

修士論文

可視光通信プロジェクタを用いた
映像とのインタラクションに関する研究

2008 年 2 月 4 日

指導教員 原島 博 教授

東京大学大学院 情報理工学系研究科

電子情報学専攻 66414

木村 翔

内容梗概

拡張現実感 (AR:Augmented Reality) とは、現実世界にコンピュータの情報を重ね合わせることで、補足的な情報を与える技術であり、近年でも積極的に研究が続けられている。拡張現実感では HMD(Head Mounted Display) をはじめとした電子デバイスを用いてユーザに情報を提示する手法が主流であったが、プロジェクタを用いて実環境に直接情報を提示する手法も提案されてきている。情報を直接実環境に提示することで、ユーザに特殊な機材等を保持させることなく情報を提示することが可能になる。しかし、実環境中に様々な情報が一度に提示されると、景観を損ねたり、人間が自分にとって必要な情報が分かりづらくなってしまうという問題が生じる。

一方で、情報機器の急速な性能向上や普及に伴い、近い将来にはロボットなどの情報機械がわれわれの生活に入り込んでくると予想できる。こうした状況下においては、人間に対してのみならず、機械に対しても情報を提示する必要がでてくる。機械に対する情報提示手法としては、バーコードや QR コードなどの ID を用いる手法が提案されてきており日常でもよく見かけるが、これらの ID は人間にとっては意味のない記号であり、必ずしも効果的な情報提示とはいえない。

実環境に提示される情報には人間に見せたい情報もあれば、カメラなどの機械だけに対して提示したい情報もあるため、全てを提示してしまうのは得策ではない。つまり、情報を提示したい対象や目的に応じて、情報を分けてデザインする必要がある。

本研究では、不可視情報を用いた情報提示の一環として、空間分割型可視光通信システムの提案を行う。空間分割型可視光通信とは、映像の中に機械を制御するための情報を埋め込む技術であり、映像と強く結びついた情報提示が可能になる。実際には、高速に情報を切り替えることができるデバイスを用いることで、プロジェクタの各ピクセルに可視光通信の原理を実装し、高速のビットパターンとして信号埋め込みを可能としている。本論文では、空間分割型可視光通信を実現するプロジェクタ（可視光通信プロジェクタ）を実装し、可視光通信プロジェクタを用いたインタラクション手法に関して述べる。具体的には埋め込まれた情報を、単一のフォトセンサを用いて映像の中から 1 点で情報を読み取るアプローチと、高速度カメラを用いて映像の中から複数の情報を同時に読み取るアプローチの 2 方向から、インタラクションの可能性について研究を行った。

フォトセンサを用いて情報を取得するアプローチにおいては、テーブル型システムを作成し、テーブル上に提示されている映像にフォトセンサ付きの受信機を置くと、埋め込まれた情報が提示されるシステムを実装した。多数の受信機を同時に利用可能であるという、空間分割型可視光通信の利点を発揮するテーブル型システムにおいて、その特徴を生かしたアプリケーションを実装した。

高速度カメラを用いて映像の中から複数の情報を同時に読み取る、ProCam システムにおいては、可視光通信プロジェクタと高速度カメラの同期を必要としないアルゴリズムを提案・実装を行った。さらに、壁面などに投影したプロジェクタ映像に高速カメラ付きモニタを向けると、映像中に埋め込まれた情報を読み出してカメラ映像に情報を重畳した映像をモニタに提示するアプリケーションを実装した。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本論文の背景	2
1.2	本論文の目的	2
1.3	本論文の構成	2
第 2 章	関連研究	4
2.1	はじめに	5
2.2	ユビキタス情報環境構築のための実世界の拡張	5
2.2.1	拡張現実感 (Augmented Reality:AR)	5
2.2.2	Spatially Augmented Reality	6
2.2.3	Display-Based Computing	8
2.3	不可視情報による拡張現実型情報提示	9
2.3.1	赤外光を用いた手法	10
2.3.2	高速デバイスを用いた手法	13
2.3.3	色感度を利用した手法	18
2.3.4	ステガノグラフィ	19
2.4	赤外可視変換素材を用いた選択的情報提示	20
2.5	本章のまとめと提案手法の位置づけ	21
第 3 章	映像と連携してメタ情報を発信するテーブル型ディスプレイ EmiTable	24
3.1	はじめに	25
3.2	先行研究	25
3.2.1	概要	25
3.2.2	基本原理	25
3.2.3	投影・送信システム	26
3.2.4	映像への埋め込みアルゴリズム	27
3.2.5	受信端末	28
3.2.6	アプリケーション	29
3.3	テーブル型リアスクリーンへの拡張	30
3.3.1	テーブル型情報環境	30
3.3.2	EmiTable	30
3.3.3	アプリケーション	32
3.4	本章のまとめ	33
第 4 章	可視光通信プロジェクタと高速度カメラを用いたユビキタス情報環境	36
4.1	はじめに	37
4.2	可視光通信プロジェクタと高速度カメラを用いたユビキタス情報環境の提案	37

4.3	ハードウェア構成	38
4.4	信号埋め込みアルゴリズム	39
4.4.1	基本アルゴリズム	39
4.4.2	静止画への埋め込みアルゴリズム	39
4.4.3	アルゴリズムの検証実験	41
4.5	重心不変マーカの提案	46
4.6	評価実験	46
4.6.1	実験概要	46
4.6.2	時間分解能における実験	47
4.6.3	空間分解能における実験	47
4.6.4	考察	48
4.7	インタラクティブなアプリケーションの提案	48
4.8	本章のまとめ	48
第 5 章	結論	50
5.1	本研究の成果	51
5.2	今後の展望	51
5.2.1	可視光通信プロジェクタ	52
5.2.2	テーブル型システム	52
5.2.3	可視光通信プロジェクタ - 高速度カメラシステム	53
付録 A	赤外可視変換素材を用いた選択的情報提示	54
A.1	はじめに	55
A.2	コンセプト	55
A.3	システムの基本構成	55
A.4	赤外可視変換素材	57
A.4.1	赤外輝尽蛍光	57
A.4.2	アップコンバージョン蛍光	59
A.5	素材に関する実験	60
A.5.1	実験の目的・内容	60
A.5.2	実験結果	61
A.5.3	素材の実験のまとめ	66
A.6	赤外 LED によるマトリクスディスプレイ	68
A.7	赤外情報の投影に関する基礎実験	69
A.7.1	実験の目的	69
A.7.2	実験内容・結果	69
A.7.3	赤外情報の投影に関する実験のまとめ	70
A.8	本章のまとめ	72
	謝辞	73
	参考文献	74
	発表文献	79

図目次

2.1	マーカの認識	6
2.2	2次元マトリックスコード	6
2.3	ARToolKit	7
2.4	Active Cyber Code	7
2.5	Data Tiles	8
2.6	Virtual Glassboat	8
2.7	KARMA	8
2.8	Shader Lamps	9
2.9	Display-Based Computing	10
2.10	Augmented Coliseum	10
2.11	RFIG Lamps	10
2.12	ビジョンベーストラッキング	11
2.13	不可視マーカ	12
2.14	透明マーカ	12
2.15	MultiAudable	12
2.16	CoBIT	12
2.17	触覚情報提示システム	13
2.18	秘映プロジェクタ	14
2.19	IR アノテーション	14
2.20	赤外可視ハイブリッドプロジェクタ	14
2.21	可視光通信	15
2.22	Smart Light	16
2.23	Instant Replay	16
2.24	高速モーションキャプチャシステム	17
2.25	DMD	17
2.26	Snared Illumination	18
2.27	パターン光の埋め込み	18
2.28	マーカの埋め込み	19
2.29	色感度の違いを利用した不可視情報の埋め込み	20
2.30	サイバースカッシュ	20
2.31	Grid Onput	20
2.32	赤外可視変換素材を用いた選択的情報提示	21
2.33	提示される可視情報と不可視情報の関係性	22
2.34	不可視情報の提示デバイスと受信デバイスの関係性	23
3.1	空間分割型可視光通信の基本原理	26

3.2	DMD	27
3.3	映像中に情報を埋め込む原理	28
3.4	空間分割型可視光通信のシステム構成図	28
3.5	受信端末の構成と外観	29
3.6	地図映像の天気情報の提示	30
3.7	EmiTable	31
3.8	EmiTable の概観	31
3.9	可視光通信プロジェクタ (PVLC Projector)	31
3.10	クロスワードパズル	32
3.11	数独パズル	33
3.12	走る人	34
3.13	スイッチ付き受信機	35
3.14	展示の様子	35
4.1	システムの基本構成図	37
4.2	高速度カメラ (HAS-220)	38
4.3	基本アルゴリズム	40
4.4	静止画への埋め込みアルゴリズム	40
4.5	提案アルゴリズムによるメタ情報の埋め込み	42
4.6	信号読み出し (左: 撮影画像, 右: 差分画像)	43
4.7	処理の流れ	44
4.8	情報の重畳	44
4.9	ビューアー	45
4.10	小型モニタ	45
4.11	重心不変のマーカー	46
4.12	時間分解能における認識率	47
4.13	空間分解能における認識率	47
4.14	アプリケーション概要	49
A.1	電子デバイスを用いた手法	55
A.2	赤外可視変換素材を用いた提案手法	55
A.3	実装イメージ図	56
A.4	一般的な蛍光	57
A.5	赤外輝尽蛍光	58
A.6	ブロードバンドタイプ	58
A.7	放出波長の特性	58
A.8	IR センサカード	58
A.9	感度特性	58
A.10	放出波長特性	58
A.11	赤外検知カード	59
A.12	感度特性	59
A.13	アップコンバージョン蛍光	59
A.14	ヤグターキー	60
A.15	輝度測定実験の模式図	61

A.16 発光の様子 (赤外可視変換蛍光材ブロードバンドタイプ)	61
A.17 予備励起時間ごとの輝度の時間変化 (ブロードバンドタイプ)	62
A.18 投光器と素材の距離ごとの輝度の時間変化 (ブロードバンドタイプ)	63
A.19 発光の様子 (IR センサカード)	64
A.20 予備励起時間ごとの輝度の時間変化 (IR センサカード)	64
A.21 投光器と素材の距離ごとの輝度の時間変化 (IR センサカード)	65
A.22 投光器と素材の距離と輝度の関係 (PTIR シリーズ)	66
A.23 素材の比較実験結果	67
A.24 文字情報の投影	68
A.25 赤外 LED マトリクスディスプレイ	69
A.26 赤外 LED マトリクスによる赤外情報の提示	69
A.27 赤外光の強さ測定の実験模式図	70
A.28 文字情報の投影の模式図	71
A.29 赤外投光器による赤外情報の投影	71

表目次

4.1	画像中に埋め込んだ信号	47
A.1	赤外輝尽蛍光	59
A.2	アップコンバージョン蛍光	60
A.3	素材の比較	66
A.4	プロジェクタの投影光中の赤外光	70

第1章

序論

1.1 本論文の背景

拡張現実感 (AR:Augmented Reality) [1] とは現実世界にコンピュータの情報を重ね合わせることで、補足的な情報を与える技術であり、近年でも積極的に研究が続けられている。拡張現実感とは実世界に即して仮想情報を与えるため、より直感的で分かりやすい情報提示が可能であり、医学など他の研究分野にも応用され実用化が進んでいる技術である。拡張現実感では HMD(Head Mounted Display) をはじめとした電子デバイスを用いてユーザに情報を提示する手法が主流であったが、プロジェクタを用いて実環境に直接情報を提示する、拡張現実型の手法も提案されてきている。情報を直接実環境に提示することで、ユーザに特殊な機材等を保持させることなく情報を提示することが可能になる。しかし、実環境中に様々な情報が一度に提示されると、景観を損ねたり、人間が自分にとって必要な情報が分かりづらくなってしまうという問題が生じる。

一方で、情報機器の急速な性能向上や普及に伴い、近い将来にはロボットなどの情報機械がわれわれの生活に入り込んでくると予想できる。こうした状況下においては、人間に対してのみならず、機械に対しても情報を提示する必要が出てくる。機械に対する情報提示手法としては、バーコードや QR コードなどの ID を用いる手法が提案されてきており日常でもよく見かけるが、これらの ID は人間にとっては意味のない記号であり、必ずしも効果的な情報提示とはいえない。

実環境に提示される情報には、人間に見せたい情報があれば、カメラなどの機械だけに対して提示したい情報もあるため、全てを提示してしまうことは効果的な情報提示とは言えない。つまり、情報を提示したい対象や目的に応じて、情報を分けてデザインする必要がある。具体的には、人間に対して見せたくない情報は、人間の視覚特性を利用するなどして人間に気づかせないように提示することが求められている。

その手法としては、特殊な素材を用いる、人間の目の色感度の違いを利用するなどの人間の視覚特性に着目した手法など、様々な手法が考えられ、様々なシーンを想定した研究がなされている。不可視情報を用いることで、人間の気づかせない形で機械に対する情報を配置することができ、何の仕掛けも感じないものから情報を得たり、それらとインタラクションすることが可能になる。

1.2 本論文の目的

本研究では、不可視情報を用いた情報提示の一環として、空間分割型可視光通信システムに関する研究を行う。空間分割型可視光通信とは、映像の中に機械を制御するための情報を埋め込む技術であり、映像と強く結びついた情報提示が可能になる。具体的には、高速に情報を切り替えることができるデバイスを用いることで、プロジェクタの各ピクセルに可視光通信の原理を実装し、高速のビットパターンとして信号埋め込みを可能としている。映像自体にメタ情報が埋め込まれていることにより、キャリブレーションや位置計測などを必要とせず、システム構成が複雑にならないという利点がある。また、映像と深く結びついたメタ情報の埋め込みが可能である。

本論文では、以上の空間分割型可視光通信の利点を生かした、人間と映像とのインタラクションに関して、提案・実装することを目的とする。具体的には、映像中に埋め込まれたメタ情報を読み出すにあたり、単一のフォトセンサを用いて映像の中から 1 点で情報を読み取るアプローチと、高速度カメラを用いて映像の中から複数の情報を同時に読み取るアプローチの 2 方向から研究を進めた。本論文では、それぞれのアプローチの原理と実装に関して述べる。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第2章では、関連研究を紹介する。まず、実世界に仮想世界の情報を配置する拡張現実型の情報提示に関して説明する。次に本研究のテーマでもある、不可視情報を用いた拡張現実型の情報提示について、不可視情報の種類に基づいて説明する。最後に、これまでに提案されてきた不可視情報による拡張現実型の情報提示について、提示する対象や情報の取得手法の面からまとめる。

第3章では、映像と連携してメタ情報を発信する、空間分割型可視光通信に関して説明する。不可視情報として、情報を時間軸方向への埋め込みによる情報提示に関して述べる。情報を取得する手法としてはフォトダイオード付きの受信機を用い、プロジェクタ投影面上の1点での情報を取得する。

まず、先行研究を説明し、テーブル型情報環境システムへの拡張、その利点に関して説明する。さらに、新たに開発したアプリケーションや、今後のアプリケーションの可能性についてもまとめる。

第4章では、可視光通信プロジェクタと高速度カメラを用いたユビキタス情報環境について述べる。不可視情報は第3章と同じく、空間分割型可視光通信に基づいて、映像中に埋め込む手法を用いる。一方、情報を取得する手法としては高速度カメラ用い、プロジェクタ投影面上の1点のみならず、複数の点から同時に情報を取得することを考える。

まず、可視光通信プロジェクタと高速度カメラのフレームレートの違いが問題にならないアルゴリズムの提案を行う。続いて、提案システムの実装・撮影実験についてまとめる。最後に、提案システムにおけるインタラクティブなアプリケーションの提案・実装について述べる。

第5章では、本研究の成果をまとめるとともに、今後の展望について述べる。

第2章

関連研究

2.1 はじめに

人間や機械に対して情報を提示する手法は様々であり、今日でも非常に多くの研究がなされている。本論文で提案する、人間には見えない情報を用いた情報提示に関する手法は、近年、活発に議論がなされている分野であり、人に対する情報と機械に対する情報を、どのように分けてデザインすると、効果的なインタラクションが実現できるのかに関して、様々な手法が提案されている。

以下では、人間が気づかないところに機械に対する情報がたくさん配置されているというユビキタス情報環境を構築するにあたり、実世界に仮想世界の情報を埋め込む手法、実世界に提示する情報として不可視情報を用いたシステムを挙げる。さらに、可視情報と不可視情報の提示の仕方、人に対する情報と機械に対する情報をどのように分けてデザインしているのか、情報を提示・取得するデバイスに関しての分類などを行いつつ、本研究の位置づけを行う。

2.2 ユビキタス情報環境構築のための実世界の拡張

本項ではユビキタス環境を構築するために、実環境に様々な仮想世界の情報埋め込む手法、また、提示された情報の取得方法についてまとめる。

2.2.1 拡張現実感 (Augmented Reality:AR) [1]

拡張現実感とは実世界に仮想世界の情報を重畳合成して提示を行う技術のことである。実環境の物体に即して情報が提示されるため、視覚的に分かりやすくユーザに情報を提示することができ、提示される情報も状況に応じて様々なものが考えられ、実装されている [2]。拡張現実感による適切な情報提示を行うためには、ユーザや対象物体の位置を正確に計測する必要がある。計測を容易にする手段として物体に ID を持たせる手法があり、事物に貼り付けられた様々な可視、あるいは電子的なタグが提案されてきた。

バーコードなどの非電氣的なタグは電氣的なタグに比較して情報量はあまり持てないものの、印刷するだけで安価に大量に作ることができるため、日常生活において普及してきた。

拡張現実感への応用として、暦本は安定して認識できるマーカーとして矩形の 2 次元マトリックスコード [3] を設計した。2 次元マトリックスコードには 5×5 の 25 ビットの情報が格納可能であり、マーカを認識することによりその座標系を求め、3 次元的に整合された付加情報を重ねて表示する (図 2.1)。これにより、オブジェクトの説明を行ったり、本の絵を立体的に表示することが可能になる (図 2.2)。なお、システムは小型ディスプレイとカメラを組み合わせたシステムとなっている [4]。

また、加藤らはコンピュータビジョン (Computer Vision:CV) を用いて文字や画像をそのままマーカとして持ちいる手法 (ARToolKit) を提案している [5]。マーカ認識によって得られた情報を元にして、透過型頭部搭載ディスプレイ (HMD:Head Mounted Display) 上に CG を重畳して表示するシステムである (図 2.3)。さらに最近では印刷されたコードの一部を隠すことで違うコードとして認識させることができ、インタラクティブに重畳する情報を変えることができる Active CyberCode [6](図 2.4) も考案されている。

一方で電氣的なタグは、非電氣的なタグより多くの情報を持つことができ、書き換えることができるなど自由度が高いものが多い。元々は流通業界でバーコードに代わる商品識別・管理技術として研究が進められてきた。しかし、それだけ留まらず社会のユビキタス化・自動化を推進する上での基盤技術として注目が高まっている。

Data Tiles [7](図 2.5) では RFID タグの付いた透明のアクリルタイルをフラットパネルディスプレイの上に置くことにより、タグ情報に応じて異なるアプリケーションをタイル領域に提示する。このように RFID のついたオブジェクトを、ユーザーに RFID リーダーの近くに置かせることで、オブジェクトの ID を認識

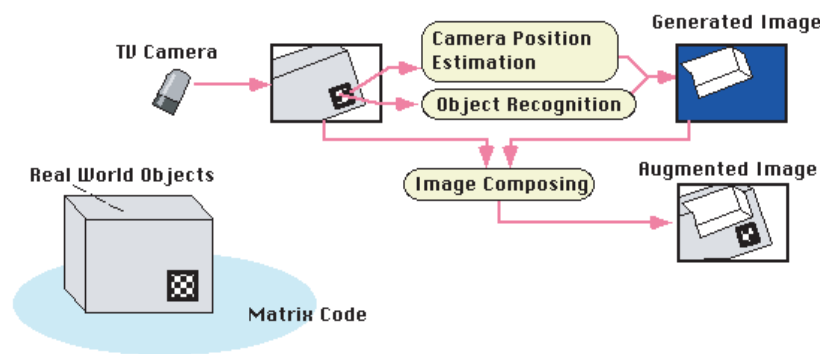


図 2.1: マーカの認識 (文献 [2] より)



図 2.2: 2次元マトリックスコード (文献 [3] より)

をさせる使い方もあるが、一方で環境中に RFID を遍在させておき、その中を RFID リーダーが動くことにより位置を認識する研究も行われている。Virtual Glassboat [8] ではカートの先端に RFID リーダーを用いて、床に埋め込まれた ID を読み込み場所に応じた情報を提示する (図 2.6)。また、最近では広い範囲の床面に RFID を配置し、床の上を RFID を仕込んだスリッパを履いた人が歩くと、インタラクションを行うインテリマット [9] も報告されている。

また、Feiner らの KARMA [10](図 2.7(a)) では超音波センサによって得られた位置情報を元にユーザに補助的な情報を HMD 上に表示する (図 2.7(b))。レーザービームプリンターの保守タスクを題材にして、支援情報をユーザに分かりやすく提示するシステムである。

実世界を拡張するにあたって、実世界の情報を取得する手法の 1 つであるタグを用いる手法には、マーカや RFID など様々な形式がある。そのいずれにおいてもカメラやバーコードリーダーを用いて取得した情報を HMD などのメガネ型ディスプレイや小型モニタに表示するために、ユーザは HMD などの電子機器を装着・保持する必要がある。

2.2.2 Spatially Augmented Reality

HMD や小型モニタの着用・保持を必要とする拡張現実感の研究が行われている一方で、仮想世界の情報をプロジェクタから直接投影することで、仮想世界と現実世界の融合をはかる研究が行われている [65]。仮想情報を現実世界に直接投影するという特徴は、

- ユーザが特別な機材を装着する必要がない
- 仮想情報を与えられた物体に直接触れることが出来る
- 仮想情報をユーザ間で共有し円滑なコミュニケーションが可能

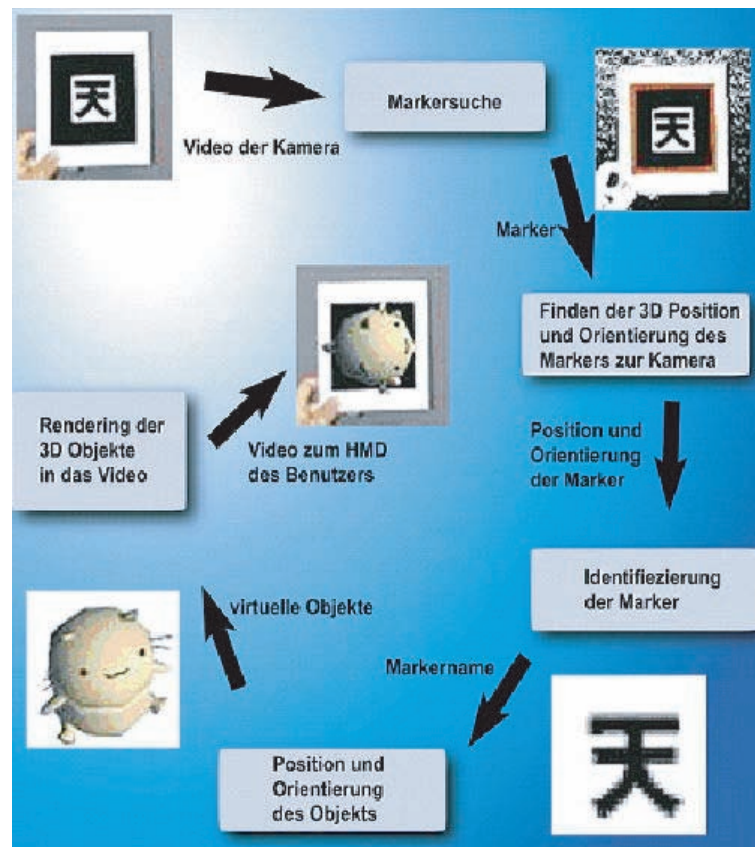


図 2.3: ARToolKit (文献 [5] より)



図 2.4: Active Cyber Code (文献 [6] より)

といった利点が挙げられる。

Raskar らはプロジェクタと再帰性反射材を用いて、3 次的にリアルな視覚情報を実現している [11]。再帰性反射材とは、光を入射してきた方向にそのまま反射する素材である。再帰性反射材を塗布した実物体 (図 2.8(a)) にプロジェクタによりテクスチャ情報を投影すると、実世界上で空間的な情報を提示する (図 2.8(b))。

また Dynamic Shader Lamps [12] は赤外センサや磁気センサを用いることでシーンの変化を検出し、Shader Lamps を動的空間にも対応させようという研究である。ペン型の入力デバイスを用いることで、インタラクティブにオブジェクト上に絵を描くことが可能となっている。

以上のように HMD などのメガネ型デバイスを必要としない拡張現実感を実現する手法としてプロジェクタを用いて仮想情報を直接現実世界に投影する手法が研究されてきた。一方で、プロジェクタなど本来は人間に対して視覚情報を提示するために使用されてきた装置を、機械などに対しても情報を提示することで、実世界指向の新たな情報システムを構築していこうという試みがある。



図 2.5: Data Tiles (文献 [7] より)



図 2.6: Virtual Glassboat (文献 [8] より)

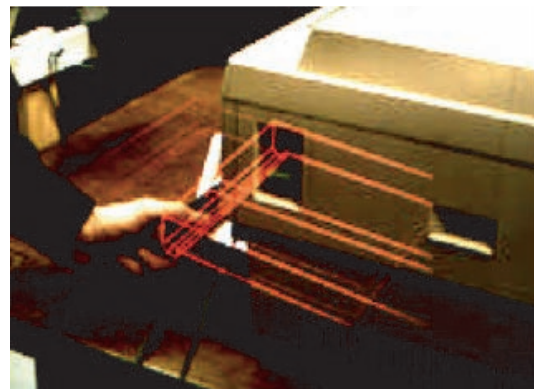


図 2.7: KARMA (文献 [10] より)

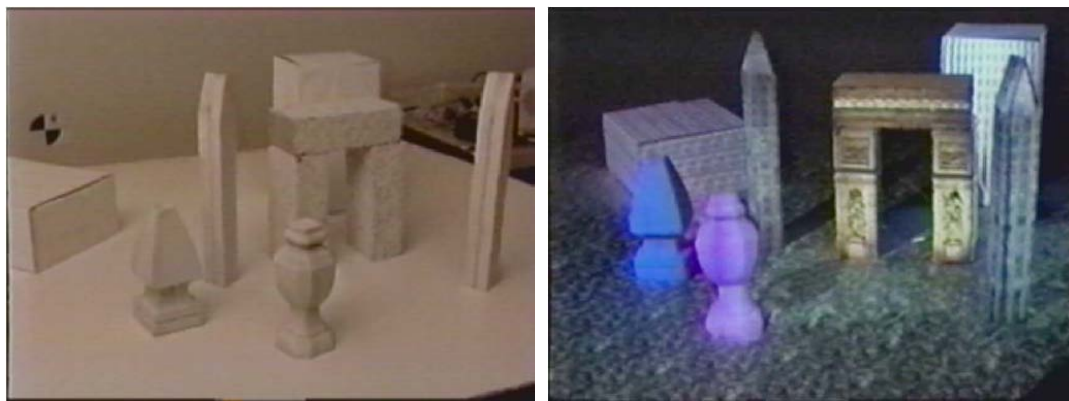
2.2.3 Display-Based Computing

従来、ディスプレイは実世界の情報提示対象として人間を想定している場合がほとんどであったが、実世界に存在する機械や家電製品、ロボットなど人間以外の人工物に対して積極的に情報を提示する Display-Based Computing(以下 DBC) [13] という考え方が提案されている。

DBC ではカメラとプロジェクタとは双対をなすシステムであると考え、プロジェクタから実世界に情報を投影し、位置計測や物体制御を行う。従来のカメラを用いて位置計測を行う場合、図 2.9(a) のように素子からの ID を受け取ることで位置情報を計算していたが、ディスプレイを計測に用いた場合、図 2.9(b) のように濃淡・カラーの違う情報をグリッド状に出すことで、フォトランジスタを持つデバイス自体が自身の位置を把握することができる。ディスプレイを用いる DBC の考え方は、位置情報を与えるのみならず、何らかの情報(機械制御情報など)を、ディスプレイから直接受信デバイスに与えることが可能であり、システムを複雑化することを防ぐ。

DBC の利点としては

- 空間の光学的構造化による計測の高速化
- 計測の高精度化



(a) 未投影時

(b) 投影時

図 2.8: Shader Lamps (文献 [11] より)

- 複数の素子を同時に容易に計測可能

が挙げられる。

また、上記のようにして計測した位置情報を元に指標画像を投影することで小型車の制御を行い、Augmented Coliseum(図 2.10) というゲーム環境を構築している [14, 15, 18, 19]。また、最近では投影面から離れた受光部に対しても情報を提示できる Augmented Coliseum Plus [23] が提案されている。Augmented Coliseum Plus では、人型ロボットを用いたインタラクションを実装している。受光部は人型ロボットの頭上に配置されているが、幾何学的な補正を行うことにより、受光部と投影面とのずれを解消している。また、奥行き距離を計測することも試みている [22]。さらには、蛍光ペンや顕微鏡などの様々な場合を想定したアプリケーション [17, 21, 24] や、測定の高速化 [20] も行われており、急速に研究が進められている分野となっている。

新居らの再帰性光通信 [41–44] は、再帰性反射材にグレイコードパターンを送り、反射された光を撮影することで、オブジェクトの位置把握を行う ProCam システムである。グレイコードパターンを切り替えることで、位置情報を送っており、DBC の概念と非常に近いものを持つ。

また、Raskar らの RFIG Lamps [25] では、RFID に可搬型プロジェクタを組み合わせることで RFID の位置を同定している。RFID に向けてピクセル毎に異なるパターン光を照射することで、RFID はプロジェクタとの位置関係を把握して、電波で位置情報を送信する仕組みである (図 2.11)。再帰性光通信では、再帰性反射材の持つ性質によって、反射されられた光を撮影することで位置を測定していたが、RFIG では位置を特定するまでは DBC の概念を用い、オブジェクトの持つ情報を送信するという、デジタル情報伝送の部分は RFID が担っている。

2.3 不可視情報による拡張現実型情報提示

2.2 節で述べたように、プロジェクタやディスプレイなどの情報提示デバイスを用いて、人間だけでなく機械に対しての情報も実環境に提示する手法が考えられてきているが、人間にとって必要な情報と機械にとって必要な情報は必ずしも一致しない。たとえば、DBC では人間に見せたい映像であり、デバイスに見せたいのは制御に必要な指標画像である。人間に必要な情報と機械に必要な情報をすべて提示すると、情報量は非常に多くなり、

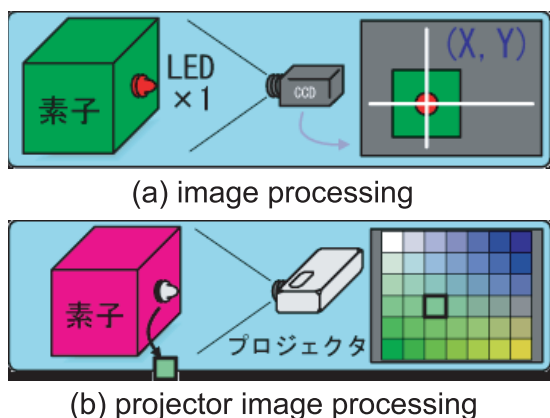


図 2.9: Display-Based Computing (文献 [13] より)



図 2.10: Augmented Coliseum (文献 [19] より)

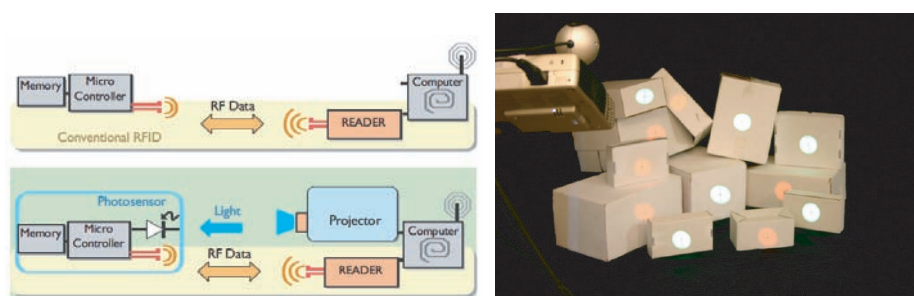


図 2.11: RFIG Lamps (文献 [25] より)

- 景観を損ねてしまう
- 自分にとって必要な情報の判別に苦勞する
- インタラクションに失敗する可能性がある

といった問題が生じる．そこで人間に必要な情報と機械に必要な情報を分けてデザインするという試みが行われている．つまり，機械にとって必要な情報は人間に見えないように提示しようとするものである．

その1つの解として，人間の見えない位置(オブジェクトの底面)にマーカを貼り付ける手法 [65] があるが，そのマーカを認識するために大がかりな仕掛けが必要(オブジェクトの底面にマーカがある場合，床に何らかの仕掛けが必要)となるなど，様々なアプリケーションを考える場合，現実的でない場合が多い．このような問題を解決する有効な手法の一つとして，人間の目には見えない形で空間中に情報を提示する技術が盛んに研究されている．

本節では人間の視覚特性に着目し，カメラなどの機械には判別可能であるが，人間には見えない情報提示手法に関して，不可視情報をどのように提示し，認識していくのかについてまとめる．

2.3.1 赤外光を用いた手法

本項では，人間の目には知覚できない不可視情報を用いた情報提示に関してまとめる．

人間の目には見えない情報として，情報を波長方向にシフトする手法，つまり赤外光を用いる手法が考えられる．紫外光も人間には見えない情報であるが，情報を取得するデバイスがあまり充実していないことや，人間にとって危険なものであるため，あまり用いられていない．一方で赤外領域では，赤外 LED，赤外線カメラをはじめとした，赤外領域での情報を提示・取得するデバイスが普及している．それに伴っ

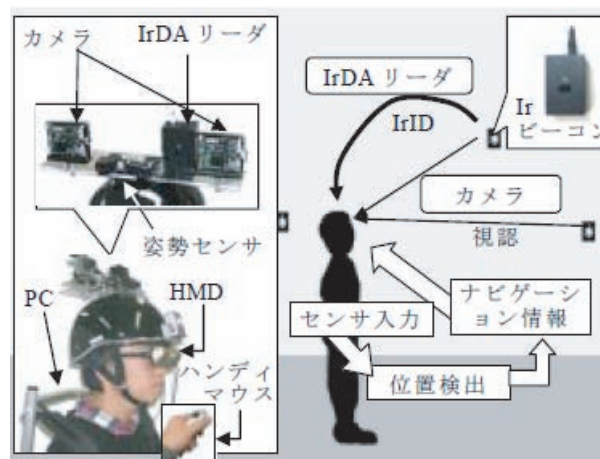


図 2.12: ビジョンベーストラッキング (文献 [26] より)

て、実世界から情報を取得する、あるいは実世界に情報を提示するにあたり、可視光の情報に加えて不可視光である赤外光の情報をを用いる技術の検討がなされてきた。

電子機器を用いた手法

3次元空間中の既知の点列をカメラで撮影し、その点の画像座標からカメラの位置や姿勢を推定するアルゴリズムは古くから知られているが、前田らのビジョンベーストラッキング [26] では屋内に赤外線ビーコンを配置し、人間には点列が見えないように工夫している。ユーザ側の赤外線カメラで配置されたビーコンを捉えることにより、屋内でのユーザの位置情報が取得可能となる (図 2.12)。別途ジャイロセンサによってユーザの姿勢も求めることで、地図などのナビゲーション情報を HMD 上に重畳する AR ナビを実現している。この研究では人間の目には見えない ID 情報を環境中の物体に付加することで、人間には気づかせないが、機械にはどこにいるのか分からせる仕掛けを環境中に配置しているということになる。

電子機器を用いない手法

一方で、人の目には見えない手法として、透明な素材と組み合わせて使う研究が行われている。システムがシンプルに構成できることに加えて、ユーザインターフェースなど電子機器を埋め込むのに制約があるような場合においても有効な手法である。

中里らは半透明の再帰性反射材を利用した不可視の画像マーカー (図 2.13) を実環境に配置する手法を提案している [27]。屋内において天井や壁に設置し、再帰性反射マーカーに向けて赤外光を照射する。再帰性反射材には光源方向に強く光を反射する特性があるため、このマーカーにフラッシュを当てて撮影するとマーカーを鮮明に捉えることができる。また、文献 [28] においては、400 個を超える透明マーカーを天井に配置し評価実験を行い、精度良くユーザの位置・姿勢を推定することが可能であったと報告されている。

筧らは赤外光は反射するが可視光は透過する透明な素材をマーカー (図 2.14) として用い、赤外光を投影した様子を赤外カメラで撮影しマーカー認識を行っている [29]。このマーカーは LumisightTable 上のオブジェクトとして用いられ、従来の問題点であったオブジェクトの遮蔽という問題を解決した。

情報を実環境に投影する手法

ビジョンベーストラッキングは赤外線ビーコンを用いて位置情報を全方位に発信していたのに対し、赤外ビームをスポットライトのように指向性を持って一部分だけに照射することで位置に応じた個別の情報

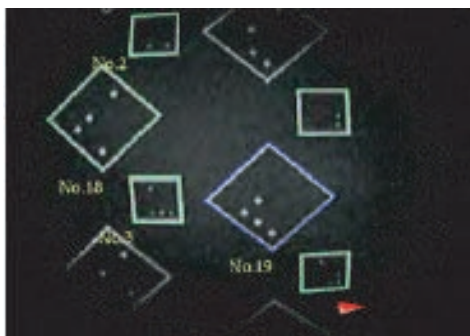


図 2.13: 不可視マーカ (文献 [27] より)



図 2.14: 透明マーカ (文献 [29] より)



図 2.15: MultiAudable (文献 [31] より)

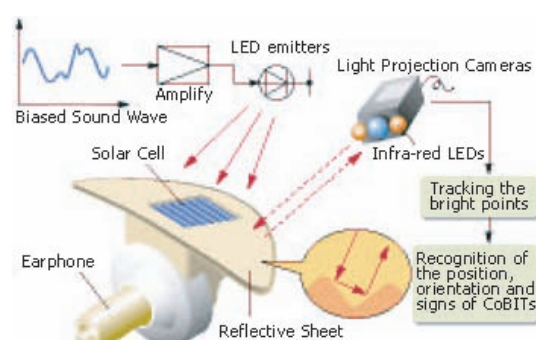


図 2.16: CoBIT (文献 [32] より)

提示を行う研究も行われている。西村らは赤外線発信器を天井に2次元的に配置し、それぞれが個々の位置に対応した座標値を発信することで位置情報を送信している [30]。ユーザが赤外線受信器のついたモバイル端末をもって歩くことで、端末は常にユーザの位置を認識することが可能となる。モバイル端末にはMP3デコーダーや振動モーターなどが搭載されており、ユーザの位置に応じた映像、音声、触覚情報などが提示される。

また、楠らが開発した MultiAudable [31](図 2.15) では赤外 LED により赤外ビームを投影し、特定の場所だけに情報を提示している。これによりボードの上に場所に応じ、複数の情報が宿されている。ユーザは CoBIT [32](図 2.16) と呼ばれる小型無電源情報端末をボード上におくことで、場所に応じて違う音情報を得ることが可能になる。

MultiAudable では空間を分割して情報を提示していたが、さらに高い解像度を持って情報を提示する手法としてプロジェクタを用いる手法が挙げられる。プロジェクタは映像投影デバイスであるが、1ピクセルごとに異なる個別の情報提示が可能なデバイスと考えることもできる。しかし通常のプロジェクタを用いて情報を提示しようとすると映像は人間の目には意味のない情報となり、実環境に提示すると景観を損ねるなどの問題が生じる。人間の目には見えないが、機械だけに見える手法として、岩中らは可視光プロジェクタの映像に赤外光プロジェクタの情報を重ねる手法を提案している [33](図 2.17)。可視光プロジェクタによって投影された情報に重ねて付加的な情報を投影することにより視覚と触覚の情報を同時に提示するシステムになっている。

同じくプロジェクタに着目した研究として白井らの秘映プロジェクタ [34](図 2.18) が挙げられる。赤外光によりマーカを投影し、そのマーカを携帯端末の赤外線カメラによりキャプチャすることでマーカに埋め込まれた ID がデコードされ ID に対応する情報が携帯端末上に提示される。また秘映プロジェクタでは文

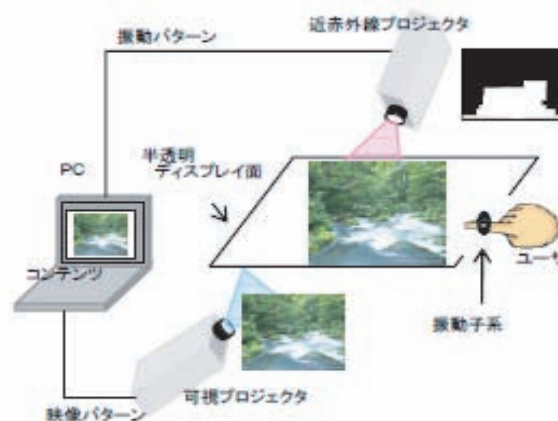


図 2.17: 触覚情報提示システム (文献 [33] より)

字や記号など、人間が直接認識可能な情報を可視光と重ねて提示し、情報を得たい人だけが赤外光で提示された情報にアクセスすることが出来る選択的な情報提示手法も提案している。これは人間に見せる情報と機械に見せる情報を分けているのではなく、人間に見せる情報の中でもアノテーション情報と詳細情報というように、優先度をつけて分類して提示している。さらに、八谷による“みることは信じること [35]”というメディアアート作品も提案されている。このシステムでは、専用のビューアを通してみると、赤外光で提示された日記を読み取ることができるという作品である。

文献 [33] や秘映プロジェクタにおいては、使用している赤外光プロジェクタは市販されているプロジェクタの可視光をカットしたものであった。詳しくは A.7 にて述べるが、市販されているプロジェクタにも若干の赤外光が含まれている。一方で、松岡は赤外光のみを投影するプロジェクタを試作した [36]。受信側には PDA を用いることを想定しており、高精細にマーカを配置するデバイスとして赤外光プロジェクタを提案している。試作されたプロジェクタでは 10m 程度の距離において、信号の送受信の実験を行っている。

さらに Lee らは 1 台のプロジェクタから、赤外光と可視光を各々制御して同時に投影可能なプロジェクタ [37] を実装した。光源には 24 個の可視 LED と 24 個の赤外 LED からなるものを用い、プロジェクタの光源に組み込んでいる。図 2.20 において、左側の映像が可視光によって提示された情報であり、右側の映像が赤外光によって提示された情報である。さらに赤外光によって位置情報を提示し、ポインティングデバイスを当てると、先端に取り付けられた受信部から位置情報の信号を受信し、すぐさま指し示している位置に、可視光によって情報を重ねることを実装している。このシステムでは、可視光による情報と赤外光による情報を同じプロジェクタから投影しているため、キャリブレーションを必要としない。

2.3.2 高速デバイスを用いた手法

人間の目には見えない情報として、時間軸方向に情報を埋め込む手法が挙げられる。人間の可視光に対する視覚特性は波長によって異なるものの、およそ 60Hz であり、それ以上では視覚的なちらつきは認識できない。つまり、人間の目には知覚できない早さで情報を切り換えることで、人と機械とに違った情報を提示することが可能になる。そのような情報を高速で切り換えることが出来るデバイスとしては、LED (Light Emitting Diode) と DMD (Digital Micromirror Device) が挙げられる。以下ではこれらのデバイスを用いた研究について紹介する。

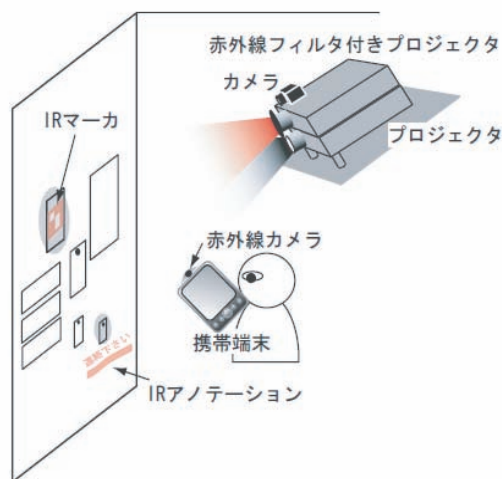


図 2.18: 秘映プロジェクタ (文献 [34] より)



図 2.19: IR アノテーション

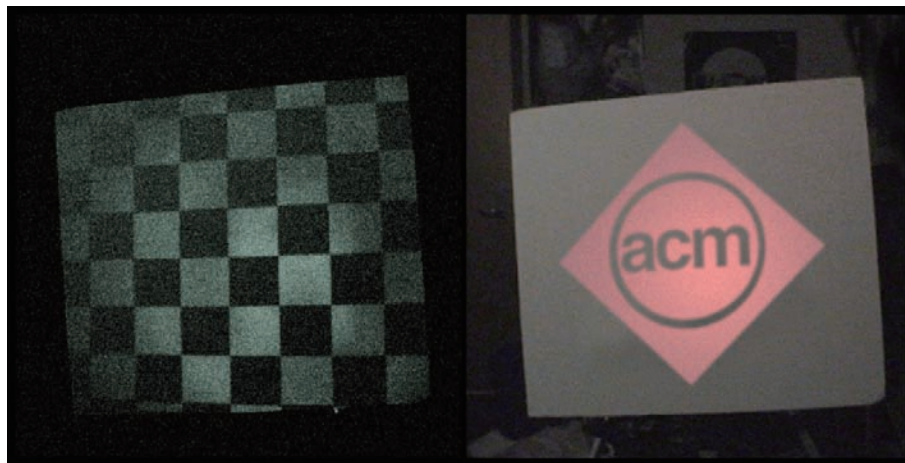


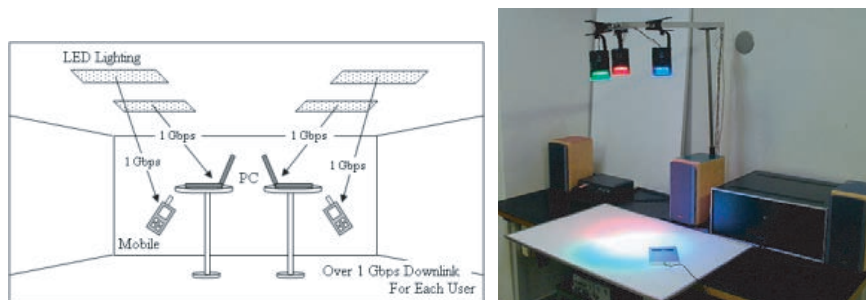
図 2.20: 赤外可視ハイブリッドプロジェクタ (文献 [37] より)

LED を用いた研究

省エネルギー照明として研究が進められてきた LED は、長寿命、小型、低消費電力といった優れた特徴を持ち、次世代の照明用光源として注目されている。

2.2.1 節で述べた ID は近距離でしか利用できないため理想的な環境でしか実現していない。そこで松下らは目の前から遠くまでのユーザが見ている事物を区別するのに十分な空間解像度を持つ認識として ID Cam [38] を提案している。ID Cam では LED の早い応答速度、及び電氣的に制御できることに着目し、LED の点滅パターンを ID、その点滅を認識できる高速カメラに用いることで 10m の距離でもタグの認識が可能であることを示した。また、屋外においても、看板の照明や巨大ディスプレイ、ビルの警告灯などがビーコンになることが可能であると提案している。

その中で照明を通信源として用いる可視光通信 (Visible Light Communication: VLC) の研究は着々と進められている [39]。可視光通信では高輝度白色 LED 照明を高速点滅させ、ビット情報を可視光に載せて通信を行う (図 2.21)。可視光を用いている利点として、人体への影響を考えた場合、電波などに比較して出力を上げられることや、普段から使用している照明をそのままそのまま利用可能であるというユビキタ性を備えていることが挙げられる。また、信号機や該当ディスプレイなどの既存の社会インフラにも適用



(a) 概念

(b) Sound Spot

図 2.21: 可視光通信 (文献 [39] より)

できる，GPS の使えない屋内や地下でも使用できるといった特徴があり実用性が高い．

岩崎らは，自動車交通システムの高度な情報化・知能化を図る ITS の中で，路車間の可視光通信を用いたシステムを提案している [40]．信号から可視光通信によって情報を送信し，道路を走る車に情報を送る仕組みである．可視光通信における一般的な受信素子はフォトダイオードであるが，この研究では高速度カメラによって撮影している．受信端末として高速度カメラを用いた場合，撮影速度に対して処理速度が間に合わなくなるが，FPGA によって信号の領域を割り出し，処理する領域を減らすことでリアルタイム計測を可能にしている．

LED の高速性を利用した研究としては，LED を並列に並べることでプロジェクタの作成を目指す，Smart Light [45,46] の研究がなされている．1 画素を 1 つの LED で表すことにより，本来の画像に加えて，見えないグリッド状のデータグリッド状のデータストリームを重畳して投影している．これにより画素ごとに違った情報を高速で通信することを可能にしている．

Smart Light の目指すものは，本研究で提案する，空間分割型可視光通信において目指すものと一致している．しかし，目的に対するアプローチがことなる．Smart Light は LED を並べて配置しており，可視光通信機能をもったピクセルをアレイ化することによって映像を作り出すというアプローチをとっている．一方，PVLC ではプロジェクタを原点として，各々のピクセルに可視光通信の機能を実装しており，アプローチが異なる．よって，単位時間あたりに送信可能な情報量は Smart Light の方が多いが，PVLC では高解像度の画像が提示できているという違いがある．

さらに LED プロジェクタを用いて，グレイコードパターンを高速で送信し，オブジェクトの高速なトラッキングを実現するホッケーゲーム Instant Replay [47] も提案されている．Instant Replay ではホッケーのパックのトラッキングを，500fps というカメラでは実現できないスピードで行っている．

さらに Lasker らは，高速の位置計測システムをモーションキャプチャに用いている [48]．グレイコードのパターン光を送信し，計測対象につけられた受信機が，自らの位置を計算することにより，500Hz という高速なモーションキャプチャを実現した．

DMD(Digital Micromirror Device) を用いた研究

DMD [50] とは米 Texus Instruments 社が開発した，マイクロミラーが XGA(1024×768) アレイ状に並び，高速に角度を制御することが出来るデバイスである (図 3.2(a))．マイクロミラーの角度により，光源からの光をスクリーン方向に導くか，吸収材方向に導くかが決まる．この原理によって画素ごとに異なる制御が可能となる．その特性は，ミラー角度が $\pm 12^\circ$ の 2 値で変化し，ミラーの切り換え速度は最大で 8kHz と

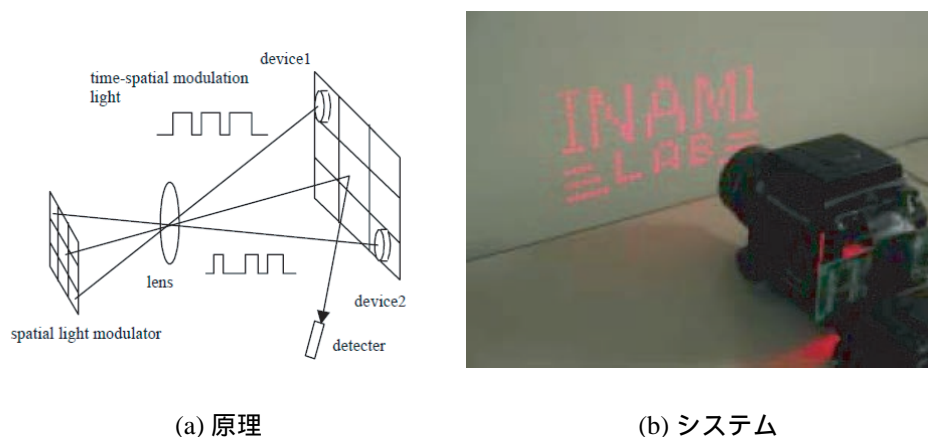


図 2.22: Smart Light (文献 [45] より)

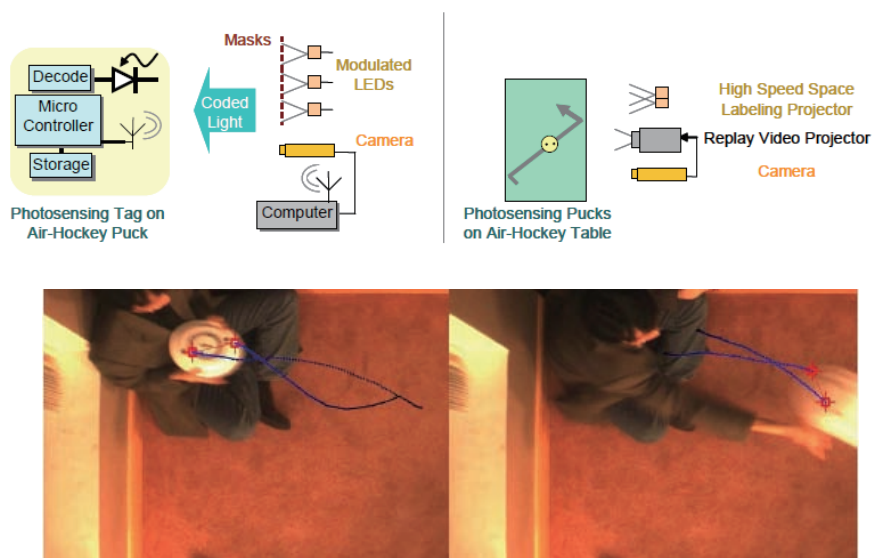


図 2.23: Instant Replay (文献 [47] より)

高速である．DMD は日常的なデバイスとして主に DLP(Digital Light Processing) プロジェクタの光学系に組み込まれている．

この DMD の特性を利用した研究として Snared Illumination [51] が挙げられる．Snared Illumination システムでは裸眼で見える映像を最も多く投射し，各眼鏡で見せる映像は時分割で一瞬だけ投射する．裸眼で見た場合は，眼鏡で見せる一瞬の映像は視覚できない．しかし，その表示タイミングに合わせて液晶シャッターが閉じる眼鏡をかけると，挟み込まれたサブフィールド映像だけを確実に見ることで，裸眼で見たときとは違った映像が見ることができる．サブフィールドの映像は 1 つに限らず，3 つの眼鏡を用い，それぞれにシンクロしたサブフィールド映像を挟み込むことで，3 つの眼鏡それぞれで異なった映像を見せることになる．また，左右の目に視差を感じさせる映像を見せるようにしているため，立体視にもなっている．

Snared Illumination は，高速に切り換えた映像を人間に見せることが目的であったために，映像の切り換えと同期の取れたメガネが必要であった．Cotting らは映像の中に形状計測のためのスリット光を表示して，同期した高度カメラで観測する手法を提案している [54]．人間の目には映像のみを見せるためにメガ

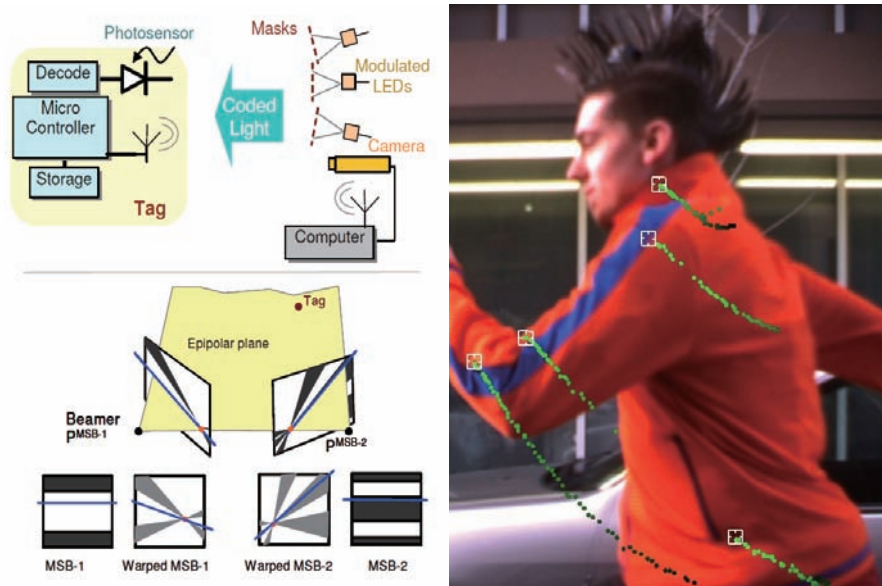


図 2.24: 高速モーションキャプチャシステム（文献 [48] より）

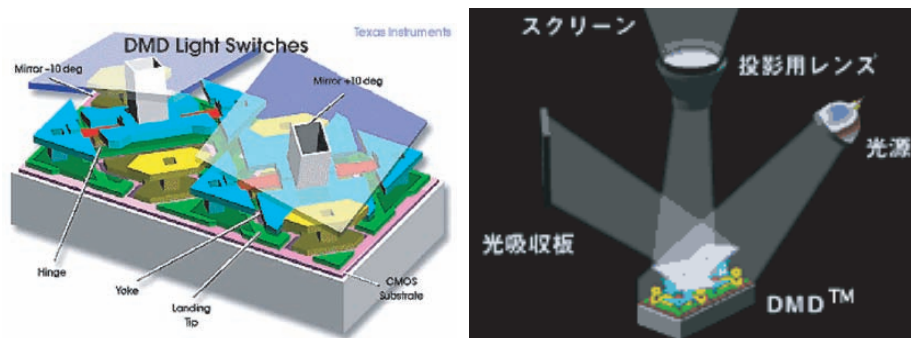


図 2.25: DMD

ネは必要としない．同期した高速カメラでパターン光を測定することで，画面にかざした手の形状認識を行うことが可能になる，この仕組みにより，ユーザは特別な機械を用いることなく，手のみを用いてインタラクティブに映像を操作することが可能になっている．

パターン光ではなく，具体的な位置に基づいた情報を埋め込んでいる研究として，Grundhöfer らは映像中に 2 次元のバーコードを埋め込み，同期したカメラで取得する手法を提案している [62, 63]（図 2.28）．人間の視覚特性に着目し，人間が近くできないように情報を埋め込んでいる．また，映像中に 2 次元のバーコードを埋め込んでいるため，位置に応じた情報を提示可能である．アプリケーションとしてテレビスタジオにおける CG の重畳などに利用したものを提案している．

一方，北村らは映像のピクセル毎に可視光通信による信号埋め込み（空間分割型可視光通信 [56–60]）を提案している．各々のピクセルに対して PWM(Pulse Width Modulation) の冗長性を利用し，同じ輝度成分に対して異なった情報を埋め込んでいる．認識素子としてカメラを用いず，ディスプレイ映像から映像に重ねておいた小型デバイスの制御している．つまり，空間分割型の可視光通信であると同時に，前述の Display-Based Computing の一つと捉えることもできる．このシステムでは，プロジェクタからスクリーンへの一方向の通信であるため，スクリーンのシーン変化への対応はできていない．しかし，後述する色感度

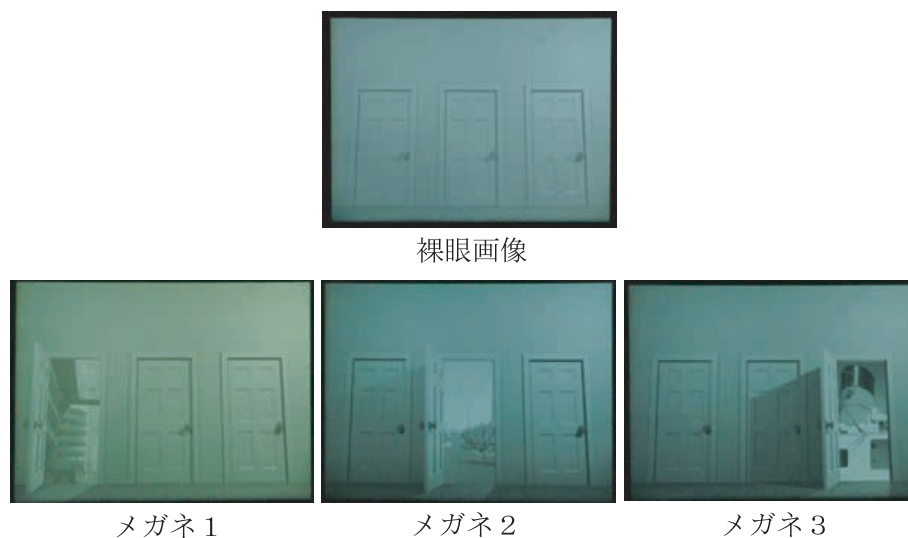


図 2.26: Snared Illumination (文献 [51] より)

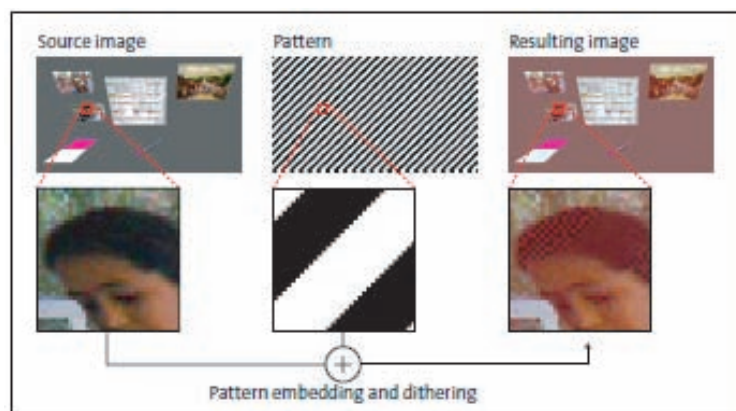


図 2.27: パターン光の埋め込み (文献 [54] より)

を利用した手法やステガノグラフィーでは画像や映像の劣化が起こっているのに対し，この手法ではPWMの冗長性を利用しているため画像の劣化は起こらない．詳しくは3.2節において述べる．

同様の研究として柏木らによる可視光通信を用いた誘導に関する研究 [61] も行われている．高速なプロジェクタにより提示された位置情報を，肩につけたフォトセンサによって情報を受信する．高速なプロジェクタを作製しPWMによる冗長性を利用して，人間が知覚できない情報を投影している点は，空間分割型可視光通信と同じである．しかし，空間分割型可視光通信では人間に見える情報として日本地図などの情報を提示しているのに対して，柏木らの手法では，灰色の画像中に情報を埋め込んでいるにとどまっている．

また，最近ではDMDを映像投影のデバイスとしてではなく，光スイッチとして用いることによるリアルタイム形状計測 [55]，立体ディスプレイ [52]，カメラ [53] に応用した使い方も提案されており，様々な分野において注目を浴びているデバイスである．

2.3.3 色感度を利用した手法

前述の研究は赤外光，LED・DMDなどの高速デバイスといった特殊なデバイスを用いていたが，永井らはカメラ1台・可視光プロジェクタ1台というシンプルな構成でインタラクティブ性を備えたプロジェ

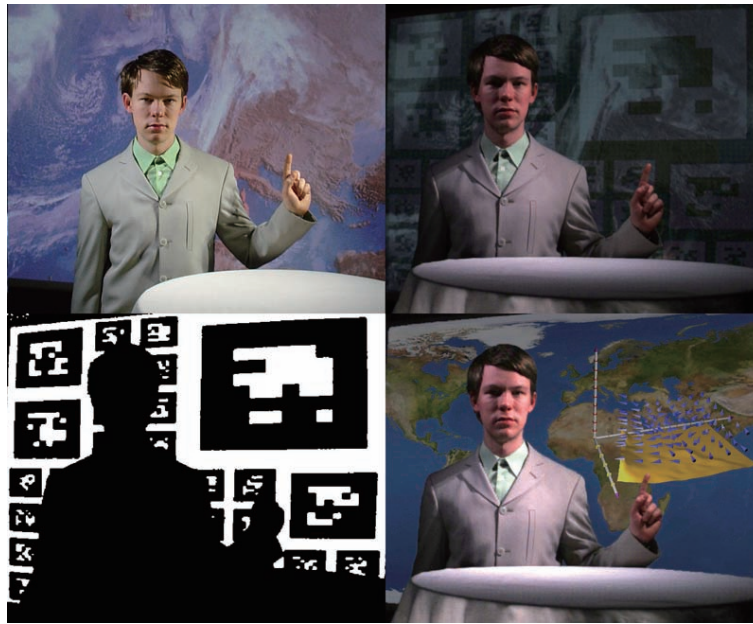


図 2.28: マーカの埋め込み (文献 [62] より)

クタ型複合現実感を実現している [64, 65] .

プロジェクタ映像を投影するスクリーン面の物体を認識するために埋め込むパターンを生成する際に、カメラと人間の視覚の感度特性の違いに着目している。つまりカメラと人間が同じ色差を観察したとき、カメラの色感度特性上の距離と人間の色感度特性上の距離は異なる (例えば人間にとって、白背景画像の中で黄色は判別しづらいがカメラでは判別可能)。これを利用し、人間には知覚しづらいが、カメラには判断可能なパターンを投影画像中に埋め込む。不可視情報として、図 2.29 のように、グレイコードパターンを埋め込み、形状計測に利用している。

2.3.4 ステガノグラフィ

ステガノグラフィ [66] とは、カラー静止画像に目に見えないデータを埋め込む技術である。似た技術として電子透かしがあるが、ステガノグラフィは画像そのものではなく画像に埋め込まれたデータが重要である。一方、電子透かしは、画像そのものが重要である。そのため、著作権者などの情報を埋め込み、偽造やコピーから著作権の保護をしています。電子透かしにはお札のように透かしがわかる「可視透かし」と、画像や音楽などのデジタルコンテンツのように実際には目に見えない「不可視透かし」がある。

ステガノグラフィでは画像を細かいいくつかのブロックにわけ、隣り合うブロックの階調レベルの高低により 0 か 1 かを決定している。情報を埋め込む際に階調レベルを変化させているために、人間には知覚しづらいレベルでの画像の劣化が起こっている。

ステガノグラフィを用いた研究としては、NTT のサイバースカッシュ [67] が挙げられる。印刷した画像の中に誘導したいホームページの URL などを示す電子透かしを埋め込み、その画像を Web カメラやカメラ付き携帯電話で撮影するだけで、指定されたホームページなどに自動的にナビゲートする。

また、富士通では、埋め込めるデータ量は限られるものの、一般家庭で使われているプリンタの解像度で印刷可能、携帯電話に搭載されているカメラの解像度で認識が可能であるというより日常生活に親和性の高いステガノグラフィの研究が行われている。

さらに最近では印刷型ステガノグラフィ技術を利用した、見えないドットコード “Grid Output” [68] (図

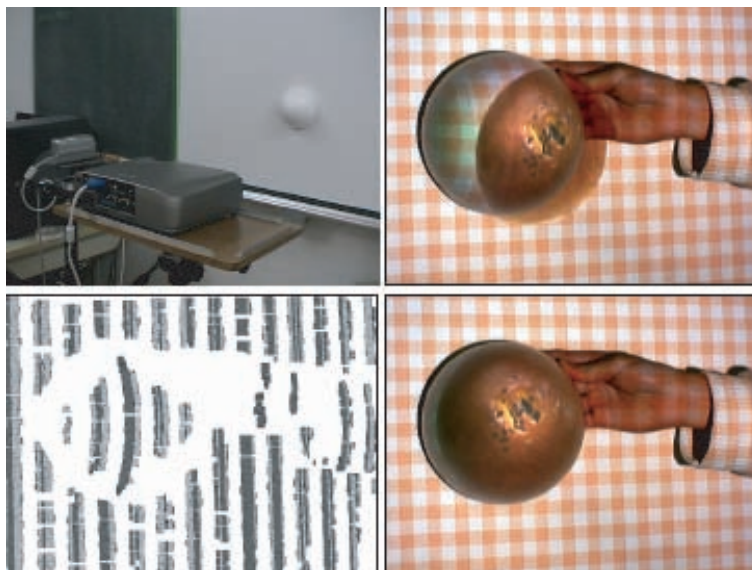


図 2.29: 色感度の違いを利用した不可視情報の埋め込み (文献 [64] より)

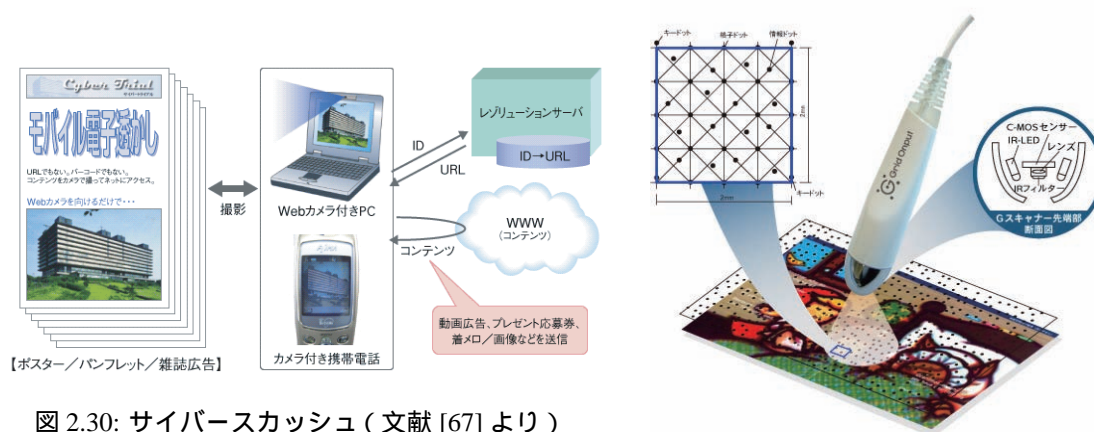


図 2.30: サイバースカッシュ (文献 [67] より)

図 2.31: Grid Onput (文献 [68] より)

2.31) という技術も実装されている。ペン型のデバイスを用いて、紙面をタッチすることにより、見えないドットコードを読み取るという仕組みである。

2.4 赤外可視変換素材を用いた選択的情報提示

このような流れの中で、我々は赤外プロジェクタと赤外光を可視光に変換する特殊な素材を用いた、選択的情報提示システムの構築に取り組んできた [83]。従来研究では、プロジェクタなどを用いて投影された情報を、赤外線カメラおよびディスプレイを用いてユーザーに見えるような方法が提案されてきたが、本手法では、電子的なデバイスを必要としない赤外光の情報提示手法を提案する。

基本的なシステム構成は、“赤外情報のプロジェクション”と“スクリーンにおける赤外開始変換”からなる。実装イメージ図を、図 2.32 に示す。赤外プロジェクタによって実世界に提示された情報は、赤外光であるため人間は知覚することができない。しかし、赤外可視変換スクリーンを持つユーザーは、赤外情報を投影できるプロジェクタからの投影光に素材をかざすことで、赤外情報を可視化して見ることができる。

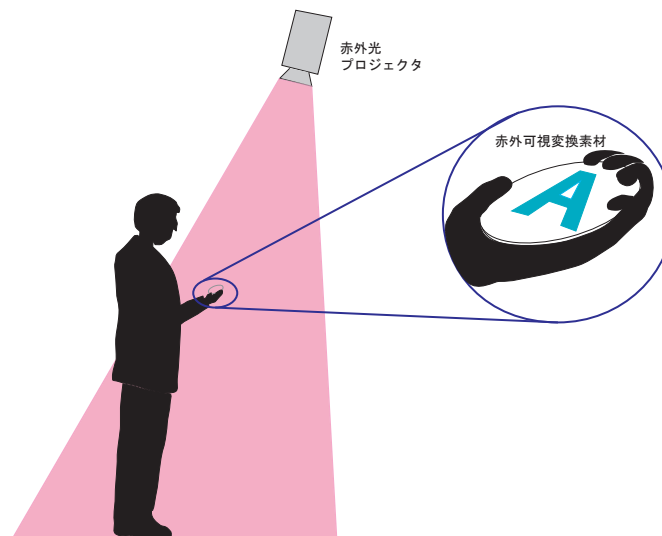


図 2.32: 赤外可視変換素材を用いた選択的情報提示（文献 [83] より）

また，赤外可視変換素材を持たない人はその情報を見ることができない．
本システムの特徴は，

- 電子デバイスの着用・保持を必要としない
- 赤外光で情報を投影するために周りの景観を損ねることがない
- 電子ディスプレイに提示するよりも大きさ・形の自由度が高い

ことが挙げられる．

また，電子デバイスを必要としないことから，ユビキタス情報社会への親和性を考えた場合，非常に適応力があるシステムであると考えられる．

一方，赤外プロジェクタの実装は

- 強い赤外光を発する光源がない
- 可視光に比べて波長が長いためエネルギーが低い
- 目に見えないため直接覗き込む可能性があり危険である

などの困難な理由から，実現できなかった．詳しくは付録 A を参照されたい．

2.5 本章のまとめと提案手法の位置づけ

本章では，プロジェクタなど光学デバイスを用いて実世界に情報を配置する手法，その中で，人に対する情報と機械に対する情報を，どのように分けてデザインしているのかについて，様々な手法や研究を紹介しまとめた．さらに，人間には知覚できないが，機械には認識できる情報を，原理の違いからまとめた．

不可視情報を提示するシステムを，提示する情報の種類に基づいて整理すると図 2.33 のようになる．横軸は，システムが不可視情報と同時に可視情報を提示しているか否かである．同時に提示されていない場合，実世界の物体に位置情報を付加させるなど，実世界の物体や位置に強く関係した情報を提示するシステムである．縦軸は，提示されている不可視情報が，文字や映像など人間が理解可能な情報であるのか，また，バーコードや信号のように機械によってデコードすることで初めて意味を持つ情報であるのかで分類

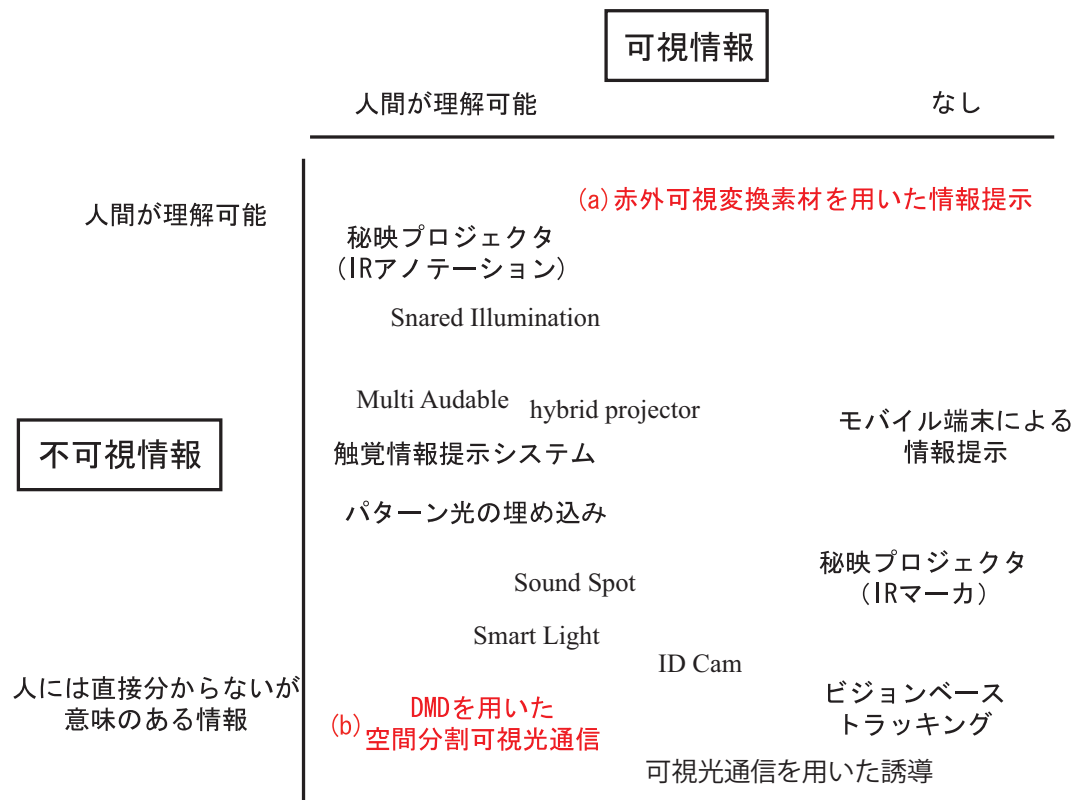


図 2.33: 提示される可視情報と不可視情報の関係性

している。

従来の研究は、不可視情報のみを空間中に配置するものが主流であったが、近年では、映像の中に不可視情報を重畳するなど、可視情報に対して強く関係のある不可視情報を埋め込む、研究が数多くなされている。

本論文では、第3章と第4章にて、前述の空間分割型可視光通信システムの原理と実装、さらにシステムの拡張やアプリケーションについて述べる。また、付録Aにて、2.4節で概要を述べた、赤外光で提示された情報を電子デバイスを用いずに取得することができる選択的な情報提示手法について述べる。

一方で、不可視情報を提示するデバイス、取得するデバイスの種類から分類した図を、図2.34に示す。Smart LightなどはLEDのアレイ化によってプロジェクタを構成しているため、プロジェクタかLEDのどちらに分類すべきか基準が曖昧であるが、パターン光を提示するのみに限らず、文字情報の投影などを実現しているため、今回はプロジェクタに分類した。

本研究で提案する(a)赤外可視変換素材を用いた情報提示システム、(b)DMDを用いた空間分割型可視光通信システムを赤字で示した。第3章で提案するEmiTableは、文献[61]やSmart Light[46]に近いシステム構成になっている。しかし、いずれも人間に対して見せる情報は十分な解像度をもった映像ではない。一方で、本論文で提案するEmiTableは、XGA解像度を持つ映像の中にメタ情報を埋め込むため、映像と人間とのインタラクションを実現しているところが異なる。

また、第4章で提案するProCamシステムは、パターン光の埋め込み[54]やマーカの埋め込み[62]に近いシステム構成になっている。しかし、どちらのシステムもプロジェクタとカメラの同期を必要としている。パターン光の埋め込みでは、パターン光を手などの形状計測に用いている、マーカの埋め込みでは、テレビスタジオなど限られた場所を想定しているため、同期を取ることに問題はないが、本研究では、多

受信デバイス 送信デバイス		カメラ	センサ
プロジェクタ	高速	可視光通信プロジェクタ+高速度カメラ パターン光の埋め込み (Cotting et al.) マーカの埋め込み (Grundhofer et al.)	EmiTable 可視光通信を用いた通信 (柏木ら) RFIG (Rasker et al.) Smart Light (Nii et al.)
	赤外	秘映プロジェクタ (白井ら) (IRマーカ・IRアノテーション) 赤外可視ハイブリッドプロジェクタ (Lee et al.)	赤外プロジェクタ (松岡) 触覚情報提示システム (岩中ら)
LED・ ビーコン	高速	LD Cam (松下ら) 路車間可視光通信通信 (岩崎ら)	可視光通信 (中川ら) Prakash (Rasker et al.)
	赤外	ビジョンベーストラッキング (中里ら) MultiAubable (楠ら)	Prakash (Rasker et al.) リモコン

図 2.34: 不可視情報の提示デバイスと受信デバイスの関係性

数のプロジェクタやカメラが混在するような状況でも、システムを複雑化せずにユビキタス情報環境を構築することを目指しており、プロジェクタと高速度カメラが同期を必要とするのは望ましくない。よって、本論文で述べる可視光通信プロジェクタと高速度カメラを用いた ProCam システムでは、両者の同期は必要としない点が、従来研究と異なっている。

第3章

映像と連携してメタ情報を発信する テーブル型ディスプレイ EmiTable

3.1 はじめに

本章では、人には映像を提示しつつ、同時に機械に対する情報も提示する、空間分割型可視光通信 (Pixel-level Visible Light Communication: PVLC) について述べる。空間分割型可視光通信は、前述の 2.5 節の図 2.33 の (b) にあたる研究として位置づけられ、人間の見る映像中に機械に対するビット情報を埋め込むという概念である。文献 [56–60] で提案されている手法では、DMD(Digital Micromirror Device) を用い、プロジェクタ投影映像 (XGA 解像度) の各ピクセルの ON/OFF を高速で切り替えことにより、映像中に人間が知覚できないメタ情報を高速点滅信号として埋め込むことを可能にする。

本章では、空間分割型可視光通信の基本原則など先行研究について述べ、歪みのない映像を投影するための光学系を改善したプロジェクタの開発について述べる。さらに、テーブル型リアスクリーンへの拡張によるテーブル型情報環境 EmiTable の開発、新しく作成したアプリケーションに関してまとめる。

3.2 先行研究

3.2.1 概要

北村らは映像の中に人には知覚できない機械信号を埋め込み、人には通常の映像を提示しつつ、同時に機械を制御できるシステム (図 2.33(b)) の構築を目指し、可視光通信と DBC の考え方を基礎として、空間分割型可視光通信を提案してきた [56–59]。PVLC では、高速な光の切り替えを可能にするデバイスとして、DMD を用いたプロジェクタに着目し、その映像光の中に時間軸方向に機械を制御する付加信号を乗せる手法を用いている。これにより

- プロジェクタ映像の画素単位の位置精度を持つ位置依存型の可視光通信
- 人にはプロジェクタの空間型パターンを、機械には時間軸方向に埋め込んだ情報をそれぞれ同じ位置に提示できる DBC

を実現するシステムの構築を目指している。

同様のことを目指す研究として、新居らの Smart Light [45, 46] が挙げられる。Smart Light は LED をアレイ状に並べて配置しており、可視光通信機能をもったピクセルをアレイ化することによって映像を作り出すというアプローチをとっている。一方、PVLC ではプロジェクタを原点として、各々のピクセルに可視光通信の機能を実装しており、アプローチが異なる。よって、単位時間あたりに送信可能な情報量は Smart Light の方が多いが、PVLC では高解像度の画像が提示できているという違いがある。

以下では PVLC の基本原理、信号の送信・受信の仕組み、テーブル型ディスプレイへの拡張、実装されているアプリケーションについてまとめる。

3.2.2 基本原理

空間分割可視光通信の基本原則を図 3.1 に示す。図 3.1(a) の示すように、反転した 2 枚の白黒映像を高速に切り換えた場合、人間には残像効果により輝度が平均化された平坦な映像が知覚される。一方で、フォトダイオードをはじめとする高速に動作する機械にとっては、図 3.1(a) の Region A と領域 Region B では異なる信号が観測できる。これは、PWM(Pulse Width Modulation) においては、同じ輝度値を提示する場合でも、それを構成するビット表現は複数存在することを意味する。つまり、同じ輝度を異なるビット列で表現することが可能である。

PWM においては、あるピクセルの ON(白)/OFF(黒) を、人間の知覚の時間分解能を超える速度で切り換えた場合、短い時間内での ON と OFF の割合が同じであれば人間には同じ輝度に知覚される。それゆえ図

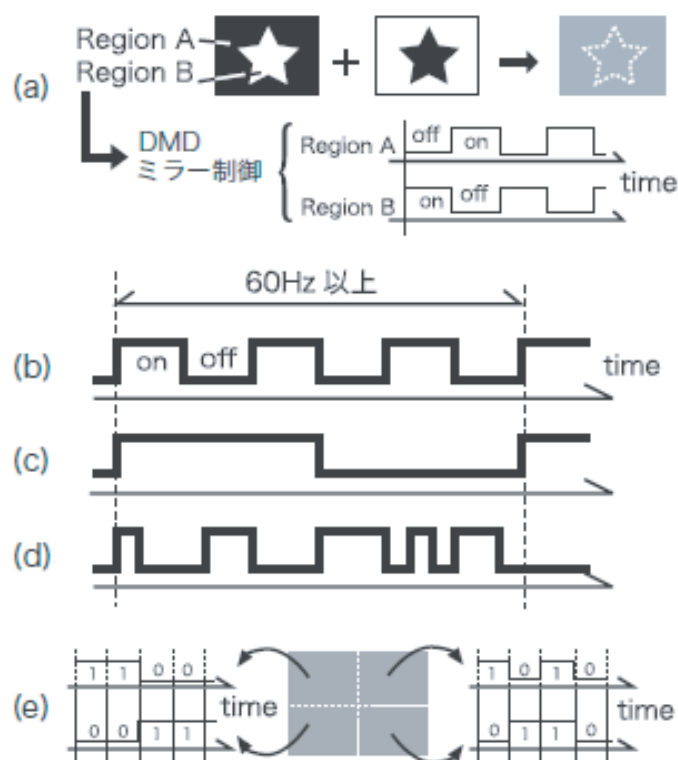


図 3.1: 空間分割型可視光通信の基本原理

3.1(b)(c)(d) は、ON/OFF の割合が等しいため人間には同じに見える。一方でフォトセンサなどの高速な応答性能を持つ機械に対しては、すべて違う信号として認識される。つまり、人間には同じように見えていても、機械に対しては違う情報を提示することが可能である。この PWM における ON と OFF の順序の冗長性を利用して人に知覚されない信号を埋め込み、位置に応じた可視光通信を実現する。

3.2.3 投影・送信システム

Digital Micromirror Device [50]

3.2.2 節で述べた原理を実現するにあたり、高速に切り換えるスイッチとして DMD(Digital Micromirror Device) を用いている。

DMD とは米 Texus Instruments 社が開発した、マイクロミラーが XGA(1024 × 768) アレイ状に並び、高速に角度を制御することが出来るデバイスである(図 3.2)。マイクロミラーの角度により、光源からの光をスクリーン方向に導くか、吸収材方向に導くかが決まる。この原理によって画素ごとに異なる制御が可能となる。その特性は、ミラー角度が $\pm 12^\circ$ の 2 値で変化し、ミラーの切り換え速度は最大で 8kHz と高速である。

DMD 装置として DMD Discovery 1100 Starter Kit (Texus Instruments 社) と、これを高速制御するための ALP ボード (ViALUX 社) を用いた。ミラー数は 1024 × 768、動作速度は最大 8kHz、ミラーの角度は $\pm 12^\circ$ 、最大で 2730 種類のミラー常置を高速切り換え可能である。

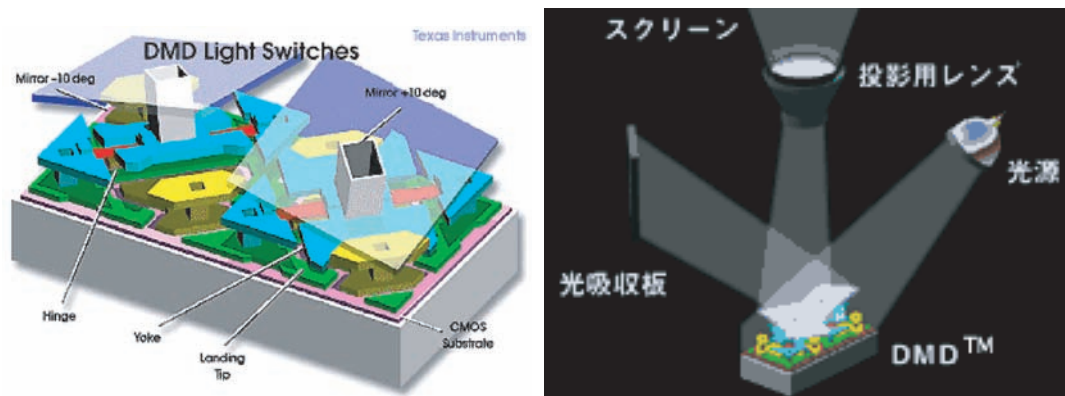


図 3.2: DMD

可視光通信プロジェクト

DMD は日常的なデバイスとして主に DLP(Digital Light Processing) プロジェクタの光学系に組み込まれている。DLP プロジェクタによる映像における各ピクセルの輝度値は、スクリーン方向に光を飛ばす時間(ON)と飛ばさない時間(OFF)の割合で表現される。DMD のミラー 1 枚がスクリーン上の 1 ピクセルに対応し、独立に ON/OFF を制御することにより、そのピクセルの輝度を作り出す。このようにして、DLP プロジェクタの映像は、人間にとっては滑らかな映像として認識される。

前述の原理で述べたように、PWM においては、短い時間の中での ON/OFF の割合が一定であれば、ON/OFF の順番には一定の自由度を確保できる(図 3.3)。一般に市販されているプロジェクタでは、DMD の切り替え速度が 120Hz 程度と遅いため、空間分割型可視光通信の機能を持たせることはできない。

本研究では、プロジェクタの各ピクセルにおいて可視光通信の機能を持たせるために、前述の DMD Discovery 1100 + ALP3 Starter Kit(Texas Instrument 社製)をプロジェクタの DMD 部分として用いた。これにより、DMD の切り替え速度が 8kHz の DLP プロジェクタが実装でき、各ピクセルの輝度提示の冗長性を利用して、人間に知覚できないメタ情報を埋め込むことが可能になる。

3.2.4 映像への埋め込みアルゴリズム

文献 [56–60] では 256 フレーム(bit) を 1 周期として PWM 制御を行っている。これにより、8bit を 1 ブロックとして 32 ブロックを 1 周期とした送受信を実現する。この 32 ブロックはその用途から 3 種類に分類される。具体的には 2 個の同期信号ブロック、15 個の情報埋め込みブロック、15 個の輝度補正ブロックである。それぞれの役割は以下のである。

- 同期信号ブロック (2 ブロック): 送信ビット列の始まりを示す信号である。なお、3.2.6 におけるアプリケーションにおいては、“0101010101010101” をスタートビットとしている。
- 情報埋め込みブロック (15 ブロック): 情報を埋め込むブロックである。120bit の情報を埋め込むことができるが、埋め込む情報はアプリケーションによって自由に設計できる。
- 輝度補正ブロック (15 ブロック): そのピクセルの輝度に合わせて、8bit に自由に ON/OFF を割り当てるブロックである。このブロックによって ON/OFF の割合を調整し、ピクセルの輝度を保つ。受信側ではこのブロックは意味を持たない情報となるため、無視される。

なお、情報埋め込みブロックと輝度補正ブロックは 15 ブロックずつである必要はなく、埋め込みべきメタ情報の量と、作り出すべき輝度の制約を満たす範囲で、自由に設計可能である。

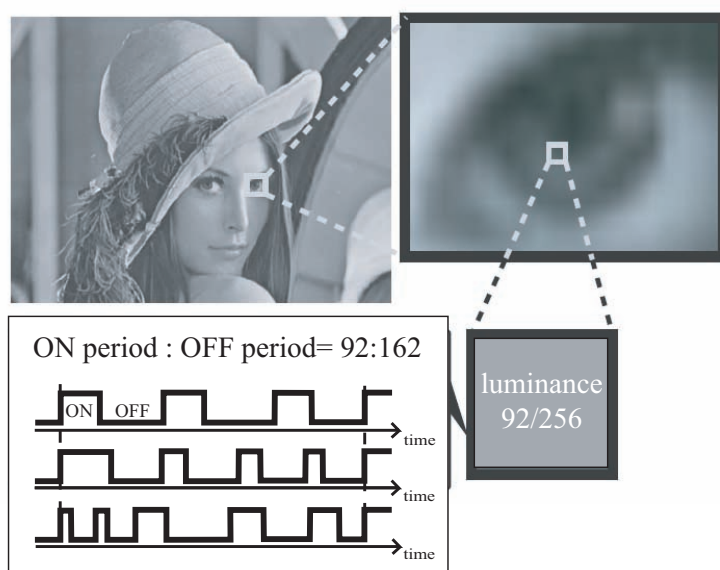


図 3.3: 映像中に情報を埋め込む原理

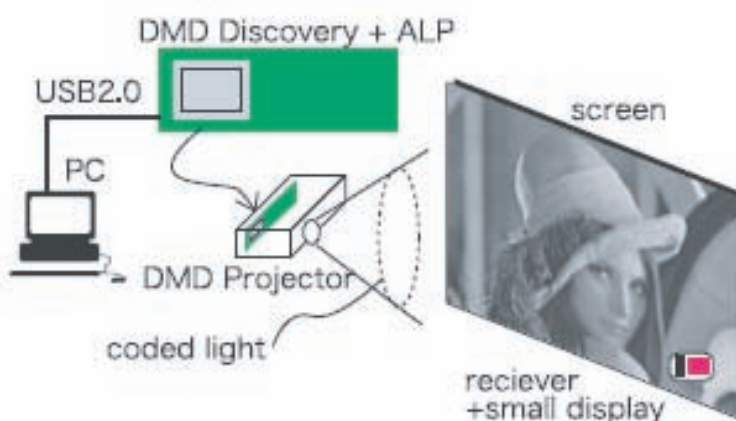


図 3.4: 空間分割型可視光通信のシステム構成図

また、ブロックの順序は、始めに同期信号ブロック、残りのブロックについては情報埋め込みブロックと輝度補正ブロックを交互に繰り返す。情報埋め込みブロックにおいては、0と1の配置を自由に設定することができず、0や1が連続しやすいという特徴がある。0や1が連続する場合、切り替え周波数が実質的に8kHzより落ち（4回連続で0や1が続けば、切り替え周波数は2kHzになる）視覚的なちらつきを生じやすい。そこで、情報埋め込みブロックと輝度補正ブロックを交互に配置することにより、ON/OFF周波数が1kHz以上になるようにして、視覚的なちらつきを押さえる狙いがある。

3.2.5 受信端末

3.2.3節で述べた、プロジェクタで投影した映像信号を受信するデバイスとしてフォトダイオード、コンパレータ、PICによる受信回路が設計されている。フォトダイオードによりプロジェクタ光のON/OFFを電圧に変換し、コンパレータによりデジタル処理（A/D変換）を行う。その先はアプリケーションによっ

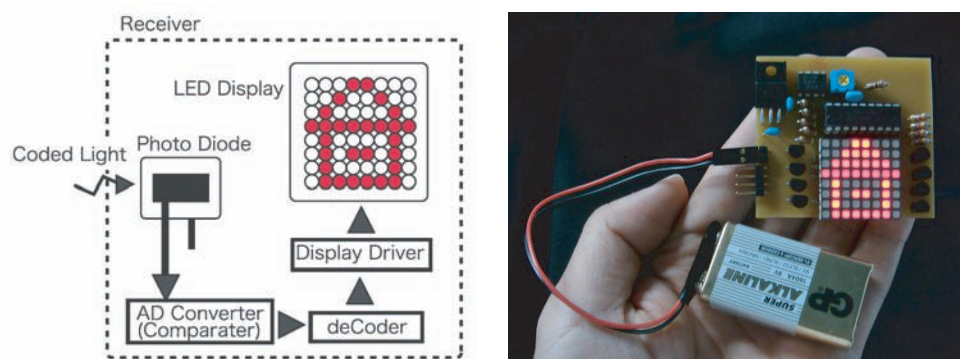


図 3.5: 受信端末の構成と外観

て異なるが、LED マトリクスディスプレイなどの表示デバイスを用いた受信機が実装されている。受信機の構成と外観を図 3.5 に示す。

なお、1 つの LED の ON/OFF を表現するのに 1bit 必要であり、LED マトリクスディスプレイ全体を表示するために 64bit のデータを送信している。したがって、プロジェクタからは「情報埋め込みブロック」が 8 ブロック（64 ビット）と「輝度補正ブロック」が 22 ブロック（176bit）からなる信号を生成、送信している。

3.2.6 アプリケーション

3.2.4 節でビット列を送信するための空間伝送路の設計法について述べたが、ビット列にどのような意味を持たせるのかは、アプリケーションに応じて設計でき、音声・文字・映像・位置などさまざまな情報を埋め込むことが可能である。

3.2.5 節で述べた、小型 LED マトリクスディスプレイを組み込みこんだ受信端末用のアプリケーションとして、ピクトグラム映像情報を埋め込んだアプリケーションが実装されている（図 3.6）。壁面もしくは垂直なスクリーンに投影された日本地図に受光端末をかざすと、その場所に埋め込まれた天気予報図がピクトグラムで表示される。受信機ではフォトランジスタで受信したビット情報を A/D 変換し、デコーダを介してディスプレイドライバに送る構成になっている。図 3.6(a) にあるように、投影された映像は通常のプロジェクタと変わらない。しかし、プロジェクタ映像中に受信機をかざすと、場所に応じて様々な天気のパクトグラム（図 3.6(b)-(d)）が表示される。

このアプリケーションは、フロントプロジェクション方式による垂直スクリーンで実装されている。その結果、

- プロジェクタ光が人影などで遮断される（オクルージョンの問題）
- LED マトリクスディスプレイの表示がプロジェクタ光に重なって見えづらい
- 受光端末を支える必要があるため、複数使用したい場合に使用できる端末数の限界が低い

ことが問題として挙げられる。

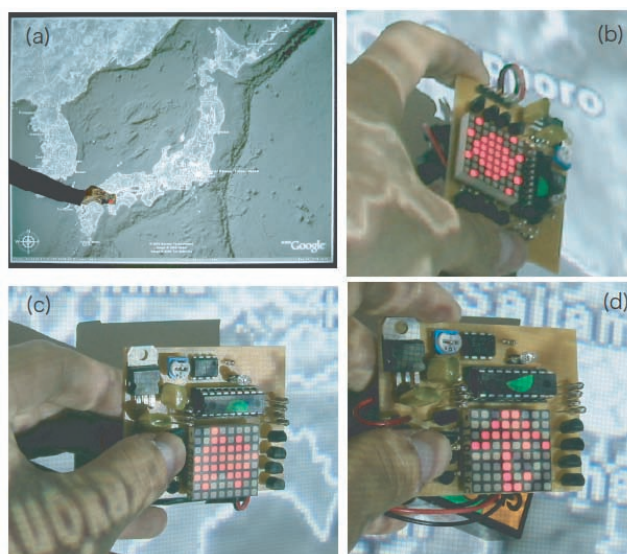


図 3.6: 地図映像の天気情報の提示

3.3 テーブル型リアスクリーンへの拡張

3.3.1 テーブル型情報環境

テーブル型情報環境は、グループワークにおける効果的なワークスペースとして期待されており、様々な研究が行われている。特に、テーブル型ディスプレイの上にオブジェクトを置く操作は、ディスプレイ映像とのインタラクションを行うにあたり、直感的でタンジブルな入力や複数ユーザの共通指標とすることを可能にする。従って、テーブル上のオブジェクトの位置に応じたインタラクションを実現することは、テーブル型情報環境を構築する上で重要な要素であると考えられる。

テーブルシステムの研究としては、DigitalDesk [69] や Meta Desk [70] など数多くの研究がなされている。テーブルシステムを構築するにあたり、ユーザの自然で直感的な入力を実現するために、テーブル上のオブジェクトの位置を測定する手法というのは本質的な要件の一つとなっている。カメラを用いることでオブジェクトの位置を測る手法は、筑らの Lumisight Table [71] や Tablescape Plus [72] などが挙げられる。また、最近では Microsoft 社によって、カメラを用いた手指の認識を可能にする、テーブル型ディスプレイ Surface [73] が発表されるなど、テーブルシステムは研究においても商用においても積極的に研究がなされている。

本研究では、ディスプレイとオブジェクトとの通信を実現することは非常に重要であると考えられる。というのは、テーブル上のディスプレイそのものが情報を発信していれば、テーブル上のオブジェクトはその情報を受信するだけで、位置情報などの情報を得ることが可能になる。さらに、位置情報のみならず、様々なメタ情報を同時に送信することも可能である。

3.3.2 EmiTable

空間分割型可視光通信の技術をテーブル上のディスプレイに応用することで、新たなテーブル型情報環境を構築した。

このテーブル型システムを“映像全体から情報を発信するテーブル型ディスプレイ (A Tabletop Surface that can Emit Imperceptible Metadata along with Visible Image)” にちなんで、EmiTable (図 3.7) と名づけた。

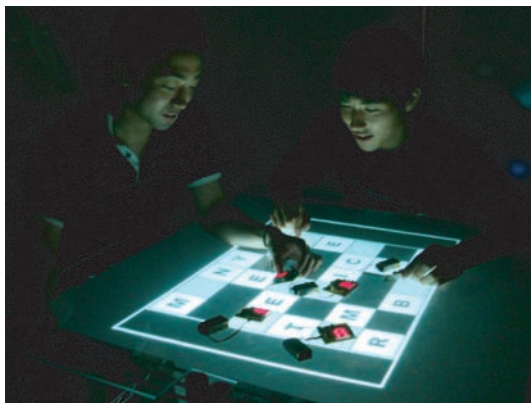


図 3.7: EmiTable

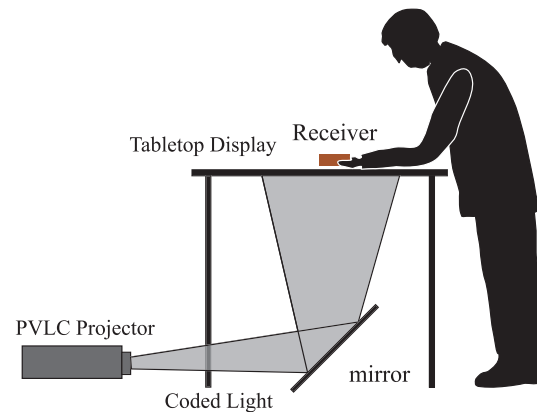


図 3.8: EmiTable の概観

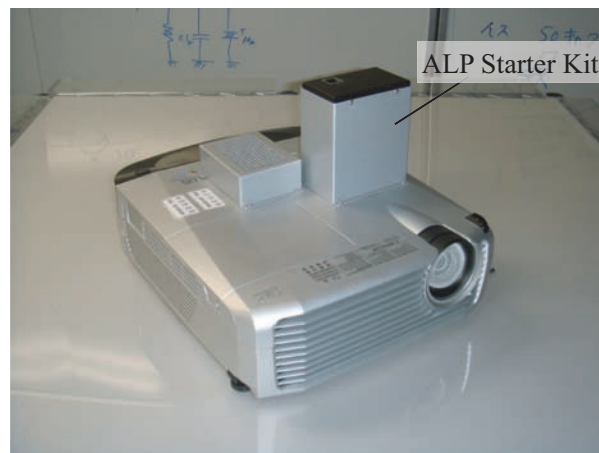


図 3.9: 可視光通信プロジェクタ (PVLIC Projector)

また、テーブルの概観を図 3.8 に示す。テーブルはリアスクリーンシート、スチールワイヤー棚、反射ミラー、アクリル板により構成した。

先行研究ではフロントプロジェクション方式により映像投影していたため、プロジェクタ光が手や受信機によって遮断される問題が発生していたが、本稿では、バックプロジェクション方式を採用することで、影やオクルージョンによる伝送路遮断の問題を解決した。フロントプロジェクション方式ではプロジェクタ光を直接フォトランジスタで受けるのに対して、リアプロジェクション方式ではスクリーンで拡散した光をフォトランジスタで受け取ることになるが、指向性の強いフォトランジスタを用いることでプロジェクタ光を受光することができた。

さらに、壁面投影を行っていたものが、テーブル型にすることによって、複数の受信端末を同時に配置することが容易になった。複数端末の同時制御という DBC の特徴は、テーブル型システムにおいて特に効果的であると考えられる。さらに、壁面に投影する方式では主として個人と受信端末機械とのインタラクティブシステムであったが、テーブル型にすることで共同作業におけるインタラクションも期待できる。

また、先行研究では試作プロジェクタで予備実験を行ったが、新たに光学系を改善したプロジェクタを開発し、歪みのない映像投影が可能になった。開発したプロジェクタを図 3.9 に示す。

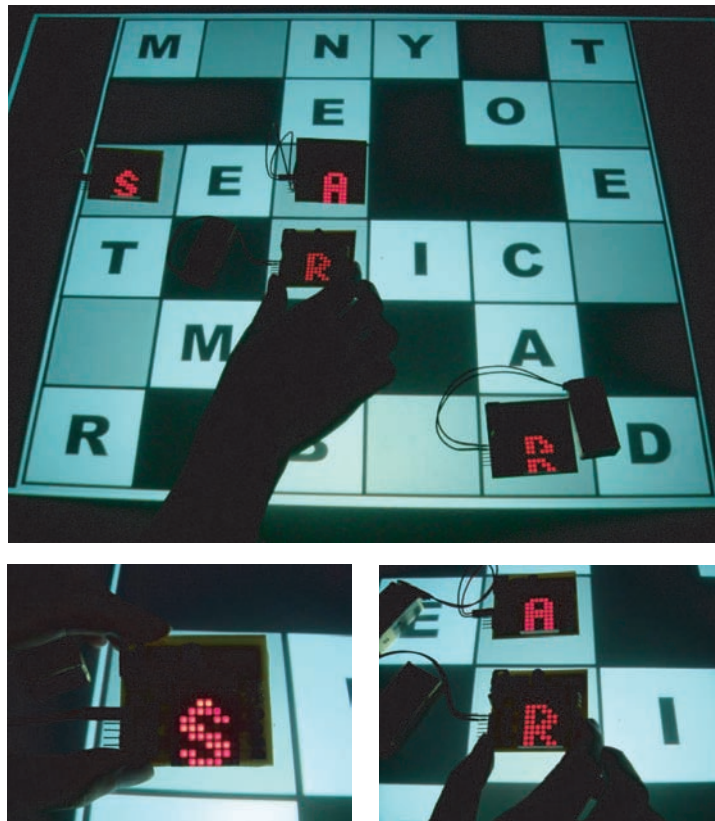


図 3.10: クロスワードパズル

3.3.3 アプリケーション

テーブル型ディスプレイに拡張したことにより、さらにいくつかのアプリケーションを試作した。

パズルアプリケーション

2種類のパズルアプリケーションを実装した。図 3.10 はクロスワードパズルのアプリケーションである。空欄は輝度 127 の灰色であり、場所に応じて答えが埋め込まれている。ユーザは端末を空欄の中に置くことで、LED マトリクスディスプレイに解答のアルファベットが表示されそのマスに解答を得ることができる。

一方、図 3.11 は数独パズルである。クロスワードと同様に、灰色のマスに受信端末を置くことで、解答の数字を知ることが可能になる。

走る人アプリケーション

本研究で使用しているプロジェクトは DMD ボード (ALP Starter kit) の制約により、リアルタイムに情報を更新していくことができない。つまり、動画提示や埋め込まれている情報を動的に変化させることができないために、アプリケーションの自由度が小さい。

このアプリケーションでは、受信機を動かした場合に、連続した絵になるように情報を埋め込んでいる。図 3.12 に示すように、左から右へ受信機を動かしていくと、人が走っていくアニメーションが表示される。

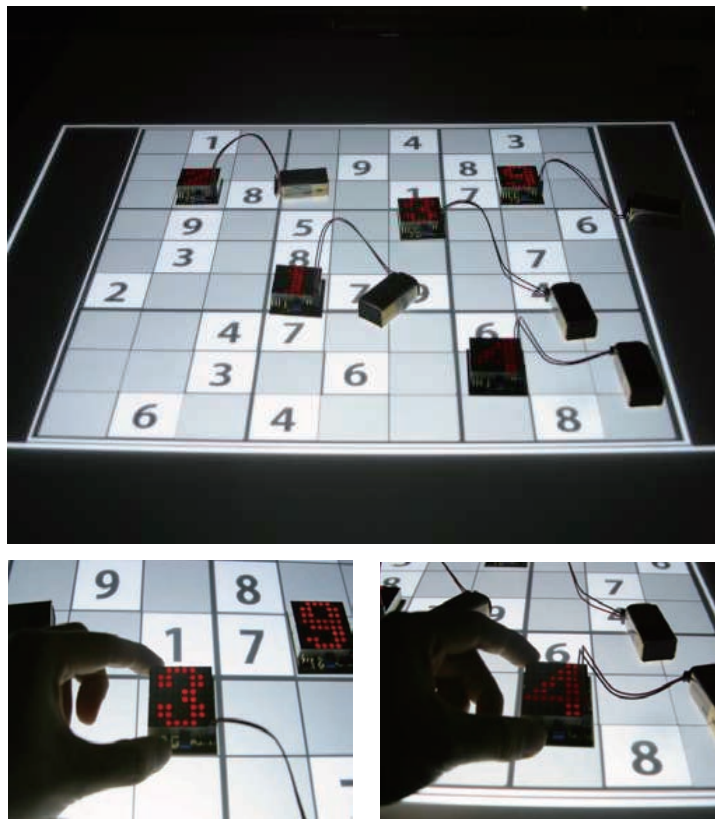


図 3.11: 数独パズル

選択的に情報を取得できる受信機

空間分割型可視光通信では、スタートビットを複数用意することにより、同一の座標に複数のメタ情報を埋め込むことが可能である。本論文では、同一の座標に埋め込まれた2種類のメタ情報を、選択的に受信可能な受信機を試作した(図 3.13)。3.2.5 節で述べた既存の受信機にスイッチがついているのが特徴である。スイッチを切り替えることで、天気予報と花粉情報を切り替えることができるアプリケーションを実装した。

本論文では2種類のメタ情報として共にピクトグラムを用いたが、ピクトグラムの情報と音情報を重ね合わせるといった、異なるモダリティのメタ情報を同一のピクセルに埋め込むことも可能である。その場合は、異なる受信機を用いることで、それぞれのメタ情報にアクセスすることが可能になる。

また、本システムを、日本バーチャルリアリティ学会第12回大会[82]や、東大で開催されたIML Open House[86]などにおいて展示を行った。展示の様子を図 3.14 に示す。

3.4 本章のまとめ

本章では、映像と連携して情報を提示する空間分割可視光通信に関して、先行研究を説明しつつ原理を述べた。さらに、バックプロジェクション方式による、テーブル型ディスプレイへの拡張、その実装について述べた。本研究の先行研究に対する差分として、

- 光学系を改善したプロジェクタの開発により、歪みのない映像投影が可能になった。

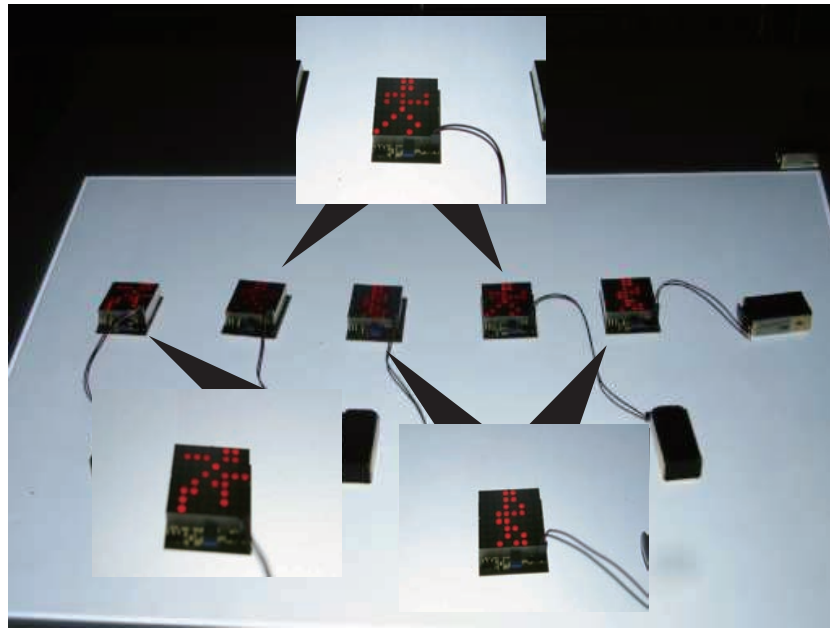


図 3.12: 走る人

- テーブル型ディスプレイにすることにより、プロジェクタ光 (情報の通信路) が手や受信機によって遮蔽される問題の解消した。
- 複数の受信端末を同時に配置することが容易になった。

ことが挙げられる。

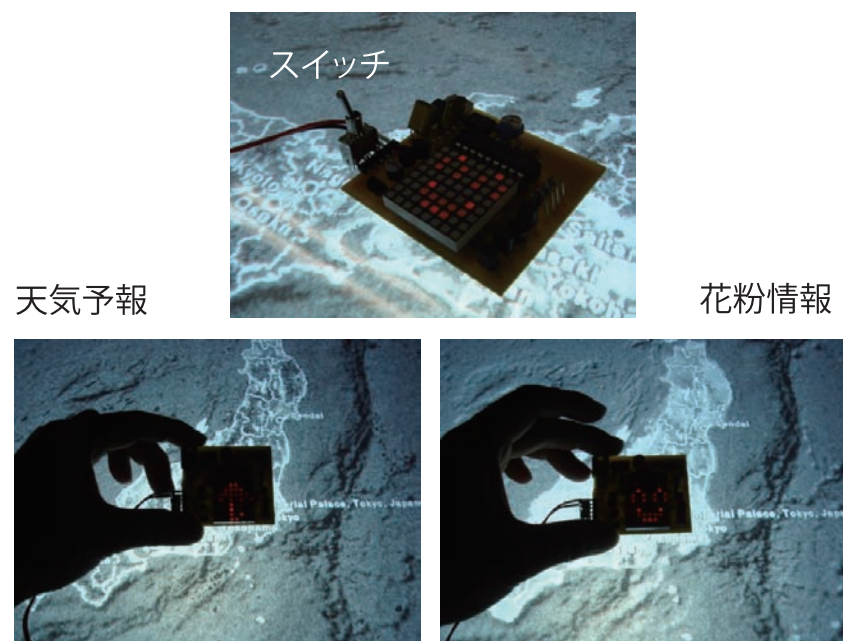


図 3.13: スイッチ付き受信機



図 3.14: 展示の様子

第4章

可視光通信プロジェクタと 高速度カメラを用いた ユビキタス情報環境

4.1 はじめに

第3章で述べたシステムにおいては、提示されたメタ情報を読み出すにあたり、単一のフォトセンサで構成される受信端末を用いていた。よって、画像中の1点における情報の読み出しのみが可能であった。

それに対して本章では、情報読み出しに高速度カメラを用いることを考える。高速度カメラを用いることの利点は、映像中の一点に限らず、映像全体から並列して独立したメタ情報を取得できることである。映像全体から並列して独立したメタ情報を取得することで、取得可能な情報量が増えるだけでなく、映像とカメラの位置関係も把握することが可能になる。

また、可視光通信プロジェクタ（PVLC プロジェクタ）と高速度カメラの組み合わせは、人には認知できない高速な点滅パターンをサイドチャネルとして持つ、新しい ProCam システムとも位置づけられる。

本章では、本論文の提案する ProCam システムの概略を述べた後、PVLC プロジェクタと高速度カメラのクロック周期の違いや同期ずれを解消するための基本的なアルゴリズム設計、および実装と信号の読み出しにおける実験の結果について述べる。さらに、提案する ProCam システムにおけるインタラクティブなアプリケーションの提案と実装について述べる。

4.2 可視光通信プロジェクタと高速度カメラを用いたユビキタス情報環境の提案

提案する ProCam システムの基本構成図を図4.1に示す。PVLC プロジェクタによって提示された映像は、人間にとっては何の仕掛けもない普通の映像として観察される。しかし、その映像中にはメタ情報が埋め込まれており、高速度カメラで撮影すると、映像中に埋め込まれたメタ情報を読み出すことができる。

映像中から取得したメタ情報を元にして、カメラの位置・姿勢計測、ユーザへの情報提示などを行う。提案システムの特徴は

- 埋め込まれたメタ情報は、ユーザには見えない
- カメラとプロジェクタのキャリブレーションを必要としない
- プロジェクタとカメラは同期を必要としない
- 投影映像と結び付きの強いメタ情報を提示・取得できる
- 時分割によって同位置に複数の情報を埋め込むこと（情報の多重化）が可能である

が挙げられる。

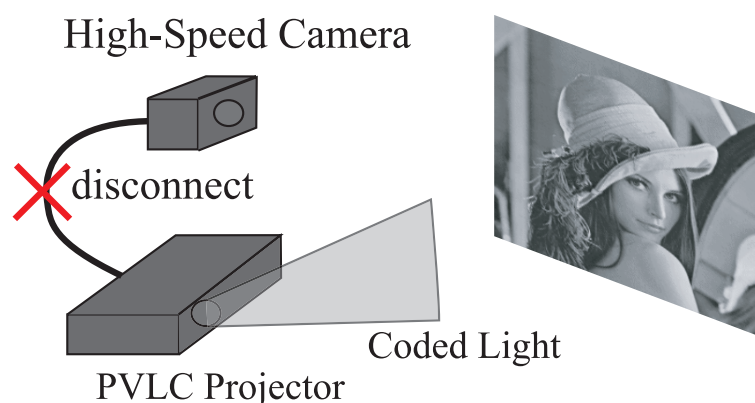


図 4.1: システムの基本構成図

4.3 ハードウェア構成

提案する ProCam システムの実装には、高速に投影・撮影を行えるプロジェクタと高速度カメラが必要である。

可視光通信プロジェクタ

プロジェクタには、我々が提案してきた空間分割型可視光通信を実現する PVLC プロジェクタを用いる。PVLC プロジェクタでは、DMD を用いることで2値画像を高速(8kHz)で切り換え、人間に知覚できないメタ情報を埋め込んだ映像を投影できる。プロジェクタ映像における各ピクセルの輝度値は、スクリーン方向に光を飛ばす時間(ON)と飛ばさない時間(OFF)の割合で表現されるが、短い時間の中での ON/OFF の割合が一定であれば、ON/OFF の順番には一定の自由度を確保できる。PVLC ではこの PWM における冗長性に着目し、映像中の各ピクセルにおいて、人間には知覚できないメタ情報を埋め込んでいる。詳しくは3.2を参照されたい。

高速度カメラ

一方、PVLC プロジェクタで提示した情報を取得するデバイスとしては、高速度カメラを用いる。PVLC プロジェクタで提示された情報は、非常に高速に変化するため、そのスピードに対応するために十分な撮影速度を持つ高速度カメラが必要である。市販されている高速度カメラは撮影した画像データをカメラ内蔵のメモリに蓄えるメモリタイプとPCのメモリに直接転送するタイプの2タイプに分けられ、前者の方が一般的に高速撮影が可能である。しかし、本研究は将来的には動的なシーンに対応できるシステムを目指すため、リアルタイムで処理可能な後者の高速度カメラの方が好ましい。基礎実験においては Point Grey Research 製の Dragonfly Express(200fps で動作可能)を用いた。また、後半の実装では Ditect 製の HAS-220(1000fps で動作可能)(図4.2)を用いている。



図 4.2: 高速度カメラ (HAS-220)

4.4 信号埋め込みアルゴリズム

4.4.1 基本アルゴリズム

4.3 節のハードウェア構成でメタ情報を提示・取得する場合、プロジェクトとカメラのフレームレートの違いが問題になる。すなわち、PVLC プロジェクトの投影切り換え速度 (8kHz) に対してカメラの撮影速度 (一般に 1000fps 以下) が遅いため、プロジェクト映像の複数のフレームが積分された情報が撮影されることになる。

プロジェクトとカメラの精密な同期が可能であれば、単にプロジェクトの ON/OFF 切り替え周期をより低速なカメラの周期に合わせることで、時間積分された撮影結果であってもメタ情報の読み出しは容易である。したがって、プロジェクトとカメラを同期させるための通信手段を別途確保することが考えられる。しかし、このような仕組みを用意することは、システムを複雑化し、複数プロジェクトと複数カメラが混在するような状況でも臨機応変に対応できるユビキタス情報環境を構築する上での柔軟性を損なう可能性がある。そこで本研究では、プロジェクト映像のみを通信チャンネルとして使用し、同期用の通信チャンネルを別に用意することは考えないものとする。

同期を必要としない情報読み出し手法として、図 4.3 に示すアルゴリズムを提案する。まず、投影映像の 1 画素毎に別々のメタ情報を埋め込むのではなく、複数画素の集合としての領域単位での埋め込みを考える。この領域を図 4.3(a) のようにいくつかの小領域 (図 4.3 では A から E の 5 領域) に分割し、それぞれの小領域に少しずつタイミング (位相) をずらして信号を埋め込む。埋め込む信号は、カメラ 1 フレーム分の積分時間と同程度の時間幅で 1bit を表し、図 4.3 では、5 領域で (積分時間/5) の時間幅でタイミングをずらしている。この結果、各小領域における信号と撮影タイミングは図 4.3(b) のようになる。なお、2 本の点線で囲まれた領域が、カメラ 1 フレーム分の積分時間である。

この場合、各小領域における撮影結果は図 4.3(c) のようになる。Region B では、各フレームの積分時間とメタ情報の信号位相がほぼ一致しており、撮影結果において ON/OFF のパターンを明確に区別できる。一方、Region D では、メタ情報の信号位相が時間的にほぼ半分ずれており、いずれのフレームにおいても ON/OFF の中間的な値になる。したがって、Region B からは信号を読み出すことができ、Region D からは信号を読み出すことができないことになる。カメラとプロジェクトは同期していないため、A-E のどの領域で信号が読み取り可能になるのかは不定である。しかし、意図的に位相をずらした信号を埋め込むことで、A-E のいずれかで信号が読み取り可能になることを保証するのが提案方式である。

4.4.2 静止画への埋め込みアルゴリズム

埋め込みアルゴリズム

前述のアルゴリズムを、静止画に対する情報埋め込みに応用する。本研究で用いる埋め込みアルゴリズムはカメラの撮影時間を考慮しなければいけないこと、また、輝度を維持したまま情報を埋め込むためにこれまで提案してきたアルゴリズムやその他既存のアルゴリズムを適用するのは難しい。また、静止画においては、各画素における輝度 (ON/OFF の比率) を制約条件としつつ、前述のようにカメラにおける積分時間幅を考慮した ON/OFF パターンを生成する必要がある。そこで、図 4.4 の信号埋め込みアルゴリズムを提案する。なお図 4.4 は、図 4.3 の中でカメラの撮影時間とタイミングがあっている領域 (図 4.3 の Region B に相当) を示している。

信号は「情報埋め込みブロック」と「輝度補正ブロック」で構成する。「情報埋め込みブロック」では、カメラの積分時間に相当するだけの時間間隔で ON/OFF を行う。「輝度補正ブロック」では、この制約がないため、より高速な ON/OFF を行うことができる。なお、投影映像中で、メタ情報が埋め込まれていない領域に関しては、「輝度補正ブロック」のみで構成されることになる。このとき、投影映像中のどの位置にメ

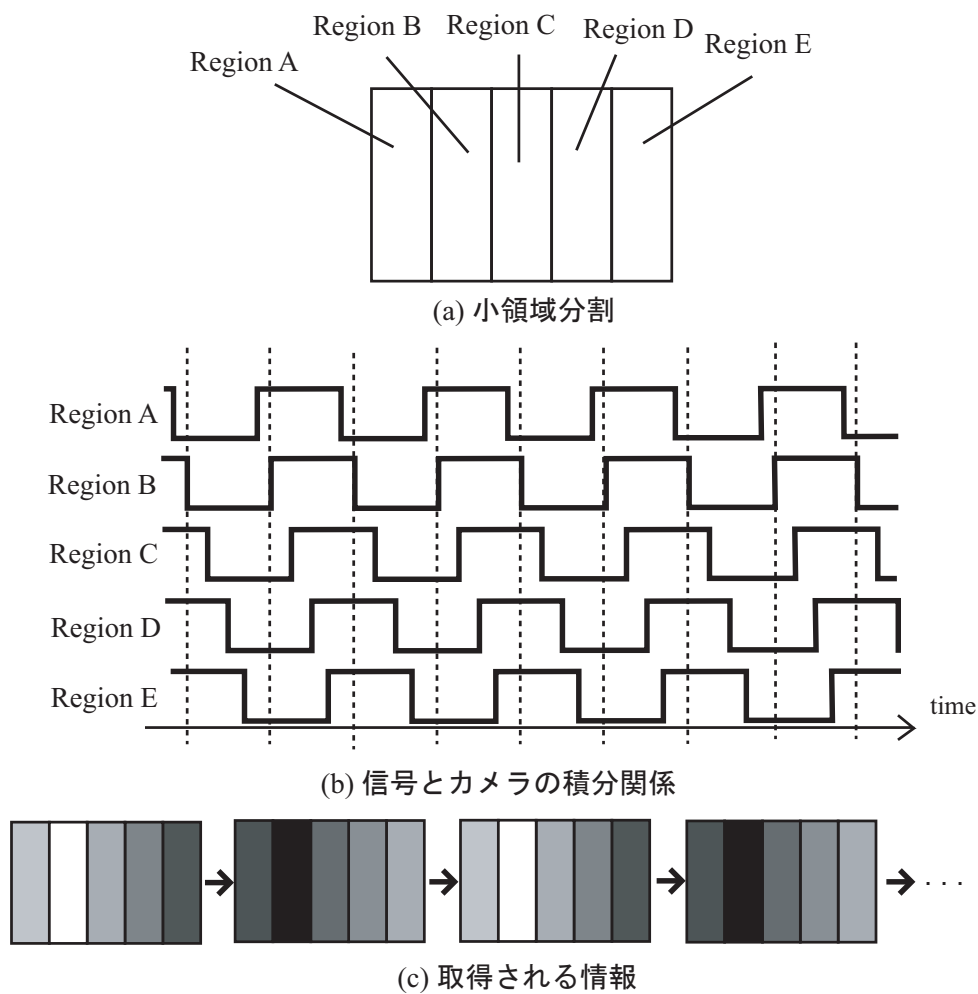


図 4.3: 基本アルゴリズム

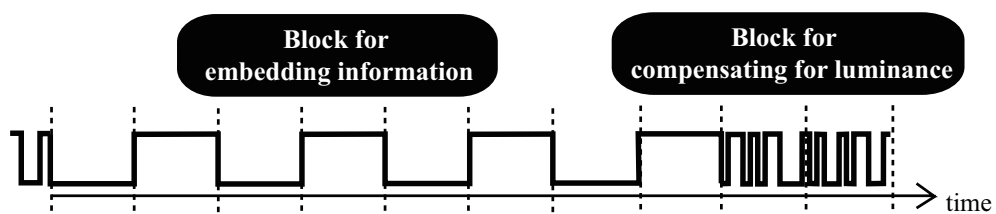


図 4.4: 静止画への埋め込みアルゴリズム

タ情報が埋め込まれているのかを判別するための仕組みが必要になる。これは、1枚の撮影画像だけから判別することはできない。

信号領域特定アルゴリズム

信号の埋め込まれた領域を特定するために、撮影画像におけるフレーム間差分を取ることを考える。「情報埋め込みブロック」を含む領域では、投影映像における輝度が大きく変化することになり、フレーム間差分が大きくなる。そこで「輝度補正ブロック」に関しては、撮影画像中でのフレーム間差分が小さくなるように、すなわち均一な輝度で撮影されるようにパターンを生成することとする。具体的には、信号が埋め込まれていない領域では、プロジェクトの切り換え速度がカメラの撮影速度に対して早いために、カメラの1フレームの撮影時間に1/0(ON/OFF)が複数回含まれる。これらはピクセルの輝度値を構成するための信号であり、各フレームで均一になるように配置するので、各フレームでの1/0(ON/OFF)の割合は近い値になる。つまりフレーム間の差分を取った時に差は小さくなる。これによって、投影映像中でメタ情報が埋め込まれた領域を撮影画像のフレーム間差分で判定することが可能になる。

4.4.3 アルゴリズムの検証実験

信号読み取り部

4.4で述べたアルゴリズムによる信号の読み出しについて基礎的な実験を行った。本稿で述べる実験で用いた高速度カメラはPoint Grey Research製のDragonfly Expressであり、120fpsで動作させている。プロジェクトの投影光は全ての領域で1(ON)と0(OFF)の時間の長さが等しいため人間の目には輝度127の灰色の画像に見える。

高速度カメラで撮影した画像を図4.5(a)に示す。5分割したいいずれかの領域においては、輝度差が明確に確認できる。

画像における埋め込み

前述のアルゴリズムを用いた信号を投影映像中に埋め込み読み出す実験を行った。カメラの撮影画像は図4.5(b)になる。信号は図4.5(b)の赤丸の場所に埋め込まれている。信号を埋め込んだ領域では、前述の実験の結果と同様のパターンが確認できる。

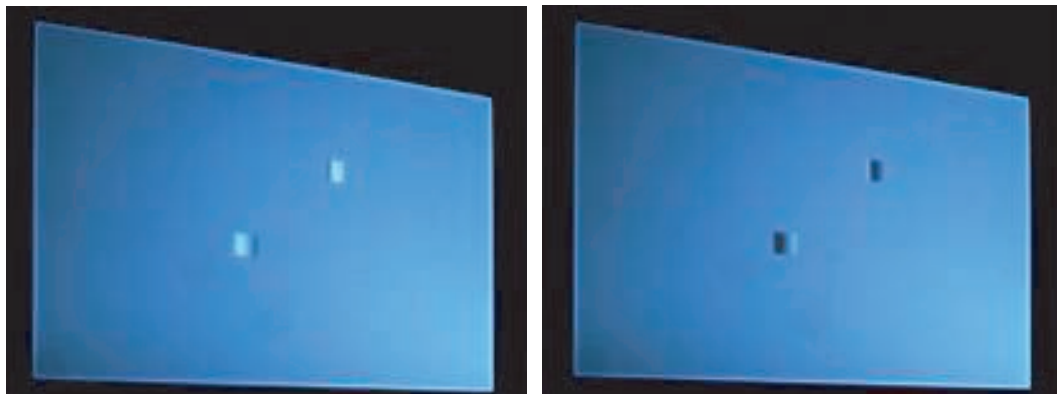
また、撮影画像の各フレームの差分を取った結果を図4.6に示す。各差分画像は左側の撮影画像とその前のフレームの画像との差分である。輝度補正をしているフレームにおいては、フレーム間での輝度の差は0に近い値であった。一方で、信号が埋め込まれているピクセルでは、輝度の変化がはっきりと見て取れた。

以上から、カメラを用いることで映像中から同時に複数の情報を取得可能であることが確認できた。なお本実験では、信号の埋め込み領域を 50×20 pixelとした。

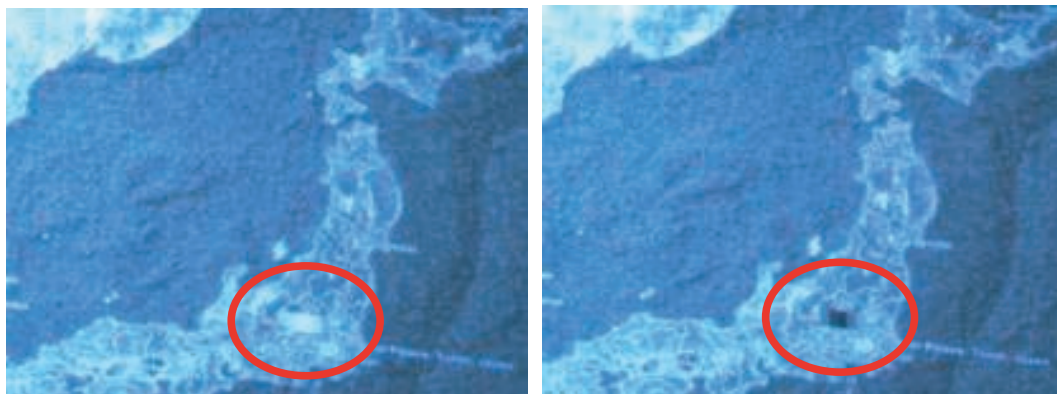
情報の重畳

4.4において提案した理論に基づき実装を行った。PVLCプロジェクトにより投影された映像と、高速度カメラにより撮影した画像を図4.8に示す。人間の目には何の仕掛けもない普通の映像として見えるが、位置が整合したメタ情報が埋められており、高速度カメラで撮影すると映像中に埋め込まれた信号を読み取ることができる。読み取った信号はPCによってデコードされ、メタ情報に応じた情報をユーザに提示する。図4.8では、基本的な例として、読み取った信号領域に天気マークを重畳している。なお、本実験以降では、高速度カメラはHAS-220を用いた。なお、動作速度は1000fpsである。

処理の流れを図4.7に示す。本実装では256bitを1周期として信号を構成している。そのうち56bit分がメタ情報埋め込み領域である。信号を確実に撮影するためには、 $256 + 56 = 312$ bit以上を撮影することが



(a) 輝度 127 の画像における埋め込み



(b) 画像における埋め込み

図 4.5: 提案アルゴリズムによるメタ情報の埋め込み

必要である。プロジェクタは 8000Hz で映像を切り替えており、高速度カメラは 1000fps で撮影している。つまり、 $(312 \times 1000) / 8000 = 39$ より 39 枚以上撮影するのが必要である。

さらに、閾値調整機能付きのビューアを作成した(図 4.9)。これによって、最適な閾値を設定することができ、認識率を上げることが容易になった。現在の実装では、撮影が 39msec、処理が(信号の数によって前後するが) 30msec 程度である。従って、1 回の撮影・処理は 69msec 程度であり、ビューアの更新頻度はおよそ 15~16fps である。なお、使用した PC は Dell Optiplex755(Core2 Duo E8400 3.0GHz, メモリ 2G) である。また、ビューアを表示する小型モニタとして、7.1 インチ液晶ディスプレイ LCD-7CX (PLANEX 製) を用いた。小型モニタの概観は図 4.10 である。

高速度カメラによって撮影された映像に、メタ情報を重畳することは、HMD を使う拡張現実感 (AR) のシステムと同様の効果を与えるものである。しかし、HMD の中だけで現実が拡張されているのではなく、現実世界の中のプロジェクタ映像そのものが拡張されている点が異なっており、結果として、ユーザの 3 次元的な位置計測が不要となり、複数のユーザが同時に参加することも容易になる。

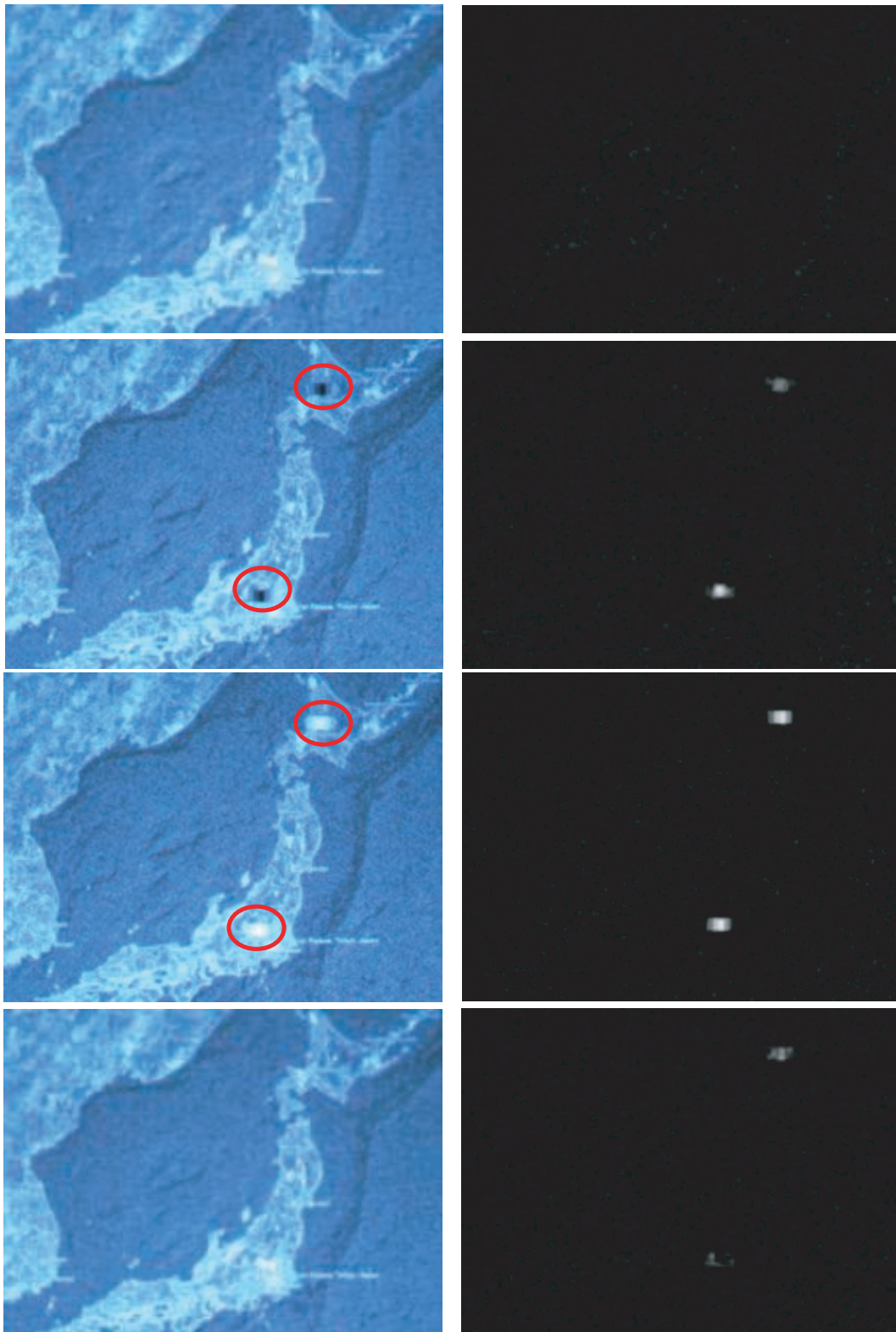


図 4.6: 信号読み出し (左: 撮影画像, 右: 差分画像)

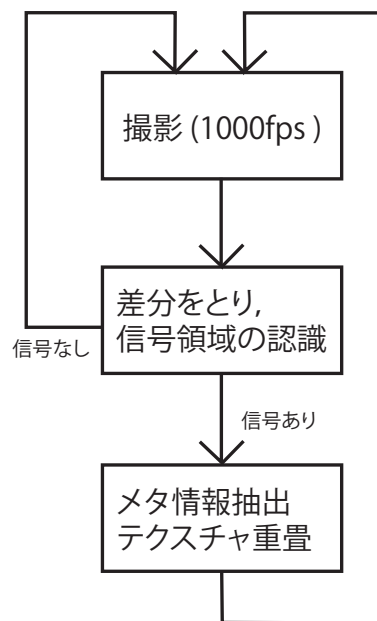


図 4.7: 処理の流れ

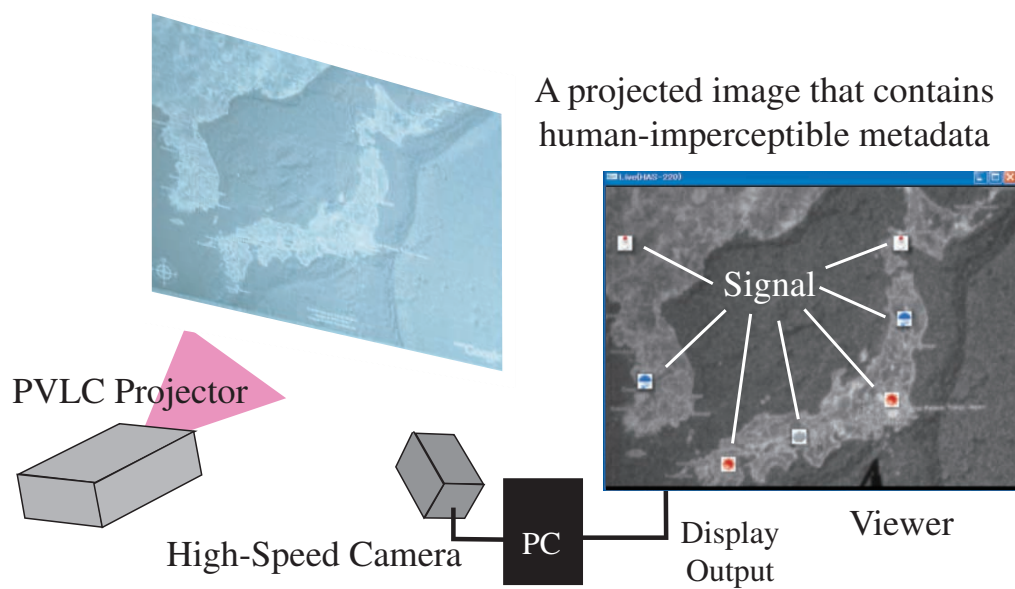


図 4.8: 情報の重畳

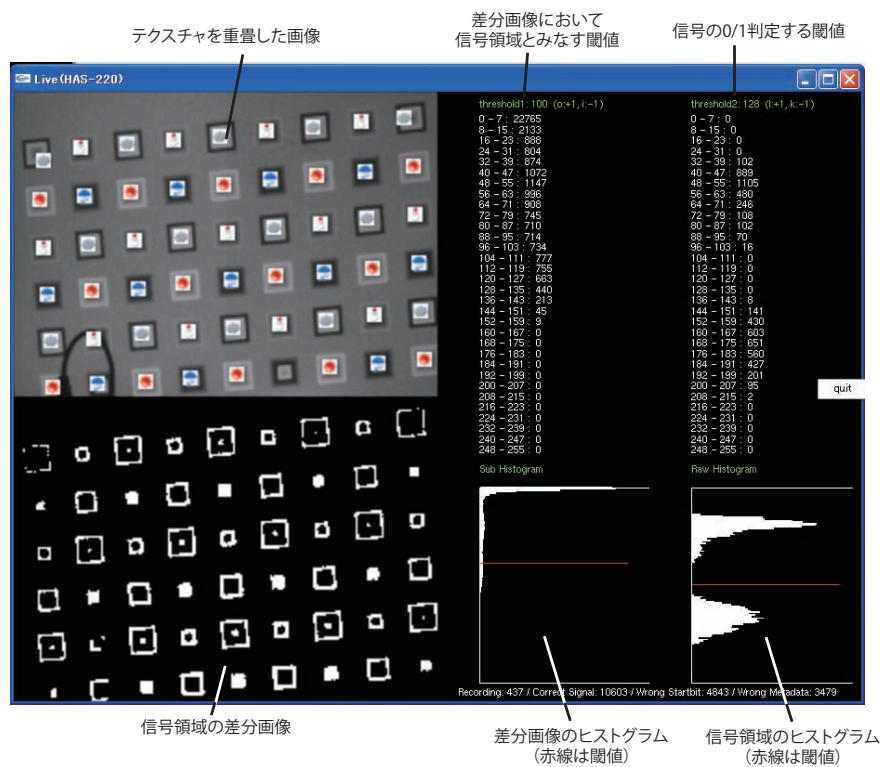


図 4.9: ビューアー



図 4.10: 小型モニタ

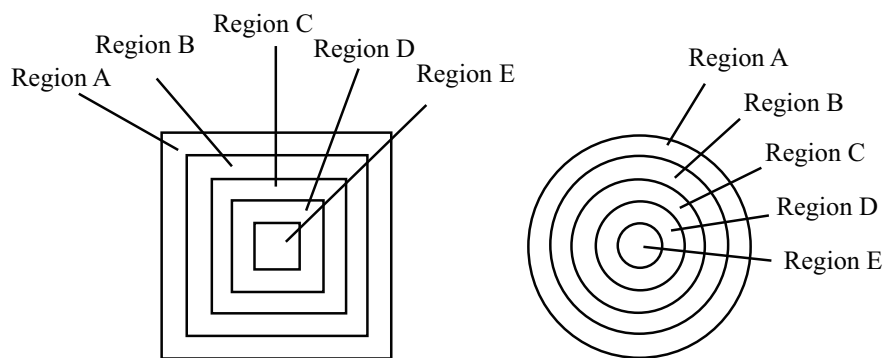


図 4.11: 重心不変のマーカ

4.5 重心不変マーカの提案

図 4.3 に示すような、縦割りの領域分割を行う場合、分割した各々の小領域における重心は一致しない。本研究で提案するアルゴリズムは、分割したいいずれかの小領域での信号の読み取りを保障するものであるが、それがどの小領域になるかは不定である。従って、信号の位置を特定するにあたり、信号領域が一定にならないという問題点が生じる。例えば、4.4.3 に述べた情報を重畳するアプリケーションにおいては、信号が埋まっていると認識される小領域が時間によって変わるために、重畳される情報が大きくぶれるという現象が生じる。

そこで、分割した各々の小領域における重心が不変のマーカ(図 4.11)を用いることを提案する。これらのタイプのマーカを用いることで、前述の問題が解決され、安定した信号領域の読み出しが可能になる。

4.6 評価実験

4.6.1 実験概要

提案手法による信号の埋め込み・読み出しにおける有用性や信頼性を確認するために、信号の認識率に関する実験を行った。

実験は、

時間分解能 小領域ごとの信号の位相のずれの大きさと、認識率の関係性について調べる。信号を正しく認識するためには、各小領域におけるタイミングのずれがどの程度必要であるのかを調べる。また、信号の位相のずれの大きさを検証することは、信号の領域の分割数を検証することに関係する。

空間分解能 信号の大きさ(面積)と認識率との関係性について調べる。信号を正しく認識するにあたって、どれくらいの大きさの信号が必要であるのか定量的な評価を行う。

に関して行った。

なお、実験に用いたハードウェアは 4.3 で述べたものであり、埋め込まれている信号は 6 ビット(内最初の 2 ビットはスタートビット)の信号が 4 種類である(表 4.1)。プロジェクタ映像全体に各々の種類につき 5 個ずつ、計 20 個の信号を配置し、300 回撮影をした。この条件で、正しく認識できた信号の数を埋め込んだ信号の数(本実験では 6000)で割ったものを、信号の認識率とする。なお、プロジェクタ映像は、すべての領域で輝度 127 であり、人間の目にはただの灰色の画像として見える。

表 4.1: 画像中に埋め込んだ信号

signal	ビット列
signal 1	010101
signal 2	011001
signal 3	011010
signal 4	010110

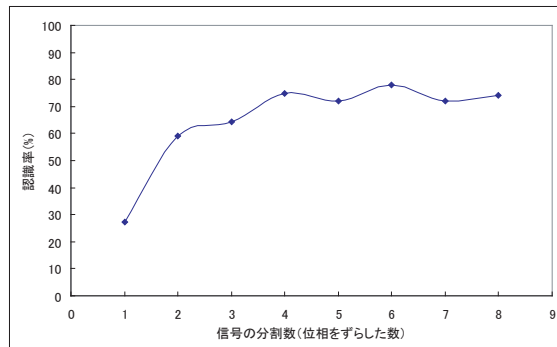


図 4.12: 時間分解能における認識率

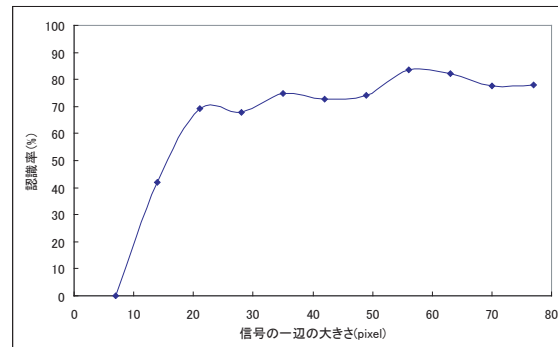


図 4.13: 空間分解能における認識率

4.6.2 時間分解能における実験

位相のずれの数が1～8個の場合において、信号の認識率を調べた。位相のずれが2～8個の場合には、なるべく（ハードウェアの制約上厳密に均等にずらすことは不可能な分割数が存在する）位相差が均等になるように信号を埋め込んだ。なお、信号の大きさは、一辺がプロジェクタ映像において50pixel程度の正方形で統一した。また、高速度カメラに写っている、プロジェクタ映像の大きさはおよそ700pixel × 500pixelである。

実験結果を図4.12に示す。分割数（位相のずれの数）が1のとき、つまり信号のずれがない場合は、カメラの撮影のタイミングと信号のタイミングが一致することが保障されないため、低い認識率となる。分割数4までは、分割数が増えるに従って認識率が高くなっていることから、本論文で提案したアルゴリズムを用いる場合は、分割数4以上が適当とわかる。また、分割数4以上に関しては、認識率はほぼ一定となっており、提案アルゴリズムにおいて、信号の $/2$ 以下の位相のずれは、認識率に差を生じさせないことがわかった。

4.6.3 空間分解能における実験

信号の大きさを变化させた場合の信号の認識率を調べた。分割数（位相のずれの数）は4個で固定し、信号の大きさのみを变化させた。なお、高速度カメラに写っている、プロジェクタ映像の大きさはおよそ700pixel × 500pixelである。

実験結果を図4.13に示す。横軸のピクセル数は、正方形の信号の一辺のピクセル数である。グラフより20pixelを切ったあたりから、認識率が急激に下がっている。これは、信号が小さすぎて、カメラが信号をうまく撮影できないことによるものである。一方、30pixelよりも大きい信号では認識率は70%以上でほぼ一定であった。従って、誤認識の原因は、信号の大きさではなくその他の要因であると考えられる。

4.6.4 考察

両実験から、信号の分割数は4個以上、信号の大きさは一辺の長さが30pixel以上が適当とわかった。また、環境光や信号を認識する閾値設定による認識率の変化が大きく、最適な条件を設定することが重要であることがわかった。

また、両実験を通じて、認識率は最高でも80%程度であった。これは、様々なアプリケーションを作成していく上で、十分に高い認識率とは言えない。

原因はいろいろ考えられるが、認識できないときには、撮影した信号すべてが誤認識される場合が多いため、高速度カメラのハードウェア的な問題が大きいと考えられる。つまり、割り込み処理などが入り、正確に1000fpsで撮影できていないフレームが存在していると考えられる。それを裏付ける事実として、撮影画像において、信号を埋め込んでいない場所の輝度がすべてのフレームにおいて同一ではなく、数フレームに一度、輝度が高いフレームが存在する。

従って、今後は原因を究明し、それをハードウェア、ソフトウェアの両面から改善していくことが課題として挙げられる。

4.7 インタラクティブなアプリケーションの提案

高速度カメラとプロジェクタ映像の距離に応じて、写り込む範囲が変化することを利用し、カメラとプロジェクタ映像との位置関係を認識することができる。これを利用することで、より柔軟な情報提示が可能になる。

例えば、離れて見ているときには日本地図全体が写っていることを前提にマクロな情報提示に留め、近づくに連れてより詳細な情報を重畳していくことが可能になる(図4.14)。図4.14において、プロジェクタ映像の広い範囲がカメラにより撮影されている場合(カメラ位置A)には、映像全体から同時に複数の信号を認識し、それに応じた情報(日本全体)をユーザのディスプレイに表示する。一方で、カメラをプロジェクタ映像に近づけた場合(カメラ位置B,C)は、撮影している領域に埋め込まれた情報から撮影領域を割り出し、その撮影範囲に応じた付加情報が重畳される。なお、カメラとプロジェクタ映像との位置関係に位置に依存した情報は、ユーザの持つモニタに提示される。

本システムではプロジェクタの映像信号自体に、位置に応じたメタ情報が埋め込まれており、カメラは単にその情報を取得してユーザに提示するだけで、位置に応じた情報を提示できる。このようなシンプルな仕組みで実現されるため、複数のプロジェクタやカメラを独立して同時に使用することが、容易に実現可能である。

4.8 本章のまとめ

本章では、可視光通信プロジェクタと高速度カメラを用いたProCamシステムによる、ユビキタス情報環境における、システムの原理とインタラクションに関して述べた。可視光通信プロジェクタによって提示された、不可視情報を読み出すにあたり高速度カメラを用いることにより、映像の一点に限らず、映像全体から並列して独立したメタ情報を取得することが可能になる。また、高速度カメラに映りこむ範囲からプロジェクタ映像と高速度カメラの位置関係も把握することが可能になる。

まず、本ProCamシステムを実装するにあたり、必要とされるハードウェア・信号アルゴリズムにおける要件についてまとめた。続いて、可視光通信プロジェクタと高速度カメラのフレームレートの違いを埋める、信号送受信アルゴリズムやマーカの形状を提案した。さらに、提案アルゴリズムの有効性を確認する実験、信号の読み出しの精度に関する実験を行いその有用性の確認を行った。最後に、高速度カメラに映

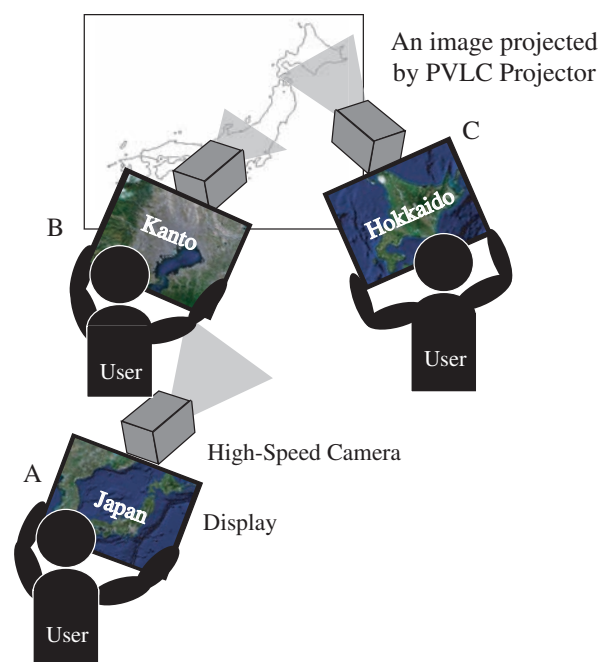


図 4.14: アプリケーション概要

りこむ範囲を元に、プロジェクタ映像と高速度カメラの位置関係を把握することを用いたインタラクティブなアプリケーションを提案した。

第5章

結論

5.1 本研究の成果

本研究の主な成果について述べる。本研究では、空間分割型可視光通信を実現する、可視光通信プロジェクタにおける映像とのインタラクションの提案・実装を行った。空間分割型可視光通信によって映像中に埋め込まれたメタ情報を読み出すにあたり、フォトセンサによる映像中の1点での情報取得と、高速度カメラによって映像全体から複数の信号を同時に取得することの両面から検討を行った。また、それぞれにおいて、アプリケーションの提案・実装を行った。

以降に、本論文の章構成に沿って成果をまとめる。

第2章では、まず、拡張現実感に関して従来研究、その中でも特にプロジェクタなどを用いて実世界に直接情報を提示している研究に着目し、拡張現実型の情報提示に関して述べた。さらに、人間の目には見えない不可視情報を用いて、実世界に情報を提示し拡張している研究を、不可視情報の種類（赤外光、高速切り替え、その他）によって分類しつつ、不可視情報を用いた拡張現実型情報提示の利点をまとめた。

第3章では、映像中に人間には知覚できないメタ情報（位置に応じた情報）を埋め込むことで、映像とメタ情報を同時に発信できるテーブル型ディスプレイ EmiTable を提案した。EmiTable ではテーブル型ディスプレイ面と手持ち受信機によるスムーズでロバストな通信を実現した。これによって、人間とテーブル型ディスプレイの新しいインタラクションの形を提案した。

まず、コア技術となる空間分割型可視光通信の先行研究についてその原理からアプリケーションまで概要を述べた。続いて、可視光通信プロジェクタの実装、テーブル型にすることによる利点に関して述べた。さらに、新たに開発したアプリケーションについて述べた。

第4章では、第3章で述べた、可視光通信プロジェクタによって提示された映像中に埋め込まれたメタ情報を取得するにあたって、高速度カメラを用いることを提案した。高速度カメラを用いることにより、映像の一点に限らず、映像全体から並列して独立したメタ情報を取得することが可能になる。また、高速度カメラに映りこむ範囲からプロジェクタ映像と高速度カメラの位置関係も把握することが可能になる。

まず、本 ProCam システムを実装するにあたり、必要とされるハードウェア・信号アルゴリズムにおける要件についてまとめた。続いて、可視光通信プロジェクタと高速度カメラのフレームレートの違いを埋める、信号送受信アルゴリズムやマーカの形状を提案した。さらに、提案アルゴリズムの有効性を確認する実験、信号の読み出しの精度に関する実験を行いその有用性の確認を行った。最後に、高速度カメラに映りこむ範囲を元に、プロジェクタ映像と高速度カメラの位置関係を把握することを用いたインタラクティブなアプリケーションを提案した。

また、付録A章では、赤外光を用いたユビキタス情報環境、赤外光プロジェクタの可能性について提案を行った。技術的な問題、安全性の問題から赤外光プロジェクタは実装することができなかったが、赤外光プロジェクションと、赤外光を可視光に変換する特殊な素材（赤外可視変換素材）を用いることで、日常生活において親和性の高い選択的な情報提示手法を提案した。さらに、赤外可視変換素材に関して実験を行い、その特性を測定した。また、赤外 LED マトリクスディスプレイを実装し、情報提示実験を行った。

5.2 今後の展望

本研究の今後の展望について述べる。

5.2.1 可視光通信プロジェクタ

動画対応可視光通信プロジェクタ

現在の可視光通信プロジェクタは、事前に生成した投影する画像を、プロジェクタ内のメモリに読み込んでおく必要がある。つまり、映像や埋め込むメタ情報を動的に変化させていくことができない(正確には0.3秒の動画だが非常に高速なため、人間にはほとんど静止画として認識される)。この問題は、情報をプロジェクタに転送するインターフェースによるところが大きい。PCと可視光通信プロジェクタをつなぐインターフェースはUSB2.0であるが、リアルタイムに情報を更新するためには最低でも1024(pixel)×768(pixel)×8000(bps) 6Gbpsの帯域が必要となる。USB2.0は最大でも480Mbpsと帯域が足りない。

現在、我々の研究室では、信号をソフトウェアによって生成するのではなく、プロジェクタ上のハードウェア上で生成することで、上記の問題を解決することを目指している。これによって、受信機を置くことを入力として、動的に映像を変化させるといった、何らかのフィードバックを返すなど、インタラクションの幅が広がる。それに伴って、システムの特徴を生かしたアプリケーションの幅も広がると考えられる。

ちらつき軽減

一般に人間がちらつきを感じるのは60Hz程度といわれているが、実装した可視光通信プロジェクタで映像を投影したところ、8000Hzで映像を提示してもちらつきが感じられてしまう。原因としては

- 光源が明るすぎる
- 8000Hzでは十分な速度とはいえない
- DMDが特殊な制御をしている
- 同一のパターンを繰り返し提示しているため、周期的な輝度の変化がちらつきと知覚される
- ある程度の大きさを持つブロックで同一のON/OFFを提示している

などが考えられる。

現在の可視光通信プロジェクタでは、DMDのボードとしてALP-1+Discovery1100を用いている。我々の研究室では、その後継モデルのADP-3+Discovery3000を用いた、可視光通信プロジェクタを製作中である。新可視光通信プロジェクタは13300Hzでミラーを切り替えることが可能である。また、光源の輝度も落とすことにより、ちらつきの現象が期待できる。

5.2.2 テーブル型システム

アプリケーション開発

空間分割型可視光通信においては、埋め込むメタ情報は現在実装されているピクトグラムに限らない。今後の課題としては、ピクトグラムに限らず、音、力、制御情報などさまざまな情報を埋め込むことが挙げられる。また、モダリティの多様性に応じて受信機も多様化させていくことが必要である。

さらに、テーブル型であることを生かしたアプリケーションの開発も今後の課題である。テーブル型情報環境はグループワークにおいて効果的な手段として期待できる。現在のシステムでは、多人数よりも個人向けのアプリケーションになっているが、今後は多人数向けのアプリケーションを開発していきたい。多人数型アプリケーションの一例として、自立型の受信機が考えられる。自立型の受信機にすることによって、一方向だけに情報を提示することが可能になる。特定の人にだけ提示したい情報は受信機に提示、全体で共有したい情報はテーブル面に提示する、といった情報の選択的な情報提示が実現できる。

5.2.3 可視光通信プロジェクタ - 高速度カメラシステム

ロバスト性の向上

本論文では、可視光通信プロジェクタと高速度カメラ間で、同期を必要としない通信アルゴリズムを提案し、評価実験を行った。しかし、認識率は70～80%程度と低く、十分に実用に耐えうるものとは言えない。

さらに、蛍光灯など環境光がある場合では、誤認識は増加すると考えられる。今後はよりロバストな読取アルゴリズムとして、最適なマーカ、カメラの制御をもっと深く理解したアルゴリズムを提案していくことが、課題として挙げられる。

また、現在のところ約15～16fps程度で情報取得・処理をしているが、カメラを人が保持して動かした場合には十分な処理速度とは言えない。今後は、より高速な処理を目指して、

- より高速に撮影できる高速カメラを用いる
- マルチスレッドを用いるなどプログラムの改善
- アルゴリズムの改善

などが挙げられる。

さらなるアプリケーションの提案・実装

本研究では時間の制約から基礎動作を確認するに留まった。今後は、第4.7節で提案したアプリケーションを実装していく予定である。さらに、第5.2.1節で述べた動画対応の可視光通信プロジェクタに対応した、インタラクティブなアプリケーションを提案・実装していくことが課題として挙げられる。

付録A

赤外可視変換素材を用いた 選択的情報提示

A.1 はじめに

本付録では本論文で提案する不可視情報を用いたユビキタス情報環境の構築のうち、赤外光を用いた情報提示、および赤外可視変換素材を用いた選択的な情報取得に関してまとめる。赤外光はリモコンをはじめとして、日常生活においても様々な形で用いられており、人間の目には見えない情報伝達手段として身近な存在である。本研究ではプロジェクタと赤外光を組み合わせることで、人間や機械に対する新たな情報提示手法の提案を行う。特に赤外光を用いた人間に対する情報提示手法を提案する。本研究は図 2.33 の (a) に位置づけられ、人間に直接理解可能な文字情報などを実環境に配置することを考える。人間に直接理解可能な情報を提示していることにより、特殊な電子機器を介さなくとも、提示された不可視情報の意味を理解することができるのが特徴である。

以下では、具体的な提案手法、赤外可視変換素材に関する調査、赤外可視変換素材に関する基礎実験、赤外 LED マトリクスディスプレイの実装に関して述べる。

A.2 コンセプト

現在、様々な情報が飛び交い氾濫している中で、情報を得たい人だけに提示できるような、選択的な情報提示手法が必要とされている。その中で、赤外光で情報を提示し、その情報を何らかのデバイス・素材を介して能動的に取得する方法が効果的な手法として挙げられる。従来はプロジェクタなどを用いて投影された赤外情報を、赤外線カメラおよびディスプレイを用いてユーザに見えるような方法 (図 A.1) が提案されてきた。本論文では、さらに電子的なデバイスを必要としない赤外光の情報提示手法を提案する。

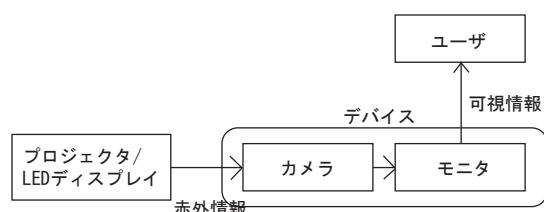


図 A.1: 電子デバイスを用いた手法

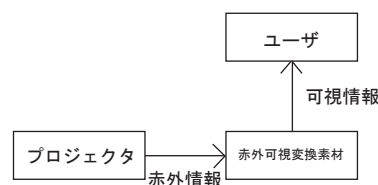


図 A.2: 赤外可視変換素材を用いた提案手法

A.3 システムの基本構成

基本的なシステム構成を図 A.2 に示す。本システムでは、赤外情報を提示できるプロジェクタと赤外情報を可視化できるスクリーンとで構成される。プロジェクタの投影光は赤外可視変換素材で可視化され拡散し、ユーザが直接見ることができる。

赤外情報のプロジェクション

通常のプロジェクタでは可視光の映像を投影するが、本提案システムでは、可視光をカットした赤外光を投影できるプロジェクタの実装が必要となる。

スクリーンにおける赤外可視変換

赤外光で投影された情報は人間の目には見えないものであるため、2 章で述べた、赤外情報を人間の目に見える可視情報に変換する素材を用いる。赤外可視変換素材をスクリーンとして用い、ここに赤外情報

を投影すると、スクリーン上で情報が可視化され、人間の目に認識可能となる。

このシステムでは、

- 電子デバイスの着用・保持を必要としない
- 赤外光で情報を投影するために周りの景観を損ねることがない
- 電子ディスプレイに提示するよりも大きさ・形の自由度が高い

ことが特徴として挙げられる。

1つの実装のイメージを図 A.3 に示す。赤外可視変換スクリーンを持つユーザは、赤外情報を投影できるプロジェクタからの投影光に素材をかざすことで、赤外情報を可視化して見ることができる。また、赤外可視変換スクリーンを持たない人はその情報を見ることができない。

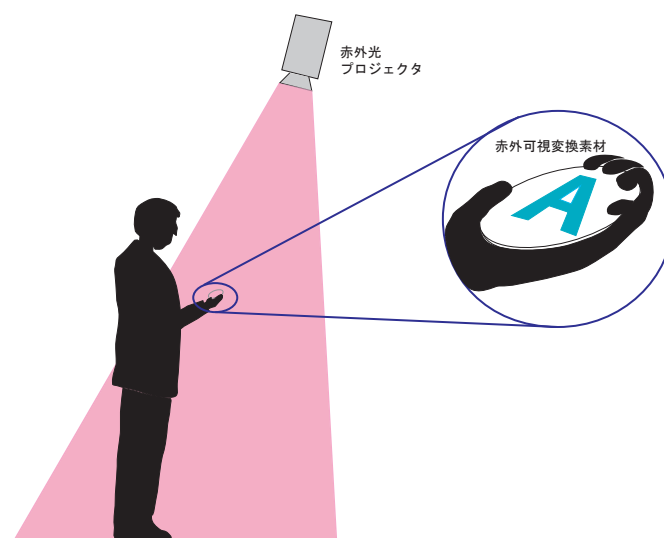


図 A.3: 実装イメージ図

スクリーンとして用いる赤外可視変換素材に関しては、A.4 で挙げる素材を比較することで、提案システムに適した素材を検討する。提案システムを構成するにあたり赤外可視変換素材に求められる性質である、

- 発光輝度
- 発光時間
- 励起に必要な波長帯域
- 予備励起の必要性
- 発光色 (色の種類)
- 素材の大きさ・形状

の6点について比較・検討する。なお、実験ではA.4で挙げた素材のうち赤外輝尽蛍光を示す赤外可視変換蛍光材ブロードバンドタイプおよびIRセンサカード、およびアップコンバージョン蛍光を示す赤外可視変換蛍光材PTIRシリーズを用いた。

一方、赤外情報のプロジェクションを実現するにあたっては、赤外情報を投影できるプロジェクタを実装することが考えられる。本論文ではその第一段階として市販のプロジェクタを用い、プロジェクタの投

影光に含まれる赤外光の波長帯域・強さを測定する実験を行う。

A.4 赤外可視変換素材

赤外可視変換素材とは赤外光を可視光に変換する素材である。

通信やレーザーで用いられている赤外線は、人間の目には見えないものであるため、赤外線の照射位置を検出する研究が行われてきた。本研究では、赤外光を可視光に変換するという特殊な性質に着目し、産業的に利用されてきた赤外可視変換素材を、隠された情報を浮き上がらせるディテクタとしてもちいることで応用することを考える。以下では、赤外可視変換素材の性質や製品動向についてまとめる。

光を照射することにより、その波長が変化する物質としては蛍光物質が代表的である。蛍光とは図 A.4 のように、光や電磁波などを照射することによりそれよりもエネルギーが低い長波長側の光を発する現象である。従って、一般に知られている蛍光物質は、紫外光を照射すると可視光が放出される性質を有するものである。一方、赤外線は可視光より波長が長くエネルギーも低いいため、赤外光を可視光に変換する素材は、一般的な蛍光物質とは原理が異なる。この素材にはその発光原理の違いから「赤外輝尽蛍光」と「アップコンバージョン蛍光」の 2 種類がある。以下でそれらの原理について述べる。

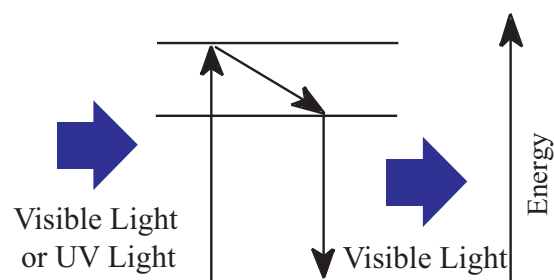


図 A.4: 一般的な蛍光

A.4.1 赤外輝尽蛍光

赤外輝尽蛍光を示す素材に対し外から紫外光もしくは可視光が当たると光を吸収して電子がエネルギー準位の高い状態に移りエネルギーをため込んだ状態になる。これを予備励起 (図 A.5(a)) という。予備励起された状態の素材に赤外光を照射すると、蓄えておいた電子が元のエネルギー準位に戻され、可視光が放出される (図 A.5(b))。

この蛍光を示す素材について 3 種類のを調査した。以下でその詳細について述べる。

赤外可視変換蛍光材 ブロードバンドタイプ (Phosphor Technology Ltd.) [74]

赤外可視変換蛍光材ブロードバンドタイプ (図 A.6) は英国の Phosphor Technology Ltd. によって開発された赤外輝尽蛍光を示す粉末素材である。主な用途としては、Si フォトセンサなどの可視光用検知器に塗布することにより、赤外光を可視光に変換し、可視光検知器で計測するというものである。この素材には、その励起波長の帯域や発光色の違いから 5 種類のタイプが存在する。今回は励起波長が 700 ~ 1500nm と最も短波長にあたる GL29P と GL29PM に関して調査した。放出波長の特性を図 A.7 に示す。一方、励起波長の感度特性に関しては情報を得ることが出来なかった。

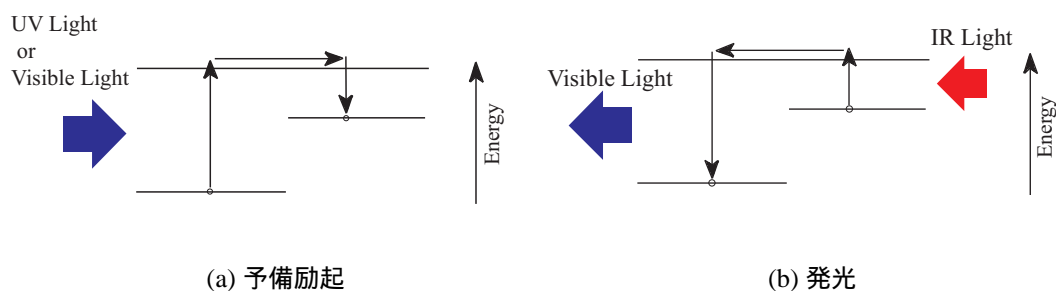
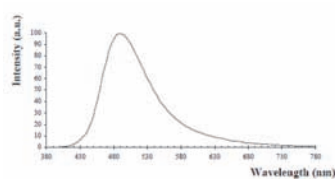


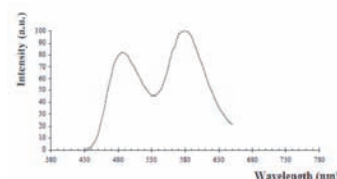
図 A.5: 赤外輝尽蛍光



図 A.6: ブロードバンドタイプ



(a) GL29P



(b) GL29PM

図 A.7: 放出波長の特徴

IR センサカード (LUMITEK) [75]

IR センサシリーズ(図 A.8)は米国 LUMITEK 社によって開発された赤外輝尽蛍光を示す素材である。主な用途としては、赤外線レーザーの照射位置を検出などが挙げられる。今回調査した反射型カードタイプの他にも透過型カードタイプ・板タイプ・シールタイプがある。通常、蛍光灯の光で 1 分以内に予備励起され、赤外線を連続的に照射して、約 1 分間発光する。感度特性を図 A.9、発光特性を図 A.10 に示す。



図 A.8: IR センサカード

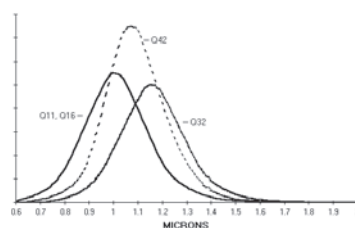


図 A.9: 感度特性

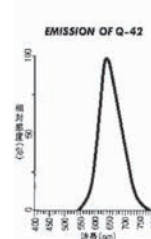


図 A.10: 放出波長特性

赤外検知カード (NTT 光エレクトロニクス研究所) [76]

赤外検知カード(図 A.11)は NTT 光エレクトロニクス研究所が開発した赤外輝尽蛍光を示すカードタイプの素材である。もとは光通信で用いられている 1300nm, 1550nm の赤外線を可視化して人間が見るために開発されたものである。蛍光灯や懐中電灯に数秒かざすことで予備励起させることができ、また十分な量のエネルギーを蓄えることができる。感度特性を図 A.12 に示す。発光色は赤であるが、その波長特性に関しては情報を得ることは出来なかった。

ここで上述の 3 種類の蛍光材の性質を表 A.1 にまとめる。これらの素材は予備励起を必要とするために、



図 A.11: 赤外検知カード

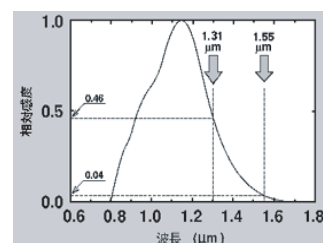


図 A.12: 感度特性

表 A.1: 赤外輝尽蛍光

素材名	ブロードバンドタイプ	IR センサカード	赤外検知カード
型番	GL29P/GL29PM	Q42-R45	-
予備励起	UV 光 or 白色光	白色光 (特に 450 ~ 500nm)	白色光
励起波長 (nm)	700 ~ 1500	700 ~ 1500	800 ~ 1650
放出波長 (発光色)	490/590nm	640nm	赤
大きさ	粒子サイズが 15 μ m	102mm × 127mm	18mm

長時間連続的に使用できないという欠点を持つ。一方、次に紹介するアップコンバージョン蛍光を示す素材は予備励起を必要としないものである。

A.4.2 アップコンバージョン蛍光

アップコンバージョン蛍光を示す素材に赤外光を照射したときの電子の遷移図は図 A.13 のようになる。電子が励起状態にあるときに、連続的に光子密度の高い赤外光を照射すると連続励起が起きる。この状態からの緩和が起きると、入射光の波長よりも波長の短い光が放出される。赤外輝尽蛍光と比較すると、励起にはより強い赤外光が必要であるが、予備励起は必要とせず赤外光を照射し続ける限り発光し続ける。

この蛍光を示す素材を 2 種類調査した。

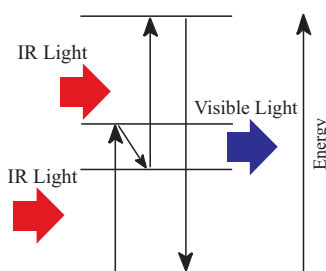


図 A.13: アップコンバージョン蛍光

赤外可視変換蛍光材 PTIR シリーズ (Phosphor Technology Ltd.) [74]

赤外可視変換蛍光材 PTIR タイプは前述の赤外可視変換蛍光材ブロードバンドタイプと同じく Phosphor Technology Ltd. によって開発された素材である。主な用途には、同様に Si フォトセンサなどの可視用検知



図 A.14: ヤグターキー

表 A.2: アップコンバージョン蛍光

素材名	PTIR タイプ	ヤグターキー
型番	PTIR545	-
励起波長 (nm)	950/980/1550	900 ~ 1070
放出波長 (nm)	548/554/670	550+660
大きさ	粒子サイズが 3 μ m	42mm

器に塗布し，赤外光を可視光に変換し，可視用検知器で計測することが挙げられる．しかし励起波長，放出波長の特性については情報を得られなかった．

ヤグターキー (住田ガラス) [77]

ヤグターキー (図 A.14) は住田ガラスによって開発されたアップコンバージョン蛍光を示すカードタイプの素材である．主な用途としては YAG レーザーの照射位置の確認が挙げられる．エルビウムに加えてイットリウムが混入されているためにある程度の幅の励起波長帯域を有することが特徴として挙げられる．ここで上述の 2 種類の蛍光材の性質を表 A.2 にまとめる．

A.5 素材に関する実験

A.5.1 実験の目的・内容

赤外可視変換素材が使用可能な環境を評価する指標として，発光の明るさを知る必要がある．そこで，赤外輝尽蛍光を示す赤外可視変換蛍光材ブロードバンドタイプおよび IR センサカード，アップコンバージョン蛍光を示す赤外可視変換蛍光材 PTIR タイプについて輝度の時間変化の測定を行い，発光時間を調べた．

赤外輝尽蛍光を示す素材の実験の配置図を図 A.15 に示す．赤外輝尽蛍光においては予備励起が必要であるために，まず PLUS の DLP プロジェクタ V-1100(1000 ルーメン) から白背景を投影し，その光によって予備励起を行った．この際の DLP プロジェクタと素材の距離は 1m である．発光するときの輝度は予備励起の時間によって変化すると考えられるため，予備励起の時間は 1 秒，3 秒，5 秒，7 秒，10 秒，および予備励起を行うには十分に長い時間とされている 60 秒の 6 通りで変化させた．

続いて素材に赤外線投光器により赤外光を投影し発光させ，その可視光の輝度をおよそ 1 秒ごとに色彩輝度計 (KONICA MINOLTA CS-100A) によって測定した．今回の実験では 0.1cd 以上を発光しているとし，赤外可視変換素材の発光輝度が 0.1cd 未満になるまで測定を続けた．また，今回使用する赤外線投光器には高出力赤外線投光器 IN35 を用いた．高出力赤外線投光器 IN35 は，赤外線 LED を 256 個取り付け付けた 900

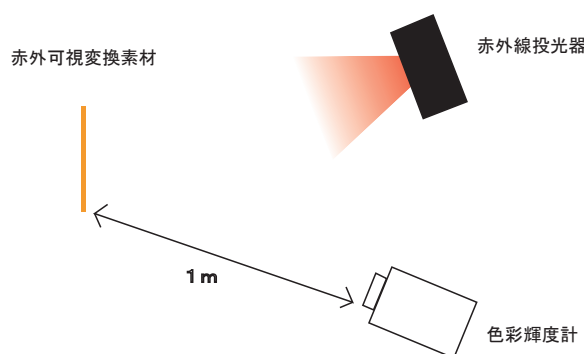


図 A.15: 輝度測定実験の模式図

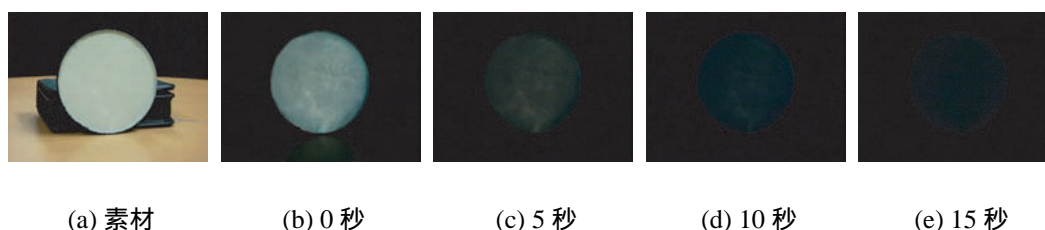


図 A.16: 発光の様子（赤外可視変換蛍光材ブロードバンドタイプ）

～1000nm の範囲の波長域の光を照射できる光源である。実験では輝度計までの距離の違いによる輝度の誤差をなくすために、素材と輝度計の距離は 1m に固定した。また、発光の輝度は素材に照射する赤外光の強さによっても変化すると考えられるため、赤外線投光器と赤外可視変換素材の距離を 50cm, 100cm, および 150cm の 3 通りで変化させることで、素材に照射する赤外光の強さを変化させた。

一方、アップコンバージョン蛍光を示す素材では予備励起を必要としないため、素材に赤外光を照射して輝度を測定することのみを行った。アップコンバージョン蛍光では輝度の時間変化はないと考えられるため、赤外線投光器と赤外可視変換素材の距離に応じてのみ、発光の輝度が変化すると考えられる。そこで赤外線投光器と素材の距離を 0cm から 100cm まで 10cm ごとに測定を行った。

なお、照明条件は外光による影響を遮断するために、実験はすべて暗室において行った。

A.5.2 実験結果

各実験の結果を以下に示す。全体を通じ発光は暗く、蛍光灯などが点いている明るい環境では発光の識別が困難となることが分かった。しかし暗室であれば、人間の目で十分に認識ができる明るさであった。以下、各種素材の特性について述べる。

赤外可視変換蛍光材 ブロードバンドタイプ

赤外可視変換蛍光材ブロードバンドタイプの発光の様子を図 A.16 に示す。

赤外線投光器と素材の距離を固定し、予備励起の時間を変化させたときの時間変化を図 A.17 に示す。赤外光を照射した直後の輝度が最も高く、10 秒以内に半分以下の輝度に下がることが分かる。また、予備励起の時間による輝度の差があまり見られず、数秒程度で十分な予備励起ができる。

続いて、予備励起の時間を固定した上で赤外線投光器と素材の距離を変化させたときの、輝度の時間変化を図 A.18 に示す。投光器と素材の距離によって輝度に大きな違いがあるのが分かる。投光器と素材の距離が短くなるほど輝度は高くなるが、輝度の落ち方も急激で発光時間も短くなる場合があった。逆に、投

光器と素材の距離が長いほど輝度の落ち方が緩やかになるが、これは照射する赤外光が弱いほど、素材にため込んだエネルギーを使う速度が遅くなるためと考えられる。

IR センサカード

まずは発光の様子を図 A.19 に示す。最初は明るく発光していることがわかるが、数十秒で急激に暗くなり、その状態が数百秒続く。

続いて、赤外線投光器と素材の距離を固定し、予備励起の時間を変化させたときの輝度の時間変化を図 A.20 に示す。これより予備励起の時間が長い方が長時間高い輝度で発光することが分かる。しかし、5 秒、7 秒、10 秒の間にはそれほど差は見られず、5 秒程度の予備励起をすれば十分であるということが分かった。また、赤外線投光器と素材の距離が 150cm では 50cm や 100cm の場合ほど、予備励起の時間による輝度の違いに顕著な差が見られなかった。これは距離が長い場合十分な量の赤外光が素材にあたらず、発光が全体的に弱いと予想される。

次に、予備励起の時間を固定した上で赤外線投光器と素材の距離を変化させたときの輝度の変化を図 A.21 に示す。全体的に予備励起の時間を変化させた場合より、差がないことが分かる。図 A.21(a) や図 A.21(b) では 150cm の方が全体的に輝度が高めにしているが、これは 50cm と 100cm の場合は強い赤外光をあてたためにため込んでいたエネルギーを急激に使ってしまったためと考えられる。

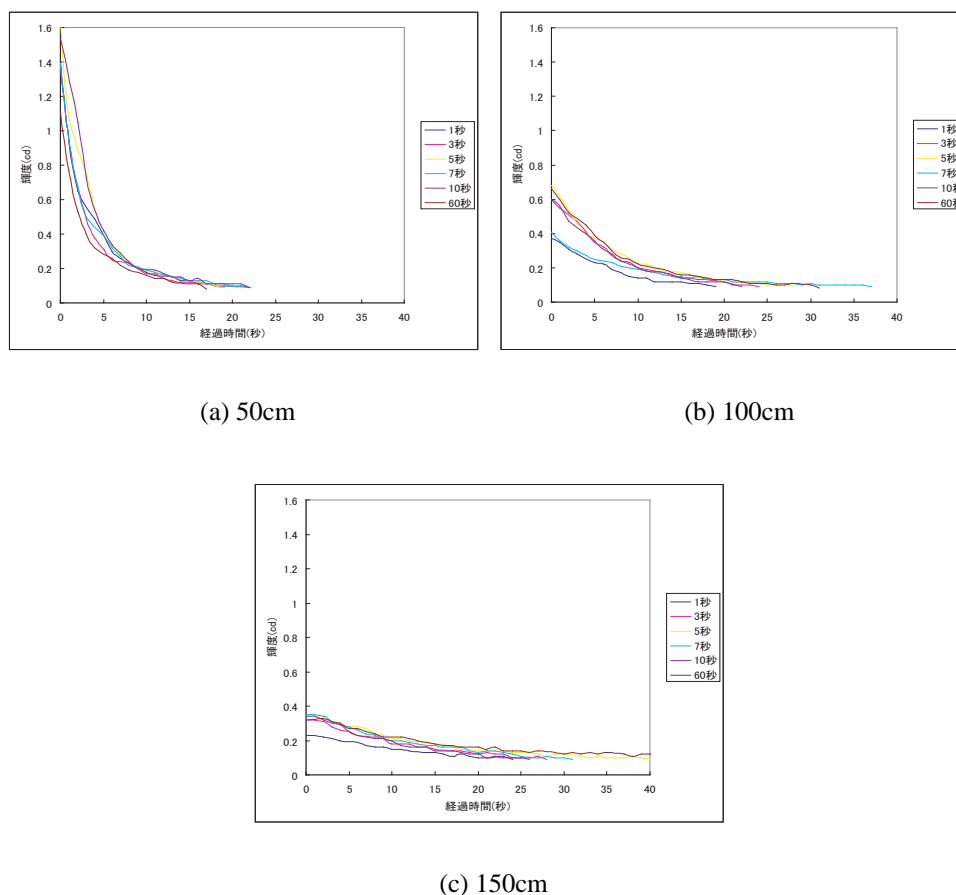
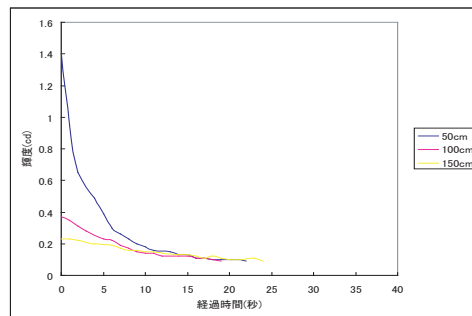
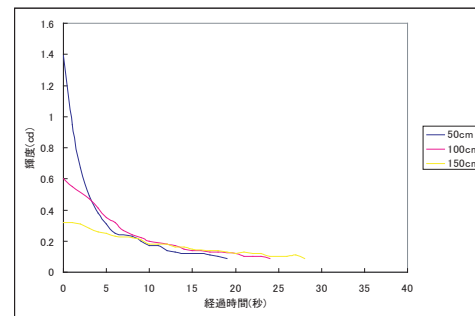


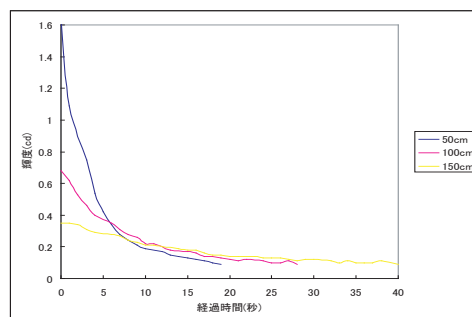
図 A.17: 予備励起時間ごとの輝度の時間変化 (ブロードバンドタイプ)



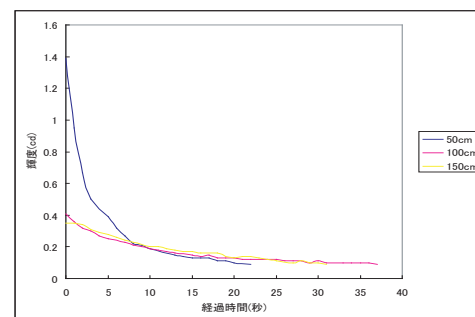
(a) 1 秒



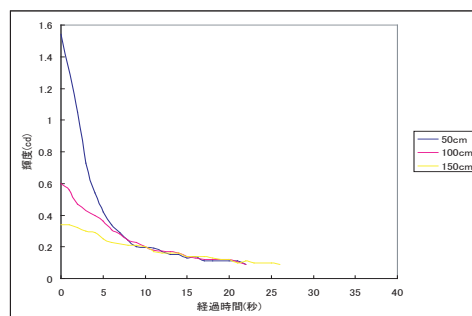
(b) 3 秒



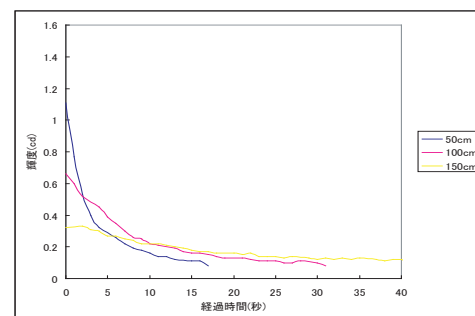
(c) 5 秒



(d) 7 秒



(e) 10 秒



(f) 60 秒

図 A.18: 投光器と素材の距離ごとの輝度の時間変化 (ブロードバンドタイプ)

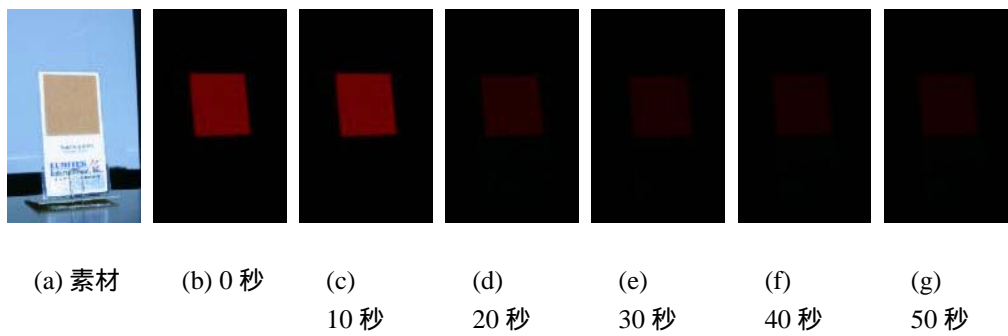


図 A.19: 発光の様子 (IR センサカード)

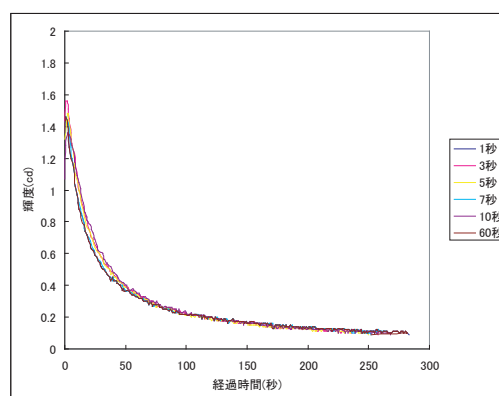
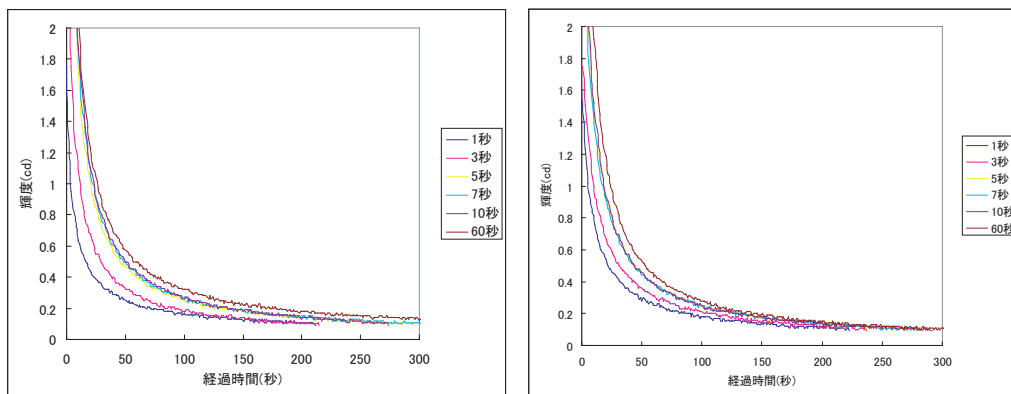
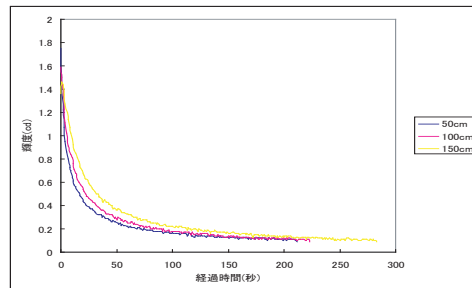
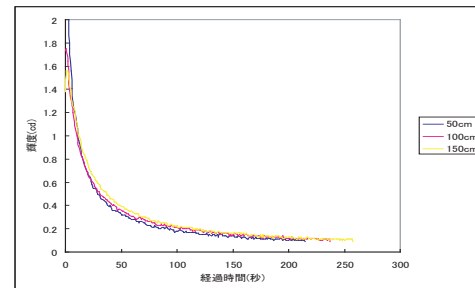


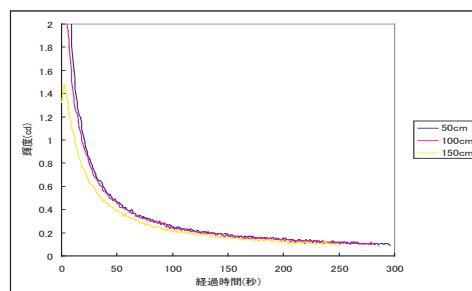
図 A.20: 予備励起時間ごとの輝度の時間変化 (IR センサカード)



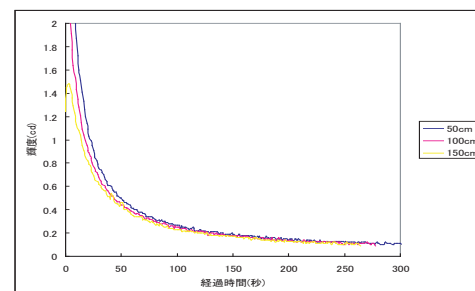
(a) 1 秒



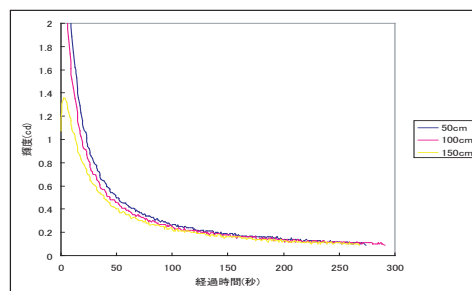
(b) 3 秒



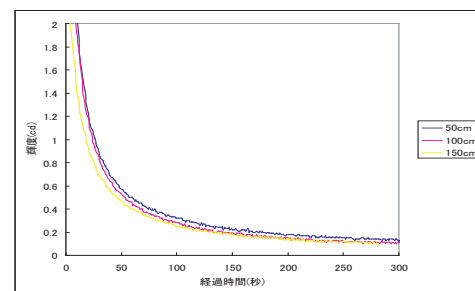
(c) 5 秒



(d) 7 秒



(e) 10 秒



(f) 60 秒

図 A.21: 投光器と素材の距離ごとの輝度の時間変化 (IR センサカード)

赤外可視変換蛍光材 PTIR シリーズ

投光器と素材の距離を変化させたときの輝度の変化を図 A.22 に示す。

投光器と素材の距離が長くなるにつれて急激に輝度が落ち、50cm を超えたあたりからは肉眼でほとんど見えないほど弱い発光であった。一方で、投光器と素材の距離が数十 cm までであれば肉眼でははっきりと見えるほどの発光が確認できた。

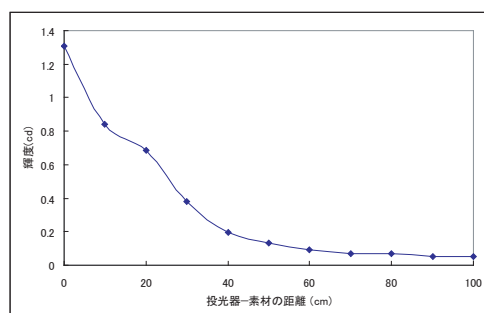


図 A.22: 投光器と素材の距離と輝度の関係 (PTIR シリーズ)

A.5.3 素材の実験のまとめ

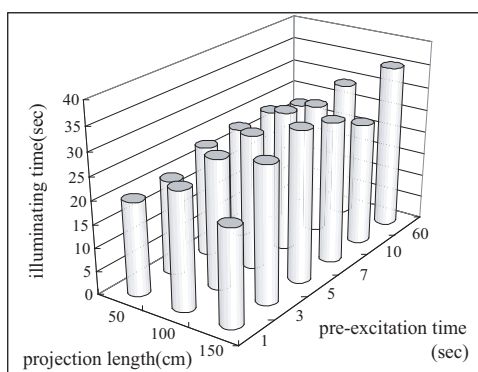
素材の実験では赤外輝尽蛍光を示す赤外可視変換蛍光材ブロードバンドタイプおよび IR センサカード、アップコンバージョン蛍光を示す赤外可視変換蛍光材 PTIR タイプについて輝度の時間変化の測定を行い、各々の素材の特性を調べた。全体として、素材の発光は暗いため蛍光灯が点いているような明るい環境では使用できないことが分かった。逆に暗室であれば十分に肉眼で認識できるが、赤外輝尽蛍光の場合、赤外光をあてた直後から輝度が急激に低下してしまう。

ここで各素材について各パラメータごとの発光時間と最大輝度を図 A.23 に示す。また、これらのグラフを元に、4.1 節で挙げた素材の満たすべき要件の整理を行うと表 A.3 になる。

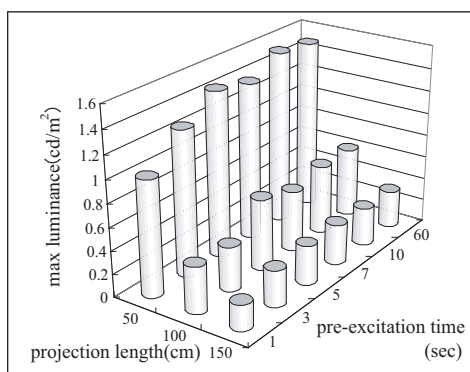
実験の結果から発光輝度では、ブロードバンドタイプ、PRIR シリーズに比べて IR センサカードの輝度が高かったが、肉眼ではどの発光の明るさも差がないように見えた。どの赤外可視変換素材も輝度が高い状態では人間の目でははっきりと認識できる明るさであったが、暗い環境下でしか発光は確認できない。

表 A.3: 素材の比較

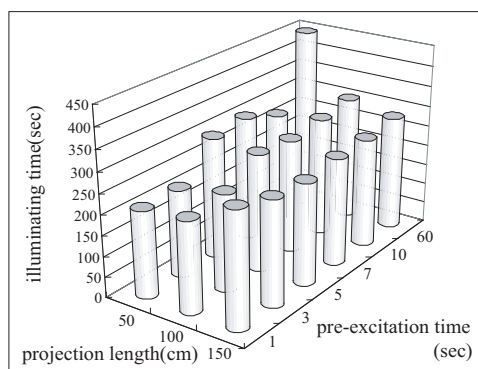
素材名	ブロードバンドタイプ	IR センサカード	PTIR シリーズ
型番	GL29P/GL29PM	Q42-R45	PTIR545
メーカー	Phosphor Technology Ltd.	LUMITEK	Phosphor Technology Ltd.
発光輝度			
発光時間	×		
励起の波長帯域 (nm)	700 ~ 1500	700 ~ 1500	950/980/1550
予備励起の必要性	有	有	無
放出波長	490/590	640	548/554/670
素材の大きさ・形状の自由度			



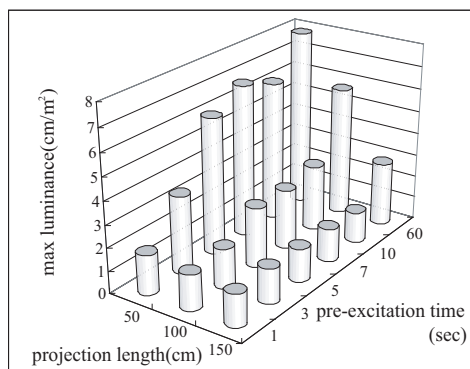
(a) 発光時間(ブロードバンドタイプ)



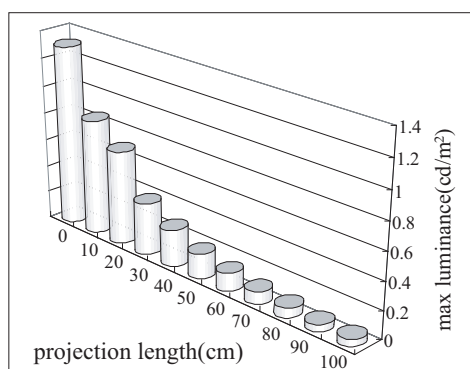
(b) 最大輝度値(ブロードバンドタイプ)



(c) 発光時間(IRセンサカード)



(d) 最大輝度値(IRセンサカード)



(e) 最大輝度値(PTIRシリーズ)

図 A.23: 素材の比較実験結果



図 A.24: 文字情報の投影

発光時間に関しては、PTIR シリーズは赤外光を照射し続ける限り発光し続けるが、IR センサカードとブロードバンドタイプは赤外光を照射し続けても発光時間は限られたものであった。IR センサカードとブロードバンドタイプでは図 A.23 より IR センサカードの方が発光時間が長い。

波長帯域ではブロードバンドタイプと IR センサカードは 700 ~ 1500nm と広いバンド幅をもつのに対し、PTIR シリーズ 950nm などの特定の波長でしか励起できない。

発光色の種類に関しては、ブロードバンドタイプが 5 種類、IR センサカードが 3 種類、PTIR シリーズが 8 種類の発光色をもつ。

素材の大きさについては、ブロードバンドタイプと PTIR シリーズは粉末素材であるため、自由な大きさ・形状に塗布することができるのに対し、IR センサカードは大きさ・形状は固定である。しかし、IR センサカードの発光面の大きさは約 120mm × 100mm と適度な大きさであるため問題はないと考えられる。

これにより、赤外光で投影された情報を赤外可視変換素材を用いて取得するのに適しているのは、アップコンバージョン蛍光を示す PTIR シリーズであることが分かった。

そこで PTIR シリーズをスクリーンとして用い、文字情報を投影したところ図 A.24 となった。

A.6 赤外 LED によるマトリクスディスプレイ

赤外可視変換素材によって人間に見える形に変換することの基礎的な実装として、さらに、赤外 LED をマトリクス状に並べたディスプレイを試作した。この実装により、赤外光による動的な情報提示を実現することが可能になる。その外観と内部の回路の様子を図 A.25 に示す。なお、使用した赤外 LED は 5mm High Infrared LED OSIR5113 (OptoSupply 社製) であり、8 × 8 個用いてディスプレイを構成している。制御部はマイコン (PIC16F88) を 5 つ用いており、各々の赤外 LED の ON と OFF を独立に変化させることが可能である。

このディスプレイは人間の目には何も光っているようには見えない。つまり LED がアレイ状に並んでいるだけである。しかし、赤外可視変換素材をかざすことにより、LED の点滅パターンや文字情報を読み取ることが可能になる。

赤外 LED マトリクスによって提示された文字情報を図 A.26 に示す。図 A.26 は LED マトリクスディスプレイが点灯している様子を、ビデオカメラで撮影したものである (デジタルカメラやビデオカメラは赤外領域まで感度があるため、撮影することが可能である)。1 秒ごとに数字が減るカウントダウンのアプリケーションを試作し、2006 年 12 月に東京大学にて開催された IML Opne House [85] にて展示を行った。

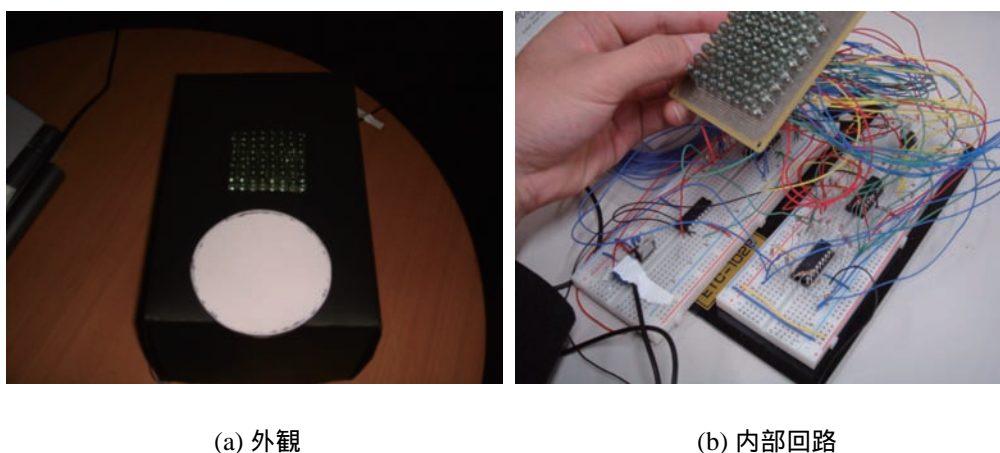


図 A.25: 赤外 LED マトリクスディスプレイ

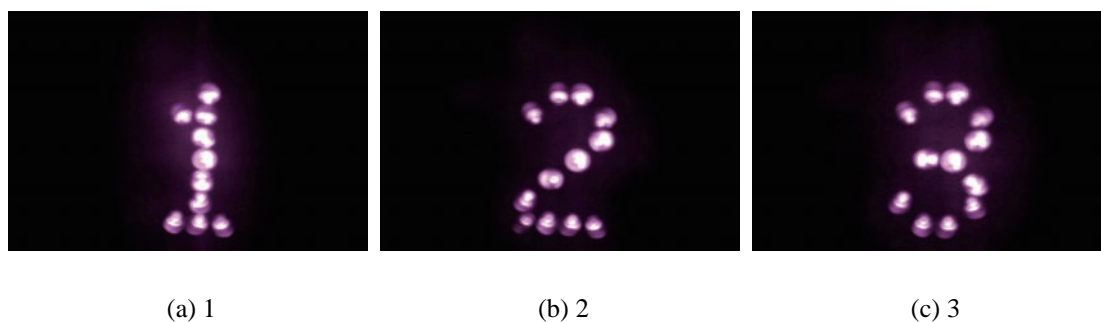


図 A.26: 赤外 LED マトリクスによる赤外情報の提示

A.7 赤外情報の投影に関する基礎実験

A.7.1 実験の目的

赤外光による情報を提示する手法として、赤外光を投影できるプロジェクタが考えられる。市販のプロジェクタは可視光を投影するためのものであるため、不必要な赤外領域の光は内部でフィルタによりカットされている、あるいは赤外光を放出しないランプを使用していると考えられる。そこで、基礎実験では、赤外光投影プロジェクタを実装する第一段階として、市販のプロジェクタからの投影光に含まれる赤外光について、その波長領域と強さを測定した。

A.7.2 実験内容・結果

図 A.27 のようにレンズ部に可視光カットフィルタ (FUJIFILM IR-76, IR-80, IR-84, IR-90) をつけたプロジェクタ (PLUS V-1100Z) から白背景を投影し、その投影光をフォトダイオードに照射することで、フォトダイオードによって駆動される電圧値をオシロスコープ (Tektronix TDS2012) により測定した。なお、可視光カットフィルタ IR-76 は 760nm 以下の波長の可視光をカットするハイパスフィルタである。実験で用いたプロジェクタは DLP プロジェクタであり、内部で白、赤、緑、青のフィルタが回転しているため、オシロスコープで観測される電圧の波形は 4 段階に電圧が変化する階段状の波形になる。その中で最も赤外光

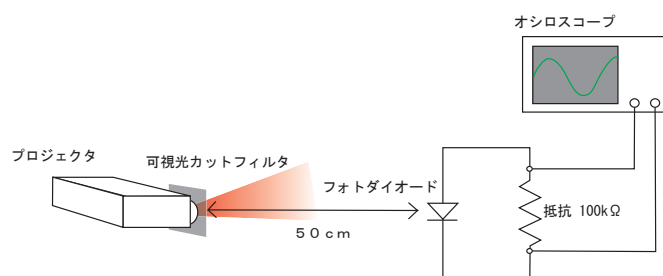


図 A.27: 赤外光の強さ測定の実験模式図

表 A.4: プロジェクタの投影光中の赤外光

フィルタ (nm)	電圧値 (mV)
760	200
800	80
840	30
900	—

を透過する白フィルタでの電圧値に注目した。

これにより赤外光の波長はフィルタの閾値によって、強さはフォトダイオードによって駆動される電圧値によって得ることができる。

実験の結果を表 A.4 に示す。これより市販の DLP プロジェクタ V-1100 からは 840nm 付近までは赤外光が出ていることが分かった。しかし、フォトダイオードで駆動される電圧値のノイズが 20mV 程度あることを考慮すると、840nm 付近の赤外光は極めて弱いものである。

続いて、市販のプロジェクタの赤外光による文字情報を投影を行った。実験の模式図を図 A.28 に示す。可視光カットフィルタをレンズ部につけたプロジェクタにより黒背景の白文字を投影した。なお、投影面には十分な赤外光の反射が得られるホワイトボードを用いた。投影した文字情報を肉眼で見ると図 A.29(a) のように何も写っていないように見えるが、ナイトショット機能を通して見ると図 A.29(b) のように赤外光で投影した文字情報を読み取ることが可能であった。なお、この実験は 760nm のハイパスフィルタを用いたが、800nm のハイパスフィルタでは投影される赤外光が弱いため、ナイトショット機能を通して、赤外光で投影された文字情報は見えなかった。

A.7.3 赤外情報の投影に関する実験のまとめ

赤外情報の投影の基礎実験として、市販の DLP プロジェクタ (PLUS V-1100) の投影光中の赤外光の強さ、波長帯域を調査した。その結果、840nm 付近まで赤外光が出ていることが分かった。さらに、760nm 付近においては、投影した赤外光による文字情報をビデオカメラのナイトショット機能で可視化して見ることが可能であった。しかし、投影光中の赤外光は弱く、投影面や環境光などの制約が大きいといった問題点が挙げられる。今回の実験は暗室において行ったが、蛍光灯は赤外光を放出するために、環境光がある状況では、投影した赤外光が判別できない可能性がある。

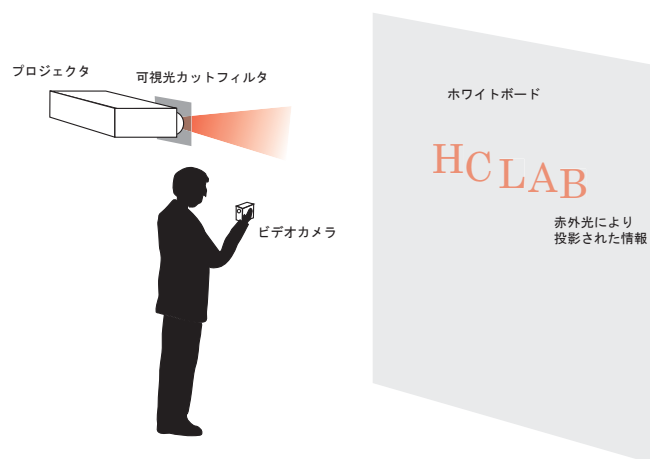


図 A.28: 文字情報の投影の模式図



(a) ナイトショット OFF

(b) ナイトショット ON

図 A.29: 赤外投光器による赤外情報の投影

A.8 本章のまとめ

本章では提案システムを実装するにあたっての実験について述べた。スクリーンとして用いる赤外可視変換素材については、その発光輝度を測定し比較・検討を行い、スクリーンとして最も適した素材はアップコンバージョン蛍光を示す赤外可視変換蛍光材 PTIR シリーズと分かった。また、赤外可視変換素材 PTIR シリーズと赤外線投光器を用いた簡単な文字情報の投影実験、動的な情報提示を実現するための、赤外 LED マトリクスディスプレイの試作と情報提示実験を行った。

一方、赤外情報の投影に関しては、市販のプロジェクタを用いた基礎実験を行い、投影光中に赤外光が含まれていることを確認した。しかし、その波長帯域は狭く、また赤外光の強さも弱いものであるため、より広い帯域で強い赤外光を投影できるようなチューニングの必要性があることが分かった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、素晴らしい研究環境と数多くの成果発表の機会を与えて下さり、多くの有益なご助言頂きました。原島 博 教授、苗村 健 准教授に心から御礼申し上げます。原島教授には、さまざまな知見や研究への取り組み方についてご教示頂き、研究の方向性について大局的な見地からご指導頂きました。苗村准教授には、本研究の構想から本論文を書き上げるに至るまで、研究内容に関する具体的なお助言を頂くとともに、論文投稿や学会発表の際には細かな部分まで親身になって面倒を見て頂きました。本当にありがとうございました。

高橋 桂太 特任助教には、研究内容に関して広い視点から多くのご指摘、ご助言を頂きました。また、論文投稿の際には、文章の構成から細部にいたるまで面倒を見て頂きました。深く御礼申し上げます。研究員の筧 康明 氏には、卒論生の頃より、貴重な時間を削ってまで、親身にご指導・ご支援頂きました。研究当初から熱心にご助言を下さり、時には深夜までご協力をして頂き、研究室内外で幅広くご指導下さいました。数々の素晴らしいアイデアをご教授いただき、非常に多くのことを学ばせて頂きました。本当にありがとうございました。

博士課程3年の橋田 朋子 氏には、学部生の頃より、研究に関する議論はもとより研究室生活全般に渡って大変お世話になりました。北村 匡彦 氏（現 NTT）には、在学中、空間分割型可視光通信システムに関して多くの指導を頂き、有益な議論をさせていただきました。北村氏なくしては、本論文は書きえませんでした。深く感謝いたします。修士課程2年の吉野 祥之 氏は、学部生の時から良き仲間として、互いに高めあい、研究のみならずあらゆる場面でお世話になりました。今後のご活躍をお祈り申し上げます。更に、森村 久美子 講師には、スペシャルイングリッシュレッスンの指導を頂いただけでなく、研究室生活において暖かな励ましをして頂きました。博士課程2年のチェン ドミニク 氏には、国際学会投稿にあたり、英語のアドバイスをいただきました。深く感謝いたします。博士課程2年の田口 裕一 氏には、研究に関する的確なアドバイスを頂くとともに、生活に関してもアドバイスを頂き、非常に有益な時間を過ごすことができました。博士課程2年の小池 崇文 氏には、国際学会の際に行動を共にし、初めての海外で緊張する私を、様々な面で助けて頂きました。本当にありがとうございました。同じ修士課程2年の天野 翔 氏、上田 健介 氏、ソン ヨンア 氏は同じ学年として良い関係を築くことができ、非常に楽しく充実した学生生活とともに過ごし、お互い切磋琢磨することができました。今後のご活躍をお祈り申し上げます。

研究室において、多くの時間を共有させて頂いた SIGMA グループの皆様には特にお世話になりました。修士課程1年の大口 諒 氏、学部生の谷田 英生 氏とは、同じチームとして助け合い、活発な議論をするとともに、多くの面で協力を頂きました。心からお礼申し上げます。

また、研究環境の整備に努めてくださった、大谷 智子 氏、東山 薫 氏、吉田 有里 氏、坂井 理笑 氏に御礼申し上げます。居心地のよい研究室生活を過ごすことができました。心から感謝しております。日常生活においていつもお世話になり、あらゆる面で支えてくださった原島・苗村研究室の先輩方、後輩の皆様には、厚く御礼申し上げます。ありがとうございました。

最後に、研究生活を通してお世話になりましたすべての方々に対して、様々な面でこれまで支えてくださった、友人、そして家族に、心から感謝いたします。

2008 年 2 月 4 日
木村 翔

参考文献

- [1] Michael Bajura and Ulrich Neumann:“Dynamic Registration Correction in Augmented-Reality Systems”, Virtual Reality Annual International Symposium(VRAIS), pp.189–196, (1995).
- [2] 暦本 純一, 綾塚 祐二, 林 一輝: “Augment-able Reality:実空間と情報空間を融合した情報交流”, WISS1998, pp.115–124, (1998).
- [3] 暦本 純一: “2 次元マトリックスコードを利用した拡張現実感の構成手法”, WISS1996, pp.199–208, (1996).
- [4] Jun Rekimoto:“NaviCam : A magnifying glass approach to augmented reality”, Teleoperators and Virtual Environments. Vol. 6, no. 4, pp.399–412, (1997.8)
- [5] H.Kato, M.Billinghurst, I. Poupyrev, K. Imamoto and K. Tachibana:“Virtual Object Manipulation on a Table-Top AR Environment”, In pfoceedings of the International Symposium on Augmented Realily(ISAR2000), pp.111–119, (2000).
- [6] 綾塚 祐二, 暦元 純一:“Active CyberCode:直接操作できる二次元コード”, 第 13 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ, WISS2005 . pp.3–8, (2005).
- [7] Jun Rekimoto, Brygg Ullmer and Haruo Oba:“DataTiles:A Modular Platform for Mixed Physical and Graphical Interactions”, Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems(CHI’01), pp.269–276, (2001)
- [8] 椎尾 一郎, 増井 俊之, 塚田 浩二:“MouseField: ユビキタスコンピューティングのための入力デバイス”, 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No. 7, pp.1661–1670, (2005.7).
- [9] 黒川 高弘, 高橋 甲介, 中西 英之:“床面 RFID センサ「インテリマット」の開発”, 情報処研究報告研究報告, 2007-HCI-124, pp.49–56, (2007.7).
- [10] Steven Feiner, Blair MacIntyre and Doree Sligmann:“Knowledge-based augmented reality”, Communication of the ACM, Vol.36, No.7, pp.38–49, (1997.7)
- [11] R. Raskar, G. Welch and W.C. Chen: “Table-Top Spatially-Augmented Reality: Bringing Physical Models to Life with Projected Imagery,” 2nd Int’l Workshop on Augmented Reality, pp.64–71 (1999).
- [12] D.Bandyopadhyay, R.Raskar and H.Fuchs:“Dynamic Shader Lamps:Painting on Movable Object”, Proc.IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR2001), pp.207–216, (2001).
- [13] 稲見 昌彦, 杉本 麻樹, 新居 英明:“Display-Based Computing の研究 第一報 : 画像提示装置を主体とした実世界指向情報システム”, VRSJ10 回大会, pp.441–442, (2005.9)
- [14] 中村 享大, 杉本 麻樹, 小島 稔, 新居 英明, 稲見 昌彦:“Display-Based Computing の研究 第二報 : 画像提示装置を用いた位置姿勢計測”, VRSJ10 回大会, pp.455–458, (2005.9).

- [15] 小島 稔, 杉本 麻樹, 中村 享大, 富田 正浩, 新居 英明, 稲見 昌彦: “Display-Based Computing の研究 第三報: 小型ロボットを用いた MR ゲーム環境の構築”, VRSJ10 回大会, pp.451–454, (2005.9).
- [16] 新居 英明, 橋本 悠希, 杉本 麻樹, 稲見 昌彦: “Display-Based Computing の研究 (第四報): プロジェクタを使用した位置検出システム”, VRSJ10 回大会, pp.447–450, (2005.9)
- [17] 小島 稔, 児玉 和樹, 中村 享大, 杉本 麻樹, 稲見 昌彦: “Display-based Computing の研究 第五報: ライトペンの試験の実装”, 情報処理学会研究報告, 2006-HI-118, (2006.5).
- [18] M. Sugimoto, M. Kojima, A. Nakamura, G. Kagotani, H. Nii and M. Inami: “Augmented coliseum: Display-based computing for augmented reality inspiration computing robot,” in SIGGRAPH 2005 Emerging Technologies, (2005).
- [19] M.Kojima, M.Sugimoto, A.Nakamura, M.Tomita, H.Nii and M.Inami: “Augmented Coliseum:An Augmented Game Environment with Small Vehicles”, The First IEEE Intern. Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems(TableTop2006), pp.3–8, 2006.
- [20] 中村 享大, 小島 稔, 杉本 麻樹, 新居 英明, 稲見 昌彦: “Display-based Computing の研究 第六報: 画像表示装置を用いた位置計測における高速化”, 信学技報, MVE2006-3, pp.13-16, (2007.6).
- [21] 井田 伸也, 杉本 麻樹, 小島 稔, 新居 英明, 稲見 昌彦: “画像提示装置を用いた顕微鏡下のロボット制御”, 信学技報, MVE2007-6, pp.93-96, (2007.6).
- [22] 杉本 麻樹, 管 彬洋, 富田 正浩, 稲見 昌彦: “Display-based Computing の研究 第八報: 画像提示装置を用いたロボットの計測と制御の複合システム”, 日本バーチャルリアリティ学会第 12 回大会論文集, 2D3-6, (2007.9).
- [23] 杉本 麻樹, 小島 稔, 稲見 昌彦: “Augmented Coliseum Plus:小型ヒューマノイドロボットを用いた複合現実環境の提案”, エンタテインメントコンピューティング 2007, pp.31-34, (2007.10).
- [24] 杉本 麻樹, 小島 稔, 中村 享大, 富田 正浩, 新居 英明, 稲見 昌彦: “複合現実感技術と小型ロボットを用いたゲーム環境”, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.11, pp.3490–3498, (2007.11).
- [25] Ramesh Raskar, Paul Beardsley, Feroen van Baar, Yao Wang, Paul Dietz, Johnny Lee, Darren Leigh and Thomas Willwacher: “RFID Lamps:Interactiong with a Self-Describing World via Photosensing Wireless Tags and Projectors”, ACM Transactions on Graphics, Vol.23, Issue 3, pp.406–415, (2004).
- [26] 前田 真希, 小川 剛史, 清川 清, 竹村 治雄: “ウェアラブル拡張現実感のための赤外マーカのステレオ計測と姿勢センサを用いた位置・姿勢推定”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.10, No.4, pp.459–466, (2005).
- [27] 中里 祐介, 榊原 誠之, 横矢 直和: “不可視マーカを用いたウェアラブル AR システムの実環境における実証実験”, 画像の認識・理解シンポジウム (MURU2005) 講演論文集, pp.1420–1427, (2005).
- [28] 中里 祐介, 榊原 誠之, 横矢 直和: “不可視マーカを用いた位置・姿勢推定システムの構築および評価”, 信学技報, MVE2007-50, pp.73–78, (2007.10).
- [29] Yasuaki Kakehi, Takero Hosomi, Makoto Iida, Takeshi Naemura and Mitsunori Matsushita: “Transparent Tabletop Interface for Multiple Users on Lumisight Table”, The First IEEE Intern. Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems(TableTop2006), pp. 141–148, (2006.1).

- [30] 西村 勇一, 檜山 敦, 谷川 智洋, 広田 浩一, 廣瀬 通孝: “ユビキタス環境におけるモバイル端末による情報提示に関する検討”, 日本 VR 学会 第 10 回大会, pp.13–16, (2005.9).
- [31] 楠 房子, 矢入 郁子, 西村 拓一: “MultiAudable: 個別音声出力可能なインタラクティブテーブル”, インタラクション 2004 論文集, pp.279–286, (2004.3).
- [32] Takuichi Nishimura, Hideo Ito, Yoshiyuki Nakamura and Hideyuki Nakashima: “A Compact Battery-less Information Terminal For Interactive Information Support”, the Fifty Annual Conference on Ubiquitous Computing(Ubicomp2003), Workshop: Multi-Device Interfaces for Ubiquitous Peripheral Interaction, (2003).
- [33] 岩中 由紀, 佐藤 宏介: “赤外パターン光投影制御による触覚情報提示装置”, 電子情報通信学会総合大会, A-16-25, (2005).
- [34] 白井 良成, 松下 光範, 大黒 毅: “秘映プロジェクタ: 不可視情報による実環境の拡張”, WISS2003, pp.115–122, (2003).
- [35] “見ることは信じること”, <http://www.petworks.co.jp/~hachiya/works/miru.html>
- [36] 松岡 康友: “赤外線プロジェクタの照射角度に基づく位置検出システム”, 東京大学大学院学際情報学府修士学位論文, (2006.3).
- [37] J.Chung Lee, S.Hudson, P.Dietz: “Hybrid Infrared and Visible Light Projection for Location Tracking,” Symposium on User Interface Software and Technology(UIST), (2007.10).
- [38] 松下 伸行, 日原 大輔, 後 輝行, 吉村 真一, 暦本 純一: “ID Cam: シーンと ID を同時に取得可能なイメージセンサ”, インタラクション 2002 論文集, pp.9–16, (2002.3).
- [39] Toshihiko Komine and Masao Nakagawa: “Integrated System of White LED Visible-Light Communication and Power-Line Communication”, IEEE Trans. on Consumer Electronics , Vol. 49, No. 1, pp.71–79, (2003.2).
- [40] 岩崎 真也, 圓道 知博, 藤井 俊彰, 谷本 正幸: “路車間可視光通信のためのリアルタイム受信システム”, IMPS シンポジウム 2007, I4-14, (2007.11).
- [41] 新居 英明, 稲見 昌彦: “再帰性光通信技術の研究”, 第 8 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 539–542, (2003).
- [42] 稲見 昌彦, 新居 英明: “再帰性光通信技術の研究 (第二報)- 試験的実装-”, 第 4 回 SICE システムインテグレーション部門 (S I 部門) 講演会, CD-ROM 集, (2003).
- [43] 新居 英明, 杉本 麻樹, 稲見 昌彦: “再帰性光通信技術の研究 (第三報) - 超高速度 LED プロジェクタの試験的実装”, ヒューマンインターフェース学会研究報告集, Vol.6, No.3, pp. 77–80, (2004).
- [44] 新居 英明, 杉本 麻樹, 稲見 昌彦: “再帰性光通信技術の研究 (第四報) - LED 照明によるビデオ撮影妨害技術”, 第 28 回ヒューマンインターフェース学会研究会 「人工現実感, ヒューマンインターフェース学会研究報告集, Vol.6, No.3, pp. 81–84, (2004).
- [45] H.Nii and M.Inami: “Ultra high speed projector for jam light system,” in International Workshop on Modern Science and Technology 2004, CD-ROM, (2004.9).

- [46] Hideaki Nii, Maki Sugimoto and Masahiko Inami: "Smart Light: Ultra High Speed Projector for Spatial Multiplexing Optical Transmission", IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR'05), p.95, (2005)
- [47] H.Nii, J.Summet, Y.Zhao, J.Westhues, P.Dietz, S.Nayar, J.Barnwell, M.Noland, V.Branzoi, E.Bruns, M.Inami and R.Raskar: "Instant Replay using high speed motion capture and projected overlay," in ACM SIGGRAPH2006: Sketches, (2006).
- [48] Ramesh Raskar, Hideaki Nii, Bert deDecker, Yuki Hashimoto, Jay Summet, Dylan Moore, Yong Zhao, Jonathan Westhues, Paul Dietz, John Barnwell, Shree Nayar, Masahiko Inami, Philippe Bekaert, Michael Noland, Vlad Branzoi, Erich Bruns: "Prakash: Lighting Aware Motion Capture using Photosensing Markers and Multiplexed Illuminators," in ACM SIGGRAP2007: Papers, (2007).
- [49] 橋本 悠希, 新居 英明, Ramesh Raskar, 稲見 昌彦: "LED を用いた動作計測プロジェクタの高解像度化", 日本バーチャルリアリティ学会第 12 回大会論文集, 2D3-1, (2007.9).
- [50] The Digital Micromirror Device, <http://www.dlp.com/>
- [51] Ian E. McDowall, Mark T. Bolas, Perry Hoberman and Scott S. Fisher, "Snared Illumination", Siggraph2004 Emerging Technology, (2004).
- [52] 金箱 翼, 高木 康博: "高密度指向性表示を行う時分割表示モジュールの基礎実験", 映像情報メディア学会技術報告, Vol.31, No.31, pp.43-46, (2007.6).
- [53] Shree K. Nayar, Vlad Branzoi: "Programmable Imaging: Towards a Flexible Camera," International Journal of Computer Vision, Vol.70, pp.7-22, (2006).
- [54] Daniel Cotting, Martin Naef, Markus Gross and Henry Fuchs: "Embedding Imperceptible Patterns into Projected Images for Simultaneous Acquisition and Display", Proc. International Symposium on Mixed and Augmented Reality(ISMAR2004), pp.100-109, (2004.10).
- [55] Q.Chen, T.Wada: "A light modulation/demodulation method for real-time 3D imaging", IEEE 3DIM 2005, pp.15-21, 2005.
- [56] 北村 匡彦, 苗村 健: "DMD を用いた空間分割型可視光通信の基礎検討", FIT2006, Vol.5, pp.293-295 (2006.9).
- [57] 北村 匡彦, 苗村 健: "DMD を用いた空間分割型可視光通信による静止画への情報埋め込み", VRSJ11 回大会, pp.501-505, (2006.9).
- [58] 北村 匡彦, 苗村 健: "ProCam システムのための DMD を用いた空間分割型可視光通信の検討", IPSJ CVIM-156, pp.17-24, (2006.11).
- [59] 北村 匡彦: "映像の中に機械制御情報を埋め込む空間分割型可視光通信の研究", 東京大学大学院学際情報学府修士学位論文, (2007.3).
- [60] 北村 匡彦, 苗村 健: "DMD を用いた空間分割可視光通信: メタメディア情報を埋め込んだ映像投影", VR 論, vol. 12, no. 3 (2007.9).
- [61] 柏木 剛, 檜山 敦, 谷川 智洋, 廣瀬 通孝: "可視光通信を用いた誘導に関する研究", 日本バーチャルリアリティ学会第 12 回大会, (2007.9).

- [62] Anselm Grundhöfer, Manja Seeger, Ferry Häntsch, and Oliver Bimber: “Dynamic Adaptation of Projected Imperceptible Codes,” IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR’07), pp. 181-190, 2007
- [63] Anselm Grundhöfer, Manja Seeger, Ferry Häntsch, and Oliver Bimber: “Coded Projection and Illumination for Television Studios,” EUROGRAPHICS2007, Volume26, Number3, (2007).
- [64] 永井 悠文, 向川 康博, 大田 友一: “プロジェクタ型複合現実感のためのスクリーン物体の追跡”, 信学技報 MVE 2004-37, pp.1-6, (2004.10).
- [65] 永井 悠文, 向川 康博, 大田 友一: “パターン埋め込みによる動的シーンへの適応的投影”, 信学技報 PRMU 2004-159, pp.31-36, (2005.1).
- [66] ステガノグラフィ, <http://jp.fujitsu.com/group/labs/techinfo/techguide/list/steganography.html>
- [67] サイバースカッシュ, <http://www.ntt.co.jp/cclab/pamph/sp/sp09.html>
- [68] Grid Onput, <http://www.grid-mark.co.jp/gridonput.html>
- [69] Pierre Wellner: “The DigitalDesk calculatro: Tangible Interface for Remote Collaboration and Communication,” In Proceedings of ACM Symposium on User Interface Software and Technology(UIST’91), pp.27-34, (1991).
- [70] Brygg Ullmer and Hiroshi Ishii: “The metaDESK: Models nd Prototypes for Tangible User Interfaces”, In Symposium on User Interface Software and Technology(UIST’97), pp.223-232, (1997).
- [71] Yasuaki Kakehi, Makoto Iida, Takeshi Naemura, Yoshinari Shirai, Mitsunori Matsushita, and Takeshi Ohguro: “Lumisight Table: Interactive View-Dependent Tabletop Display,” IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 25, no.1, pp 48 – 53 (2005.1).
- [72] Yasuaki Kakehi, Makoto Iida, Takeshi Naemura and Mitsunori Matsushita: “Tablescape Plus: Upstanding Tiny Displays on Tabletop Display,” SIGGRAPH2006 Emerging Technologies, (2006).
- [73] Microsoft Corp. Microsoft Surface, <http://www.microsoft.com/surface>
- [74] “赤外可視変換蛍光材”, http://www.tech-world.jp/products/products006_ptir.html
- [75] “IR センサカード”, http://www.tegascience.co.jp/products/ltk/ltk_top.htm
- [76] “赤外検知カード”, <http://www.tamura.com/yasuaki/research/>
- [77] “ヤグターキー”, <http://www.sumita-opt.co.jp/ja/goods/other.htm>

発表文献

- [78] Sho Kimura, Ryo Oguchi, Hideo Tanida, Yasuaki Kakehi, Keita Takahashi and Takeshi Naemura: “PVLC Projector: Image Projection with Imperceptible Pixel-Level Metadata,” ACM SIGGRAPH2008, (2008). (投稿中)
- [79] 木村 翔, 筧 康明, 高橋 桂太, 苗村 健: “可視光通信プロジェクタと高速度カメラを用いたユビキタス情報環境におけるインタラクション”, インタラクション 2008, インタラクティブ発表, (2008.3). (発表予定)
- [80] Sho Kimura, Masahiko Kitamura and Takeshi Naemura: “EmiTable: A Tabletop Surface Pervaded with Imperceptible Metadata,” 2nd Annual IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (Tabletop 2007), pp. 189–192 (2007.10).
- [81] 木村 翔, 筧 康明, 高橋 桂太, 苗村 健: “可視光通信プロジェクタと高速度カメラを用いたユビキタス情報環境の基礎検討”, 日本バーチャルリアリティ学会第 12 回大会, 2C2-5 (2007.9).
- [82] 木村 翔, 北村 匡彦, 苗村 健: “EmiTable: 映像と連携してメタ情報を発信するテーブル型ディスプレイ”, 日本バーチャルリアリティ学会第 12 回大会, T02 (2007.9). (学術奨励賞 受賞)
- [83] 木村 翔, 筧 康明, 苗村 健: “赤外可視変換素材を用いた選択的情報提示に関する基礎検討”, FIT2006 第 5 回情報科学技術フォーラム 情報科学技術レターズ, vol. 5, LK-009, pp. 289 – 291 (2006.9).
- [84] (新聞取材) “ディスプレイ内の画像上に置くと...受信機の画面に情報 東大 観光案内などに用途”, 日経産業新聞, 2007 年 11 月 15 日 13 面記事 .

その他の展示など

- [85] “赤外可視変換素材を用いた選択的情報提示の研究”, IML Open House 2006, (2006.12). (IML Award 銀賞受賞) (作品展示)
- [86] “EmiTable: 映像と連携してメタ情報を発信するテーブル型ディスプレイ”, IML Open House 2007, (2007.12). (作品展示)