

壁面型インタラクティブ・サーフェスと 貼付オブジェクトの連携に関する研究

総合情報学研究科
知識情報学専攻

インタラクションデザインの理論と実践

13M7118
濱村 康司

目次

1	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	タンジブル・ユーザ・インターフェース	2
1.3	インタラクティブ・サーフェス	3
1.4	本研究の目的	5
2	関連研究	6
2.1	インタラクティブ・サーフェスに関する研究	6
2.2	実世界オブジェクトを利用したシステムに関する研究	11
2.3	先行システム: Magrid Surface	13
3	提案手法	16
3.1	システムのコンセプト	16
3.2	先行研究の問題点	16
3.3	実世界オブジェクトの利用方法	18
3.4	本研究のアプローチ	19
4	筐体の構成要素に関する実験	20
4.1	サーフェスの構成	20
4.2	赤外光源の構成	23
4.3	赤外線 LED の光量に関する実験	26
4.4	赤外線 LED の照射範囲に関する実験	31
5	オブジェクトの構成要素に関する実験	36
5.1	オブジェクトの認識手法	36
5.2	オブジェクトに用いる素材に関する実験	38
5.3	認識できるマーカーのサイズに関する実験	42
5.4	磁石の吸着力に関する実験	46
6	プロトタイプシステムの実装	49
6.1	ハードウェア構成	49
6.2	ソフトウェア構成	55
7	議論	59
7.1	プロトタイプシステムで可能となったこと	59
7.2	プロトタイプシステムの問題点	59
7.3	今後の展望	60
8	結論	63

1 序論

本章では、本研究の背景として、実世界指向インターフェース、タンジブル・ユーザ・インターフェース、インタラクティブ・サーフェスについて説明し、本研究が目指す課題を明確にする。

1.1 本研究の背景

人間がコンピュータを操作する手段は、文字情報を中心とした CUI (Character User Interface) からウィンドウやアイコンなどのデスクトップメタファを中心とした GUI (Graphical User Interface) へと変化していっている。CUI では、ファイルの移動や削除などの簡単な操作であってもユーザはコマンドを覚える必要があつたり、画像データなどの編集が難しかったりといった問題点が存在していたが、GUI では、WIMP (ウィンドウ、アイコン、メニュー、ポインティングデバイス) を利用することでインターフェースを視認性に優れ、直感的に操作ができるようにして CUI の問題点を解消している。これによってユーザは専門知識が無くても簡単にコンピュータを操作することができるようになった。

しかし、GUI の発達に伴い、従来のヒューマンインターフェースの限界や問題点が浮かび上がるようになってきた。暦本は文献[35]の中で、人間は実世界の中で生活しており、活動の全てが仮想空間で完結しているわけではないので、コンピュータのインターフェースを改善するだけではなく、実世界のインターフェースを改善しなければ本当の意味で人間の生活を楽にすることはできないと問題を提起している。また、ハードウェアの小型化や低価格化によって様々な機器にコンピュータが組み込まれるようになり、日常生活のあらゆる場面でコンピュータと触れる機会が増加した。そのため従来のヒューマンインターフェースを発展させていくだけでは対応が難しいという問題も浮かび上がってきた。

これらの問題に立ち向かうためのアプローチとして、実世界での人間の作業を支援するためのインターフェース、すなわち実世界指向インターフェース (Real World Oriented Interface) の研究が始まり、現在も HCI (Human Computer Interaction) の研究テーマとして活発的に研究がされている。

暦本は文献[35]にて、HCI における実世界と仮想世界の関係を以下の 4 種類に分類している(図 1.1 参照)。

(a) 従来型インターフェース (GUI, CUI)

GUI の場合、ユーザはコンピュータとキーボードやマウスを利用してインタラクションを行う。そのため、ユーザは実世界とも交流しているが、仮想世界のインタラクションと実世界のインタラクションは融合しておらず、2つの間にギャップが発生している。

(b) 仮想現実感 (Virtual Reality)

ユーザはコンピュータの作り出した仮想世界の中だけでインタラクションを行う。そのためユーザは実世界とインタラクションを行うことができない。

(c) 遍在型コンピュータによる実世界指向インターフェース

コンピュータを実世界に偏在させることで、実世界をコンピュータによって強化し、実世界と仮想世界を一体にする。(例: Ubiquitous Computing)

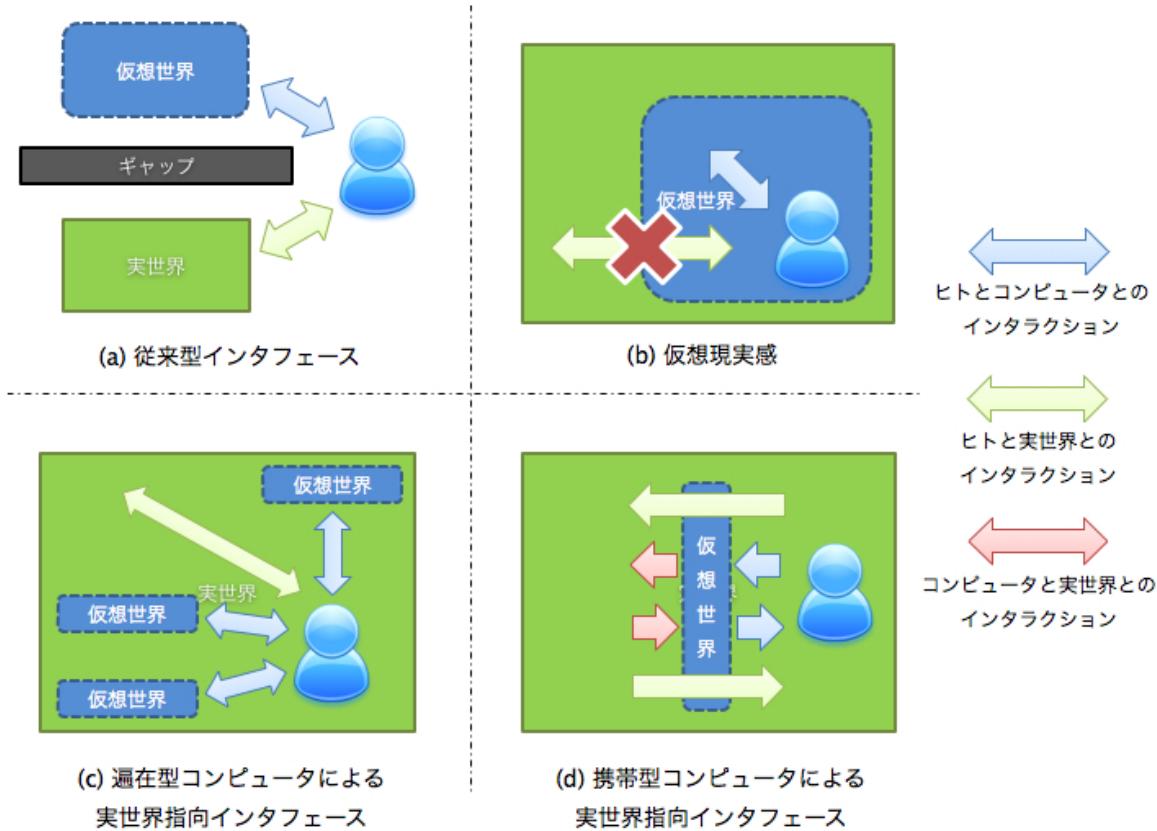


図 1.1: HCI における 4 つのスタイル (文献 [45] より図引用)

(d) 携帯型コンピュータによる実世界指向インターフェース

携帯型コンピュータによってユーザを強化し、実世界とのインタラクションを拡張していく。(例: Augmented Reality)

実世界インターフェースは (c) や (d) のようなアプローチによって仮想世界のインタラクションと実世界のインタラクションを融合させ 2 つの間に存在するギャップを除去することを目標としている。

1.2 タンジブル・ユーザ・インターフェース

実世界インターフェースの中に、情報に物理的実体を与え、直接触れて感知・操作できるようにしたインターフェースであるタンジブル・ユーザ・インターフェース (TUI) が存在する。石井らは、実世界を「メタファ」としてグラフィカルにシミュレートするのではなく、実世界そのものをインターフェースに変えてしまうという目的を持った「タンジブル・ビット」という研究アプローチを提言している [17]¹。

ユーザが情報を操作する際には以下の 2 つのキー・コンポーネントが不可欠である。

¹ ASCII.jp : タンジブル・ビット : ビットとアトムを融合する新しい UI – <http://ascii.jp/elem/000/000/055/55585/> (2015/01/06 確認)

- (1) 人間がその感覚器を用いて知覚可能な情報の外部表現（出力）
- (2) 人間がその手や体を用いて情報を操作可能にするための制御機構（入力）

Smalltalk で提唱されたソフトウェアの設計モデルである、「Model-View-Controller」を拡張して GUI と TUI のモデルを比較したとき、GUI コントロール（入力）のみが「タンジブル」であり、表現（出力）は「インタンジブル」なピクセルやサウンドであるのに対し（図 1.2 参照）、TUI は触れて感知できる「タンジブル」な情報表現を用いることにより表現メディアそのものを直接操作のメカニズムとしても利用することができる特徴を持っている（図 1.3 参照）。さらに、TUI は「インタンジブル」な情報表現と「タンジブル」な情報表現をシームレスに組み合わせることによりダイナミックかつ直接的なインタラクションを可能にしている。

この TUI を実現した例として I/O Brush [36] が挙げられる。I/O Brush は筆型インターフェースの内部にビデオカメラ、光源、タッチセンサなどが組み込まれており、ユーザは実世界にある物体に筆型インターフェースで触れることによって、物体表面の色や動きなどをキャプチャすることができる。そして筆型インターフェースをディスプレイに押し付けることで、画面上に物体の色や動きを使った絵を描画することが可能となっている。

このシステムのように、TUI は実世界に存在するものをデジタル技術で拡張することによって、タンジブルな表現とインタンジブルな表現を融合させ、直接操作性に優れたシステムを実現することに成功している。

1.3 インタラクティブ・サーフェス

実世界指向インターフェースの中でも、実世界に存在する机や壁といった「面」（サーフェス）を用いる「インタラクティブ・サーフェス」に関する研究が近年活発に行われている。インタラクティブ・サーフェスは実世界に存在するサーフェスをコンピュータによって拡張しユーザに対して映像を提示したり（出力）、面そのものに触れたりすることで操作を行ったり（入力）することが可能としている。

インタラクティブ・サーフェスはその形状によって以下の 3 つに分類される。

水平面型サーフェス (Horizontal Type Surface)

テーブルや床など、水平面上に情報を提示する形態のサーフェス

複数人のユーザが同時に利用することでき、同一場・同期的なインタラクションが行なわれる。

壁面型サーフェス (Wall Type Surface)

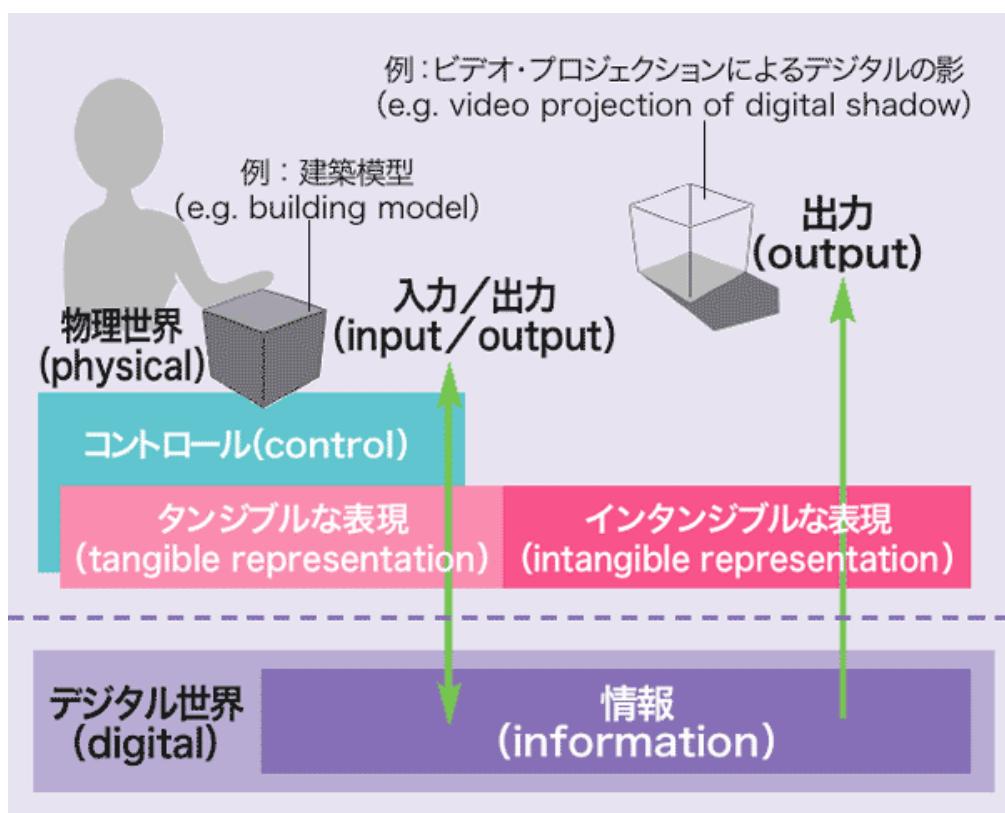
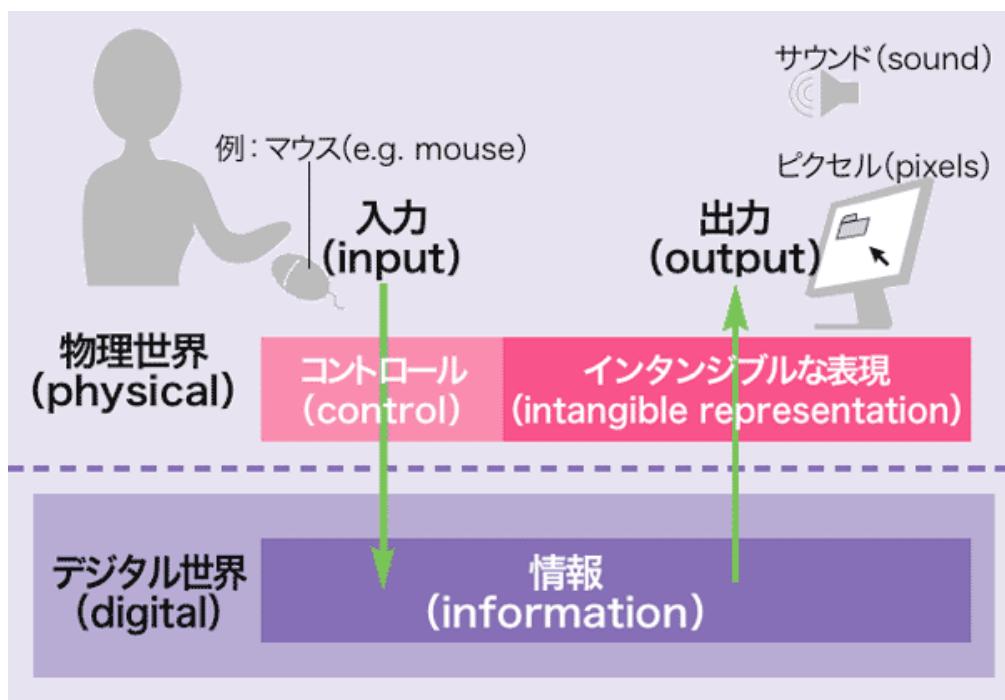
壁など、垂直面上に情報を提示する形態のサーフェス

複数人のユーザが同時に利用するには適しておらず、同一場・非同期なインタラクションが行なわれる。

携帯型サーフェス (Portable Type Surface)

小型でユーザが持ち運んで使用する形態のサーフェス

主に個人で利用するため、複数人のユーザで同時に利用することは少ない。



特に近年では、スマートフォンやタブレット型端末のような携帯型のインタラクティブ・サーフェスが急激に普及しているほか[42]、駅や空港、ショッピングモールのデジタルサイネージや、学校の電子黒板などの壁面型のインタラクティブ・サーフェスも普及しており[33]、インタラクティブ・サーフェスの有用性や利便性は人々に高く認知されるようになっている。

1.4 本研究の目的

掲示板やホワイトボードなどの壁面型サーフェスは情報処理技術の発展した今もなお、形状を大きく変化させることなく情報共有の場として用いられている。壁面型のサーフェスには通常、文字を書き込んだり、メモやポスターを貼付したり、ピンやマグネットなどのオブジェクトを貼付したりといった実世界上のアナログな操作で情報の提示や除去を行っている。

しかし、壁面型サーフェスをデジタル技術で拡張した壁面型のインタラクティブ・サーフェスは、急速に普及していっているものの、操作手段はリモコンやタッチパネルなどが主体で、発生するフィードバックは仮想世界上の画面変化のみであることが大半である。一方で、テーブル型システムをはじめとした水平面型のインタラクティブ・サーフェスではオブジェクトを利用したインタラクションが多く行われており[31][21]、実世界のインタラクションと仮想世界のインタラクションを融合させるアプローチがとられている。

そこで、本研究では壁面型インタラクティブ・サーフェスにおける貼付オブジェクトの利用に着目し、壁面型サーフェスのサーフェスと貼付オブジェクトをデジタル技術によって拡張するアプローチをとる。このアプローチによって実世界のインタラクションと仮想世界のインタラクションを融合させ、新たな連携の形の実現を目指とする。

2 関連研究

近年、サーフェスと実世界オブジェクトを利用した様々なシステムが提案されている。2.1節ではインタラクティブ・サーフェスに関する研究、2.2節では実世界オブジェクトを利用したシステムに関する研究、2.3節では本研究の先行システムである Magrid Surface について纏める。

2.1 インタラクティブ・サーフェスに関する研究

2.1.1 水平型インタラクティブ・サーフェスの関連研究

水平型インタラクティブ・サーフェスにはテーブル型のものが非常に多く、ACM (Association for Computing Machinery) の主催する国際会議 ITS (Interactive Tabletops and Surfaces)¹ では様々なテーブル型インタラクティブ・サーフェスが発表されている。本項では水平型インタラクティブ・サーフェスの中でも、テーブル型かつ実世界オブジェクトを使用したシステムについて纏める。

Lumisight Table[20][31] は、天地問題を解消したテーブル型協調作業支援システムである。従来のテーブル型システムでは、参加者がシステムを囲んだ際、正面にいるユーザにしか適切な情報提示を行うことができず、反対側や左右にいるユーザからは情報の視認性を低下させてしまう問題（天地問題）が発生していた。このシステムでは視界制御フィルムの Lumisty[29] を使用することでユーザと正対する方向からの映像のみを投影し、映像の多重化を実現している。これによって、ユーザの見る方向によって異なる映像を提示することができ、天地問題の解消に成功している。

Tablescape Plus[21] は、テーブル型サーフェスに置いたオブジェクトを入力装置としてだけではなくディスプレイとしても利用できるシステムである（図 2.1 参照）。このシステムは Lumisight Table 同様、Lumisty を使用することで、オブジェクトに特殊なハードウェアを埋め込むことなく、テーブル型ディスプレイ（水平面）と上に置かれたオブジェクト（垂直面）の双方に別々の映像を投影することが可能となっている。

The reacTable[19][18] はタンジブルオブジェクトを利用して音楽の演奏ができるテーブル型システムである（図 2.2 参照）。ユーザはアクリル製のパックを回転させたり、テーブル上をタッチしたりすることで音階や音量などのコントロールができるほか、パックを移動することで複数種類の機能を組み合わせることができるようになっている。また、テーブルやオブジェクトに投影される映像には音の状態や動きが反映されており、直感的かつ簡単な操作で複雑な演奏ができるようになっている。

SLAP Widgets[52] はテーブル型システムのためのタンジブルな周辺装置である（図 2.3 参照）。透明なシリコンとアクリルでできたスライダー、ノブ、キーボードなどを使うことでディスプレイ上のボタンやバーには存在しない触覚フィードバックと従来のオブジェクトでは難しかった動的なグラフィックの付加が可能となっている。これによって実世界のインターフェースの利点と仮想世界のインターフェースの利点を両方利用することに成功している。

SnapRail[12] は、テーブル型システムの上に置かれたオブジェクトのオクルージョンに対処

¹ITS 2014 – <http://its2014.org/> (2015/01/06 確認)

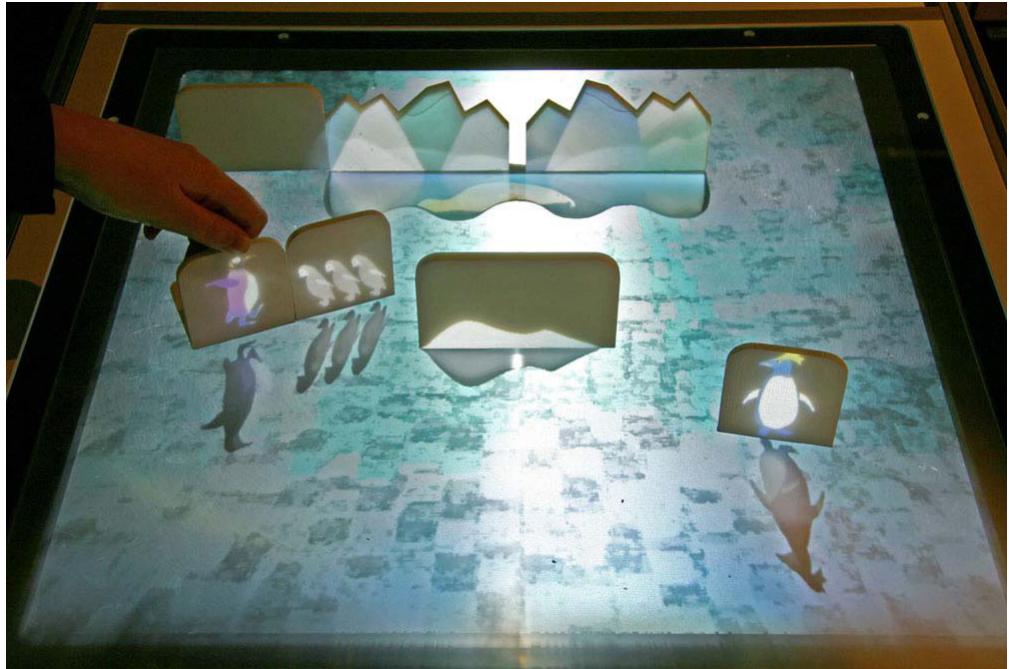


図 2.1: Tablescape Plus (文献 [21] より図引用)

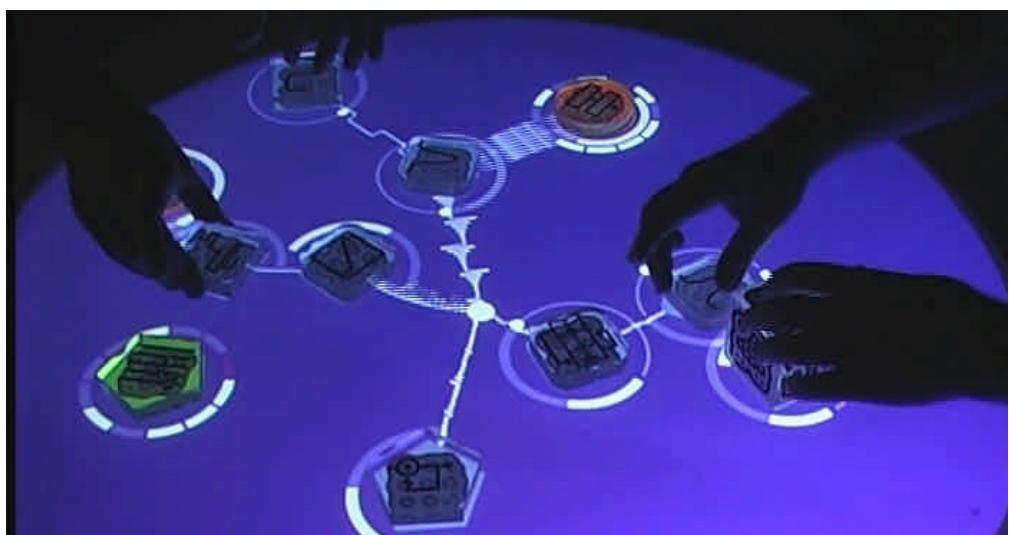


図 2.2: The reacTable (文献 [19] より図引用)



図 2.3: SLAP Widgets (文献 [52] より図引用)

するウィジェットである(図 2.4 参照)。ユーザが通常テーブル型システムの上にオブジェクトを置くと、オブジェクトによって画面が隠れてしまう問題(オクルージョン)が発生する。このシステムではオブジェクトを置いた際、隠れてしまいそうな要素をオブジェクトの周囲にあるリング状のウィジェットに吸着させてしまうことでオクルージョンを回避している。また、各要素のコントロールはオブジェクトを移動したりウィジェットをタッチしたりすることで簡単に行なうことが可能となっている。これによってオクルージョンの回避だけではなく、優れた操作性を実現している。

Augstein ら[10]は、Microsoft PixelSense²向けのテーブル型の神経リハビリテーション向けトレーニングシステムを提案している(図 2.5 参照)。テーブル型コンピュータ(Samsung: SUR40[39])と半透明なアクリルでできたタングラム(正方形を三角形や四角形に切り分けたパズル)オブジェクトを用意し、患者にパズルを解かせることによって脳機能のトレーニングを行っている。オブジェクトの形状によって色を自動で強調するフィードバックを与えており、これによって従来ではできなかつたようなリハビリテーションができるようになっている。

2.1.2 壁面型インタラクティブ・サーフェスの関連研究

壁面型インタラクティブ・サーフェスは、操作の際にサーフェスと正対する必要があることから多人数での同時利用が難しかったり、面が垂直であることからサーフェスと実世界オブジェクトを組み合わせて利用するのが難しかったりといった短所が存在する。一方で、掲示板やテ

²Microsoft®PixelSense™ – <http://www.microsoft.com/en-us/pixelsense/default.aspx>
(2014/12/26 確認)



図 2.4: SnapRail (文献 [12] より図引用)



図 2.5: The Fun.Tast.Tisch. Project (文献 [10] より図引用)

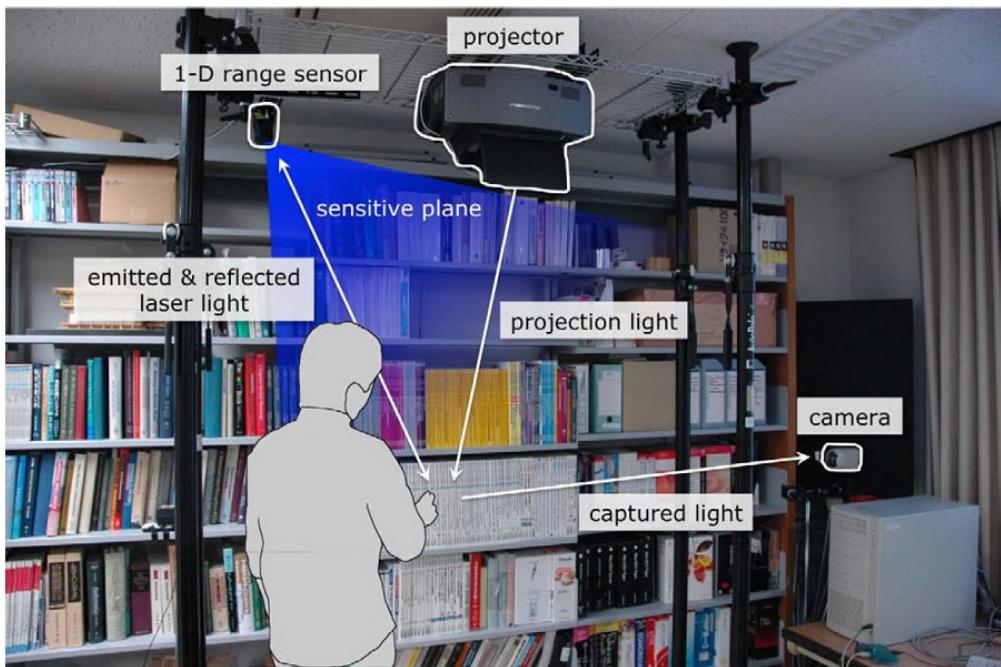


図 2.6: Interactive Bookshelf Surface (文献 [30] より図引用)

レビなど、人間は日常生活において垂直面にある情報を見ることが多いため、システムを利用した際に情報を受け取りやすいという長所も存在する。本項では壁面に情報を投影するインタラクティブ・サーフェスについて纏める。

i-wall[47] は壁を拡張し、ディスプレイとして利用するシステムである。壁の近くの床には RFID タグが埋め込まれており、RFID リーダを組み込んだ靴を履くことでユーザの位置を検出している。ユーザが位置検出範囲に入るとシステムはパーソナル空間に入ったと見なし、壁にウィンドウが表示される。ウィンドウは壁に近づくほど大きくなり、遠ざかると小さくなるようになっているほか、操作インターフェースとして携帯電話を利用し、携帯電話の操作によってウィンドウの位置やサイズをコントロールすることができるようになっている。

Interactive Bookshelf Surface[30] は、本棚をインタラクティブ・サーフェス化したシステムである(図 2.6 参照)。本棚にレンジセンサとカメラを取り付けることで、本棚に触れた位置や出し入れした本の表紙を認識することが可能となっている。これらを利用してすることで、本を探索する際に、本棚の本の背表紙にタッチすると表紙画像が投影する機能(文書探索機能)と本を収納する際に、本棚に本を近づけると収納位置にプロジェクタから光を投影する機能(収納支援機能)を実現している。

Shadow++[38] はオブジェクトを基に人工的な影を作成しインタラクティブな影絵遊びを可能にしたシステムである。このシステムでは紙でできたマーカーの両側を、赤外光を透過し、可視光を遮断する IR フィルタで挟むことで、マーカーがユーザから視認できないオブジェクトを作成している。このオブジェクトに赤外光を照射すると、スクリーンには紙でできたマーカーのパターンのみが影で表示されるため、マーカーの位置をもとに CG を投影するとオブジェクトと異なる形状の影を表示することが可能となっている。

株式会社日立ソリューションズの Starboard[15] は現在既に多くの教育現場で実用されている電子黒板システムである。タッチ操作対応のホワイトボードにプロジェクタから映像を投影するボード型、タッチ操作対応のディスプレイを使って入出力の双方を行うタッチディスプレイ型、既存のデジタルテレビに取り付け、反射ペンを使用して入力を行う後付け型等の様々な形状の物が存在し、2014年3月時点では世界80ヶ国以上、27万台以上も導入されている。

セイコーエプソン株式会社は一つの装置で映像の出力と電子ペンの認識の双方を行うことのできるプロジェクタ一体型の電子黒板を発売している[40]。プロジェクタ一体型にすることで、既存の黒板やホワイトボードなどを投影面として利用できるため、従来の板書と併用することができる他、壁掛けの装置が全ての処理を行うため、生徒が誤って機器を壊してしまったり、汚してしまったりするリスクも少ないという利点を持つ。そのため、今後は多くの教育現場に導入されていくと推測される。

2.1.3 携帯型インタラクティブ・サーフェスの関連研究

携帯型のインタラクティブ・サーフェスは持ち歩いての利用が多く想定されるため、実世界オブジェクトを利用したインタラクションが用いられるることは少ないので現状である。本項では携帯型インタラクティブ・サーフェスのインタラクションに実世界オブジェクトを利用したものについて纏める。

GaussStones[28] は磁石を用いることでタブレットなどの携帯型サーフェスでのマルチタスクなインタラクションを可能にしたシステムである(図2.7参照)。GaussStones は Project Gauss³ の一環で、GaussSense[27] というグリッド状に配置された磁気センサを利用して、通常のタッチセンサであれば、センサとの間に実物体が存在するとオクルージョンが発生し、位置の認識を行うことができないが、磁気センサを利用すれば、センサとの間に実物体があっても位置の認識を行うことが可能である。この特性を活かすことで、GaussSense は携帯可能かつオクルージョンの無いオブジェクト認識も可能なセンサになっている。GaussStones ではオブジェクトとして用いる磁石の周りを亜鉛でシールドすることによって複数の磁石を利用した際に磁石が引き合ったり反発したりしてしまう問題を解消している。

THAW[26] はスマートフォンをオブジェクトとしてしまうことで、コンピュータとシームレスな連携を可能としたシステムである(図2.8参照)。スマートフォンを実世界インターフェースとして利用するだけではなく、コンピュータ画面上の追加画面としても利用することができる。また、コンピュータのディスプレイに表示されたカラーパターン画像をスマートフォンの背面カメラで認識することでマーカーなどの追加ハードウェアなしにコンピュータとスマートフォンを連携させることができている。

2.2 実世界オブジェクトを利用したシステムに関する研究

様々なインタラクティブ・サーフェスにおいて実世界オブジェクトを用いたインタラクションが行なわれていた。本節ではインタラクティブ・サーフェス以外に実世界オブジェクトを利用した研究について纏める。

³Project Gauss: Portable and Occlusion-Free Magnetic Object Tracking Using Analog Hall-Sensor Grid – <http://www.cmlab.csie.ntu.edu.tw/~howieliang/HCIProjects/projectGauss.html> (2014/12/26 確認)



図 2.7: GaussStones (文献 [28] より図引用)



図 2.8: THAW (文献 [26] より図引用)

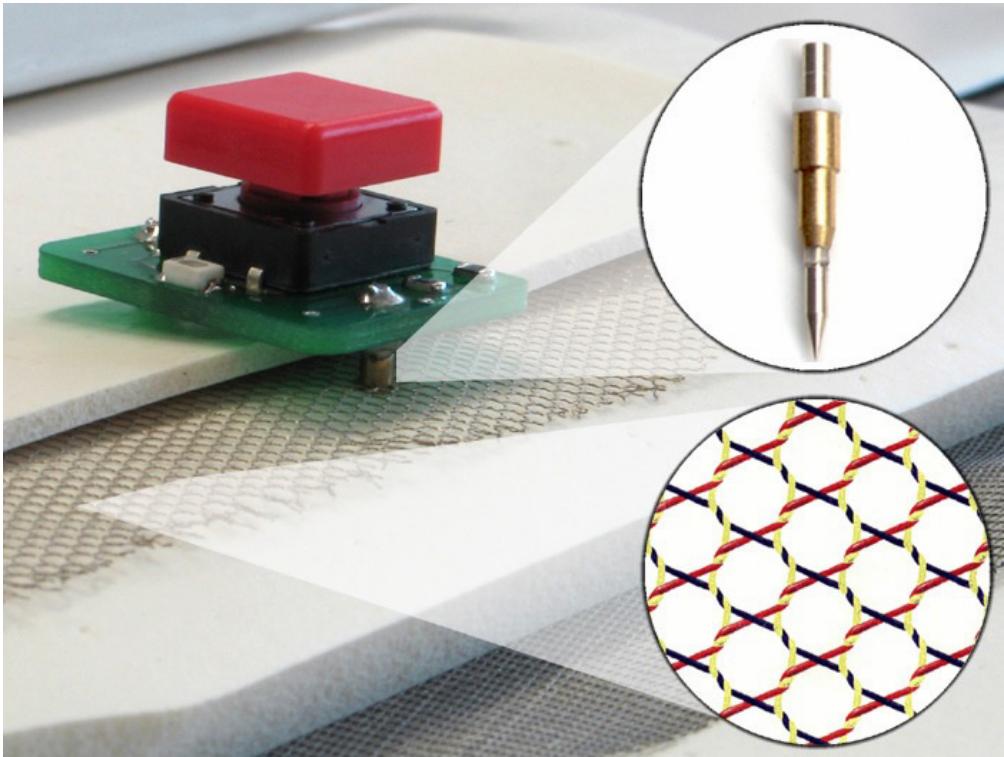


図 2.9: VoodooIO (文献 [50] より図引用)

VoodooIO[50] は ピン型の実世界オブジェクトを利用したインタフェース・ツールキットである (図 2.9 参照)。導電層を埋め込んだ柔軟性のある基盤に、ボタンやスライダーのついたピンを差し込むことで、基盤全体をコントローラとして利用することができるようになっている。

Bloxels[25] はブロック型の実世界オブジェクトを利用した、立体型ディスプレイシステムである (図 2.10 参照)。各ブロックには信号受信用のフォトトランジスタ、信号送信用の赤外線 LED、発色用のフルカラー LED、マイクロコントローラなどが埋め込まれており、ブロック間で通信を行いながら様々な色に発光するようになっている。これによって周辺装置による位置の認識なしに複雑な立体形のディスプレイを簡単に作成することが可能である。

2.3 先行システム: Magrid Surface

田中は文献 [45] にて、磁石の操作によって情報が変化し、アナログ情報とデジタル情報を組み合わせて表示できる壁面型インターフェース・サーフェスを提案している。システムは映像投影用のサーフェスとプロジェクタ、操作用の磁石、オブジェクトの位置検出用の赤外光投光器と赤外線カメラ、処理用のコンピュータから構成されている (図 2.11 参照)。サーフェスに磁性ステンレスでできた金網を使用することで、磁石で紙などを直接貼り付けることが可能なだけではなく、プロジェクタから映像を投影することも可能となっている。また、磁石には再帰性反射材と IR フィルタを取り付けており、サーフェスの裏側の赤外光投光器から赤外光を照射し、反射像を赤外線カメラでキャプチャすることで磁石の位置や種類を認識可能となっている。これによって、投影する映像は磁石によって情報のコントロール (磁石を貼り付けると



図 2.10: Bloxels (文献 [25] より図引用)

情報が提示、移動すれば情報も移動、取り外すと情報が除去) や、情報への選択的アクセスが可能なシステムになっている(図 2.12 参照)。

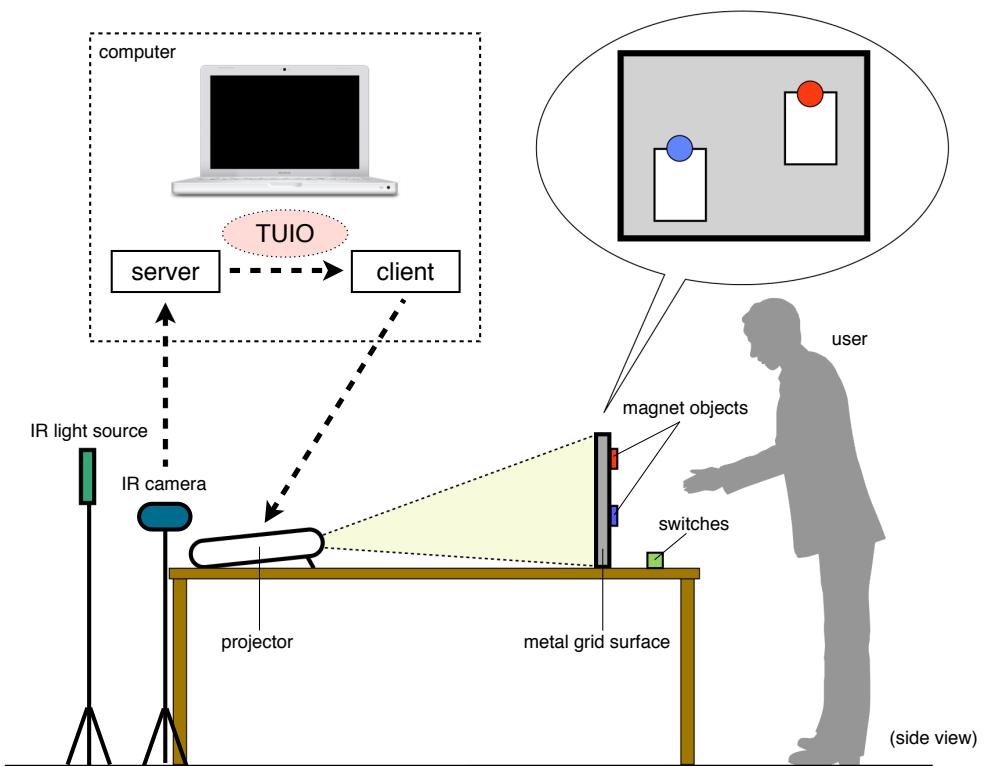


図 2.11: Magrid Surface の構成 (文献 [45] より図引用)

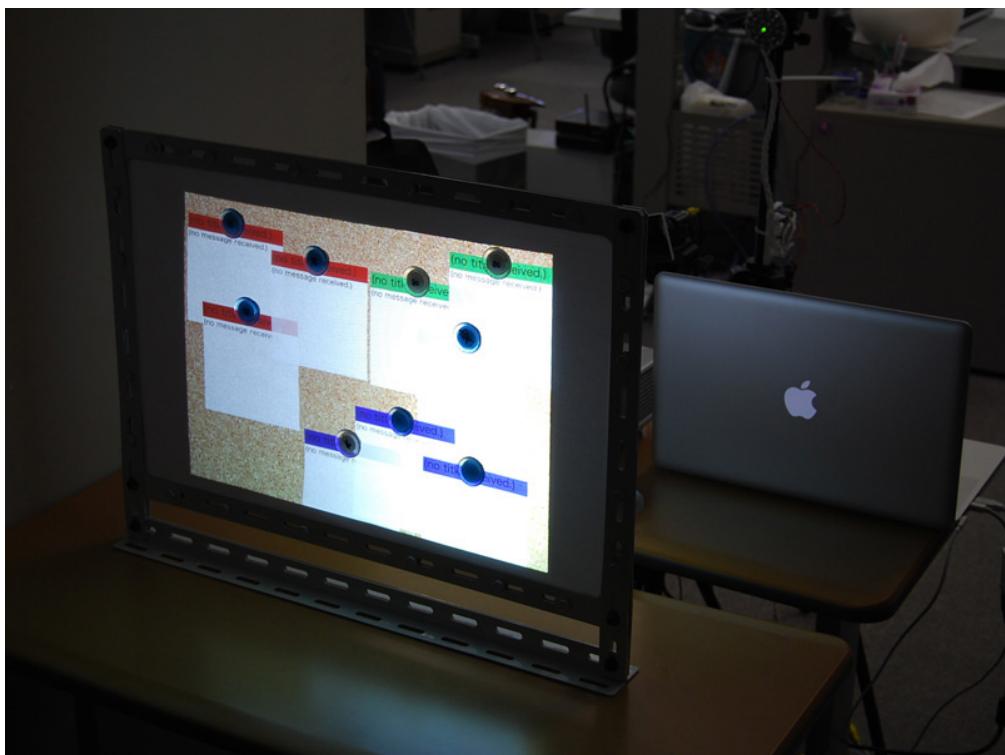


図 2.12: Magrid Surface のシステム動作時風景 (文献 [45] より図引用)

3 提案手法

本章では、先行研究の問題点と、実世界オブジェクトの利用方法について説明した上で本研究のアプローチを明らかにする。

3.1 システムのコンセプト

本研究でも先行研究同様、壁面型インターラクティブ・サーフェスと実世界オブジェクトをデジタル技術で拡張するアプローチをとる。ユーザは実世界オブジェクトを利用し、オブジェクトをサーフェスに貼付するとデジタル情報が提示され、オブジェクトを除去するとデジタル情報が除去される。また、オブジェクトの操作によって提示されるデジタル情報をコントロールすることが可能である。さらに、オブジェクトに磁石を使用することで、デジタル情報のコントロールだけではなく、磁石を使用して紙などのアナログ媒体を貼付することも可能となっている(図3.1参照)。これによって実世界のインターラクションと仮想世界のインターラクションを融合させ、新しい連携の形を提案する。

3.2 先行研究の問題点

先行研究には3つの問題点が存在する。

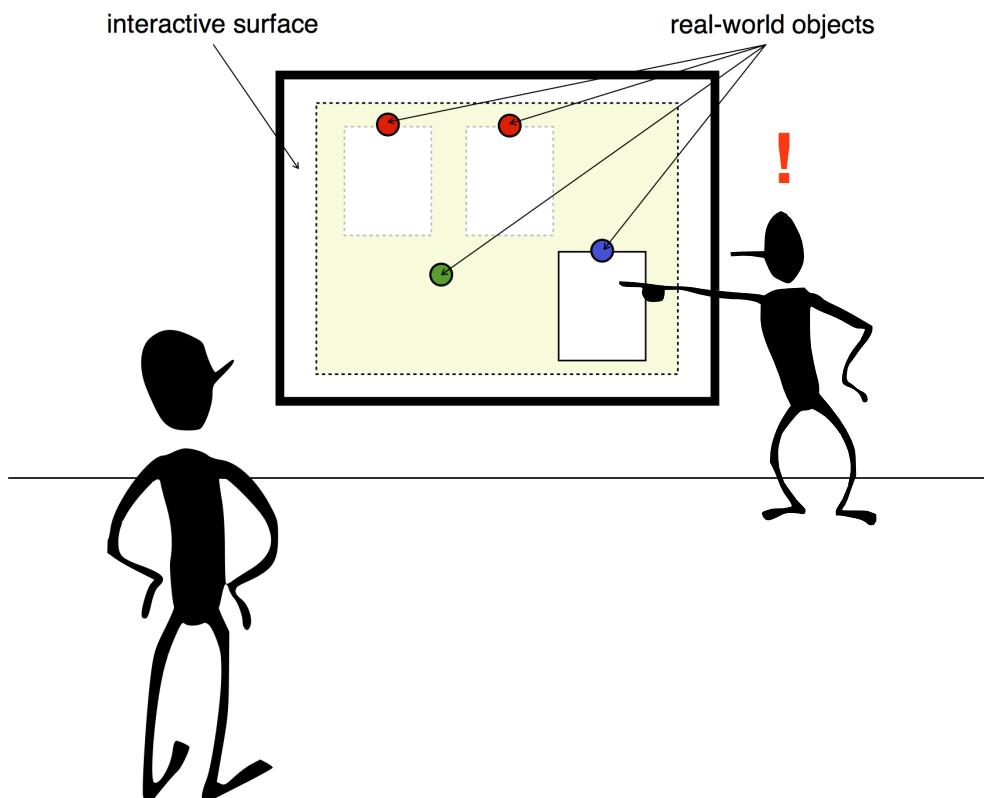


図3.1: システムのコンセプト(文献[45]より図引用)

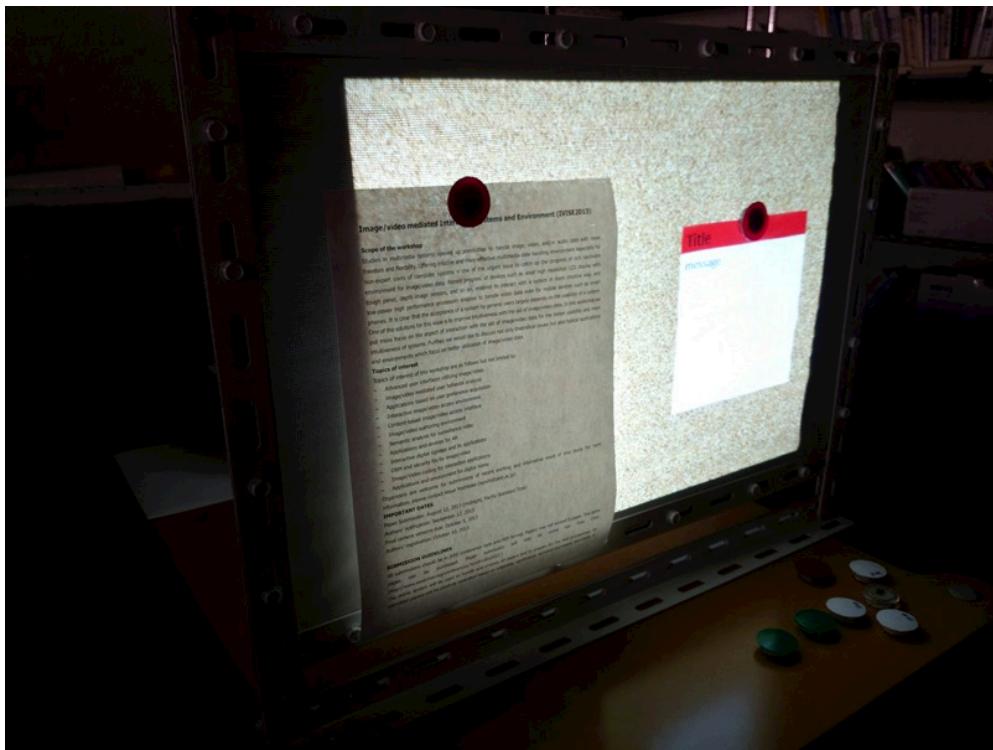


図 3.2: Magrid Surface に紙を貼付した状態 (文献 [14] より図引用)

1つ目にサーフェスへの赤外光の照射方法が挙げられる。先行研究では赤外光源として赤外線 LED を 3 種類、各 10 個組み合わせたものを用意し、サーフェス後方から赤外光を直接照射する方式をとっていたが、LED の指向性の強さから、サーフェス全体に光を照射するのが難しかった。そのため、サーフェスをあまり大型化することができず、紙などと連携させる際に位置的制限が大きいという問題点が存在した(図 3.2 参照)。

2つ目に、オブジェクトの認識手法が挙げられる。先行研究ではマグネットオブジェクトの認識をマルチタッチ認識アプリケーション Community Core Vision¹ (以下 CCV と略す) で行なっていた。CCV を利用することで、サーフェスにあるオブジェクトの位置を認識し、座標データを表示アプリケーションに向けて送信しているが、CCV はマルチタッチ認識用のアプリケーションであることから、パターン認識などの高度な処理をすることができなかった(図 3.3 参照)。そのため、オブジェクトを用いてのインタラクションは提示・除去・移動だけの単純なものとなってしまっているほか、オブジェクトの区別を IR フィルタと、サーフェスに貼付した順番だけで行わなければならぬという問題点が存在した。

3つ目に、提示情報の切り替え方法がサーフェスやオブジェクトとは別に用意したスイッチである点が挙げられる。先行研究では提示情報の切り替えを、照射する赤外光の波長を切り替えることで行っていたが、赤外光の波長を切り替えるためには投光器に取り付けたスイッチを操作する必要があった。そのため、ユーザが提示情報をコントロールするためには「オブジェクトを操作する」と「スイッチを操作する」の全く違った二種類の動作を取らなければならず、

¹CCV - Community Core Vision – <http://ccv.nuigroup.com/> (2014/01/16 確認)

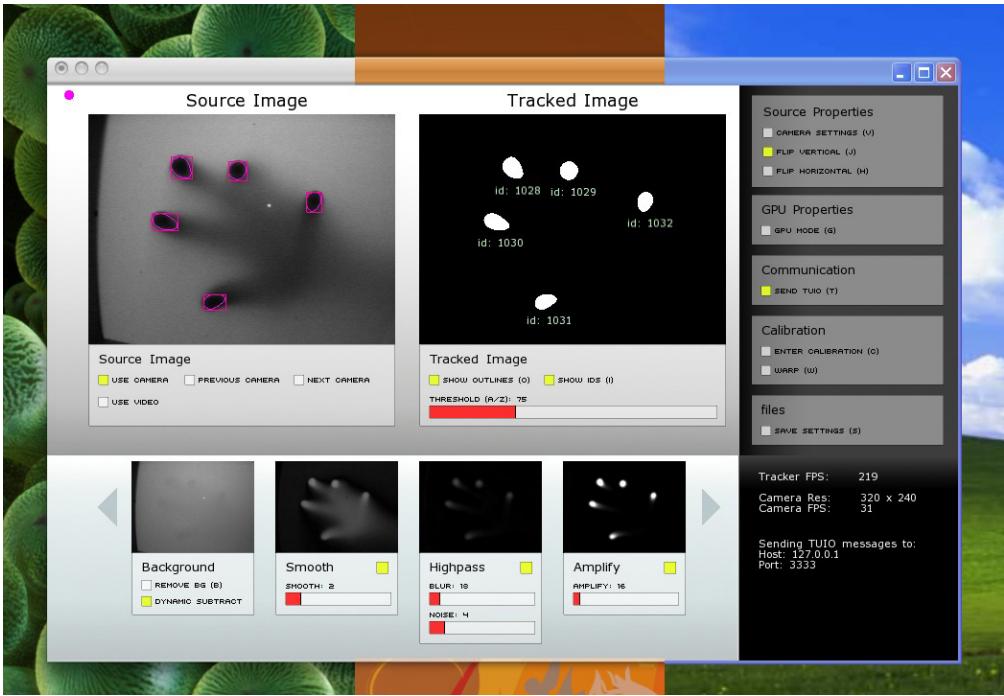


図 3.3: Community Core Vision (脚注 1 より図引用)

自然にインタラクションを取れるとは言い難い状態になってしまっていた。

これらのことから、先行研究はユーザとサーフェスのインタラクションに多くの制限が発生している。そのため、オブジェクトの機能拡張を行い、制限をなくすことができればインタラクションをよりスムーズなものにできると考えられる。

3.3 実世界オブジェクトの利用方法

2章にて述べた多くの先行研究において、ユーザは実世界オブジェクトを利用してシステムとのインタラクションを行っていた。オブジェクトの利用方法はいくつか存在するが、代表的なものを以下に挙げる。

(a) オブジェクトを表示ポイントとして利用する

Magrid Surface[45] のように、オブジェクトの位置に追加情報を表示することで、オブジェクトを情報の表示ポイントとして利用する手法。

(b) オブジェクトをコントローラとして利用する

The reacTable[19] のように、オブジェクトの操作によって情報が変わるコントローラとして利用する手法。

(c) オブジェクトを表示物として利用する

Tablescape Plus[21] のように、オブジェクトにそのものに情報を投影し、表示物として利用する手法。

(d) オブジェクトに機能を持たせて利用する

SLAP Widgets[52] のように、オブジェクトに機能を持たせ、機能性オブジェクトとして利用する手法。

(e) 機能を持ったものをオブジェクトとして利用する

THAW[26] のように、既に機能を持ったもの（スマートフォン等）をオブジェクトとして利用する手法。

本研究ではこのうちの (d) と (e) に着目し、機能を持ったオブジェクトを利用する手法で従来の壁面型インタラクティブ・サーフェスでは存在しなかったような連携の形を探る。

3.4 本研究のアプローチ

本研究では先行研究のシステム構成を踏襲しながら、先行研究の問題点を解消したシステムを実現する。そのために以下のアプローチをとる。

最初に、サーフェスへ赤外光を照射する赤外光源を改良し、大型のサーフェスでも利用可能にする。紙などのアナログ媒体を使用することや、機能を持ったオブジェクトを利用するなどを考慮した場合、先行研究のサーフェスでは位置的制限が多いため、サーフェスの大型化が必要である。そして、サーフェスを大型化するためには、まず先行研究の問題点であった赤外光の照射方法に関する問題を解決する必要がある。

次に、オブジェクトの機能を拡張する。先行研究においては、オブジェクトの認識手法が原因で単純なインタラクションしかできなかったり、情報を切り替える際には別に用意したスイッチを利用しなければならなかつたりといった問題点が存在した。本研究ではこれらの問題に対処するために、オブジェクトに機能を付加するアプローチと、機能性を持ったものをオブジェクトにするアプローチに関する検討を行う。そのため、オブジェクトの認識手法に関する問題の解決と、どの程度の重量、形状のものが貼付オブジェクトとして利用できるか明らかにする。

最後に、表示ソフトウェアの改良を行う。サーフェスやオブジェクトの機能改良を元に表示ソフトウェアを新たに開発する。

本研究ではこれらのアプローチで、壁面型インタラクティブ・サーフェスと貼付オブジェクトの機能や利便性を拡張し、既存のシステムではできなかったような連携が可能となるようなシステムを実現する。

4 筐体の構成要素に関する実験

本章では、実装するプロトタイプシステムの筐体の構成要素に関して、素材の特性を検証する実験を行い、使用するものを決定する。

4.1 サーフェスの構成

本研究においても、先行システムと同様に素材そのものが磁性を持ち、スクリーンの背面から投影ができ、マグネットの位置の認識もできる素材である磁性ステンレス金網をスクリーン素材として使用する。磁性ステンレス金網はメッシュ数（1インチあたりの目の数）やワイヤの線径（線の太さ）によって光の透過率や磁性の強さが異なる。例えば、メッシュ数が小さく、線径が細いものは光を多く通すことができるが、磁石を保持する力が弱くなってしまうし、メッシュ数が大きく、線径が太いものは光をあまり通すことができないが、磁石を保持する力が強くなるという特性を持つ。本研究においては先行研究にて行われた金網の選定実験を考慮し、株式会社くればあの磁性ステンレスメッシュ（金網）¹ のうち、20 メッシュで線径が 0.35 mm のものをスクリーン素材として使用する。

先行システムでは金網を長さ 45 cm のアングル材と長さ 60 cm のアングル材に固定してサーフェスを形成していたが、本研究においては大型化の為に、長さ 60 cm のアングル材と長さ 90 のアングル材と L 字型の金具を使い、金網をボルトで固定することによってサーフェスの大型化と張力の保持を可能とした。

また、先行システムでは金網に赤外光を照射した際の表面反射を回避するため、金網全体にマットグレーの塗料（アサヒペン：クリエイティブカラースプレー 35 ミスティーグレー）を塗布していた。金網単体に赤外光を照射した場合と、金網に塗料を塗布し、赤外光を照射した場合の写真を図 4.1 と図 4.2 に示す。本研究においても赤外光を直接金網に照射するため、同様に塗料をサーフェス全体に塗布した。また、フレームに用いたアングル材はユニクロメッキ処理がされており、フレームから赤外光を表面反射していたためフレーム全体にマットブラックの塗料（アサヒペン：クリエイティブカラースプレー 49 マットブラック）を塗布し、表面反射を防止した。

さらに、先行研究においては金網に映像を投影した際の映像鮮明化のため、トレーシングペーパー（桜井株式会社：スタートレス T808）を貼付していた。金網単体に映像を投影した場合と、金網トレーシングペーパーを貼付し、映像を投影した場合の写真を図 4.3 と図 4.4 に示す。本研究においても同様の映像投影方式を取る為、サーフェス全体に同種のトレーシングペーパーを貼付した。

完成したサーフェスと先行研究のサーフェスを比較した様子を図 4.5 に示す。サーフェスを大型化することによって、金網やトレーシングペーパーの張力を維持できなかったことや、投影時に 1 ドットあたりの面積が増えたことから画像の鮮明さは少し低下してしまったものの、システムとして利用できるサーフェス部分の広さは 2 倍以上に増加させることができた。

¹ 株式会社くればあの磁性ステンレスメッシュ（金網） - <http://www.nippon-clever.co.jp/kanaami/13.html> (2014/12/26 確認)



図 4.1: 金網単体に赤外光を照射した場合 (文献 [45] より図引用)



図 4.2: 金網にマットグレーの塗料を塗布し、赤外光を照射した場合 (文献 [45] より図引用)

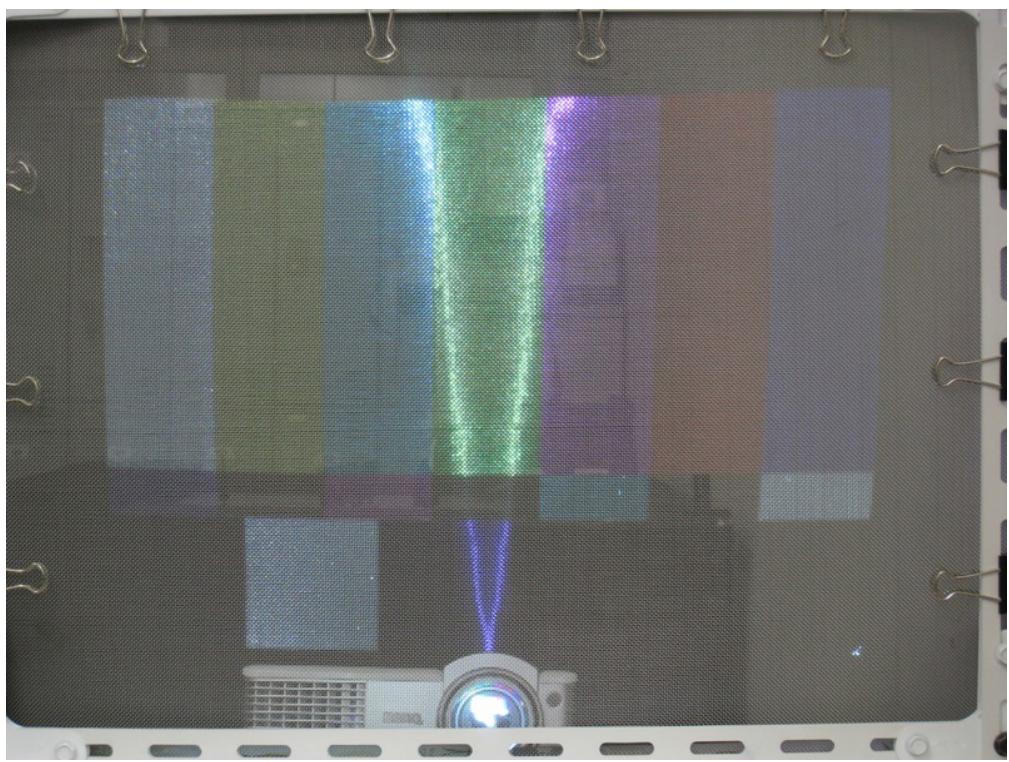


図 4.3: 金網単体に映像を投影した場合 (文献 [45] より改変の上図引用)

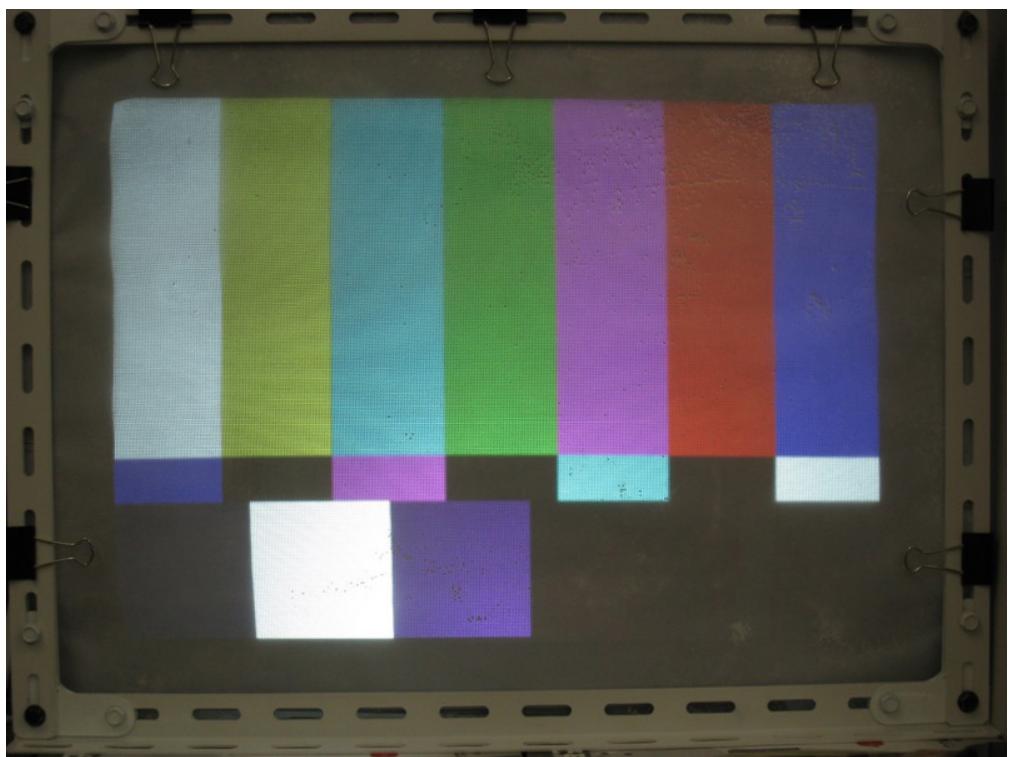


図 4.4: 金網にトレーシングペーパーを貼付し、映像を投影した場合 (文献 [45] より改変の上図引用)



図 4.5: 手前: 先行研究のサーフェス 奥: 本研究のサーフェス

4.2 赤外光源の構成

4.2.1 赤外光の照射方法

赤外光源と赤外カメラを利用してオブジェクトの位置を検出するシステムの多くは赤外光をオブジェクトに直接照射する方法がとられてきた[37][48]。しかし、光源となる赤外線 LED を大型のサーフェスへ照射する際にはサーフェスに万遍なく赤外光を照射するため、赤外線 LED を大量に用意する必要があった。

田中は文献[44]にて看板の間接照明などに用いられる *Plexiglass®Endlighten* [11]を用いた光学特性の検証を行っている。*Endlighten* は面の水平方向から照射された光を垂直方向に拡散させる特性を持っていることから、間接的に赤外光を照射することが可能となっている。

しかし、本研究のような大型のサーフェスに赤外光を間接照射した場合、装置の大型化や、金網を間に挟むことによる認識率の低減がシステムを利用した際の障害となる可能性がある。そのため、本研究では赤外光を直接照射する方法をとったまま、別形状の LED を使用することでサーフェス全体に万遍なく赤外光を照射できないか検討する。

4.2.2 LED の形状

LED の形状として代表的なものに、「砲弾型」と「表面実装(SMD)型」が存在する。

砲弾型 LED はリードフレームと LED チップを一体化させ、周囲をレンズが囲っている(図 4.7 参照)。砲弾型 LED はレンズを使用して集光するため、強い指向性を持たせることができるほか、機械的強度も高いという特色を持っている。これらの特色を活かし、砲弾型 LED は

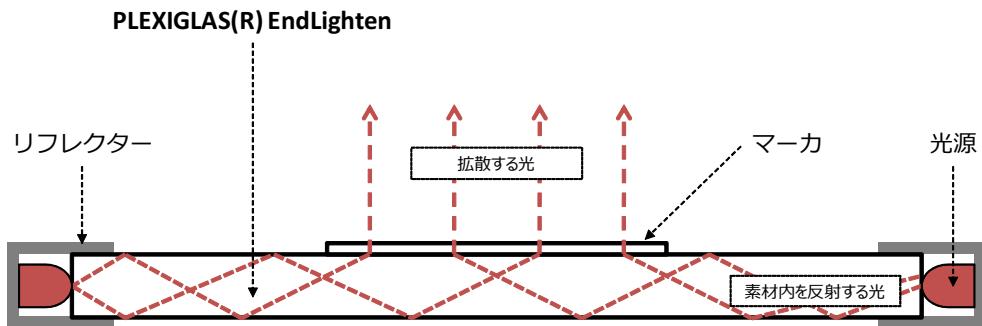


図 4.6: Plexiglass®Endlighten (文献 [44] より引用)

テレビのリモコンや自動車のブレーキランプ、信号機などに用いられているが、指向性の強さから、照明などの面を照らす用途として用いられることは少ない。

表面実装 (SMD) 型 LED は基板上に LED チップを実装し、周囲をテーパー状にすることで反射板として利用している (図 4.8 参照)。表面実装型 LED は反射板を利用することで、より多くの光を取り出すことができるほか、反射板の形状やレンズの取り付けによって様々な状況に対応することができる。そのため、液晶画面のバックライトや LED 電球など、面を照らす用途として多く用いられている。

本システムの赤外光源は、大型のサーフェス全体を万遍なく照らす必要がある。そのため本研究では、面を照らす用途として用いられている表面実装型の赤外線 LED を用意しシステムの赤外光源として利用できるかどうかを実験によって明らかにする。

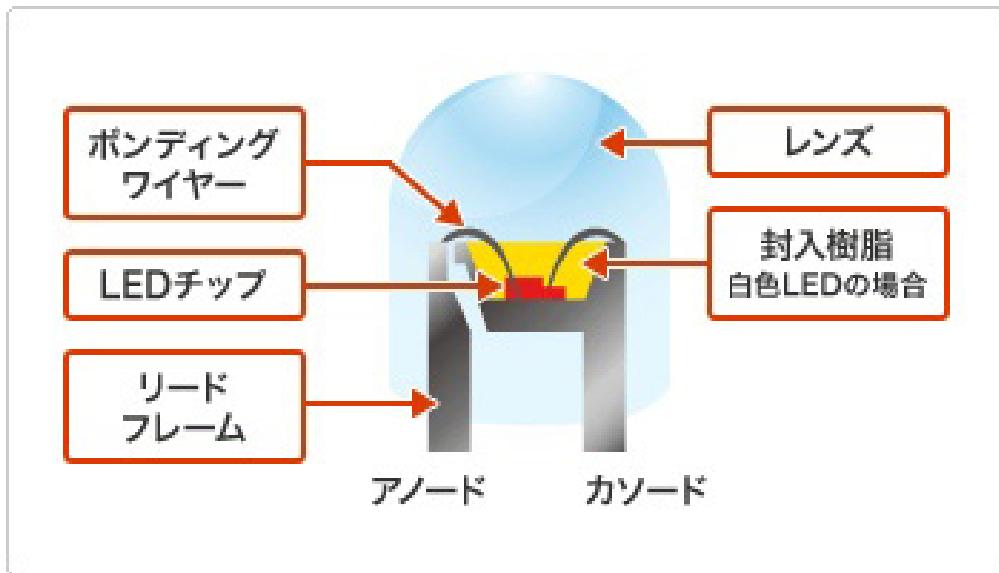


図 4.7: 砲弾型 LED の構造 (文献 [34] より引用)

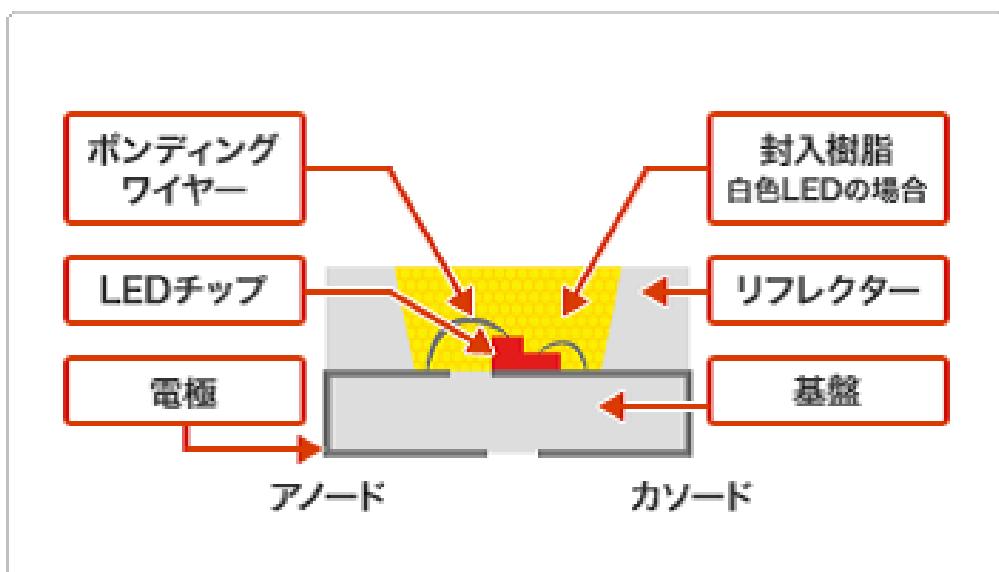


図 4.8: 表面実装型 LED の構造 (文献 [34] より引用)

4.3 赤外線 LED の光量に関する実験

4.3.1 実験目的

先行研究では 7 種類の砲弾型の LED を用意し、それぞれを照射した際の IR フィルタの透過状況を確認した上で、VSF771N、LSF812N1、TLN231(F) の 3 種類を光源の LED として利用していた。本研究では別形状の LED を用いるにあたり、まず各 LED の光量と IR フィルタの透過状況を比較する実験を再度行うことで、表面実装型赤外線 LED をシステムに利用できるか検証する。

4.3.2 実験方法

実験は先行研究同様、複数種類の赤外線 LED と複数種類の IR フィルタを用意し、壁面に固定した IR フィルタの集合にそれぞれの LED を用いて赤外光を照射したものを赤外光に対応したカメラで撮影する方法をとった。

実験を行うにあたって、波長や形状の違う 10 種類の赤外線 LED (表 4.1 参照) を用意した。赤外線 LED 1 個だけでは光量が不足してしまった為、赤外線 LED を 4 個まとめて光源とし、各 LED の電流を統一するために CRD (定電流ダイオード) を使用して、LED に 40 mA が流れるようにした。

IR フィルタには富士フィルム株式会社の紫外線吸収フィルタ (SC フィルター) を 1 種類 (SC-74)² と光吸收・赤外透過フィルター (IR フィルター) を 11 種類 (IR-76～IR-96)³ の計 12 種類を用意した (以降両者を合わせて IR フィルタと記す)。IR フィルタはそれぞれフィルター番号と、遮断できる光の波長が対応している。例えば、IR-76 フィルタは 760 nm 以下の波長光を遮断し、その波長光より長波長側のものは透過する特性を持っている。IR フィルタを

表 4.1: 用意した赤外線 LED

形状	型番	製造者	ピーク発光波長 (nm)	半値角 (degree)
表面実装型	VS706SMT [7]	Alpha-One	700	±55
表面実装型	VS741SMT [8]	Alpha-One	740	±55
砲弾型	VSF771N1 [2]	Alpha-One	770	±12
表面実装型	VS771SMT [9]	Alpha-One	770	±55
砲弾型	LSF812N1 [1]	Alpha-One	810	±10
表面実装型	LS812SMT [3]	Alpha-One	810	±55
表面実装型	LS856SMT [4]	Alpha-One	850	±55
砲弾型	TLN231(F) [49]	Toshiba	870	±16
表面実装型	LS876SMT [5]	Alpha-One	870	±55
表面実装型	LS944SMT [6]	Alpha-One	940	±55

²富士フィルム: SC フィルター – <http://fujifilm.jp/personal/filmandcamera/sheetfilter/sc.html> (2015/01/16 確認)

³富士フィルム: IR フィルター – <http://fujifilm.jp/personal/filmandcamera/sheetfilter/ir.html> (2015/01/16 確認)

再帰性反射材の上に固定することで、フィルタを透過する波長の赤外光が照射されたときには反射光を確認することができるようになっている。

撮影するカメラには高感度の白黒 CCD カメラ (Watec: WAT-902H ULTIMATE) に赤外領域が撮影できるレンズ (TAMRON: 12VM412ASIR) を取り付けたものを使用した。また、レンズの先端には SC-74 フィルタをかぶせ、可視光の影響を軽減させている。カメラの映像は USB キャプチャユニット (mathey: MVCP-02MAC) と、付属のキャプチャソフト (EzCAP) を使用し、キャプチャを行った。

4.3.3 実験結果と考察

実験結果を図 4.9～図 4.19 に示す。

赤外光線未照射時と、ピーク発光波長が 700 nm の赤外線を照射した場合は、すべてのフィルタが黒く表示されていることが確認できる (図 4.9, 図 4.10 参照)。これはカメラのレンズに取り付けた SC-74 フィルタが 740nm 以下の波長光を遮断していることが原因であると推察される。

ピーク発光波長が 740 nm の赤外線を照射した場合は、前者の 2 つと比較し、画面全体が明るくなっていることが確認できる (図 4.11 参照)。これはカメラのレンズに取り付けた SC-74 フィルタが遮断できない光が多く照射されるようになったことが原因であると推察される。また、同じ要因から、壁に貼り付けた方の SC-74 フィルタも透けて見えるようになっている。

ピーク発光波長が 770 nm の赤外線を照射した場合は、どちらも IR-78 以降のフィルタが黒く表示されており、IR-76 フィルタは若干透けて見える状態が確認できる (図 4.12, 図 4.13 参照)。同様に、ピーク発光波長が 810 nm の赤外線を照射した場合は IR-82 以降のフィルタ (図 4.14, 図 4.15 参照)、ピーク発光波長が 850 nm の赤外線を照射した場合は IR-86 以降のフィルタ (図 4.16 参照)、ピーク発光波長が 870 nm の赤外線を照射した場合は IR-88 以降のフィルタ (図 4.17, 図 4.18 参照) が同様に黒く表示されており、それらより番数が 1～2 個小さい IR フィルタは若干透けて見える状態が確認できる。番数が 1～2 個小さい IR フィルタが若干透けて見える原因は、赤外線 LED から照射される赤外光の波長が単独ではなく、ピーク波長以外の波長成分も含んでいることが原因であると推察される。

一方で、ピーク発光波長が 940 nm の赤外線を照射した場合に、IR-88～IR-92 フィルタの透過状況があまり良くないことが確認できた (図 4.19 参照)。これは 940 nm の赤外線 LED の放射電力 (Radiated Power) が他のものと比べて低くなっていることが原因であると推察される。

また、それぞれピーク発光波長の同じ砲弾型赤外線 LED と表面実装型赤外線 LED を比較した際、IR フィルタの透過状況、中心部の光量ともに大きな差は存在しないことが確認できた。

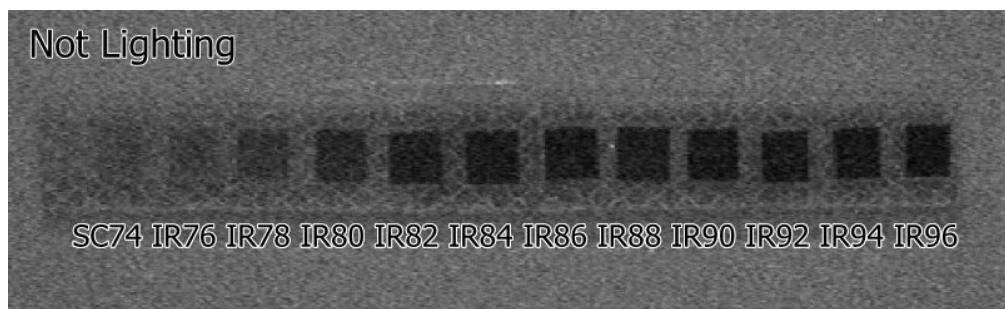


図 4.9: 赤外光線未照射時の IR フィルタ

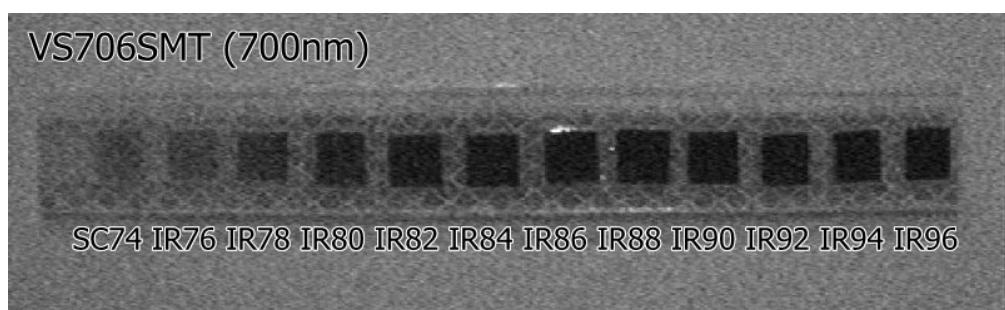


図 4.10: VS706SMT (表面実装型, 700nm) 照射時の IR フィルタ

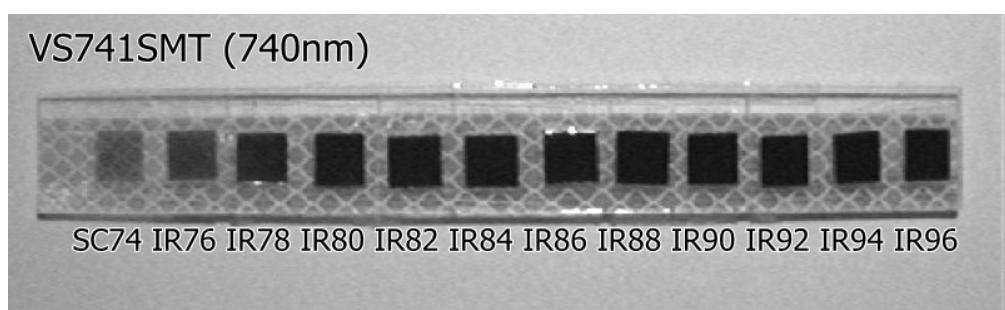


図 4.11: VS741SMT (表面実装型, 740nm) 照射時の IR フィルタ

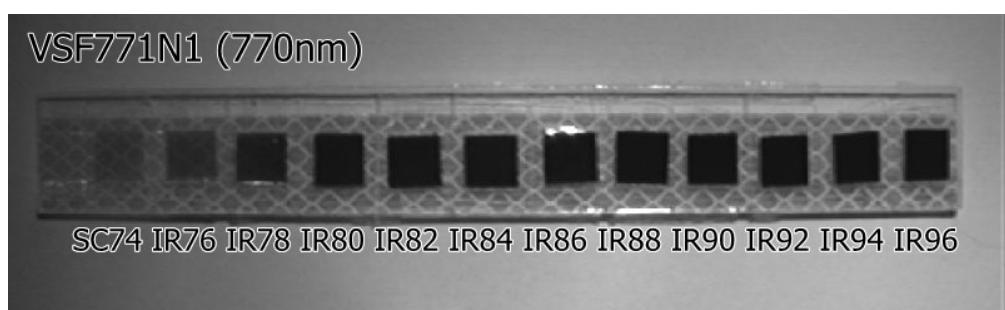


図 4.12: VSF771N1 (砲弾型, 770nm) 照射時の IR フィルタ

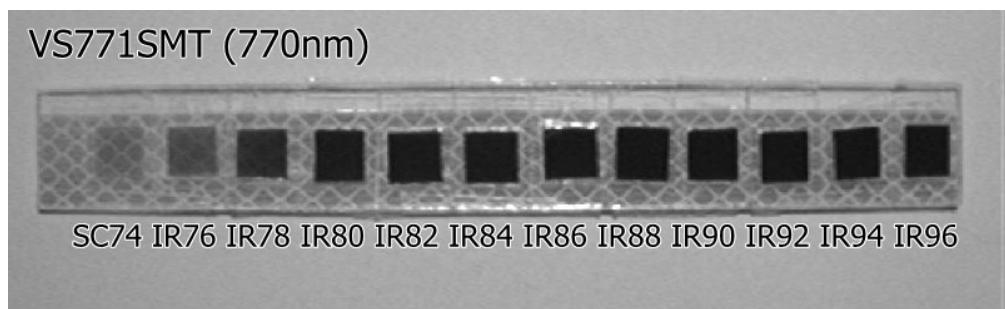


図 4.13: VS771SMT (表面実装型, 770nm) 照射時の IR フィルタ

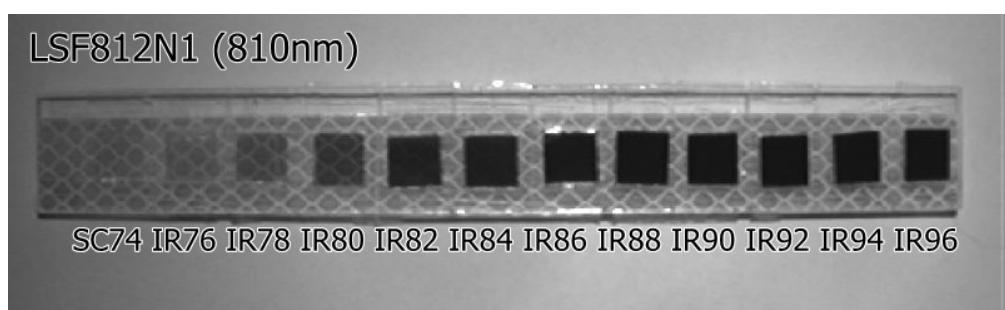


図 4.14: LSF812N1 (砲弾型, 810nm) 照射時の IR フィルタ

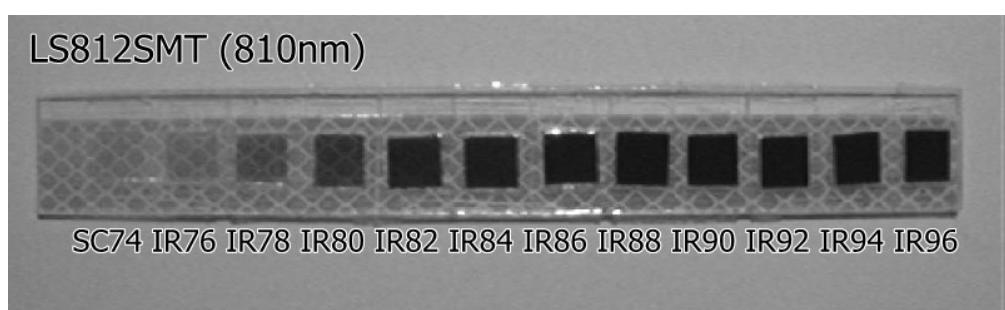


図 4.15: LS812SMT (表面実装型, 810nm) 照射時の IR フィルタ

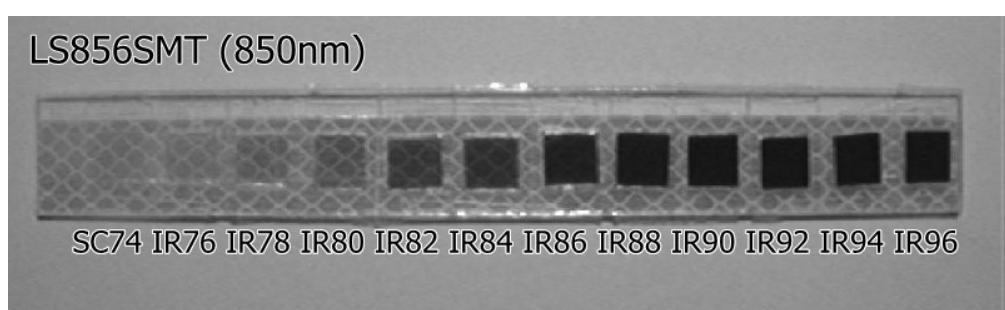


図 4.16: LS856SMT (表面実装型, 850nm) 照射時の IR フィルタ



図 4.17: TLN231(F) (砲弾型, 870nm) 照射時の IR フィルタ

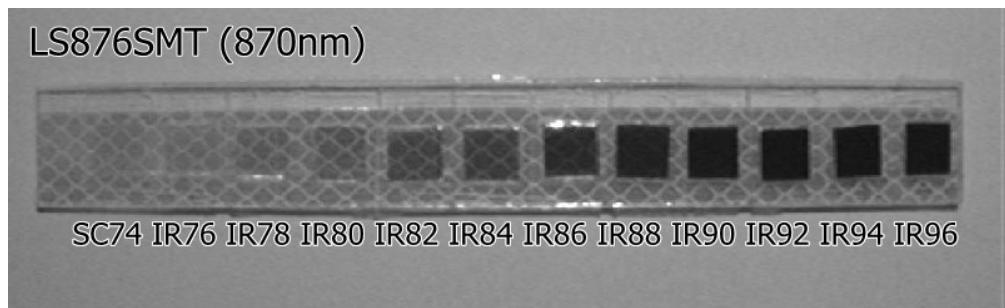


図 4.18: LS876SMT (表面実装型, 870nm) 照射時の IR フィルタ

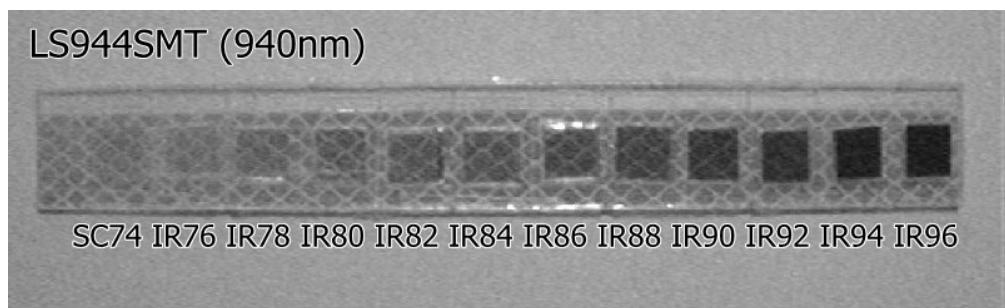


図 4.19: LS944SMT (表面実装型, 940nm) 照射時の IR フィルタ

4.4 赤外線 LED の照射範囲に関する実験

4.4.1 実験目的

先行研究においては砲弾型赤外線 LED の指向性の強さからサーフェス全体に赤外光を照射するのが難しいという問題点が存在した。この実験では、砲弾型と比較して指向性の弱い表面実装型赤外線 LED を照射した時の照射範囲を明らかにすることで、表面実装型赤外線 LED をシステムに利用できるか検証する。

4.4.2 実験方法

実験は複数種類の赤外線 LED と A3 サイズ (420mm × 297mm) の方眼紙を用意し、壁面に固定した方眼紙に向けてそれぞれの LED を用いて赤外光を照射したものと赤外光に対応したカメラで撮影する方法をとった。

LED には先行システムで利用した砲弾型赤外線 LED 3 種類と、それと同じ波長を持つ表面実装型赤外線 LED 3 種類を用意した（表 4.2 参照）。赤外線 LED 1 個だけでは光量が不足してしまったため、赤外線 LED を 3 個使用し、光が各方向均等に拡散するように正三角形状に配置した。また、各 LED の電流を統一するために CRD を使用して、LED に 40 mA が流れるようにした。各 LED 群は方眼紙の中心から 30 cm の距離を取り、カメラで撮影する際の障害にならないよう、画面下側から斜めに照射するように設置した。撮影は 4.3 節の実験と同様の機材、ソフトウェアを用いて行った。

4.4.3 実験結果と考察

実験結果を図 4.20 ~ 図 4.26 に示す。

ピーク発光波長が 770 nm、810 nm、870 nm、全ての条件において砲弾型赤外線 LED 使用時にはスポットライト状に光が照射されており、方眼紙の端の方まで光が照射できていなかったのが、表面実装型赤外線 LED を使用することで方眼紙全体に光を照射することができるようになっていることが確認できる。

また、砲弾型赤外線 LED はメーカーによって半値角が違つておらず、照射範囲に差が発生していたが、表面実装型 LED にはピーク発光波長が違つても半値角に違いは無く、照射範囲にも差は見受けられなかつた。

表 4.2: 用意した赤外線 LED

形状	型番	製造者	ピーク発光波長 (nm)	半値角 (degree)
砲弾型	VSF771N1 [2]	Alpha-One	770	±12
砲弾型	LSF812N1 [1]	Alpha-One	810	±10
砲弾型	TLN231(F) [49]	Toshiba	870	±16
表面実装型	VS771SMT [9]	Alpha-One	770	±55
表面実装型	LS812SMT [3]	Alpha-One	810	±55
表面実装型	LS876SMT [5]	Alpha-One	870	±55

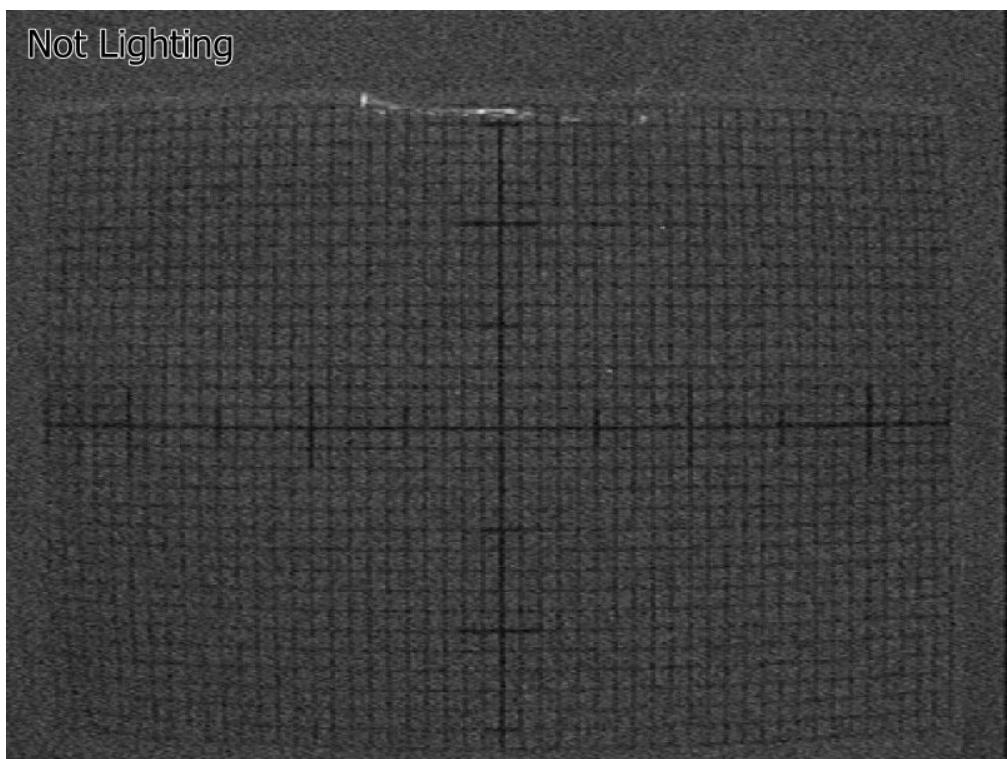


図 4.20: 赤外光線未照射時の方眼紙

これらのことから、広い照射範囲を持ち、ピーク発光波長の違いによる照射範囲の違いも無い表面実装型赤外線 LED は本研究のシステムにとって非常に有用であることが確認できた。

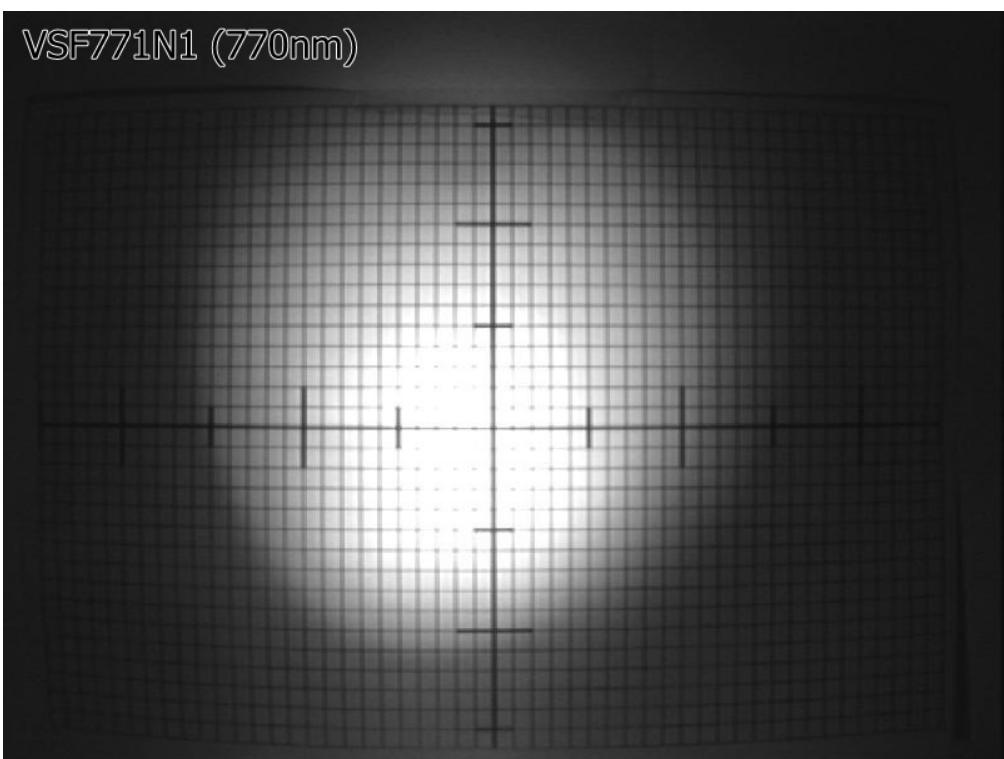


図 4.21: VSF771N1 (砲弾型, 770nm) 照射時の方眼紙

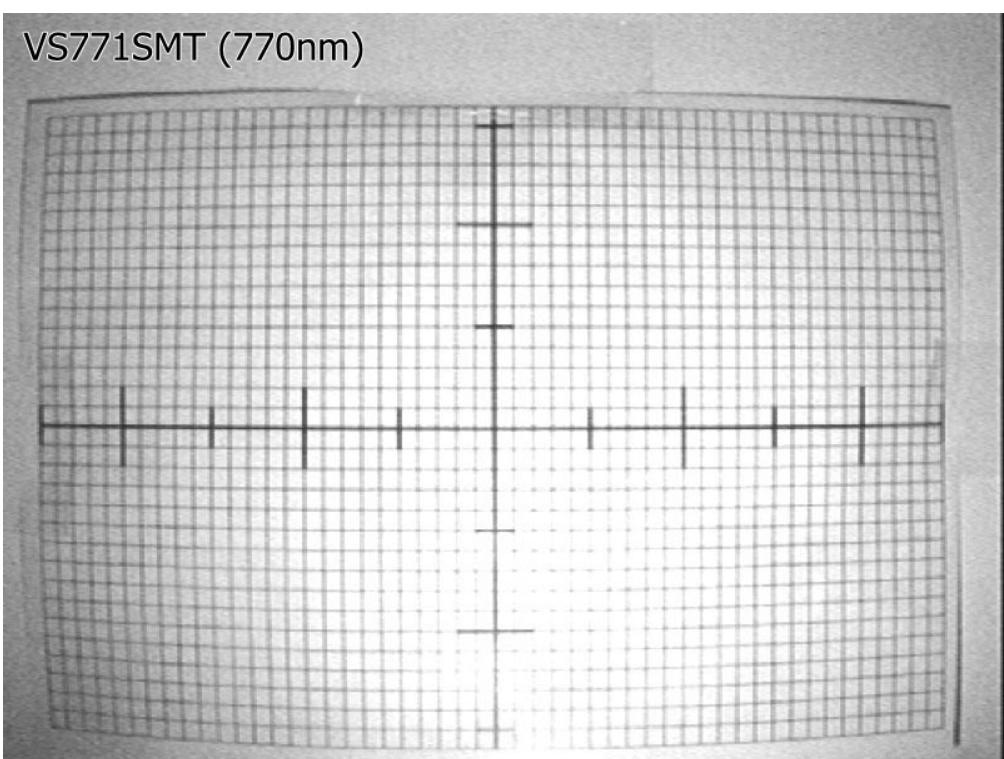


図 4.22: VS771SMT (表面実装型, 770nm) 照射時の方眼紙

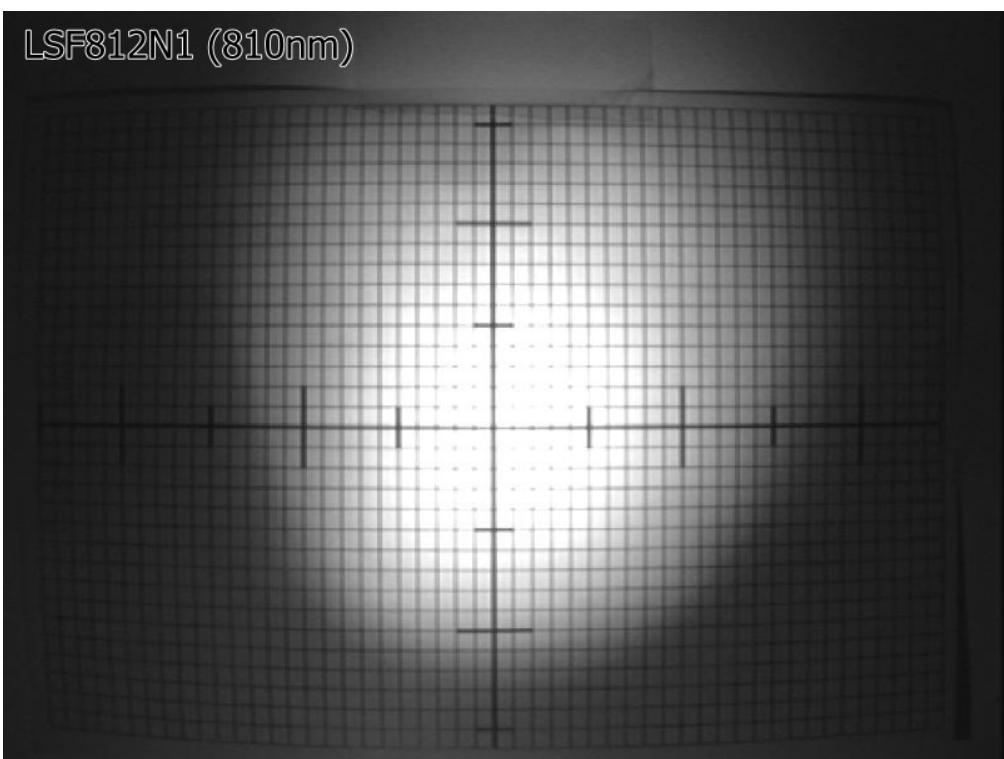


図 4.23: LSF812N1 (砲弾型, 810nm) 照射時の方眼紙

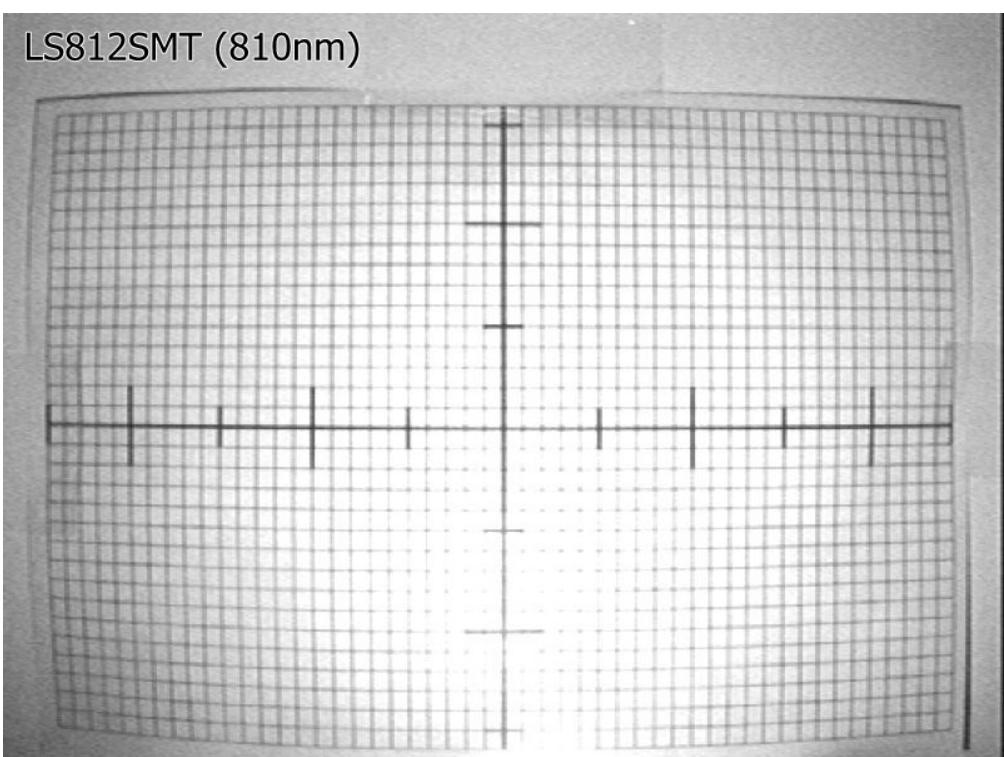


図 4.24: LS812SMT (表面実装型, 810nm) 照射時の方眼紙

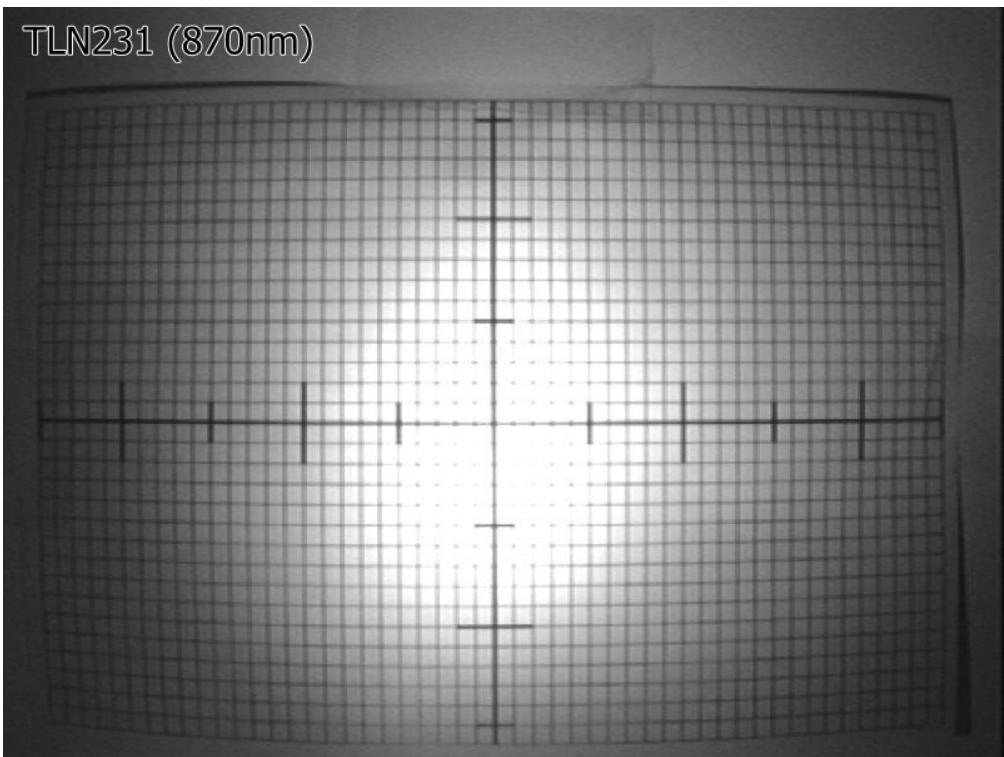


図 4.25: TLN231(F) (砲弾型, 870nm) 照射時の方眼紙

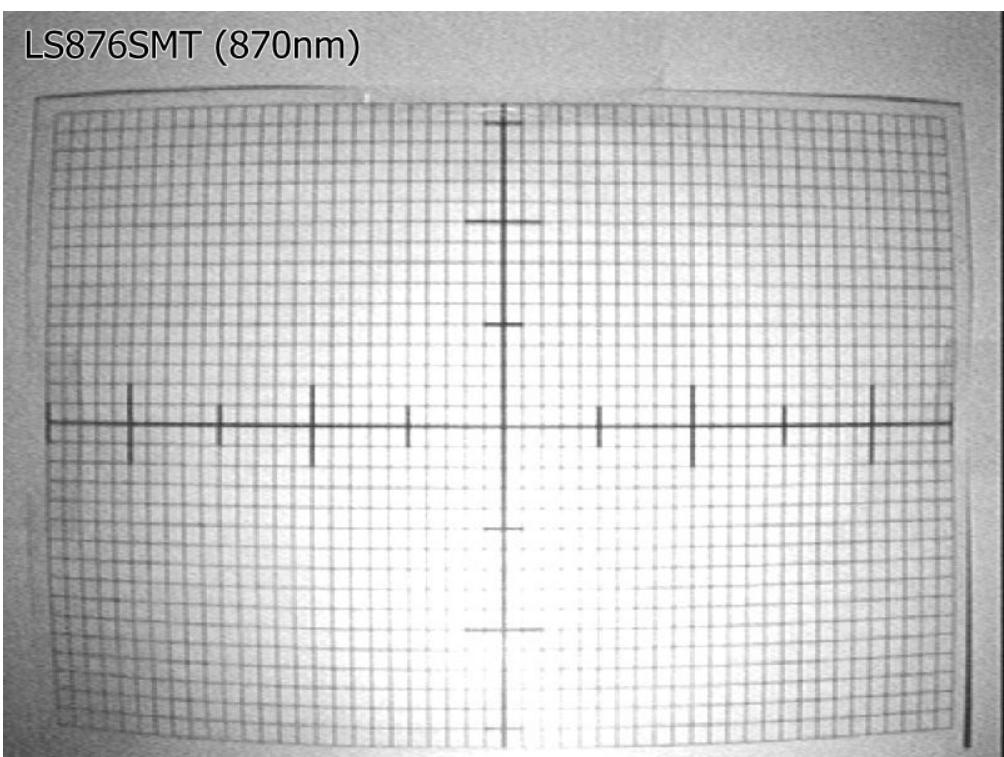


図 4.26: LS876SMT (表面実装型, 870nm) 照射時の方眼紙

5 オブジェクトの構成要素に関する実験

本章では、実装するプロトタイプシステムのオブジェクトの構成要素に関して、素材の特性や認識精度を検証する実験を行い、使用するものを決定する。

5.1 オブジェクトの認識手法

本研究においても先行研究同様、オブジェクトの背面に反射材を取り付け、サーフェスの裏側の赤外光投光器から赤外光を照射し、反射像を赤外線カメラでキャプチャすることでオブジェクトの位置をキャプチャする方式をとる。先行研究においては、マルチタッチ認識アプリケーションのCCVを利用してオブジェクトの認識を行っていたが、CCVではパターン認識などの高度な処理をすることができず、オブジェクトを用いてのインタラクションに大きな制限が存在した。この問題に対処するために、オブジェクトの認識手法の改良を試みた。

オブジェクトを認識するアプリケーションの開発は全てXcode(4.5.2)とopenFrameworks(0.8.3)¹を使用して行った。openFrameworksは「C++」というプログラミング言語のライブラリの集合体で、インタラクティブなコンテンツやメディアアートを制作することに特化したフレームワークである[43]。C++をベースにすることで、コンピュータのハードウェアに近い部分での処理を記述することが可能となっており、コンピュータの性能を最大限に発揮できるようになっている。また、openFrameworksはC++の様々なオープンソースのライブラリを利用することが可能で、拡張性に優れている。そのため、本研究におけるアプリケーションの開発環境としてopenFrameworksを使用することとした。

5.1.1 テンプレートマッチングを利用した認識手法

テンプレートマッチングとは、事前に用意したテンプレート画像と類似したものがソース画像に存在するかどうかを調べる手法である。画像処理、認識用ライブラリのOpenCV(Intel Open Source Computer Vision Library)²ではcvMatchTemplate関数を使用すると、ソース画像上でテンプレート画像のパッチをスライドさせ、様々なマッチング手法（二乗差分マッチング、相関マッチング、相関係数マッチング等）を使って、テンプレート画像が存在することを示す類似度の高い場所を探索することができる[13]。実際にサーフェス上に貼付したオブジェクトをテンプレートマッチング（相関係数マッチング）を利用してオブジェクトの認識を行った様子を図5.1に示す。

テンプレートマッチングを利用してオブジェクトの位置を認識することは可能であったが、問題点も浮かび上がった。1つ目に、認識の精度が挙げられる。図5.1のアプリケーションでは、アプリケーション上のオブジェクト画像をキャプチャすることでテンプレート画像を用意していたが、明るさの変動に弱く、オブジェクトがキャプチャ時の位置から大きく動いた際には認識できなくなってしまうことがあった。2つ目に、計算コストの高さが挙げられる。特に相関係数マッチングを利用した場合、探索に多くの計算を必要とすることからテンプレート画像が1つだけであってもFPS(Frames Per Second)が低下してしまうことがあった。そのため、複数種類のオブジェクト認識を行う際には処理スピードを維持できない可能性が存在

¹openFrameworks - <http://www.openframeworks.cc/> (2015/01/23確認)

²OpenCV - <http://opencv.org/> (2015/01/23確認)



図 5.1: テンプレートマッチングによるオブジェクト認識

する。

5.1.2 マーカーを利用した認識手法

マーカー（目印）を利用した認識手法は、実世界上にあるオブジェクトの位置を認識するための手法として様々な場所で利用されている。マーカーのパターンをデータ化したパターンファイルを事前に用意する必要こそあるものの、テンプレートマッチングよりも高速かつ高精度なオブジェクト認識が可能である。マーカー認識を行うツールとして代表なものを以下に挙げる。

ARToolKit[24] は画像処理に基づく拡張現実構築ツールである。識別用のパターンが描かれた正方形のマーカーをカメラで読み取り、マーカーの位置をもとに 3 次元オブジェクトを表示することで、現実世界の画像に仮想世界の物体を重ねて表示することが可能である。ARToolKit には Java や Android で利用できる NyARToolkit³ や、複数のマーカー認識に対応しながらシンプルかつ高速なものにした ARToolKitPlus[51]⁴ などの様々な派生版が存在する。本研究で開発環境として利用する openFrameworks では ARToolKitPlus が ofxARToolkitPlus ライブラリとして用意されており、ライブラリを利用してマーカー認識を利用したアプリケーションを簡単に開発することが可能である。

reacTIVision[22]⁵ はテーブル型システムでタンジブルなインタラクションを実現するためのツールである。reacTIVision は専用のマーカーとアプリケーションを使用しており、認識結

³NyARToolkit project – <http://nyatla.jp/nyartoolkit/wp/> (2015/01/23 確認)

⁴ARToolKitPlus – http://studierstube.icg.tugraz.at/handheld_ar/artoolkitplus.php (2015/01/23 確認)

⁵reacTIVision – <http://reactivision.sourceforge.net/> (2015/01/23 確認)

果は TUIO[23]⁶ プロトコルを使用して送信される。TUIO プロトコルは、タンジブルなマルチタッチサーフェスのための情報を送受信するのに特化した通信プロトコルで、C++ や Java など、様々な環境で利用することが可能である。

これら 2 種類のマーカー認識ツールを比較したところ、複雑な形状のマーカーパターンを使用する reacTIVision の方が高い認識率を示したもの、IR フィルタや紙を使ってマーカーを作成する際に、マーカーパターンの複雑さが障害となる可能性があったため(図 5.2, 図 5.3 参照)、本研究では ARToolKitPlus をマーカー認識ツールとして用いる。

5.2 オブジェクトに用いる素材に関する実験

5.2.1 実験目的

本研究のシステムでオブジェクトの位置や状態を赤外線カメラで検出、認識するためには、赤外光を反射する素材と、マーカーパターン状に赤外光を吸収する素材が必要である。そこで、実際にサーフェスで利用するオブジェクトを設計するにあたって、どのような反射材とマーカーパターンを構成する素材を使用すれば認識率が高くなるのか明らかにする。

5.2.2 実験方法

実験にあたり、反射材として蛍光反射テープ（ホクセツコーポレーション：蛍光反射テープ レモンイエロー）と高輝度反射テープ（ホクセツコーポレーション：高輝度反射テープ 白）の 2 種類、マーカーパターンを構成する素材としてステッカーシート（エーワン合同会社：ラベルシール [インクジェット] 光沢フィルム・透明）と黒画用紙（株式会社マルアイ：色画用紙 N861）の 2 種類を用意した。

ステッカーシートはインクジェットプリンタを使用、黒画用紙は全てカッティングマシンで同じデータと設定を使用してそれぞれマーカーパターン部のサイズを 70 × 70 mm に統一した。

これらの 2 種類の反射材、2 種類のマーカーパターン構成素材を組み合わせた 4 種類のマーカーと、普通紙に印刷したマーカーの計 5 種類を作成し、それぞれをマグネットシートに取り付け、サーフェスに貼付した際の認識状況を確認した。

撮影用の赤外線カメラは 4.3 節、4.4 節の実験と同様のものを使用し、カメラはサーフェス全体が画角内に収まる後方 1 m の位置に固定した。また、サーフェスに赤外光を照射する赤外光源もほぼ同じ位置に設置することで反射光を認識しやすいうようにした。

認識状況は openFrameworks の ofxARToolkitPlus ライブライアリを利用したアプリケーションを作成して確認した。画面左側にはカメラ画像、画面右側には下に表示された閾値でカメラ画像を二値化したものを表示している。また、マーカーを認識できた際には左側のカメラ画像上のマーカー部分が黄色い枠で囲われ、中心には ID 番号が重ねて表示されるようになっている。

5.2.3 実験結果と考察

ステッカーシートを利用したマーカーの外観を図 5.4、認識結果を図 5.5 に、黒画用紙を利用したマーカーの外観を図 5.6、認識結果を図 5.7 に示す。

ステッカーシートを利用したマーカーオブジェクトの場合、蛍光反射テープ条件、高輝度反射

⁶TUO – <http://www.tuio.org/> (2015/01/23 確認)

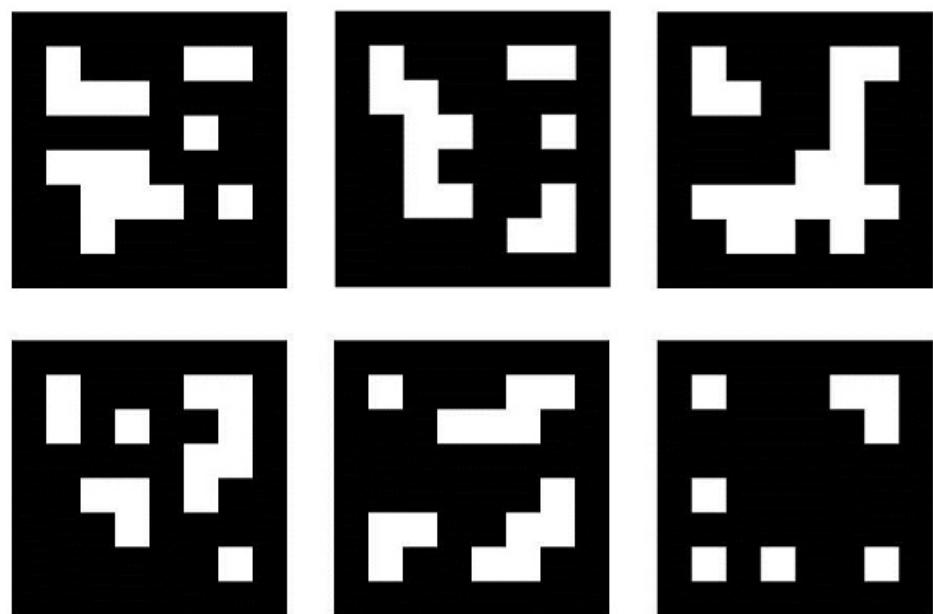


図 5.2: ARToolKitPlus で利用するマーカー

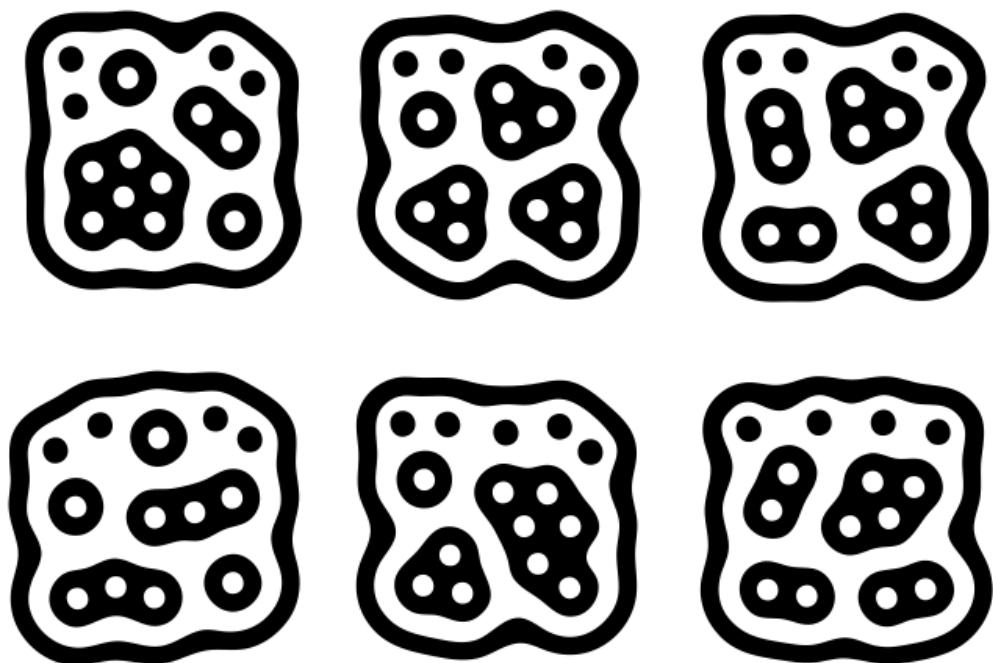


図 5.3: reacTIVision で利用するマーカー (脚注 5 より図引用)

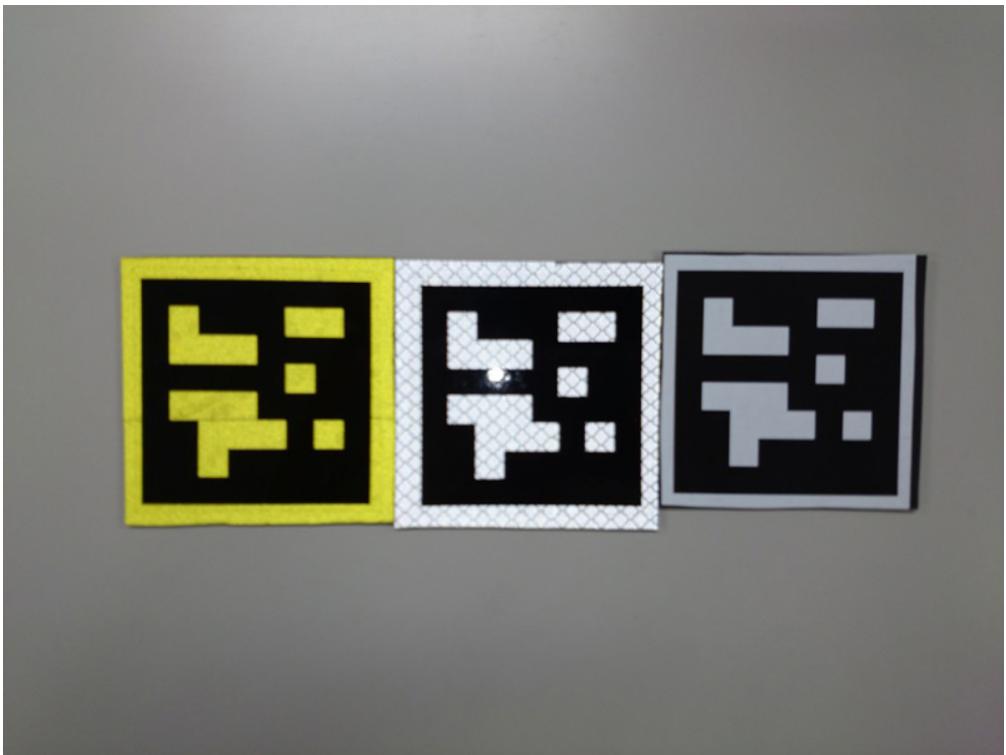


図 5.4: ステッカーシートを利用したマーカーの外観

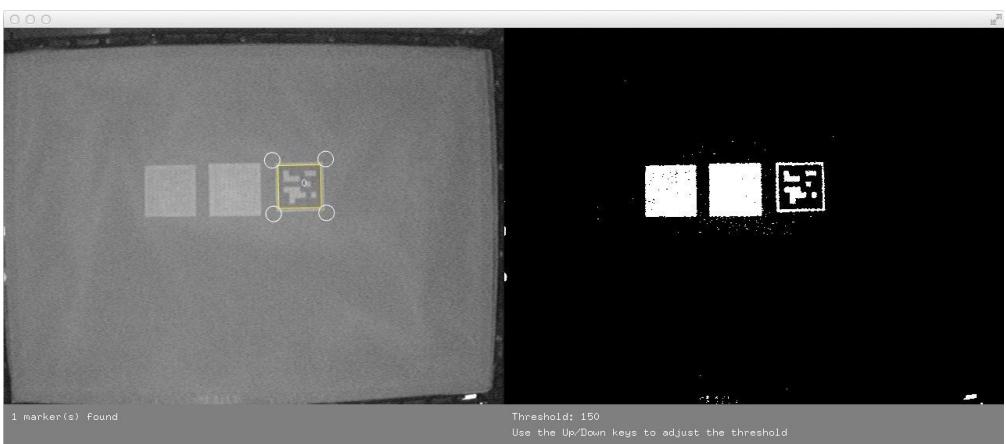


図 5.5: ステッカーシートを利用したマーカーの認識結果

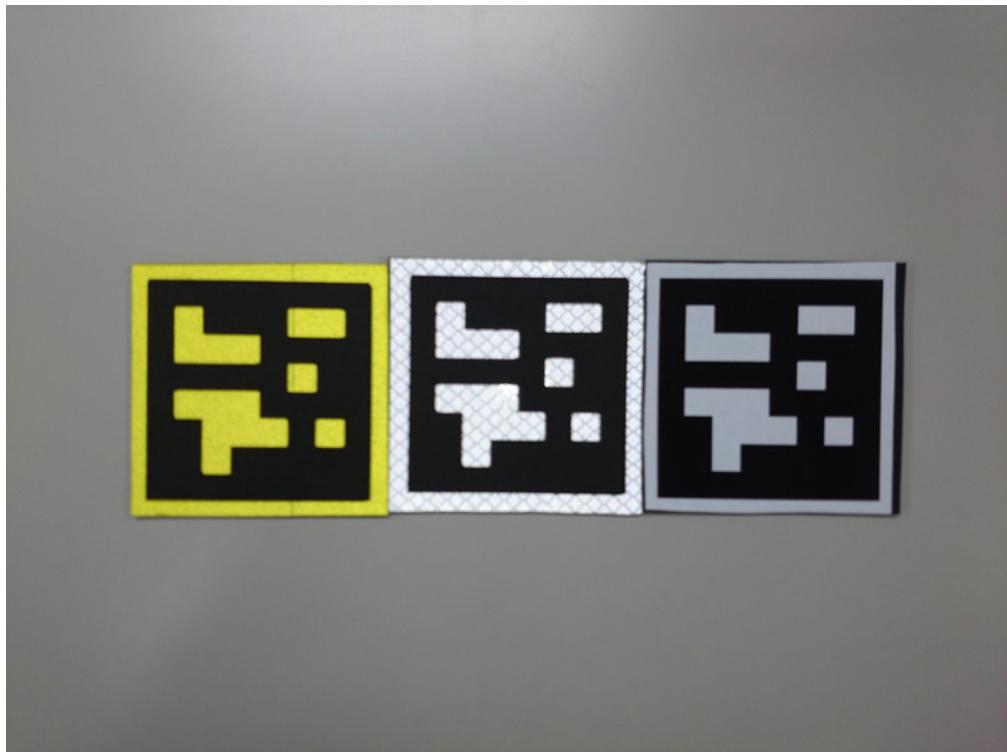


図 5.6: 黒画用紙を利用したマーカーの外観

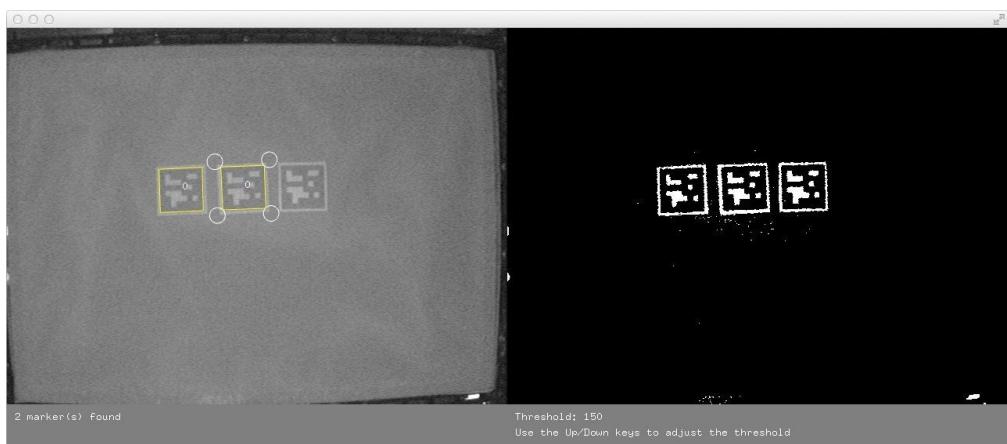


図 5.7: 黒画用紙を利用したマーカーの認識結果

テープ条件とともに黒く印刷したマーカーパターン部分も多くの光が透過してしまっており、オブジェクト全体から光を反射してしまった。そのため、閾値をどのように設定してもマーカーを認識することができなかった。

一方で、黒画用紙を利用したマーカーオブジェクトの場合は、マーカーパターン部分が光をしっかりと遮断しており、どちらのマーカーも認識することができるようになった。また、蛍光反射テープ条件と高輝度反射テープ条件を比較したところ、高輝度反射テープを利用したマーカーオブジェクトの方が僅かに輪郭が鮮明に確認でき、閾値によっては高輝度反射テープを利用したマーカーオブジェクトだけ認識することができた。

また、図5.7にて、ステッカーシートを利用した際に同じ閾値で認識できていた普通紙のマーカーの位置とID番号が表示されなくなっているが、これは実験中同じマーカーパターンかつ同じ大きさのマーカーを複数使った場合、複数の認識が安定して行えず、認識数が1～3の間でぶれてしまっていたのが原因である。このことから、同じマーカーパターンかつ同じ大きさのマーカーを複数使った場合、素材の違いや光源とのわずかな位置関係の違いで認識アプリケーションの判定に支障が出る可能性が想定される。

5.3 認識できるマーカーのサイズに関する実験

5.3.1 実験目的

5.2節の実験から、マーカーを構成する各素材を決定した。本節ではそれらの素材を用い、どれくらいのサイズのマーカーであればソフトウェアが認識可能であるのか、また、どのサイズのマーカーであれば認識がしやすいのか実験によって明らかにする。

5.3.2 実験方法

実験にあたり、黒画用紙をカットして $70 \times 70\text{ mm}$ から $30 \times 30\text{ mm}$ まで、5種類の大きさのマーカーパターンを作成し、マーカーパターンより縦横ともに 10 mm ずつ大きくカットしたマグネットシートと高輝度反射テープの上に貼付した。また、マーカーの認識精度はマーカーパターンによって異なる可能性が想定されるため、2種類のマーカーパターンを用意した。

認識状況は5.2節の実験と同様の機材、ソフトウェアを用いて観測した。

5.3.3 実験結果と考察

実験結果を図5.8～図5.12と、図5.13に示す。

同じ閾値で 70 mm から 30 mm まで全てのマーカーを認識できることがわかったが、マーカーの大きさによって認識できる閾値の幅に僅かながら差が存在することが判明した。

両方のマーカーを認識できる閾値の幅が最も広かったのは 50 mm のマーカー(139～160)と 40 mm のマーカー(141～162)で、それより大きい 60 mm のマーカー(140～158)と 70 mm のマーカー(140～156)は、サイズが大きくなるにつれて徐々に認識可能閾値の幅が狭まっていた。これは今回、マーカーが大きくなればなるほど外枠部分が占める比率が小さくなっていたことから、閾値が高くなった際に、マーカーパターンの外枠部分がノイズとして処理されてしまい、マーカーパターンの輪郭を正常に認識できなくなってしまっていたのが原因であると推察される。

一方で、 30 mm のもの(146～161)は最も認識可能閾値の幅が狭かったが、これはマーカー



図 5.8: 70 mm のマーカーの認識結果

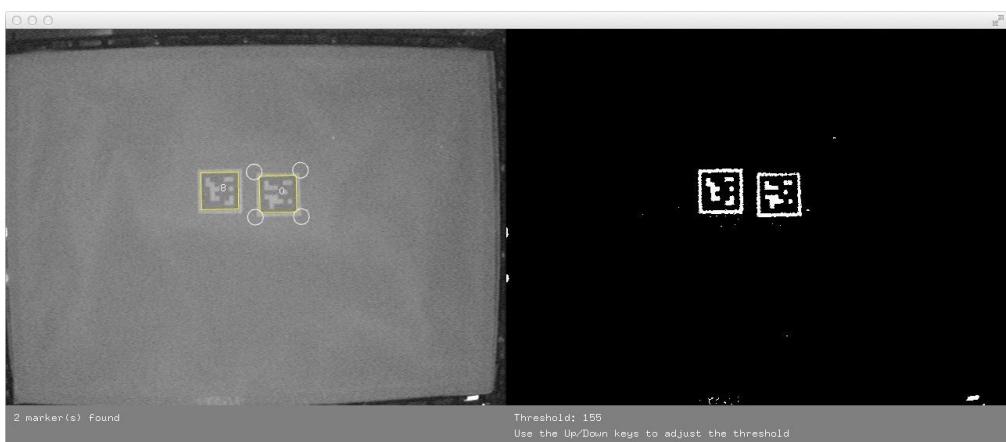


図 5.9: 60 mm のマーカーの認識結果

がかなり小さくなってしまっておりマーカーパターンとノイズをアプリケーションが区別できなくなってしまっていることが原因であると推察される。

実験前に想定していたマーカーパターンによる認識精度の違いは、実験中僅かに確認できたものの、全条件において閾値の差が 1 ~ 2 度であり、実装の際に考慮する必要は無いことが判明した。

また、同じ素材、マーカーパターンでサイズだけ違うものを同時に貼付したところ、2 サイズ違うもの (40 mm と 60 mm) を同時に貼付した場合は問題なく両方に認識できたものの、1 サイズしか違わないもの (40 mm と 50 mm) を同時に貼付した場合は、5.2 節の実験で見られたのと同様、認識数がぶれてしまう問題が発生した。1 サイズしか違わないものであっても、マーカーパターンが違うものであった場合は問題なく同時に認識ができていたことから、5.2 節の実験で発生したのと同様、認識アプリケーションの判定が原因であると推察される。



図 5.10: 50 mm のマーカーの認識結果



図 5.11: 40 mm のマーカーの認識結果



図 5.12: 30 mm のマーカーの認識結果

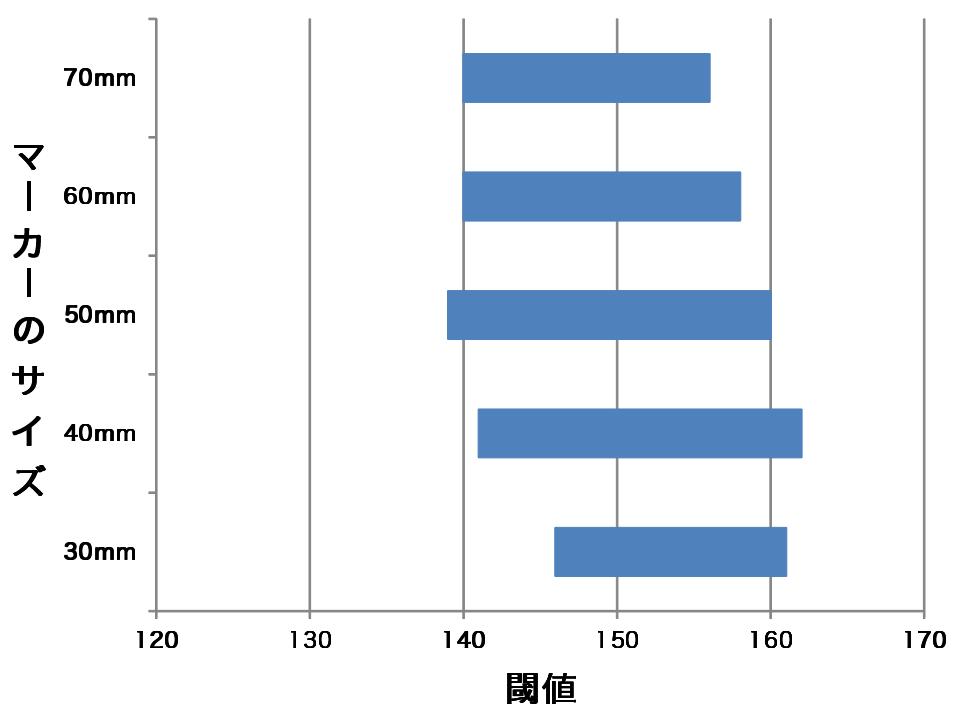


図 5.13: マーカーが認識可能な閾値

5.4 磁石の吸着力に関する実験

5.4.1 実験目的

本研究で用いるサーフェスは磁性を持つため、オブジェクトとサーフェスの接着面に磁石を取り付けることで、オブジェクトをサーフェスに貼付することが可能になる。

磁石の吸着力は磁石メーカー各社によって式が異なったり、誤差が大きかったりするため、正確な値を一概に求めることはできないが⁷、磁石の材質、寸法、磁石と吸着面の間隔、使用温度などによって変化することが分かっている。

この実験ではオブジェクトに磁石を取り付けた際の吸着状況を確かめることで機能性オブジェクトを利用する際に、どの程度の重量のものであればサーフェスに貼付できるのかどうかと磁石にどの程度の吸着力が必要となるのかどうかを明らかにする。

5.4.2 実験方法

実験を行うにあたって、強力な吸着力を持つネオジム磁石3種類(表5.1参照)各4個と、機能性オブジェクトとして用いる無線機器3種類(表5.2参照)を用意した。THAW[26]などでは機能性オブジェクトとしてスマートフォンが用いられていたが、本研究においてはアプリケーションに実装しやすいBluetooth接続のキーボード、その中でも軽量のものを利用して実験を行う。

無線機器の底面形状は機器によって異なったため、サンワサプライ: NT-MBT01BKとロジクール: Bluetooth Easy-Switch Keyboardの2種類は各頂点付近に1個ずつ、マクロソフト: Wedge Mobile Keyboardは底面下部に横一列に磁石を取り付け、サーフェスに貼り付けた時の吸着具合を確かめた。

5.4.3 実験結果と考察

実験結果を表5.3～表5.5に示す。表の△は貼付して固定できる場所とできない場所が混在している状態、○は全ての場所で貼付して固定できる状態を示している。

サンワサプライ: NT-MBT01BKは10mmの磁石を4個貼付した状態、マクロソフト: Wedge Mobile Keyboardは15mmの磁石を4個貼付した状態で、サーフェスに貼付して固定することが可能となった。一方で、ロジクール: Bluetooth Easy-Switch Keyboard K811は20mmの磁石を4個使用してもサーフェスに固定することができず、20mmの磁石を4個と15mmの磁石を2個の合計6個貼付することで固定することが可能となった。また、サー

表5.1: 用意した磁石

サイズ (ϕ mm × mm)	表面磁束密度 (mT)	吸着力 (kg)	重量 (g)
10 × 5	430	1.9	3
15 × 5	350	2.6	7
20 × 5	360	4.4	12

⁷株式会社マグファイン: 磁気計算機 MAGSPEC Version 1.2 – http://www.magfine.co.jp/magnetjapan/user_data/magspec.php (2015/01/16 確認)

表 5.2: 用意した無線機器

メーカー	種類	型番	重量 (g)
サンワサプライ	Bluetooth テンキー	NT-MBT01BK	170
マイクロソフト	Bluetooth キーボード	Wedge Mobile Keyboard	255
ロジクール	Bluetooth キーボード	Bluetooth Easy-Switch Keyboard K811	336

表 5.3: サンワサプライ: NT-MBT01BK

サイズ ($\phi mm \times mm$)	磁石 1 個	磁石 2 個	磁石 3 個	磁石 4 個
10 × 5	×	×	△	○
15 × 5	×	×	○	○
20 × 5	×	△	○	○

表 5.4: マイクロソフト: Wedge Mobile Keyboard

サイズ ($\phi mm \times mm$)	磁石 1 個	磁石 2 個	磁石 3 個	磁石 4 個
10 × 5	×	×	×	△
15 × 5	×	×	×	○
20 × 5	×	×	△	○

表 5.5: ロジクール: Bluetooth Easy-Switch Keyboard K811

サイズ ($\phi mm \times mm$)	磁石 1 個	磁石 2 個	磁石 3 個	磁石 4 個
10 × 5	×	×	×	×
15 × 5	×	×	×	×
20 × 5	×	×	×	△

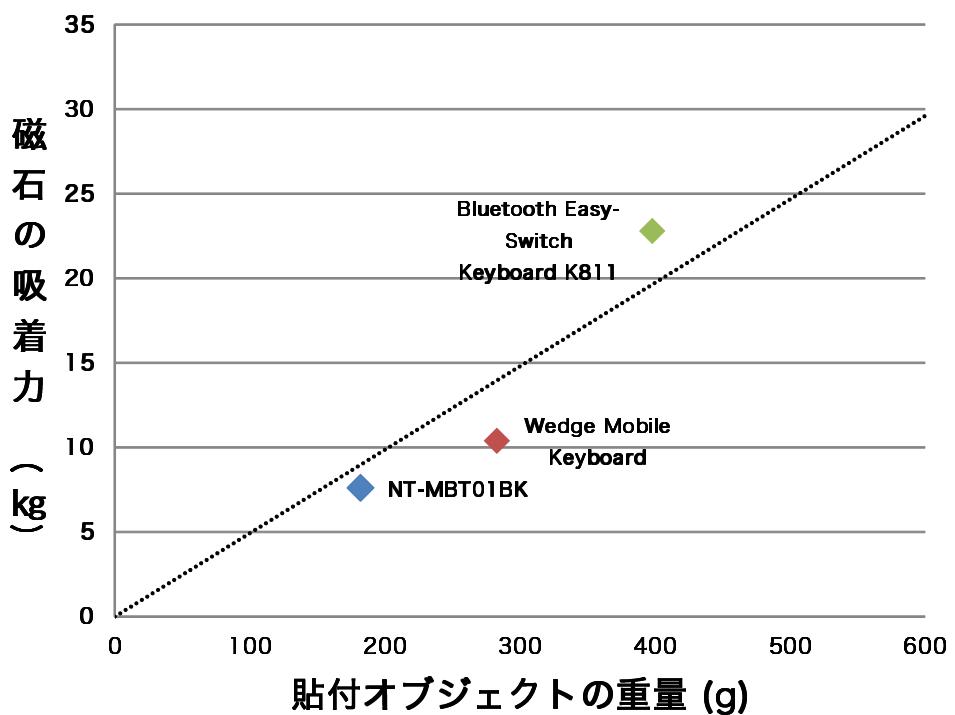


図 5.14: 固定可能時における磁石の吸着力とオブジェクトの重量の関係

フェス外部のフレームを利用した場合は全てのオブジェクトを 10 mm の磁石 1 個だけで固定することが可能であった。

磁石の吸着力は、磁石を鉄板に貼付し、垂直方向に引っ張った際にかかる重量を表しており、磁石を複数離して貼付した場合は、それぞれの磁石の吸着力の和が全体の吸着力となる。本実験の結果から、各オブジェクトをサーフェスに固定できる時の磁石の吸着力を計算すると、重量 170 g の NT-MBT01BK は吸着力 7.6 kg、重量 255 g の Wedge Mobile Keyboard は吸着力 10.4 kg 重量 336 g の Bluetooth Easy-Switch Keyboard K811 は吸着力 22.8 kg のときに固定可能となっている。

オブジェクトをサーフェスに固定可能な時の磁石の吸着力とオブジェクトの重量の関係と、それらから最少二乗法で求められる近似直線を点線で表示したものを図 5.14 に示す。これらのことから 100 g のオブジェクトをサーフェスに貼付して固定するには、約 4.9 kg の吸着力が必要であることが明らかになった。

6 プロトタイプシステムの実装

4章と5章の結果を元に、プロトタイプシステムの実装を行った。本章ではプロトタイプシステムの構成に関して説明する。

6.1 ハードウェア構成

プロトタイプシステム動作時の外観を図6.1と図6.2に示す。プロトタイプシステムは、映像を表示するサーフェス、映像を投影するプロジェクタ、ユーザが情報の操作に利用するオブジェクト、赤外光を照射するための赤外線投光器、オブジェクトの位置を取得するための赤外線カメラ、オブジェクトの位置情報の処理や表示情報のコントロールを行うコンピュータから構成される。

システムは、最初にサーフェスに向けて赤外線投光器で赤外光を照射し、サーフェスに貼付したオブジェクトからの反射光を赤外線カメラでキャプチャし、オブジェクトの位置や操作などをもとにコンピュータが処理を行い、プロジェクタに情報を送信するような形で動作をしている(図6.3参照)。

6.1.1 サーフェス

プロトタイプシステムのサーフェスは、先行研究同様20メッシュで線径が0.35mmの磁性ステンレス金網を用いる。金網からの表面反射を防ぐために、金網全体にはマットグレーの塗料を塗布したほか、映像鮮明化のためにトレーシングペーパーを貼付した。また、フレームからの表面反射を防ぐために、フレーム全体にマットブラックの塗料を塗布した。

6.1.2 オブジェクト

本研究においてはオブジェクトの種類や角度を認識するため、全てのオブジェクトにARマークを取り付けた。マグネットの吸着面に再帰性反射材を貼り付け、その上にカッティングマシンで黒画用紙をカットして作成したマーカーパターンを貼り付けることで、光を照射した際にマーカーパターン以外の部分が反射するようになっている(図6.4参照)。さらに、マーカーパターンの上部にIRフィルタを取り付けることで、Shadow++[38]のようにユーザが外部から視認できないマーカーを作成することや、田中らの研究[46]のような複数の波長の赤外光に対応したマーカーを作成することも可能となっている。

また、プロトタイプシステムでは機能性オブジェクトとして、Bluetoothテンキー(サンワサプライ: NT-MBT01BK)を利用する。オブジェクトにはサーフェスに吸着させるためのネオジム磁石と、マーカーを取り付けており、壁面上に取り付けたオブジェクトから表示情報のコントロールや、システム環境設定の調整などが可能となっている。

6.1.3 赤外線投光器

先行研究同様、サーフェスに照射する赤外光の波長を切り替えられるよう、3種類のピーク発光波長をもつ赤外線LEDを用いた赤外線投光器を作成した。投光器に用いる赤外線LEDは4.3節や4.4節の実験や最大順方向電流の値を元に、表面実装型赤外線LEDのうち、波長が810nm(LS812SMT)、870nm(LS876SMT)、940nm(LS944SMT)のものを利用すること



図 6.1: システムの外観（正面）



図 6.2: システムの外観（背面）

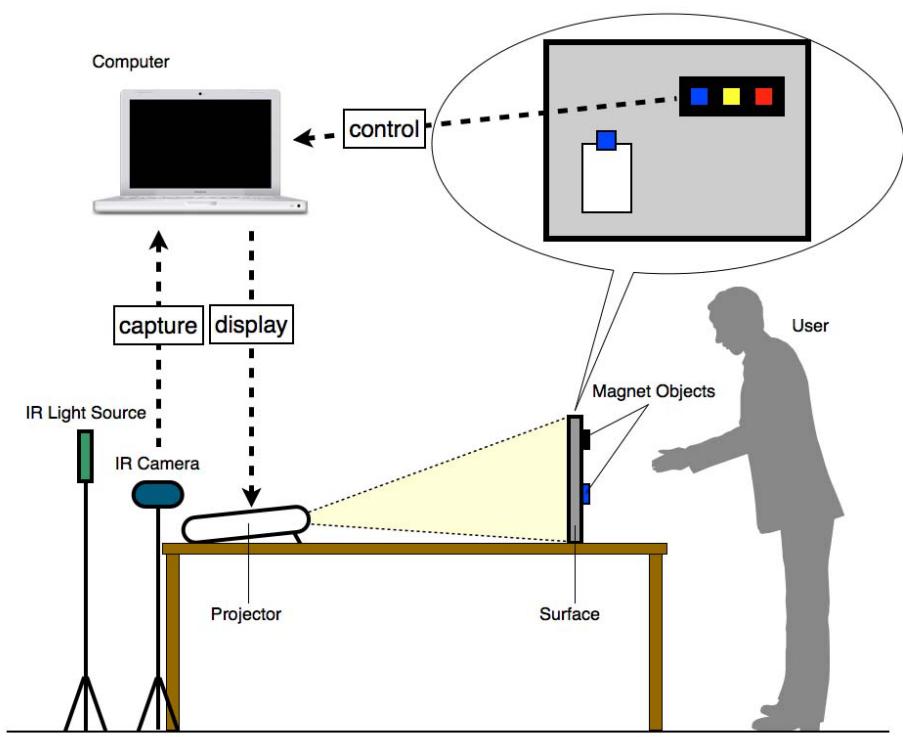


図 6.3: システムの構成

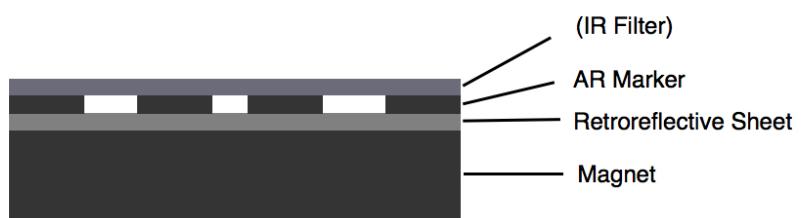


図 6.4: オブジェクトのマーカー部の構造

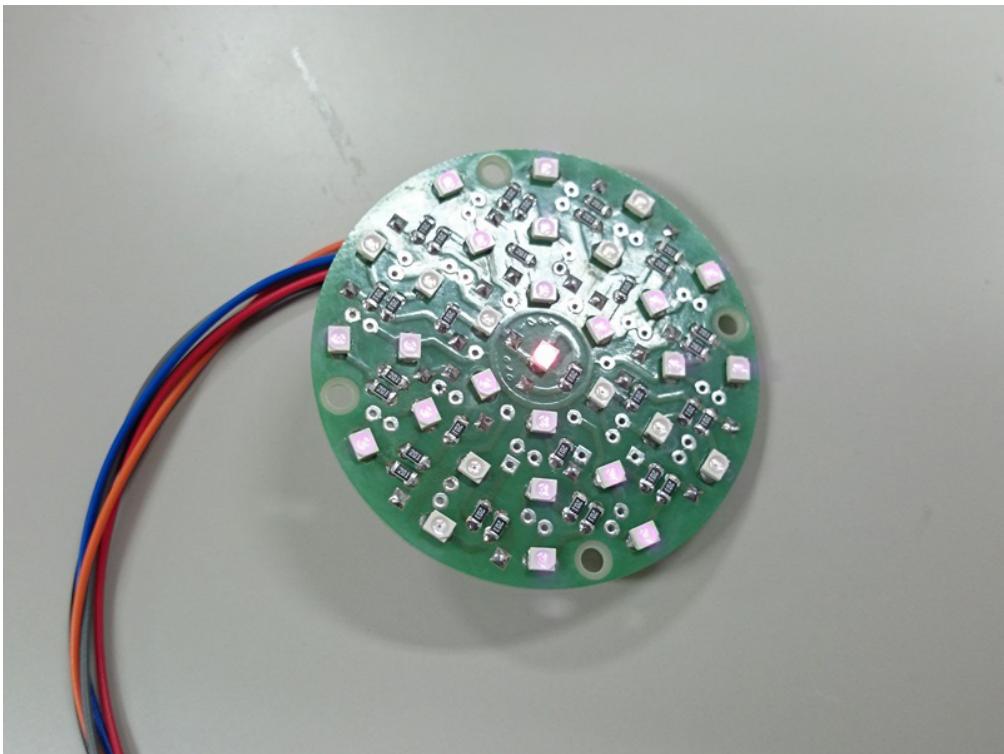


図 6.5: 投光器の外観

とした。それぞれの LED は LED フラッシュ基板（サンハヤト: LED-610）の上に、各 10 個ずつ LED の照射範囲が近似するよう、放射状に配置した。また、中央には通電確認用にピーク発光波長 700 nm の表面実装型赤外線 LED (VS706SMT) を配置した。

投光器の外観を図 6.5 に、回路図を 6.6 に示す。

また、本研究の投光器と先行研究の投光器の赤外線 LED をそれぞれ全て点灯させ、サーフェスの後方 70 cm から赤外光を照射した状態を図 6.7 と図 6.8 に示す。先行研究の投光器では赤外光がサーフェスの中心部のみに照射されており、場所によって明るさに大きな差ができるのにに対し、本研究の投光器はサーフェス全体に万遍なく赤外光が照射されており、場所による明るさの差も少なくなっていることが確認できる。

6.1.4 赤外線カメラ

赤外線カメラは、実験時同様高感度の白黒 CCD カメラ (Watec: WAT-902H ULTIMATE) に赤外領域が撮影できるレンズ (TAMRON: 12VM412ASIR) を取り付けたものを使用した。また、レンズの先端には SC-74 フィルタをかぶせ、可視光の影響を軽減させている。カメラの映像は USB キャプチャユニット (mathey: MVCP-02MAC) を用いて 640×480 ピクセルの解像度でキャプチャを行った。

6.1.5 プロジェクタ

先行研究においてはプロジェクタとして短焦点プロジェクタ (BenQ: MP512ST) を使用していたが、プロトタイプシステムでの映像投影に短焦点プロジェクタを使用したところプロ

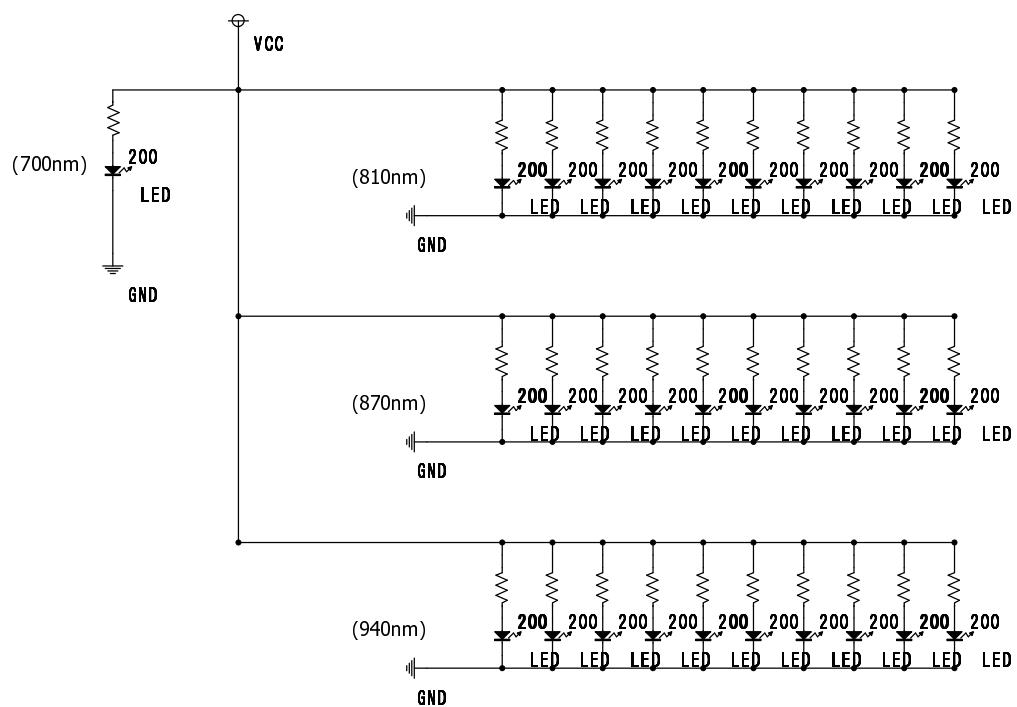


図 6.6: 投光器の回路図

ジエクタの位置と赤外線カメラの位置が重なってしまった。そのため、超短焦点プロジェクタ (HITACHI: CP-AW100N) を使用し、サーフェスの下部から投影を行うことで、プロジェクタの位置と赤外線カメラの位置をずらすこととした。

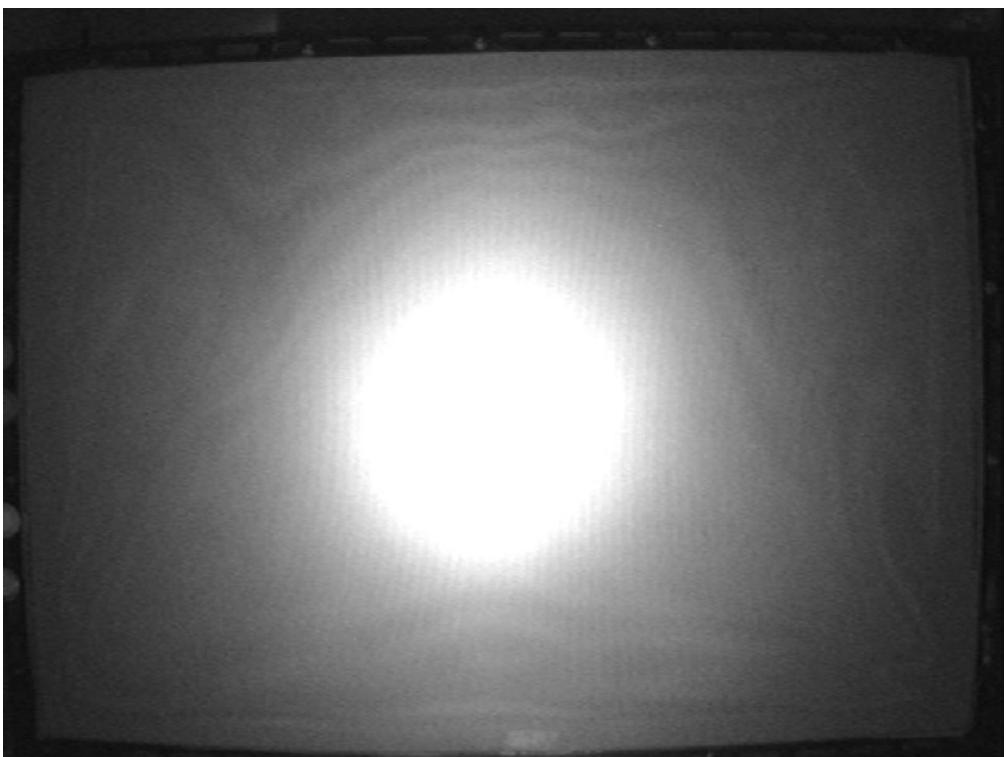


図 6.7: 先行研究の投光器でサーフェスに赤外光を照射した状態

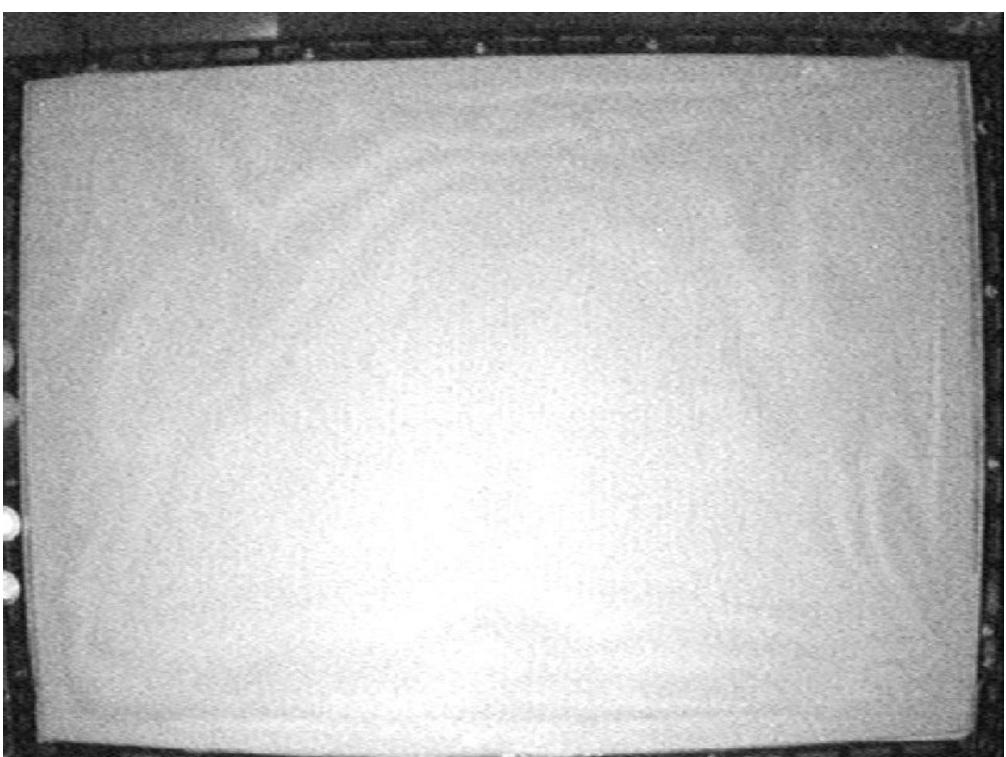


図 6.8: 本研究の投光器でサーフェスに赤外光を照射した状態

6.2 ソフトウェア構成

プロトタイプシステムのソフトウェアが行なう処理は2種類に分けられる。一方は赤外線カメラの画像を元にオブジェクトの位置情報を取得する処理、もう一方はオブジェクトの位置や操作をもとに表示情報をコントロールする処理である。

先行システムでは、位置情報を取得するアプリケーションに、マルチタッチ認識アプリケーションのCCVを、表示情報をコントロールするアプリケーションはProcessing¹で作成したアプリケーションを使用して処理を行っていた。処理をそれぞれ別のアプリケーションで行うこと、実装の簡略化がされていたものの、高度なオブジェクト認識ができなかつたり、2つのアプリケーション間でプロトコルを統一して通信を行なわなければならなかつたりといった問題が存在した。そこで本研究では、オブジェクト認識手法の高度化や、処理の高速化を目指し、2種類の処理を1つのアプリケーションで行う。

アプリケーションの開発は5章でマーカーの認識実験に使用したアプリケーション同様、全てXcode(4.5.2)とopenFrameworks(0.8.3)を使用して行った。また、オブジェクトの位置情報を取得するために、マーカー認識ライブラリのofxARToolkitPlusライブラリ(Version 0.1)を使用している。

6.2.1 プロトタイプアプリケーション

実装したプロトタイプシステム用に、掲示板アプリケーションを実装した。

ユーザは紙貼付用のマグネットオブジェクトとIDカード用のマグネットオブジェクトを利用して、自分にとって重要な情報のみに選択的にアクセスすることが可能となっている。

紙貼付用オブジェクト、IDカード用オブジェクトともに全て違うマーカーパターンが貼付されており、紙貼付用オブジェクトには事前に対象ユーザなどのパラメータを設定してある。ユーザは紙貼付用オブジェクトを利用して紙を貼付することで、貼付した紙の対象ユーザをソフトウェア上で識別することが可能となっている。

そしてIDカード用オブジェクトを貼付した際には対応した紙貼付オブジェクトを使用して貼付した紙が強調されて表示されるような仕組みになっている。

実際にアプリケーションを動作させた様子を図6.9と図6.10に示す。

教授用のIDカードを貼付した際には教授対象の2個と、全員対象の1個の計3個の紙が強調して表示されており(図6.9参照)、学生用のIDカードを貼付した際には、学生対象の1個と、全員対象の1個の計2個の紙が強調して表示されていることがわかる(図6.10参照)。

6.2.2 オブジェクトの機能拡張

また、プロトタイプシステムでは、オブジェクトへの機能を付加するアプローチと、機能を持ったものをオブジェクトを利用するアプローチによって先行研究ではできなかつたサーフェスとオブジェクトの連携を実現した。具体的な機能を以下に示す。

オブジェクトへの機能を付加するアプローチとして、オブジェクトの認識にマーカーを使用することによって、オブジェクトの位置だけではなく、種類や角度も取得できるようにした。これによって、オブジェクトを回転させることで情報が変化するという機能を付加することが

¹Processing – <https://processing.org/> (2015/01/30 確認)

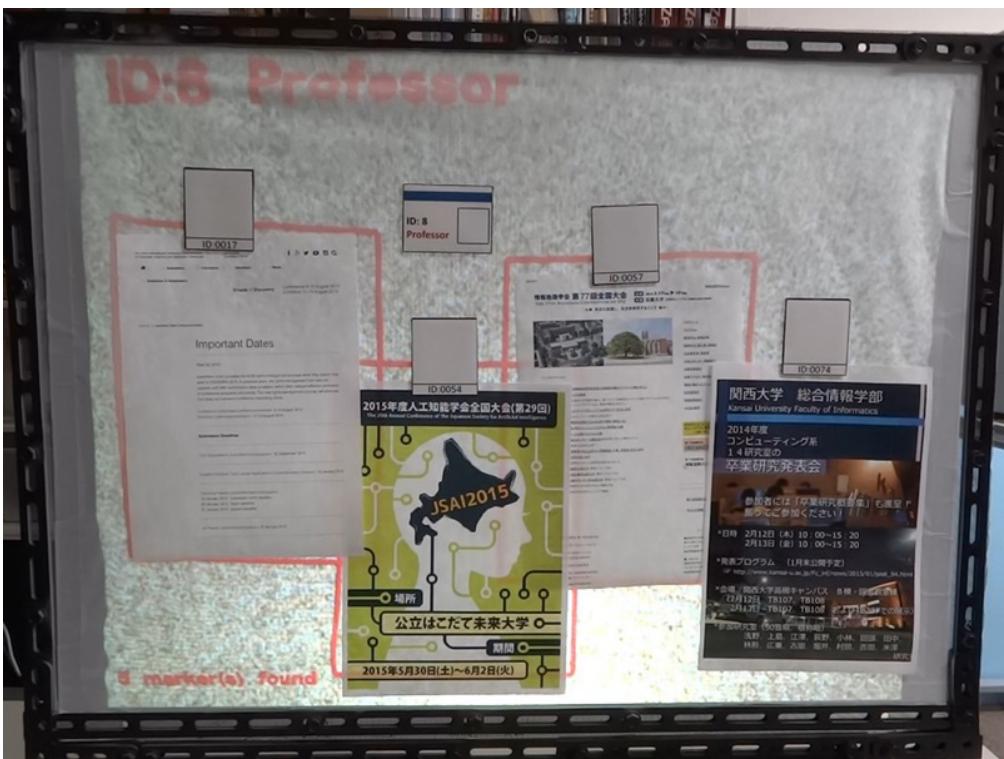


図 6.9: 教授用 ID カードを貼付した状態

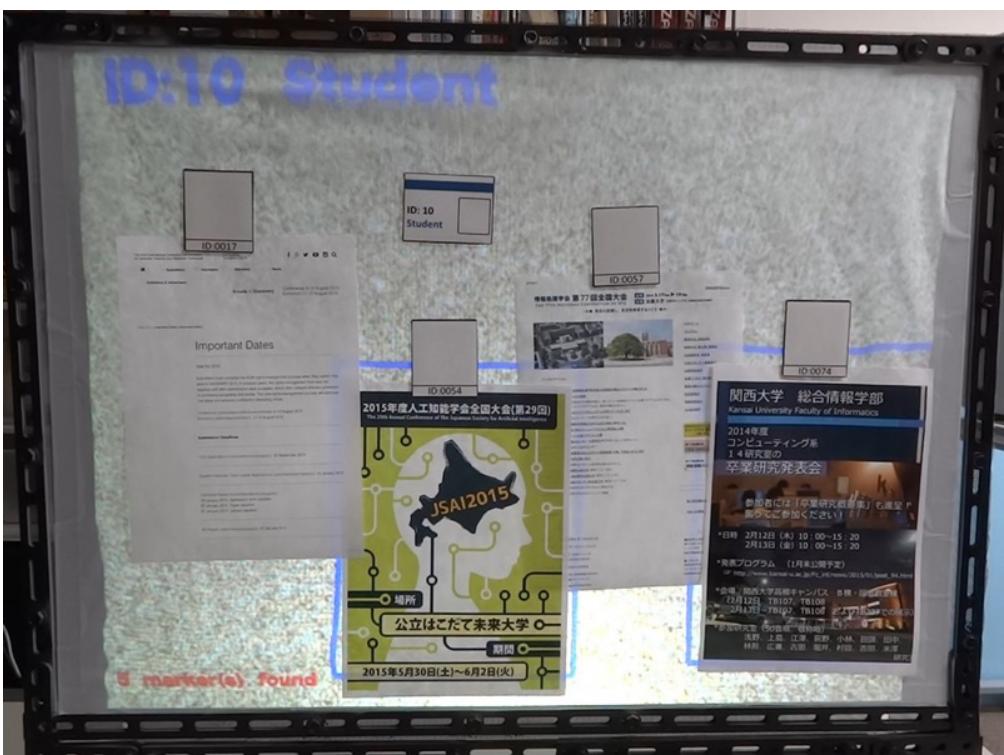


図 6.10: 学生用 ID カードを貼付した状態

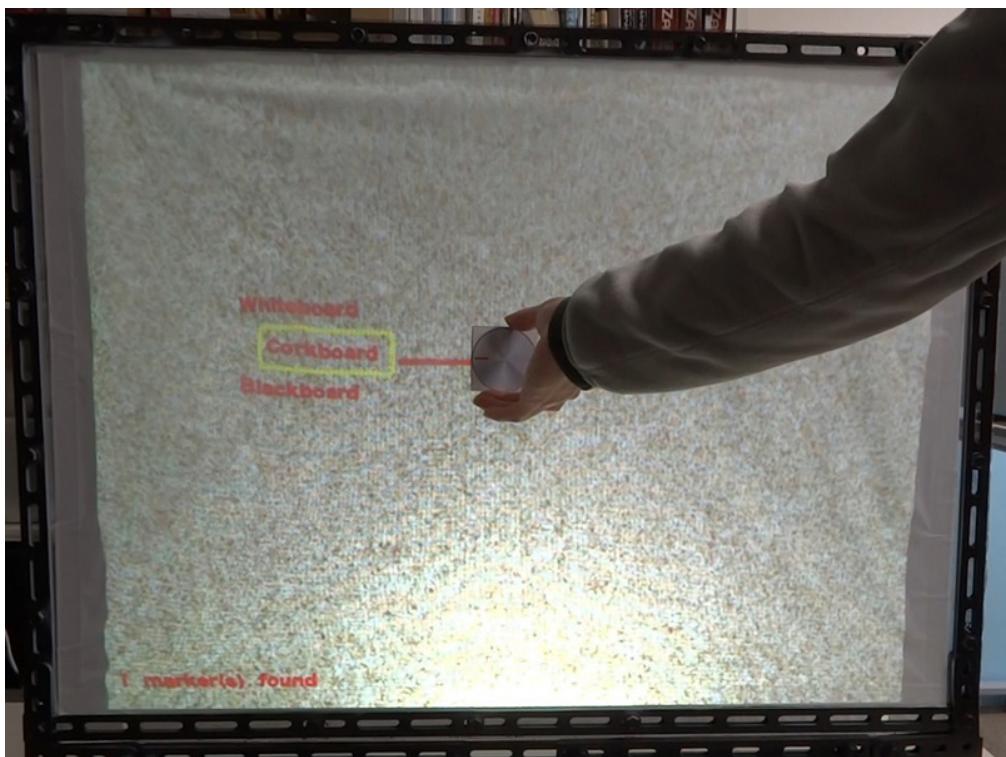


図 6.11: オブジェクトへの機能の付加

できるようになった。プロトタイプシステムでは、ノブの絵が描かれたオブジェクトを回転させることで、背景画像が変わるようにになっている(図 6.11 参照)。

次に機能を持ったものをオブジェクトとして利用するアプローチとしては、Bluetooth テンキーをオブジェクトとして利用できるようにした。これによって、オブジェクトをサーフェスに直接貼付し、表示モードの切り替えやシステムの環境設定などができるようになり(図 6.12, 図 6.13 参照)、オブジェクトを利用したインタラクションの幅を広げることに成功した。

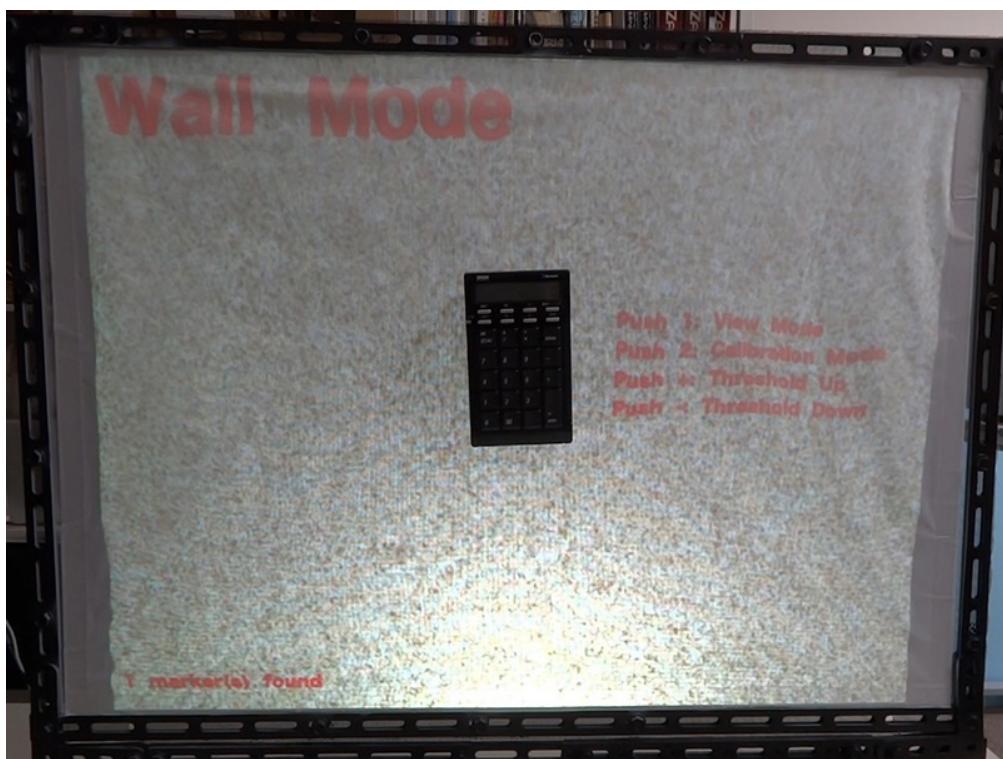


図 6.12: 機能性オブジェクトの利用



図 6.13: オブジェクトを利用して環境設定している様子

7 議論

本章では、6章で実装したプロトタイプシステムについての考察を行う。加えて、提案システムの問題点や改善点について挙げ、今後の展望について述べる。

7.1 プロトタイプシステムで可能となったこと

実装したプロトタイプシステムでは、先行研究のシステム構成を踏襲しながら、サーフェスやオブジェクトの機能改良を行うことで先行研究の問題点を解消することが可能となった。

サーフェスへ赤外光を照射する赤外光源に表面実装型赤外線 LED を用いることで、サーフェス全体に万遍なく赤外光を照射できるようになり、サーフェスを大型なものにできるようになった。それによって、先行研究では難しかったアナログ媒体との連携が可能となった。

また、オブジェクトの認識手法をマルチタッチ認識アプリケーションの CCV から、マーカー認識ツールの ARToolkitPlus を利用した自作アプリケーションにすることで、オブジェクトの種類や角度など、新たなパラメータを取得することができるようになった。これによって、先行研究ではできなかった、オブジェクトの識別や、機能の付加が可能となった。

さらに、機能性オブジェクトをインタラクションに利用できるようにすることで、モードの切り替えや、閾値の調整など、オブジェクトを利用して様々な操作をすることが可能となった。

これらの取り組みによって、壁面型インタラクティブ・サーフェスと貼付オブジェクトの機能や利便性を拡張し、既存のシステムではできなかった連携が実現できるようになった。

7.2 プロトタイプシステムの問題点

7.2.1 オブジェクトの認識精度

実装したプロトタイプシステムでは、マーカー認識に ARToolkitPlus を用いていたが、ARToolkitPlus はカメラのキャリブレーションのために専用アプリケーションを動かし、カメラキャリブレーションファイルを作成しなければならなかった。今回の実装においては専用アプリケーションを稼働させる環境を用意することができずキャリブレーションファイルを手動で作成したため、オブジェクトの位置によっては補正がうまく働くか、現実世界上のオブジェクトの位置と、仮想世界上のオブジェクトの位置がずれてしまうことがあった。

また、ARToolkitPlus の開発は 2006 年 6 月で終了しており、マーカー認識精度の向上や機能の拡張が期待できなくなってしまったため、今後は 5.1 節で取り上げた reacTIVision[22] や、ReAR Surface[41] で用いられていた、スマートフォンとの連携が容易な Vuforia¹ など(図 7.1 参照)、様々なマーカー認識ツールを用いて実験を行い、本システムに最適なオブジェクト認識手法を探していく必要があるといえる。

7.2.2 サーフェスの工作精度

プロトタイプシステムに用いたサーフェスは、先行研究同様、磁性ステンレス金網にトレーシングペーパーを貼付したものを利用した。しかし、先行研究のサーフェスよりもサーフェスを

¹Vuforia Augmented Reality for 3D Mobile Content – <https://www.qualcomm.com/products/vuforia>(2015/02/06 確認)



図 7.1: Vuforia の使用例 (文献 [41] より図引用)

大型化させたことで、金網を固定する際に必要となる張力が増加し、先行研究のサーフェスよりも金網のたるみが酷くなってしまった。また、それによって貼付したトレーシングペーパーも場所によって金網から剥離してしまい、文字や図形が歪んでしまうことがあった。今後は、金網に張力を持たせる固定具を用意したり、トレーシングペーパーよりも剥離し辛く、映像が鮮明に見えるような素材を用意したりすることでこの問題を解決していく必要があるといえる。

7.3 今後の展望

7.3.1 複数波長の赤外光の利用

プロトタイプシステムでは赤外光源として複数波長の赤外線 LED を組み合わせたものを利用していたが、先行研究のような波長の切り替えによる情報の切り替えは行わなかった。今後は田中らの研究 [46] のように、マーカーパターンを複数種類の IR フィルタで構成し、照射する赤外光の波長を切り替えることで、単一のマーカーに複数種類の情報を付与することが可能になると考えられる。

7.3.2 オブジェクトの機能拡張

プロトタイプシステムにはおいては、オブジェクトに機能を持たせるアプローチとして、オブジェクトを回転させると表示モードが切り替わる機能を実装したが、これだけではオブジェクトの操作が十分な機能を持っているとはいえない。今後はオブジェクトの動作に着目し、様々なインタラクションを考えていかなければならないといえる。

また、実装を簡易化するために機能性オブジェクトとして Bluetooth テンキーを使用したが、テンキーを利用してのインタラクションは、表示モードの切り替えや閾値の調整といった単純なものになってしまった。今後はオブジェクトのパラメータ設定や、デジタル情報の入

力など、機能性オブジェクトを利用したシステムの操作機能の拡張を行っていく必要があるといえる。

さらに、機能性オブジェクトとしてスマートフォンやタブレットといった携帯型インタラクティブ・サーフェスを用いることで THAW[26] や、Memory Stones[16] のような、携帯型インタラクティブ・サーフェスと壁面型インタラクティブ・サーフェスの連携を行ったり、文献 [32] のように複数人同時閲覧できるような情報提示システムにしたりといったことも可能になると考えられる。

7.3.3 オブジェクトの操作性の評価

プロトタイプシステムでは、「オブジェクト角度が利用できる」、「テンキーのボタンが利用できる」といった機能ベースでオブジェクトを利用した際のインタラクションを設計した。そのため、実際にユーザが利用した際には、オブジェクトの操作とサーフェスの情報変化に一貫性を感じることができるかどうかに疑問の余地が残ってしまった。

この問題を解決するために、評価実験を行い、オブジェクトをどのように操作し、どのようにサーフェスの情報が変化すれば一貫性を感じ、違和感がなくなるのかを明確にしなければならないといえる。そして、それらの実験結果を元に、ユーザがオブジェクトの操作と情報の変化を自然に結びつけることができ、オブジェクトを自然に利用してインタラクションが行なえるシステムへと改良していく必要があると考えられる。

7.3.4 実世界オブジェクトを「繋ぐ場」としてのサーフェス

本研究では、サーフェスを大型化させることによる共有スペースの増加や、オブジェクトの機能拡張によって、既存のシステムではできなかった壁面型インタラクティブ・サーフェスと貼付オブジェクトの連携を可能とした。これによって、MAX² (図 7.2 参照) や Pure Data³ のようなオブジェクト操作主体のビジュアルプログラミング言語を、実世界オブジェクトを組み合わせて構築できるようになると考えられる。また、Sony の MESH project⁴ (図 7.3 参照) のような実世界オブジェクトを利用した開発環境でも、サーフェス上でオブジェクトとオブジェクトを組み合わせて利用できるようになり、複数人での利用など利用の幅を広げることが可能となると考えられる。

今後はこれらのようなオブジェクトとオブジェクトを「繋ぐ場」として、本研究の壁面型インタラクティブ・サーフェスを利用することで、様々な実世界オブジェクトを組み合わせて利用できる協調作業システムが実現可能となっていくと考えられる。

²Max is a visual programming language for media – <https://cycling74.com/products/max/> (2015/02/09 確認)

³Pure Data – <http://puredata.info/> (2015/02/09 確認)

⁴MESH Creative DIY Kit for the Connected Life – <https://www.indiegogo.com/projects/mesh-creative-diy-kit-for-the-connected-life> (2015/02/09 確認)

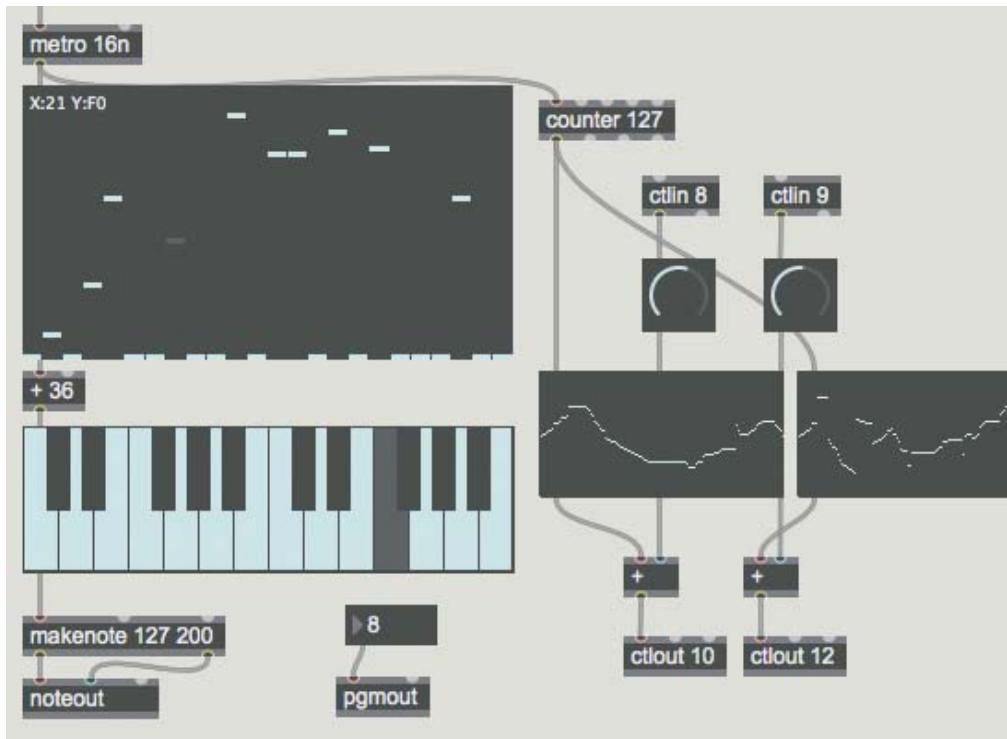


図 7.2: MAX (脚注 2 より図引用)



図 7.3: MESH project (脚注 4 より図引用)

8 結論

本論文では、壁面型インタラクティブ・サーフェスにおける貼付オブジェクトの利用に着目し、先行研究における問題点を解消し、従来の壁面型インタラクティブ・サーフェスでは実現できていなかったサーフェスとオブジェクトの連携を可能とした。

1章では、本研究の背景にある実世界指向インターフェースについて概観し、その中でもタングible・ユーザ・インターフェースとインタラクティブ・サーフェスについて説明を行った。その上で、壁面型インタラクティブ・サーフェスにおけるサーフェスと貼付オブジェクトの連携の拡張という本研究の目的を明確なものとした。

2章では、インタラクティブ・サーフェスに関する先行研究と、実世界オブジェクトを利用した先行研究、それと本研究の先行システムである、Magrid Surface に関して説明を行った。

3章では、先行研究、本研究共通のシステムコンセプトについて概観し、先行研究における問題点と実世界オブジェクトの利用方法について説明を行った。その上で、本研究におけるアプローチを明確なものとした。

4章では、プロトタイプシステムの筐体を構成する要素に関して、素材の特性を検証する実験を行った。まず、先行研究の実験結果を参考にサーフェスの大型化を行った。そして、大型のサーフェスに対応できる赤外光源を設計するために、砲弾型赤外線 LED と表面実装型赤外線 LED の特性を明確にした。

5章では、プロトタイプシステムのオブジェクトを構成する要素に関して、素材の特性や認識手法の精度を検証する実験を行った。まず、オブジェクトの機能拡張のためにオブジェクトの認識手法について概観した上で、マーカー認識ツールの ARToolkitPlus を用いてオブジェクトの構成素材とサイズに関して、ソフトウェア上での認識状況を確認し、プロトタイプシステムに用いるマーカーオブジェクトの特性を明確にした。さらに、強力な磁石を利用した際にどの程度の重量のオブジェクトまで貼付することができるのか検証し、機能性オブジェクトを構成する際に必要となる吸着力を明確にした。

6章では、4章と5章の実験結果を元にプロトタイプシステムの実装を行った。基本構成は先行研究の構成を踏襲したまま、オブジェクトにマーカーを取り付けることでオブジェクトの機能を拡張した。これによって複数種類のマーカーの個別認識や、角度の認識ができるようになり、オブジェクトを利用したインタラクションの幅を広げることができるようになった。また、認識アプリケーションと表示アプリケーションを openFrameworks で作成したひとつのアプリケーションにすることで、処理の高速化を実現した。

7章では、実装したプロトタイプで可能となったことと問題点を説明し、今後の展望について述べた。

8章では、本論文の要点をまとめ、結論付けた。

謝辞

本研究の遂行、ならびに本稿を纏めるにあたりまして、数多くの御指導・御鞭撻を賜りました、関西大学大学院総合情報学研究科松下光範教授に深甚の謝意を表します。

本研究の遂行に関して、関西大学大学院総合情報学研究科卒業生の田中琢磨氏、関西大学大学院総合情報学研究科の阪口紗季季氏には多くの御指導・御協力を頂きました。心より深く感謝致します。

大学、大学院を通して長い間学生生活を共に送ってきた同期の上間大生氏、大塚直也氏、堤修平氏には議論や相談など研究を含めた様々な面でサポートをして頂きました。心より深く感謝致します。

松下研究室に所属する学部生の皆様、特に実世界グループの皆様にはアイデア出しやプログラミングなどで様々なサポートをして頂きました。心より感謝致します。

研究活動費においては、科研費基盤研究 C (課題番号: 24500160) の交付を受けました。記して感謝の意を示します。

実験装置の作成に関しては株式会社サイエンの池口誠亮氏にサポートを受けました。記して感謝の意を示します。

最後に、27歳までの長い学生生活を精神面、経済面で支えて頂いた家族に感謝致します。

参考文献

- [1] ALPHA-ONE ELECTRONICS LTD.: *Model No. LSF812N1: Infrared LED* (2014).
- [2] ALPHA-ONE ELECTRONICS LTD.: *Model No. VSF771N1: Visible Light Emitting Diode* (2014).
- [3] ALPHA-ONE ELECTRONICS LTD.: *Model No. LS812SMT: Infrared LED Lamp* (2015).
- [4] ALPHA-ONE ELECTRONICS LTD.: *Model No. LS856SMT: Infrared LED Lamp* (2015).
- [5] ALPHA-ONE ELECTRONICS LTD.: *Model No. LS876SMT: Infrared LED Lamp* (2015).
- [6] ALPHA-ONE ELECTRONICS LTD.: *Model No. LS944SMT: Infrared LED Lamp* (2015).
- [7] ALPHA-ONE ELECTRONICS LTD.: *Model No. VS706SMT: Visible LED Lamp* (2015).
- [8] ALPHA-ONE ELECTRONICS LTD.: *Model No. VS741SMT: Visible LED Lamp* (2015).
- [9] ALPHA-ONE ELECTRONICS LTD.: *Model No. VS771SMT: Visible LED Lamp* (2015).
- [10] Augstein, M., Neumayr, T., Ruckser-Scherb, R., Karlhuber, I. and Altmann, J.: The Fun.Tast.Tisch. Project: A Novel Approach to Neuro-rehabilitation Using an Interactive Multiuser Multitouch Tabletop, *Proceedings of the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '13, ACM, pp. 81–90 (2013).
- [11] EVONIK-INDUSTRIES: PLEXIGLAS® EndLighten, Electronic Catalog, <http://www.plexiglas.de/product/plexiglas/de/produkte/massivplatten/endlighten/pages/default.aspx> (2015/01/10 確認).
- [12] Furumi, G., Sakamoto, D. and Igarashi, T.: SnapRail: A Tabletop User Interface Widget for Addressing Occlusion by Physical Objects, *Proceedings of the 2012 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '12, ACM, pp. 193–196 (2012).
- [13] Gary, B., Adrian, K., 松田晃一: 詳解 OpenCV – コンピュータビジョンライブラリを使った画像処理・認識, オライリージャパン (2009).

- [14] Hamamura, Y., Tanaka, T. and Matsushita, M.: Magrid Surface: An Interactive Display That Varies the Information by an Attached Magnetic Object, *Proceedings of the 2013 International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems*, SITIS '13, IEEE Computer Society, pp. 795–799 (2013).
- [15] 株式会社日立ソリューションズ: インタラクティブホワイトボード StarBoard, Electronic Catalog, <http://www.hitachi-solutions.co.jp/starboard/> (2015/01/10 確認).
- [16] Ikematsu, K. and Siio, I.: Memory Stones: An Intuitive Copy-and-paste Method Between Multi-touch Computers, *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '13, ACM, pp. 1287–1292 (2013).
- [17] 石井裕: タンジブル・ビット: 情報と物理世界を融合する新しいユーザ・インターフェース・デザイン, 情報処理, Vol. 43, No. 3, 情報処理学会, pp. 222–229 (2002).
- [18] Jordà, S.: The Reactable: Tangible and Tabletop Music Performance, *CHI '10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '10, ACM, pp. 2989–2994 (2010).
- [19] Jordà, S., Geiger, G., Alonso, M. and Kaltenbrunner, M.: The reacTable: Exploring the Synergy Between Live Music Performance and Tabletop Tangible Interfaces, *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, TEI '07, ACM, pp. 139–146 (2007).
- [20] Kakehi, Y., Iida, M., Naemura, T., Shirai, Y., Matsushita, M. and Ohguro, T.: Lumisight Table: Interactive View-dependent Display-table Surrounded by Multiple Users, *ACM SIGGRAPH 2004 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '04, ACM, p. 18 (2004).
- [21] Kakehi, Y., Naemura, T. and Matsushita, M.: Tablescape Plus: Interactive Small-sized Vertical Displays on a Horizontal Tabletop Display, *Proceedings of the 2nd Annual IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer System*, pp. 155–162 (2007).
- [22] Kaltenbrunner, M. and Bencina, R.: reacTIVision: A Computer-vision Framework for Table-based Tangible Interaction, *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, TEI '07, ACM, pp. 69–74 (2007).
- [23] Kaltenbrunner, M., Bovermann, T., Bencina, R. and Costanza, E.: TUIO: A Protocol for Table-Top Tangible User Interfaces, *Proceedings of the 6th International Workshop on Gesture in Human-Computer Interaction and Simulation* (2005).
- [24] 加藤博一: 拡張現実感システム構築ツール ARToolKit の開発, 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, パターン認識・メディア理解, Vol. 101, No. 652, pp. 79–86 (2002).

- [25] Lee, J., Kakehi, Y. and Naemura, T.: Bloxels: Glowing Blocks As Volumetric Pixels, *ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '09, ACM, p. 5:1 (2009).
- [26] Leigh, S., Schoessler, P., Heibeck, F., Maes, P. and Ishii, H.: THAW: Tangible Interaction with See-through Augmentation for Smartphones on Computer Screens, *Proceedings of the Adjunct Publication of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST'14 Adjunct, ACM, pp. 55–56 (2014).
- [27] Liang, R., Cheng, K., Su, C., Weng, C., Chen, B. and Yang, D.: GaussSense: Attachable Stylus Sensing Using Magnetic Sensor Grid, *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, ACM, pp. 319–326 (2012).
- [28] Liang, R., Kuo, H., Chan, L., Yang, D. and Chen, B.: GaussStones: Shielded Magnetic Tangibles for Multi-token Interactions on Portable Displays, *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, ACM, pp. 365–372 (2014).
- [29] LINTEC-GRAFIC-FILMS: Lumisty® View Control Film, Electronic Catalog, http://www.glazingenhancement.com/products_lumisty_view_control_film.html (2015/01/10 確認).
- [30] Matsushita, K., Iwai, D. and Sato, K.: Interactive Bookshelf Surface for in Situ Book Searching and Storing Support, *Proceedings of the 2Nd Augmented Human International Conference*, AH '11, ACM, pp. 2:1–2:8 (2011).
- [31] Matsushita, M., Iida, M., Ohguro, T., Shirai, Y., Kakehi, Y. and Naemura, T.: Lumisight Table: A Face-to-face Collaboration Support System That Optimizes Direction of Projected Information to Each Stakeholder, *Proceedings of the 2004 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work*, CSCW '04, ACM, pp. 274–283 (2004).
- [32] 宮田章裕,瀬古俊一,青木良輔,橋本遼,石田達郎,伊勢崎隆司,渡辺昌洋,井原雅行: デジタルサイネージとモバイル端末を連携させた複数人同時閲覧のための情報提示システム, 情報処理学会論文誌, Vol. 56, No. 1, pp. 106–117 (2015).
- [33] 文部科学省: 平成 25 年度学校における教育の情報化の実態等に関する調査結果, http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/zyouhou/1350411.htm (2015/01/10 確認).
- [34] 大塚商会: LED の原理・仕組み・構造について, <http://www.otsuka-shokai.co.jp/products/led/principle.html> (2015/01/10 確認).
- [35] 景本純一: 実世界指向インターフェースの研究動向, コンピュータソフトウェア, Vol. 13, No. 3, pp. 196–210 (1996).

- [36] Ryokai, K., Marti, S. and Ishii, H.: I/O Brush: Drawing with Everyday Objects As Ink, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '04, ACM, pp. 303–310 (2004).
- [37] 阪口紗季: 多波長赤外光を用いた拡張影の生成手法に関する研究, 関西大学総合情報学研究科修士論文 (2014).
- [38] Sakaguchi, S., Tanaka, T., Shinoki, R. and Matsushita, M.: Shadow++: A System for Generating Artificial Shadows Based on Object Movement, *ACM SIGGRAPH 2012 Posters*, SIGGRAPH '12, ACM, p. 119:1 (2012).
- [39] SAMSUNG: Samsung SUR40 with Microsoft® PixelSense™, Electronic Catalog, <http://www.samsung.com/jp/consumer/computersperipherals/monitors/lfdlcd/LH40SFWTGC/XJ> (2015/01/10 確認).
- [40] セイコーエプソン株式会社: ビジネスプロジェクター エプソンの電子黒板, Electronic Catalog, <http://www.epson.jp/products/offirio/emp/ekokuban/> (2015/01/10 確認).
- [41] 篠木良: Vision Based AR を用いた電子端末の情報表示方式の拡張に関する研究, 関西大学総合情報学研究科修士論文 (2014).
- [42] 総務省: 情報通信白書 〈平成 26 年版〉, 日経印刷 (2014).
- [43] 田所淳: Beyond Interaction : クリエイティブ・コーディングのための openFrameworks 実践ガイド, ビー・エヌ・エヌ新社 (2013).
- [44] 田中琢磨: 赤外光の波長特性を利用したマーカの提案とその光学特性の検証, 関西大学総合情報学部卒業論文 (2011).
- [45] 田中琢磨: 多波長の赤外光を用いたインタラクティブ・サーフェスのための情報貼付方式に関する研究, 関西大学総合情報学研究科修士論文 (2013).
- [46] 田中琢磨, 阪口紗季, 松下光範: 複数波長の赤外光源を用いた物体認識手法, 情報処理学会 第 74 回全国大会講演論文集, No. 4, pp. 365–366 (2012).
- [47] 田中悠, 牛田啓太, 杉田馨, 苗村健, 原島博, 島田義弘: 壁とパーソナル空間の交わりを情報環境にするシステム i-wall, 映像情報メディア学会誌, Vol. 56, No. 9, pp. 1500–1505 (2002).
- [48] 東納ひかり, 阪口紗季, 田中琢磨, 松下光範: 透影モーション: 異なる波長の赤外光を用いた動的な不可視影の生成, 情報処理学会インタラクション 2013, 3EXB–04 (2013).
- [49] TOSHIBA: 東芝赤外 LED GaAlAs 赤外発光: TLN231(F) (2004).

- [50] Villar, N. and Gellersen, H.: A Malleable Control Structure for Softwired User Interfaces, *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, TEI '07, ACM, pp. 49–56 (2007).
- [51] Wagner, D. and Schmalstieg, D.: ARToolKitPlus for Pose Tracking on Mobile Devices, *Proceedings of the 12th Computer Vision Winter Workshop*, CVWW '07, pp. 139–146 (2007).
- [52] Weiss, M., Wagner, J., Jansen, Y., Jennings, R., Khoshabeh, R., Hollan, J. D. and Borchers, J.: SLAP Widgets: Bridging the Gap Between Virtual and Physical Controls on Tabletops, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '09, ACM, pp. 481–490 (2009).