

卒業論文 2008年度(平成20年度)

Dynamic Multiple Display Arrangements:  
動的な分散配置を可能にするマルチディスプレイシステム

担当教員

慶應義塾大学 環境情報学部

村井 純

徳田 英幸

楠本 博之

中村 修

高汐 一紀

重近 範行

Rodney D. Van Meter III

植原 啓介

三次 仁

中澤 仁

慶應義塾大学 環境情報学部

立石 幹人

## Dynamic Multiple Display Arrangements: 動的な分散配置を可能にするマルチディスプレイシステム

情報コンテンツによる空間演出のあり方は、情報型ディスプレイの爆発的な普及によりその形態を大きく変えようとしている。そのようなディスプレイを用いることで、一つの形式にとらわれない自由な手法によって広告形態が多様化しており、中でも屋外広告が勢力を増している。屋外広告とは、公共の場における視覚メディアを用いた広告であり、以前は静的な内容が中心であったが近年では照明・音響・映像などのさまざまなメディアを用いた空間演出がされ始めている。そのようなデジタル技術を用いた高度な演出を伴うメディア広告を、“デジタルサイネージ”と呼ぶ。

デジタルサイネージの実現にはその情報を表示するためのディスプレイデバイスが必要であるが、近年では十分な画質・処理速度・通信機能を持ったデバイスが可搬性を持ちつつある。屋外広告への注目と高性能なデバイスの出現により、今後高度なディスプレイデバイスを利用し、複数のディスプレイを用いて動的に広告を表示する手法が用いられると予想できる。そのような広告を表示するためには、複数のディスプレイを統合的に利用し、一つの巨大な仮想ディスプレイとして利用する手法が必要である。

仮想ディスプレイを用いた動的なコンテンツの表示において、デバイス間の物理的位置空間の把握、物理的位置空間の補正、そして各デバイス間の情報共有といった問題を解決する必要がある。本研究ではそのような問題を解決する機構として、“複数分散ディスプレイ間の物理的位置空間を補間しコンテンツを表示、制御する”Dynamic Multiple Display Arrangements” (DMDA) を提案・実装・評価した。

DMDA の有効性を検証するために、物理的空間内における幾何学的ひずみ補正精度の検証をプロトタイプ上でおこなった。実験においては、ツインディスプレイ環境において 99%の精度でコンテンツを複数のディスプレイに表示できることが示された。本研究の想定する環境は屋外などの離れたディスプレイを一つの仮想ディスプレイとして利用する環境であり、99%の精度があれば視聴者に対して違和感のないコンテンツの表示が可能である。従って、本研究の提案は、近い将来により多く利用されると想定される屋外広告において、有効であることが立証できた。

### キーワード

1. デジタルサイネージ
2. マルチディスプレイ
3. ディスプレイの動的再構築
4. ピクセル変換
5. 画像補正

<p style="text-align: center;">Dynamic Multiple Display Arrangements: Multi-Display System for Dynamically-Distributed Placement</p>
--

The styles of producing informational atmospheres are dramatically changing due to a wide spread of displays with intelligences. With those displays, various methods of advertisements, that are not tied to a single style or format, have been introduced. One of those advertisements is the outdoor advertisement, which has began to use various light, sounds, and visuals to produce the space instead of using a static and quiet billboard. Advertisements with the advanced digital technologies are called "Digital Signage".

In order to present the digital signage, display devices for showing the information are necessary. Nowadays, devices with graphics quality, sufficient performance, and communication technology have started to become portable. With positive interests on outdoor advertisements and advanced devices, advertisements with dynamic contents are expected to be displayed on multiple displays. In order to present those advertisements, a method for unifying multiple displays into a single image display is necessary.

For displaying dynamic contents on the image display, there are problems such as: obtaining physical placement of devices, correcting the physical placements, and information synchronization between devices. In this research, "Dynamic Multiple Display Arrangements" (DMDA), which corrects physical placement of multiple displays in a space and displays the contents properly to audiences, is proposed as a solution.

To validate the effectiveness of DMDA, evaluation of geometrical accuracy was measured on a prototype implementation. In the experiment, it was proven that the contents can be displayed on dual-display environment with 99% of accuracy. Because the system is expected to be used with large-scale displays for outdoor advertisements, 99% is accurate enough to present the information to audiences without fuzzy impressions. Therefore, the proposal stated in this research is proven to be effective in the outdoor advertisements, which is the primary scope of the system.

Keywords :

1. Digital Signage, 2. Multiple Display, 3. Display Dynamic Reconstruction,
4. Pixel Conversion, 5. Image Correction

Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

Mikito Tateishi

# 目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の目的	2
1.3	本論文の構成	2
第2章	屋外広告，空間演出，可搬デバイスの統合	3
2.1	キーワードの抽出	3
2.1.1	空間演出と可搬デバイス	4
2.1.2	屋外広告と空間演出	4
2.1.3	可搬デバイスと屋外広告	4
2.2	キーワードの統合	5
2.3	マルチディスプレイの重要性	6
2.4	想定される本研究の利用シーン	6
第3章	マルチディスプレイシステムとその問題点	9
3.1	マルチディスプレイシステム	9
3.2	既存システム	9
3.2.1	既存システムと想定される利用シーンの比較	10
3.3	問題点	11
3.3.1	デバイス間の物理的位置関係性の欠如	12
3.3.2	幾何学的ひずみによる情報の劣化	12
3.4	まとめ	12
第4章	Dynamic Multiple Display Arrangements	13
4.1	本研究要件	13
4.1.1	デバイス間の物理的位置空間の把握	13
4.1.2	物理的位置空間の補正	13
4.1.3	デバイス間の位置情報共有	13
4.2	Dynamic Multiple Display Arrangements の提案	14
4.3	関連研究	14
4.3.1	Siftables	14
4.3.2	iPong	15
4.3.3	Virtual Global Race	16

4.3.4	本研究要項と関連研究の比較	16
4.4	まとめ	17
<b>第5章</b>	<b>設計</b>	<b>18</b>
5.1	設計概要と本研究におけるアプローチ	18
5.1.1	カメラキャリブレーションと逆3D変換の検証	18
5.1.2	サーバ・クライアントモデルとP2Pモデルの検証	19
5.1.3	モジュール関連図を用いたシステムの流れの説明	20
5.2	状態把握モジュール	21
5.2.1	位置データの静的化	21
5.2.2	アフィン変換による逆3D変換	23
5.3	IOモジュール	24
5.4	IDデータ処理モジュール	24
5.5	画像描画モジュール	25
<b>第6章</b>	<b>実装</b>	<b>26</b>
6.1	実装概要	26
6.2	状態把握モジュール	26
6.3	仮想ディスプレイ値処理モジュール	28
6.4	画像描画モジュール	29
6.5	まとめ	29
<b>第7章</b>	<b>評価</b>	<b>33</b>
7.1	実験概要	33
7.1.1	実験環境	35
7.1.2	実験手法	35
7.2	実験結果	38
7.2.1	シングルディスプレイ	38
7.2.2	ツインディスプレイ	42
7.3	考察	45
<b>第8章</b>	<b>結論</b>	<b>47</b>
8.1	本論文のまとめ	47
8.2	今後の課題と発展	48
8.2.1	処理時間の効率化	48
8.2.2	動的な位置情報の取得	48
8.2.3	人間工学に基づいた設計	48
8.2.4	コンテンツの描画領域の検討	48
	謝辞	49

# 目次

2.1	屋外広告，空間演出，可搬デバイスの関連図	5
2.2	屋外広告，空間演出，可搬デバイスの役割的概念図	6
2.3	街頭に分散したディスプレイと仮想ディスプレイによる統合	7
3.1	統合型マルチディスプレイ	10
3.2	分散型マルチディスプレイ（マスゲーム）	11
4.1	関連研究「Siftables の使用図」	15
4.2	関連研究「複数人数で iPong を使用した図」	15
4.3	関連研究「Virtual Global Race を実行した図」	16
5.1	複数デバイス間の物理的最大点と仮想ディスプレイの作成	19
5.2	サーバー・クライアントモデル	20
5.3	Dynamic Multiple Display Arrangements のモジュール関連図	21
5.4	手動で設定する静的位置情報	22
5.5	デバイス管理に用いるテキストファイル	24
6.1	ソースコード「ディスプレイ上ポイントの 3D 変換」	27
6.2	ソースコード「デバイス毎のユニークファイル作成」	30
6.3	ソースコード「グローバル仮想ディスプレイ値の計算」	31
6.4	ソースコード「コンテンツ領域の切り出し，描画」	32
6.5	DMDA プロトタイプのスクリーンショット	32
7.1	実験環境「測定するコンテンツ上の 8 つのポイント」	34
7.2	実験環境「デバイスの四隅における幾何学的ひずみ」	34
7.3	実験環境「机上の設置ポイント」	36
7.4	実験環境「全体風景」	37
7.5	実験環境「各実験ポイント」	37
7.6	実験環境「使用するコンテンツ」	38
7.7	実験手法「デスクトップ上での誤差検証」	38
7.8	実験手法「対応するポイント間のピクセル数測定」	39
7.9	実験結果「回転角度の差による補正誤差」	41
7.10	実験結果「幾何学的ひずみによる低解像度化」	42
7.11	実験結果「回転角度の差による補正誤差（低解像度考慮）」	43

7.12	実験結果「デバイス間に奥行き差がある場合の水平距離の差による補正誤差」	44
7.13	実験結果「デバイス間に奥行き差がない場合の水平距離の差による補正誤差」	44
7.14	実験結果「2つの回転角度の大小による補正精度」	45

# 表 目 次

2.1	二分野の比較によって抽出したキーワード	5
3.1	既存システムの特徴比較	11
4.1	本研究と関連研究の比較	17
5.1	手動で設定する静的位置情報	23
6.1	実装環境	26
6.2	3D 変換に用いる変数一覧	28
6.3	コンテンツ描画に用いる変数一覧	29
7.1	測定データの格納情報 (シングルディスプレイ)	39
7.2	測定データの格納情報 (ツインディスプレイ)	40
7.3	低解像度補正定数	41
7.4	低解像度による誤差を補正した値	42



# 第1章 序論

## 1.1 本研究の背景

近年，インターネットの普及と同時に情報の露出が高まり，形式にとらわれない自由な手法によって広告形態が多様化している．中でも映像メディアの進化と共に屋外広告がインターネット広告について勢力を増しており，人々の注目が映像メディアの技術と演出の双方に集まっている [1][2]．

屋外広告とは，公共の場における視覚メディアを用いた広告である．これまでは一般的に看板が屋外広告のメディアとして大部分を占めてきたが，近年は大型スクリーンを用いた映像メディアによる広告が増加し，更には映像メディアの移動性や非日常的イベントによって生まれる印象強い広告の制作が重視されつつある．例として，大型液晶ディスプレイを用いた街頭広告，複数のディスプレイを側面に取り付けた動くトラック広告や商品キャラクターを装った複数の人間によるゲリラ広告が挙げられる [3]．

屋外広告が勢力を伸ばしている背景には，これまでのテレビやラジオ，新聞といった一方向性の情報の多くがインターネット上に流れ，これらの情報が対人コミュニケーションの要素に遷移した事によって情報共有の場が架空世界と実世界に二極化されつつあることが挙げられる．

又，広告の多様化と共に近年，映像を用いた空間演出において様々な新しい映像手法が試されている．中でも複数のディスプレイを用いてコンテンツを表示するマルチディスプレイシステムが多く映像手法として取り入れられ，マルチディスプレイに使用されるディスプレイ本体の技術革新が進んでいる．例として，サッカーゲームを演出するオーロラビジョンをはじめ，ライブコンサートを盛り上げる大型マルチディスプレイ，床面マルチディスプレイ，形状を自由に変更させる事が可能なプラズママルチディスプレイ等が挙げられる [4]．

こうした空間演出におけるマルチディスプレイシステムの開発と別に，近年，iPhone[5]やスマートフォンの出現により，マルチディスプレイシステムに用いるデバイスとして十分な画質，処理速度，通信機能を持ったデバイスが物理的、仮想的可搬性を持ちつつある．可搬性の高さとは，感覚的に物理的空間内を移動させる事が可能である点と，情報通信によりデバイスと社会間にネットワークが形成される点を指す．又，色の発光によりコンテンツを表示する現在の主用ディスプレイに代わる電子ペーパーの研究が進められている．電子ペーパーとは電気信号を流す事によってコンテンツを表示する紙媒体のディスプレイである．将来，電子ペーパーが持つデバイスの移動性の高さを応用した電子ファブリックが実用化される事によって，多様化された広告形態の中でこれらのデバイスが持つ様々な演出手法実現の可能性が更に高まる．

## 1.2. 本研究の目的

---

しかし、屋外広告、空間演出、可搬デバイス等、三つの領域を複合した利用シーンは現在までに提案されていない。この1つの問題点として、屋外広告と空間演出に共通するマルチディスプレイの利用シーンが限定されていることが挙げられる。マルチディスプレイシステムは普及当時の使用メリットであった大型ディスプレイの安価構築として利用目的を定着しており、表示するコンテンツの応用性、デバイスの可搬性を考慮する必要性がある。

## 1.2 本研究の目的

本研究は、近年注目を浴びている屋外広告が、形態の多様化によって物理的空間内に分散している。これに対して、ビューアの持ちうる視点に向けて正しいコンテンツを動的に表示する事が出来ない問題点を解決する分散型マルチディスプレイシステム「Dynamic Multiple Display Arrangements (以下 DMDA)」の提案を行う。同システムのコア・アルゴリズムとなる物理的空間における幾何学的ひずみの補正アルゴリズムの有効性を示す事によって DMDA の基盤を形成する。

## 1.3 本論文の構成

本論文は8章から構成される。第2章において、本研究が必要とする要素を明確化する。第3章において、既存のマルチディスプレイシステムの実用例を挙げ、必要とされる機能と関連研究を述べる。第4章において、DMDA を提案する。DMDA の持つ解決手段と関連研究を比較し、本研究で評価すべき機能を検討する。第5章において、DMDA 全体の設計概要と各モジュールについて使用する手段を検討する。第6章において、DMDA の各モジュールの実装方法に関して述べる。第7章において、第6章にて実装した DMDA をシングルディスプレイ、ツインディスプレイを用いて定性的、定量的な側面から評価する。最後に、第8章で本研究の結論と、今後の可能性を述べる。

## 第2章 屋外広告，空間演出，可搬デバイスの統合

本章では，第1章で述べた社会的背景に基づき，近年注目されている屋外広告，空間演出，可搬デバイスの三分野を統合した新しいメディアシステムの開発における要素を明確化し，想定される将来の利用シーンを述べる．

### 2.1 キーワードの抽出

屋外広告，空間演出，可搬デバイスの統合を実現する際に必要となる要素を模索するために，三つのキーワードを，空間演出と可搬デバイス，屋外広告と空間演出，可搬デバイスと屋外広告に見られる既存例を用いて比較し，抽出する．

- 屋外広告

屋外広告とは，公共の場における視覚メディアを用いた広告である．近年注目されている理由として，これまでは一般的に静的コンテンツのみを表示する看板が屋外広告のメディアとして大部分を占めてきた事に対し，近年は大型スクリーンを用いた動的コンテンツを表示するディスプレイシステムによる広告形態が増加し，更には動的コンテンツを表示するデバイスの可搬性や非日常的イベントによって直感性に秀でた多くの情報を取り入れる事が可能となった背景が挙げられる．

- 空間演出

空間演出とは，特定の空間が持つ意味や目的を，照明，音響，映像などの様々な演出手法を用いて表現する事を指す．近年では，コンサート会場やスポーツ会場での空間演出に使用されている演出手法が多様化されている．特に演出手法としてのディスプレイシステムの様々な研究が進められており，ディスプレイシステムの新技術，新演出手法の研究が注目されている．

- 可搬デバイス

可搬デバイスとは，近年出現した iPhone，スマートフォンや電子ペーパーをはじめとした物理的空間，仮想的空間での可搬性の高いディスプレイデバイスを指す．物理的空間においての可搬性の高さとは，物理的空間内でのデバイス位置を，動的に変化させる事が出来る性質を指す．仮想空間においての可搬性の高さとは，複数センサーや情報通信がデバイスに搭載され高機能化する事によって，不特定デバイ

## 2.1. キーワードの抽出

---

スの用途に多様化する事が可能である事と，情報通信によってデバイスと社会間にネットワークが形成される事を仮想的な可搬性として指す．

### 2.1.1 空間演出と可搬デバイス

近年，可搬デバイスの出現によって即席的な空間演出の構築が可能となり，また，これまでの静的メディアを用いた空間演出がより効果的なものとなった．ミュージアムにおけるポータブルプレイヤーを用いた映像ガイドの出現や，同じくポータブルプレイヤーに映像メディアを流す事での簡易的なバックグラウンドムービーの構築等が挙げられる [6]．

前述した例に示した様に，どのような場所においても可搬デバイスを用いて空間演出が行える事から，空間演出と可搬デバイスの比較からユビキタスをキーワードとして抽出する．

### 2.1.2 屋外広告と空間演出

近年，映像メディアの発信に大型ディスプレイの利用が重要視されている．印象強い情報発信が出来る事から，屋外広告と空間演出，共に様々なシーンで利用されている．屋外広告では多くの人間が集まる公共スペースの一角を使用して大型ディスプレイが用いられる．空間演出ではコンサート会場やスポーツ会場等，各会場の形状にあった大型ディスプレイが用いられる．

大型ディスプレイの構築には多くの費用がかかる事から，マルチディスプレイを利用する事で大型ディスプレイを仮想的に構築する事が多く見られる．よって，屋外広告と空間演出に共通するマルチディスプレイをキーワードとして抽出する．

### 2.1.3 可搬デバイスと屋外広告

近年，屋外広告として大型自動車の側面に複数のディスプレイを設置した可搬性のある広告形態がみられるようになった．又，iPhone やスマートフォンの出現によって，高画質，高機能で通信機能を備えたディスプレイの携帯が可能となった．対して，物理的位置の可搬性とは別に，ディスプレイの用途を多様化する事によるディスプレイ概念としての仮想的な可搬性が見られるようになった．[7] これにより可搬性を持った広告形体の可能性が大きく高まり，現在，こういった物理的，仮想的に可搬性を持ったデバイスを用いた新しい広告形体の開発として，デジタルサイネージが挙げられる．[8][9]

可搬デバイスと屋外広告において可能性を持ったデジタルサイネージをキーワードとして抽出する．

## 2.2. キーワードの統合

## 2.2 キーワードの統合

本節では屋外広告，空間演出，可搬デバイスの統合を実現する際に必要となる方向性を模索するために，空間演出と可搬デバイス，屋外広告と空間演出，可搬デバイスと屋外広告を比較し，三つのキーワードを抽出した．これらを，キーワードの持つ意味合いと共に表 2.1 に示す．

表 2.1: 二分野の比較によって抽出したキーワード

	抽出したキーワード	意味合い
空間演出と可搬デバイス	ユビキタス	物理的空間内に分散されたデバイス
屋外広告と空間演出	マルチディスプレイ	複数のディスプレイ
可搬デバイスと屋外広告	デジタルサイネージ	多様な屋外映像広告を実現する情報発信手法

また，抽出したキーワードを用いて屋外広告，空間演出，可搬デバイスを三つのスコープにまとめ，これらを複合した際に生じる本研究の領域を図 2.1 を用いて示す．

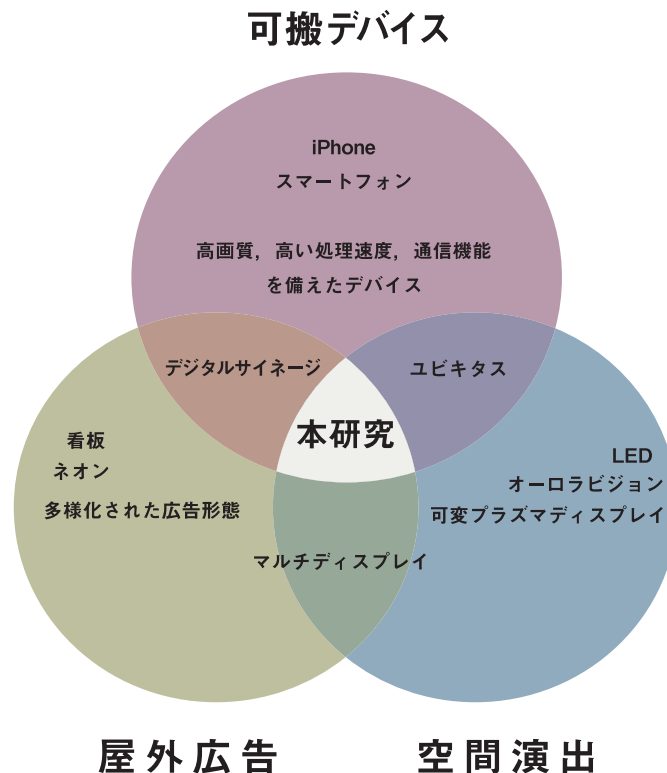


図 2.1: 屋外広告，空間演出，可搬デバイスの関連図

本章で抽出したキーワード，ユビキタス，マルチディスプレイ，デジタルサイネージの三つを統合した文を，より言語に特化して示すために，表 2.1 に記した意味合いを用いて

### 2.3. マルチディスプレイの重要性

構成する．以下に統合した文を記す．

物理的空間内に分散されたデバイスをマルチディスプレイで複合した  
多様な屋外映像広告を実現する情報発信システム

## 2.3 マルチディスプレイの重要性

本節では，第2.2節で述べた，物理的空間内に分散されたデバイスをマルチディスプレイで複合した多様な屋外映像広告を実現する情報発信システムの開発において重要な要素を模索し，本研究の方向性を明確化する．

本章で抽出したキーワードはシステムを構築する際に，それぞれ別の役割的意味合いを持つ．ユビキタスは近年のデバイスがもたらしている社会的現象を表し，システム基盤の内包する状況となり，静的である．デジタルサイネージはそのシステム基盤の表層部に見える社会的現象を背景に生まれた成果物であり，手法に依存し内容が変化するが，目的物としての位置付けは静的である．対して，マルチディスプレイは成果物を構築する一手法として存在し，様々なアプローチを用いるために，可変的であると共に，現在様々な手法が試されているために，本研究で焦点をあてるべきキーワードである．役割的意味合いの概念を図2.2に示す．

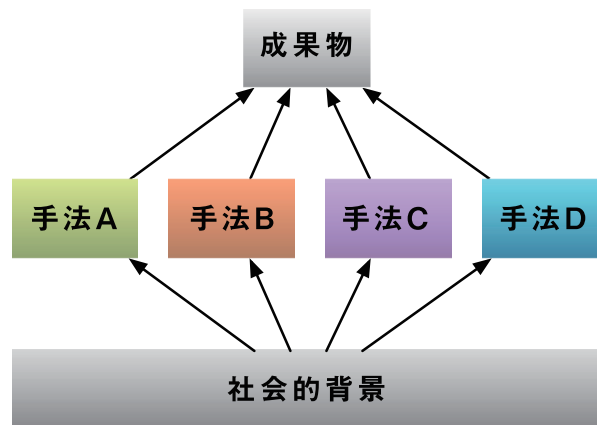


図 2.2: 屋外広告，空間演出，可搬デバイスの役割的概念図

## 2.4 想定される本研究の利用シーン

本節では，本研究が想定するマルチディスプレイシステムの近い将来の屋外広告における利用シーンを述べる．近い将来とは，電子ペーパーが一般化され，民営企業が利用する事が可能となる時を指す．

## 2.4. 想定される本研究の利用シーン

第1章では，近年，iPhone やスマートフォンの出現により，マルチディスプレイシステムに用いるデバイスとして十分な画質，処理速度を持ったデバイスが物理的，仮想的に可搬性を持ちつつあると述べた．

現在，街頭にはビルの外壁に設置された大型ディスプレイをはじめ，LED を使用した看板，トラックの側面に設置された複数のディスプレイや店頭に並ぶ商品 PR 用ディスプレイ等，多くの場所に様々なディスプレイが存在するが，紙等を媒体とした静的コンテンツを表示する看板も多く使用されており，動的コンテンツを使用するデバイスが今後増加する可能性がある．

対して，本研究で想定する近い将来の屋外広告シーンでは，紙媒体の看板等が電子ペーパーを用いた看板へと移り変わり，動的コンテンツを表示するためのディスプレイが急激に増加すると共に，情報の分散化が進む．屋外広告に空間演出としての機能を求められる事により，これらの動的コンテンツを扱うディスプレイの必要性が生じる．

本研究が提唱するマルチディスプレイシステムは，動的コンテンツを表示するディスプレイを仮想的に統合し，同一コンテンツを表示する．統合の手法として，物理的空間内に任意の視点を設け，視点に対して各ディスプレイが正面にある状態を物理的空間を補正する事によってシミュレーションする．補正されたディスプレイを仮想ディスプレイを設ける事によって仮想的に統合する．仮想ディスプレイについては第5.1節で述べる．動的コンテンツを表示するディスプレイを統合するためには，各ディスプレイの物理的位置空間を把握し，各ディスプレイに対して表示すべきコンテンツ情報を知らせるための観察者と統括者が必要となる．タイムズスクエアを用いたイメージを図2.3に示す．左図がタイムズスクエアに存在するディスプレイを抽出し線で囲んだものを示し，右図でディスプレイを仮想的に統合し同一コンテンツを表示したものを示す．



図 2.3: 街頭に分散したディスプレイと仮想ディスプレイによる統合

想定される利用シーンにおいて，仮想ディスプレイの生成による物理的位置空間の補正以外に，任意の視点の設定や仮想ディスプレイを設定する物理的空間領域の設定，動的コンテンツの表示に対する情報共有時間の遅延を考察する必要があるが，本研究では仮想ディスプレイの生成部に焦点を当てる．

次章で，既存のマルチディスプレイシステムの実用例を述べ，本研究が想定する近い将

#### 2.4. 想定される本研究の利用シーン

---

来の利用シーンについて必要とされる機能を明確化し，必要とされる機能の関連研究を述べる．



## 第3章 マルチディスプレイシステムとその問題点

本章では、第2.4節で述べた本研究が想定する近い将来の利用シーンの実現において、既存のマルチディスプレイシステムの実用例を述べ、必要とされる機能を明確化し、必要とされる機能の関連研究を述べる。

### 3.1 マルチディスプレイシステム

はじめに、本研究におけるマルチディスプレイの用語定義を述べる。マルチディスプレイには作業効率性を向上させる目的の手法と、大画面の構築による映像演出が目的の二種類が存在する。前者は作業用手法であり、演出としての応用は困難である。よって、本研究では作業用手法はマルチディスプレイとしての対象から除外する。

又、本研究では、ディスプレイに限定せず、複数デバイスを統合したデバイスに同一コンテンツを表示させるシステムをマルチディスプレイシステムとする。コンテンツに関しても、動的コンテンツに限定せず、静的コンテンツの表示も考慮する。

### 3.2 既存システム

既存のマルチディスプレイシステムには、統合型マルチディスプレイと分散型マルチディスプレイとの2つのシステムが使用されている。本節では両システムの特徴を述べ、本研究で想定する近い将来の利用シーンに対して、両システムが持つ特徴と比較することによって必要とする機能を明確化する。

- 統合型マルチディスプレイ

統合型マルチディスプレイとは、複数のディスプレイを特定された空間内に隣接させることで高解像度ディスプレイを構築するシステムである。統合型マルチディスプレイは動的コンテンツを表示する事を可能にし、空間得出しにおいては高い効率を示す。現在は移動性を持つデバイスによるシステムの実現には至っておらず、設置位置は静的である。コンテンツを提供するプロセッサにディスプレイ毎の物理的位置関係を入力する事によってコンテンツの表示領域の切り出しを行うため、ディスプレイ位置を観察するモジュールは存在しない。統合型ディスプレイの実用例を図3.1に示す。

## 3.2. 既存システム

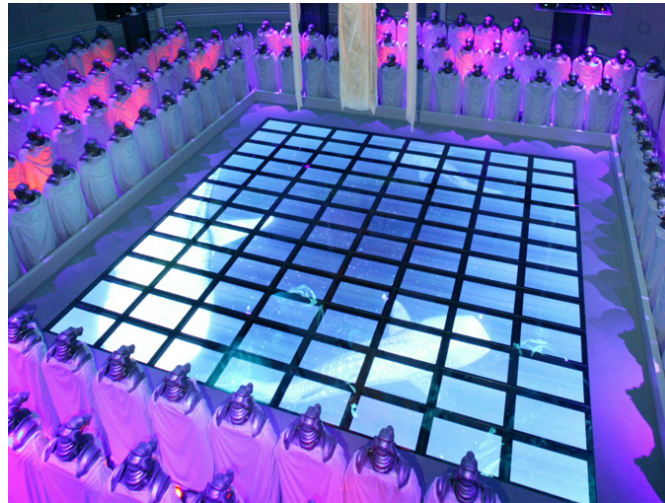


図 3.1: 統合型マルチディスプレイ

- 分散型マルチディスプレイ

分散型マルチディスプレイとは、マルチディスプレイを統合する各デバイスが可搬性を持ち、物理的空間内にて表示するコンテンツの大きさを変化させる事を可能とするシステムを指す。

分散型マルチディスプレイの例として、マスゲームを挙げる。マスゲームとは、複数の人間がそれぞれ表示するコンテンツの構成される位置に対応する一部を持ち、全体でコンテンツを表示する手法を指す。本手法は、人間がコンテンツを保持する事により、可搬性を持つ。一般的なマスゲームの場合、各人間が持つコンテンツは単色ボードであり、同色ボードを表示する人間同士であれば位置を変えてもコンテンツには問題が生じない。又、ボードに限らず身体を用いたコンテンツ表現も行う例が存在する。これにより物理的空間内での移動に制限がかかる事はないが、コンテンツ表示に関する各デバイスの位置関係の把握に関して観察者が必要となる。又、マスゲームを用いて表示するコンテンツの媒体は単色ボードや身体であるため、動的コンテンツを表現することは出来ない。

マスゲームの利用例を図 3.2 に示す。

## 3.2.1 既存システムと想定される利用シーンの比較

本節のまとめとして、統合型ディスプレイと分散型ディスプレイの特徴を第 2.4 節で述べた想定される利用シーンと比較し、これを表 3.1 に示す。比較する項目として、デバイスの設置位置が静的であるか動的であるか、表示するコンテンツが静的であるか動的であるか、デバイス位置の観察の方法、各デバイスにコンテンツを表示する役割、表示されたコンテンツを見るによる特定視点の有無、使用するデバイスの物理的空間内での傾きや奥行き之差から生まれる幾何学的ひずみの有無を挙げる。

## 3.3. 問題点

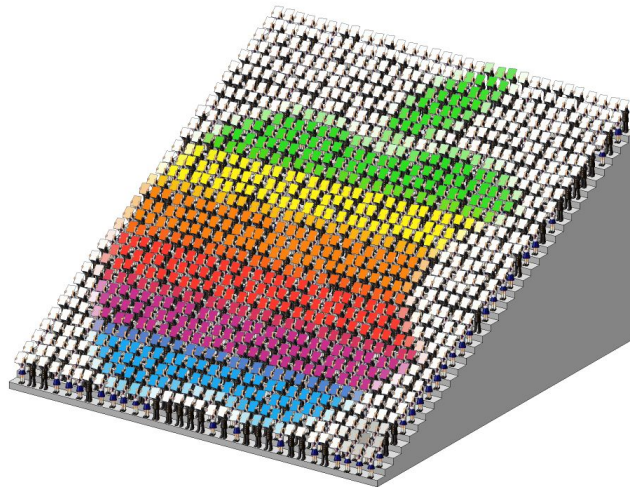


図 3.2: 分散型マルチディスプレイ (マスゲーム)

表 3.1: 既存システムの特徴比較

	デバイスの 設置位置	表示する コンテンツ	デバイス位置 の観察方法	コンテンツ の表示者	特定視点 の有無	デバイスの 幾何学的歪み
統合型 ディスプレイ	静的	動的	なし	デバイス 統括者	なし	なし
分散型 ディスプレイ	動的	静的	観察者	各デバイス	なし	なし
想定される 利用シーン	動的	動的	観察者	各デバイス	あり	あり

統合型ディスプレイと分散型ディスプレイを比較する事によって、本研究が想定する近い将来の利用シーンの持つ特徴とデバイスの設置位置，デバイス位置の観察方法，コンテンツの表示者の項目において，分散型マルチディスプレイが合致する事が分かった．又，表示するコンテンツの項目については統合型マルチディスプレイと合致する事が分かった．よって，両マルチディスプレイシステムの持つ各特徴を複合する事で，本研究が想定する近い将来の利用シーンの一部を実現する事が可能である．これに対して，特定視点の有無，デバイスの幾何学的歪みの項目に関して両マルチディスプレイシステムとも想定される利用シーンと異なる．

## 3.3 問題点

第 3.2.1 項で分かった統合型マルチディスプレイと分散型マルチディスプレイの両システムの複合では，本研究が想定する近い将来の利用シーンを実現する事が出来ない事を述べた．この問題をデバイス間位置関係の把握，物理的位置空間の補正の 2 点を用いて述べる．

### 3.4. まとめ

---

#### 3.3.1 デバイス間の物理的位置関係性の欠如

本研究で想定される利用シーンにおいて、物理的空間内に分散されるデバイスは傾きや奥行き等によって幾何学的ひずみを持つ。よってデバイス間の物理的位置関係の把握には視点が伴うが、統合型マルチディスプレイ、分散型マルチディスプレイの両システムには特定の視点が存在しない。

既存のマルチディスプレイシステムでは、デバイスの表示するコンテンツ情報が正面に対して一方向にのみ発信される。よって、特定の視点を設置した際には、視点がデバイスに対して正面でない限り表示されるコンテンツ情報の一部、又は全てを失う事となる。よって、本研究では、特定視点とデバイス間の物理的位置空間を把握する事を必要とする。

#### 3.3.2 幾何学的ひずみによる情報の劣化

第3.3.1項に同じく、物理的空間内に分散されるデバイスが持つ傾きや奥行きの差による幾何学的なひずみが生じるため、表示されるコンテンツの情報の損失を防がなくてはならない。しかし既存システムは、デバイスに対する視点を持っていないため、コンテンツを受け取る視点は常に正面にある事を前提としているため、幾何学的ひずみの補正を行う機能を持っていない。よって、本研究ではデバイスの持つ傾きや奥行きによる幾何学的なひずみを補正するための機能を持つ事を必要とする。

### 3.4 まとめ

本章では、本研究が想定する近い将来における本研究の利用シーンの実現において既存のマルチディスプレイシステムが持つ問題点を、デバイス間の物理的位置関係の欠如と幾何学的ひずみによる情報の劣化として2点挙げた。次章で、これらの問題点を解決する手法を述べる。

# 第4章 Dynamic Multiple Display Arrangements

本章では、第3章で述べた、本研究の想定する近い未来の利用シーンに対する既存システムの持つ問題点を解決するシステム、Dynamic Multiple Display Arrangements(以下DMDA)を提案する。又、DMDAの持つ解決手段と関連研究を比較し、本研究で評価すべき機能を検討する。

## 4.1 本研究要件

第3.3節で明確化した問題点に対する解決手段を述べる。

### 4.1.1 デバイス間の物理的位置空間の把握

物理的空間内に分散されるデバイスは物理的位置空間における各デバイスの位置関係を把握していない。これにより、各デバイス間に傾きや奥行き、水平距離による幾何学的ひずみが生じた場合、同一コンテンツの情報劣化が生じる。本研究ではこの問題点に対し、デバイスの物理的位置空間における傾き、視点からの奥行き、視点からの水平距離を観察者の設置により把握する事によって各デバイスの絶対的位置を取得する事によって、物理的空間内に分散されたデバイス間の位置関係を把握する事が可能となる。

### 4.1.2 物理的位置空間の補正

前項で述べた問題点と同様に、各デバイス間に生じる幾何学的ひずみにより、コンテンツ情報は劣化する。これをデバイス間の物理的位置空間を把握により分散されたデバイスを統合する。本研究ではこの問題点に対し、デバイスの持つ幾何学的ひずみを特定の視点に対して、正常となるディスプレイを仮想的に生成する事によって補正する。これによりコンテンツの劣化した情報を修復し、ディスプレイに表示する事が可能となる。

### 4.1.3 デバイス間の位置情報共有

観察者の設置により特定の視点を中心とした時の、デバイスの物理的位置情報を取得する上で、物理的位置空間の補正を複数デバイス上で行うためには各デバイス間の情報を共

有する事が必要となる。

## 4.2 Dynamic Multiple Display Arrangements の提案

前節で述べた本研究要項を満たすマルチディスプレイシステム「Dynamic Multiple Display Arrangements (以下 DMDA)」を提案する。

DMDA は特定の視点を設定した場合において、複数の物理的空間内にて分散されたデバイス間の物理的位置空間における具体的位置、傾き、奥行き、水平距離を観察者の設置によって把握し、デバイス間で位置情報を共有し、視点に対して正常なコンテンツ情報を表示するための幾何学的ひずみの補正を行い、仮想的に統合するシステムである。

本研究要項の実現手法については、第 5 章で述べる。

## 4.3 関連研究

本節では、第 4.1 節で述べた本研究の要件に関する関連研究を挙げ、本研究が評価すべき要件を明確化する。

### 4.3.1 Siftables

Siftables は、MIT の開発した複数の小型ディスプレイを用いた分散マルチディスプレイシステムによるセンサー・ネットワーク・ユーザ・インターフェイスである。[10] 物理的空間における各デバイス間をワイアレスネットワークを用いて情報共有を行い、デバイスのグループ化、デバイスの直感的操作によるタンジブル・コンピューティングを行う。

各デバイスは、フルカラー有機エレクトロルミネッセンスによるスクリーン、赤外線、3次元可速度センサー、Bluetooth、フラッシュメモリ、充電式バッテリーを搭載した低処理速度のコンピュータである。

一機能として、複数のデバイスが物理的に隣接した際に、ディスプレイに表示された人間が隣接するデバイスに向き合う機能がある。Siftables が認知可能なデバイス間の物理的位置関係は、ディスプレイを正面にして上下左右と、傾きである。デバイス間の 3次元距離は取得出来ない。表示するコンテンツはディスプレイ画面にクリッピングされており、デバイス間を越えて同一コンテンツを表示する機能は存在しない。よってデバイスと視点間の物理的位置を考慮した画像補正は行っていない。このシステムの使用例として、隣接するデバイスに向かって顔を向ける機能を図 4.1 に示す。

Siftables の開発目的は身体感覚を通じて情報とメディアにアクセスする事である。よって、コンピュータ上で音楽ファイルや写真ファイルを表示させる事よりも多くのメディアを、多くのグルーピング手法を用いて容易く操作する事を可能とする。

## 4.3. 関連研究



図 4.1: 関連研究「Siftables の使用図」

## 4.3.2 iPong

iPong は株式会社コピキタスエンターテイメントの制作した複数の iPhone, あるいは iPod touch(以下 iPhone) を使用した Pong と呼ばれるゲームである。[11] 従来の Pong に異なり, 複数人数でのゲーム操作が可能となり, ゲームに使用されるボールがゲームに参加しているデバイス間を移動する。これに対して, 各デバイスがタッチスクリーンを指で画面下のボードを操作してボールを跳ね返すものである。同一ネットワーク上にいるデバイスを認知し, P2P でデータを共有する。

デバイス間でボールが移動する際には, 実際のデバイス間の物理的位置空間の把握はされておらず, ネットワークに参加しているデバイスを順々に移動していく。又, デバイス間を移動する際の, デバイス間の空間は考慮されておらず, 一定時間を持って別のディスプレイに表示される。よってデバイスと視点間の物理的位置を考慮した画像補正も同じく行っていない。iPong を複数のユーザが利用している場面を図 4.2 に示す。



図 4.2: 関連研究「複数人数で iPong を使用した図」

## 4.3. 関連研究

## 4.3.3 Virtual Global Race

Virtual Global Race (以下 VGR) は, Intel ブラジル社の開発した複数のマシン上で仮想的に一つのサーキット場を表示させるシステムである. [12]VGR は, 特定の仮想サーキット場を構築するパーツを開発ウェブページから取得し, 複数のデバイス上でスクリーンサーバとして起動する事で仮想的にサーキット場を構築するアプリケーションである. 仮想サーキット場は, パードビューで見る事を想定して制作されている. 視点を任意に設定する事は出来ない. 又, デバイス間の物理的位置の把握はされておらず, アプリケーションを実行する者の意図によってサーキット場を構成する必要性がある. 又, マシン間の情報共有もされておらず, サーキット場を走るマシンの同期もアプリケーション実行者の任意である. マシンの同期には, 手動でスクリーンサーバが開始されるタイミングを修正している. VGR を起動し, サーキット場を一台のマシンが走っている様子を図 4.3 に示す.



図 4.3: 関連研究「Virtual Global Race を実行した図」

## 4.3.4 本研究要項と関連研究の比較

前節で本研究要項について 3 つ関連研究を挙げそれぞれについて説明した. 本節では, 本研究要項について関連研究を比較する. 比較を表 4.1 に示す. デバイス間の物理的位置空間の把握については Siftables と VGA の 2 つの関連研究が相対的, 又は手動で行われている事が分かる. 又デバイス間の位置情報共有については, Siftables と iPong において行われている事が分かる.

一方, 物理的位置空間の補正及び描画を行っている関連研究は本研究で挙げた中に存在しない事が分かった. 本研究が想定する近い将来の利用シーンの実現において, 本研究で焦点を当てるべき点が物理的位置空間の補正である事が分かった.

本研究では, 物理的位置空間の補正を主機能とした DMDA のプロトタイプの制作を行い, 物理的位置空間の補正精度をはかり, 幾何学的ひずみによるコンテンツの情報劣化を防げるかを評価する.



## 4.4. まとめ

表 4.1: 本研究と関連研究の比較

	デバイス間物理的 位置関係の把握	物理的位置空間 の補正及び描画	デバイス間の 位置情報共有
Siftables	3 軸加速度センサー による相対的位置	なし	Bluetooth での情報共有
iPong	なし	なし	同一 LAN での 情報共有
VGR	手動入力による 相対的位置	なし	なし
DMDA	具体的位置	あり	無線ネットワーク

## 4.4 まとめ

本章では、本研究要項を複合した新規マルチディスプレイシステム「Dynamic Multiple Display Arrangements (以下 DMDA)」を提案した。又、本研究要項の関連研究を 3 つ挙げ、それぞれについて述べた。まとめとして、各関連研究の本研究要項に関する表を示し、DMDA が焦点を当てる要項を物理的位置空間の補正に定めた。次章以降で物理的位置空間の補正を評価するための DMDA プロトタイピングの設計、実装を行う。

## 第5章 設計

本章では，Dynamic Multiple Display Arrangements(以下 DMDA) のプロトタイプ実装について，全体の設計概要と各モジュールについて使用する手段を検討する．

### 5.1 設計概要と本研究におけるアプローチ

本節では，第 4.1 節で述べた本研究要項を満たすために DMDA のプロトタイプを設計する．これにあたり，それぞれの実装に用いる手段を検討する．第 4.1 節では，次の 3 点を挙げた．

- デバイス間の物理的位置空間の把握
- 物理的位置空間の補正
- デバイス間の情報共有

又，第 4.3.4 項にて，本研究では物理的位置空間の補正による本研究の将来の利用シーンに対する有効性を検証するために，精度を評価検証するためのプロトタイプを実装する事を述べた．これにあたり，各点の実装に適した手法を検証し，本研究におけるアプローチとする．

分散型マルチディスプレイを統合しコンテンツを表示するために，仮想ディスプレイを用いる．仮想ディスプレイとは，複数のデバイスを仮想的に統合する際に，各デバイスの物理的位置空間上に作成するディスプレイのことである．デバイス間の物理的 maximum 位置に仮想ディスプレイを作成する概念を図 5.1 に示す．仮想ディスプレイの  $x$  軸上最小点をディスプレイ A の左点， $x$  軸上最大点をディスプレイ C の右上点， $y$  軸上最小点をディスプレイ B の下点， $y$  軸上最大点をディスプレイ C の右上点とした．又，各デバイスの中で最も視点に対して奥行きが小さい点に位置するポイントを仮想ディスプレイの生成点とする．これらの点を用いて，デバイス間の物理的 maximum 位置を認識し仮想ディスプレイを作成する事で，各デバイス毎のコンテンツ表示領域を明確化する事が可能となる．

#### 5.1.1 カメラキャリブレーションと逆 3D 変換の検証

本研究では，将来の利用シーンでの実用性を検証するために，物理的位置空間の補正に関する精度を求める．物理的位置空間の補正を行うにあたって，カメラキャリブレーション

## 5.1. 設計概要と本研究におけるアプローチ

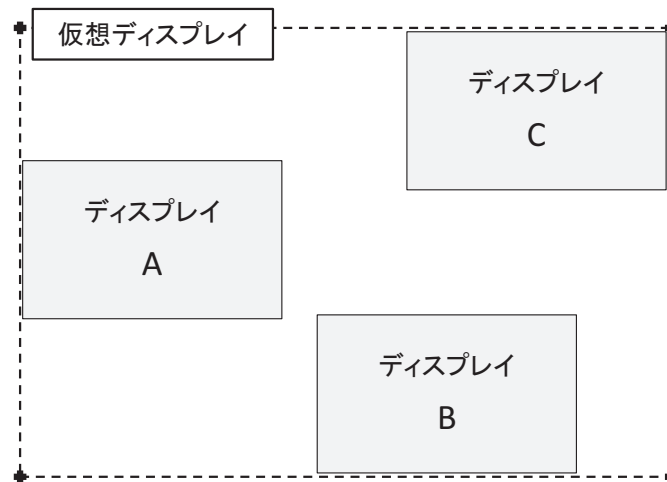


図 5.1: 複数デバイス間の物理的最大点と仮想ディスプレイの作成

ンと位置情報の手入力による逆 3D 変換のどちらが DMDA の手法として適しているかを検証した。

カメラキャリブレーションによる物理的位置空間の補正は、キャリブレーション用のコンテンツをカメラに対して正しい情報を表示するようデバイス側の表示方法を調整して行う。調整には、拡大・縮小とコンテンツの 4 隅を  $x$  軸,  $y$  軸方向に平行移動させて形状を変化させて行う。デバイスの物理的位置情報を必要とせず、デバイスの幾何学的ひずみにおける依存性も存在しない。よってカメラキャリブレーションは複数のプロジェクターを用いる際に使用される [13]。しかし、視点が移動する毎にキャリブレーションを行う必要性があり、視点の追従を行うことは出来ない。

対して逆 3D 変換は、デバイスの物理的位置情報を入力すれば、逆 3D 変換アルゴリズムを用いることによってカメラ等を使用せずに幾何学的ひずみを補正したコンテンツをシミュレーションすることが出来る。これにより、視点の動的な追従が行える。

よって、主旨となる精度の高い物理的位置空間の補正を実装出来る逆 3D 変換を本プロトタイプに用いる。

### 5.1.2 サーバ・クライアントモデルと P2P モデルの検証

本システムのプロトタイプ実装において、複数デバイス間の情報通信にサーバ・クライアントモデルと P2P モデルのどちらが適しているかを検証した。

プロトタイプとして実装するにあたって、物理的位置空間の補正と位置情報の共有、コンテンツの描画それぞれの機能を明確化し実行する事によって本システムの必要機能を理解する必要がある。P2P モデルを用いる事によって生まれる情報送受信のタイミング調整やパケットロス等の問題によって他モジュールに影響を及ぼし各モジュールを把握出来ない状況を考慮するのは本研究の主旨と異なる。よって、本プロトタイプではサーバ・クライアントモデルを複数デバイス間の情報共有モデルに用いる。TCP によるセッショ

## 5.1. 設計概要と本研究におけるアプローチ

ンを張り，データの確実な共有をはかる．本プロトタイプにおけるサーバ・クライアントモデルの概念とクエリを図 5.2 に示す．サーバとクライアント間で共有されるのは各デバイス毎の仮想ディスプレイの座標と，各仮想ディスプレイを統合した全体の仮想ディスプレイの座標とした．

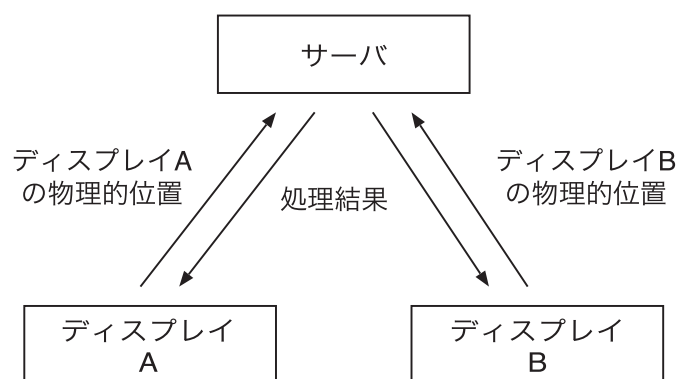


図 5.2: サーバ・クライアントモデル

## 5.1.3 モジュール相関図を用いたシステムの流れの説明

本節で物理的位置空間の補正に対するアプローチに逆 3D 変換を用いることを述べた．又，デバイス間の情報共有に対するアプローチにサーバ・クライアントモデルを使用することを述べた．これらアプローチをふまえた DMDA のモジュール相関図を図 5.3 に示す．図解では仮想ディスプレイを ID(Image Display) と表記する．中央にひかれた破線より下部をクライアント・モジュールとし，上部をサーバ・モジュールとする．モジュール相関図を用いて DMDA プロトタイピングの流れを説明する．

状態把握モジュールにおいて各デバイスの持つ物理的位置情報，ディスプレイ解像度，IP アドレスを取得する．これらを基にして，各デバイス毎の仮想ディスプレイの座標（以下ローカル ID 座標）を導き出す．状態把握モジュールで導き出したローカル ID 座標，IP アドレスを IO モジュールに渡し，サーバに送信する．

ID データ処理モジュールでは，DMDA プロトタイピングを実行しているデバイスの情報管理を行う．管理内容として，各デバイスの IP アドレスとローカル ID 座標がある．この各デバイス毎のローカル ID 座標の中で最も x 軸上，y 軸上それぞれで大きい座標を統合し，グローバル ID 座標を求める．又，求めたグローバル ID 座標をクライアント側の IO モジュールに送信する．

IO モジュールから受け渡されたグローバル ID 座標を画像描画モジュールにてローカル ID 座標と比較する．これによって，各デバイスが自身の表示すべきコンテンツ領域を把握し，必要となるコンテンツ領域をクライアント側に保存されてあるコンテンツから切り出す．ローカル ID 座標に基づいて物理的位置空間における幾何学的ひずみを補正し，切り出したコンテンツを描画する．

## 5.2. 状態把握モジュール

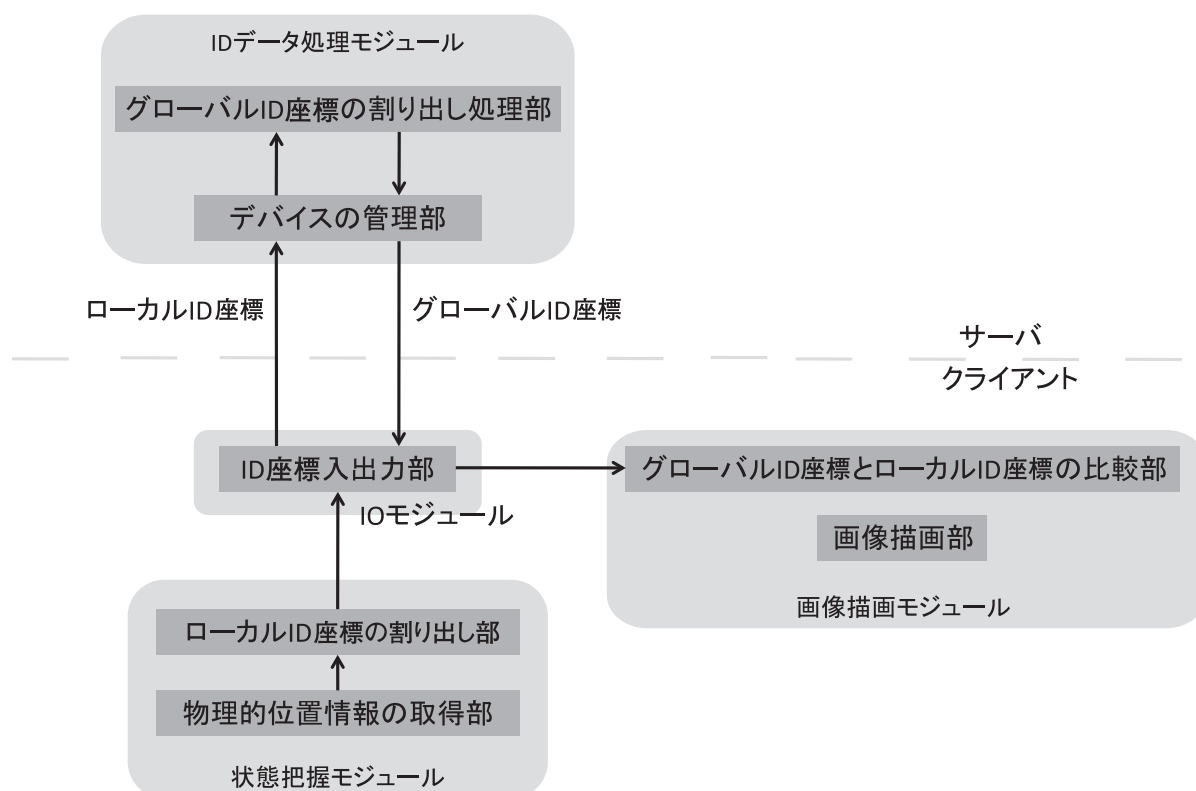


図 5.3: Dynamic Multiple Display Arrangements のモジュール関連図

## 5.2 状態把握モジュール

状態把握モジュールは、手動で入力された各デバイスの物理的位置情報を用いて各デバイス毎の仮想ディスプレイ座標を割り出し、ローカル ID 座標として IO モジュールに受け渡す。本節では、仮想ディスプレイ座標を割り出すための機能を位置データの静的化とアフィン変換による逆 3D 変換とに分けて述べる。

## 5.2.1 位置データの静的化

物理的位置空間の補正を行うにあたって、位置測定手法の模索は本研究の要件に沿っていないため述べない。よって、物理的位置空間の補正に必要な視点、注視点、視点からデバイスまでの奥行き距離、注視点からデバイスまでの水平距離、デバイスの水平線に対する角度等の位置情報は手動で入力し、静的に扱う。入力する情報を表 5.1 に示す。又、入力する情報の物理的空間における関係を図 5.4 に示す。入力した型が cm 単位の情報は、物理的位置空間の補正をデジタル情報を用いて行う必要があるため、単位をピクセルに変換する。デバイスの物理的大きさを cm 単位で測定し、デバイスの解像度と比較し、1 ピクセルの表示する物理的領域を割り出した。

5.2. 状態把握モジュール

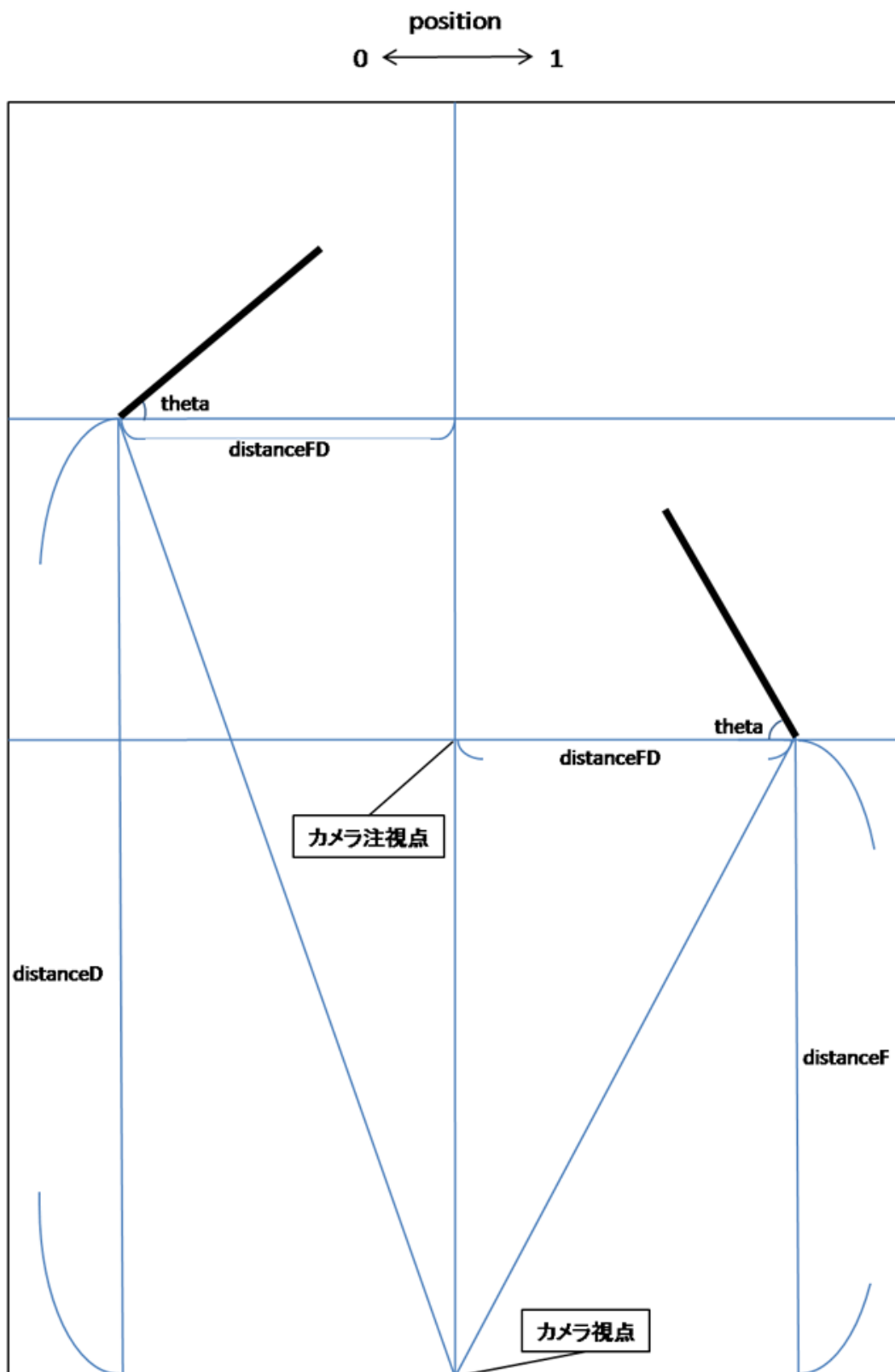


図 5.4: 手動で設定する静的位置情報

## 5.2. 状態把握モジュール

表 5.1: 手動で設定する静的位置情報

入力する位置情報	型	役割
Position	0/1	デバイス位置がカメラ注視点に対して左にある場合を「0」 デバイス位置がカメラ注視点に対して右にある場合を「1」
DistanceF	cm	視点からカメラ注視点までの奥行き
DistanceD	cm	視点からデバイスまでの奥行き
DistanceFD	cm	カメラ注視点からデバイスまでの水平距離
theta	degree	デバイスの持つ水平線に対する角度

## 5.2.2 アフィン変換による逆 3D 変換

アフィン変換による逆 3D 変換を用いてデバイスの物理的位置空間における幾何学的ひずみを補正し、ローカル ID 座標を求める。アフィン変換とは、ユークリッド幾何学的な線形変換と平行移動の組み合わせによる座標変換手法である [14]。これを用いてデバイスのワールド座標を求め、ワールド座標を透視法を用いて仮想ディスプレイ上の座標に変換する。

まず、入力された回転角度を用いてデバイスをワールド空間で y 軸回転させる。ワールド空間における y 軸は、高さを表す軸とする。回転の中心点にはデバイスの中心点を用いる。アフィン変換における y 軸回転を式 (5.1) に示す。回転させた後に、z 座標に対してデバイスまでの奥行き距離を与え、デバイスのワールド座標を求める。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos & 0 & -\sin & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin & 0 & \cos & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

求めたワールド座標の仮想ディスプレイ上に対応する座標を求めるために透視投影を用いる。視点を原点、仮想ディスプレイが入力された「distanceF」上にあった場合、点  $P(x,y,z)$  が仮想ディスプレイに投影されたときの点  $P'(x',y')$  を式 (5.2),(5.3) に示す。デバイス上の全てのピクセルに対してこの変換を行い、デバイスと仮想ディスプレイの対応リストを配列を用いて生成する。この対応リストは、サーバでグローバル ID 座標が求められた後にクライアントでコンテンツを描画する際に用いられる。全てのピクセルの変換を行うとともに、デバイスの x 軸上最小点、最大点、y 軸上最小点、最大点の 4 つのポイント毎の仮想ディスプレイ上での座標を求め、ローカル ID 座標として IO モジュールに渡す。

$$x' = \left( \frac{\text{distanceF}}{z} \right) x \quad (5.2)$$

## 5.3. IO モジュール

$$y' = \left( \frac{\text{distance}F}{z} \right) y \quad (5.3)$$

## 5.3 IO モジュール

IO モジュールは、各モジュール間で仮想ディスプレイ座標を入出力するモジュールである。

## 5.4 ID データ処理モジュール

ID データ処理モジュールは、各ローカル ID 座標間で最大値となる座標を用いて各デバイスを統合する仮想ディスプレイ（以下グローバル ID 座標）を割り出す。機能の一部として、DMDA を実行しているデバイスの情報管理を行う。デバイス管理に用いるデータを以下に表す。

- IP アドレス
- ローカル ID 座標

デバイスの管理は、DMDA を実行しているデバイス毎にユニークなテキストファイルを用いて行う。テキストファイルはデバイスの IP アドレスをファイル名とすることでユニーク性を持ち、ローカル ID 座標を内包する。デバイス管理に用いるテキストファイルの内容を図 5.5 に示す。ローカル ID 座標は、テキストファイルにおいて最小値となる  $x,y$  と最大値となる  $x,y$  を 1 行毎に書かれている。これはサーバ・クライアント間で情報を交換する際に、情報の型が String となってしまうために Point や Dimension といった型の正確な値が反映されないために起因する。

```
133.27.60.128 // IP Address
-720 // Smallest x
-450 // Smallest y
719 // Largest x
449 // Largest y
```

図 5.5: デバイス管理に用いるテキストファイル

グローバル ID 座標の割り出しは、各テキストファイルに内包されているローカル ID 座標の最小値と最大値を比較して行う。比較する過程の各時における最小値と最大値を一時的に記憶させ、最終的に各テキストファイルを比較し終えた時点での最小値と最大値がグローバル ID 座標となる。割り出したグローバル ID 座標を、IO モジュールを介して画像描画モジュールに渡す。



## 5.5 画像描画モジュール

画像描画モジュールは、状態把握モジュールで生成したデバイス上のスクリーン座標と仮想ディスプレイ座標の対応リストを用いて、ID データ処理モジュールで求めたグローバル ID 座標とデバイス上のスクリーン座標を対応させ、コンテンツを描画する。

グローバル ID 座標とスクリーン座標を対応させると同時に、描画するコンテンツをグローバル ID 座標に応じた大きさにスケーリングし、座標軸をグローバル ID 座標に同期させる。

スケーリングされたコンテンツの全てのピクセルをデバイス上のピクセルと対応させ表示させる。この際に、対応するピクセルがコンテンツとデバイス間において 1:1 とは限らないために、デバイス上にてコンテンツ情報が内包されていないピクセルが生じる。これを解決するために、コンテンツ情報が内包されていないピクセルに対して、 $x$  軸方向の 1 つ前のピクセルが内包するコンテンツ情報をコピーする。又、グローバル ID 座標に対応するデバイス上のピクセルがデバイスの解像度を越えることによってエラーが生じることを避けるために、そうしたピクセルは描画対象から除外する。

## 第6章 実装

本章では、Dynamic Multiple Display Arrangements(以下 DMDA) のプロトタイプ実装について、各モジュール毎の実装を説明する。

### 6.1 実装概要

本プロトタイプではクライアント側で実行するアプリケーションとサーバの2種類を実装した。クライアント側アプリケーションは「Processing1.0」を用いて実装し、物理的位置情報の手入力部分ライブラリに「Interfascia」を使用した。サーバについては Java で実装した。Processing1.0 は Java のネイティブ言語が背景で使用されているため、サーバとの互換性に問題は見られなかった。本実装の実装環境を表 6.1 に示す。

表 6.1: 実装環境

使用 OS	MacOSX 10.5.4
使用言語	Java Processing
開発環境	Xcode 3.0 Processing 1.0
使用ライブラリ	Interfascia

### 6.2 状態把握モジュール

入力されたデバイスと視点の静的位置データを用いたローカル仮想ディスプレイ値の計算し、デバイスと仮想ディスプレイのピクセル対応表を生成するモジュールである。図 6.1 にアルゴリズムを示し、アルゴリズムに使用する変数の説明を表 6.2 に示す。

デバイスの持つ全てのピクセルに対し、デバイス上の  $x$  ポジション、 $y$  ポジションを求め、手入力した値に基づきアフィン変換を行う。アフィン変換では  $z$  軸周りを回転させた後にカメラ視点からデバイスまでの奥行き距離分、又、カメラ注視点からデバイスまでの水平距離を平行移動してワールド座標系ピクセルを求める。この際に、デバイスの position によって平行移動する水平距離の演算子を「+」もしくは「-」のいずれかを選択

## 6.2. 状態把握モジュール

する。ワールド座標系を求めた後に、透視法に基づいた計算を行い、仮想ディスプレイ上でのピクセルが対応する位置を割り出す。

割り出した仮想ディスプレイ上のピクセルをそれぞれ 2 次元配列を用いて記憶させる。この対応表は、サーバ側でグローバル仮想ディスプレイ値を計算し、クライアントに返した後の逆 3D 変換で必要となる。

```
void Cal(){

    for (int i=0; i<_dpiW*_dpiH; i++) {
        x = i % _dpiW - _dpiW/2;
        y = (i - (i%_dpiW)) / _dpiW - _dpiH/2;

        if (position == 0) {
            xw = _cos*x - _distanceFD;
        } if (position == 1) {
            xw = _cos*x + _distanceFD;
        }
        if (position == 0) {
            zw = _sin*x + _distanceD + _dpiWsin/2;
        } if (position == 1) {
            zw = (-1)*_sin*x + _distanceD + _dpiWsin/2;
        }
        yw = y;

        xs = _distanceF / zw * xw;
        ys = _distanceF / zw * yw;

        xsf = (int)(xs + (-1)*minXs);
        ysf = (int)(ys + (-1)*minYs);
    }

    one2onePixels[ysf][xsf] = i;

}
```

図 6.1: ソースコード「ディスプレイ上ポイントの 3D 変換」

## 6.3. 仮想ディスプレイ値処理モジュール

表 6.2: 3D 変換に用いる変数一覧

変数名	型	説明
x	float	デバイス上の x ポジション
y	float	デバイス上の y ポジション
xw (x world)	float	ワールド座標における x ポジション
yw (y world)	float	ワールド座標における y ポジション
zw (z world)	float	ワールド座標における z ポジション
xs (x screen)	float	仮想ディスプレイ上の x ポジション
ys (y screen)	float	仮想ディスプレイ上の y ポジション
minXs	int	仮想ディスプレイ上の最小 x ポジション
minYs	int	仮想ディスプレイ上の最小 y ポジション
xsf	int	軸変換を考慮した仮想ディスプレイ上の x ポジション
ysf	int	軸変換を考慮した仮想ディスプレイ上の y ポジション
one2onePixels	int[ ][ ]	デバイスと仮想ディスプレイのピクセル対応表

## 6.3 仮想ディスプレイ値処理モジュール

仮想ディスプレイ値処理モジュールはサーバ側で実行される。各デバイスから送られてきたローカル仮想ディスプレイ値を管理し、グローバル仮想ディスプレイ値を割り出すモジュールである。本モジュールにはデバイスの管理部、グローバル仮想ディスプレイ値の割り出し部が存在する。以下に各機能部を説明する。

- デバイスの管理部

デバイスの管理は、DMDA を実行しているデバイス毎の IP アドレス、デバイスのカメラ注視点に対する水平位置、ローカル仮想ディスプレイ値を内包したファイルを作成する事によって実装した。図 6.2 にデバイス毎のユニークファイル作成のアルゴリズムを示す。

サーバはクライアントが接続してきた事を確認し、null ファイルを生成する。この null ファイルに対してクライアントから送られてきたデータに内包されているクライアントの ip アドレスを用いてファイル名を変更する。ファイル名を変更した後に、ファイルの内容にクライアントから送られてきたデータをコピーする。前もって null ファイルを作成した理由として、クライアントからデータを入力する際に while 文を用いているために、while 文スコープの外でファイルを宣言、初期化する必要性があったためである。

- グローバル仮想ディスプレイの割り出し処理部

デバイスの管理部よりデータを格納したファイルの内容を受け取り、グローバル ID を割り出すモジュールである。図 6.3 にグローバル仮想ディスプレイ値の計算アルゴリズムを示す。

## 6.4. 画像描画モジュール

## 6.4 画像描画モジュール

仮想ディスプレイ値の処理モジュールで割り出したグローバル仮想ディスプレイ値をローカル仮想ディスプレイ値と比較し、各デバイスで描画すべき領域を求め、描画するモジュールである。ソースコードを図 6.4 に示し、用いる変数を表 6.3 に示す。

ローカル仮想ディスプレイの持つピクセルに対して対応するデバイスのピクセルを、対応表から導く。又、グローバル仮想ディスプレイに対応するピクセルを導く。グローバル仮想ディスプレイ値にスケーリングされている `imageDisplay` からピクセル情報を抜き出し `device` に置き換える。

表 6.3: コンテンツ描画に用いる変数一覧

変数名	型	説明
iDW	int	グローバル仮想ディスプレイの横幅
iDH	int	グローバル仮想ディスプレイの縦幅
iDWL	int	ローカル仮想ディスプレイの横幅
iDHL	int	ローカル仮想ディスプレイの縦幅
imageDisplay	image	グローバル仮想ディスプレイ値にスケーリングされたコンテンツ
device	image	デバイスで表示する領域にクリッピングされたコンテンツ

## 6.5 まとめ

本章では DMDA の実装方法について述べた。これについて次章で物理的位置空間の補正、また複数デバイス間の補完の検証を行い、評価について述べる。

## 6.5. まとめ

```
sock = server.accept();

in = new BufferedReader(
    new InputStreamReader(sock.getInputStream()));
out = new PrintWriter(sock.getOutputStream(), true);

File file = new File("null.txt");
boolean chk = false;

try {
    chk = file.createNewFile();
} catch (IOException e) {
    e.printStackTrace();
}

try {
    stream = new FileOutputStream(file);
    osr = new OutputStreamWriter(stream);
    bw = new BufferedWriter(osr);

    int count = 0;
    String read;
    while((read = in.readLine()) != null) {
        _localData[count] = read;
        if(count == 0){
            renameFile = new File(read + ".txt");
            boolean chkf = file.renameTo(renameFile);
        }
        bw.write(_localData[count], 0, _localData[count].length());
        bw.newLine();
        bw.flush();
        osr.flush();
        stream.flush();
        System.out.println(_localData[count]);
        count++;
        if (count == 9) {
            break;
        }
    }
}
```

図 6.2: ソースコード「デバイス毎のユニークファイル作成」

```
while ((read = br.readLine()) != null) {
    strs[count] = read;
    if (count == 1) {
        _mPointSmallest = new Point(Integer.parseInt(strs[count]), 1);
    }
    if (count == 2) {
        _mPointSmallest.y = Integer.parseInt(strs[count]);
    }
    if (count == 3) {
        _mPointLargest = new Point(Integer.parseInt(strs[count]), 1);
    }
    if (count == 4) {
        if (_mPointSmallest.y > Integer.parseInt(strs[count])) {
            _mPointSmallest.y = Integer.parseInt(strs[count]);
        }
    }
    if (count == 6) {
        _mPointLargest.y = Integer.parseInt(strs[count]);
    }
    if (count == 8) {
        if (_mPointLargest.y < Integer.parseInt(strs[count])) {
            _mPointLargest.y = Integer.parseInt(strs[count]);
        }
    }
    count++;
}
```

図 6.3: ソースコード「グローバル仮想ディスプレイ値の計算」

## 6.5. まとめ

```
for (int y=0; y<iDHL; y++) {
  for (int x=0; x<iDWL; x++) {
    int i = one2onePixels[y][x];
    int j = iDW*(iDH/2-iDHL/2+y) + x;
    if (position == 1) {
      j = iDW*(iDH/2-iDHL/2+y) + (iDW-iDWL+x);
    }
    if (j < 0){
      j = 0;
    }
    if (j >= iDW * iDH) {
      j = iDW * iDH - 1;
    }
    int k = imageDisplay.pixels[j];
    device.pixels[i] = k;
  }
}
```

図 6.4: ソースコード「コンテンツ領域の切り出し, 描画」



図 6.5: DMDA プロトタイプのスクリンショット



## 第7章 評価

本章では，第6章で実装した Dynamic Multiple Display Arrangements(以下 DMDA) のプロトタイプによる物理的空間内におけるデバイスの回転，奥行き，水平距離の補正精度を測定し，第4.1節で述べたデバイスと視点間の物理的位置の補正モジュールに関する精度が本研究で想定する将来の利用シーンにおいて有効であるかを検証する．本実験では，物理的空間内における幾何学的ひずみ補正精度の検証を，回転と，デバイス間における奥行き，水平距離それぞれ別に行った．回転の補正精度検証にシングルディスプレイを用い，デバイス間における奥行き，水平距離の補正精度検証にツインディスプレイを用いた．各幾何学的ひずみの検証を別々に行ったのは，各要素がもたらす補正精度の干渉を防ぐためである．

### 7.1 実験概要

本実験では，第6章において実装した DMDA のプロトタイプを用いて物理的位置空間を補正，生成，描画されたコンテンツを撮影し，理想値となるアフィン変換による逆3D変換によって計算された仮想ディスプレイ値にスケールされたコンテンツの8つのポイントを，デスクトップ上で比較する事によって物理的位置空間の補正精度を測定した．本実験で補正精度を検証するために用いた理想値の説明，理想値と比較するために測定したポイントの説明を述べる．

- 本実験における理想値

本実験では，物理的位置空間における幾何学的ひずみの補正精度を検証するために，第5.1節で述べたアフィン変換による逆3D変換を用いて計算した理論上の仮想ディスプレイが持つ解像度にコンテンツをスケールした．DMDA のプロトタイプが幾何学的ひずみを補正し，描画するコンテンツはこれを理想とする．逆3D変換は，本実験で撮影される DMDA を実行したデバイスが設置される各点毎に行われる．よって，理想値もデバイスの設置位置が変更される度に化する．

- 測定するポイント

DMDA のプロトタイプを用いて物理的空間内における幾何学的ひずみを補正し，描画したコンテンツと理想値となるコンテンツを比較するにあたって，本実験ではコンテンツ上の8つのポイントを測った．これを図7.1に示す．8つのポイントには，4つのメインポイントと，それらメインポイント間の空間を補完し，データを補助するための4つポイントを含めた．メインポイントはコンテンツ上の対角線上でよ

## 7.1. 実験概要

り大きい特徴点を見出し、4つのポイントとした。これは、物理的空間内にてデバイスを回転、奥行き、水平に平行移動させた場合に幾何学的ひずみが最大となるポイントを測定する事によって、DMDAのプロトタイプにおける最大補正誤差を測定するためである。これを図7.2に示す。

画面の対角線上で最も隅に近い4つのポイントを測定し、  
補間的意味合いとして中心に近い4つのポイントを測定した。

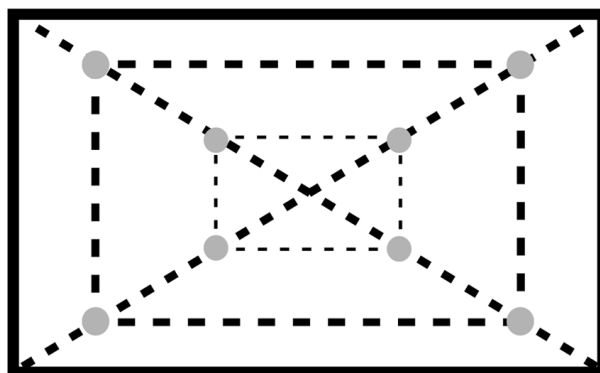


図 7.1: 実験環境「測定するコンテンツ上の8つのポイント」

物理的空間での回転による幾何学的ひずみを最も生じる  
デバイスの四隅を補正精度測定のポイントとする。

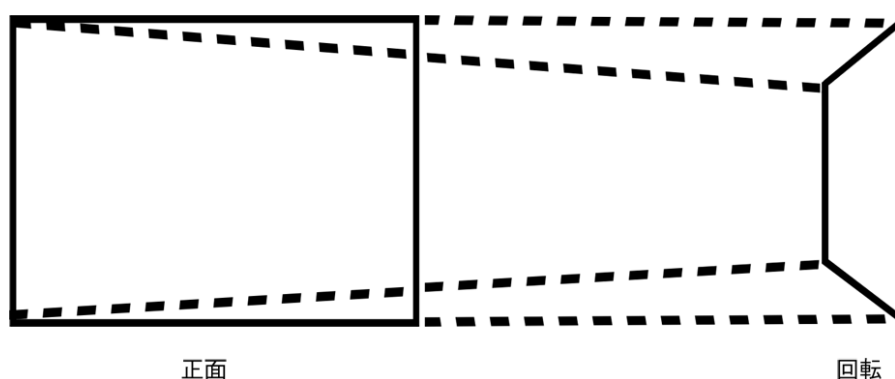


図 7.2: 実験環境「デバイスの四隅における幾何学的ひずみ」

本実験では、カメラを用いてデータの収集を行う際に、実験環境に取り入れた机、使用したデバイスや設定した物理的位置情報の関係からコンテンツの一部が撮影されたものからフレームアウトする状況が生じた。よって、測定するポイントをコンテンツの撮影された範囲内に設定し、デバイスの物理的位置が移り変わるに伴い、常時変更した。

## 7.1. 実験概要

### 7.1.1 実験環境

本項では実験環境について述べる．本実験では幅 120cm × 190cm の机の上にカメラ視点，カメラ注視点を奥行き 50cm，100cm，150cm に設け，各カメラ注視点を通り視点に対して垂直軸上に，カメラ注視点から水平距離 10cm, 20cm，30cm，50cm の実験ポイントを 13 点設けた．各ポイントには水平線に対する角度 20°，40°，60° をマーキングした．机の上に設置するデータを図 7.3 に示す．撮影には，デジタルカメラ（Canon Kiss Digital，50mm，1728 × 1152pixels，Gray Scale）を使用した．人間が使用する際の実用性を兼ねて，人間の持つ視界に近いレンズ値に設定した．使用するデバイスには，Apple 社 MacBookPro (MA610J/A) を 2 台使用した．[15] 実験の全体風景を図 7.4 に示し，各実験ポイントを図 7.5 に示す．

本実験に使用するコンテンツを図 7.6 に示す．コンテンツは横 14 本，縦 10 本の格子状に設計し，各軸に数字をつけた．格子状のコンテンツとしたのは，DMDA のプロトタイプを用いて生成したコンテンツと，理想値となるコンテンツを比較する際に特徴点 8 つを見出し易くするためである．

### 7.1.2 実験手法

本実験では，実験作業をデータ収集とデータ集計のフェーズに分けた．データ収集では DMDA のプロトタイプによる物理的位置空間の補正，及びコンテンツの描画された環境を撮影し，理想値となるコンテンツと 8 つのポイントについて絶対的距離をピクセル単位で測定した．データ集計では，測定した絶対的距離の単位をピクセルからパーセンテージに変換し，収集したデータを用いて実験目的に沿った集計を行った．各フェーズについて述べる．

#### ● データ収集

データ収集では，データ集計を行うために DMDA のプロトタイプを用いて物理的空間内の幾何学的ひずみの補正，及び描画したコンテンツを理想値となるコンテンツと各 8 つのポイントにおける絶対的誤差（pixels）を測定した．DMDA のプロトタイプを用いて描画されたコンテンツは，実験環境における各実験ポイントにデバイスを設置し，1 枚ずつ撮影した．理想値となるコンテンツは，各実験ポイントに物理的位置情報を基に仮想ディスプレイの Width/Height を計算し，スケーリングすることで生成した．その上で，撮影したコンテンツ上に理想値となるコンテンツを不透明度 60% にしてデスクトップ上で重ね合わせ比較した．シングルディスプレイを用いた実験では，撮影されたデバイスの幅に合わせて理想値となるコンテンツを重ねた．対して，ツインディスプレイを用いた実験では，重ね合わせる基点をカメラ注視点に対して左手にあるマシンの描画したコンテンツの中心点に設定した．これは，描画されたコンテンツを撮影した際にコンテンツの一部がフレームアウトしてしまったため，シングルディスプレイを用いた実験で行ったと同様にコンテンツを重ね合わせる事が不可能であったためである．デスクトップ上での誤差検証の様子を図 7.7 に示す．

## 7.1. 実験概要

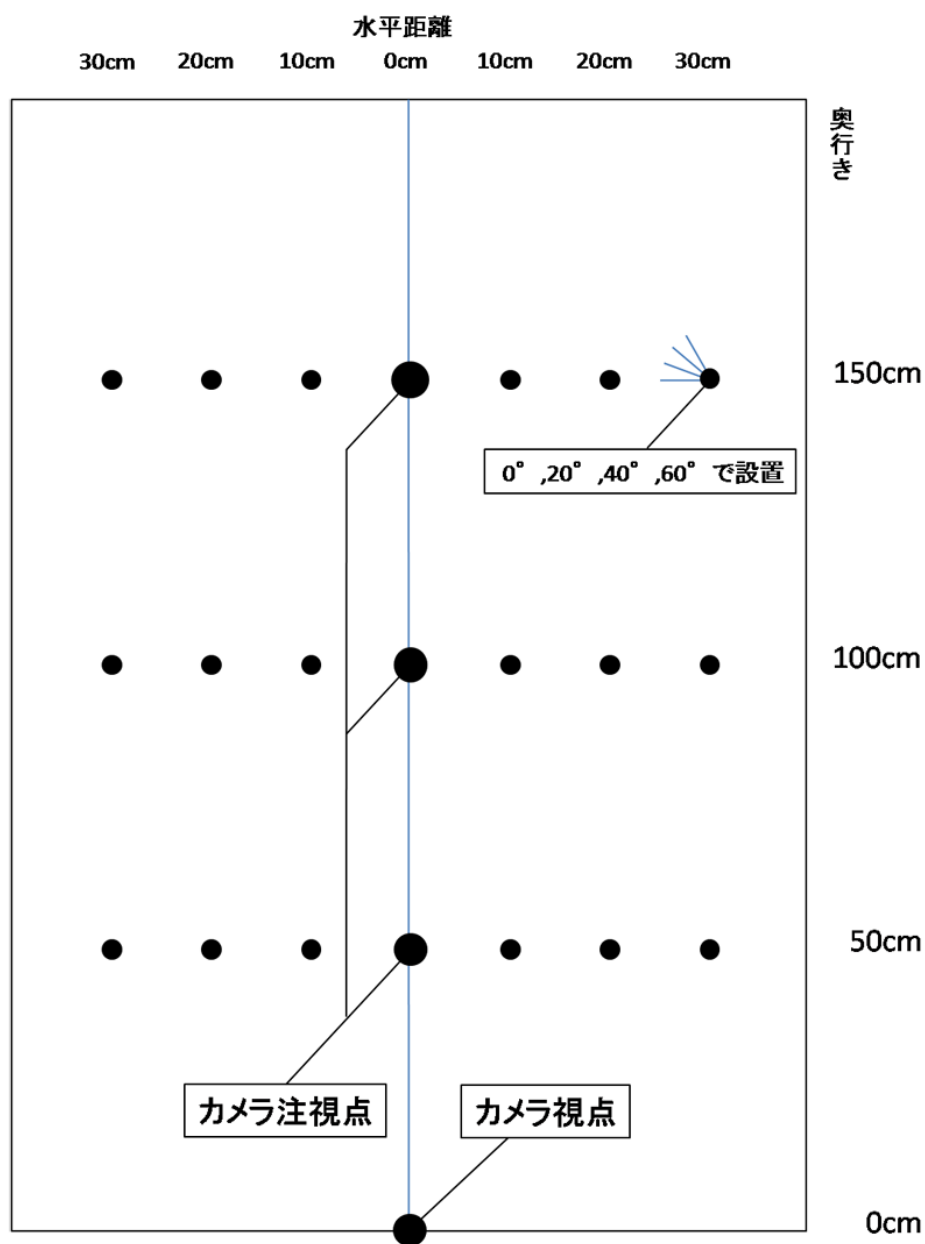


図 7.3: 実験環境「机上の設置ポイント」

DMDAのプロトタイプを用いて描画したコンテンツと、理想値となるコンテンツ上の8つのポイントを測定する際には、各コンテンツが相互に対応するポイントの左上点間のピクセル数を用いて測定した。これを図7.8に示す。

シングルディスプレイ、ツインディスプレイを用いて測定したデータの格納情報それぞれを表7.1, 表7.2に示す。

- データ集計

本実験で収集したデータを分析するために、各データの持つ補正誤差の単位をピク

## 7.1. 実験概要



図 7.4: 実験環境「全体風景」

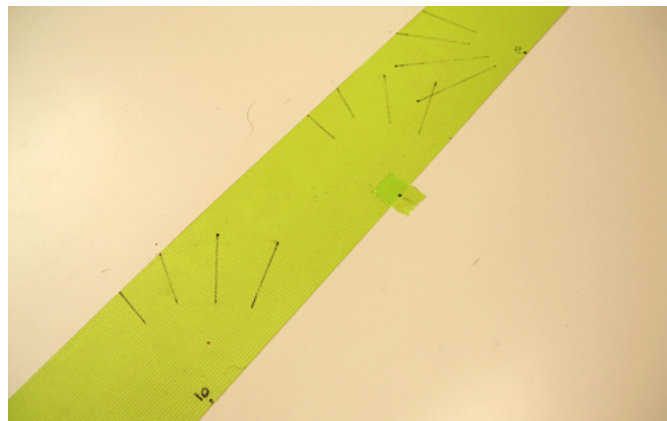


図 7.5: 実験環境「各実験ポイント」

セルからパーセンテージに変換した。これは、物理的空間内のデバイスの設置位置をかえてデータを収集したため、各データの撮影ファイルにおけるデバイスを表示するピクセル数が異なる事によって、各データが格納する補正誤差があらわず精度が判別しづらいためである。パーセンテージへの変換は、各データ毎の撮影ファイルにおけるデバイスを表示するピクセル数とピクセル単位の補正誤差の比率を求める事によって行った。

シングルディスプレイを用いた実験は、収集したデータの  $\theta$  を回転角度 20 度毎に集計し、補正誤差の平均値をパーセンテージを用いて集計する事で、物理的空間内での回転による幾何学的ひずみの補正精度を測定した。

ツインディスプレイを用いた実験は、収集したデータのカメラ注視点に対する左手に設置したデバイスと、右手に設置したデバイスの  $distanceD$  を比較し、 $distanceD$  に差があるものと、同一であるものとに分類した。分類したデータを、各データにおける 2 台のデバイスが持つ  $distanceFD$  の値によって分類し、それぞれの補正誤差を平均値を用いて集計した。これによりデバイス間の奥行き距離に差がある場合と

## 7.2. 実験結果

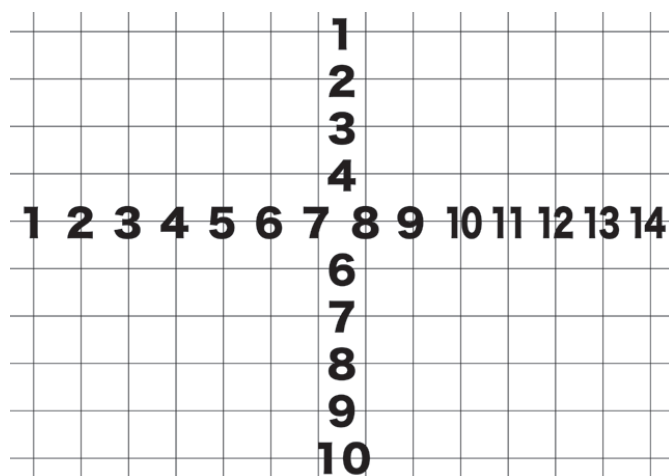


図 7.6: 実験環境「使用するコンテンツ」

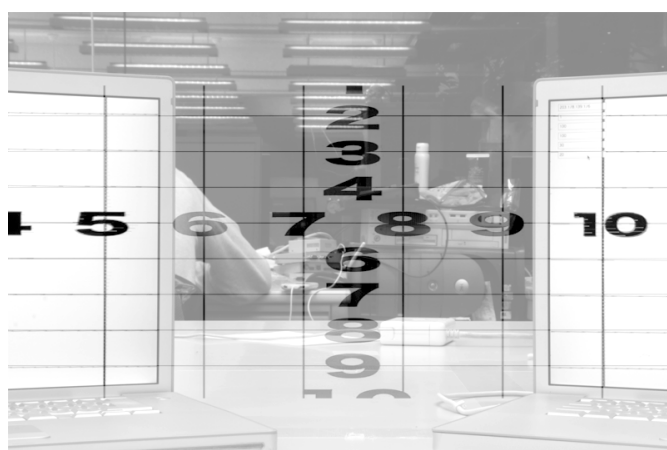


図 7.7: 実験手法「デスクトップ上での誤差検証」

ない場合それぞれにおける水平距離による補正精度を測定した。

## 7.2 実験結果

### 7.2.1 シングルディスプレイ

シングルディスプレイを用いた実験では総数 840 のデータを収集し、それぞれの補正誤差をパーセンテージを用いて計算した。実験で測定した角度  $20^\circ$  毎の補正誤差を図 7.9 に示す。

図 7.9 で表している補正誤差は、角度の値が高くなるにつれて精度を増している。理論的には、使用するコンテンツに対して幾何学的なひずみが生じておらず、補正を必要としない物理的位置に設置されている場合に精度が高いはずである。本実験ではカメラ視点に

## 7.2. 実験結果

DMDAのプロトタイプを用いて生成したコンテンツと理想値としてのコンテンツを重ね合わせた。

各コンテンツが相互的に対応するポイント左上点間のピクセル数を測定する。

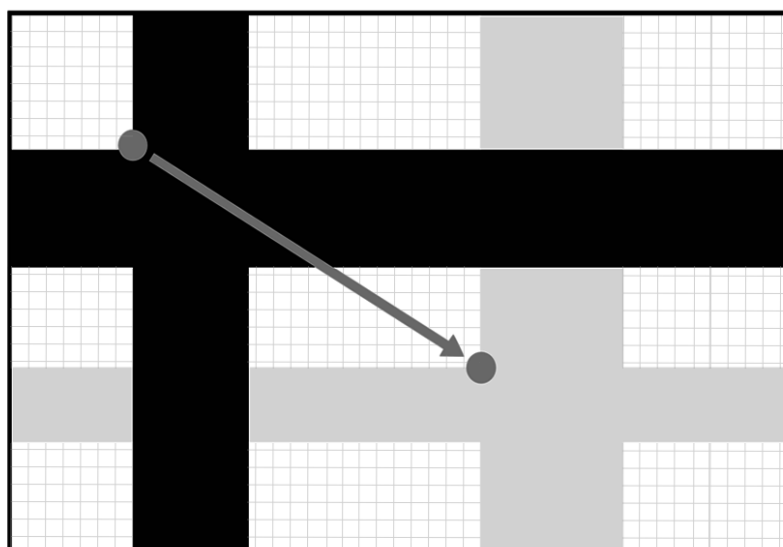


図 7.8: 実験手法「対応するポイント間のピクセル数測定」

表 7.1: 測定データの格納情報 (シングルディスプレイ)

情報名	型	内容
distanceF	cm	カメラ視点からデバイスまでの奥行き距離
distanceFD	cm	カメラ注視点からデバイスまでの水平距離
theta	degree	デバイスの水平軸に対する回転角度
screenW	pixel	デバイスの撮影ファイルにおける幅
screenH	pixel	デバイスの撮影ファイルにおける高さ
Point.l	x, y	測定したコンテンツ上のポイント
x.err(px)	pixel	ポイント間のピクセル数による x 軸方向の誤差
y.err(px)	pixel	ポイント間のピクセル数による y 軸方向の誤差
x.err(%)	percent	ポイント間の割合による x 軸方向の誤差
y.err(%)	percent	ポイント間の割合による y 軸方向の誤差

## 7.2. 実験結果

表 7.2: 測定データの格納情報 (ツインディスプレイ)

情報名	型	位置	内容
LdistanceD	cm	Left	カメラ視点からデバイスまでの奥行き距離
LdistanceFD	cm	Left	カメラ注視点からデバイスまでの水平距離
Ltheta	degree	Left	デバイスの水平軸に対する回転角度
LscreenW	pixel	Left	デバイスの撮影ファイルにおける幅
LscreenH	pixel	Left	デバイスの撮影ファイルにおける高さ
RdistanceD	cm	Right	カメラ視点からデバイスまでの奥行き距離
RdistanceFD	cm	Right	カメラ注視点からデバイスまでの水平距離
Rtheta	degree	Right	デバイスの水平軸に対する回転角度
RscreenW	pixel	Right	デバイスの撮影ファイルにおける幅
RscreenH	pixel	Right	デバイスの撮影ファイルにおける高さ
IDW	pixel	-	仮想ディスプレイの幅
Point.l	x, y	-	測定したコンテンツ上のポイント
device	0/1	-	デバイスのカメラ注視点に対しての左右位置
x.err(px)	pixel	-	ポイント間の x 軸方向の誤差
y.err(px)	pixel	-	ポイント間の y 軸方向の誤差
x.err(%)	percent	-	ポイント間の x 軸方向の誤差
y.err(%)	percent	-	ポイント間の y 軸方向の誤差

対して正面に位置し、回転を持っていない状態が幾何学的なひずみが生じておらず、補正を必要としない状態である。これはデバイスを物理的空間内で奥行き、水平距離、回転を持たせた状態で撮影した場合、持たせない状態と比較して解像度が低くなる事が関係する。正面に位置した状態と比較し、低解像度になる事によりデバイスの表示する1ピクセル辺りが対応するコンテンツ領域が広がる。これを図 7.10 に示す。

本実験のデータ収集では、DMDA のプロトタイプによって生成したコンテンツと理想値としてのコンテンツを比較する際に、相互的に対応するポイントの誤差を相対的なピクセル数の測定による行ったために、低解像度によって対応するピクセルの拡張したピクセル分を考慮しなかった。

又、本検証ではデータ検証において補正誤差が限りなく小さい場合もデータに含めたが、今後実用化するにあたっての利用シーンを想定し、人間の目を通じて利用するにあたり極度に小さい補正誤差を誤差から除いた。

デバイスの物理的空間の奥行き、水平距離、回転等の幾何学的ひずみによる低解像度化と人間の目を用いた利用シーンを考慮し、図 7.9 に示したグラフを校正する。校正するにあたって集計に用いないデータの条件を以下に示す。

- 低解像度によるコンテンツ情報の壊れたデータ



## 7.2. 実験結果

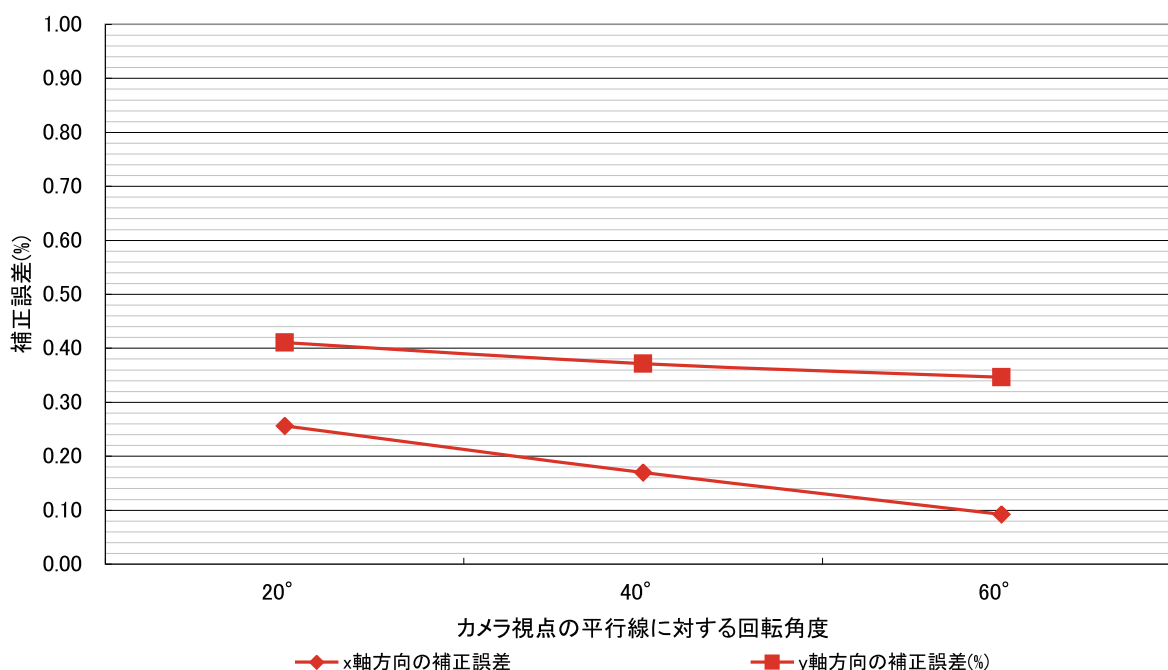


図 7.9: 実験結果「回転角度の差による補正誤差」

- 補正誤差が 0.1%以下のデータ

奥行き距離と水平距離の値それぞれに補正に用いる数を設定した。これを表 7.3 に示す。補正に用いる定数は、奥行き 50cm，水平距離 0cm のコンテンツが持つ交点のピクセル数に対して、各ポイントに位置するコンテンツが持つ交点のピクセル数を比較して設定した。各データの持つ奥行き，水平距離に応じた定数を用いて補正誤差を補正した。補正した結果を図 7.11 に示し，補正した値を表 7.4 に示す。

表 7.3: 低解像度補正定数

奥行き / 水平距離	0	10	30
50	1	1.5	1.8
100	1.05	1.575	1.89
150	1.1	1.65	1.98

低解像度の補正によって各角度の補正誤差が x 軸方向に 0.22%から 0.24%，y 軸方向に 0.34%から 0.36%の間で安定している傾向にあり，集計結果より精度の不安定性がなくなった。全てのデータを統合し平均値を算出した結果により，x 軸，y 軸の補正誤差がそれぞれ 0.23%，0.35%以下である。x 軸方向の補正誤差に対して y 軸方向の補正誤差の方が約 0.1%誤差が高い傾向にある。

## 7.2. 実験結果

幾何学的ひずみの補正によって  
各ピクセルが対応するコンテンツ情報が減少し、  
デバイスの低解像度化が生じる。

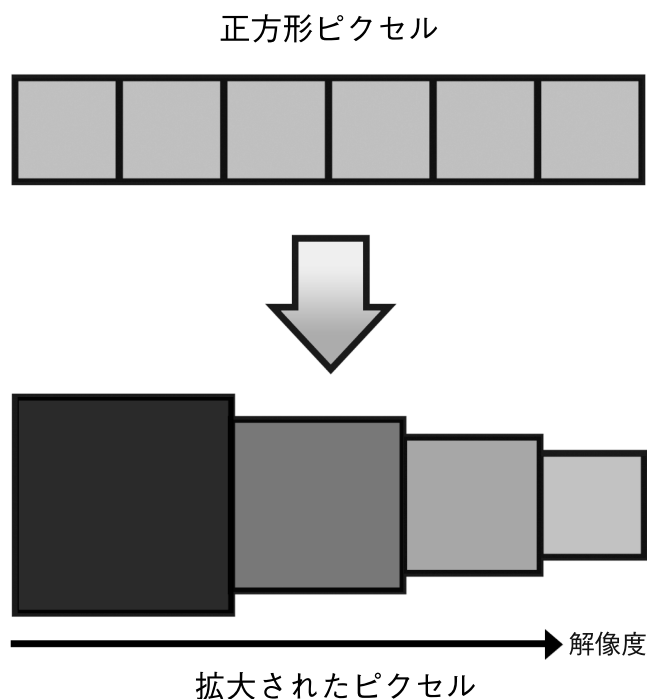


図 7.10: 実験結果「幾何学的ひずみによる低解像度化」

表 7.4: 低解像度による誤差を補正した値

角度 (度)	x 軸上のずれ (%)	y 軸上のずれ (%)
20	0.23005364	0.34597276
40	0.235367252	0.347575201
60	0.223751003	0.352270021
total average	0.229723965	0.348605994

## 7.2.2 ツインディスプレイ

ツインディスプレイを用いた実験では総数 1682 のデータを集計した。シングルディスプレイを用いた実験結果から、低解像度化によるピクセルの劣化が起きる事が分かり、低解像度の補正を行う手法が分かった。対してツインディスプレイを用いた実験では、回転による低解像度化と別に、仮想ディスプレイが水平方向に拡がることによる高解像度化が生じる。これを用いてツインディスプレイを用いた実験結果における低解像度化と高解像度化を補正した。デバイス間に奥行き差がある場合の、2つの水平距離による補正誤差

## 7.2. 実験結果

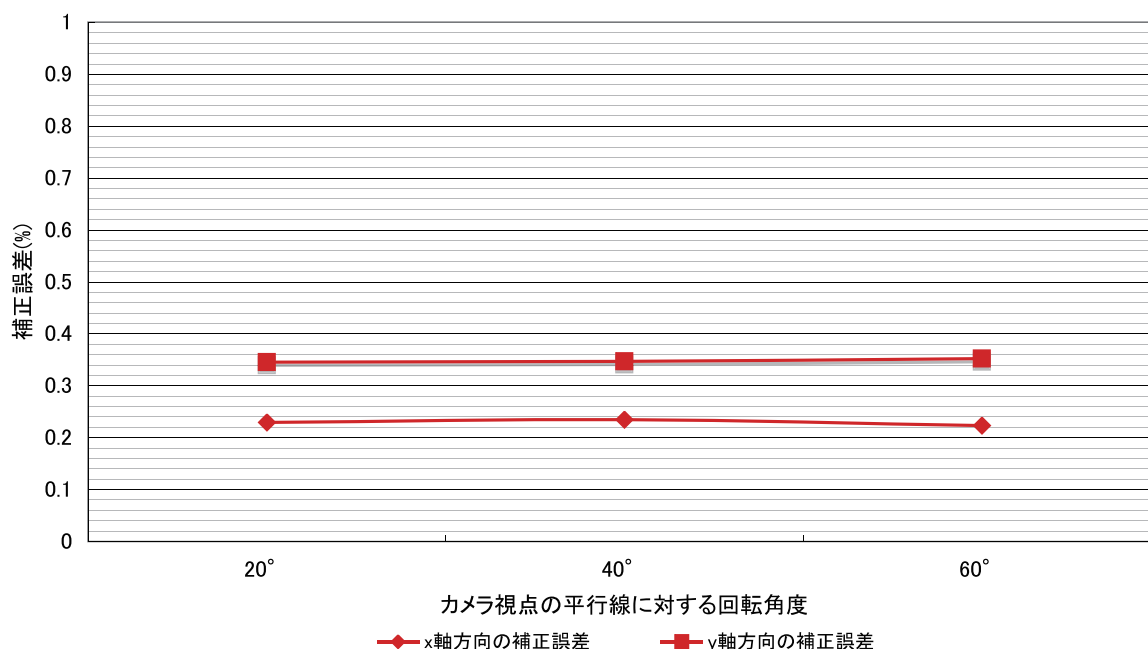


図 7.11: 実験結果「回転角度の差による補正誤差 (低解像度考慮)」

を図 7.12 に示す．デバイス間に奥行き差がない場合の，2つの水平距離による補正誤差を図 7.13 に示す．

デバイス間に奥行き差がある場合の補正誤差は，水平距離 10cm，20cm 共に補正誤差 0.04%から 0.05%間に見られ，水平距離による補正誤差の大きな開きは見られなかったが，水平距離 10cm から 20cm にかけての補正誤差が同程度であるのに対して，水平距離 20cm から 30cm にかけて誤差が開く結果が見られた．又，水平距離 20cm から 30cm 間で，カメラ注視点から左手に水平距離 10cm に設置されたデバイスは，対象デバイスの水平距離が増加するにつれて補正誤差も増加する傾向にあるが，カメラ注視点から左手に水平距離 20cm に設置されたデバイスでは補正誤差が減少する傾向にあった．

デバイス間に奥行き差がない場合の補正誤差は，カメラ注視点から左手に水平距離 10cm，20cm に設置されたデバイス共に，他方デバイスの水平距離が増加するにつれて補正誤差が減少する傾向がみられた．特に，水平距離 20cm から 30cm にかけて補正誤差が約 0.02%減少しており，精度が高まる傾向が見られた．カメラ注視点から左手に水平距離 10cm に設置されたデバイスは，対象となるデバイスが水平距離 10cm に設置された状況においてデバイスが物理的に重なり合い，データを取得出来なかった．

両グラフの傾向には，カメラ注視点から右手への水平距離 10cm に設置されたデバイスにおける補正誤差は，デバイス間の奥行き差の有無に関わらずに約 0.04%である事が分かった．又，デバイス間の奥行き差の有無に関わらずにカメラ注視点から右手への水平距離 20cm から 30cm にかけて補正誤差に変化が見られた．これは，収集したデータ数が水

## 7.2. 実験結果

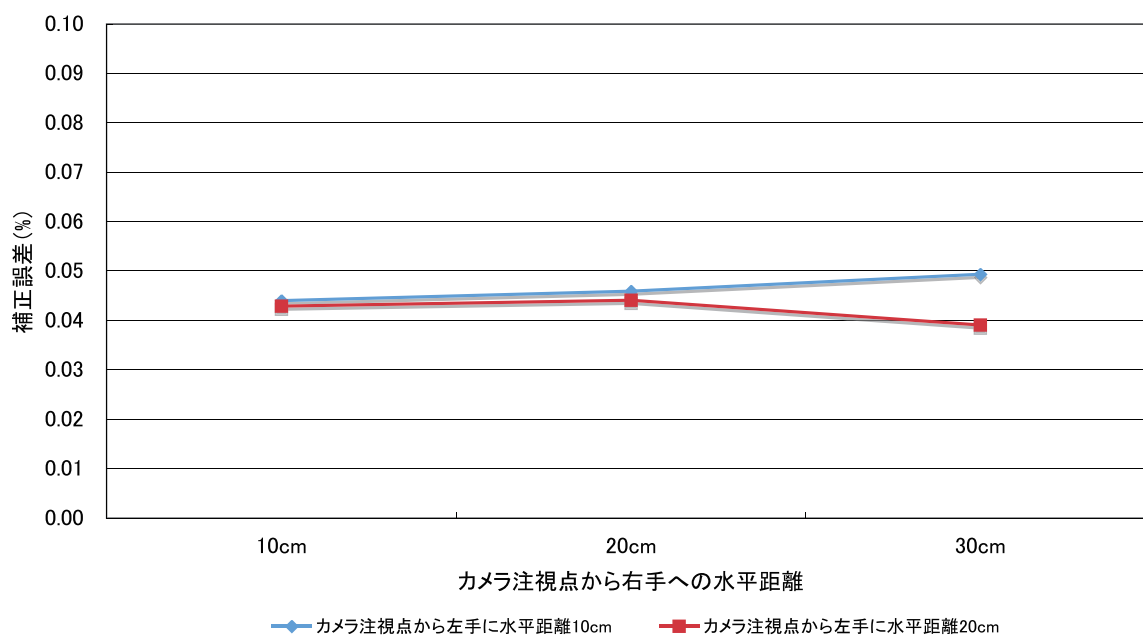


図 7.12: 実験結果「デバイス間に奥行き差がある場合の水平距離の差による補正誤差」

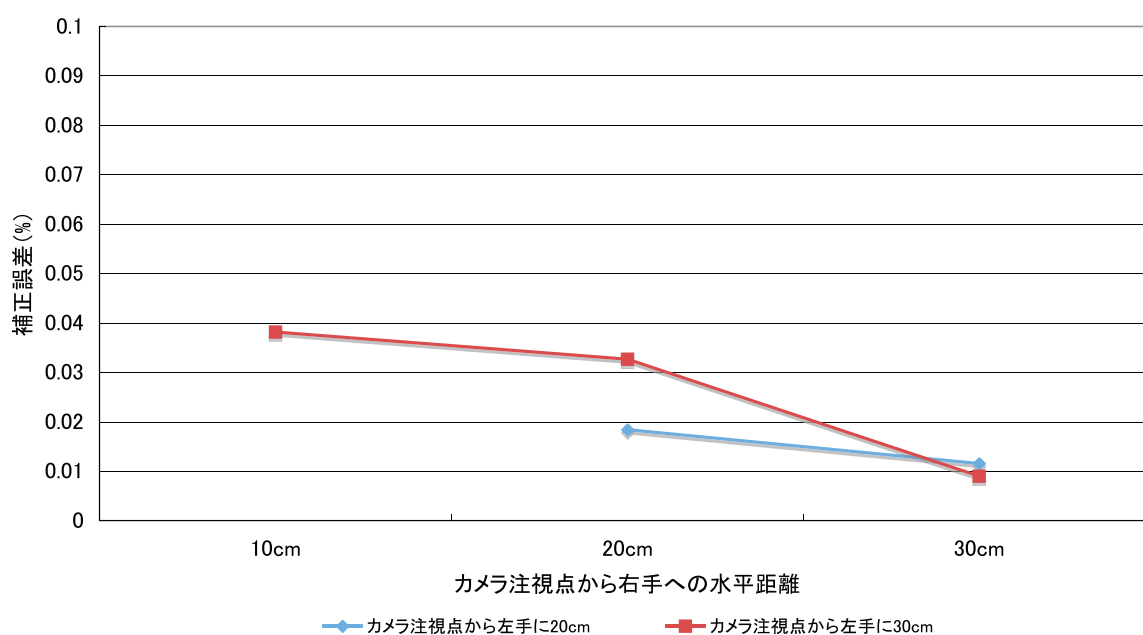


図 7.13: 実験結果「デバイス間に奥行き差がない場合の水平距離の差による補正誤差」

平距離 10cm, 20cm と比較して少ない事に起因する。実験でデータ収集に使用した撮影環境を人間の視界に似せる事によって撮影可能な物理的範囲が制限された。これにより水平距離の増加に伴いデバイスがカメラのフレーム内におさまらず、データ収集に制限が生

## 7.3. 考察

じ、補正誤差に差が生じた。

2つの回転角度の大小による補正精度を図7.14に示す。

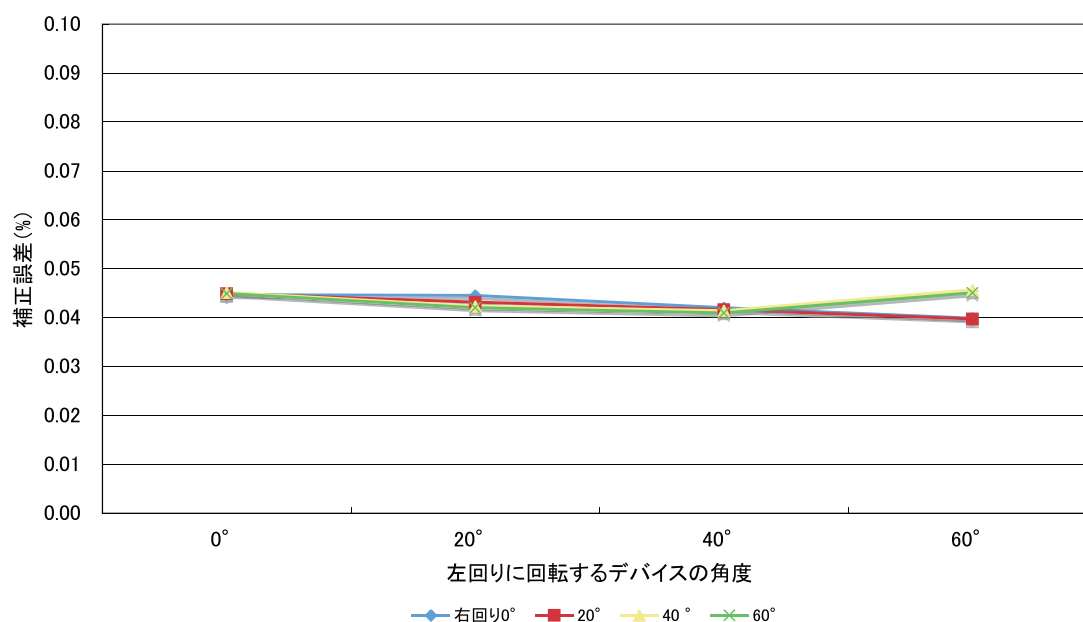


図 7.14: 実験結果「2つの回転角度の大小による補正精度」

4つの回転角度における補正誤差は約0.04%から約0.05%までの間に抑えられ、全体として安定している傾向が見られたが、左回りの回転角度40°から60°にかけて、右回り40°、60°に設置されたデバイスの補正誤差が他回転角度に設置されたデバイスに対して増加した。これは、実験に用いた2台のデバイス間の奥行き差が無く水平距離が小さい場合に、回転角度が増加するとデバイスのキーボード部分が他方デバイスと物理的に干渉するためにデータの取得が行えず、距離による補正誤差が影響されたものである。

## 7.3 考察

シングルディスプレイ、ツインディスプレイを用いた実験を別々に行う事によって、回転角度による補正誤差と奥行き、水平距離による補正誤差をそれぞれ検証する事が出来た。その結果、回転角度による補正誤差はシングルディスプレイ、ツインディスプレイに関わらず値を安定して低く保ち、回転に関する補正アルゴリズムの有効性を示した。対して奥行き、水平距離による2台のデバイス間に生じる補正誤差は回転角度による補正誤差に比べ不安定であったが、値としてシングルディスプレイの補正誤差よりも低くあった。これは、ツインディスプレイを用いた実験にて水平距離の差による高解像度化が生じる事により、ピクセル毎に対応するコンテンツ情報が多くなる事が理由として存在する。又、

## 7.3. 考察

ツインディスプレイを用いた実験における補正誤差の不安定性は、本実験環境がもたらした制限によるサンプル収集数の低下が原因である事が分かった。

幾何学的ひずみによる回転，奥行き，水平距離等によって低解像度化，高解像度化が生じる中で補正誤差が最大となる状態は，最も低解像度化が大きく生じた状態である事が分かった。これは，補正誤差が集約される数値はシングルディスプレイを用いた実験が示した結果数値に等しい。よって，本研究で示した DMDA の持つ補正アルゴリズムは最大でも補正誤差を 0.3%以下におさえられる事が分かった。本実験で得た補正誤差に基づいて DMDA の回転補正アルゴリズムを第 2.4 節で述べた将来の利用シーンにおいて実用化した場合，幅 5000mm × 3000mm の仮想ディスプレイに対して補正誤差が x 軸に 11.5mm，y 軸に 10.5mm 生じる事となり，使用するデバイス数，デバイス間距離等が増加するに伴い，x 軸，y 軸の補正誤差は減少していく事が分かった。

## 第8章 結論

本章では、本論文の結論として、本研究の成果、及び今後の研究課題を述べる。

### 8.1 本論文のまとめ

本論文は、近年注目を浴びている屋外広告が、形態の多様化によって物理的空間内に分散している事に対し、ビューアの持ち得る視点に向けて正しいコンテンツを動的に表示する事が出来ない問題点を解決する分散型マルチディスプレイシステム「Dynamic Multiple Display Arrangements (以下 DMDA)」の提案を行った。既存のマルチディスプレイシステムには、デバイス間の物理的位置関係性の欠如、幾何学的ひずみによる情報の劣化が問題として存在する。DMDA を実現するにあたり、これらの問題点を分析し、解決手段のコア・アイデアとして物理的位置空間における幾何学的ひずみの補正アルゴリズムに焦点を当てた。

本研究では、任意の方向に面した複数のディスプレイに同一コンテンツを表示する際に生じる幾何学的ひずみの補正アルゴリズムに用いるアプローチとして、カメラキャリブレーションとアフィン変換を用いた逆 3D 変換の検討を行った。その上で、カメラキャリブレーションのカメラを用いた際の撮影範囲の制限、正確な回転や奥行き距離の判定が難しい点に対して、逆 3D 変換は正確な物理的位置情報の入力による精度の高い補正を可能にするため、逆 3D 変換をアプローチとして用いた。

アフィン変換を用いた逆 3D 変換による物理的空間における幾何学的ひずみの補正精度を検証するためにプロトタイプを実装し、2 台のラップトップを用いた実験を行った。実験は、屋内スペースの 120cm × 190cm の机上にカメラ視点とカメラ注視点を設定し、両点間の物理的位置情報を基にした幾何学的ひずみの補正誤差を測定した。補正誤差の測定は、両点間の物理的位置情報の差ごとに各物理的位置情報を用いてコンテンツを補正したデバイスをカメラを用いて撮影し、数式を用いて計算した理想値としてのコンテンツとデスクトップ上で誤差となるピクセル数をはかり行った。測定する幾何学的ひずみを、回転角度差とデバイス間距離差に分け、回転角度差をシングルディスプレイによって測定し、デバイス間距離差をツインディスプレイによって測定した。

実験の結果、本論文で用いたアルゴリズムが物理的空間における回転やデバイス間距離による幾何学的ひずみを 99%補正し、DMDA に対して物理的位置空間の補正アルゴリズムが有効である事を示した。

## 8.2. 今後の課題と発展

## 8.2 今後の課題と発展

本研究の評価に基づき、今後の課題と発展を述べる。

### 8.2.1 処理時間の効率化

本研究では、物理的位置空間の補正に焦点を当て、補正アルゴリズムの検討を行うために実装、評価を行ったが、補正にかかる処理時間の測定には及ばなかった。今後、DMDA が将来において利用されるシーンでは、視点が動的に移動するだけでなく、描画されるコンテンツも動的であるため、実際にかかる処理時間を効率化しなくてはならない。

### 8.2.2 動的な位置情報の取得

本研究では物理的位置空間の補正、及び複数デバイス間の空間補完に焦点を当て実装を行った。今後は、動的な位置情報を取得する事を実現させ、屋外空間でコンテンツを受け取る側への動的なデータは威信を可能とする。

又、本研究では、デバイスの物理的位置を手入力し、手動でデバイスを実験環境に設置し、実験を行った。これに対して2つ実験結果に支障をきたした。1つは手動でのデバイス設置による誤差である。もう一つは実験を行う際に手動でのデバイス設置であるために時間を大きく浪費した。実験データを効率的に増やし、本システムを向上させるためにも位置データを自動で取得出来る設計を行う必要がある。

### 8.2.3 人間工学に基づいた設計

本研究では、実装したプロトタイプについて一眼レフカメラを用いた補正精度の検証、評価を行い、精度の高さを示したが、一眼レフカメラの持つレンズが平面的な3CCDを通して視界を確保しているのに対し、人間は球体である眼球を2つ用いて奥行きを補正した視界を持つ。本プロトタイプでは人間の視界に対応しきれておらず、今後は人間工学に基づいた設計を行う必要がある。

### 8.2.4 コンテンツの描画領域の検討

本研究ではコンテンツの描画領域を、コンテンツの幅、高さの比率に合わせスケールングする手法を取り入れた。これにより、デバイス間の物理的位置関係に最適化されたコンテンツの描画領域を割り出すモジュールの検討が必要である。



# 謝辞

本論文の作成にあたり，ご指導頂いた慶應義塾大学環境情報学部教授村井純博士，同学部教授徳田英幸博士，同学部教授中村修博士，同学部准教授楠本博之博士，同学部准教授高汐一紀博士，同学部准教授三次仁博士，同学部准教授植原啓介博士，同学部専任講師中澤仁博士，同学部専任講師 Rodney D. Van Meter III 博士に感謝致します．

本論文を進めるにあたり，研究のみでなく筆者の人生について常に叱咤激励による多大なるご支援を頂きました同学部専任講師重近範行博士，元村井研究室 arch グループ所属湧川隆次博士に心から感謝致します．お二人は筆者に本論文を書くきっかけを与えて下さいました．

又，同じく本論文を進めるにあたり，全体から細部に渡る様々な助言をくださった慶應義塾大学政策・メディア研究科後期博士課程岡田耕司氏，松谷健史氏，同研究科修士課程金井瑛氏，空閑洋平氏，六田佳祐氏，慶應義塾大学 SFC 研究所上席所員中村友一氏に感謝致します．同じく，同大学政策・メディア研究科後期博士課程，石原知洋氏，海崎良氏，堀場勝広氏，田崎創氏，工藤紀篤氏，久松剛氏，松園和久氏，水谷正慶氏に感謝致します．

共に卒業論文を執筆した慶應義塾大学環境情報学部黒宮佑介氏，峯木巖氏，同大学総合政策学部中里恵氏には，常に筆者の卒業論文に対する原動力を与えてくださいました．感謝致します．

そして本研究の執筆に限らず，研究室での活動において様々なお手伝いをして頂きました慶應義塾大学総合政策学部飯塚裕貴氏，上原雄貴氏，永山翔太氏，同大学環境情報学部三部剛義氏，中村遼氏，澤田暖氏，佐藤貴彦氏，波多野敏明氏，元同大学村井研究室所属永井ゆり氏，同大学大藪勇輝氏，徳田・村井・楠本・中村・高汐・重近・バンミーター・植原・三次・中澤合同研究プロジェクトの皆様感謝致します．

最後に，筆者の大学における4年間の研究生活を常にかげから支え続けてくださった家族，多大なる励ましをくださった友人全てに感謝致します．

以上を持って，謝辞といたします．

## 参考文献

- [1] 友子 瀬戸. 街レポートいま、街頭スクリーンが熱い!新しい「ストリートメディア」が広告のかたちを変える. *実業の日本*, 103(11):80–82, 2000/9.
- [2] 起・業・人 (number 254) メディアシステム代表取締役 安田政俊「屋外広告」用ディスプレイで急成長 映像の企画・制作にも強み. *週刊ダイヤモンド*, 96(37):124–125, 2008/9/27.
- [3] 靖二 江口. 第34回 デジタルサイネージ：古くて最も新しい映像メディア (知っておきたいキーワード). *映像情報メディア学会誌：映像情報メディア*, 62(11):1730–1733, 20081101.
- [4] 透 室園, 哲也 松本, and 喜史 湯浅. 遊技場向けオーロラビジョンシステム (特集 最新のディスプレイ技術). *三菱電機技報*, 80(8):516–520, 2006/8.
- [5] iPhone. <http://www.apple.com/iphone/>(2009/01/29 確認), 2007.
- [6] Jonathan Zdziarski. *Phone Forensics: Recovering Evidence, Personal Data, and Corporate Assets*, volume 138. O'Reilly, 2008.
- [7] Hsieh-yi Teng. Display device having universally swinging decorative article, May 1995.
- [8] Jörg Müller and Antonio Krüger. How much to bid in digital signage advertising auctions? In *Adjunct proceedings of Pervasive 2007*, 2007.
- [9] Jörg Müller and Antonio Krüger. Learning topologies of situated public displays by observing implicit user interactions. In *Proceedings of HCI International 2007*, 2007.
- [10] David Merrill, Jeevan Kalanithi, and Pattie Maes. Siftables: towards sensor network user interfaces. In *TEI '07: Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction*, pages 75–78, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [11] Akky Akimoto. iPong on multiple iPod Touch devices, may 2008.
- [12] Virtual global race. <http://www.virtualglobalrace.com.br/>(2009/01/29 確認), 2008.

- [13] 幹生 和田, 貴之 岡谷, and 光一郎 出口. 複数プロジェクタの重ね合わせ投影による高精細画像実現 (一般セッション 12). 情報処理学会研究報告. *CVIM*, [コンピュータビジョンとイメージメディア], 2008(27):313–320, 20080310.
- [14] 隆治 久永, 稔 栗林, and 初一 田中. 幾何学的ひずみの局所的な補正による電子透かし検出能力の改善 (画像). 電子情報通信学会論文誌. *A*, 基礎・境界, 88(10):1146–1153, 20051001.
- [15] Hongen Liao, Makoto Iwahara, Nobuhiko Hata, and Takeyoshi Dohi. High-quality integral videography using a multiprojector. *Opt. Express*, 12(6):1067–1076, 2004.