

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

携帯プロジェクタから投影された情報に対する
インタラクション手法

徐 世旺

(コンピュータサイエンス専攻)

指導教員 田中 二郎

2008年3月

概要

携帯電話の小さい内蔵スクリーンは携帯電話で扱える情報の量と大きさに比べ、非常に小さい。そのために、携帯電話が持つ大きな情報を表示するための新たな表示方法と大量に増加した情報から必要な情報を上手く選択するためのインタラクション手法が必要となる。携帯電話の小さな内蔵スクリーンサイズを解決する鍵は、小型化と省電力化が進んでいるプロジェクション技術の発展にあると考える。我々はプロジェクション機能を持つ携帯電話を携帯プロジェクタと呼び、そのデバイスを用いるための技術としてピーク手法を挙げ、実現した。そして、ピーク手法により表示された情報におけるインタラクション手法として、クラッチング、情報レイヤの切り替え、クラッチングを用いた仮想情報の切り替えについて述べる。ピーク手法と提案インタラクション手法を実現するために、我々は商品化されている既存のプロジェクタをベースにし、携帯プロジェクタのプロトタイプを試作した。試作したプロトタイプシステムはUSBカメラと加速度センサを併用している。我々はImage-Based Motion Estimation(IBME)アルゴリズムを利用し、携帯プロジェクタを持ったユーザに対する携帯プロジェクタの動きをUSBカメラから取得した画像情報に基づいて相対的に測定する。その際、加速度センサから得られる絶対的な回転値を、カメラで測定した相対的な動き情報から発生する誤差を補正するのに使う。そして、自由に動く携帯プロジェクタの投影面に発生する歪みを事前に投影する仮想情報を歪ませ、投影映像には歪みのない映像に見せる。我々は携帯プロジェクタを用いた使用シナリオについても述べる。

目次

第1章 序論	1
1.1 背景	1
1.2 研究の目的	3
1.3 本論文の構成	4
第2章 仮想情報の表示手法	5
2.1 本研究で用いる仮想情報とは	5
2.2 ピーク手法	5
2.2.1 ピーク手法の動作	6
2.2.2 ピーク手法により得られる効果	6
2.2.3 仮想情報の表示にピーク手法を用いた理由	7
第3章 インタラクション手法	9
3.1 クラッチング	9
3.1.1 クラッチングとは	9
3.1.2 ピーク手法における問題について	9
3.1.3 投影可能な領域とクラッチング	9
3.1.4 クラッチングの動作	10
クラッチングの仕組み	10
ユーザとシステムの動作	10
3.1.5 クラッチングの結果	11
3.2 情報レイヤの切り替え	12
3.2.1 情報レイヤとは	12
閲覧レイヤ	12
選択レイヤ	13
3.2.2 情報レイヤの切り替え操作	13
3.2.3 選択レイヤでの仮想情報の選択	13
3.3 クラッチングを用いた仮想情報の切り替え	16
3.3.1 Zスイッチングを用いた理由	16
3.3.2 Zスイッチングの操作	16
3.3.3 システムの動作	17

第4章	使用シナリオ	19
4.1	屋内でのシナリオ	19
4.1.1	配線図閲覧	20
4.1.2	設計図閲覧	21
4.1.3	インターネットショッピング	22
4.2	屋外でのシナリオ	23
4.2.1	地図閲覧	24
第5章	実装	26
5.1	プロトタイプ	26
5.1.1	ポケットプロジェクタ	26
5.1.2	USB カメラ	27
5.1.3	3 軸加速度センサ	27
5.1.4	その他	28
5.2	携帯プロジェクタの動き推定	28
5.2.1	カメラを用いた動きの測定	31
5.3	歪み補正	32
第6章	関連研究	34
6.1	ハンドヘルドプロジェクタを用いたインタラクションについての研究	34
6.2	覗きこむような表示手法とプロジェクションについて	35
6.3	カメラを用いて測定した携帯デバイスの動きに基づいた操作について	36
第7章	議論	37
7.1	ピーク手法について	37
7.2	インタラクション手法について	37
7.2.1	情報レイヤの切り替えとクラッチングを用いた仮想情報の切り替えの 関係について	37
7.2.2	クラッチングを用いた仮想情報の切り替えについて	38
第8章	まとめ	40
	謝辞	41
	参考文献	42

図目次

1.1	携帯電話の世帯普及率の推移	1
1.2	携帯プロジェクタのイメージ	3
1.3	携帯プロジェクタの利用シーン	4
2.1	ピーク手法のイメージ	5
2.2	壁面の1面を覆う大きな仮想情報の一部を表示するピーク手法の例	6
2.3	ビルの床を覆う大きな仮想情報の一部を表示するピーク手法の例	7
3.1	仮想情報とクラッチング	10
3.2	クラッチング：仮想情報のスクロール	11
3.3	情報レイヤ：閲覧レイヤと選択レイヤ	12
3.4	情報レイヤの切り替え	13
3.5	仮想情報の選択	15
3.6	クラッチングを用いた仮想情報の切り替え	17
4.1	使用シナリオ：新築の電気配線図閲覧	20
4.2	使用シナリオ：設計図閲覧	21
4.3	使用シナリオ：インターネットショッピング	22
4.4	使用シナリオ：インターネットショッピング (家具の購入)	23
4.5	使用シナリオ：地図閲覧の仕組み	24
4.6	使用シナリオ：地図閲覧	25
5.1	プロトタイプ	26
5.2	プロトタイプシステムの構成図	27
5.3	ピーク手法で表示された仮想情報に対する携帯プロジェクタを持ったユーザの動き	29
5.4	歪み補正	33

表 目 次

5.1 携帯プロジェクタを持つユーザのスクリーンに対する動き	28
5.2 単独でデバイス自体の動きの認識が可能なセンサの種類	30

第1章 序論

1.1 背景

我々の生活の中で一番身近な携帯デバイスの1つとして携帯電話が挙げられる。これは実際に2人以上の世帯を対象とした内閣府調査[1]と単身者を含む総務省調査[2]による携帯電話の世帯普及率の推移から読み取ることが出来る。図1.1はそれらの調査の結果をまとめたものである。携帯電話の世帯普及率は図1.1の総務省データによると1993年の3.2%から2003年の93.6%へと10年間で一気に0%近くから100%近くへと急増している。2004年からは普及率の変化が見られるが、どの調査からも全世帯の約82%以上普及されているのが分かる。多くの人々に幅広く普及されていることは携帯電話が持つ様々な可能性を裏付ける携帯電話の潜在力の一つであると考ええる。

携帯電話の世帯普及率

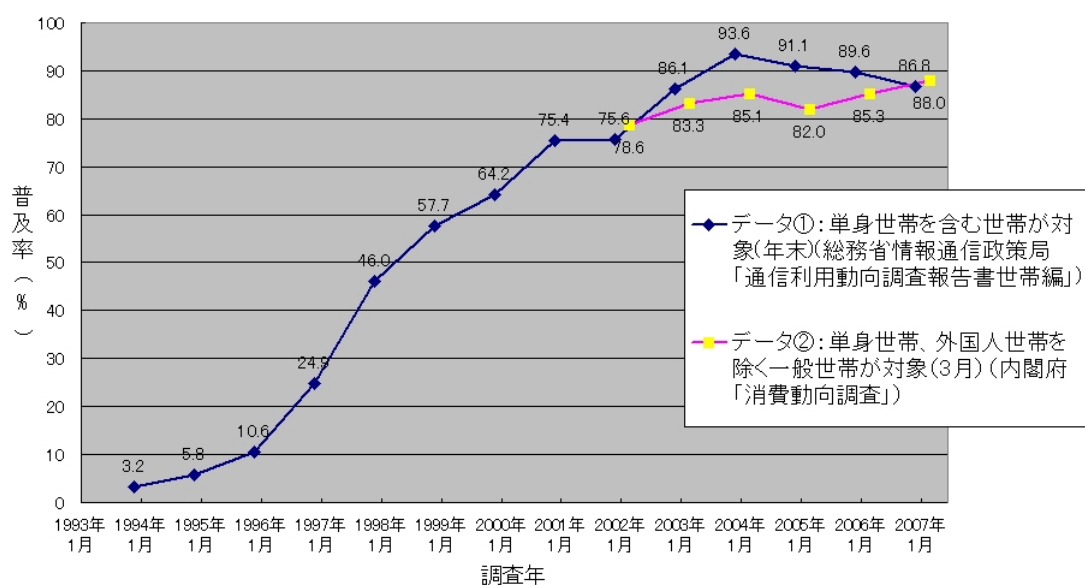


図 1.1: 携帯電話の世帯普及率の推移

近年、携帯電話は高い普及率を足場にして本来の電話機能だけでなく、カメラ、ラジオ、電

子手帳、時計などの多様な小型デジタル機器の機能を吸収し、様々な機能を保有するデジタル統合機器へ変化しつつある。このような傾向は年々加速しており、その結果、携帯電話は、個人情報の管理からインターネットへの接続、ゲームや音楽などの各種エンターテインメント機能に到るまでの多様な機能をユーザに提供し、我々の生活の中でそれらを用いる場面を増やしている。

同時に、携帯電話の利用場面の増加は、携帯電話に対してユーザが要求する利用場面の増加を招き、更なるユーザの要求に合わせるために携帯電話への機能の統合化を加速化させている。この統合化により携帯電話で扱える情報の量は急激に増加している。音声通話が携帯電話で扱われていた主な情報であった時から比べ、近年、Web サイトからのテキスト情報、内蔵カメラから撮影した画像や動画、地上デジタル放送の受信器から得られるリアルタイムストリーミング情報、2次元バーコードリーダからのバーコード情報、歩行者用ナビゲーション機能からの位置情報、電子マネーなどで用いられる個人信用情報がその変化の例である。

また、情報の量の増加と共に携帯電話で扱える情報の大きさも増加している。それは昔の携帯電話に比べ、現在発売されている携帯電話らの基本メモリが平均 100MB に至っていることから確認できる。さらに、最近の携帯電話のメモリは microSD カードやメモリースティックなどの外部メモリカードを利用すれば、約 2GB 以上に拡張できる。十分なメモリ容量は、500 万画素以上の内蔵カメラで撮影できる最大サイズ (2560X1920 ピクセル) の写真も十分に携帯電話で撮影出来て、さらに大きなサイズの写真やイメージなども携帯電話で扱えることを意味する。

このように携帯電話が持つ情報の大きさと情報の量は両方とも増加しているにもかかわらず、携帯電話の外形は、携帯電話の携帯性を保つためにある程度制限され、大きさを小さくする必要がある。そのため、携帯電話の内蔵スクリーンのサイズも、増えていく一方の情報の量と大きさに比べて非常に小さい。そのために、携帯電話が持つ大きな情報を表示するための新たな表示方法と大量の情報から必要な情報をうまく選択するためのインタラクション手法が必要となる。

携帯電話の小さなスクリーンサイズを解決する鍵は、小型化と省電力化が進んでいるプロジェクション技術の発展にあると考える。最近のプロジェクション技術は、プロジェクタがポケットに入ることも、携帯電話や PDA などの携帯デバイスの中に一つの機能として埋め込まれることも、十分に期待出来る程度まで至っている。このプロジェクション機能を利用することにより携帯電話は、携帯電話の小さな内蔵スクリーンでは上手く表示出来なかった大量の情報を外部の表面上に大きく表示することが出来、既存の小さな内蔵スクリーンの限界を克服出来ると考えられる。

さらに、携帯電話内の情報を一般的なプロジェクタがプロジェクション機能を利用して表示する情報のように表示するのではなく、いつでも、どこでも持っていける携帯電話の特徴を活かした新たな表示手法を使うことで、今までは出来なかった新たなインタラクションが

可能になると考える。

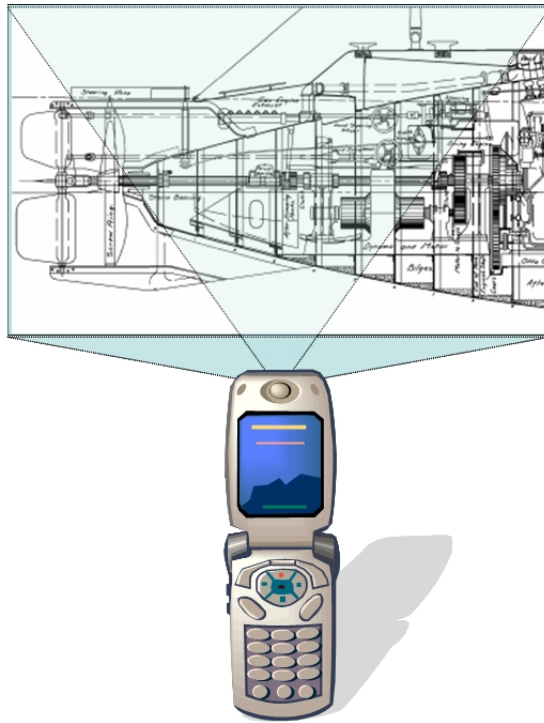


図 1.2: 携帯プロジェクタのイメージ

1.2 研究の目的

本研究ではプロジェクション機能を持つ携帯電話を携帯プロジェクタと呼び(図 1.2)、そのデバイスを用いるための技術として以下の2つの項目を提案し、実現する。

- 大きな情報の一部をプロジェクタを通して覗いてみるような錯覚を引き起こす情報の表示手法
- 上記の表示手法により表示された情報におけるインタラクション手法

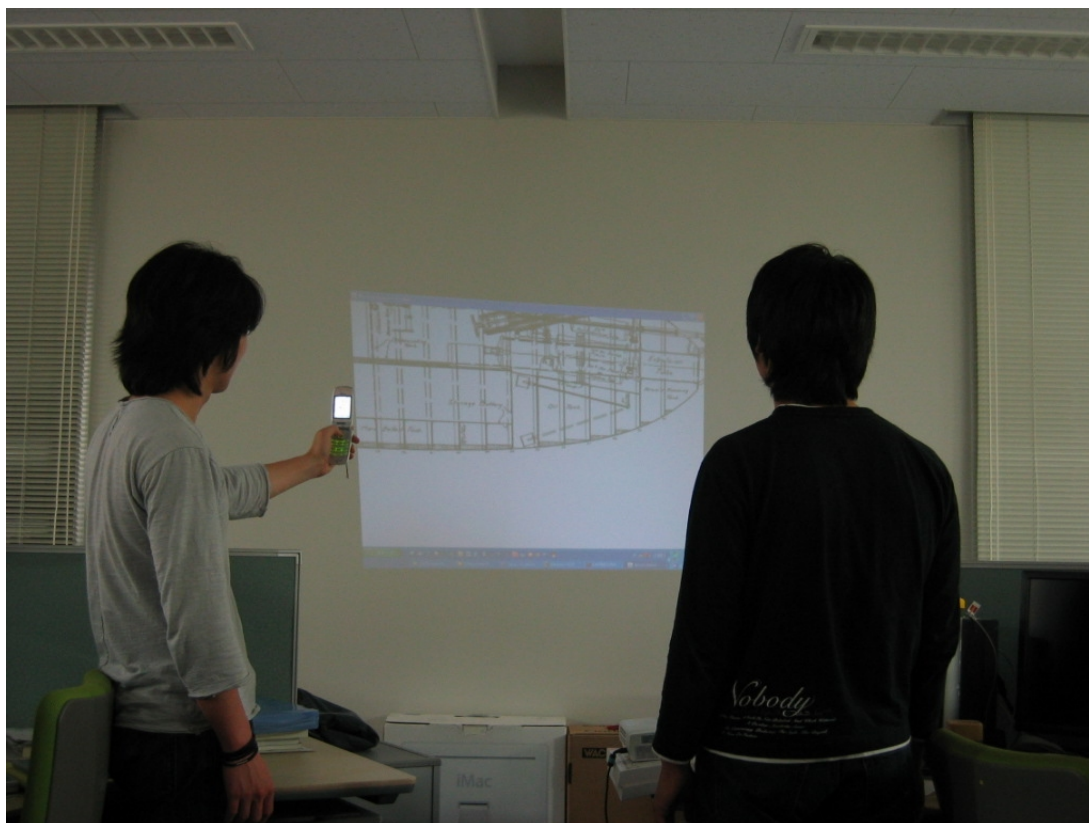


図 1.3: 携帯プロジェクタの利用シーン

1.3 本論文の構成

本論文ではまず、第2章で我々はピーク手法と呼ぶ大きな情報の一部をプロジェクタを通して覗いてみるような錯覚をユーザに引き起こす情報表示手法とその表示手法で用いる仮想情報について述べる。第3章では第2章で述べた表示手法により表示された仮想情報におけるインタラクション手法のクラッチング、情報レイヤの切り替え、クラッチングを用いた仮想情報の切り替えについて説明する。第4章では我々のピーク手法とピーク手法で表示された仮想情報に対するインタラクション手法を利用した使用シナリオについて述べる。第5章は第2章と第3章で述べた手法を実現するための実装について説明する。第6章は本研究との関連研究について紹介する。第7章では我々の提案手法についてから議論した後、最後に第8章でまとめる。

第2章 仮想情報の表示手法

2.1 本研究で用いる仮想情報とは

携帯プロジェクタのプロジェクション機能を通して、壁面やスクリーンなどの外部面上に大きく表示される情報は、設計図や地図のように複雑で、膨大な情報量を持つものである。なお、4000X3000 ピクセル以上の高解像度のイメージもプロジェクション機能を通して表示する情報の1つである。例えば、航空写真やA0サイズのポスターのように大きな表示面積を要する情報がその例である。本研究では表示の対象となるこれらの情報を仮想情報と呼ぶ。

携帯プロジェクタ内の仮想情報は、本研究でピーク手法と呼ぶ表示手法により、外部面に表示する。このピーク手法は自由に投影面を動かすことが出来る携帯プロジェクタの特徴を考慮した表示手法である。次の2.2節では携帯プロジェクタ内の仮想情報を表示するピーク手法について述べる。

2.2 ピーク手法

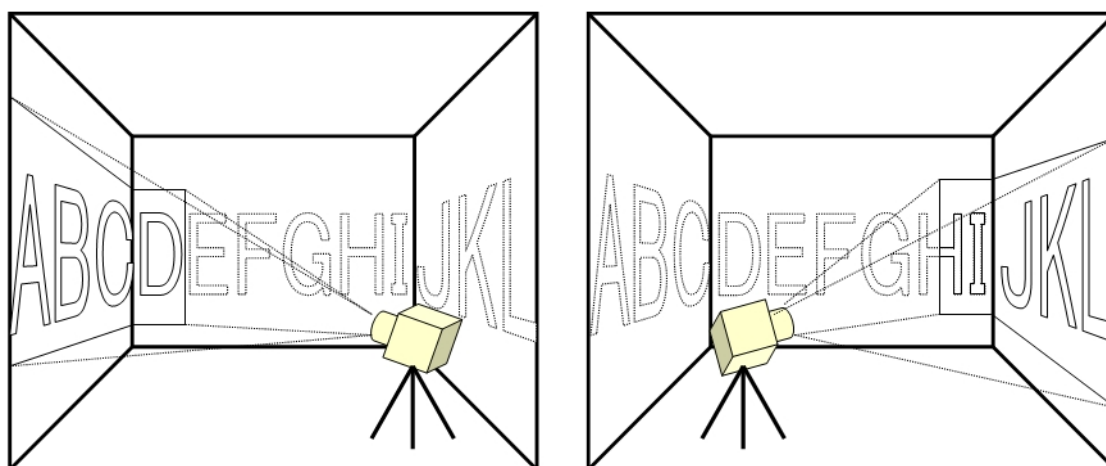


図 2.1: ピーク手法のイメージ

ピーク手法は、壁面やスクリーンなどの外部面の全体を覆うように配置された仮想情報を、ユーザが携帯プロジェクタを懐中電灯のように使って照らし出した投影領域の中の仮想情報だけをユーザに表示することで作られる仮想情報表示手法である(図 2.1)。

2.2.1 ピーク手法の動作

図 2.1 で示す仮想情報は、3つの壁面の全体を覆うように配置された A から L までのアルファベットから成っている。ユーザが図 2.1 の左のように携帯プロジェクタからの投影面を壁面に向けると、その方向のアルファベットである A から D のアルファベットがユーザに表示される。また、図 2.1 の右のように、ユーザが携帯プロジェクタの向きを変えると、図 2.1 の左のように表示されていたアルファベット A から D がそのまま表示されるのではなく、新しく向けた方向に該当するアルファベットの H から L が表示される。

2.2.2 ピーク手法により得られる効果

ピーク手法は、ユーザに携帯プロジェクタ内の仮想情報が実際の壁面やスクリーンなどの中に埋め込まれているような錯覚を引き起こす。この錯覚により、ユーザは携帯プロジェクタを用いて実際の環境に埋め込まれた大きな仮想情報の一部を覗き込んでいるような感覚で操作を行うことが出来る。これはユーザに回りの環境に対する現実感を与え、投影場所と投影されている仮想情報との関係をより直感的に認知することを補助する。

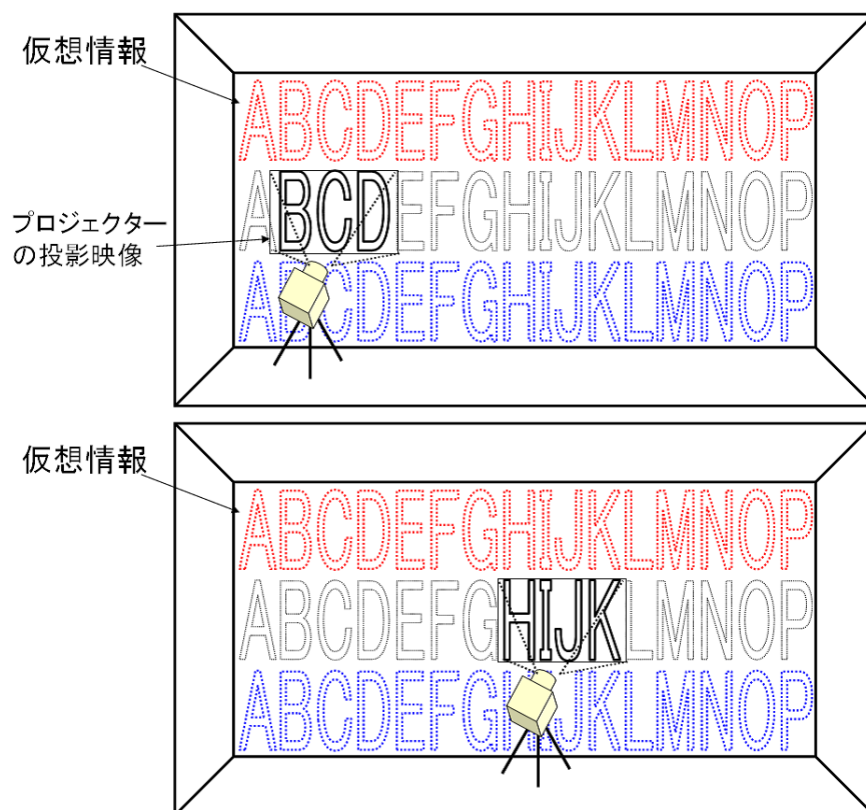


図 2.2: 壁面の 1 面を覆う大きな仮想情報の一部を表示するピーク手法の例

また、図 2.2 のように他の場所の壁面などの外部面には図 2.1 とは異なったスタイルの仮想情報を表示することができる。1 壁面の全体を覆うように配置された仮想情報をユーザは携帯プロジェクタを用いてその中の一部を覗きこむ。

携帯プロジェクタのプロジェクション機能は、ユーザの保有している仮想情報をいつでもどこでも大きく表示出来るようにサポートするため、仮想情報を投影出来る外部面は壁面やスクリーンだけではなく、ビルの床なども含む。図 2.3 はピーク手法を用いてビルの床の上に仮想情報を表示した模様を示す。ユーザが図 2.3 の (1) から図 2.3 の (2) に動くとその動きに従い、ユーザに見える仮想情報の部分が変わる。

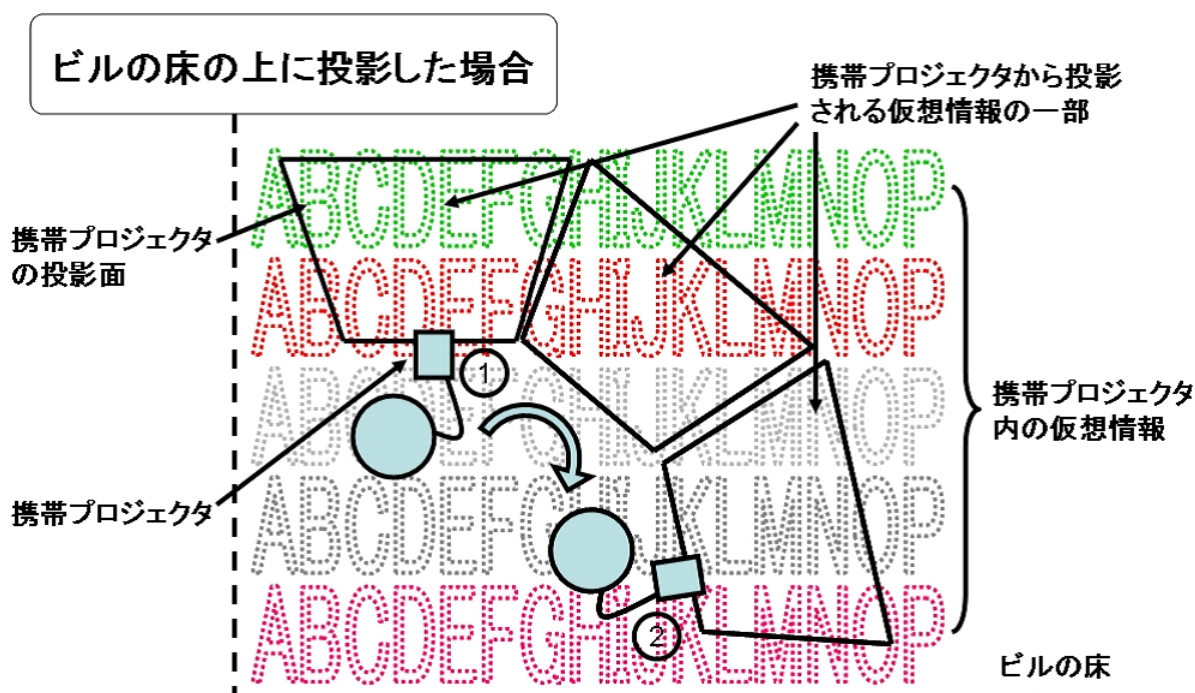


図 2.3: ビルの床を覆う大きな仮想情報の一部を表示するピーク手法の例

ピーク手法を用いて、携帯プロジェクタ内の仮想情報を表示すると、ユーザが携帯プロジェクタを動かしてもピーク手法により表示される投影面の中の仮想情報は動かない特徴がある。従って、ピーク手法は壁面やスクリーン、床などの外部面のそれぞれが 1 つの大きな仮想情報を持っているようにも表示することが出来る。そして、小型携帯デバイス内の仮想情報を仮想情報の持つ本来の大きさを維持したまま、プロジェクション機能を通じて表示出来る。

2.2.3 仮想情報の表示にピーク手法を用いた理由

ユーザが手にした携帯プロジェクタの位置と投影の方向に関する姿勢情報を利用することが出来れば、システムはそれらの情報に基づき、表示する情報を変えることが出来る。これは大きな仮想情報が投影される投影面に対し、既存のデスクトップや携帯デバイスで行われ

ているインタラクション手法とは異なる新たなインタラクションを支援することが出来ると考えたからである。

また、携帯プロジェクタを手にするにより発生しかちな投影映像に対する揺れや投影面の動きの問題を解決する方法としてもピーク手法は携帯プロジェクタを用いた仮想情報の表示に適している。ピーク手法により外部面に固定されているように投影される大きな仮想情報は、ユーザの動きや手振れに影響されず、その内容を効果的にユーザに伝えることが出来るからである。

第3章 インタラクション手法

本研究ではピーク手法により表示された仮想情報におけるインタラクション手法として以下の3つのインタラクション手法を提案する。

- クラッチング
- 情報レイヤの切り替え
- クラッチングを用いた仮想情報の切り替え

3.1 クラッチング

3.1.1 クラッチングとは

クラッチングはピーク手法を用いる場合に発生する問題を解決するために提案された。クラッチングは、ユーザが携帯プロジェクタを通して仮想情報を投影する壁面やスクリーンなどの投影可能な領域を超えたところにある仮想情報を閲覧するために使う操作である。

3.1.2 ピーク手法における問題について

ピーク手法は携帯プロジェクタから投影される仮想情報が外部面の上に張り付けられているように表示する情報表示手法である。しかし、ピーク手法を用いる場合、表示される仮想情報の大きさは実際の壁面やスクリーンの大きさに制限されてしまう問題がある。仮想情報の大きさは無制限に近く拡大出来るため、巨大な大きさの仮想情報と表示面である実際の壁面やスクリーンなどの外部面の間には、大きさの不一致が発生する。この大きさの不一致は、ユーザが携帯プロジェクタ内の仮想情報を外部面に大きく表示したにも関わらず、その仮想情報の全てを閲覧することが出来ないという問題を持つ。

3.1.3 投影可能な領域とクラッチング

図 3.1 は仮想情報の大きさと投影可能な領域の関係について示す。図 3.1 で示す投影可能な領域とは、携帯プロジェクタを用いて仮想情報を投影した場合、投影された仮想情報がきちんとユーザに認知できるような外部面の中の領域を意味する。即ち、ユーザはガラスの上や反射率の悪い暗い壁紙の上などではないこの領域の中で、携帯プロジェクタを動かしながら

仮想情報を閲覧することが出来る。しかし、図 3.1 のように壁面やスクリーンなどの投影可能な領域の中に収まらない A から P までのアルファベットから成る大きな仮想情報があるとすると、投影可能な領域を超えたところにある A から C のアルファベットと N から P のアルファベットは携帯プロジェクタを用いて閲覧することが出来ない。この問題を解決出来る方法として本研究ではクラッチングを挙げる。

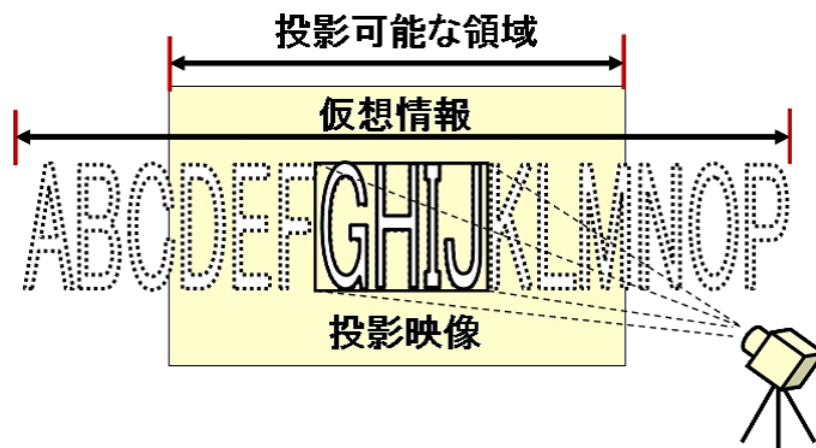


図 3.1: 仮想情報とクラッチング

3.1.4 クラッチングの動作

クラッチングの仕組み

クラッチングの動作は一般的な 2D マウスを使用している時の動作と類似している。マウスを使用している間、マウスがマウスパッド (作業領域) の上の端にいたると、マウスを持ち上げてマウスパッドの中央に運んでから、パッドの上を下ろすという動作のように、ピーク手法で覗いている状態をしばらくの間中止し、仮想情報の位置を変更してから再びピーク手法で覗いている状態に戻ると言った動作である。

ユーザとシステムの動作

ユーザは図 3.2 (a) から図 3.2 (b) のように投影可能な領域の端に携帯プロジェクタの投影映像を配置してからクラッチングを使い、投影可能な領域を超えたところの仮想情報を、図 3.2 (c) のように投影可能な領域の中に持って来られる。その際、クラッチングの有無をシステムに知らせるために、携帯プロジェクタに付けたクラッチボタンと呼ぶ専用のボタンを利用する。システムはクラッチボタンが押されている時、携帯プロジェクタからの投影映像の移動量分、仮想情報をスクロールする。クラッチボタンが押されていない時には (デフォルト時)、大きな仮想情報の一部を覗く状態のピーク手法で仮想情報が表示される。

3.1.5 クラッチングの結果

この操作によって、図 3.2 で示されるように、投影可能な領域よりも更に大きい仮想情報を、本研究の表示手法であるピーク手法を用いて閲覧出来るようになる。

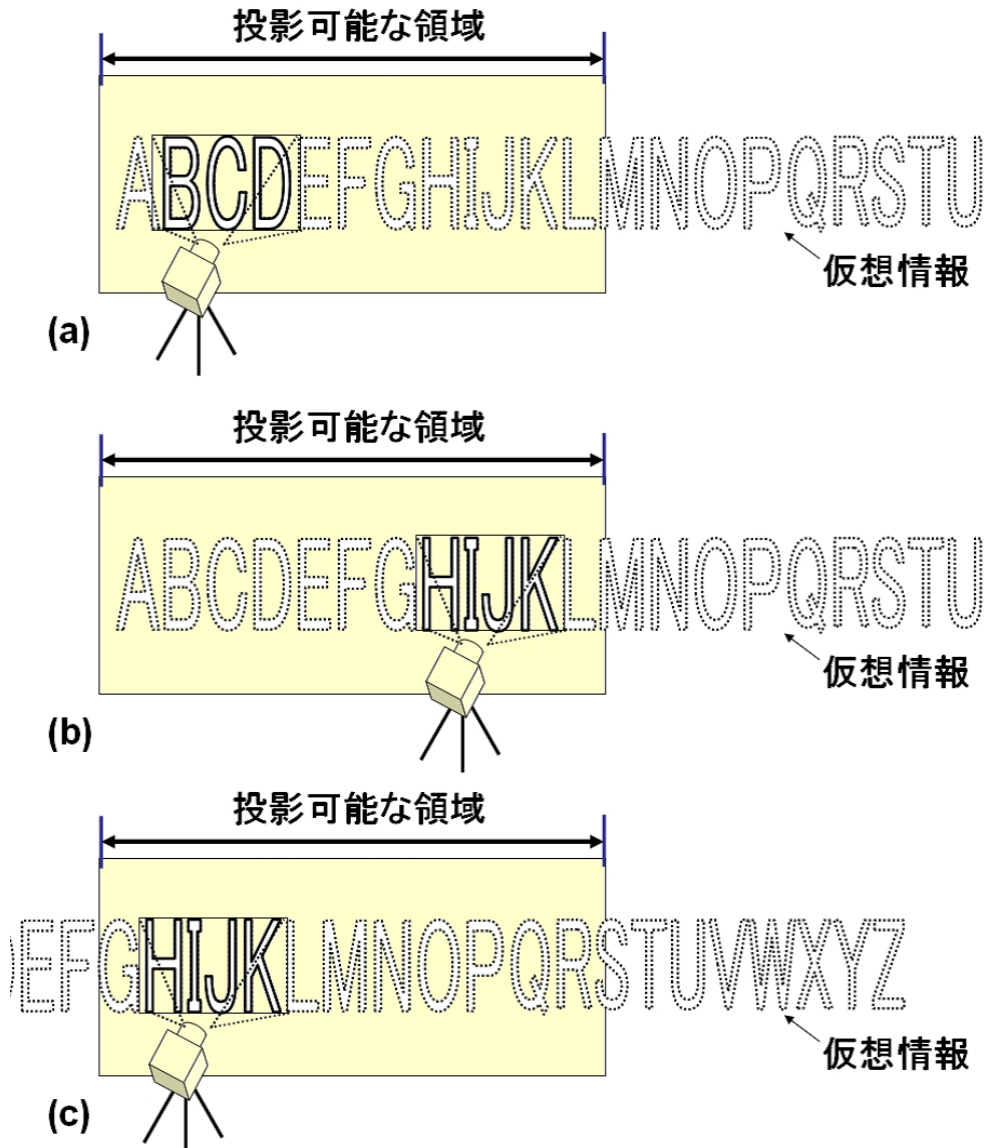


図 3.2: クラッチング：仮想情報のスクロール

3.2 情報レイヤの切り替え

情報レイヤの切り替えは、1つの大きな仮想情報を閲覧する閲覧レイヤと閲覧レイヤで表示する仮想情報を選択する選択レイヤを切り替える操作である。この操作は携帯プロジェクタで扱えるようになる大量の情報の中から必要な情報を選択するための考案されたインタラクション手法である。

3.2.1 情報レイヤとは

ピーク手法により投影される仮想情報を含む1つの仮想の平面を我々は情報レイヤと定義する。携帯プロジェクタ内の仮想情報はこの情報レイヤの上に配置されてから壁面や床などの実際の外部面の上に表示される。

我々のプロトタイプシステムは以下の2つの情報レイヤを持つ(図3.3)。

- 閲覧レイヤ
- 選択レイヤ



図 3.3: 情報レイヤ：閲覧レイヤと選択レイヤ

閲覧レイヤ

閲覧レイヤは図3.3左に示すように1つの大きな仮想情報を持つ情報レイヤである。ユーザは閲覧レイヤの上の仮想情報をピーク手法を用いて閲覧することが出来る。閲覧レイヤは、ピーク手法で表示される初期設定レイヤとなっているため、ユーザが携帯プロジェクタ内の仮想情報を初めに外部面に投影する時、ユーザに現れる情報レイヤである。この閲覧レイヤの上で携帯プロジェクタ内の仮想情報は本来の大きさを保てる。

選択レイヤ

選択レイヤは閲覧レイヤで表示する仮想情報を選択するために作られた情報レイヤである。そのため、図 3.3 右に示すように、閲覧レイヤで表示できる携帯プロジェクタ内の仮想情報らの縮小アイコンで構成されている。この選択レイヤの中の縮小アイコンらもピーク手法により表示される。

3.2.2 情報レイヤの切り替え操作

我々のプロトタイプシステムは情報レイヤの切り替えが起こると図 3.4 で示すように、表示する情報レイヤを切り替える。例えば、現在表示している情報レイヤが閲覧レイヤである場合には閲覧レイヤから選択レイヤに切り替わる。また、現在表示している情報レイヤが選択レイヤだとすると選択レイヤから閲覧レイヤに切り替わる。

ユーザはこの情報レイヤの切り替えを行うために、携帯プロジェクタに付けたレイヤボタンと呼ぶ専用のボタンを利用する。ユーザがレイヤボタンを押すとプロトタイプシステムは情報レイヤの切り替えを行う。

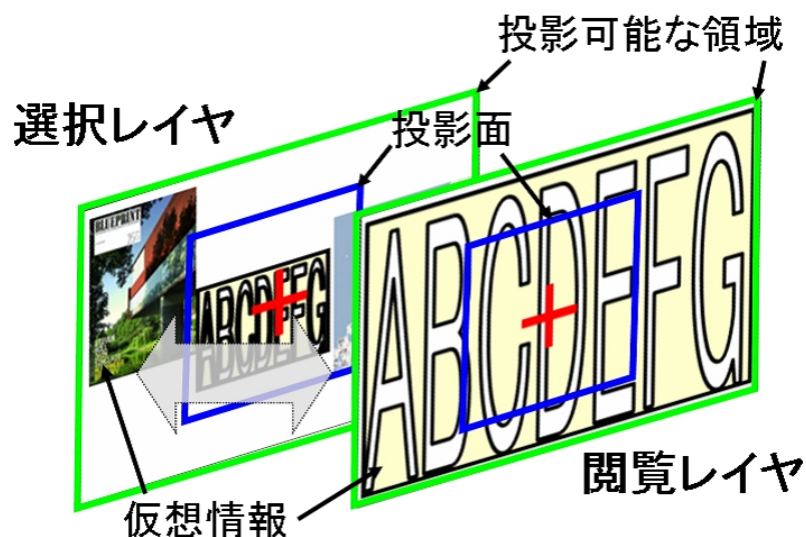


図 3.4: 情報レイヤの切り替え

3.2.3 選択レイヤでの仮想情報の選択

選択レイヤでの仮想情報の選択は投影映像の中央に表示される十字カーソルを利用する (図 3.5 (a))。

ユーザは携帯プロジェクタを動かして投影映像の中央の十字カーソルを操作する。例えば、図 3.5 (a) から図 3.5 (b) のように携帯プロジェクタを動かし、選択レイヤの右上に描画されて

いる仮想情報の縮小アイコン (地図情報) の上に十字カーソルを持っていくことが出来る。これにより、投影映像の中央の十字カーソルが仮想情報の縮小アイコンの上に位置すると、その仮想情報は選択状態になる。ユーザは図 3.5 (b) のように仮想情報の縮小アイコンを選択状態にしたまま再びレイヤボタンを押すことで、選択状態の仮想情報を閲覧レイヤの上に表示することが出来る。

選択状態の仮想情報の取り消しは図 3.5 (b) から図 3.5 (c) で示すように、再び携帯プロジェクタを動かし、中央の十字カーソルを仮想情報の縮小アイコンの上から外すことで行える。

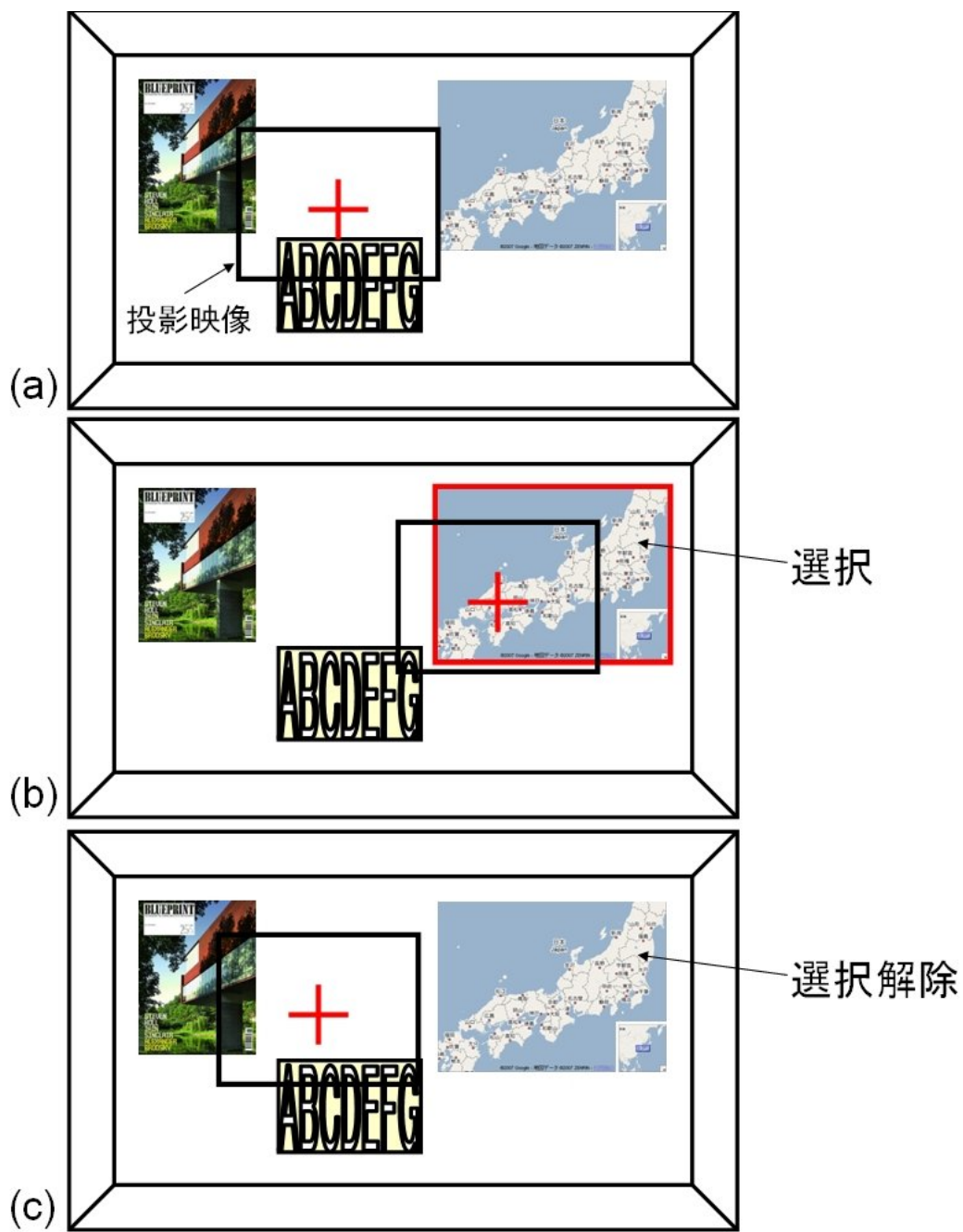


図 3.5: 仮想情報の選択

3.3 クラッチングを用いた仮想情報の切り替え

本研究ではクラッチングを用いた仮想情報の切り替えを Z スイッチングと呼ぶ。Z スイッチングは、我々がクラッチングと情報レイヤの切り替えの 2 つのインタラクション手法について分析している最中に考案したインタラクション手法である。

3.3.1 Z スイッチングを用いた理由

クラッチングは、ユーザが壁面やスクリーンなどの投影可能な領域に対し、ピーク手法で表示しきれない大きな仮想情報を閲覧するために仮想情報をスクロールする。この操作は投影可能な領域が存在する 2 次元平面上で行われるため、ユーザの壁面やスクリーンに対する奥行き方向への動きを利用していない。情報レイヤの切り替えは、クラッチング時使っているクラッチボタンとは異なる別のボタンを利用している。そして、閲覧レイヤ上で表示している仮想情報を切り替えるために、閲覧レイヤとは異なる別の情報レイヤを用いている。これはユーザがそれぞれのインタラクション手法を使う際、ユーザ自身の動きや操作に混乱をもたらす可能性を潜んでいる。

我々は仮想情報を大きく表示する閲覧レイヤの利点を保ちながら、仮想情報の切り替えの操作に一貫性を与えられる方法として着眼したのが Z スイッチングである。Z スイッチングは仮想情報の選択と切り替えと言った 2 つの操作をクラッチング状態の Z 軸方向の動きに対応付けることで、選択と切り替えを連続的に行える。また、クラッチボタン 1 つを使って行うことが出来るため、ユーザの操作に対する理解を高めることが出来る考える。

3.3.2 Z スイッチングの操作

Z スイッチングはユーザが 2 つの動作を連続的に行うことで作動する。ユーザは携帯プロジェクタに付けたクラッチボタンを押したまま、携帯プロジェクタをスクリーンや壁面に向けて前後に動かすことで Z スイッチングを行う (図 3.6)。

図 3.6 に示すように、現在外部面に表示している閲覧レイヤ上の仮想情報は図 3.6 の (c) であるとする。ユーザがクラッチボタンを押した状態で携帯プロジェクタを前に動かすと Z スイッチングが行われ、表示されている閲覧レイヤ上の仮想情報が図 3.6 の (c) から図 3.6 の (d) に変わる。続けて携帯プロジェクタをより前に移動すると閲覧レイヤ上の仮想情報はさらに、図 3.6 の (d) から図 3.6 の (e) へ、図 3.6 の (e) から図 3.6 の (f) へと変わっていく。

同様に最初の閲覧レイヤ上の仮想情報が図 3.6 の (c) である場合、ユーザはクラッチボタンを押したまま、携帯プロジェクタを後ろに動かして、閲覧レイヤ上の仮想情報を図 3.6 の (c) から図 3.6 の (b) と図 3.6 の (a) へと切り替えることが出来る。

もし、ユーザが Z スイッチングを行い、閲覧レイヤの上の仮想情報を図 3.6 の (c) から図 3.6 の (a) に切り替えてから、さらに携帯プロジェクタを後ろに動かし、再度 Z スイッチングを行うと、ユーザが保有した携帯プロジェクタ内の仮想情報の数が図 3.6 で示している (a) から (f)

までの6個の場合、閲覧レイヤ上の仮想情報は図3.6の(a)から図3.6の(f)へ、図3.6の(f)から図3.6の(e)へと変わっていく。逆に、閲覧レイヤ上の仮想情報が図3.6の(f)の場合、ユーザが前の方向にZスイッチングを行うと、閲覧レイヤ上の仮想情報は図3.6の(f)から図3.6の(a)に切り替わる。

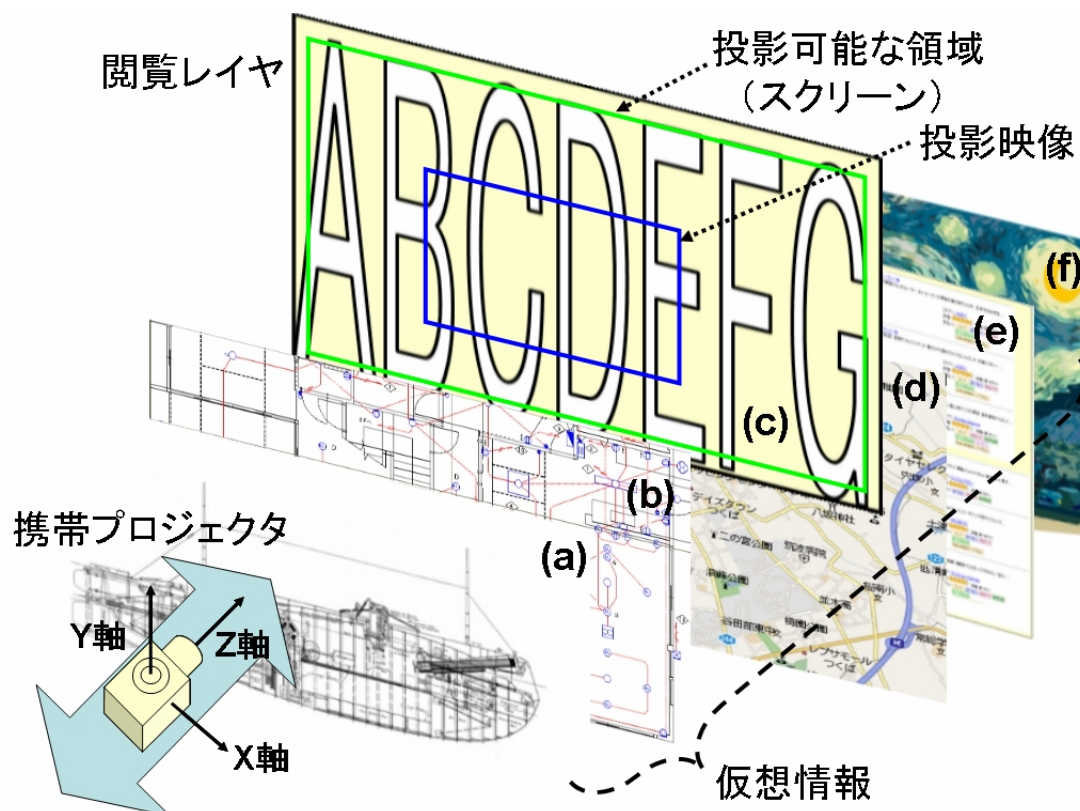


図 3.6: クラッチングを用いた仮想情報の切り替え

3.3.3 システムの動作

システムはユーザのZスイッチング操作に対し、以下の2つの動作を行う。

- クラッチボタンが押されている時：仮想情報の並び

ユーザがクラッチボタンを押している時、システムはスクリーン上に表示されている仮想情報を基準にして、ユーザとスクリーンの間に携帯プロジェクタ内の仮想情報を図3.6のように仮想的に並べる。我々のシステムの仮想情報の並び順はユーザが仮想情報を携帯プロジェクタの中に入れた順番に従う。現在表示している仮想情報より、以前に入力した仮想情報は、ユーザの視点から見て、現在表示している仮想情報の背面に、以

後に入力した仮想情報は、現在表示している仮想情報の前面に入れる。例えば、図 3.6 の場合、携帯プロジェクタ内の一番最近入力された仮想情報は図 3.6 の (a) で、一番最初に入力された仮想情報は図 3.6 の (f) である。ユーザは携帯プロジェクタ内の仮想情報を入れ替えることで、この並び順番を更新出来る。

- 上記の状態で携帯プロジェクタが前後に動いた時：仮想情報の切り替え

ユーザがクラッチボタンを押したまま携帯プロジェクタを動かすと、システムはカメラから撮られた映像から Z 軸方向に対する携帯プロジェクタの動きを解釈する。システムでは携帯プロジェクタが向いている方向への動きをプラス (+) 方向の動きとして扱い、その反対をマイナス (-) 方向の動きとして扱う。システムは、それぞれの方向に対する携帯プロジェクタの動きから携帯プロジェクタの移動量を計算し、その値を積算した結果が予め設定しておいた閾値を超えた時、現在表示している仮想情報の次もしくは前の順番に該当する仮想情報を、閲覧レイヤ上に表示する仮想情報として選択する。仮想情報を切り替える基準となるこの閾値は携帯プロジェクタ内の仮想情報の数に合わせて、低くまたは高く設定することが出来る。

その結果、ユーザは閲覧レイヤ上に表示する仮想情報の選択と切り替えを、クラッチングを用いた連続的な操作手法である Z スイッチングを用いて行うことが出来る。

第4章 使用シナリオ

本章では携帯プロジェクタを用いる使用シナリオについて述べる。使用シナリオは以下のように大きく2つのカテゴリーに分けて説明する。

- 屋内でのシナリオ
- 屋外でのシナリオ

どのカテゴリーのシナリオにおいても携帯プロジェクタの携帯性を十分に活かすような使用シナリオを挙げることを試みた。また、きちんとしたコンピュータ関連設備が備わっていない場所での使用を基本使用場面とする。

4.1 屋内でのシナリオ

屋内でのシナリオで用いる仮想情報は設計図や配線図などの細かくて大きな情報である。この仮想情報を携帯プロジェクタを通して外部面に表示する時の利点は、携帯プロジェクタの内蔵スクリーンの解像度に縛られずに仮想情報が持つ本来の大きさで表示することが出来るということである。

仮にユーザはプロジェクション機能が搭載されていない携帯デバイスを持っているとする。その場合、携帯デバイス内の情報をユーザが閲覧するには携帯デバイスの内蔵スクリーンを利用するしかない。しかし、携帯デバイス内の情報が本研究で用いられている仮想情報であるとなると、一般的な携帯デバイスの内蔵スクリーンのサイズではそれらの情報を表示し切れず、縮小するか、部分的な情報しか表示できない。それで、この問題を解決しようとして、携帯デバイスの内蔵スクリーンの解像度を高くすればするほど、今度は内蔵スクリーンの中に表示される情報の大きさが段々小さくなり、ユーザが内蔵スクリーン上に表示された情報を認識するのに難しくなる。

しかし、本研究で用いる携帯プロジェクタのプロジェクション機能を利用して仮想情報を外部の面に表示すれば、高い解像度のまま、仮想情報を大きく表示することが出来るため、ユーザに対する情報の可読性と可視性を保持できる。また、携帯プロジェクタ内で扱う仮想情報のサイズを表示ディスプレイの大きさなどに合わせる必要がなくなり、PCで作成した仮想情報をそのまま携帯プロジェクタで扱える。これは携帯プロジェクタで扱う仮想情報の作成や編

先の部屋での点検を終えて A さんは今度、違う部屋構造の隣の部屋に入って再び電気配線状況の点検を行う。A さんは Z スイッチングを使い、先まで表示していた電気配線図を現在点検を行っている部屋の電気配線図に切り替えて、壁面や床の上に表示する。その際、A さんは床の裏の電気配線に問題があるのを発見し、その内容を携帯プロジェクタの通信機能を利用して工事本部へと連絡する。工事本部は A さんからの連絡を受付、問題の原因は設計当時の床の裏側の水道配管状況にあると判断し、水道配管工の B さんに連絡を入れ、A さんと合流するように指示する。また、同時に設計当時の床の裏側の水道配管状況が載っている水道配管図を A さんと B さんに送る。A さんは本部からの情報を携帯プロジェクタで受け取り、送られた水道配管図を再びピーク手法を用いて床の上に投影し、先の問題をどのように解決するかを考える。B さんが現場に到着し、A さんが照らしている配管図を見ながら、お互いに相談をし、今度どのようにこの問題を解決するかを決める。

4.1.2 設計図閲覧

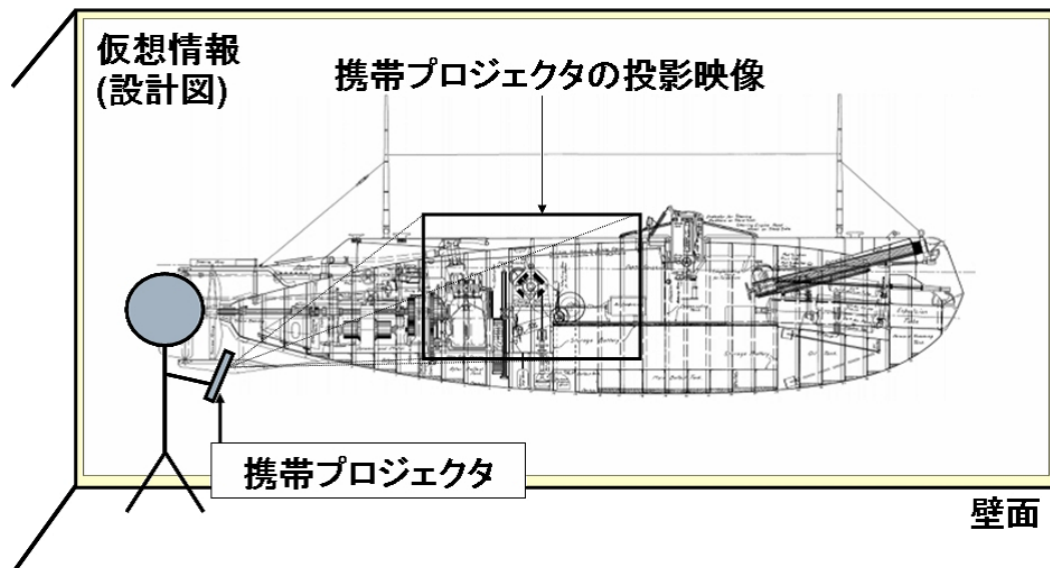


図 4.2: 使用シナリオ：設計図閲覧

船舶デザイナーの C さんは依頼を受けた船の設計を行うために、以前設計した船舶の設計図を携帯プロジェクタに入れ、会議室の壁面などの投影可能な領域にサンプル設計図を大きく投影し、内容を検討しながら、現在依頼された船の設計を考える (図 4.2)。C さんは図 4.2 のように設計図の細かい部分をピーク手法で閲覧しながら、今度の設計における注意すべき点を明確にしていく。C さんは現在依頼された船の設計には中型船の設計を参考にすることが良いと判断し、携帯プロジェクタとオンラインでつながっている C さんの自身の PC の中から中型船のサンプルを探し、携帯プロジェクタの中にダウンロードする。ダウンロード

が終わってから、CさんはZスイッチングを使用し、表示するサンプル設計図を中型船のサンプル設計図に切り替える。

新しく表示した中型船のサンプル設計図は、船の先頭に対応する設計図の部分がCさんのいる会議室の投影可能な領域を超えるところにあったため、Cさんはクラッチングを行って、船の先頭部の設計図を投影可能な領域の中に持ってくる。投影可能な領域の中に持ってきた設計図を眺めながら再びCさんは設計のことを考える。Cさんは依頼者からの要求のいくつかを反映して作成したサンプルを携帯プロジェクタから依頼者に送る。

4.1.3 インターネットショッピング

仕事から帰ってきたAさんは自分の部屋で今年の春に着る服を買うために、携帯プロジェクタを出して部屋の壁面にインターネットショッピングモールサイトを開き、インターネットショッピングを楽しむ。多くの服リストから1つの商品を選び、壁面の上に実際のサイズで選択商品を表示してから購入するかを考える(図4.3)。しかし、今見ている服があまり気に入らなかったのもので、Aさんは再び表示する仮想情報を服リストにレイヤボタンを利用して切り替える。Aさんは服リストから気に入った服を1つずつ選択し、ショッピングモールが提供しているお気に入りリストの中に入れていく。Aさんはこのお気に入りリストをインターネットショッピングモールサイトから携帯プロジェクタにダウンロードして壁面の上に実際のサイズで表示する。お気に入りリストの中の服をZスイッチングを使って切り替えながらじっくりとデザインや大きさ、値段などを比較して、買う服を決める。

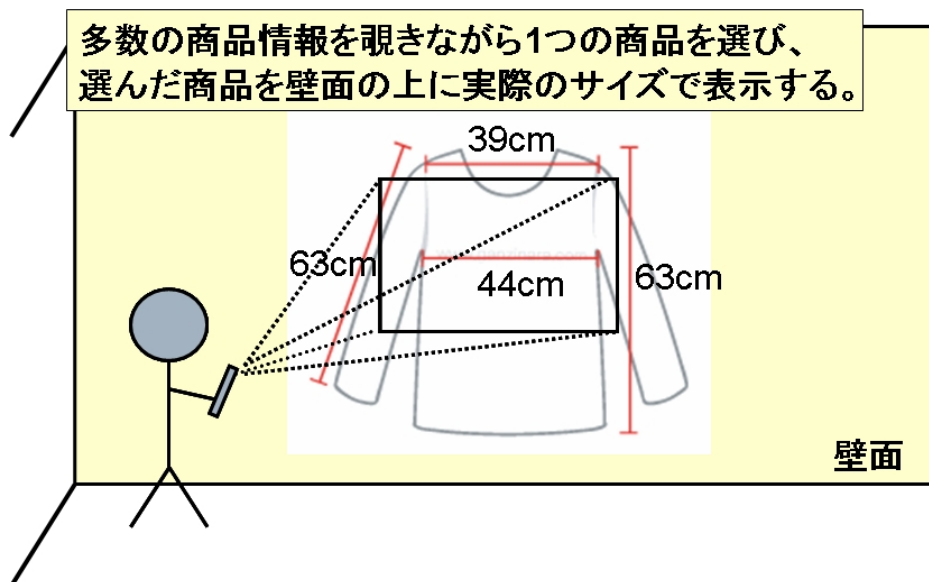


図 4.3: 使用シナリオ：インターネットショッピング

Aさんは部屋のインテリアにも興味があり、今度新しい家具も購入する予定である。Aさ

んは図 4.4 のように気に入った本棚を、部屋の中の置く場所に、実際の大きさに投影し、本棚の縦と幅のサイズを確認しながら、部屋の雰囲気と合うかどうかを考える。Aさんは色々な本棚を Z スwitchングを用いて同じ置き場所の上に表示して、どの本棚を選択するか決めていく。また、本棚以外の家具も携帯プロジェクタから投影して部屋の色々な場所に照らしてみながら、購入を決定する。そして、インテリア会社から A さんに送られた A さんの部屋にお勧めの家具リストを A さんは携帯プロジェクタで投影し、内容を確認してその中からいくつかを購入すると選ぶと、その情報がインテリア会社に携帯プロジェクタから送られる。

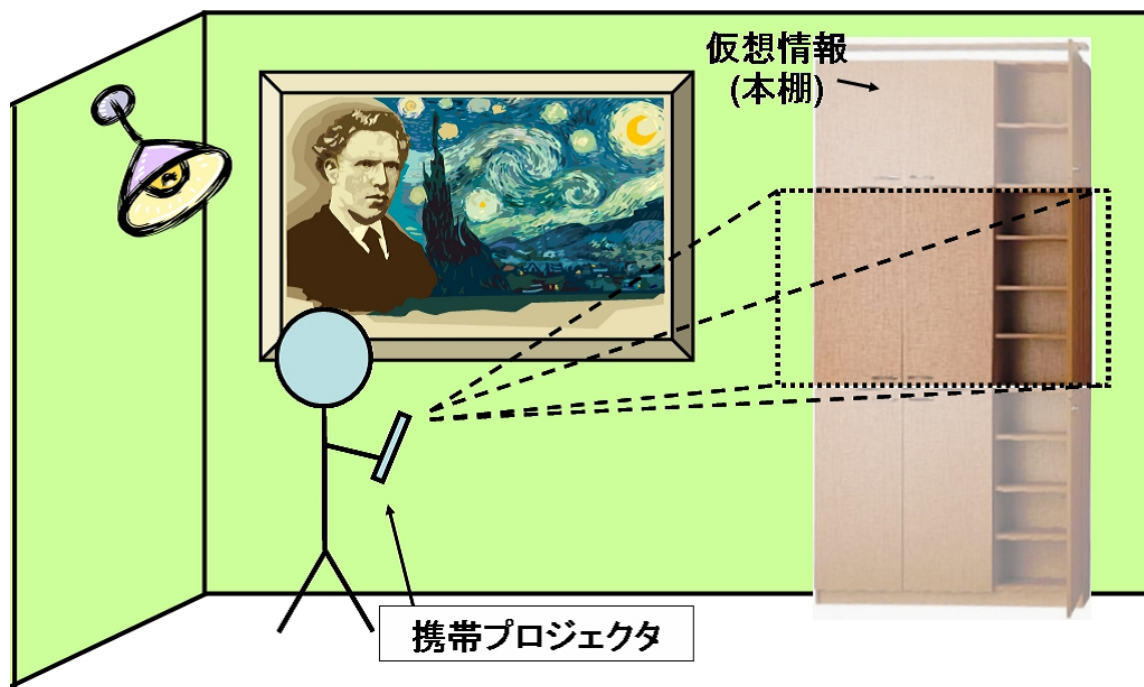


図 4.4: 使用シナリオ：インターネットショッピング (家具の購入)

4.2 屋外でのシナリオ

屋外でのシナリオで用いる仮想情報は主に地図情報である。

携帯プロジェクタを屋外で使用することは様々な制約を同伴する。まず、携帯プロジェクタから投影した投影映像は太陽光により妨害される。その理由は、我々の実装で用いているポケットプロジェクタの光源は 10W の LED ランプであるため、投影映像の明るさが太陽光に比べて非常に弱いからである。そのため、地面に投影した投影映像が太陽光によりユーザに見えなくなってしまう。この問題はプロジェクタ技術の発展からある程度改善できると考えるが、これのため、態々プロジェクタの光源の出力を太陽光の近くまで強くする必要はないと

判断した。それは太陽光に妨害されて、投影映像が見られない場所では、携帯プロジェクタで仮想情報を投影せず、携帯プロジェクタに付いている内蔵スクリーンを利用するか、太陽光により妨害されない場所に移動してから仮想情報を投影すると言った次善の策を取ることがより現実的で、この問題の解決により効果的であると見なしたからである。また、投影面が映る外部面の反射率や色により投影映像をユーザが見えにくくなる場合がある。アスファルトの上や歩道ブロックの上など、投影映像が映る外部面の色が黒色系か、反射率が低い外部面の上では投影映像が見えにくくなる。しかし、これらの問題も上記の問題と同様に妨害されない場所に移動してから携帯プロジェクタ内の仮想情報を投影すれば、解決出来る。

従って、我々は屋外でのシナリオで取り上げる外部面は常に、3.1 節で定義した投影可能な領域であることにする。また、この節で述べるシナリオは屋内でのシナリオで述べた仮想情報を携帯プロジェクタを通して外部面に表示する時の利点を継承する。

屋外でのシナリオの大きな特徴として、携帯プロジェクタ内に搭載されている GPS などの位置追跡システムを利用することを挙げられる。これにより、携帯プロジェクタを持ったユーザの位置に合わせた仮想情報を提供することが出来、よりコンテキストアウェアなサービスを支援出来る。

4.2.1 地図閲覧

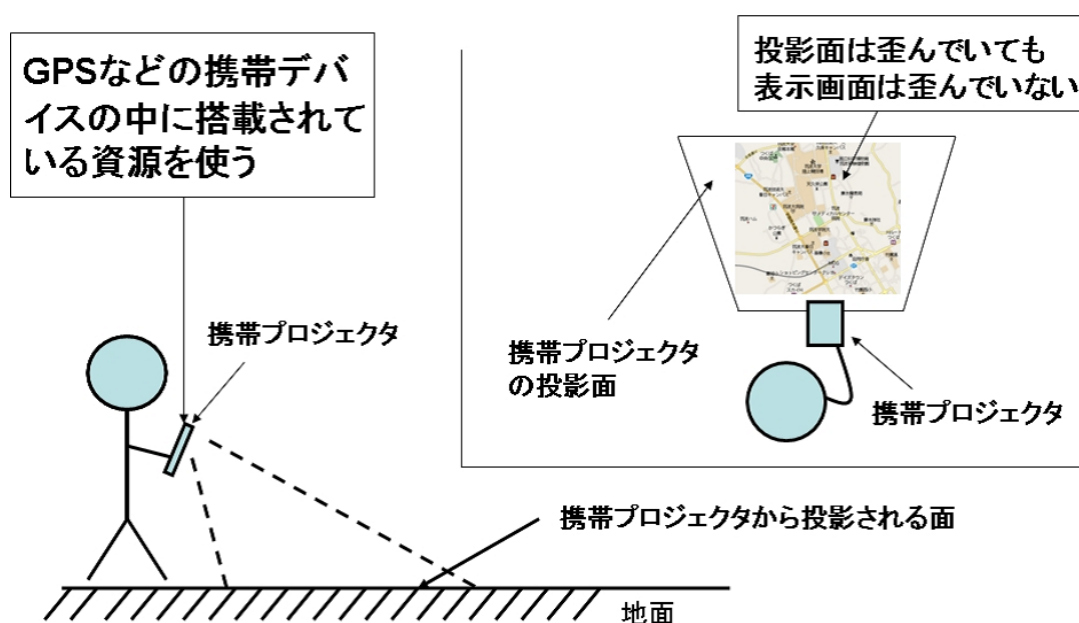


図 4.5: 使用シナリオ：地図閲覧の仕組み

携帯プロジェクタを持っている A さんは見馴れていない町の中で友人と会うために待ち合

わせの場所に向かって歩いている(図 4.5)。しかし、随分歩いたと思ったら道に迷ってしまった。Aさんはポケットから携帯プロジェクタを取り出し、携帯プロジェクタを地面向けて足元のところを照らし出した。そこに投影される投影映像の中の仮想情報は、現在Aさんが立っている場所の地図である。投影映像の中の地図にはAさんの回りにある目印となるビルやお店などの情報が詳細に表示されている。Aさんが携帯プロジェクタを右に動かして投影映像が照らしていた位置を変えると、その動きに合わせて、投影映像の中の地図情報も現在投影映像が照らし出している右方向の位置に対する地図に変わっていく。Aさんは自分の下の地面に大きな地図が貼られているような感覚で操作を行う(図 4.6)。Aさんは前から方向音痴で地図音痴だったが、携帯プロジェクタを使用してから道に迷うことが少なくなった。



・ユーザは地面に大きな地図が張られているような感覚で操作を行う。

図 4.6: 使用シナリオ：地図閲覧

無事に友人との待ち合わせに間に合ったAさんは再び携帯プロジェクタを取り出し、地面に地図情報を照らす。照らしている地図に対し、Aさんはレイヤボタンを押し、地図の上に表示する付加情報をレストランと選択し、その情報を地図の上に表示する。友人とAさんは回りのレストランの位置や種類などを一緒に見ながら、夕食のお店を決める。

第5章 実装

現在のプロジェクション技術の発展から予測される携帯プロジェクタのプロトタイプを試作し、ピーク手法とピーク手法で表示された仮想情報に対する提案インタラクション手法を実現する。

5.1 プロトタイプ

プロトタイプの試作は図 5.1 に示すように商用化されている既存のプロジェクタをベースに行なった。プロトタイプシステムの構成は図 5.2 に示す。

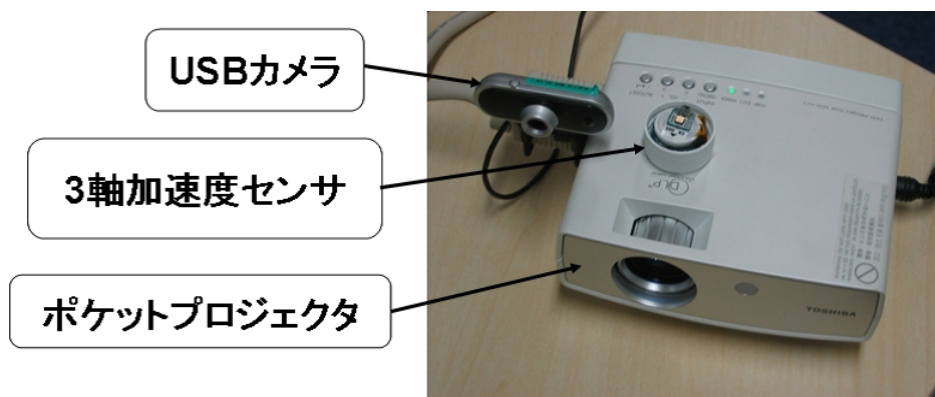


図 5.1: プロトタイプ

5.1.1 ポケットプロジェクタ

携帯プロジェクタのプロジェクション機能を実現するために東芝製小型 LED プロジェクタ (商品名：TDP-FF1) を用いた。このプロジェクタの外形寸法は幅 140mm、高さ 62mm、奥行 124mm で、外部バッテリーを装着した時、重さは 0.75kg である。光源は 10W の LED ランプを使用している。壁面やスクリーンまでの投写距離 0.4～2.5m にあたり、投写画面サイズは 11 型から 68 型まで変化する。

5.1.2 USB カメラ

受像素子 1/4 インチの CMOS センサを持つ USB2.0 対応の USB カメラを一般の携帯デバイス (携帯電話や PDA など) に搭載されているカメラ機能の代わりとして用いた。この USB カメラは、毎秒 30 フレームの画像を、1 ピクセルあたり 24bits の 320X240 ピクセルのサイズの解像度で得られている。

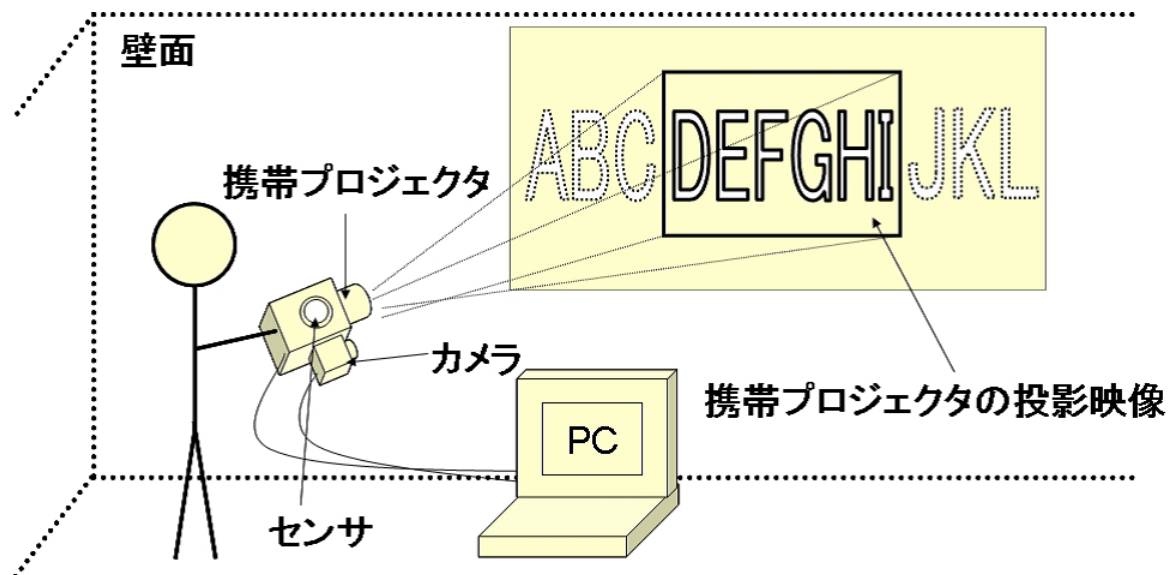


図 5.2: プロトタイプシステムの構成図

5.1.3 3 軸加速度センサ

携帯プロジェクタの重力方向に対する傾きを検出するために、BlueTooth 通信が可能な Nokia 製 Cookie を用いた。Cookie は以下の 6 種類のセンサを基本機能として搭載している

- 2-axis linear accelerometer
- Compass (3-axis MI sensor)
- Ambient light sensor
- Galvanic skin response sensor (皮膚抵抗測定)
- Heart rate sensor
- Skin temperature sensor

しかし、2軸加速度センサから得られる加速度情報だけでは、重力方法に対する携帯プロジェクタの傾きを検出するのに不十分である。筆者は3-axis linear accelerometer extension board と呼ばれる拡張ボードを Cookie に付け、3軸加速度センサとして Cookie を利用した。1秒当たり5回(5Hz)、3軸加速度センサから X,Y,Z のそれぞれの軸にかかる加速度の値を Bluetooth 通信を通じて得ている。3軸加速度センサの詳しい仕様は以下のようなものである。

- 測定範囲：-3G～+3G (重力加速度を 1G にみなす)
- 感度：333mV/g
- オフセット：0.5*Vcc (Vcc：トランジスター電源)
- 周波数応答：100Hz
- 量子化 bit 数：10bit (センサに搭載されている A/D コンバータの仕様)
- 基準電圧：+2.8V (A/D コンバータの仕様)
- サンプリングレート：5Hz (A/D コンバータの仕様)

また、加速度データは 0V～2.8V の電圧の変動で入力される。

5.1.4 その他

クラッチボタンとレイヤボタンとして現在のプロトタイプでは仮想情報の提供とインタラクション処理用の PC のキーボードのキーを使った。

5.2 携帯プロジェクタの動き推定

我々は、スクリーンや壁面などの外部面は常に水平面に対して垂直であると設定した上、携帯プロジェクタを持ったユーザがスクリーンに向けて行える動作を表 5.1 で表す。

表 5.1: 携帯プロジェクタを持つユーザのスクリーンに対する動き

	Translation	Rotation
X axis	○	○
Y axis	○	○
Z axis	○	○

表 5.1 で示している携帯プロジェクタを手にしたユーザの動きに対して、携帯プロジェクタから投影される投影映像は、ピーク手法を使わない場合、それぞれの動きに合され、回転

したり、投影場所を変えたりする。従って、ピーク手法の実現には表 5.1 で示す携帯プロジェクタを手にしたユーザの動きを推定する必要がある。

我々はピーク手法を用いて表示した仮想情報に対するユーザの動きを図 5.3 のようにまとめた。図 5.3 のようにスクリーンに向けてのユーザの動きを類推し、まとめるに渡って我々は、それらの動きがピーク手法で表示されている仮想情報を覗き込むユーザに取って、自然な動作であることを重要視した。しかし、本論文ではピーク手法においてのユーザの動きを図 5.3 で示すように Z 軸以外の軸に対する並行移動については考慮していない。我々は X 軸と Y 軸に対する純粋な並行移動をそれぞれ、Y 軸を回転軸にした回転運動 (Yaw) として、X 軸を回転軸にした回転運動 (Pitch) として扱う。

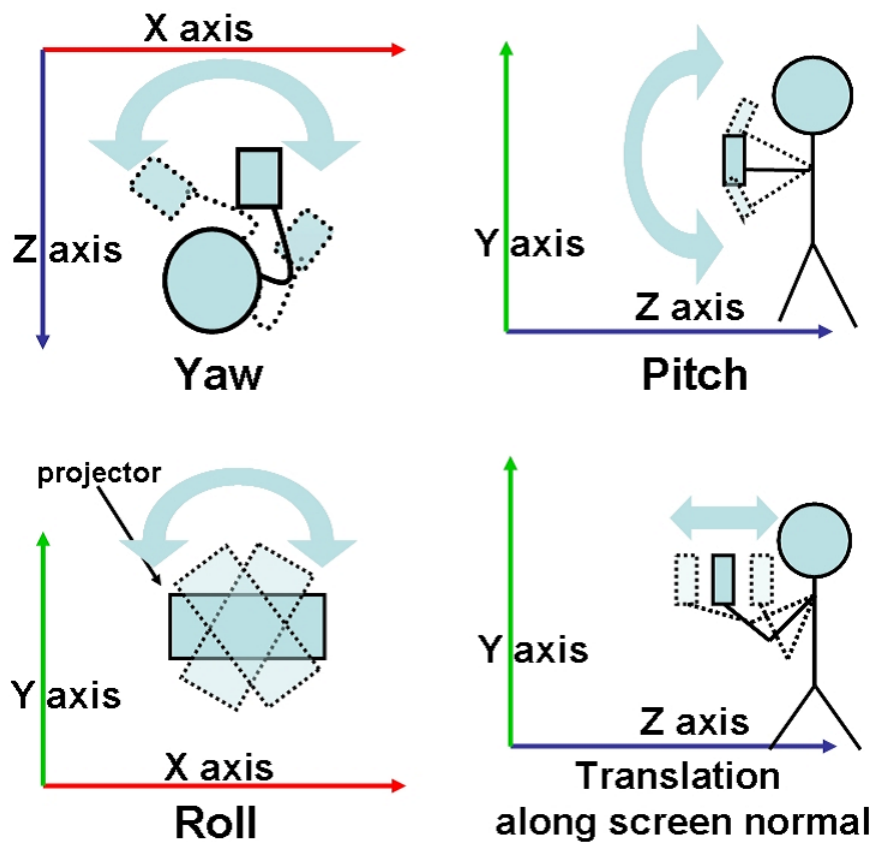


図 5.3: ピーク手法で表示された仮想情報に対する携帯プロジェクタを持ったユーザの動き

その理由は、投影している投影面の中の仮想情報の左右にある仮想情報を見るために、携帯プロジェクタを手にしたユーザは、投影した投影映像を見ながら投影面を水平方向 (左及び右) へ並行移動するより、その場所に立った状態で水平方向 (左及び右) へ小さな回転操作 (Yaw) を行う方をより自然的な操作として感じると我々は判断したからである。また、垂直方向 (上下) に対するユーザの並行移動は、ユーザの身長や手の長さなどに起因して、水平方向

への並行移動よりも不自然な動作であると判断した。これらの理由により、我々は表 5.1 で示す X 軸と Y 軸に対する並行移動を、類似した結果が得られる同軸での回転運動に代替することにした。

図 5.3 で示すユーザの動きを測定するには、携帯プロジェクタに携帯プロジェクタの動作の認識が可能なセンサなどを付着する必要がある。そのために使用するセンサらはマーカやパターンイメージなどの外部参照がなく、必要なものを完備したものである必要がある。我々はこの条件を満たし、携帯プロジェクタに付着し、使用可能なセンサらを表 5.2 に整理した。

表 5.2: 単独でデバイス自体の動きの認識が可能なセンサの種類

センサの種類	Translation	Rotation
3 軸加速度センサ	Relative X, Y, Z	
3 軸加速度センサ (傾きセンサとして)		Absolute roll, pitch
カメラ	Relative Z	Relative roll, yaw, pitch
ジャイロスコープ		Relative roll, yaw, pitch

加速度系のセンサを使う場合、3 軸に対する加速度を取得出来るため、この値を積分して、速力と位置を得ることが出来る。しかし、積分を利用して得るしかないため、誤謬が多く、短い時間内のジェスチャー程度だけを認識することが出来る。多くの携帯デバイスで加速度系センサを用いる場合、加速度系センサが重力加速度を基準とすることを利用し、我々は 3 軸加速度センサを傾きセンサとして使用した。

カメラは edge detection[4], region detection[5], optical flow[6, 7] のようなビジョン技術を利用して、取得した映像を処理し、携帯プロジェクタの相対的な位置を感知できる。

ジャイロスコープの場合は、加速度系やカメラより相対的に値段が高いが、3 軸の回転を全て取得できる長点を持っている。しかし、加速度系を傾きセンサとして使う時とは異なって相対的に傾きを認識するため、誤差が累積される可能性がある。

各々のセンサとアルゴリズムはそれぞれ長所と短所を持っていて、認識できる範囲に少しずつ差がある。そのため、本研究ではカメラと 3 軸加速度センサを用いた方法を使用した。この方法の場合、カメラから得られる各軸への回転運動の相対的な値から発生する誤差の累積を、3 軸加速度センサを傾きセンサとして使って得られる絶対的な値で補完することが出来るからである。

5.2.1 カメラを用いた動きの測定

カメラを用いた携帯デバイスの姿勢や位置の測定は Machine Vision や Robotics 分野 [8, 9, 10, 11] で幅広く取り使われている。我々は [9, 10, 11] で紹介された Image-Based Motion Estimation (IBME) アルゴリズムを応用して、携帯プロジェクタを持ったユーザに対する携帯プロジェクタの動きを USB カメラから取得した画像情報に基づいて相対的に測定する。

我々は USB カメラから取得する映像を 2 枚の順次的なイメージフレーム段位で比較する方法を利用する。これは Johnson らが [11] で行った測定手法に似ている。USB カメラから流れてくる各々のイメージペアにおいて、各イメージペア内の 2 枚のイメージ間の一致する対応点を見つけるために、我々はそれぞれのイメージの中の特徴点を探して割り出す。この特徴点は 2 枚のイメージの中で現れる携帯プロジェクタの動きを推定するのに使われる。各イメージペア内の 2 つのイメージに対してそれらの特徴点を抽出するために使える方法は色々存在するが、我々はその中でも良く知られている Kanade-Lucas-Tomasi (KLT) アルゴリズム [12] を利用した。その理由は、USB カメラから撮影した背景映像の中に凸凹や強いコーナーが少ない場合が多い我々の実装環境において、他のアルゴリズムより適していたからである。

この KLT 特徴点は 2 枚のイメージ間で window-based 強度相関マッチング (intensity correlation matching) を行う時、各イメージ上のマッチング開始位置点として使う。この window-based 強度相関マッチングは [13, 14, 15] で取り上げている Full-search Block Matching アルゴリズムを応用したものである。このマッチングプロセスは一般的に $O(N^2)$ 演算であるため、我々はこの相関マッチングにおける探索空間を縮めることで相関マッチングにかかる時間の改善を試みた。それは、現在のイメージで抽出した特徴点らと一致する関係の前のイメージで抽出した特徴点らは、 R ピクセル範囲内に存在すると仮定し、探索範囲を制限することで行っている。我々の実装では、カメラから得られる映像が 30fps であることから、この R を 3 と設定した。

相関マッチングの次の段階は、一致する関係として結びつけられたマッチングペアを任意の数で取り上げ、それらのマッチングの間の Fundamental Matrix を計算し、その Fundamental Matrix が全てのマッチングペアに対し、一番適切なのかを判断する。我々はこの段階を解くために Fischler と Bolles により紹介された RANSAC アルゴリズム [16] を利用した。各イメージペア上で追跡しておいた全ての特徴点セットから一致した対応関係の特徴点を任意的に 7 つ選択する。それから、Hartley と Zisserman から提案された 7-point Algorithm [17] を利用して、各イメージペアにおける Fundamental Matrix F_i を計算する。RANSAC が終わって得られる一番適切な F_i は全ての特徴点セットから outlier らを削除することによってローバストな F を計算する。

それから、事前に計算しておいたカメラの calibration matrix K を利用して式 (5.1) で示すよ

うに essential matrix E を計算する。

$$E = K^T F K. \quad (5.1)$$

携帯プロジェクタの動きを計算する次の段階は、式 (5.1) に示した essential matrix E から並行移動成分と回転運動成分を抽出する段階である。式 (5.1) の essential matrix E は 2 つのイメージ間の対応関係により、回転行列 R と並行移動ベクトル T に分解することが出来、式 (5.2) に示すように定義できる。

$$E = [t]_X R. \quad (5.2)$$

この essential matrix E に対する関係式は、3 次元上の携帯プロジェクタの動きを 2 次元上の閲覧レイヤでの動きに対応させ、X 軸と Y 軸方向への動きと Z 軸での回転だけである仮定すると、式 (5.3) のように表現することが出来る。

$$x'^T R S x = x'^T E x = 0. \quad (5.3)$$

式 (5.3) の S は $Sx = t \times x$ を満たす 3×3 の skew-symmetric 行列である。

この回転行列 R と S 行列は E に対する singular value decomposition(SVD)[17] $E = U \text{diag}(1, 1, 0)V^T$ により定めることが出来る。従い、 W と Z が以下の場合、

$$W = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad Z = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

式 (5.5) のように 3 次元上の携帯プロジェクタの動きに対する閲覧レイヤ上の 2 次元の動きとして R 行列と S 行列が求められる。

$$R = UWV^T \text{ or } R = UW^T V^T, S = UZU^T, \quad (5.5)$$

この R と S 行列を利用し、携帯プロジェクタの姿勢を計算し、それに応じて、スクリーン上の投影面の位置に対応する仮想情報に投影イメージを変更する。

5.3 歪み補正

我々は 3 軸加速度センサを傾きセンサとして使い、携帯プロジェクタの最初の姿勢を測定する。また、カメラを利用して携帯プロジェクタの動きを測定している間には、携帯プロジェクタの絶対的な回転運動情報を得るために使用した。携帯プロジェクタの最初の姿勢情報は、携帯プロジェクタから投影する仮想情報における表示開始領域を初期化するのに使う。我々は 3 軸加速度センサから得られる X 軸と Z 軸に対する絶対的な回転運動情報を、カメラで測定した相対的な動き情報から発生する誤差を補正するのに使う。

3 軸加速度センサからの値とカメラから得られる相対的な動き情報に基づいて、システムは大きな仮想情報上の表示する部分の位置を更新する。その理由は、携帯プロジェクタの動きにより、壁面やスクリーン上の投影面と携帯プロジェクタが常に水平状態であるのではないからである。また、システムは計算した携帯プロジェクタの動き情報に基づいて、スクリーン上の投影面の外形を推定する。スクリーン上の投影面の外形の推定が完了したら、図 5.4 のように事前に投影する仮想情報を歪ませ、実際の投影映像には歪みのない映像としてみせる [18, 19]。

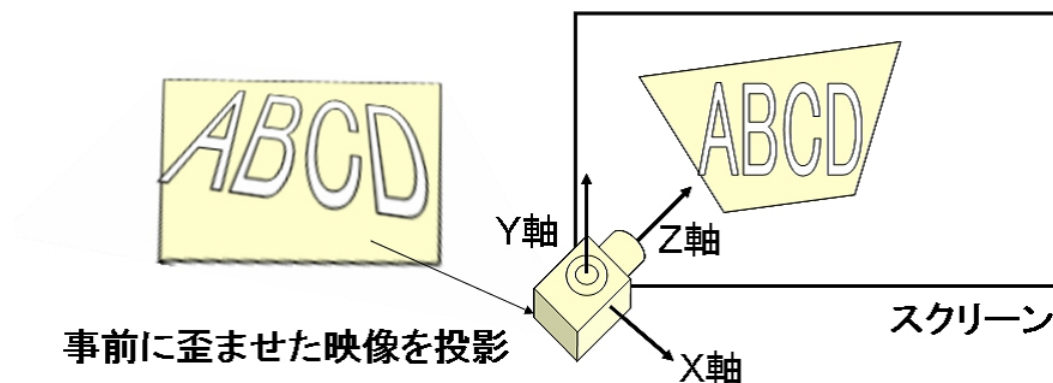


図 5.4: 歪み補正

第6章 関連研究

6.1 ハンドヘルドプロジェクタを用いたインタラクションについての研究

ハンドヘルドプロジェクタを用いて投影した投影画面への操作に、ハンドヘルドプロジェクタをそのまま利用するには、プロジェクタの動作にかかわらず、投影面に対して動かない安定した投影イメージを提供することが重要な問題となる。これを達成するために、投影イメージはプロジェクタの位置と姿勢による投影面での動きや歪みを補うために連続的に歪められる。Raskar らの RFIG lamps[20] と Beardsley らの研究 [21] は、コンピュータビジョンをベースにした解決方法を紹介している。そこでは、ハンドヘルドプロジェクタに投影面上の光学マーカを検出するためにカメラを設置し、検出したマーカ情報に従って投影イメージを補正する [20, 21]。このアプローチは事前に光学マーカを投影面上に貼って置く必要があるため、任意の環境についての利用には向いていない。Rapp ら [22] は投影イメージへの補正を行うために傾きセンサを搭載したハンドヘルドプロジェクタを利用する方法を紹介した。このアプローチは投影面に対して事前設備が必要ではないため、どの投影環境へも適用できる。しかし、傾きセンサへの依存とハンドヘルドプロジェクタにおける周囲環境に関する情報の不足は、実際の外部環境に対する投影情報の絶対位置を測定することを妨げる。我々の研究では、カメラを併用することでそのような問題を解決している。

研究 [20, 21] の著者らはハンドヘルドプロジェクタを用いたインタラクションについても述べている。RFIG lamps[20] の場合はハンドヘルドプロジェクタで RF タグが埋め込まれている場所を照らし、その RF タグからの情報をハンドヘルドプロジェクタから投影された投影映像上で見せている。しかし、投影映像に現れる情報が RF タグからの情報に限られている。Beardsley らの研究 [21] はハンドヘルドプロジェクタから投影される投影映像の中央に十字のカーソルを表示し、そのカーソルを用いて投影映像の中のオブジェクトを選択し、動かす。しかし、この操作には投影面上に光学マーカを設置する必要がある。Blasko らの研究 [23] は、模擬された wrist-worn projection display に株式の情報を閲覧するための方法としてタッチセンサスクリーンを利用することについて述べている。

Zoom-and-pick[24] はハンドヘルドプロジェクタを用いて投影した画像に対する操作に、手にしたハンドヘルドプロジェクタをそのまま使う。そのために、いくつかのマーカを投影する壁面につける。ハンドヘルドプロジェクタを操作デバイスとして使っているために発生

される手振れを考慮し、Zoom-in 機能を使った高い精度のポインティングを実現している。Zoom-in してからのポインティングの安定のために、tracking menus[25] と呼ばれているインタラクション技術を活用している。そして、プロジェクターから投影された画像の中央に十字のポインタを置いて投影面に対する絶対的なポインティングを可能にしている。携帯デバイスからのプロジェクションを模擬システムで表現し、投影された映像に対して指先を用いるインタラクションについて述べている研究として Hotaru システム [26] があるが、この研究では表示された情報を覗いているような表示方法や表示情報の切り替えなどの操作は行われていない。これらの研究は既存のデスクトップアプリケーションへの適用を主な目標としている。また、事前に投影面の上にマーカなどを張っておく必要があったり、模擬システムが設備された環境が必要であることから、本研究とは異なる。

Cao らの研究 [27] は最近のプロジェクションテクノロジーの発展動向から、近い将来には携帯用デバイスにどの面の上でも情報を大きく投影するプロジェクション技能が搭載されると予測している。Cao らはハンドヘルドプロジェクタと 3 次元空間で追跡されるペンを用いて、動的に設定空間 (design space) を定義することと実際の環境に埋め込まれた複数の仮想情報空間でのインタラクティングについて述べている。そして、それらのための技術を開発し、使用シナリオについて調べた。プロジェクタが携帯端末の中に入り、小さな内蔵スクリーンの限界を克服するという概念と懐中電灯のような空間探索感の実現という概念はほぼ同じである。しかし、Cao らの研究は予め使用空間を設定する手間がある。また、事前に高価な追跡システムを使用したい環境の中に設置しておく必要がある。

6.2 覗きこむような表示手法とプロジェクションについて

iLamp[28] は傾きセンサとカメラを併用し、様々な形の投影面に対する歪みを補正している。また、RFIG lamps[20] のように RF タグを利用したインタラクションについても述べている。我々の研究で用いるピーク手法のように、空間上の一部分を覗いているように表示しているが、投影映像に対するインタラクションについては述べていない。Khan ら [29] は複数のプロジェクタで作りだした Visualization Studio という空間で、複数のプロジェクタから投影している多数の情報に対し、Spotlight のような表示効果を利用して多くの情報の中の一部を照らし出して同じ場所にいる他のユーザの注意を引く。この Spotlight 効果は我々のピーク手法での覗きこむような表示手法と似ている。

Peephole Display[30] と Boom Chameleon[31] は大きな情報空間での情報の閲覧と閲覧している情報に対するインタラクションにユーザの空間的な位置を反映して行っている。FieldMouse[3] は携帯デバイスを用いて実際環境に埋め込まれているように配置された情報を覗きこむ。これらはプロジェクション機能を用いてはいるが、我々のピーク手法の概念と似ている。

6.3 カメラを用いて測定した携帯デバイスの動きに基づいた操作について

携帯デバイスの動きを測定する研究は Virtual Reality、Augmented Reality、Computer Vision、Machine Vision、Robotics などの様々な分野に渡り、数多く研究されている。その中には特殊な追跡システムを利用して携帯デバイスの動きを測定し、その動きを操作方法として利用する研究もある [27]。しかし、一般的には携帯デバイスの動きの測定にカメラ系とセンサ系のデバイスを用いる場合が多い。

最近の携帯電話の殆どがカメラ機能を内蔵していることから、携帯電話の動きを内蔵カメラを用いて測定し、携帯電話内の表示情報に対する操作にその結果を利用する研究がある [13]。この研究は 3 次元空間上のユーザの振舞を 2 次元スクリーン上のカーソルやメニューのスクローリングに対応付けている。Jane ら [32] は小型 PC の内蔵スクリーンに表示しているイメージのブラウジングに小型 PC を手に持ったユーザが行う動作をカメラで測定し、利用している。これらの研究は、携帯デバイスの動きを測定する方法としては本研究と似ているが、その動きが反映される表示情報や表示方法が異なる。

第7章 議論

7.1 ピーク手法について

ピーク手法の目的は大きな仮想情報の一部を覗き込むような錯覚をユーザに与えることであるため、考えてみると仮想情報の全体を一目に眺めるには少し不便であるようにも見える。しかし、これは覗き込むという動作に対するユーザの偏見から生まれだ疑問である。ピーク手法を用いて表示する仮想情報は、その大きさが投影可能な領域を超えない限り、そして、ユーザとスクリーンの間に十分な距離が取れる限り、ピーク手法を利用してその仮想情報の全体を見ることが出来る。

その方法は極に簡単である。ピーク手法で仮想情報の全体を眺めたかったら、ユーザは携帯プロジェクタを持ったまま、表示している仮想情報の全体が一目に眺められる距離まで、ただ後ろに少しずつ移動すればいい。ユーザが後ろに下がることに連れて、携帯プロジェクタから投影される投影映像の範囲は段々広がっていく。その代わりに投影映像の中の仮想情報の大きさは壁面やスクリーンの上に張り付けられているように表示されるため、最初の表示した時と比べ、その大きさに変化はない。

しかし、上で述べたように仮想情報の大きさが投影可能な領域の大きさより大きければ、ピーク手法で表示する仮想情報の全体を眺めるには必ずクラッチング操作が必要となるため、仮想情報の全体を一目に眺めることはできない。同様にスクリーンとユーザの間の距離が充分に取れない場合にも、ピーク手法を用いて仮想情報の全体を一目に眺めることはできない。この場合の解決策として、光角幅が広いプロジェクタを用いることが考えられる。そうすると後方への短い量でも十分に広い投影映像の範囲を作られる。

7.2 インタラクション手法について

7.2.1 情報レイヤの切り替えとクラッチングを用いた仮想情報の切り替えの関係について

本研究では閲覧レイヤを介して、外部面に大きく表示される仮想情報を切り替えるのに、2つのインタラクション手法を提案している。情報レイヤの切り替えとクラッチングを用いた仮想情報の切り替え(以後Zスイッチング)がそれぞれのインタラクション手法である。同じ結果を得られる操作を2つのインタラクション手法として用いた理由は、この2つのインタラクション手法はその性質が異なるからである。

単純に考えて情報レイヤの切り替えはクラッチボタンとは異なる別のボタンを利用して、閲覧レイヤとは全く異なる選択レイヤという情報レイヤを用いているため、操作の手順や情報レイヤの切り替えの究極的な目的である仮想情報の切り替えと上手くその筋合いがつかないようにも見える。しかし、この情報レイヤの切り替えは閲覧レイヤで表示する仮想情報をユーザが直接に選択出来るように支援する。言い換えれば、これはユーザが携帯プロジェクタ内の仮想情報へランダムアクセス出来るように支援するインタラクション手法である。

その代わりに、Z スイッチングはユーザが携帯プロジェクタ内に入力しておいた仮想情報を順次的に切り替えられるように支援する。Z スイッチングはクラッチングで使用していたクラッチボタンをそのまま利用し、このボタンを用いた連続動作を、インタラクションのトリガーとして使うことで、ユーザへの理解を高める。また、情報レイヤの切り替えを行わず、表示する仮想情報の切り替えを1つの情報レイヤ(閲覧レイヤ)上で行うことで、さらにその操作の連続性を高める。即ち、この操作はユーザが仮想情報の順番を知っている場合、携帯プロジェクタ内の仮想情報の切り替えを高速に行えるように支援する。

我々はユーザの仮想情報の選択及び表示する仮想情報の切り替えにおける操作のバリエーションのためにこの2つのインタラクション手法を提案した。

7.2.2 クラッチングを用いた仮想情報の切り替えについて

Z スイッチングの時の仮想情報の並び順はユーザが入力したり、入れ替えたりした更新日時順である。この順番に仮想情報を並び変えることは、ユーザが作業しているもしくは表示している仮想情報の近くにその仮想情報と関連する仮想情報が配置する可能性を高め、前と後の2方向への選択しか出来ないZ スイッチングを用いた仮想情報の切り替える操作の回数を軽減させる。しかし、このような並び順でも現在表示している仮想情報の次に閲覧したい仮想情報が現在の仮想情報の正反対に配置され、Z スイッチングを使いつらい場合がある。そのため、我々はZ スイッチング時の仮想情報の並び順をユーザが任意的に切り替えるようにサポートする必要があると判断した。我々はその操作に選択レイヤ上の仮想情報の縮小アイコンを利用することを考える。例えば、選択レイヤ上の一定の領域に縮小アイコンをユーザが並べることでZ スイッチング時の仮想情報の並び順が変わる。また、選択レイヤ上のある一か所に仮想情報の縮小アイコンに関連のあるもの同士に集めることで、集められた仮想情報がグループ化され、Z スイッチング時に順序的に表示される仮想情報は同じグループの仮想情報が優先的に表示される。

Z スイッチング操作にはユーザがZ 軸方向に携帯プロジェクタを持ちながら移動する必要がある。しかし、このZ 軸方向への移動は携帯プロジェクタ内の仮想情報の数が多くなると、大きな問題になってしまう。例えば、Z スイッチングで表示する仮想情報を1個切り替えるために必要な移動量を1cm だとして、携帯プロジェクタ内の仮想情報の数が500 個であった場合、全ての仮想情報を1 回ずつ表示するのに前後の方向を合わせ、500cm 移動しなければならない。これはユーザと壁面の間に十分な距離が保障されていない環境である場合には、Z スイッチング操作を用いて表示できない仮想情報が発生することを意味する。

この問題を解決する方法として、我々の研究で用いているもう1つの仮想情報の切り替え操作である情報レイヤの切り替えを利用する方法があるが、それはZスイッチングの問題を解決する根本的な解決策ではない。それで我々は最初に携帯プロジェクタ内の仮想情報の数に合わせてZスイッチングに必要な移動量の閾値を動的に変えることを考えた。例えば、携帯プロジェクタ内の仮想情報の数が多ければ、移動量の閾値を短くし、1つの仮想情報を切り替えるためにユーザが動く距離を短くする。しかし、この方法はユーザの動きに敏感になってしまい、誤作動の可能性が高く、切り替えの速度が速くなり、ユーザが表示したい仮想情報を選択することが難しい。

それで我々は次にZ軸方向に移動させた携帯プロジェクタの移動速度に合わせ、切り替える仮想情報の数を増やすことを考えた。例えば、携帯プロジェクタをZ軸早く動かせば、切り替える仮想情報が10個ずつになって、ゆっくり動かせば、普通の1個の仮想情報の切り替えになる。しかし、この方法の問題は、早く動かした場合、10個の間の仮想情報を表示しないため、ユーザが表示される仮想情報の順番をある程度覚えていない限り、ユーザの検索時間が長くなることである。

これらの方法にわたり、ユーザがZ軸方向に携帯プロジェクタを動かそうとするとユーザの大半が、携帯プロジェクタを手にした腕を前に伸ばす、もしくは後に引くという動作を行った。それで我々は腕の長さで1個の仮想情報の切り替えの移動量の閾値5cmから、Zスイッチングが有効な仮想情報の数を20個以下であると定めた。20個以上の仮想情報が携帯プロジェクタ内に存在する場合は、上記に述べた選択レイヤを利用した仮想情報のグループ化を行ってZスイッチングで表示する仮想情報の数を調節したり、情報レイヤの切り替えの操作を利用する方が有効であると結論付けた。

第8章 まとめ

本研究は、近い将来登場すると予想するプロジェクション機能を持つ携帯電話を携帯プロジェクタと呼び、そのプロトタイプシステムを商品化されている既存のポケットプロジェクタをベースにして試作した。我々はこの携帯プロジェクタを用いるための技術として我々はピーク手法呼ぶ大きな情報の一部を覗いているような錯覚をユーザに引き起こす情報表示手法を挙げ、試作したプロトタイプシステムを使用し、実現した。ピーク手法で表示する設計図や地図のように複雑で、膨大な情報量を持つ情報を我々は仮想情報と呼ぶ。ピーク手法で表示されたこの仮想情報におけるインタラクション手法として、仮想情報を空間上でスクロールするためのクラッチング、表示する情報レイヤを切り替える情報レイヤの切り替え、情報レイヤの切り替えを介せず、仮想情報の切り替えられるクラッチングを用いた仮想情報の切り替え(Zスイッチング)について述べた。そして、携帯プロジェクタを用いる使用シナリオとして配線図閲覧、設計図閲覧、インターネットショッピング、地図閲覧を挙げた。ピーク手法と提案インタラクション手法の実装のために我々のプロトタイプシステムはUSBカメラと加速度センサを併用した。我々はImage-Based Motion Estimation(IBME) アルゴリズムを利用し、携帯プロジェクタを持ったユーザに対する携帯プロジェクタの動きをUSBカメラから取得した画像情報に基づいて相対的に測定する。その際、加速度センサから得られる携帯プロジェクタのX軸とZ軸に対する絶対的な回転情報を、カメラで測定した相対的な動き情報から発生する誤差を補正するのに使う。そして、自由に動く携帯プロジェクタの投影面に発生する歪みをUSBカメラと加速度センサからの値を利用して推定し、事前に投影する仮想情報を歪ませ、投影映像には歪みのない映像に見せる。最後に我々は各インタラクション手法についての議論を行い、我々のインタラクション手法が持つ問題点とそれらの解決点について明確にした。

謝辞

本研究は、様々な方々の協力により進められてきました。中でも、指導教員である田中二郎教授には心から感謝を申し上げます。そして、WAVE チームの担当として研究全体を通してご指導いただきました志築文太郎講師には深くお礼を申し上げたいと思います。また、論文の執筆の際に様々な助言をいただきました三末和男准教授および高橋伸講師にも心から感謝しております。そして研究にご協力いただきました WAVE チームメンバーの皆様および IPLAB メンバーの方々にも深く感謝しております。そして生活の中で私を支えてくれた家族、友人達にも感謝を申し上げたいと思います。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] 内閣府. 消費動向調査. <http://www.cao.go.jp/>.
- [2] 総務省情報通信政策局. 通信利用動向調査報告書. <http://www.soumu.go.jp/>.
- [3] Itiro Siio, Toshiyuki Masui, and Kentaro Fukuchi. Real-world interaction using the fieldmouse. In *UIST '99: Proceedings of the 12th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 113–119, New York, NY, USA, 1999. ACM.
- [4] Jari Hannuksela, Pekka Sangi, and Janne Heikkila. A vision-based approach for controlling user interfaces of mobile devices. In *CVPR '05: Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, p. 71. IEEE Computer Society, 2005.
- [5] William T., David B., Paul A., Chris N., Michal, Craig D., William S., Hiroshi, Kazuo, Yasunari, and Ken-ichi. Computer vision for interactive computer graphics. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 18, No. 03, pp. 42–53, 1998.
- [6] S. S. Beauchemin and J. L. Barron. The computation of optical flow. *ACM Comput. Surv.*, Vol. 27, No. 3, pp. 433–466, 1995.
- [7] A. Bruhn, J. Weickert, C. Feddern, T. Kohlberger, and C. Schnorr. Real-time optic flow computation with variational methods. *10th Int. Conf. on Computer Analysis of Images and Patterns (CAIP 2003)*, Vol. 2756, pp. 222–229, 2003.
- [8] J. Weng, N. Ahuja, and T. S. Huang. Optimal motion and structure estimation. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 15, No. 9, pp. 864–884, 1993.
- [9] Stergios I. Roumeliotis, Andrew E. Johnson, and James F. Montgomery. Augmenting inertial navigation with image-based motion estimation. In *Proc. Int'l Conf. Robotics and Automation (ICRA 2002)*, pp. 4326–4333, 2002.
- [10] Andrew E. Johnson and Larry H. Matthies. Precise imagebased motion estimation for autonomous small body exploration. In *Proc. 5th Int'l Symp. On Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, pp. 627–634, 1999.

- [11] Andrew E. Johnson, Yang Cheng, and Larry H. Matthies. Machine vision for autonomous small body navigation. In *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, Vol. 7, pp. 661–671, 2000.
- [12] Jianbo Shi and Carlo Tomasi. Good features to track. In *CVPR '94: Proceedings of the 1994 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 593–600. IEEE Computer Society, 1994.
- [13] Jingtao Wang, Shumin Zhai, and John Canny. Camera phone based motion sensing: interaction techniques, applications and performance study. In *UIST '06: Proceedings of the 19th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 101–110, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [14] B. Furht, J. Greenberg, and R. Westwater. Motion estimation algorithm for video compression. Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 1997.
- [15] P. Kuhn. Algorithms, complexity analysis and vlsi architectures for mpeg-4 motion estimation. Kluwer Academic Publishers.
- [16] Martin A. Fischler and Robert C. Bolles. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Commun. ACM*, Vol. 24, No. 6, pp. 381–395, 1981.
- [17] Richard Hartley and Andrew Zisserman. Multiple view geometry in computer vision. Cambridge University Press, 2000.
- [18] Ramesh Raskar and Paul Beardsley. A self-correcting projector. In *CVPR '01: Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 504–508. IEEE Computer Society, 2001.
- [19] Rahul Sukthankar, Robert G. Stockton, and Matthew D. Mullin. Smarter presentations: Exploiting homography in camera-projector systems. In *Proceedings of International Conference on Computer Vision*, pp. 247–253, 2001.
- [20] Ramesh Raskar, Paul Beardsley, Jeroen van Baar, Yao Wang, Paul Dietz, Johnny Lee, Darren Leigh, and Thomas Willwacher. Rfig lamps: interacting with a self-describing world via photosensing wireless tags and projectors. In *SIGGRAPH '04: ACM SIGGRAPH 2004 Papers*, pp. 406–415, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [21] Paul Beardsley, Jeroen Van Baar, Ramesh Raskar, and Clifton Forlines. Interaction using a handheld projector. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, Vol. 25, No. 1, pp. 39–43, 2005.

- [22] S. Rapp, G. Michelitsch, M. Osen, J. Williams, M. Barbisch, R. Bohan, Z. Valsan, and M. Emele. Spotlight navigation: Interaction with a handheld projector device. *International Conference on Pervasive Computing*, Video paper, 2004.
- [23] Gabor Blasko, Steven Feiner, and Franz Coriand. Exploring interaction with a simulated wrist-worn projection display. In *ISWC '05: Proceedings of the Ninth IEEE International Symposium on Wearable Computers*, pp. 2–9, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.
- [24] Clifton Forlines, Ravin Balakrishnan, Paul Beardsley, Jeroen van Baar, and Ramesh Raskar. Zoom-and-pick: facilitating visual zooming and precision pointing with interactive handheld projectors. In *UIST '05: Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 73–82, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [25] George Fitzmaurice, Azam Khan, Robert Pieké, Bill Buxton, and Gordon Kurtenbach. Tracking menus. In *UIST '03: Proceedings of the 16th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 71–79, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [26] M. Sugimoto, K. Miyahara, H. Inoue, and Y. Tsunesada. Hotaru: Intuitive manipulation techniques for projected displays of mobile devices. *INTERACT 2005*, pp. 57–68, 2005.
- [27] Xiang Cao and Ravin Balakrishnan. Interacting with dynamically defined information spaces using a handheld projector and a pen. In *UIST '06: Proceedings of the 19th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 225–234, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [28] Ramesh Raskar, Jeroen van Baar, Paul Beardsley, Thomas Willwacher, Srinivas Rao, and Clifton Forlines. ilamps: geometrically aware and self-configuring projectors. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 22, No. 3, pp. 809–818, 2003.
- [29] Azam Khan, Justin Matejka, George Fitzmaurice, and Gordon Kurtenbach. Spotlight: directing users’ attention on large displays. In *CHI '05: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 791–798, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [30] Ka-Ping Yee. Peephole displays: pen interaction on spatially aware handheld computers. In *CHI '03: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 1–8, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [31] Michael Tsang, George W. Fitzmaurice, Gordon Kurtenbach, Azam Khan, and Bill Buxton. Boom chameleon: simultaneous capture of 3d viewpoint, voice and gesture annotations on a spatially-aware display. In *UIST '02: Proceedings of the 15th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 111–120, New York, NY, USA, 2002. ACM.

- [32] Jane Hwang, Jaehoon Jung, and Gerard Jounghyun Kim. Hand-held virtual reality: a feasibility study. In *VRST '06: Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pp. 356–363, New York, NY, USA, 2006. ACM.