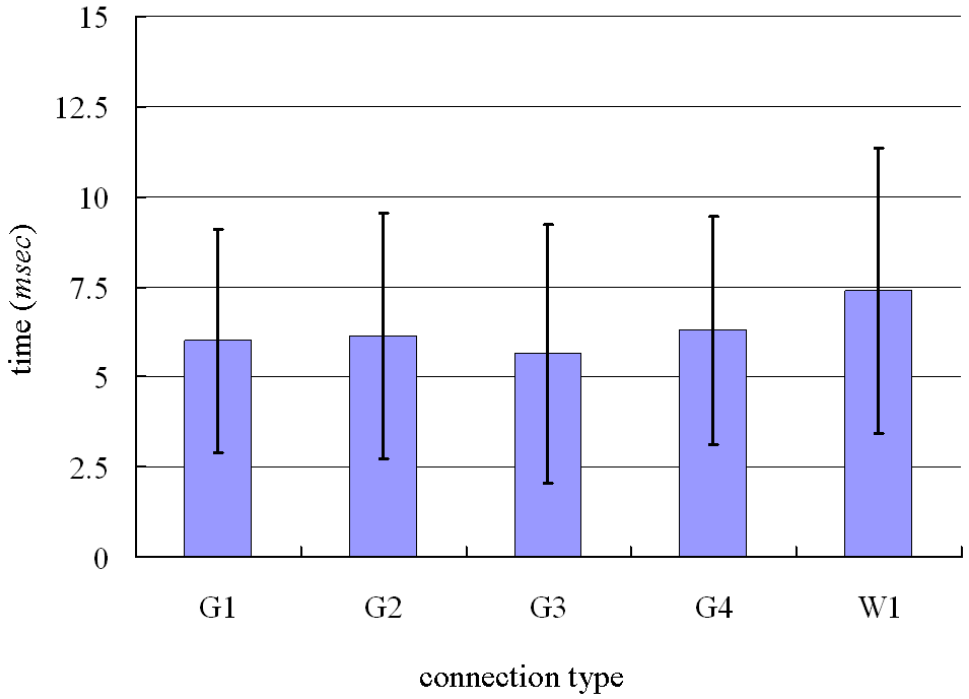


図 4.14: 入力からカーソル位置が更新されるまでの時間

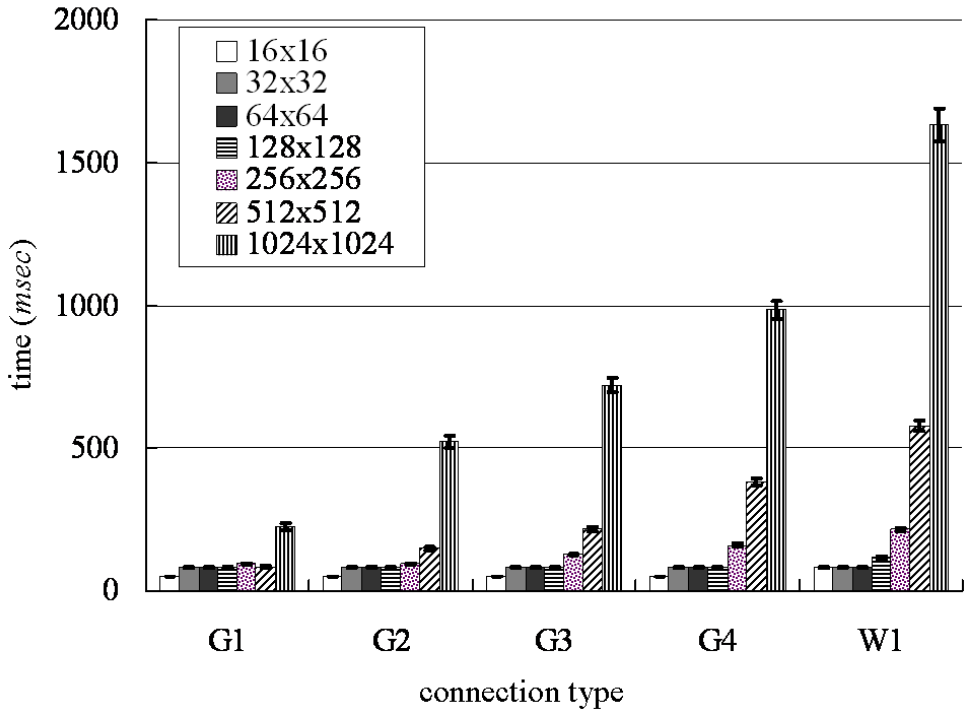


図 4.15: 入力からアプリケーション画面が更新されるまでの時間

図 4.16: 遅延の測定に用いた画像

アプリケーション画面の更新時間

クライアントマシンで入力を行ってから，アプリケーション画面が更新されるまでの時間を測定するため，アプリケーションサーバマシンで画像ビューアを実行し，クライアントソフトでウィンドウ内に表示した．そして，クライアントマシンで行ったキーボード入力によって表示した画像を切り替えた際に，クライアントソフトが画像の更新を完了するまでの時間を測定した．画面の転送が完了した時刻はコンピュータ内部で正確にわからないため，30 fps(33 $msec/frame$) のビデオカメラでディスプレイを撮影し，フレーム数を数えることで測定した．また，これを一般的なエディタ上で 1 文字程度のサイズである 16 $\times$ 16 $pixel$ ピクセルから，1 つのウィンドウ全体程度の $1,024 \times 1,024$ $pixel$ まで各解像度にリサンプリングした画像を用いて測定を行った．図 4.15 は，接続形態および画像のサイズごとに 5 回ずつ測定した平均と標準偏差を示しており，接続形態は前項の実験と同様である．ただし，ビデオカメラの撮影は 33 $msec$ ごとに行われるため，実際の遅延はグラフから平均 16 $msec$ 程度減じたものとなる．また，表示する画像には RealVNC での圧縮効率が低いフルカラーの写真画像を用いた．実際に利用した画像を図 4.16 に示す．

4.5.4 処理負荷の測定

提案する環境の構成ではサーバの負荷を軽減するため，クライアントと 2 種類のサーバに処理を分散している．そのため，クライアントソフトはレンダリングされた画面を各サーバから受け取るのではなく，3D サーバソフトから送られる GUI オブジェクトの 3 次

元位置姿勢情報と，アプリケーションサーバソフトから送られるアプリケーション画面を用いてレンダリング処理を行う必要がある．そのため，クライアントの負荷が大きすぎれば，逆にレスポンス時間は遅くなってしまう．そこで，実装環境における負荷分担の妥当性を確認するため，各コンポーネントでの処理負荷を測定する．主な処理負荷として，3D サーバソフトでカーソルおよびウィンドウの位置姿勢を更新するために必要な時間と，クライアントソフトでレンダリングするための時間を測定する．なお，アプリケーションサーバでの処理量は利用するアプリケーションに依存するため，本論文では測定対象から外すものとする．測定環境は前節と同様のものを用いる．

ウィンドウの位置姿勢を更新するための時間

3D サーバソフト内では，利用者の視点位置やディスプレイの位置姿勢の変化をセンサが検知する度にウィンドウの位置をすべて同時に更新する必要がある．そこで，ウィンドウの位置姿勢を更新するための処理負荷として，複数のウィンドウの位置姿勢を同時に更新するために必要な時間を測定した．具体的には，複数のウィンドウの所有者を同一の利用者に設定し，その所有者の視点位置をセンサが更新した際に，ウィンドウの位置姿勢が更新されるまでの時間を測定した．また，ウィンドウ数を 1 から 30 まで変化させ，ディスプレイ数を 1 から 4 まで変化させて測定を行った．なお，ディスプレイ数を変化させたのは，処理内でウィンドウとディスプレイとの交差判定を行っているため，ディスプレイ数にも処理時間が依存するためである．図 4.17 に，ウィンドウ数およびディスプレイ数ごとに 50 回ずつ測定した平均値を示す．なお，標準偏差は最大で 1.0 $msec$ であった．図中の横軸がウィンドウ数を，縦軸が処理時間を表しており，各折れ線 Dn(n=1, 2, 3, 4) の n がディスプレイ数を表している．

カーソルの位置姿勢を更新するための時間

3D サーバソフトは，センサからデータが送られる度に，また，クライアントマシンでマウスから入力が行われる度にカーソルの位置姿勢も更新する必要がある．そこで，カーソルの位置姿勢を更新するための処理負荷として，複数のカーソルの位置姿勢を同時に更新するために必要な時間を測定した．カーソルの処理量は，センサからデータを受け取った際よりも，マウスから入力が行われた際の方が多いため，複数のカーソルを 1 つのマウスで同時に移動した際の時間を測定した．カーソルがディスプレイ間にある場合は，Halo

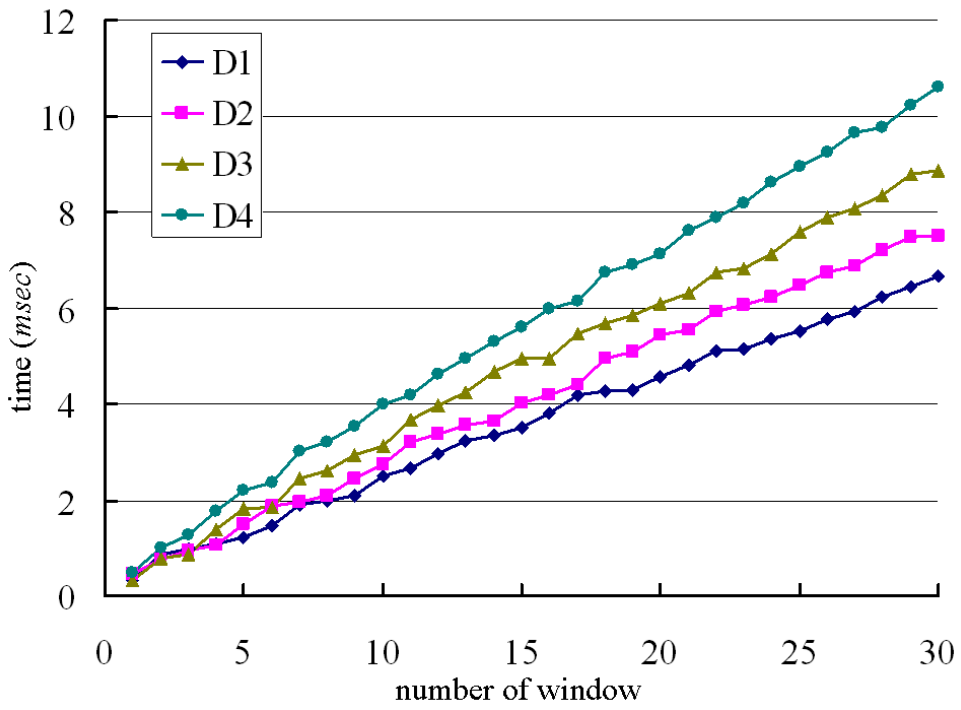


図 4.17: ウィンドウの位置姿勢更新に必要な時間

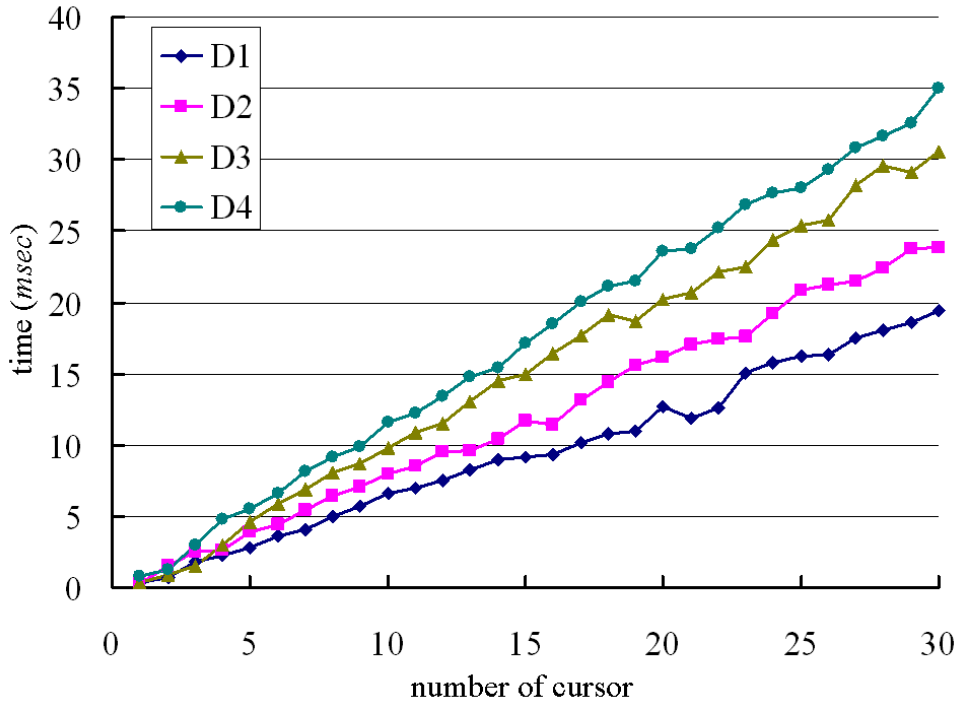


図 4.18: カーソルの位置姿勢更新に必要な時間

に関する計算もカーソルの処理の一部とした．そして，カーソル数を1から30まで変化させ，ディスプレイ数を1から4まで変化させて測定を行った．図4.18は，カーソル数およびディスプレイ数ごとに50回ずつ測定した平均値を示している．なお，標準偏差は最大で5.0 $msec$であった．図中の各軸およびDn(n=1, 2, 3, 4)の意味は図4.17と同様である．

レンダリングをするための時間

クライアントマシンでは，3Dサーバソフトから受け取った3次元位置姿勢情報と，アプリケーションサーバソフトから受け取ったアプリケーション画面を用いてレンダリングを行う．この処理をクライアントマシンが十分に処理できるかどうかを確認するため，レンダリングに必要な処理時間を測定した．ただし，レンダリングがOpenGLによって行われることから，正確なレンダリング時間を測定することはできないため，フレームレートを測定した．また，クライアントマシンには，前節の測定環境内で最も処理性能およびレンダリング性能の低いノートPCを用い，ウィンドウ数およびカーソル数を各々1から10まで変化させて測定した．その結果，ウィンドウ数およびカーソル数を共に10まで増やしても，フレームレートは60 Hzのままであった．これは，クライアントマシンのディスプレイのリフレッシュレートに等しく，十分に高速であると言える．

4.6 考察

本節では，4.5.3節，4.5.4節で行った性能測定の結果から，その影響と利用可能性について議論する．さらに，アーキテクチャやインタフェースの改良に関する可能性について検討する．

4.6.1 遅延の影響

図4.14からわかるように，入力に対するカーソルの位置更新が，全ての接続形態において平均10 $msec$以下で完了しており，レンダリング時間を加味しても20 $msec$以下であることがわかる．一般に，カーソル操作やタイピングのレスポンス時間は，50から150 $msec$以下が望ましいとされており [115]，カーソル操作においては十分なレスポンス速度が実現されていると言える．表示情報の位置姿勢更新はセンサの変化を検知した際にも発生す

るが，実装環境で用いたセンサの遅延は 50 $msec$ 程度であるため，この時の遅延の合計は 70 $msec$ 程度となる．これに対して，VR(Virtual Reality) の分野において，非透過型 HMD(Head Mounted Display) を装着した利用者の視点を追従する場合，80 $msec$ 以上の遅延がタスク効率を下げる可能性が指摘されている [116]．これよりも短い遅延の影響は明らかにされていないため，検証する余地はあるものの，利用者が視点位置を移動しながら作業を行うことは少ないため，センサの遅延の影響は小さいと考えられる．一方，クライアント数が増えても更新時間が変わらないのは，マウスからの入力頻度に送信時間が十分速いためと考えられる．そのため，同時にカーソルを操作するクライアント数が増えた場合は、更新時間が増える可能性があるため，今後シミュレーションなどによって検証する必要があると考えられる．

一方，図 4.15 からわかるように，入力から 16 × 16 $pixel$ の領域を更新するための遅延はいずれも 100 $msec$ 以内であり，文字のタイピングを行うには十分なレスポンス速度と言える．しかし，1,024 × 1,024 $pixel$ の広い領域を更新するためには，有線で最大 1,000 $msec$ 程度，無線ではクライアントマシンが 1 台でも 1,500 $msec$ 程度の遅延が見られる．そのため，動画再生ソフトのように画面全体が毎秒 1 回以上更新されるアプリケーションを利用するのは困難となる．ここで，レスポンス時間はクライアント数に依存しているため，クライアント数とレスポンス時間について単回帰分析を行った．なお，解像度が小さい場合はカメラのフレームレートによる誤差の影響が大きいため，512 × 512 $pixel$ および 1,024 × 1,024 $pixel$ の条件において解析した．その結果，共に相関係数 0.99 以上の比例関係が見られたため，VNC は各クライアントに対して同じ画像を個別に転送していると言える．そのため，アプリケーションサーバマシンのデスクトップ画面のうち，各クライアントソフトが必要とする領域を 3D サーバソフトがアプリケーションサーバソフトに通知し，各クライアントソフトが必要とする領域のみを転送すれば，レスポンス速度はクライアント数に依存しない．そのため，有線の場合は最大 250 $msec$ 程度でウィンドウ全体を更新でき，多くのアプリケーションを利用できる．一方，クライアントマシンが無線で接続されている場合，動画などのアプリケーションを扱うことは難しいものの，画面全体を更新することの少ないエディタやワークシートなどのアプリケーションを利用することは十分可能と考えられる．また，動画のように，ウィンドウ全体を更新し続けるアプリケーションでは，信頼度が低い代わりに高速でマルチキャストが可能な UDP を利用する手法も考えられる．

4.6.2 各コンポーネントでの処理負荷

図4.17からわかるように，3Dサーバ内でウィンドウの位置姿勢更新にかかる処理時間は，ウィンドウ数とディスプレイ数にほぼ線形的に依存している．そのため，ウィンドウ数をw，ディスプレイ数をd，サーバの性能に依存する係数$Kn(n=1,2)$とすると，処理時間$t(w,d)$は

$$t(w,d) = (K1 + K2 \times d) \times w \tag{4.1}$$

で表されると考えられる．実際に最小二乗法で各係数を算出した結果，$K1 = 0.179$および$K2 = 0.0444$となり，誤差分散は0.0503であった．

同様に，図4.18から，カーソルの位置姿勢更新にかかる処理時間は，カーソル数とディスプレイ数に線形的に依存している．また，カーソル数をc，ディスプレイ数をd，サーバの性能に依存する係数$Kn(n=3,4)$とすると，処理時間$t(c,d)$は

$$t(c,d) = (K3 + K4 \times c) \times c \tag{4.2}$$

で表される．実際に最小二乗法で各係数を算出した結果，$K3 = 0.455$および$K4 = 0.176$となり，誤差分散は0.361であった．

これらの結果から，3Dサーバ内で行われる処理にかかる時間$t(w,c,d)$は，

$$\begin{aligned} t(w,c,d) &= (K1 + K2 \times d) \times w \\ &\quad +(K3 + K4 \times d) \times c \end{aligned} \tag{4.3}$$

で表される．ここで，一般的なディスプレイのリフレッシュレートである60 Hzでセンサやカーソル入力を動作させる場合，$t(w,c,d) < 16.7$となる必要がある．$w,c,d = 7$程度で$t(w,c,d) = 16.2$となることから，4-5名程度で利用する場合でも3次元データの処理は非常に処理量が多く，アプリケーションと分離する効果は大きいと考えられる．

一方，4.5.4節の結果から，クライアントソフトでのレンダリング処理は，カーソルおよびウィンドウ数が10以下の条件において，グラフィックス用ハードウェアを持たない一般的なノートPC上で十分高速に実行できることがわかる．一般的に1つのディスプレイ上にウィンドウを10以上配置して利用することは少ないため，クライアントソフトの処理量は十分に小さいと言える．これらから，3D位置姿勢に関する処理とアプリケーショ

ンに関する処理を分けたことによって，総合的にレスポンスが悪化することは無いと言える．

本章ではアプリケーションサーバでの処理負荷を測定対象としなかったが，近年のコンピュータは複数のエディタやブラウザなどを同時に立ち上げて利用することも多いため，数個程度のアプリケーションを同時に扱うことはできると考えられる．各々が処理負荷の高いアプリケーションを複数同時に利用する場合も考えられるが，提案したアーキテクチャは 3D サーバマシンととアプリケーションサーバマシンを分離しているため，アプリケーションサーバマシンを複数に分割し，さらに処理分散を行うことも容易である．この時，環境全体の総合的な通信量は変わらないため，ネットワークによるレスポンス速度は変化しない．

4.6.3 アーキテクチャの拡張

実装環境は，複数のクライアントマシンへの同時入力に対し，3D サーバソフトが適切に処理を行うことで，複数のカーソルを同時に操作することができる．ただし，現行の OS は，複数カーソルによるインタラクションに対応していないため，複数のカーソルでウィンドウ内のアプリケーションを同時に操作することができない．しかし，近年は，多人数で同時に操作できる大画面ディスプレイに関する研究が多く行われており，Microsoft Surface [117] や EnterTaible [22] のように複数点同時入力に対応したコンピューティング環境も発表されている．また，複数の点入力をサポートする OS やフレームワークも開発されている [35, 118, 119]．そのため，アプリケーションサーバマシンの OS が複数人による入力に対応すれば，現在のアーキテクチャで対応できる可能性が高い．

実装環境では，クライアントソフトの負荷は十分に小さいと言えるが，さらに低性能な PDA などの端末を用いる場合はレンダリングが困難となる可能性もある．このような場合は，3D サーバソフトでレンダリングを行い，クライアントソフトへ送信する手法が考えられる．また，近年は OpenGL ES [120] など，モバイルデバイス上で動作する高速な 3D レンダリングエンジンも開発されており，これらを利用する手法も考えられる．

4.6.4 インタフェースの拡張

実装環境では，一般的なマウスとキーボードを入力インタフェースとして用いたが，複数のディスプレイを扱う環境ではより有効な入力手法が考えられる．例えば，複数のディスプレイを用いることで，カーソルが移動できる領域が非常に広く，マウス移動による利用者への負荷が大きくなるため，視線によるカーソル移動を組み合わせて使うことなどが有効である [121]．また，ジェスチャによるインタラクションを用いることで，アウェアネス情報を他の利用者に与えることができるため，複数人での作業時に有効であると考えられる [122]．そのため，これらのマルチモーダルインタラクションに対応できるフレームワークとして拡張することが考えられる．

一方，近年は周囲の環境のいたるところにセンサやディスプレイを配置することで，利用者からコンピュータへのインタラクションだけでなく，コンピュータが利用者の状態を読み取り，それに応じた情報提示などを行うアンビエントインタフェース環境 [123] が注目されている．複数ディスプレイを用いる環境では，利用者の周囲に数多くのディスプレイが配置されていることも多いため，アンビエントインタフェースの概念を導入することで，より有効な環境を構築できる可能性がある．例えば，各利用者の位置情報などを用いて，利用者から見えない位置を避けるようにウィンドウを移動させることや，全てのディスプレイを無駄なく使うようウィンドウを配置することなど，環境に自律的な動作を負荷すること考えられる．また，環境中の好きな場所に情報を投影できる everywhere displays projector [124] や，何らかの移動機構を取り付けたディスプレイを用い，ディスプレイ自体が自動的に適切な位置に移動することも考えられる．

4.6.5 ユーザビリティ

本章では，既存のインタフェース技術である Perspective Window と Perspective Cursor などを実際に利用できる環境として実現することを目的とし，主に実現時のパフォーマンスについて評価した．これらインタフェース技術の有効性については [90, 104] において既に述べられているが，実現した環境でのユーザビリティに関しては更なる評価が必要である．たとえば，複数の Perspective Window で既存のアプリケーションを実行し，ドキュメント作成などの現実的なタスクを行った際の作業効率や，利用者の疲労などが考えられる．また，実現したシステムを複数人で用いた場合において，自身のウィンドウの見

分けやすさや, 他の利用者が所有するウィンドウの影響，利用者の行動なども調べる必要がある．さらに，[90] において Perspective Cursor はディスプレイ間に間隙が無い環境で評価されているため，ディスプレイ間に間隙がある場合の作業効率や，3 次元に拡張した Halo の有効性の検証も重要と考えられる．そのため，今後は被験者実験を通してこれらの評価を行っていく必要があると言える．

4.6.6 各利用者に対する最適な情報提示の実現

本章で述べた複数のディスプレイをシームレスに利用する環境においては，複数人が 1 つの情報を同時に見ながら作業することは考慮されていない．例えば，Perspective Window は複数人に対して同時に適切な変形をすることができない．そこで，2 章および 3 章で述べたような情報の可視性制御手法を応用することが考えられる．具体的には，各利用者に対して適切に変形したウィンドウを重畳表示し，それぞれを対応する利用者のみに見せることで，各利用者に対して適切に変形したウィンドウを同時に提示することができる．また，GUI オブジェクトが利用者の視点位置に追従して変形した場合，異なる利用者のウィンドウが重なって邪魔になりやすいが，可視性制御を用いて邪魔なウィンドウを除外することができる．このように，複数ディスプレイ環境においても，情報の可視性制御を有効利用することで，新たな展開を期待することができる．

4.7 むすび

本章では，複数人で複数のディスプレイをより有効に使う方法について検討し，それらの要素を包含する環境として，複数のディスプレイをシームレスに利用できる GUI 環境について述べた．そして，アーキテクチャやデータフロー，通信方式などを含む実現方法を提案した．さらに，試作した環境を用いて，複数人で既存のさまざまなアプリケーションを利用できることなどを確認した．また，試作した環境での入出力に関するレスポンス時間と，各コンポーネントでの処理負荷などを測定し，その妥当性や有効性について検討した．今後は，ユーザビリティの詳細な評価や，より良いアーキテクチャの検討などの研究が継続されることを期待したい．

第5章

結論

本論文では，複数人で共有ディスプレイを利用する際に，個人的な情報や視点位置に応じた情報の表示法など，各利用者にとって適切な情報提示を実現する環境を構築するための技術を提案し，その利用可能性などについて検討した結果について述べてきた．まず，共有ディスプレイを利用する環境で個人的な情報を提示する手法は，単一のディスプレイを用いる手法と複数のディスプレイを併用する手法の2つの大きなカテゴリに分類できることと，各々の従来研究の問題点について述べた．前者のカテゴリに関して，複数人に対して単一のディスプレイ面上で異なる情報をフレキシブルに提供できる手法として，回転偏光板を用いた可視性制御手法と，それを応用したテーブル型ディスプレイについて提案した．また，光学特性の調査や被験者実験を通してその利用可能性や応用分野について検討した．一方，後者に関して，複数のディスプレイをより効率的に利用するため，それらをシームレスに統合利用する環境の構築手法を提案した．そして，そのパフォーマンスを評価し，利用可能性や拡張構成などについて検討した．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，単一のディスプレイ面上で複数の利用者に対する情報の可視性を変化させることで，各々に対して異なる情報を提示する従来の手法を紹介し，その問題点について述べた．そして，それらの解決手法として回転偏光板を利用した情報の可視性制御手法を提案した．これは，プロジェクタの前方に回転機構を取り付けた直線偏光板を設置し，プロジェクタからの映像を偏光として偏光を崩さないスクリーンに投影するものである．投影された情報を別の直線偏光板を通して観察すると，観察される輝度は偏光板同士の相対角度に応じて減衰するため，複数の利用者に異なる輝度で情報を提供できる．また，

プロジェクタ前方の偏光板を回転させることで，観察される輝度を任意に制御できる．次に，テーブル型のディスプレイに本手法を適用し，原理に対する実際の輝度減衰率を，観察方向や偏光板の向きごとに測定した．その結果から誤差の原因とその影響の考察し，利用方法や拡張構成などについて議論することで，特にテーブル型ディスプレイにおける有効可能性を示した．

第3章では，情報の可視性を変化させることで，複数人に対して異なる情報を提示できるテーブル型ディスプレイの従来システムを概観し，それらの問題点を解決するため，第2章で提案した回転偏光フィルタによる情報可視性の制御手法を応用し，複数の利用者に対して異なる可視性で情報を提供するテーブル型ディスプレイを提案した．提案ディスプレイは，回転偏光フィルタを具備したプロジェクタに加え，これを具備しないプロジェクタを備えており，これらから投影される情報を組み合わせることで，さまざまな情報表現を実現できる．その例として，テーブルの周りにいる複数の利用者に対して情報の開示と隠蔽を制御する手法と，特定の利用者にのみ観察できる情報の分類を提示する手法について述べた．また，被験者実験を通して，情報の開示と隠蔽の実現性を確認し，偏光板同士の角度と各プロジェクタから投影する情報の輝度に対する情報の見え方を観測した．その結果から，提案ディスプレイの柔軟性や限界，応用分野として3から5名程度で行う協調作業やエンタテインメントにおける有効性を議論した．そして，その応用例の1つであるメディアアート作品「MysteriousPOND」について述べ，最後に，提案ディスプレイの拡張や今後の展望について議論した．

第4章では，共有ディスプレイを利用する環境で個人的な情報を提示するもう1つの手法として，複数のディスプレイを利用する環境に注目し，まず，それらの環境を有効利用するための従来研究を紹介した．そして，複数のディスプレイ空間を利用者の視点位置に対してシームレスに接続する技術を統合し，なおかつ既存のアプリケーションの利用や，複数人での利用に対応したシームレスな複数ディスプレイ環境について議論した．さらに，ソフトウェアおよびハードウェアアーキテクチャや，データフロー，コンポーネント間の通信などを検討し，シームレスな複数ディスプレイ環境の実現手法として提案した．これは3次元位置姿勢情報を扱うサーバとアプリケーションを扱うサーバ，およびクライアントの3つのコンポーネントからなり，各利用者に対して一般的なマウスとキーボード入力を提供することができる．また，アプリケーションを扱うサーバとして，さまざまなOS用に配布されているVNCを用いているため，このサーバを入れ替えるだけでさまざまな

OS で実行される一般的な既存のアプリケーションを利用できる．次に，実装環境においてネットワーク負荷や各コンポーネントでの負荷などを測定した結果から，多くのタスクに対して十分なレスポンスで作業できることや，比較的性能の高くないノート PC をクライアントとして利用できることなどを確認した．さらに，ボトルネックの解消やより多くの利用者への対応といったアーキテクチャの改良や応用，今後の展望について述べた．

コンピュータを用いた作業形態は，用途に合わせて常に多様化している．しかし，日常で一般の利用者がコンピュータを利用する場面では，デスクトップ画面の前に座って作業を行う形態が長くに定着していた．このような状況の中，テーブル型のディスプレイや複数のディスプレイに囲まれた環境は日常に浸透し始めており，一般消費者のコンピューティング環境に新たな形態を生み出す可能性を見せている．しかし，これらの環境に関する研究は始まったばかりであり，本論文ではその最も基礎となる環境構築に注目してきた．そのため，これらの上で複数人が有効に利用できる GUI のデザインや，協調作業や対戦といった作業形態に応じたアプリケーションの設計指針など，より上位のレイヤに関する課題には興味深いものも多い．今後，このような研究が進められるにあたり，本研究が一つの礎として貢献することを願う．

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，大阪大学サイバーメディアセンター 竹村 治雄 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，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 藤原 融 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.

本研究を遂行するにあたり，共同研究者として，共有ディスプレイを用いた技術に関して数々の御助言を頂いたブリストル大学 Sriram Subramanian 博士，複数ディスプレイ環境に関して有益な御助言，ご協力を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.

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，ソニー・エリクソン・モバイルコミュニケーションズ株式

会社 大森 健太 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 Sandeva Goonetilleke 氏，丹羽 真隆 氏，山口 徳郎 氏，北岡 伸也 氏，築谷 喬之 氏，坂本 龍哉 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に心から感謝と御礼を申し上げます．

参考文献

[1] G.A. Miller. The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *The Psychological Review*, Vol. 63, No. 2, pp. 81–97, 1956.

[2] N. Cowan. The magical number 4 in short-term memory: a reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, Vol. 24, pp. 87–185, 2001.

[3] 垂水浩幸. グループウェアとその応用—ネットワークとマルチメディアトラック. 共立出版, 2000.

[4] 大石巌, 田村徹, 畑田豊彦. ディスプレイの基礎. 共立出版, 2001.

[5] M. Stefik, 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*, Vol. 30, Issue 1, pp. 32–47, 1987.

[6] 堀川桂太郎, 及川利直, 簗栄司. 協調作業支援環境 COGENT の開発と運用. 情報処理学会研究報告, Vol. 96, No. 20, pp. 13–18, 1996.

[7] B.A. Myers, H. Stiel, and R. Gargiulo. Collaboration using multiple PDAs connected to a PC. In *Proceedings of Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, pp. 285–294. ACM, 1998.

[8] N.A. Streitz, J. Geisler, T. Holmer, S. Konomi, C.M. Tomfelde, W. Reischl, P. Rexroth, P. Seitz, and R. Steinmetz. i-LAND: an interactive landscape for creativity and innovation. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp. 120–127. ACM, 1999.

[9] S. Izadi, H. Brignull, T. Rodden, Y. Rogers, and M. Underwood. Dynamo: a public interactive surface supporting the cooperative sharing and exchange of media. In *Proceedings of Symposium on User Interface Software and Technology (UIST)*, pp. 159–168. ACM, 2003.

[10] D.M. Russell and A. Sue. Large interactive public displays: use patterns, support patterns, community patterns. In *Proceedings of CSCW Workshop on Public, Community and Situated Displays*, 2002.

[11] T. Prante, C. Röcker, N. Streitz, R. Stenzel, C. Magerkurth, D. Alphen, and D. Plewe. Hello.wall - beyond ambient displays. In *Video and Adjunct Proceedings of International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp)*, pp. 277–278, 2003.

[12] D. Vogel and R. Balakrishnan. Interactive public ambient displays: transitioning from implicit to explicit, public to personal, interaction with multiple users. In *Proceedings of Symposium on User Interface Software and Technology (UIST)*, pp. 137–146. ACM, 2004.

[13] J.P. Birnholtz, T. Grossman, C. Mak, and R. Balakrishnan. An exploratory study of input configuration and group process in a negotiation task using a large display. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp. 91–100. ACM, 2007.

[14] E.M. Huang. Design and analysis of groupware for large displays. In *CHI extended abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1118–1119. ACM, 2005.

[15] 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. 69–92, 2007.

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

[17] C. Shen, N. Lesh, and F. Vernier. Personal digital historian: story sharing around the table. *Interactions*, Vol. 10, No. 2, pp. 15–22, 2003.

[18] H. Koike, Y. Sato, and Y. Kobayashi. Integrating paper and digital information on EnhancedDesk: a method for realtime finger tracking on augmented desk system. *Computer Human Interaction*, Vol. 8, Issue 4, pp. 307–322, 2001.

[19] SMART Table. http://www2.smarttech.com/st/en-us/products/smart+table/default.htm.

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

[21] O. Omojola, E.R. Post, M.D. Hancher, Y. Maguire, R. Pappu, B. Schoner, P.R. Russo, N. Gershenfeld, and R. Fletcher. An installation of interactive furniture. *IBM Systems*, pp. 861–879, 2000.

[22] E. Loenen, T. Bergman, V. Buil, K. Gelder, M. Groten, G. Hollemans, J. Hoonhout, T. Lashina, and S. Wijdeven. Entertaible: a solution for social gaming experiences. In *Proceedings of Intelligent User Interfaces Conference (IUI)*, pp. 16–19. ACM, 2007.

[23] P. Steurer and M.B. Srivastava. System design of smart table. In *Proceedings of International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, p. 473. IEEE, 2003.

[24] P. Tandler, T. Prante, C.M. Tomfelde, N.A. Streitz, and R. Steinmetz. Connectables: dynamic coupling of displays for the flexible creation of shared workspaces. In *Proceedings of Symposium on User Interface Software and Technology (UIST)*, pp. 11–20. ACM, 2001.

[25] 新西誠人, 伊賀聡一郎, 桜井彰. Interactive station: デジタル情報に手書きできるテーブルトップコンピュータ. ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp. 245–248, 2007.

[26] D. Wigdor, C. Shen, C. Forlines, and R. Balakrishnan. Perception of elementary graphical elements in tabletop and multi-surface environments. In *Proceedings of*

Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI), pp. 473–482. ACM, 2007.

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

[28] T. Yamaguchi, S. Subramanian, Y. Kitamura, and F. Kishino. Strategic tabletop negotiations. In *Proceedings of International Conference on Human-Computer Interaction (INTERACT)*, pp. 169–182. IFIP, 2007.

[29] E. Tse, C. Shen, S. Greenberg, and C. Forlines. How pairs interact over a multimodal digital table. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp. 215–218. ACM, 2007.

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

[31] F. Vernier, N. Lesh, and C. Shen. Visualization techniques for circular tabletop interfaces. In *Proceedings of Advanced Visual Interfaces (AVI)*, pp. 257–263. ACM, 2002.

[32] M. Fjeld, K. Lauche, M. Bichsel, F. Voorhorst, H. Krueger, and M. Rauterberg. Physical and virtual tools: activity theory applied to the design of groupware. In *Proceedings of Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, pp. 153–180. ACM, 2002.

[33] H. Koike, S. Kajiwara, and K. Fukuchi. Information layout and interaction on virtual and real rotary table. In *Proceedings of International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (Tabletop)*, pp. 95–102. IEEE, 2007.

[34] C. Shen, F.D. Vernier, C. Forlines, and M. Ringel. Diamondspin: an extensible toolkit for around-the-table interaction. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp. 167–174. ACM, 2004.

[35] S. Chatty, A. Lemort, and S. Vales. Multiple input support in a model-based interaction framework. In *Proceedings of International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (Tabletop)*, pp. 179–186. IEEE, 2007.

[36] S. Lee, W. Buxton, and K.C. Smith. A multi-touch three dimensional touch-sensitive tablet. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp. 21–25. ACM, 1985.

[37] W. Westerman and J.G. Elias. Method and apparatus for integrating manual input. U.S. Patent 6,323,846, 2001.

[38] W.D. Hillis. A high resolution imaging touch sensor. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 1, No. 2, pp. 33–44, 1982.

[39] J. Rekimoto. Smartskin: an infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp. 113–120. ACM, 2002.

[40] S. Malik and J. Laszlo. Visual touchpad: a two-handed gestural input device. In *Proceedings of International Conference on Multimodal Interfaces (ICMI)*, pp. 289–296. ACM, 2004.

[41] N. Matsushita and J. Rekimoto. Holowall: designing a finger, hand, body, and object sensitive wall. In *Proceedings of Symposium on User Interface Software and Technology (UIST)*, pp. 209–210. ACM, 1997.

[42] O. Hilliges, D. Kim, and S. Izadi. Creating malleable interactive surfaces using liquid displacement sensing. In *Proceedings of International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (Tabletop)*, pp. 167–170. IEEE, 2008.

[43] H. Ishii and B. Ullmer. Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp. 234–241. ACM, 1997.

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

[45] 川上玲, 筧康明, 苗村健, 原島博. Lumisight: Lumisty フィルムを用いた方向依存映像ディスプレイ. インタラクション論文集, pp. 53–54, 2003.

[46] L. Chan, T. Hu, J. Lin, Y. Hung, and J. Hsu. On top of tabletop: a virtual touch panel display. In *Proceedings of International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (Tabletop)*, pp. 181–188. IEEE, 2008.

[47] 北村喜文, 大澤渉, 竹村治雄, 岸野文郎. SharedHole: 個人情報と公共情報を共存表示できる対面型協調作業ディスプレイ. 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. 11, pp. 2598–2607, 2003.

[48] G.B.D. Shoemaker and K.M. Inkpen. Single display privacyware: augmenting public displays with private information. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp. 522–529. ACM, 2001.

[49] M. Sugimoto, K. Hosoi, and H. Hashizume. Caretta: a system for supporting face-to-face collaboration by integrating personal and shared spaces. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp. 41–48. ACM, 2004.

[50] C. Magerkurth, M. Memisoglu, T. Engelke, and N. Streitz. Towards the next generation of tabletop gaming experiences. In *Proceedings of Graphics Interface (GI)*, pp. 73–80. CCHCCS, 2004.

[51] 櫻井智史, 北村喜文, スリラムサブラマニアン, 岸野文郎. 回転する直線偏光板を用いた情報可視性の制御手法. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 11, No. 1, 2009. (掲載決定)

[52] S. Sakurai, Y. Kitamura, S. Subramanian, and F. Kishino. Visibility control using revolving polarizer. In *Proceedings of International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (Tabletop)*, pp. 173–180. IEEE, 2008.

[53] 櫻井智史, 北村喜文, スリラムサブラマニアン, 岸野文郎. 回転偏光フィルタによる情報可視性制御 (1) ～原理提案と試作システム構築. ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp. 259–264, 2007.

[54] 櫻井智史, 北村喜文, スリラムサブラマニアン, 岸野文郎. 回転偏光フィルタにより情報の可視性を制御するテーブルトップ型ディスプレイ. 情報処理学会論文誌, 日常生活におけるコラボレーション支援技術特集, Vol. 50, No. 1, pp. 332–343, 2009.

[55] 櫻井智史, 北村喜文, スリラムサブラマニアン, 岸野文郎. 回転偏光フィルタによる情報可視性制御 (2) ～テーブルトップ型試作システムにおけるアプリケーション. ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp. 265–270, 2007.

[56] 櫻井智史, 北村喜文, 浅井和広, 岸野文郎. MysteriousPOND. エンタテインメントコンピューティング論文集, pp. 273–274, 2007.

[57] 櫻井智史, 北村喜文, 伊藤雄一, ミゲルナセンタ, スリラムサブラマニアン, 岸野文郎. 複数のディスプレイをシームレスに利用する環境の構築. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, ウェアラブル・ユビキタス技術の実用展開特集, Vol. 13, No. 4, pp. 451–460, 2008.

[58] S. Sakurai, Y. Itoh, Y. Kitamura, M.A. Nacenta, T. Yamaguchi, S. Subramanian, and F. Kishino. A middleware for seamless use of multiple displays. In *Proceedings of International Workshop on the Design, Specification and Verification of Interactive Systems (DSV-IS)*, pp. 252–266. IFIP, 2008.

[59] 櫻井智史, 伊藤雄一, 北村喜文, ミゲルナセンタ, スリラムサブラマニアン, 岸野文郎. 複数のディスプレイをシームレスに利用するためのミドルウェアの構築. 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, pp. D8–3, 2008.

[60] 高谷知男. 「デュアルビュー液晶」「トリプルビュー液晶」について. シャープ技報, 第 96 号, pp. 21–22, 2007.

[61] A.R. Russel. Privacy filter for a display device. U.S. Patent 5,528,319, 1994.

[62] H. Hua, L.D. Brown, C. Gao, and N. Ahuja. A new collaborative infrastructure: SCAPE. In *Proceedings of Virtual Reality (VR)*, pp. 171–179. IEEE, 2003.

[63] Microvision. http://www.microvision.com/pico_projector_displays/.

[64] W.S. Yerazunis and M. Carbone. Privacy-enhanced displays by time-masking images. In *Proceedings of Australian Conference on Computer-Human Interaction (OzCHI)*, 2001.

[65] 白井良成, 松下光範, 大黒毅. 秘映プロジェクタ: 不可視情報による実環境の拡張. 第11回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS) 論文集, pp. 115–122, 2003.

[66] S. Kimura, M. Kitamura, and T. Naemura. EmiTable: a tabletop surface pervaded with imperceptible metadata. In *Proceedings of International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (Tabletop)*, pp. 189–192. IEEE, 2007.

[67] B. Frohlich, R. Blach, and O. Stefani. Implementing multi-viewer stereo displays. In *Proceedings of International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG)*, pp. 139–146, 2005.

[68] 西川渉, 佐藤一人, 福地健太郎, 小池英樹. 偏光を応用したテーブルトップシステムの提案. 第15回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS) 論文集, pp. 59–62, 2007.

[69] T. Piazza and M. Fjeld. Ortholumen: using light for direct tabletop input. In *Proceedings of International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (Tabletop)*, pp. 193–196. IEEE, 2007.

[70] 株式会社SKRテクノロジー. http://www.skr-tech.co.jp.

[71] 八谷和彦. FairyFinder. http://www.petworks.co.jp/∼hachiya/works/fairyfinder.html.

[72] 大坪順次. 光入門. コロナ社, 2002.

[73] 服部知彦. 立体画像におけるクロストーク消去方式および装置. 特開2001-298754, 2001.

[74] Y. Rogers and S. Lindley. Collaborating around vertical and horizontal displays: which way is best? *Interacting with Computers*, Vol. 16, Issue 6, pp. 1133–1152, 2004.

[75] M. Elwart-Keys, D. Halonen, M. Horton, R. Kass, and P. Scott. User interface requirement for face to face groupware. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp. 295–301. ACM, 1990.

[76] 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. In *Proceedings of Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, pp. 274–283. ACM, 2004.

[77] M. Agrawala, A.C. Beers, I.M. Fakespace, B. Frohlich, M.B. Fakespace, and P. Hanrahan. The two-user responsive workbench: support for collaboration through individual views of a shared space. In *Proceedings of Conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH)*, pp. 327–332. ACM, 1997.

[78] R. Kruger, S. Carpendale, S.D. Scott, and S. Greenberg. Roles of orientation in tabletop collaboration: comprehension, coordination and communication. In *Proceedings of Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, pp. 501–537. ACM, 2004.

[79] S.D. Scott, M.S.T. Carpendale, and K.M. Inkpen. Territoriality in collaborative tabletop workspaces. In *Proceedings of Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, pp. 294–303. ACM, 2004.

[80] 鶴田匡夫. 光の鉛筆 – 光技術者のための応用光学. 株式会社新技術コミュニケーションズ, 1985.

[81] 櫻井智史, 北村喜文, 浅井和広, 岸野文郎. MysteriousPOND. ENTERTAINMENT MEDIA COMPLEX OSAKA, ホテルニューオータニ大阪, 2007.

[82] 櫻井智史, 北村喜文, 浅井和広, 岸野文郎. MysteriousPOND. 「メディアアートで創る大阪の未来」シンポジウム, 大阪市中央公会堂, 2007.

[83] オプトロニクス社編集部 (編). 光技術総合事典. オプトロニクス社, 2004.

[84] 中山智量, 北村喜文, 伊藤雄一, 岸野文郎. 立体映像とマルチチャンネルサウンドを用いた複数人用マルチメディアコンテンツ環境に関する検討. 情報処理学会研究報告. EC, エンタテインメントコンピューティング, Vol. 2006, No. 24, pp. 65–71, 2006.

[85] M.R. Morris, D. Morris, and T. Winograd. Individual audio channels with single display groupware: effects on communication and task strategy. In *Proceedings of Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, pp. 242–251. ACM, 2004.

[86] T. Yamaguchi, K. Asai, Y. Kitamura, and F. Kishino. Interactive multimedia contents in the IllusionHole. In *Proceedings of International Conference on Entertainment Computing (ICEC)*, pp. 116–121. IFIP, 2008.

[87] F. Kusunoki, I.E. Yairi, and T. Nlshimura. Multi-Audible table for collaborative work. In *Proceedings of International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE)*, pp. 67–73, 2004.

[88] J.T. Biehl and B.P. Bailey. ARIS: an interface for application relocation in an interactive space. In *Proceedings of Graphics Interface (GI)*, pp. 107–116. CCHCCS, 2004.

[89] 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. In *Proceedings of Symposium on User Interface Software and Technology (UIST)*, pp. 279–288. ACM, 2007.

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

[91] K.S. Booth, B.D. Fisher, C.J.R. Lin, and R. Argue. The “mighty mouse” multi-screen collaboration tool. In *Proceedings of Symposium on User Interface Software*

and Technology (UIST), pp. 209–212. ACM, 2002.

[92] B. Johanson, G. Hutchins, T. Winograd, and M. Stone. PointRight: experience with flexible input redirection in interactive workspaces. In *Proceedings of Symposium on User Interface Software and Technology (UIST)*, pp. 227–234. ACM, 2002.

[93] B. Brumitt, B. Meyers, J. Krumm, A. Kern, and S.A. Shafer. EasyLiving: technologies for intelligent environments. In *Proceedings of International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing (HUC)*, pp. 12–29, 2000.

[94] M. Román, C. Hess, R. Cerqueira, A. Ranganathan, R.H. Campbell, and K. Nahrstedt. A middleware infrastructure for active spaces. *Pervasive Computing*, Vol. 1, Issue 4, pp. 74–83, 2002.

[95] P. Tandler. Software infrastructure for ubiquitous computing environments: supporting synchronous collaboration with heterogeneous devices. In *Proceedings of International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp)*, pp. 96–115, 2001.

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

[97] J.T. Biehl, W.T. Baker, B.P. Bailey, D.S. Tan, K.M. Inkpen, and M. Czerwinski. Impromptu: a new interaction framework for supporting collaboration in multiple display environments and its field evaluation for co-located software development. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp. 939–948. ACM, 2008.

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

[99] Distributed Multihead X Project. http://dmx.sourceforge.net/.

[100] X.Org project. http://www.x.org/wiki/.

[101] J. Rekimoto and M. Saitoh. Augmented surfaces: a spatially continuous work space for hybrid computing environments. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp. 378–385. ACM, 1999.

[102] S. Borkowski, J. Letessier, and J.L. Crowley. Spatial control of interactive surfaces in an augmented environment. In *Proceedings of Working Conference on Engineering for Human-Computer Interaction*, pp. 228–244. IFIP, 2004.

[103] R. Kijima and T. Ojika. Transition between virtual environment and workstation environment with projective head-mounted-display. In *Proceedings of Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 130–137. IEEE, 1997.

[104] 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, カールガトウィン, 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.

[105] 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, カールガトウィン, 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, 2007.

[106] P. Baudisch, E. Cutrell, K. Hinckley, and R. Gruen. Mouse ether: accelerating the acquisition of targets across multi-monitor displays. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp. 1379–1382. ACM, 2004.

[107] D.R. Olsen Jr. and T. Nielsen. Laser pointer interaction. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp. 17–22. ACM, 2001.

[108] C. Endres, A. Butz, and A. MacWilliams. A survey of software infrastructures and frameworks for ubiquitous computing. *Mobile Information Systems*, pp. 41–80, 2005.

[109] T. Richardson, Q. Stafford-Fraser, K.R. Wood, and A. Hopper. Virtual network computing. *Internet Computing*, Vol. 2, No. 1, pp. 33–38, 1998.

[110] L. Shupp, R. Ball, B. Yost, J. Booker, and C. North. Evaluation of viewport size and curvature of large, high-resolution displays. In *Proceedings of Graphics Interface (GI)*, pp. 123–130. CCHCCS, 2006.

[111] P. Baudisch and R. Rosenholtz. Halo: a technique for visualizing off-screen objects. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp. 481–488. ACM, 2003.

[112] RealVNC. http://www.realvnc.com/.

[113] OpenGL. http://www.opengl.org/.

[114] Microsoft DirectX Developer Center. http://www.microsoft.com/japan/msdn/directx/.

[115] B. Schneiderman. *Designing the user interface.* Addison Wesley, 3rd edition, 2003.

[116] R.H.Y. So and M.J. Griffin. Effects of lags on human-operator transfer functions with head-coupled systems. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, Vol. 66, No. 6, pp. 550–556, 1995.

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

[118] windows 7. http://blogs.msdn.com/e7/.

[119] i-Phone. http://www.apple.com/jp/iphone/.

[120] OpenGL ES. http://www.khronos.org/opengles/.

[121] 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, 2008.

[122] S. Sakurai, T. Yamaguchi, Y. Kitamura, M.A. Nacenta, Y. Itoh, R. Fukazawa, S. Subramanian, and F. Kishino. M3: multi-modal interface in multi-display environment for multi-users. In *Proceedings of SIGGRAPH Conference and Exhibition in Asia (SIGGRAPH Asia)*, p. 45. ACM, 2008.

[123] W. Weber, J.M. Rabaey, and E. Aarts. *Ambient Intelligence*. Springer, 2005.

[124] C. Pinhanez. The everywhere displays projector: a device to create ubiquitous graphical interfaces. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp. 315–331. ACM, 2001.