

# 博士論文（要約）

## 映像と連携する移動ロボットの 投影型制御に関する研究

2018年12月7日

指導教員 苗村 健 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

平木 剛史

# 内容梗概

---

サイバー空間の情報を、従来の平面ディスプレイではなく、物体を用いた現実拡張型の情報提示を行うことで、人間が情報に直接触れて操作可能なインタフェース技術は、多次元情報の直観的な理解に有用である。特に、動的な情報を実物体として触れて操作する方法として、複数の移動ロボットに映像情報を視覚重畳し、協調して変化させるアプローチが注目されている。既存研究においては、無線、または映像に埋め込んだ可視パターンによってロボットを制御していた。無線を用いた制御では、ロボットに個別の命令を送信できるが、映像とロボットの位置合わせが必要で、かつロボットの増加に応じて通信負荷が増大するので、利用できるロボットの台数に制約があった。可視パターンを用いた制御では、QRコードのような2次元空間パターンを映像に表示するため、複数のロボットを並列的に制御可能であるが、映像の品質を劣化させるという問題があった。

一方、光の高速明滅で信号を送る可視光通信技術をプロジェクタに応用した空間分割型可視光通信 (Pixel-level Visible Light Communication: PVLC) を用いると、映像の各画素に不可視の情報を埋め込むことができる。これを用いてロボットを制御すれば、前述の問題を解決し、複数のロボットと映像が協調したインタフェースを実現できる。しかし、従来のPVLCは映像表現力(色階調、コントラスト)と情報の空間解像度が低く、またその装置も大型で可搬性は低かった。さらに、人の接触によるロボットの位置ずれを考慮すると、外乱に対して頑健なロボット制御が可能な情報埋め込みを実現する必要があった。

本論文では、投影される映像と連携した移動ロボットを、PVLCを用いた投影型制御システムを用いて制御することで、ロボットを介した現実拡張型情報提示の実現可能性を明らかにすることを目的とする。この実現に向けて、主に、人間が直接ロボットに触れる操作を実現するためのロボット制御、PVLCの映像表現力と情報の空間解像度の向上、ロボットを照らす映像を動かすことによるロボット操作の3項目に取り組む。人間が直接ロボットに触れる操作を実現するためのロボット制御については、PVLCで投影した速度ベクトル場で群ロボットを制御すれば、外乱でずれた位置でもロボットがすぐに制御情報を取得できると考え、これを利用した制御システムを開発する。PVLCの映像表現力と情報の空間解像度の向上については、プロジェクタの画素制御素子であるDMD (Digital Micro-mirror Device) と光源のLEDの最大明滅周波数の違いに着目する。DMDのみでの明滅(従来手法)に、LEDの明滅を加えることで効率的なデータ埋め込みができると考え、これを実現するプロジェクタとセンサを開発する。ロボットを照らす映像を動かすことによるロボット操作については、メモリの制約を考慮した映像符号化を用いれば、小型プロジェクタを用いた可搬なPVLCシステムを構築できると考え、これを利用した操作インタフェースを開発する。

# 目次

---

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 本論文の背景	2
1.2 本論文の目的	3
1.3 本論文の構成	4
参考文献	7
<b>第2章 関連研究</b>	<b>8</b>
2.1 はじめに	9
2.2 映像と実物体が連携した拡張現実感システム	9
2.2.1 映像と連携した実物体をユーザが操作するシステム	9
2.2.2 映像と連携した実物体の動作制御が可能なシステム	11
2.2.3 映像と連携した移動ロボットの動作制御が可能なシステム	12
2.3 光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御	15
2.3.1 映像の投影を伴わない光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御	15
2.3.2 映像の投影を伴う光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御	18
2.4 空間分割型可視光通信 (PVLC)	20
2.4.1 概要	20
2.4.2 原理	20
2.4.3 データ構造	20
2.4.4 色変換	21
2.4.5 これまで提案されてきた PVLC の関連研究	22
2.4.6 光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御手法における空間分割型可視光通信の位置づけ	28
2.5 本章のまとめと本研究の位置づけ	28
参考文献	29
<b>第3章 映像と連携する移動ロボットの投影型制御</b>	<b>35</b>
<b>第4章 Phygital Field: 可視光通信プロジェクタを用いた映像上における群ロボット制御</b>	<b>37</b>
4.1 はじめに	38
4.2 システムの設計と実装	39
4.2.1 可視光通信プロジェクタ	40
4.2.2 PVLC 映像におけるフレーム構成	41

4.2.3	PVLC 映像の設計フレームワーク	42
4.2.4	受光器回路	42
4.2.5	ロボット	44
4.3	評価実験	50
4.3.1	受光器の特性評価実験	51
4.3.2	ロボットの自己位置推定と制御の評価実験	55
4.4	アプリケーション	61
4.4.1	バーチャル環境の変化によってロボットが影響を受けるアプリケーション	61
4.4.2	現実環境の変化によってロボットが影響を受けるアプリケーション	62
4.4.3	バーチャル環境と現実環境の双方の変化によってロボットが影響を受けるアプリケーション	63
4.5	実演展示	63
4.5.1	実演展示の概要	63
4.5.2	実演展示における気付きと議論	64
4.6	本章のまとめ	65
	参考文献	66
<b>第 5 章</b>	<b>可視光通信プロジェクトの映像表現力向上と情報の動的更新を実現する基盤技術開発</b>	<b>68</b>
<b>第 6 章</b>	<b>NavigaTorch: ハンドヘルドな可視光通信プロジェクトを用いたロボット操作インタフェース</b>	<b>70</b>
<b>第 7 章</b>	<b>結論</b>	<b>72</b>
7.1	本研究の主たる成果	73
7.2	今後の課題と展望	74
	<b>謝辞</b>	<b>75</b>
	<b>発表文献</b>	<b>77</b>

# 目次

---

1.1	本論文の構成	6
2.1	Augmented Coliseum (文献 [17] より)	13
2.2	Prakash (文献 [46] より)	17
2.3	DBC による位置推定 (文献 [50] より)	18
2.4	大域マーカ画像によるロボット制御 (文献 [53] より)	19
2.5	LED プロジェクタによる投影 (文献 [54] より)	19
2.6	空間分割型可視光通信の概念図	21
2.7	PVLC の各ピクセルにおけるデータ構造	21
2.8	色変換における元画像における画素の輝度と変換後の画素の輝度の関係。(a) は線形色変換、(b) は閾値色変換の場合を示す。	22
2.9	EmiTable (文献 [60] より)	24
2.10	Bloxels (文献 [61] より)	24
2.11	Photonastic Surface (文献 [62] より)	25
2.12	SteganoScan (文献 [63] より)	25
2.13	SteganoScan Orbs (文献 [63] より)	26
2.14	StickyPorjection (文献 [64] より)	26
2.15	iPvlc (文献 [65] より)	27
2.16	再帰透過光学系を用いた空中映像提示 (文献 [57] より)	27
4.1	Phygital Field システムにおける速度ベクトル場とロボット移動制御の概念図	39
4.2	Phygital Field システムの概要	40
4.3	データ埋め込みにおけるバイナリフレームの模式図	41
4.4	バイナリフレームユニットの構造	42
4.5	Phygital Field システムにおける PVLC 映像の設計フレームワークの模式図	43
4.6	従来の受光器回路の回路図	43
4.7	提案する受光器の回路図	44
4.8	受光器基板のボード図	45
4.9	受光器基板の様子 (表面)	45
4.10	受光器基板の様子 (裏面)	45
4.11	製作したロボットの様子 (右上: 全体図、左上: 上面図、左下: 横断面図、右下: 正面図)	45
4.12	ロボット底面における受光部の様子	46
4.13	シャーシボードの回路図	47

4.14	シャーシボードのボード図	47
4.15	シャーシボードに部品を実装した様子	47
4.16	メインボードの回路図	48
4.17	メインボードのボード図	48
4.18	メインボードに部品を実装した様子	48
4.19	拡張ボードの回路図	49
4.20	拡張ボードのボード図	49
4.21	拡張ボードに部品を実装した様子	49
4.22	PVLC データ受信におけるプログラム処理のフローチャート	50
4.23	評価実験における測定系の様子	51
4.24	スクリーン座標系	51
4.25	受光器における時間分解能の測定結果	52
4.26	輝度特性の評価実験における操作手順	53
4.27	輝度特性の測定結果	53
4.28	画素サイズと空間解像度の制約の関係	55
4.29	空間解像度の測定結果	55
4.30	プロジェクタからの投影に用いた画像	56
4.31	左上の測定点で実験を行っている様子	56
4.32	プロジェクタからの投影に用いた画像	58
4.33	リニアアクチュエータとロボットを配置して測定を行っている様子	58
4.34	ロボット動作状態における、提案手法による自己位置推定の座標値とリニアアクチュエータ位置の比較	58
4.35	投影した映像に埋め込まれた速度ベクトル場とその目標点、映像上でロボットの走行した軌道の様子	59
4.36	時間経過に伴って移動する目標点と変化する速度ベクトル場の様子。図の左から時間 $t$ がそれぞれ $t=0\sim 1$ 秒、 $t=1\sim 2$ 秒、 $t=2\sim 3$ 秒の時の状態を示している。	60
4.37	各時間における目標点の移動と、映像上でロボットが走行した軌道の様子	60
4.38	Phygital Field システムにおけるアプリケーションの様子。(a) 投影映像に埋め込まれた情報によって群ロボットが制御されている様子。(b) ロボットがバーチャル環境の影響を受けるアプリケーションの様子。道路上を走行するロボットをユーザが手で払っても、ロボットは走行を継続することができる。(c) ロボットが現実環境に存在する物体の影響を受けるアプリケーションの様子。ユーザはコントローラとなる円柱物体を操作することで、群ロボットをコントローラを目標点として誘導することができる。ロボットはブロックに衝突しても走行を継続することができる。	61

4.39	シーソーを模したアプリケーションの様子。バーチャルなシーソーの模様と平行な方向にシーソーは傾き、ユーザーがシーソー板を傾けると、群ロボットは斜面を滑り降りるように動作する。(a) シーソー板が平行になっている状態で、ロボットはその場に留まる。(b) シーソー板が右に傾いている状態で、ロボットは傾きに応じて右方向に動作する。(c) シーソー板が左に傾いている状態で、ロボットは左方向に動作する。 . . . . .	62
4.40	サンプルゲームアプリケーションの様子。プレイヤーはコントローラとなる円柱状の物体を操作し、ロボットをスタートエリア (ゲームフィールドの左下隅) からゴールエリア (フィールドの右上隅) に誘導する。(a) 通常のフィールドでは、ロボットはコントローラの方向に移動する。(b) 川となっているフィールドでは、ロボットはコントローラの方向に向かうが、同時に川の流りに流される。(c) フィールド上に敵キャラクターがいる場合、ロボットは敵を避けながらコントローラの方向に移動する。 . . . . .	63
4.41	実演展示における体験者の様子 . . . . .	64

# 表目次

---

2.1	光の投影を用いてデバイスの位置推定と制御を行うシステムの中での PVLC の位置づけ . . . . .	28
4.1	各測定点の投影画像における座標値と実際に受信した座標値、それらの差分。座標値の単位は px である。 . . . . .	57
4.2	時間ごとの目標点の座標とその図中における描画色 . . . . .	60



# 第1章

---

## 序論

## 1.1 本論文の背景

インターネットの発明に代表される情報技術の発展に伴い、社会の情報化はますます進展し、そのアクセス端末となるコンピュータは我々の生活する日常空間に遍く存在している。例えば、わが国の2016年における携帯電話やスマートフォンなどのモバイル情報端末の世帯普及率は94.7%と、ほぼ国民ひとりひとりが情報にアクセス可能な端末を持っている状況が生まれている。このような情報社会 (Society 4.0) において、ユーザは端末を用いてサイバー空間に適宜アクセスして情報を入手し、その情報を分析することで行動を決定していた。しかし、ユーザである人間の能力は有限であり、氾濫する情報から必要な情報を抽出し、分析を行うにあたって、人間の負担は増大する一方であった。

このような状況を鑑みて、日本国政府によって平成28年1月に閣議決定された、第5期科学技術基本計画 (平成28年度～平成32年度) においては、Society 5.0の実現が提唱された。Society 5.0とは、サイバー空間 (バーチャル空間) とフィジカル空間 (現実空間) を高度に融合させたシステムによって、経済発展と社会的課題の双方を解決する、人間中心の社会のことである。Society 5.0で実現される社会では、IoT (Internet of Things) によって、フィジカル空間のセンサーからの膨大な情報がビッグデータとしてサイバー空間に集積される。サイバー空間において、このデータが人工知能 (AI) によって解析され、その結果がフィジカル空間の人間に様々な形でフィードバックされることが想定されている。しかし、人間がこのようにサイバー空間からの情報のフィードバックを受ける手段は、平面ディスプレイに表示された映像が未だ大きな割合を占めており、人間が本来的に持つ五感を生かしてアクセスできているとは言い難い状況である。

この課題の解決方法として、サイバー空間の情報を、ディスプレイの映像と連携した実物体を用いて現実拡張型の情報提示を行うことで、人間が情報に直接触れて操作可能にするというタンジブルインタフェース [1] の概念が提案されている。特に、動的な情報を実物体として触れて操作する方法として、複数の移動ロボットに映像情報を視覚重畳し、協調して変化させるアプローチは、人間がロボットを介して情報に直接触れて操作できるという点で有用である。

従来、このようなシステムを実現するにあたっては、カメラとプロジェクタを一体的に運用するプロジェクタ-カメラ (ProCam) システムが主に用いられてきた。ProCam システムでは映像処理によって様々な機能を容易に実現できる反面、カメラのキャリブレーションやカメラとプロジェクタの位置合わせなどの煩雑な処理を必要とするという問題が存在した。また、これらのシステムでは無線通信を用いてロボットが制御されていたが、ロボットに個別の命令を送信できる反面、ロボットの増加に応じて通信負荷が増大するという欠点があり、利用できるロボットの台数に制約があった。

一方、ディスプレイを映像提示のみでなく、計測や制御、通信にも用いるという概念として、Display-Based Computing (DBC) [2] が提案されている。DBCを用いると、カメラなどの外部装置は不要となり、デバイスにフォトセンサで構成された受光器を搭載するだけで位置や姿勢の検出、制御が可能となる。しかし、人間にとって意味のないマーカ画像の情報が映像中に含まれてしまうためにコンテンツ表現が制限され、デバイスとの通信には初期化処理を要するなどの課題も存在した。

これらの課題を解決する技術として、可視の映像の中に不可視の情報を埋め込むことができる空

間分割型可視光通信 (Pixel-level Visible Light Communication: PVLC) [3] が提案されている。PVLC は、人間には知覚不可能なほど高速に光源を明滅させることで情報伝送を行う技術である可視光通信 (VLC) の原理を映像中の画素ひとつひとつに対して適用したものであり、人間が知覚する可視の映像と、デバイスのみが受光可能な不可視の情報を同一の光源環境から提示することが可能である。この実現には高速に2次元パターンを切り替える必要があるため、実現には DMD (Digital Micro-mirror Device) を空間変調素子に持つ、DLP (Digital Light Processing) プロジェクタを使用して実装が行われている。このプロジェクタのことを特に可視光通信プロジェクタと呼ぶ、この可視光通信プロジェクタによって投影される PVLC 映像を用いてロボットを制御すれば、前述の問題を解決し、複数のロボットと映像が協調したインタフェースを実現することができると考えられる。

しかし、従来提案されてきた PVLC は、既存の映像ディスプレイ技術と比較して主に3つの課題が存在した。まず、PVLC による可視映像表現力 (色階調、コントラスト) が非常に低いレベルであったということである。投影できる映像はグレースケールの静止画のみであり、カラーや動画の再生は不可能と、コンテンツ表現には支障をきたす水準であった。次に、移動物体に対して適用する場合、高い空間解像度で情報を送信することが困難であるということである。これは、PVLC を用いた情報伝送の速度が低速であったことと、異なる画素間での混信が発生することに起因している。このため、従来の PVLC アプリケーションはデバイス側で表現力を補う必要があり、実現されるコンテンツも全て視覚的な表現しか実現していなかった。そして、PVLC を実現する装置である可視光通信プロジェクタの装置は大型で可搬性が低かった。これは、可視光通信プロジェクタの実装には研究開発用の DLP プロジェクタを用いる必要があり、これらの装置が全て据え置きを前提としていたことに拠るものである。そのため、プロジェクタを固定したアプリケーションのみが提案されている状況であった。

そして、上述の、特に2つ目の理由に起因して、投影空間内における PVLC を用いた実物体の動作制御については、これまで実現されてこなかった。映像と連携してロボットを制御し、かつこれらのロボットをユーザがインタフェースとして用いるためには、人の接触によるロボットの位置ずれを考慮する必要がある。映像と連携する移動ロボットの投影型制御を実現するためには、これらの PVLC の3つの課題を解決した上で、外乱に対して頑健なロボット制御が可能な情報埋め込みを実現する必要がある。

## 1.2 本論文の目的

以上のような背景を踏まえ、本論文では投影される映像と連携した移動ロボットを PVLC を用いた投影型制御システムを用いて制御することで、ロボットを介した現実拡張型情報提示の実現可能性を明らかにすることを目的とする。

本論文では主に以下の3項目に取り組む。

- 人間が直接ロボットに触れる操作を実現するためのロボット制御
- PVLC の映像表現力と情報の空間解像度の向上
- ロボットを照らす映像を動かすことによるロボット操作

人間が直接ロボットに触れる操作を実現するためのロボット制御については、PVLCで投影した速度ベクトル場で群ロボットを制御すれば、外乱でずれた位置でもロボットがすぐに制御情報を取得できると考え、これを利用した制御システムを開発する。PVLCの映像表現力と情報の空間解像度の向上については、プロジェクタの画素制御素子であるDMDと光源のLEDの最大明滅周波数の違いに着目する。DMDのみでの明滅(従来手法)に、LEDの明滅を加えることで効率的なデータ埋め込みができると考え、これを実現するプロジェクタとセンサを開発する。ロボットを照らす映像を動かすことによるロボット操作については、メモリの制約を考慮した映像符号化を用いれば、小型プロジェクタを用いた可搬なPVLCシステムを構築できると考え、これを利用した操作インタフェースを開発する。

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

#### 第1章 序論

#### 第2章 関連研究

#### 第3章 映像と連携する移動ロボットの投影型制御

#### 第4章 Phygital Field: 可視光通信プロジェクタを用いた映像上における群ロボット制御

#### 第5章 可視光通信プロジェクタの映像表現力向上と情報の動的更新を実現する基盤技術開発

#### 第6章 NavigaTorch: ハンドヘルドな可視光通信プロジェクタを用いたロボット操作インタフェース

#### 第7章 結論

構成の概要図を図1.1に示す。

2章では、関連研究について述べる。具体的には、映像と実物体の連携した拡張現実感システムと、光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御手法、また光の投影を用いた手法の1つであり、本研究の基盤技術となっている空間分割型可視光通信の3つについて、研究動向をまとめる。

3章では、映像と連携する移動ロボットの投影型制御について述べる。まず、速度ベクトル場の概念を用いたロボット制御についての研究動向をまとめる。そして、本研究で提案する、映像と連携する移動ロボットの投影型制御について、その概要と位置づけ、特徴、投影環境が制御に与える影響について述べる。

4章では、可視光通信プロジェクタを用いて、投影映像上における群ロボットの自己位置推定と制御を実現するシステム Phygital Field について述べる。これは、PVLCを用いた映像と連携する移動ロボットの投影型制御を、投影空間を固定して適用したものである。ここでは、その概要とシステム的设计、実装についてまとめ、さらにその評価実験とアプリケーション、実演展示について述べる。

5章では、可視光通信プロジェクタの映像表現力向上と情報の動的更新を実現する基盤技術開発について述べる。まず前半部では、RPVLC (Reconfigurable PVLC) フレームワークを用いた可視光通信プロジェクタの開発について述べる。ここでは、このRPVLCフレームワークの概要と

システムの設計、実装について述べた上で、実時間映像更新とデータ送受信についての評価実験とアプリケーションについて述べる。後半部では、DPVLC (Dynamic PVLC) フレームワークの提案と、これを用いた可視光通信プロジェクタの開発について述べる。ここでは、DPVLC フレームワークの概要とシステムの設計、実装について述べた上で、実時間での映像とデータの更新とデータ送受信の評価実験について述べる。

6章では、ハンドヘルドな可視光通信プロジェクタを用いたロボット操作インタフェースである NavigaTorch について述べる。これは、PVLC を用いた映像と連携する移動ロボットの投影型制御を、投影空間が移動する場合について適用したものである。ここでは、その概要とシステムの設計、実装についてまとめ、さらにその評価実験とアプリケーション、実演展示について述べる。

7章では本論文の成果をまとめると共に、映像と連携した移動ロボットによって実現される拡張現実感やインタラクションに関して、今後の展望について述べる。

以下、第2章より本論を進めていくこととする。

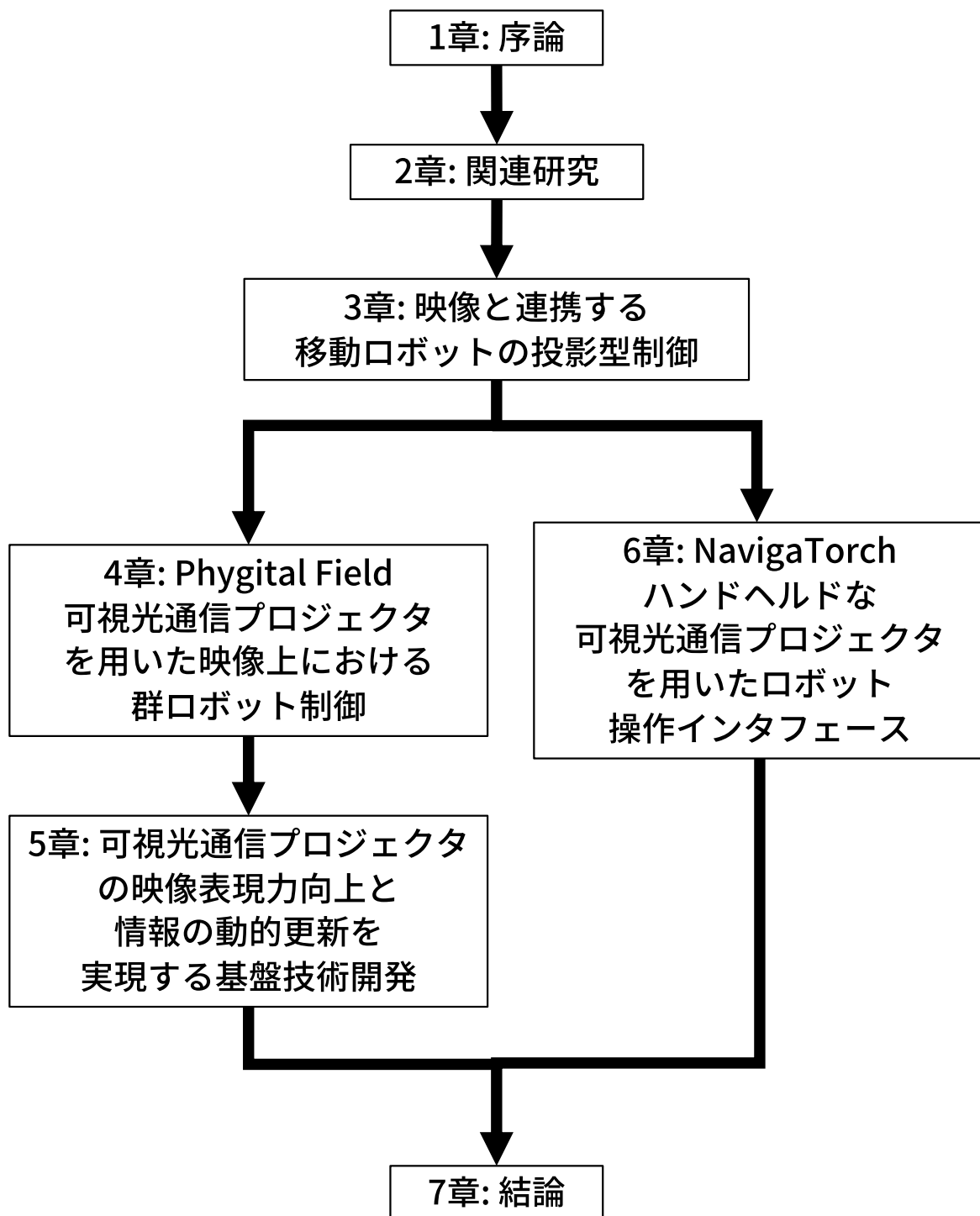


図 1.1: 本論文の構成

## 参考文献

- [1] H. Ishii and B. Ullmer, “Tangible Bits : Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms,” Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems - CHI '97, pp.234–241, mar 1997.
- [2] 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,” 日本バーチャルリアリティ学会第 10 回大会論文集, pp.441–442, sep 2005.
- [3] 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,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.12, no.3, pp.381–388, sep 2007.

## 第2章

---

## 関連研究



## 2.1 はじめに

本章では、本研究に関連する研究として、映像と実物体の連携した拡張現実感システムと、光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御手法、また光の投影を用いた手法の1つであり、本研究の基盤技術となっている空間分割型可視光通信 [1] の3つについて研究動向を述べる。

映像と実物体の連携した拡張現実感システムは、本研究で提案する映像と連携した移動ロボットの投影型制御の主要な応用領域である。これらの拡張現実感システムの概要について述べた上で、実際に提案されてきた先行研究の紹介を行う。

光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御は、本研究で提案する映像と連携した移動ロボットの投影型制御の実現手法に密接に関連する研究領域である。これらを提案した研究について、映像の投影を伴わない光の投影によるものと、映像の投影を伴うものの2つに分類して整理し、紹介を行う。

そして、光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御手法の1つであり、本研究の基盤技術となっている空間分割型可視光通信 (Pixel-level Visible Light Communication: PVLC) とその実装としての可視光通信プロジェクタについて述べる。まず、PVLCの概要と原理について述べた上で、送信するデータの構造と映像の色変換について述べる。そして、提案されてきた研究について紹介し、光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御の手法の中でのPVLCの位置づけについて述べてる。

最後に、本章のまとめと関連研究の中での本研究の位置づけについて述べる。

## 2.2 映像と実物体が連携した拡張現実感システム

本項では、映像内の位置に対応させて実物体としてデバイスを配置し、その位置を検出したり、動作を制御することで重層的に情報を表示する拡張現実感システムについて述べる。このような拡張現実感システムは、主にユーザインタフェースやエンタテインメントシステムとして提案されている。映像上の実物体の位置や姿勢を人やシステムが柔軟に制御可能な構造とすることで、実物体による現実空間とコンピュータ・グラフィックスによるバーチャルな空間の協調的な制御が実現され、ユーザにより豊かなコンテンツ体験を与えることが可能となる。

本研究では、特に映像と移動ロボットが連携したシステムについて中心的に扱うことから、本項では以下の3つの観点で関連研究を分類して紹介することとした。

- 映像と連携した実物体をユーザが操作するシステム
- 映像と連携した実物体の動作制御が可能なシステム
- 映像と連携した移動ロボットの動作制御が可能なシステム

### 2.2.1 映像と連携した実物体をユーザが操作するシステム

ユーザが映像と連携した実物体を操作可能なシステムは、主にタンジブルユーザインタフェース [2] の文脈で研究が進められている。それらの中でも代表的な研究について以下に紹介する。

**metaDESK [3]** metaDESK は、実物体をユーザが操作することで直感的にデジタル情報を扱うことができるテーブル型タンジブルユーザインタフェースである。metaDESK のアプリケーションとして Tangible Geospace が提案されており、ここでユーザは以下に示す3種類の実物体を操作して、デジタル情報を操作することができる。

- “phicons” (physical icons) : 透明な実物体で構成されており、テーブルトップディスプレイ上を動かすことで地図の位置を操作できる。
- “active LENS” : 小型ディスプレイで構成されており、地図上で対応する位置の3Dモデルを参照することができる。
- “passive LENS” : 光ファイバの束で構成されており、テーブルの裏面からリアプロジェクションで投影されている別の映像を見ることができる。

**Urp [4]** Urp は、都市計画を効率的に行うためのテーブル型のタンジブルユーザインタフェースである。ユーザは、テーブル上に置かれた建築物を模した実物体を操作することで都市における建造物の配置を設計することができる。また、プロジェクタとカメラを組み合わせた I/O Bulb システムを使用することで、建造物の位置と向きに応じて、テーブル上に適切な形状の影を生成することができる。

**musicBottles [5]** musicBottles は、実物体としてコルク付きボトルを使用し、この操作によって音楽の再生を行うテーブル型タンジブルユーザインタフェースである。各ボトルは電磁タグによってそれぞれを識別することができ、テーブル上のステージの領域にそれぞれのボトルを置いてコルクを外すことで音楽の再生を行うことができる。テーブル面の映像は、音楽のピッチと音量の変化を反映して更新される。

**Sensetable [6]** Sensetable は、平面上の複数の実物体の位置を無線でトラッキングすることができるテーブル型タンジブルユーザインタフェースである。電磁誘導方式のテーブルトップタッチスクリーンを使用し、そのテーブル面にプロジェクタで映像を投影している。ユーザは、テーブル上に置かれたダイヤルを模した実物体を動かすことで、位置に加えて方向を操作するインタフェースとして用いることができる。

**reacTable [7]** reacTable は、テーブル上の実物体を操作することで音楽の演奏を実現するテーブル型タンジブルインタフェースである。映像による視覚的フィードバックと実物体の物理的な操作が統合されることで、コンピュータを用いた楽器演奏をより精密かつ柔軟にユーザが制御することが可能となる。これにより、専門家にとっても初心者にとってもより創造的な音楽表現を実現可能なインタフェースを実現している。

**Lumino [8]** Lumino では、ブロック状の物体をテーブル上で動かし、テーブル底部のカメラで底面の2次元パターンを識別し位置を読み取るものである。このブロックは光ファイバーの束によって形成されているため、2段目に積まれたブロックのパターンも1段目を透過してカメラから撮影することができる。これにより、システムの外部にセンサ類を配置することなく積層型の

タンジブルインタフェースを実現することが可能である。

これらのシステムは柔軟な位置認識が可能であり、ユーザがデバイスを操作することが可能であるが、デバイス自体をシステムが制御し、動作させることは不可能である。

### 2.2.2 映像と連携した実物体の動作制御が可能なシステム

ユーザがデバイスを操作するだけでなく、システム側が実物体を制御し動作させることが可能なインタフェースシステムも多数提案されている。それらの中でも代表的な研究について以下に紹介する。

**Actuated Workbench [9]** Actuated Workbench は、磁力を使用してテーブル上の実物体をを2次元方向で移動させることができるテーブル型タンジブルユーザインタフェースである。テーブルの低部にある電磁石アレイを用いることで、電磁誘導により発生する磁場を制御し、テーブル上のデバイスに力を加えて移動させたり、ユーザによるひっぱりなどの操作に対して反発する力を発生させることができる。

**PICO [10]** PICO は、コンピュータによって実行される様々な処理を可視化した上で、その情報や処理にユーザが介在して作業を行うことが可能なタンジブルユーザインタフェースである。実物体の駆動制御には、Actuated Workbench [9] の構造を使用し、映像と実物体が連携した制御を実現すると同時に、ユーザによる実物体の操作をシステムの入力として扱うことができる。アプリケーションとして、携帯電話の基地局をどのように配置すればよいかの最適化計算を提案しており、各場所における通信の帯域幅を可視化することで効率的な作業を実現している。

**Madgets [11]** Madgets は、電磁誘導による動作制御と光ファイバを用いた位置検出によって実物体の制御と操作を実現するテーブル型タンジブルユーザインタフェースである。物体の移動制御は、電磁石アレイを用いた電磁誘導によって実現している。物体の位置と方向の検出は、FiberBoard [12] の原理を使用し、光ファイバを透過する赤外光をテーブル底部のカメラで検出することによって実現している。

**ZeroN [13]** ZeroN は、磁力を使用して、3次元空間内で自由に実物体を浮揚させ、移動させることができるタンジブルユーザインタフェースである。システムのコンピュータが実物体の動作を制御できると共に、ユーザが浮遊している実物体に触れて操作することも可能である。アプリケーションとして、太陽の周りを公転する惑星を表現したシステムを提案しており、映像による陰影の表現や、物理シミュレーションによる惑星の回転制御を実現している。

**inFORM [14]** inFORM は、映像と連携してピンアレイディスプレイを制御することで、動的に変化する3次元形状の制御を実現したタンジブルユーザインタフェースである。3次元形状制御による情報提示の形態として、形状変化による動的・物理的なアフォーダンスの提示、動的・物理的な制約を用いたユーザの誘導と制約、実物体との接触を用いた操作を提案している。

**Reactile [15]** Reactile は、ユーザが実物体の群を操作することで、群のふるまいをプログラミングすることが可能な群ユーザインタフェース (Swarm User Interfaces) である。従来の群ユーザインタフェースはコンピュータプログラミングによってアプリケーションが記述されていたが、Reactile ではユーザが実物体を直接操作することで、直観的に実物体のふるまいを制御できる。実物体の動作制御には電磁石のアレイを使用し、システムの状態をプロジェクタによる映像の投影によってユーザに提示している。また、2つの被験者実験を通じて、提案手法を用いて直感的に群のふるまいをデザインすることが可能であることを示している。

これらの研究は、本来ユーザへの映像出力のみ可能であるディスプレイという装置に対し、ユーザの手や操作補助のための物体の認識機能を付加することにより、タンジブルユーザインタフェースとして構成することに成功している。しかし、これらのシステムではデバイスの移動制御に電磁誘導を用いているため、テーブル側に電磁石アレイが組み込まれた大型の装置が必要である。同時に外部カメラなどによるデバイス認識等を行う必要もあり、煩雑な処理を要する。

### 2.2.3 映像と連携した移動ロボットの動作制御が可能なシステム

前項で紹介した研究については、システム側が駆動部を持つことで実物体の動作制御を実現していた。一方、実物体を移動ロボットとすることで、映像と連携した実物体の制御を実現した研究も多数提案されている。本項では、それらの中でも代表的な研究について紹介する。

**Planar Manipulator Display [16]** Planar Manipulator Display は、テーブルトップディスプレイ上で制御されたロボットを入出力のインタフェースとして使用可能なユーザインタフェースである。IrDA と赤外線照射によってディスプレイ側のシステムとロボットが通信を行うことで、ディスプレイの映像と連携したロボット制御を実現している。コンピュータが情報の表現形態としてロボットを使用すると同時に、ユーザがロボットの位置を移動、操作することでコンピュータへの入力インタフェースとしての機能を実現している。

**Augmented Coliseum [17]** Augmented Coliseum は、映像とロボットが連携して動作する拡張現実感システムとしてゲーム環境を実現している (図 2.1)。Display-Based Computing (DBC) を用いて輝度パターンをマーカ画像として投影し、それをフォトセンサで受信し位置計測に利用することでロボットの制御を行っている。

**Remote Active Tangible Interactions [18]** Remote Active Tangible Interactions では、テーブルトップディスプレイと映像上で制御されるロボットを用いて、遠隔環境における操作をより柔軟に行うことが可能なインタフェースを提案している。ロボットは DBC を用いて制御し、また別のディスプレイにテーブルトップディスプレイで表示している対象の 3D モデルの表示を行っている。ユーザ評価として、家具の配置を行うタスクを用いて実験を行い、マウスを用いた操作と比較した上で有用性の検証を行っている。Furuhira *et al.* [19] は、このインタフェースをゲーム環境に用いることで6台のロボットを用いたリモートのゲーム環境について提案している。

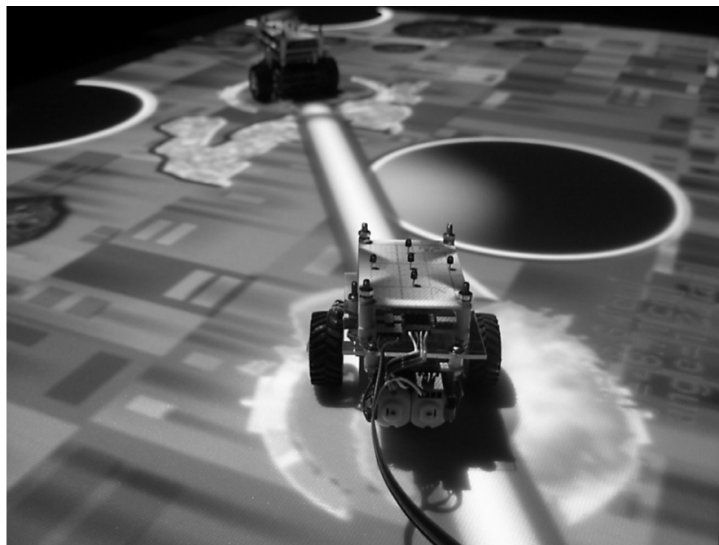


図 2.1: Augmented Coliseum (文献 [17] より)

**RoboTable [20], RoboTable2 [21]** RoboTable では、テーブルトップディスプレイ上で映像と連携して制御されるロボットを用いたユーザインタフェースシステムである。DI (Diffused Illumination) と FTIR (Frustrated Total Internal Refraction) を用いたマルチタッチディスプレイとしてテーブルトップディスプレイを構成することで、テーブルへの指の接触を認識している。ロボットの位置は、底面のマーカを reactIVision [22] の技術を用いてカメラで認識することで検出している。テーブル型システムとロボットは Bluetooth による無線通信で制御命令のやり取りを行っており、これらを組み合わせることで、映像とロボットが連携したシステムを実現している。また、RoboTable2 では、RoboTable のシステムをベースとして、様々な動作を GUI でプログラム可能なプラットフォームの提案を行っている。

**Robot Arena [23]** Robot Arena [23] は、テーブルトップディスプレイ上でロボットを制御することによって構築された拡張現実感システムである。ロボットには LEGO Mindstorm NXT を用いており、位置は IR マーカを用いてカメラで認識を行っている。また、アプリケーションとしてエンタテインメント環境を提案しており、実際のロボットと映像内のバーチャルなロボットを交えたゲームのプレイについて提案している。

**Touch and Toys [24]** Touch and Toys は、テーブル型タンジブルユーザインタフェースである。リモートのチームチームとのリアルタイムでの対話は、予測不可能な現実の環境の複雑さによって悪化する困難な人間 - ロボットインタラクション (HRI) の問題であり、多くの場合、我々は、1人のオペレータが遠隔ロボットのグループと対話することを可能にする2つの革新的なインタフェースを提示する。卓上コンピュータを使用して、ユーザは指を使って (タッチ)、または物理的なおもちゃのセット (有形のユーザインタフェース) を操作することによって、ロボットのグループを直接構成および操作できます。我々は参加者を募集して、簡単な作業で小さなグループの遠隔ロボットと対話することを要求したユーザー調査に参加し、その結果を一連の設計上の

考慮事項として提示しました。

**Tangible Bots [25]** Tangible Bots は、テーブル上で動作するロボットをユーザが操作するテーブル型タンジブルユーザインタフェースである。ロボットはシステムが表現したい情報を反映して制御され、ユーザが実際にロボットに触れて操作することで、従来のパッシブな実物体を用いたインタフェースと比較して効率的な入力を実現している。また、アプリケーションとして、音楽の創作支援システムを提案し、その有用性についての議論を行っている。

**HATs [26]** HATs は、高さの調節が可能なロボットをユーザが操作可能なテーブル型タンジブルインタフェースである。使用されるロボットは2輪であり、モータとポテンショメータによって構成された高さ調整機構をロボットに搭載することで、システムはロボットの移動・回転・高さを制御することができる。これにより、制御可能なモダリティとして実物体の高さという概念を追加することで、3次元情報など、より複雑な情報の提示とより自由度の高いユーザ操作を実現している。

**TabletopCars [27]** TabletopCars は、無線制御の自動車をロボットとしてユーザが操作可能なテーブル型タンジブルインタフェースによるエンタテインメントシステムである。ロボットをラジコンとしてユーザが操作する場合について、サッカーゲームなどの様々なアプリケーションを提案している。また、Kinect による深度情報の取得と組み合わせ、ユーザがハンドジェスチャを用いて車型ロボットを操作した際の操作性についての調査も行っている。

**Touchbugs [28]** Touchbugs は、振動によって動作するロボットをユーザが操作可能なテーブル型タンジブルインタフェースである。テーブル型ディスプレイは、カメラベースのマルチタッチディスプレイとして構成されている。また、ロボットは振動モータの駆動による振動で平面状を移動し、赤外線 LED による発光をカメラで取得することでシステムはロボットの位置を取得している。

**Thumbles [29]** Thumbles はオムニホイールを用いた全方位移動ロボットをユーザが操作可能なテーブル型タンジブルインタフェースである。ロボットは3つのモータとオムニホイールによって全方位に移動が可能であるため、ロボットを操作するユーザに対して自由な方向と大きさで力のフィードバックを与えることができる。また、アプリケーションとして、動画編集の支援や、ロボットをコントローラとしたゲーム、分子構造の3Dモデルの操作などを提案している。

これらのシステムはロボット側に駆動部などの機能が集約されているため、個々の実物体が持つ機能は複雑になるが、ディスプレイシステム側は外部カメラなどを必要としない分、簡便な構造にできるという利点が存在する。しかし、これらのシステムで用いられているロボットはディスプレイサイズに比べて大きく、数台程度のロボットを用いることが前提となっている。そのため、位置取得と制御情報の送信におけるスケラビリティは考慮されておらず、多数のロボットを同様のシステムを用いて制御することは難しかった。

## 2.3 光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御

本節では、光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御手法に関する研究動向について述べる。本節では、これらの研究を映像の投影を伴わない光の投影によるものと、映像の投影を伴うものの2つに分類した上で紹介する。

### 2.3.1 映像の投影を伴わない光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御

本項では、映像の投影を伴わない光の投影によってデバイスの位置推定と制御を行う研究について、空間的に変調された投影光を用いたもの、可視光通信を用いたもの、構造化光の投影を用いたものの3つに分類して紹介する。

#### 空間的に変調された投影光によるロボット制御

光情報には応答性の速さなど多数の特徴が存在し、これを活用してロボットの位置制御を行う研究が提案されている。もっとも基礎的な例としてはラインレースロボットが挙げられる。ロボットは、底面に表示されているライン情報をフォトセンサを用いて読み取り、常に物体の中心にラインが存在する状態となるようフィードバックを加えることで走行制御を行うロボットである。これは、空間的に輝度情報が変調された投影光を用いてロボットを制御していると捉えることができる。しかし、当然ながらロボットは自己位置を推定する手段を持たないので、決まったライン上しか走行できない。

Interactions with a line-follower [30, 31] では、ユーザがハンドジェスチャによってディスプレイ上に動的にラインを描画することで、ラインレースロボットのインタラクティブな制御を実現している。しかし、ライン上しか走行できないという制約は依然存在したままであった。Hara *et al.* [32] では、単一のロボットをレーザー光によってトラッキングすることで経路誘導を行う手法を提案している。この手法ではレーザー光が届く範囲ではシステムは自由にロボットを誘導することができるが、常に光でロボットをトラッキングする必要があるため、複数台のロボット制御に適応するためには台数分のレーザー光源が必要となる。

#### 可視光通信 (Visible Light Communication)

人に見える可視光の中に、見えない形で情報を埋め込む技術として、可視光通信 (Visible Light Communication: VLC) [33] の研究が広く行われている。可視光通信では、照明などの可視光源を高速に点滅させることで、時間的に変調した光に情報を埋め込み、通信を行っている。この時、LEDの点滅周波数は数十 kHz から数 MHz に設定が可能であるため、高速なフォトセンサを受光器として用いることで、高速な情報通信が可能である。この可視光通信の技術を応用し、複数個設置された光源からの光を受光し、その強度などによって受光器を持つデバイスの位置を推定する取り組みが、主に屋内位置推定の研究分野で多数提案されている [34–37]。しかし、可視光源を設置できる間隔には下限が存在し、環境の変化によって特定の光源からの光を取得できなくなったりすることの影響で、高い精度での位置推定には課題が存在した。

可視光通信による送信情報を用いてロボットを制御する研究も提案されている [38,39] が、その多くは制御情報のみを単一チャンネルの可視光通信によって送信し、位置の推定はロボット自体のセンサを用いて行っていた。一方、Qiu *et al.* [40] は可視光通信を用いた屋内位置推定の情報によるロボットの経路計画と制御手法を提案している。可視光通信の光源には、室内に複数配置された照明を使用し、ガウス過程によって光の強度分布をモデル化した上で位置推定を行っている。また、経路計画にはダイクストラ法を使用して適応的に実行し、実際に PC を搭載したロボットによって実証実験を行っている。Liu *et al.* [41,42] も同様に離散的に配置された光源を用いた可視光通信によって複数台のロボットの経路制御を実現している。

可視光通信を用いてロボットを制御すると、光が届く空間内に存在するロボットに対しては汎用的な通信路を確立することができるので、台数の増加や初期化処理などは問題にならない。しかし、可視光源の配置が離散的なものになってしまうため、位置制御の精度は悪く、単純な経路の誘導しか実現することができていなかった。

### 構造化光の投影による位置計測システム

複数枚の特殊なパターン画像を連続してプロジェクタで投影し、その構造化光をセンサで受光することで実物体の位置情報を計測する研究が提案されている。これらの研究では、時間と空間の双方について変調された投影光を用いて位置計測が行われていると捉えることができる。以下にこれらの研究のうち代表的なものを紹介する。

**RFIG Lamps [43]** RFIG Lamps は、プロジェクタで投影された構造化光をセンサで受信することによって個体の識別と位置推定を実現可能な無線タグを構成する研究である。プロジェクタはグレイコードの縞模様パターンを連続的に投影し、タグデバイスはこの光をセンサで受信することで位置推定を実現している。

**Lee *et al.* [44]** Lee *et al.* は、プロジェクタの投影映像の自動位置合わせを行う研究である。プロジェクタでグレイコードの縞模様パターンを連続的に投影し、その光をセンサで受信することで位置推定を行い、これを用いて自動的に位置合わせのキャリブレーションを実行している。

これらの手法では精度よく位置を取得できる反面、通常のプロジェクタを使用して時分割で情報を送信しているため、情報送信が低速である。そのため、物体は一定時間静止している必要があり、投影空間を動作するロボットなどへの適用は困難である。

**Lumitrack [45]** Lumitrack は、グレイコードの代わりに M 系列信号のパターンを映像として投影することで 1 枚の画像から位置情報を推定可能な手法を実現している。1 枚の画像から各軸方向についての位置情報が取得できるため、 $x, y$  の 2 次元座標であれば、2 枚のパターン画像の切り替えによって位置推定が可能となる。この手法であれば、2 次元座標については 2 枚のパターン画像のみ投影すれば位置推定が可能であるので、低速なプロジェクタを用いても移動するデバイスの位置推定ができる。しかし、デバイスは複数点の光を同時に受光する必要があるため、デバ



イス側にセンサを複数個並べなくては使えないという問題があった。

一方、高速なプロジェクションを用いて映像に情報を埋め込む研究が提案されている。

**Prakash [46]** Prakash は、グレイコードパターンを印刷したスライドと赤外 LED 光源のペアを並べ、それぞれを順に時分割点灯してセンサで受信することで位置情報を取得した (図 2.2)。そして、投影光を対象物に取り付けられたセンサで受光することで 500 Hz でのモーショントラッキングを可能としている。

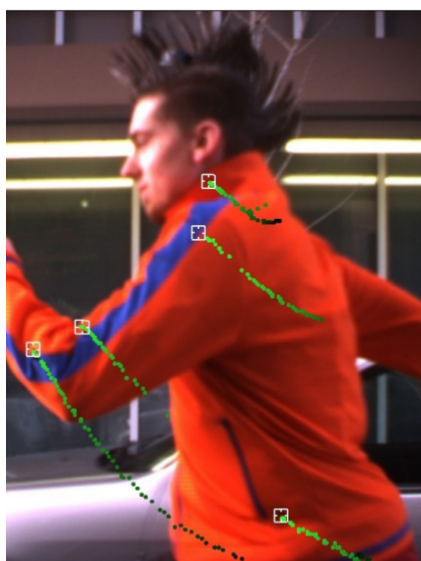


図 2.2: Prakash (文献 [46] より)

**HiFi [47]** HiFi は、DLP プロジェクタを用いてグレイコードのパターンを投影し、スマートフォンに接続したセンサで情報を受信することで屋内における位置推定を実現した。

**Zooids [48]** Zooids は、構造化光の投影によってロボットの自己位置推定を行い、無線通信による制御命令送信と組み合わせることで新しいユーザインタフェースである Swarm User Interface を実現した。DLP プロジェクタ (DLP LightCrafter 4500) を使用して位置情報を埋め込んだ光を投影し、センサを有する群ロボットでこの光を受信することでロボットの自己位置推定を実現している。ロボットの個体識別や経路計画などは中央のシステム側で計算した情報を無線通信によって各ロボットに送信している。

これらの手法は、高速な明滅を用いた投影によって、高速に情報を送信することが可能である。しかし、これらのシステムにおいても、プロジェクタを情報通信装置のみとしてしか使用していない。そのため、プロジェクタの映像提示装置としての側面が失われてしまっており、目に見える映像と目に見えない情報の双方をプロジェクタによって投影することはできなかった。

### 2.3.2 映像の投影を伴う光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御

本項では、映像の投影光を用いてデバイスの位置推定と制御を実現した研究について紹介する。本項で紹介すべき研究は Display-Based Computing (DBC) [49] に基づく研究と、本研究の基盤技術である空間分割型可視光通信 (PVLC) に基づく研究であるが、PVLC については次節で詳細に紹介を行うため、本項では DBC とそれに基づいた研究に関してのみ紹介を行う。

#### Display-Based Computing

稲見ら [49] は、画像提示装置を映像提示のみでなく、計測や制御、通信にも用いるという概念として Display-Based Computing (DBC) を提案している。DBC の枠組みのもとで、杉本ら [50] は投影したマーカ画像を用いた実物体の位置推定に関して提案している (図 2.3)。また、これを応用した研究についても、前節で紹介した Augmented Coliseum [17] をはじめとして、多数提案されている [51,52]。

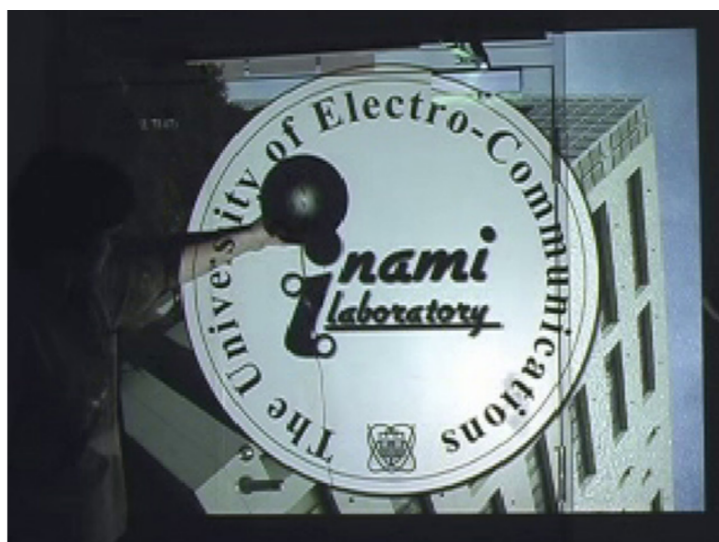


図 2.3: DBC による位置推定 (文献 [50] より)

DBC を用いると、各時刻における実物体の位置・姿勢制御がマーカ表示により簡易に実現でき、映像提示装置としてのディスプレイの役割も損なわれていない。しかし、機器の認識にあたっての初期化処理が必要であったため、機器の追加や除去といった、トラッキングが外れてしまう行為を行うことはできなかった。また、マーカ映像は可視であるため、ユーザが視認可能であるという欠点もあり、インタラクションに制約が存在しており、その位置にコンテンツ映像を表示することも不可能であった。

DBC を用いたロボット制御において、初期化処理を不要とするシステムを実現するために、安ら [53] はマーカ画像に対するロボットの追従性評価と、大域的なマーカ画像を用いたロボットの制御に関して提案を行っている (図 2.4)。しかし、DBC の原理上マーカ部にコンテンツ映像を表示することは不可能であるため、大域的なマーカ画像を用いる場合はコンテンツ映像の表示が不可能となる。大域的なマーカ画像を用いない場合は、先述のようにロボットの初期位置把握を個々

のロボットに対して行う必要がある。この場合、ロボットの台数の増加に比例してシステムの初期化処理が煩雑になる上、ロボットの追加や除去に容易に対応できない。

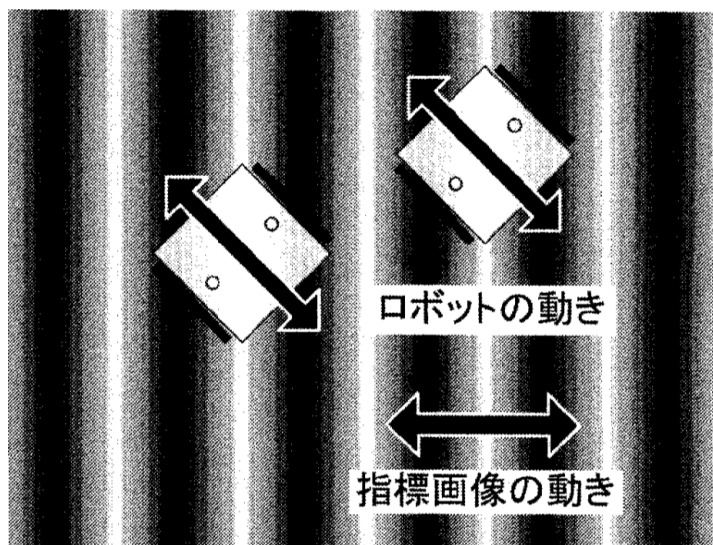


図 2.4: 大域マーカ画像によるロボット制御 (文献 [53] より)

一方、新居ら [54] は DBC の延長線上の研究として、多数の LED をマトリックスに並べてプロジェクタを構成し、高速に点滅させることで場所に応じた情報を実物体に送信可能な手法を提案している (図 2.5)。この手法では、高速明滅による光通信で空間中の位置に応じた情報を映像と同時に投影することができる。しかし、映像は白黒で、解像度は  $4 \text{ px} \times 5 \text{ px}$  と低く、人間が目にする映像として実用的なレベルではなかった。



図 2.5: LED プロジェクタによる投影 (文献 [54] より)

## 2.4 空間分割型可視光通信 (PVLC)

本節では、光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御手法の1つであり、本研究の基盤技術となっている空間分割型可視光通信 (PVLC) について述べる。まずその概要と原理を述べた上で、送信するデータの構造と映像の色変換の手法について述べる。そして、これまで提案されてきた PVLC の関連研究について紹介し、光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御の手法の中での PVLC の位置づけについて述べた上で、まとめを行う。

### 2.4.1 概要

北村ら [1] は DMD (Digital Micro-mirror Device) を用いた DLP プロジェクタを可視光通信プロジェクタとして用いることで、映像のすべての画素に高速点滅でビット情報を埋め込む空間分割型可視光通信 (Pixel-level Visible Light Communication: PVLC) 技術を提案した。PVLC を用いれば、同じ空間的位置に対し、人間に見える映像情報と機械にのみ受信できる不可視情報の2種類を同時に提示することができる。PVLC では映像と情報の位置ずれが原理的に発生しないため、キャリブレーションの必要がない上に、画面上の映像自体が情報を含んでいるため、受信端末の数が増えてもシステム負荷が増大しない。

### 2.4.2 原理

DLP プロジェクタでは、DMD の1度の更新によって1枚の2値画像によって構成されたパターンを投影することができる。この2値画像のことを本稿ではバイナリフレームと呼ぶこととする。また、この時に投影されるパターンの色は、そのタイミングで点灯している光源によって決定される。

通常の映像投影の場合、DLP プロジェクタは DMD を高速に更新することでパターンの変更を行い、それによって時分割で輝度階調を表現する。この時、DMD の更新によって表現される映像の周波数が十分高ければ人間はその点滅を知覚せず、輝度が時間平均化された画像が知覚される (Talbot-Plateau の法則 [55])。一方、フォトダイオードなどの時間分解能の高い素子でこの映像を受光すると、人間には知覚できない高速な明滅を取得することができる。PVLC では、この高速な明滅を用いて可視光通信を行うことで、人間には映像 (輝度情報) を提示しつつ、機械 (受光素子) には画面内の位置に応じた情報の伝送を行っている。PVLC の概念図を図 2.6 に示す。

また、十分に高い周波数で点滅する映像は、その輝度の時間平均が人間が知覚する輝度となり、これは ON/OFF の順序には依存しないことが知られている。この事実を利用し、ON/OFF の割合が同じであるが順序の異なる点滅パターンを用いることで、輝度を維持しながら異なるビットパターンの送信が可能となっている。

### 2.4.3 データ構造

PVLC によって投影するフレームのデータ構造は、同期フレーム部、データフレーム部、輝度調整フレーム部の3つからなり、これらによって PVLC 映像の1フレームを構成している。PVLC におけるデータ構造の模式図を図 2.7 に示す。

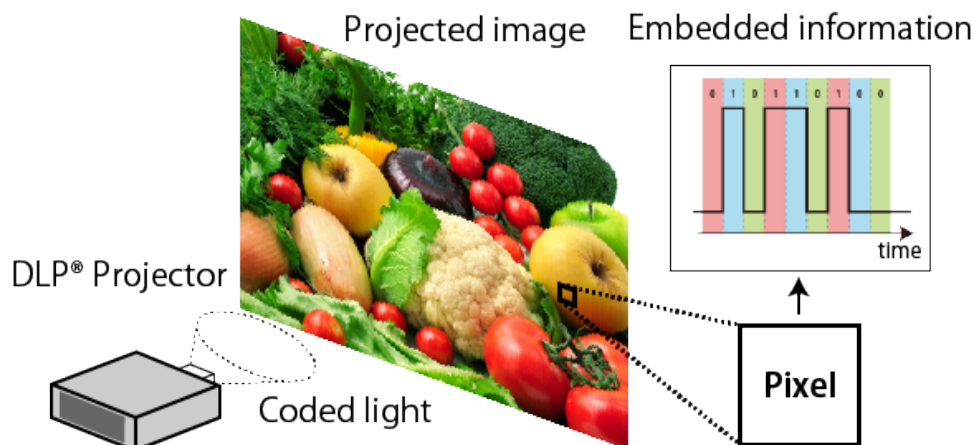


図 2.6: 空間分割型可視光通信の概念図

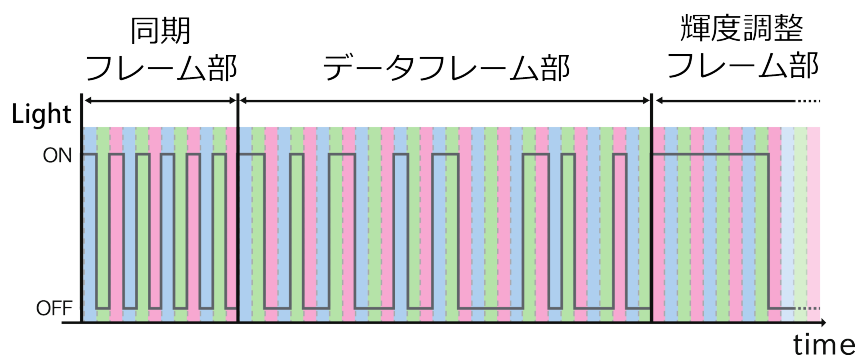


図 2.7: PVLC の各ピクセルにおけるデータ構造

同期フレーム部では、データの開始を示し、データ受信における誤りを発生させないため、全画面で同一の情報を埋め込んでいる。この時、信号の ON/OFF 回数を同じにすることで、画面全体の輝度を 50% に保つように設計する。その後、各ピクセルごとに異なる情報で構成されたデータフレーム部が事前に規定された bit 数に対応する枚数だけ置かれる。その後、データフレーム部で乱れた輝度を補正し、人間の知覚する映像を構成するための輝度調整フレーム部が存在し、この3つのフレーム部によって、ひとつの単位フレーム群が構成される。本論文ではこれをフレームユニットと呼ぶことにする。

#### 2.4.4 色変換

PVLC においては、データの埋め込みによって乱れた輝度を補正した上で人間の知覚する映像の構成を行う。その結果、映像の各フレームについて、輝度の補正手法に応じた色変換が行われた映像を人間は知覚することになる。PVLC における色変換には、「線形色変換」と「閾値色変換」の2種類の手法が提案されている [56]。この色変換による各ピクセルの輝度変化の模式図を図 2.8 に示す。

図に示すように、この色変換は、あるピクセルにおける元画像の輝度のレンジ  $[0, 255]$  を、表示する映像の知覚輝度のレンジ  $[Dc, None - Dc]$  に変換する計算と捉えることができる。この時、

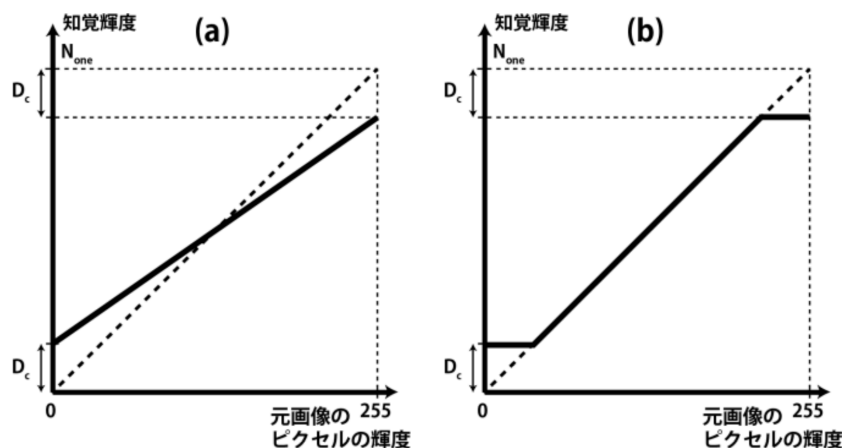


図 2.8: 色変換における元画像における画素の輝度と変換後の画素の輝度の関係。(a) は線形色変換、(b) は閾値色変換の場合を示す。

線形色変換 (図 2.8 (a)) は、色飛びは無いものの、ほぼ全ての輝度値において元画像の輝度値と異なる値として映像が表示される。閾値色変換 (図 2.8 (b)) は、データ表現に必要な ON / OFF の数が足りないピクセルのみ知覚輝度を変える方法である。輝度値が大きすぎる、もしくは小さすぎるピクセルについては色飛びが発生するが、その他のピクセルについては元画像の輝度値を維持することができる。

これら 2 つの色変換のどちらが適切かについては、元画像に依存する。2 枚の異なるサンプル画像について線形色変換と閾値色変換を行った例を表に示す。2 枚の画像はいずれも人間の女性の写真であるが、画像 1 については閾値色変換の方がより元画像の色を表現できているのに対し、画像 2 については閾値色変換では明るい部分の色飛びが激しく、線形色変換の方が元画像に近い色を表現できている。このように、どちらの色変換が適しているかは映像コンテンツに依存するため、PVLC を実現するにあたっては双方の手法を実装する必要がある。

#### 2.4.5 これまで提案されてきた PVLC の関連研究

これまでに提案されてきた PVLC についての研究は、PVLC の基盤技術開発と PVLC を利用したアプリケーション開発の 2 つに区分できる。次節からそのそれぞれについて研究を紹介する。

##### PVLC の基盤技術開発

北村ら [1] の研究において用いられた DLP プロジェクタは、既製品のプロジェクタの光学系に DMD と制御基板で構成される評価モジュールを組み合わせることで、可視光通信プロジェクタを構成していた。ここで、PC-DMD 評価モジュール間のデータ転送方式上の制約から、事前に構成された投影画像をメモリから読み出すことしかできず、リアルタイムに映像を更新して動画として投影することは困難であった。また同様の理由で、光源の置換や点減制御も不可能であったため、DMD の ON / OFF によってしか光の点減を制御することができず、可視光通信としては低速であった。また、プロジェクタの光源は単一の白色光源であったため、投影映像はグレースケール

ルでしか表示できないという表現上の課題が存在した。

深澤ら [57] は透明液晶を用いてカラー映像を表示し、バックライトとして可視光通信プロジェクタを用いることで擬似的なカラー映像表示手法を提案している。しかし、光学系や位置合わせなどの制約からカラー映像に対して自由に不可視情報を埋め込むことは困難であった。結果として、映像の表現力は低く、インタラクションは静的な映像を対象としたものに限られていた。また、信号の送信も低速で効率的とは言えないものであった。

Zhou *et al.* [58] は、PC-プロジェクタ間でのリアルタイムなデータ更新を可能とするフレームワークである、RPVLC (dynamically Reconfigurable Pixel-level Visible Light Communication) フレームワークを提案している。RPVLC フレームワークを使用した可視光通信プロジェクタであれば、従来は不可能であった動的な映像更新を実現することができる。しかし、映像は以前と同様グレースケール表示のみに対応し、信号の送信についても従来と同様の手法を利用するに留まっていた。

田中ら [59] は、複数の可視光通信プロジェクタが設置されている投影環境において、可視光通信の多重化を実現するための検討を行っている。具体的には、受光を行うフォトセンサの指向性を利用する手法と、プロジェクタ投影光の偏光を利用する手法の2種類を提案している。センサの指向性を利用する手法は、使用されるプロジェクタの台数に関わらず使用できる反面、複数の投影光が一定範囲の角度幅で入射した場合、それらの分離は不可能である。偏光を利用する手法は、どのように投影光が入射しても光を分離できる反面、使用可能な偏光のモードが2つ(左回り円偏光と右回り円偏光)であるため、プロジェクタが3台以上存在する場合は分離ができなくなる。

## PVLC を利用したアプリケーション

PVLC を利用したアプリケーションについては、主に映像と実物体が連携したディスプレイシステムの形で提案が行われている。これらの研究について以下に紹介する。

**EmiTable [60]** EmiTable は、PVLC によって映像に埋め込んだ情報を用いて受光器を持つ LED ディスプレイに対し情報提示が可能なテーブル型ディスプレイシステムである(図 2.9)。プロジェクタはテーブル下部に配置され、リアプロジェクションによってテーブル面に映像が投影されている。ディスプレイは置かれた場所の映像光に埋め込まれた情報を受信することで、その位置に応じた情報を即座に反映してディスプレイに表示することができる。しかし、機器の制約から映像はグレースケールで静止画の表示のみに対応していた。

**Bloxels [61]** Bloxels は、積層によって情報伝達が可能なブロックを用いたテーブル型ディスプレイシステムである(図 2.10)。各ブロックには受光センサと送信用の赤外線 LED、ディスプレイ表示用のフルカラー LED が実装されており、ブロックの下部から制御情報を受信した後に送信用 LED を用いて上部から再送を行う。最下部のブロックは、テーブル面に投影されている映像に PVLC によって埋め込まれた情報によって制御されている。これによって、ユーザはブロックを積層することで、様々な形状のディスプレイを構築することができる。



図 2.9: EmiTable (文献 [60] より)



図 2.10: Bloxels (文献 [61] より)

**Photonastic Surface [62]** Photonastic Surface は、PVLC によって映像に埋め込まれた情報を用いて、受光器を持つピンアレイの駆動を制御する立体ディスプレイシステムである (図 2.11)。各ピンの上部にはフォトランジスタの受光部が埋め込まれており、これが受光器となって投影される映像に埋め込まれた情報を受信する。可視光通信プロジェクタはシステムの上部に配置されており、フロントプロジェクションによってピンアレイに映像が投影されている。これによって、ピンアレイによる 3 次元的なディスプレイ表示に映像が重畳されたコンテンツ表示が実現されている。

**SteganoScan [63]** SteganoScan は、直線上に受光器とカラー LED を配置したデバイスを、可視光通信プロジェクタによる投影空間内で振り回すことで映像を表示する残像ディスプレイシステムである (図 2.12)。PVLC を用いることで位置に応じた情報を高密度で映像に埋め込むことが可能であり、かつ光による高速通信によって、LED の色情報更新がデバイスの動作に対して実時間追従できるシステムを実現している。また、棒状のデバイスと、表面積を有するデバイスの 2 種



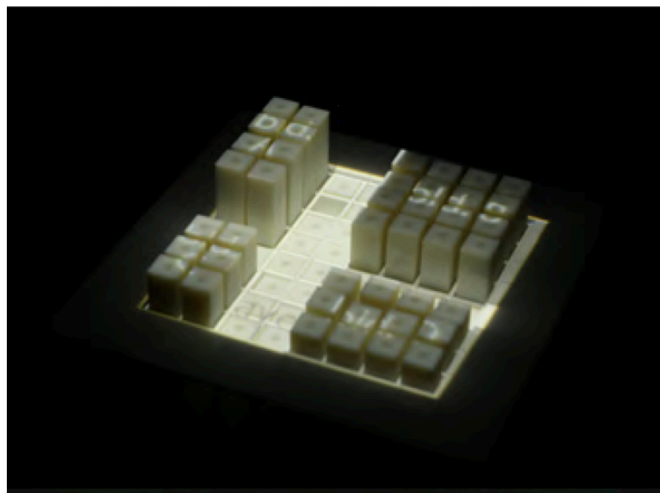


図 2.11: Photonastic Surface (文献 [62] より)

類を開発することで、様々な残像による映像表現を実現している。

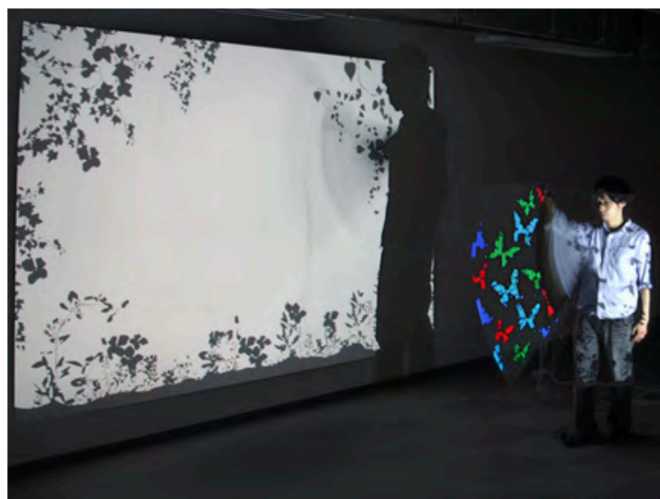


図 2.12: SteganoScan (文献 [63] より)

**SteganoScan Orbs [63]** SteganoScan Orbs は、皿状のテーブル上を回転移動するボール型デバイスを PVLC で制御し発光させることで、映像を構成する動的なディスプレイシステムである (図 2.13)。ボール型デバイス内には全方向からの受光に対応するため複数の受光器が配置されており、可視光通信プロジェクタによって上部からフロントプロジェクションで光を投影することで、各デバイスの制御を行う。PVLC を用いることで、ボールは移動してもその位置に応じた情報を即座に反映して発光する色を更新し、ディスプレイとして機能することができる。

**StickyProjection [64]** StickyProjection は、受光器デバイスの位置をプロジェクタシステムにフィードバックすることで、インタラクティブな映像更新を実現するシステムである (図 2.14)。デバイ



図 2.13: SteganoScan Orbs (文献 [63] より)

スは、可視光通信プロジェクトによって投影された映像に埋め込まれた情報を受光器で受信し、ZigBeeによる無線通信でプロジェクトが接続されているPCにフィードバックする。PCはその情報を受けて投影する映像を更新し、USB通信でプロジェクトに転送、映像の更新を行っている。しかし、通信インタフェースにおけるデータ転送速度の制約から、その映像更新速度は5 fpsと非常に低速であり、ユーザ体験は限定的なものであった。

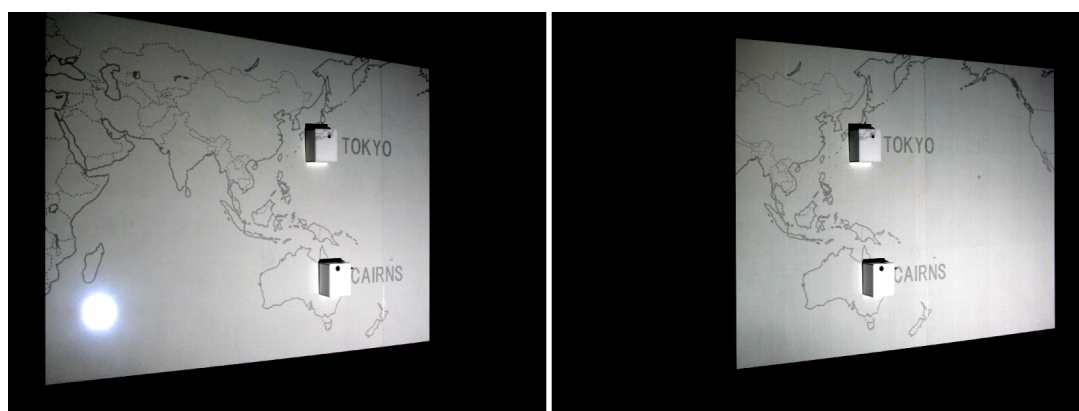


図 2.14: StickyPorjection (文献 [64] より)

**iPvlc [65]** iPvlcは、PVLCによって情報を埋め込んだ映像を用いたテーブル型ディスプレイと受光器を持つスマートデバイスが連携した情報提示システムである(図 2.15)。スマートデバイスとして、iPod TouchとiPadを使用し、受光器回路で受信した情報をマイク端子からソフトウェアモデムを用いてデバイスに転送している。PVLCによって位置に応じた情報を高密度で送信できるため、テーブル型ディスプレイの表示情報とスマートデバイスの表示情報を位置ずれなく表示させることができる。



図 2.15: iPvlc (文献 [65] より)

**再帰透過光学系を用いた空中映像提示 [57]** 深沢らは、透明液晶と可視光通信プロジェクタ、再帰透過光学系を組み合わせたインタラクティブな空中映像表示システムを提案している (図 2.16)。可視光通信プロジェクタの投影光は単色のバックライトとして使用し、可視映像は透明液晶を用いて表示を行う。また、その投影面に対して再帰透過光学素子 (Micro Mirror Array Plates: MMAPs) を設置することで、空中に映像を結像可能な光学系を構成している。これにより、空中に結像したカラー映像に受光器デバイスをかざすと反応するといったインタラクションが実現されている、一方で、映像と情報の位置合わせが不要であるという可視光通信プロジェクタの特性が失われているという側面もある。

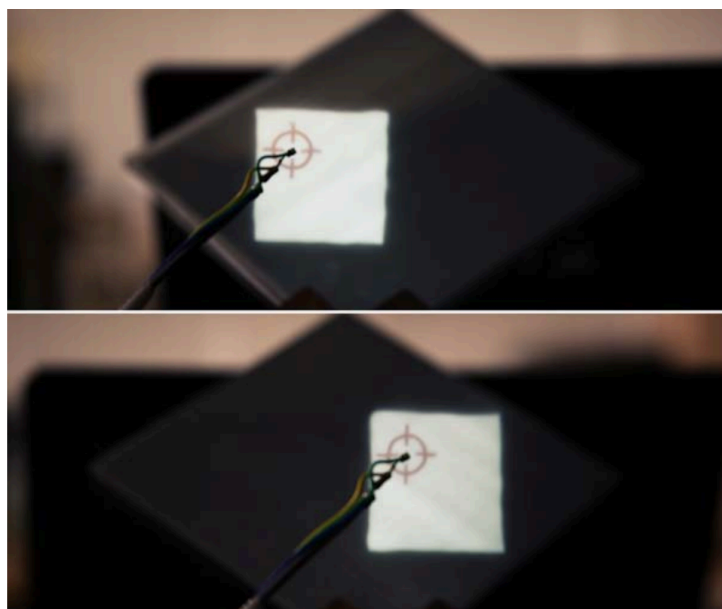


図 2.16: 再帰透過光学系を用いた空中映像提示 (文献 [57] より)

### 2.4.6 光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御手法における空間分割型可視光通信の位置づけ

表 2.1 に光の投影を用いてデバイスの位置推定と制御を行うシステムの中での PVLC の位置づけを示す。

表 2.1: 光の投影を用いてデバイスの位置推定と制御を行うシステムの中での PVLC の位置づけ

	空間分割性	映像可視性	情報遍在性	高速更新性
	位置に応じて異なる光が届く	人への映像提示が可能	機器を自由に出し入れ可能 (位置合わせなどの初期化が不要)	映像と情報の更新を高速に行うことが可能
空間変調光の投影による制御	○	×	×	-
可視光通信 (VLC)	×	×	○	-
構造化光の投影による位置計測	○	×	○	-
Display-Based Computing (DBC)	○	○	×	○
Pixel-level VLC (PVLC)	○	○	○	×

空間変調光投影、可視光通信、構造化光投影は人への映像提示を目的としておらず、また可視光通信に関しては信号伝送の空間分割性も欠けている。DBC は人への映像提示が可能で、かつ映像と情報の高速更新性も備えているが、初期化処理が必要であるため、トラッキングが外れてしまう機器の追加や除去を行うことはできない。PVLC は映像提示と同時に時分割による不可視な情報伝送が可能であるが、技術的制約から高速更新性に課題が存在する。本論文では、この PVLC における技術的制約を解決し、高速な制御を実現することで、投影映像や付加情報の高速な更新を実現する。

## 2.5 本章のまとめと本研究の位置づけ

本章では、映像と実物体の連携した拡張現実感システム、光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御手法、そして本研究の基盤技術となっている空間分割型可視光通信の3つについての研究動向を述べた。

2.2 節では、映像と実物体の連携した拡張現実感システムについて、その概要と研究動向を紹介した。本論文で提案する移動ロボットの投影型制御は、このような映像と実物体が連携した拡張現実感システムを応用領域として位置づけている。

2.3 節では、光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御手法について、映像の投影を伴わない光の投影によるものと、映像の投影を伴うものの2つに分類してこれらの研究動向を紹介した。本論文で提案する映像と連携した移動ロボットの投影型制御も、光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御の一手法として位置づけることができる。

2.4 節では、光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御手法の1つであり、本研究の基盤技術である空間分割型可視光通信 (PVLC) とその実装としての可視光通信プロジェクトについて述べた。まず、PVLC の概要と原理、送信するデータの構造と映像の色変換手法について述べた上で、

PVLC の関連研究について、基盤技術開発とアプリケーションの2つに分類してその研究動向を紹介した。最後に、光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御の手法の中での PVLC の位置づけについて述べた。

??章では PVLC を用いた、映像と連携する移動ロボットの投影型制御手法についての提案とその位置づけを行った上で、4章以降では、実際に投影型制御を用いたシステムに関する提案を行う。

## 参考文献

- [1] 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,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.12, no.3, pp.381–388, sep 2007.
- [2] H. Ishii and B. Ullmer, “Tangible Bits : Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms,” Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems - CHI '97, pp.234–241, mar 1997.
- [3] B. Ullmer and H. Ishii, “The metaDESK: Models and Prototypes for Tangible User Interfaces,” Proceedings of the 10th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '97, pp.223–232, 1997.
- [4] J. Underkoffler and H. Ishii, “Urp: A Luminous-Tangible Workbench for Urban Planning and Design,” Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems the CHI is the limit - CHI '99, pp.386–393, may 1999.
- [5] H. Ishii, “Bottles : A Transparent Interface as a Tribute to Mark Weiser,” IEICE transactions on information and systems, vol.87, no.6, pp.1299–1311, 2004.
- [6] J. Patten, H. Ishii, J. Hines, and G. Pangaro, “Sensetable: A Wireless Object Tracking Platform for Tangible User Interfaces,” Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems - CHI '01, pp.253–260, mar 2001.
- [7] S. Jordà, G. Geiger, M. Alonso, and M. Kaltenbrunner, “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, pp.139–146, feb 2007.
- [8] P. Baudisch, T. Becker, and F. Rudeck, “Lumino: Tangible Blocks for Tabletop Computers Based on Glass Fiber Bundles,” Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems - CHI '10, pp.1165–1174, apr 2010.
- [9] G. Pangaro, D. Maynes-Aminzade, and H. Ishii, “The Actuated Workbench: Computer-Controlled Actuation in Tabletop Tangible Interfaces,” Proceedings of the 15th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '02, pp.181–190, oct 2002.
- [10] J. Patten and H. Ishii, “Mechanical Constraints as Computational Constraints in Tabletop Tangible Interfaces,” Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems - CHI '07, pp.809–818, apr 2007.

- [11] M. Weiss, F. Schwarz, S. Jakubowski, and J. Borchers, “Madgets: Actuating Widgets on Interactive Tabletops,” Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '10, pp.293–302, oct 2010.
- [12] D. Jackson, T. Bartindale, and P. Olivier, “FiberBoard: Compact Multi-Touch Display,” Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces - ITS '09, pp.25–28, nov 2009.
- [13] J. Lee, R. Post, and H. Ishii, “ZeroN: Mid-Air Tangible Interaction Enabled by Computer Controlled Magnetic Levitation,” Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '11, pp.327–336, oct 2011.
- [14] S. Follmer, D. Leithinger, A. Olwal, A. Hogge, and H. Ishii, “inFORM: Dynamic Physical Affordances and Constraints through Shape and Object Actuation,” Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '13, pp.417–426, oct 2013.
- [15] R. Suzuki, J. Kato, M.D. Gross, and T. Yeh, “Reactile: Programming Swarm User Interfaces through Direct Physical Manipulation,” Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '18, pp.199:1–199:13, 2018.
- [16] D. Rosenfeld, M. Zawadzki, J. Sudol, and K. Perlin, “Physical Objects as Bidirectional User Interface Elements,” IEEE Computer Graphics and Applications, vol.24, no.1, pp.44–49, jan 2004.
- [17] M. Kojima, M. Sugimoto, A. Nakamura, M. Tomita, H. Nii, and M. Inami, “Augmented Coliseum: An Augmented Game Environment with Small Vehicles,” Proceedings of the First IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems, TABLETOP'06, pp.3–8, 2006.
- [18] J. Richter, B.H. Thomas, M. Sugimoto, and M. Inami, “Remote Active Tangible Interactions,” Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction - TEI '07, pp.39–42, 2007.
- [19] A. Furuhiro, W. Marais, and B. Thomas, “Supporting Remote Tangible Robotic Entertainment,” Proceedings of the 2008 International Conference in Advances on Computer Entertainment Technology - ACE '08, p.412, dec 2008.
- [20] A. Krzywinski, H. Mi, W. Chen, and M. Sugimoto, “RoboTable: A Tabletop Framework for Tangible Interaction with Robots in a Mixed reality,” Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology - ACE '09, pp.107–114, oct 2009.
- [21] M. Sugimoto, T. Fujita, H. Mi, and A. Krzywinski, “RoboTable2: A Novel Programming Environment using Physical Robots on a Tabletop Platform,” Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology - ACE '11, pp.10:1–10:8, nov 2011.
- [22] M. Kaltenbrunner and R. Bencina, “reactIVision: A Computer-Vision Framework for Table-Based Tangible Interaction,” Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction - TEI '07, pp.69–74, feb 2007.

- [23] D. Calife, J.L. Bernardes, and R. Tori, "Robot Arena: An Augmented Reality Platform for Game Development," *Computers in Entertainment*, vol.7, no.1, pp.11:1–11:26, feb 2009.
- [24] C. Guo, J.E. Young, and E. Sharlin, "Touch and Toys: new techniques for interaction with a remote group of robots," *Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems - CHI 09*, pp.491–500, apr 2009.
- [25] E.W. Pedersen and K. Hornbæk, "Tangible Bots: Interaction with Active Tangibles in Tabletop Interfaces," *Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems - CHI '11*, pp.2975–2984, may 2011.
- [26] H. Mi and M. Sugimoto, "HATs: Interact using Height-Adjustable Tangibles in Tabletop Interfaces," *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces - ITS '11*, pp.71–74, nov 2011.
- [27] C.T. Dang and E. André, "TabletopCars: Interaction with Active Tangible Remote Controlled Cars," *Proceedings of the 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction - TEI '13*, pp.33–40, feb 2013.
- [28] D. Nowacka, K. Ladha, N.Y. Hammerla, D. Jackson, C. Ladha, E. Rukzio, and P. Olivier, "Touchbugs: Actuated Tangibles on Multi-Touch Tables," *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '13*, pp.759–762, 2013.
- [29] J. Patten, "Thumbles - Robotic Tabletop User Interface Platform," 2014. <http://www.pattenstudio.com/thumbles/>
- [30] T. Fujiwara and Y. Iwatani, "Interactions with a line-follower: An interactive tabletop system with a markerless gesture interface for robot control," *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp.2037–2042, dec 2011.
- [31] T. Fujiwara, T. Muramatsu, and Y. Iwatani, "Further results on interactions with a line-follower," *Proceedings of SICE Annual Conference (SICE)*, pp.301–306, 2012.
- [32] K. Hara and S. Maeyama, "Navigation Using One Laser Source for Mobile Robot with Optical Sensor Array Installed in Pan and Tilt Mechanism," *Proceedings of 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp.257–262, jul 2008.
- [33] T. Komine, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "A Study of Shadowing on Indoor Visible-Light Wireless Communication Utilizing Plural White LED Lightings," *Wireless Personal Communications*, vol.34, no.1-2, pp.211–225, jul 2005.
- [34] D.-R. Kim, H.-S. Kim, S.-K. Han, S.-H. Yang, and Y.-H. Son, "An Indoor Visible Light Communication Positioning System Using a RF Carrier Allocation Technique," *Journal of Lightwave Technology*, vol.31, no.1, pp.134–144, jan 2013.
- [35] S.-K. Han, E.-M. Jeong, D.-R. Kim, Y.-H. Son, S.-H. Yang, and H.-S. Kim, "Indoor three-dimensional location estimation based on LED visible light communication," *Electronics Letters*, vol.49, no.1, pp.54–56, jan 2013.

- [36] Y.-S. Kuo, P. Pannuto, K.-J. Hsiao, and P. Dutta, “Luxapose: Indoor Positioning with Mobile Phones and Visible Light,” Proceedings of the 20th annual international conference on Mobile computing and networking - MobiCom '14, pp.447–458, 2014.
- [37] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally, and R. Parthiban, “LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.17, no.3, pp.1649–1678, 2015.
- [38] I.C. Rust and H.H. Asada, “A Dual-Use Visible Light Approach to Integrated Communication and Localization of Underwater Robots with Application to Non-Destructive Nuclear Reactor Inspection,” 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2445–2450, may 2012.
- [39] R. Murai, T. Sakai, H. Kawano, Y. Matsukawa, Y. Kitano, Y. Honda, and K.C. Campbell, “A Novel Visible Light Communication System for Enhanced Control of Autonomous Delivery Robots in a Hospital,” 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp.510–516, dec 2012.
- [40] K. Qiu, F. Zhang, and M. Liu, “Visible Light Communication-based indoor localization using Gaussian Process,” 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.3125–3130, sep 2015.
- [41] X. Liu, E. Umino, and H. Makino, “Basic Study on Robot Control in an Intelligent Indoor Environment using Visible light Communication,” Proceedings of 2009 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, pp.323–325, aug 2009.
- [42] X. Liu, H. Makino, and K. Mase, “Improved Indoor Location Estimation Using Fluorescent Light Communication System with a Nine-Channel Receiver,” IEICE Transactions on Communications, vol.E93-B, no.11, pp.2936–2944, nov 2010.
- [43] R. Raskar, P. Beardsley, J. vanBaar, Y. Wang, P. Dietz, J. Lee, D. Leigh, and T. Willwacher, “RFIG Lamps : Interacting with a Self-Describing World via Photosensing Wireless Tags and Projectors,” ACM Transactions on Graphics, vol.23, no.3, pp.406–415, aug 2004.
- [44] J.C. Lee, S.E. Hudson, J.W. Summet, and P.H. Dietz, “Moveable Interactive Projected Displays Using Projector Based Tracking,” Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '05, pp.63–72, oct 2005.
- [45] R. Xiao, C. Harrison, K.D. Willis, I. Poupyrev, and S.E. Hudson, “Lumitrack: Low Cost, High Precision, High Speed Tracking with Projected m-Sequences,” Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '13, pp.3–12, oct 2013.
- [46] R. Raskar, J. Barnwell, S. Nayar, M. Inami, P. Bekaert, M. Noland, V. Branzoi, E. Bruns, H. Nii, B. DeDecker, Y. Hashimoto, J. Summet, D. Moore, Y. Zhao, J. Westhues, and P. Dietz, “Prakash: Lighting Aware Motion Capture using Photosensing Markers and Multiplexed Illuminators,” ACM Transactions on Graphics, vol.26, no.3, pp.36.1–36.11, jul 2007.



- [47] M. Fan, Q. Liu, H. Tang, and P. Chiu, “HiFi: Hide and Find Digital Content Associated with Physical Objects via Coded Light,” Proceedings of the 15th Workshop on Mobile Computing Systems and Applications - HotMobile '14, pp.1–6, feb 2014.
- [48] M. Le Goc, L.H. Kim, A. Parsaei, J.-D. Fekete, P. Dragicevic, and S. Follmer, “Zoids: Building Blocks for Swarm User Interfaces,” Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '16, pp.97–109, 2016.
- [49] 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,” 日本バーチャルリアリティ学会第10回大会論文集, pp.441–442, sep 2005.
- [50] M. Sugimoto, K. Kodama, A. Nakamura, M. Kojima, and M. Inami, “A Display-Based Tracking System: Display-Based Computing for Measurement Systems,” Proceedings of 17th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT 2007), pp.31–38, nov 2007.
- [51] 常盤拓司, 吉積 将, 新居英明, 杉本麻樹, 稲見昌彦, “ユビキタス環境のための光レゾルバ,” 情報処理学会論文誌, vol.50, no.4, pp.1311–1320, apr 2009.
- [52] 井田信也, 小島 稔, 杉本麻樹, 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,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.107, no.80, pp.93–96, may 2007.
- [53] 安謙太郎, 永谷直久, 常盤拓司, 杉本麻樹, 稲見昌彦, “画像提示装置を用いたロボットの制御手法,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.16, no.2, pp.181–188, jun 2011.
- [54] 新居英明, 橋本悠希, 杉本麻樹, 稲見昌彦, “LEDを画素とするプロジェクタによる空間光インタフェース,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.12, no.2, pp.109–117, jun 2007.
- [55] 大山 正, 今井省吾, “視感覚の時間的側面,” 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック, 和氣典二(編), pp.335–343, 誠信書房, jan 1994.
- [56] 高橋一成, 平木剛史, 福嶋政期, 苗村 健, “可視光通信プロジェクタ映像の色表現向上に向けた色空間選択手法,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.115, no.415, pp.149–154, jan 2016.
- [57] 深澤尚史, 前川 聡, 苗村 健, “可視光通信プロジェクタの通信路における結像光学系の検討: 位置情報を埋め込んだ映像の空中像提示とプロジェクタ投影,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.111, no.479, pp.145–150, mar 2012.
- [58] L. Zhou, S. Fukushima, and T. Naemura, “Dynamically Reconfigurable Framework for Pixel-level Visible Light Communication Projector,” Proceedings of the SPIE 8979, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications VI, pp.89790J–14, mar 2014.
- [59] 田中恭太郎, 福嶋政期, 苗村 健, “可視光通信プロジェクタの多重化に関する基礎検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.113, no.227, pp.29–34, sep 2013.
- [60] S. Kimura, M. Kitamura, and T. Naemura, “EmiTable: A Tabletop Surface Pervaded with Imperceptible Metadata,” Proceedings of Second IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems - TABLETOP '07, pp.189–192, oct 2007.

- [61] J. Lee, Y. Kakehi, and T. Naemura, “Bloxels: Glowing Blocks as Volumetric Pixels,” ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies on - SIGGRAPH '09, p.Article No.5, aug 2009.
- [62] 大口 諒, 笥 康明, 高橋桂太, 苗村 健, “Photonastic Surface : 光で制御する3次元形状ディスプレイ,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.108, no.490, pp.25–30, mar 2009.
- [63] 岸 遼, 笥 康明, 苗村 健, “SteganoScan & SteganoScan Orbs : 可視光通信プロジェクタを用いた空間拡張型ディスプレイ,” ヒューマンインタフェース学会論文誌, vol.14, no.1, pp.1–7, 2012.
- [64] 深澤尚史, 苗村 健, “StickyProjection : 可視光通信プロジェクタを用いたインタラクティブな情報提示,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.110, no.35, pp.31–32, may 2010.
- [65] Y. Kato, N. Fukasawa, and T. Naemura, “iPvlc: Pixel-level Visible Light Communication for Smart Mobile Devices,” ACM SIGGRAPH 2011 Posters on - SIGGRAPH '11, p.45:1, aug 2011.

## 第3章

---

# 映像と連携する 移動ロボットの投影型制御

本章の内容は5年以内に出版される予定である。

## 第4章

---

# Phygital Field: 可視光通信プロジェクタを用いた 映像上における群ロボット制御

## 4.1 はじめに

映像とロボットが協調的に制御された拡張現実感システムは、人間がロボットを介して情報に直接触れて操作できるという点で注目を集めている。ヒューマン・コンピュータ・インタラクション (HCI) の分野では、ロボットはユーザが情報を認識、操作するためのタンジブルインタフェースとして使用する研究が提案されており [1,2]、これらはユーザが情報を直観的かつ即座に理解するために有用である。また、これらの研究を発展させた取り組みとして、複数のロボットを協調動作させる群ロボット制御を用いたアプローチである、Swarm User Interfaces も提案されている [3]。このようなシステムを実現するにあたって共通する重要な要件は、映像内におけるロボットの位置と姿勢をシステムが正確に推定するという事実と、様々な位置にいるロボットを簡単かつ即座に制御できるということである。

ロボットの位置推定については、これまでの研究では主にカメラを用いて、赤外線 LED [1,4-6] や特徴的なパターン画像 [7]、再帰性反射材 [8] でできたマーカを認識、検出することで実現していた。このようなシステムでは、カメラが環境光の影響を受けやすい上に、カメラの座標系と映像の座標系が異なるために、それらの位置合わせも事前に実施しておく必要がある。ロボットの台数が増加するに従って、認識が必要なマーカの数も増加していくのでシステムの負荷が増大していくという欠点も存在する。

カメラとコンピュータビジョン技術を用いずにロボットの自己位置推定を行う手法としては、ソナーを用いるもの [9,10]、センサフュージョンを行うもの [11] などが提案されている。しかし、これらの手法も各センサの解像度の問題から、高精度での位置推定ができないという課題が存在した。

また、これらの手法を用いた場合、ロボットの制御については別途無線通信などを用いて行う必要があるため [6]、こちらについてもロボットの数に比例してシステムの負荷が増大する結果となっていた。ロボットの制御を、複数の光源による光源方向への移動という単純な制御に限定することでこの問題を解決する手法も存在する [7] が、原理上正確な目標位置への制御は実現することができなかった。

一方、Augmented Coliseum [12] は、Display-Based Computing (DBC) [13] を用いてロボットの位置推定と制御を行っている。この手法では、映像上に表示された可視のマーカパターンをロボットがフォトセンサで読み取ることで自身の制御を行う。そのため、映像とロボットの位置は原理的に一致し、また外部装置によるロボットの位置推定と制御を行う必要がないため、多数のロボットを制御することが可能となる。しかし、この手法では、マーカパターンを表示する際に、ロボットが映像上のどの位置に存在するかを特定するための初期化処理が必要であるため、ロボットの追加や除去に対応することができない。また、可視のマーカパターンはユーザにも視認可能であるために、ユーザのコンテンツへの没入感を損なうという欠点も存在した。

本章では可視光通信プロジェクトの投影映像に埋め込まれた情報を用いることで、群ロボットの自己位置推定と制御を実現するシステム Phygital Field を提案する。Phygital Field では、可視光通信プロジェクトを用いて、人間にしか見えない映像と、ロボットにしか取得できない不可視情報を同時、同位置に提示する。その不可視情報を用いてロボットの自己位置推定と制御を行うことで、映像とロボットが協調的に動作するシステムを構築する。可視光通信プロジェクトによる

空間分割型可視光通信 (PVLC) を用いることで、人間が見る映像と群ロボットが受信する不可視の情報と同じ位置に位置ずれ無く投影することが可能となる。

可視光通信プロジェクトによって投影する不可視情報は位置座標やロボット制御のための速度ベクトル場などの情報を含んでいる。ロボットは、これらの投影映像に含まれる情報を受信するだけで、自身の自己位置推定と制御が可能となる。そのため、カメラなどの外部測定装置は不要であり、有線や無線による通信も不要であるため、スケラビリティの問題も発生しない。そして、投影映像に情報が埋め込まれているため、映像とロボットの位置ずれも原理的に発生せず、初期化レスかつマーカレスなロボットの位置推定と制御が実現可能である。システム構成も、テーブル側には可視光通信プロジェクトが配置されるのみであるため、環境依存性が低いシステムを構築することができる。そして、ビット列で情報を送信するため、位置情報以外の情報も埋め込み・提示が可能なシステムとなっている。

また、PVLC を用いることで情報の2次元的な構成が可能であることから、本研究では速度ベクトル場の情報をロボットに直接送信することによるロボット制御手法を提案する。これによって、群としてのふるまいを記述しつつ、ロボットごとに制御命令を発行する必要がなくなるため、スケラビリティの問題を解消しつつ、多数のロボットを制御するにあたって最適な方法である。例として、目標点に収束する速度ベクトル場の投影とロボットの移動制御の概念図を図4.1に示す。

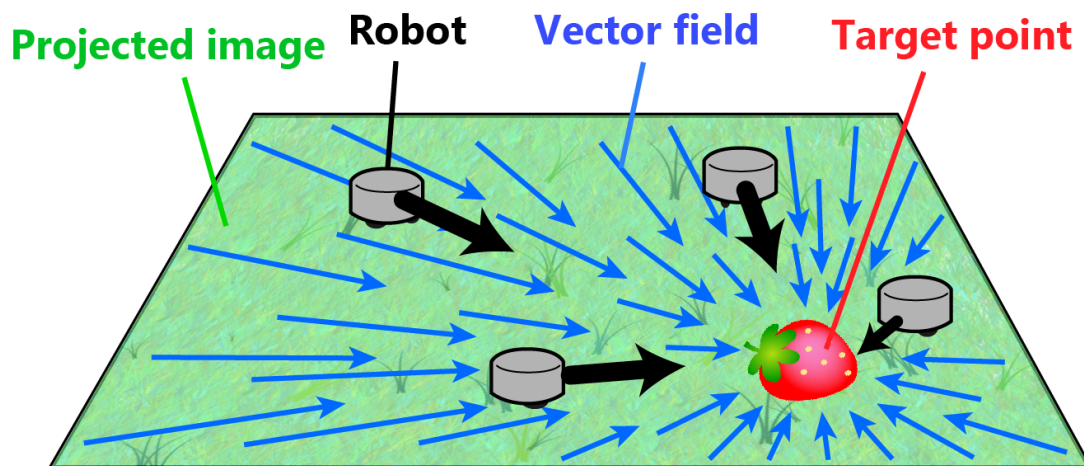


図4.1: Phygital Field システムにおける速度ベクトル場とロボット移動制御の概念図

次項からは、Phygital Field システムの設計と埋め込み信号の構成、受光器回路とそれを搭載したロボットの設計と実装について述べる。そして、受光器回路の特性、ロボットの自己位置推定の精度、ベクトル場を用いたロボットの目標点追従制御の精度についての評価実験について述べる。次に、バーチャル環境の変化や現実環境の変化、あるいはその両方の変化にロボットが追従して動作する、映像とロボットが協調したアプリケーションについて提案する。最後に、本章の内容についてのまとめを述べる。

## 4.2 システムの設計と実装

Phygital Field システムを実現するにあたって、以下の点を検討する必要がある。

- (1) ロボットの自己位置推定と制御を行う際の、PVLC におけるデータ埋め込み構造
- (2) 高速かつ低消費電力で動作する受光器回路と、その受光器回路を組み込む小型ロボットの設計と実装

(1) について、ロボットの自己位置推定に必要な情報として、位置座標情報を、制御に必要な情報として、速度ベクトル場と、制御モードの情報を埋め込むことでデータ構造を構成することとした。(2) について、提案システムにおいては、可視光通信プロジェクトとして使用する DLP プロジェクタから投影される高速な明滅光に応答可能で、かつ小型のバッテリーによる駆動に対応する低消費電力な受光器回路が必要である。そのため、この条件を満たす受光器回路を新規で設計、実装した。また、この回路を組み込んで実際に群ロボットとして動作させるにあたって、小型ロボットの設計と実装を行うこととした。

Phygital Field システムの概要を図 4.2 に示す。以降では、可視光通信プロジェクトの構成と PVLC における埋め込み情報の構成、受光器回路とロボットの設計と実装について述べる。

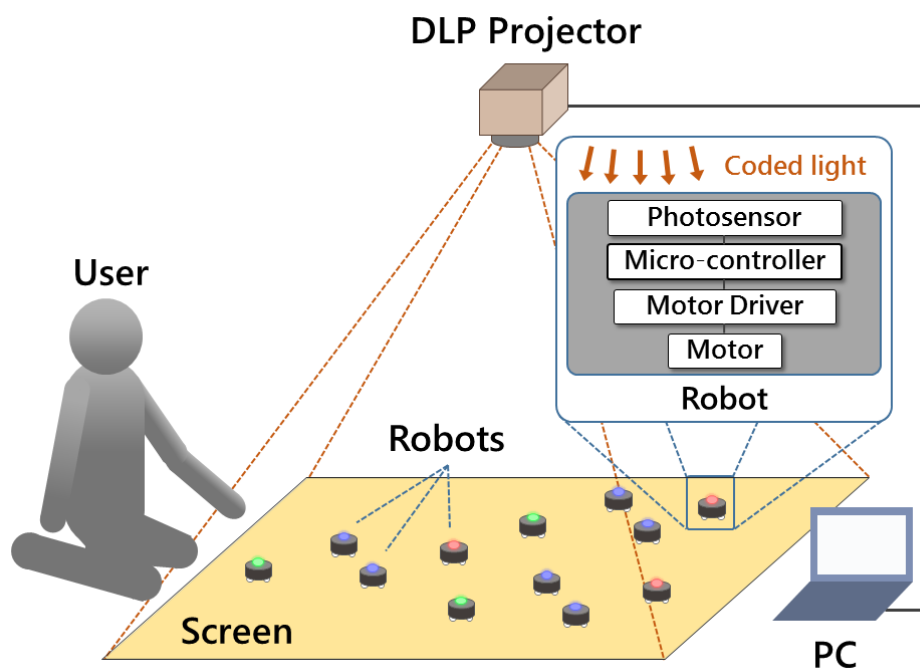


図 4.2: Phygital Field システムの概要

#### 4.2.1 可視光通信プロジェクト

Phygital Field では、DMD 制御と同期して、R, G, B3 色の LED 光源制御が可能な DLP プロジェクタ (STAR-07, ViALUX) を可視光通信プロジェクトとして使用することで、カラー映像が表示可能な PVLC システムを構築した。また、制御ソフトウェアとして ALP Ver. 4.2 コアプログラムを使用した。



## 4.2.2 PVLC 映像におけるフレーム構成

Phygital Field システムにおいて、PVLC 映像を構成するバイナリフレームは、次の図 4.3 のような模式図で表すことができる。ここで、 $N_S$  は同期フレーム部を構成するバイナリフレームの数、 $N_D$  はデータフレーム部を構成するバイナリフレームの数、 $N_L$  は輝度調整フレーム部を構成するバイナリフレームの数であり、その合計が送信単位あたりのフレーム数となる。本システムでは、埋め込み情報はちらつきの発生などを考慮し、 $N_S = 12, N_D = 32, N_L = 106$  とし、計 150 枚のバイナリフレームでバイナリフレームユニットを構成することとした。

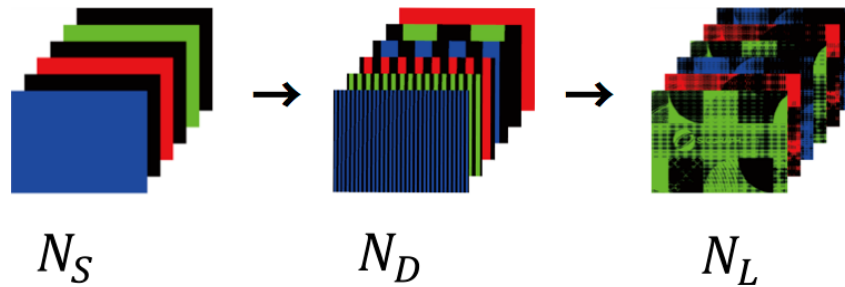


図 4.3: データ埋め込みにおけるバイナリフレームの模式図

この時、バイナリフレームユニットの構造は図 4.4 のようになる。同期フレーム部については、ON と OFF の繰り返しによるパルス波で信号を送信することとした。データフレーム部については、位置座標情報として  $x$  軸方向の位置座標情報に 10 ビット、 $y$  軸方向に 10 ビットのデータ長でデータを格納することとした。これは、プロジェクトの投影映像の解像度が XGA ( $1024 \times 768$  px) であるので、この情報を表現するためにデータ長を設定している。残りの 12 ビット分のデータについては、8 ビット分を極座標表示した速度ベクトルの偏角方向成分に、3 ビット分を動径方向成分に、1 ビットを制御モードの切り替え用フラグに割り当てることとした。輝度調整フレーム部については、データフレーム部の信号を反転した信号と元の画像の色階調を反映したバイナリフレームで構成することで、フレームユニット単位で見た時に可視映像として構成可能な設計とした。

また、PVLC システムにおいて、映像への不可視情報埋め込みは画素単位で行われる。そのため、画素の境界をまたいだ位置に受光素子が存在すると、両方の画素のデータを受信して、混信が発生してしまう。深澤ら [14] はこの問題に対処するため、位置情報など数値的連続性がある情報をグレイコードで符号化し、混信が発生しても情報の連続性を保持する手法を提案している。本システムにおいてもこの手法を採用し、数値的連続性のある位置座標情報に関しては、グレイコードによる符号化を行った上で送信するように設計することとした。

可視光通信プロジェクトの明滅周波数は、映像のちらつきとロボットの制御周期を 10 ms 程度に設定することを考慮し、12,500 Hz に設定した。この時、実際に人間が目にする映像のリフレッシュレートの

$$\frac{12500 \text{ [Hz]}}{150} = 83 \text{ [Hz]} \quad (4.1)$$

より、83 Hz となる。また、この時のデータ転送速度は

$$32 \text{ [bits]} \times 83 \text{ [Hz]} = 2656 \text{ [bps]} \quad (4.2)$$

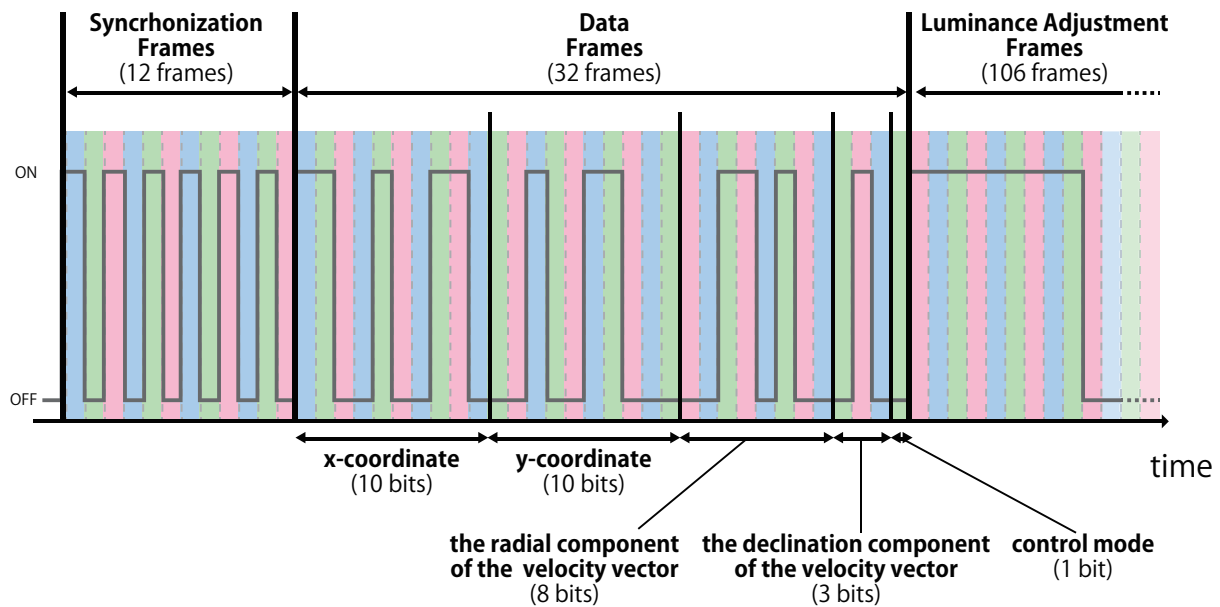


図 4.4: バイナリフレームユニットの構造

より、2,656 bps となる。

### 4.2.3 PVLC 映像の設計フレームワーク

PVLC を用いたアプリケーションの設計においては、各画素単位で埋め込む情報を設定した上で、その情報に応じて各画素の輝度値を計算する必要がある。従来のアプリケーション実装においては、この設計におけるフレームワークは実現されておらず、効率的でかつ再利用可能なアプリケーション設計の妨げとなっていた。そこで、投影画像に任意の情報を埋め込んだアプリケーションを容易に設計、実装できるソフトウェアフレームワークの開発を行った。PVLC 映像の設計ソフトウェアフレームワークの概要を図 4.5 に示す。これによって、デザイナーは複雑なバイナリフレーム生成の処理などを実装する必要がなくなり、投影する映像と埋め込む情報を準備するだけでアプリケーションを実装することができる。

### 4.2.4 受光器回路

従来の PVLC システムにおける受光器回路では、フォトセンサとして TPS615 (東芝セミコンダクタ製) と PS1101W (スタンレー電気製) の 2 種類のフォトトランジスタが用いられてきた。前者は砲弾型で半値角が  $60^\circ$  である狭指向性のセンサ、後者は表面実装型で半値角が  $130^\circ$  である広指向性のセンサとなっていた。これらについて、フォトトランジスタを図 4.6 のように  $V_{cc}$  (図中 +3.3V)、GND と抵抗  $R_L$  (図中  $R_1 + VR_1$ ) に接続することで、電流-電圧変換回路を構成し、 $V_{out}$  をコンパレータ回路により基準電圧と比較することで信号の受信を行っていた。

この回路では、数 kHz を超えるような高速な点滅光の受光において、回路の立ち上がり、立ち下がり時間を減少させ応答性を向上させるためには、 $R_L$  の抵抗値を小さく取る必要がある。しかし、 $V_{cc} = 3.3\text{ V}$  や  $5\text{ V}$ 、定常消費電流が  $10\text{ mA}$  オーダーといったような、低電圧・低消費電力

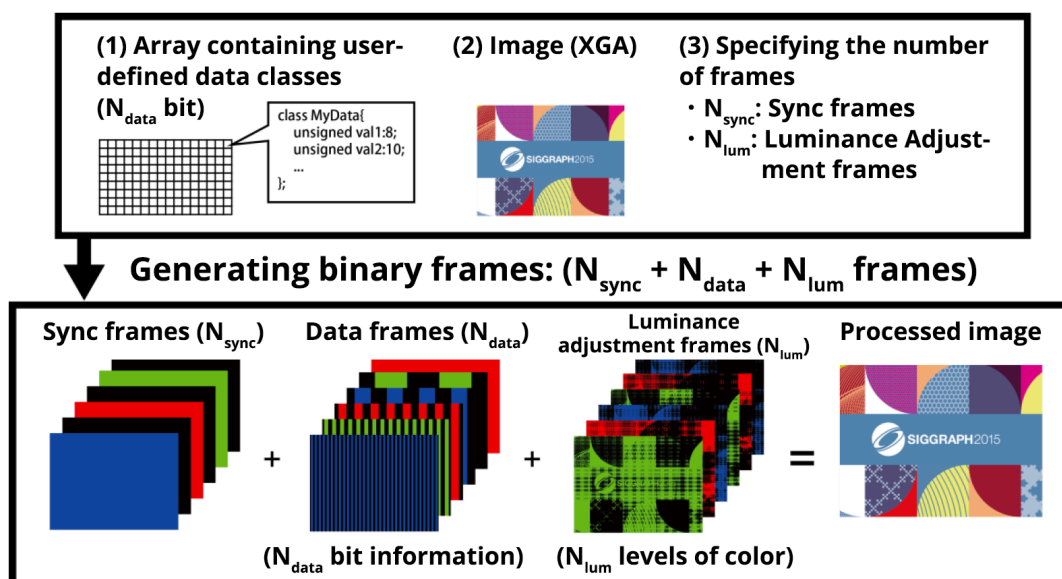


図 4.5: Phygital Field システムにおける PVLC 映像の設計フレームワークの模式図

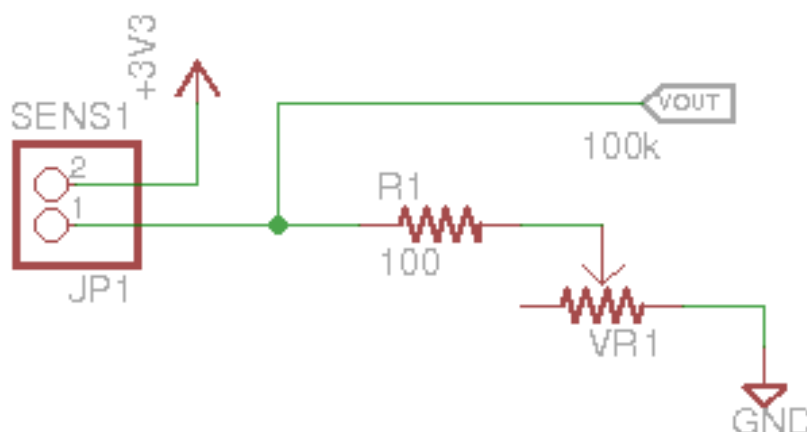


図 4.6: 従来の受光器回路の回路図

での運用が要求される状況においては  $R_L$  の抵抗値を少なくとも  $10\text{ k}\Omega$  オーダーに設定しないとバッテリーの消耗により受光器回路としての動作が困難になるという問題が存在した。

そこで、フォトトランジスタではなく、高速明滅光の受光にも対応可能なフォトダイオードを使用した受光器回路を新たに設計、実装した。フォトダイオードの出力電流は微小であるため、オペアンプを用いた電流-電圧変換回路(トランスインピーダンスアンプ回路)を設計、実装することで、安定した信号受信の実現が可能となる。設計、実装に当たっては回路の特性から、可視光域に対して十分な感度を持つフォトダイオードと、入力バイアス電流の小さく ( $\text{pA}$  オーダー以下)、ゲイン帯域幅積が大きいオペアンプを使用することとした。これらの条件を満たす電子部品として、フォトダイオードに S2506-02 (浜松ホトニクス製)、オペアンプに OPA2353UA (Burr-Brown 製) を選定し、信号ノイズを考慮して、トランスインピーダンスアンプ段はすべてチップ部品によ

る実装を行った。増幅率(トランスインピーダンス・ゲイン)は、100万倍とした。また、感度調整用に次段に非反転増幅回路を構成し、半固定抵抗で調整できる実装とした。

トランスインピーダンス・アンプの補償コンデンサの容量  $C_F$  については、ゲイン帯域幅積を GBW、帰還抵抗の抵抗値を  $R_F$ 、フォトダイオードの静電容量を  $C_D$  とすると、計算式

$$C_F = \frac{1}{4\pi R_F GBW} [1 + \sqrt{(1 + 8\pi R_F C_D GBW)}] \quad (4.3)$$

によって適切な値が計算されることが知られている [15]。今回の部品群について、 $GBW = 44 \text{ MHz}$ 、 $R_F = 1 \text{ M}\Omega$ 、 $C_D = 15 \text{ pF}$  (入射光周波数  $f = 1 \text{ MHz}$  時) であったため、 $C_F = 7.368 \text{ [pF]}$  と計算できた。ただし、今回は部品の制約から、実現可能な近い値として  $C_F = 7.5 \text{ pF}$  とした。回路図を図 4.7 に、基板のボード図を図 4.8 に、実装した回路基板の様子を図 4.9、図 4.10 に示す。

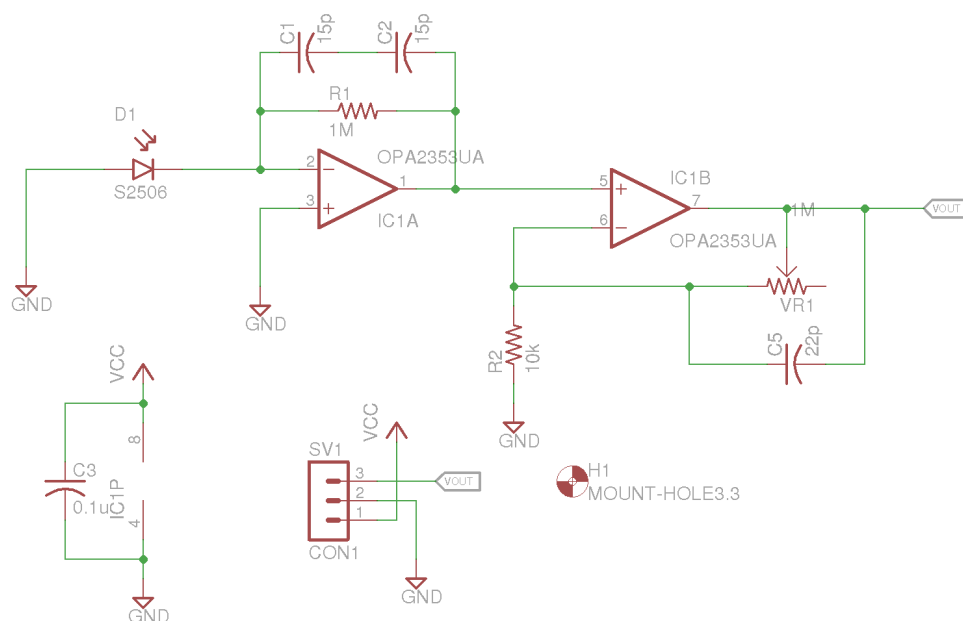


図 4.7: 提案する受光器の回路図

### 4.2.5 ロボット

Phygital Field システムにおいて、受光器回路を搭載したロボットは以下の要件を満たす必要がある。

- DLP プロジェクタからの高速な (12,500 Hz) 投影光を受信可能である
- 受信信号を解析し、位置情報と制御情報を取得可能である
- 位置・制御情報に基づいてアクチュエータを駆動し移動が可能である

この要件を満たすようにロボットを設計、実装した。製作したロボットの様子を図 4.11 に示す。ロボットの長さは 72 mm、幅は 50 mm、高さは 70 mm であり、バッテリーを含めた 1 台あたりの重量は 152 g であった。

また、ロボットは拡張性を考慮し、モータとモータドライバ回路、受光器回路からなるシャーシボード、マイクロコントローラと受光器調整部からなるメインボード、情報提示素子群や上面

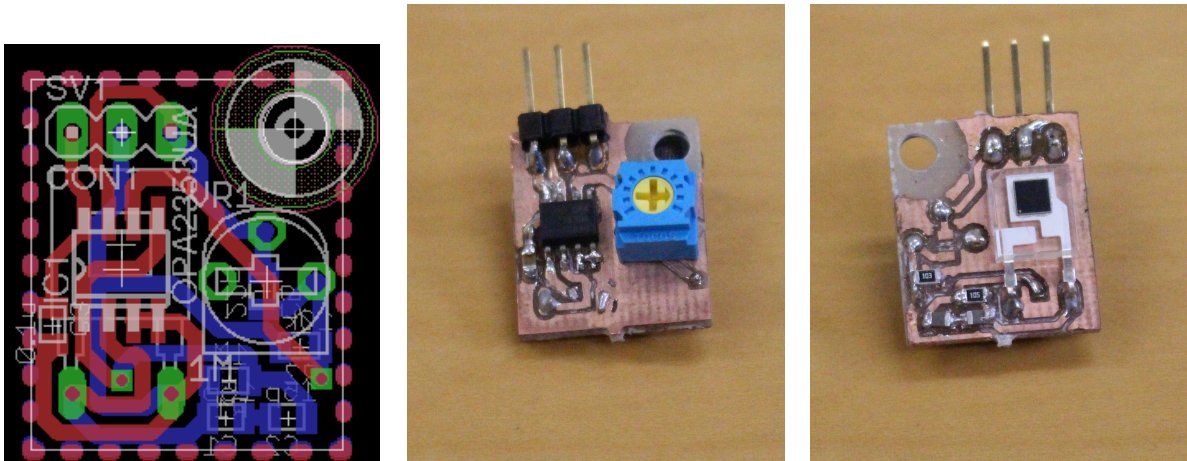


図 4.8: 受光器基板のボード図 図 4.9: 受光器基板の様子 (表面) 図 4.10: 受光器基板の様子 (裏面)

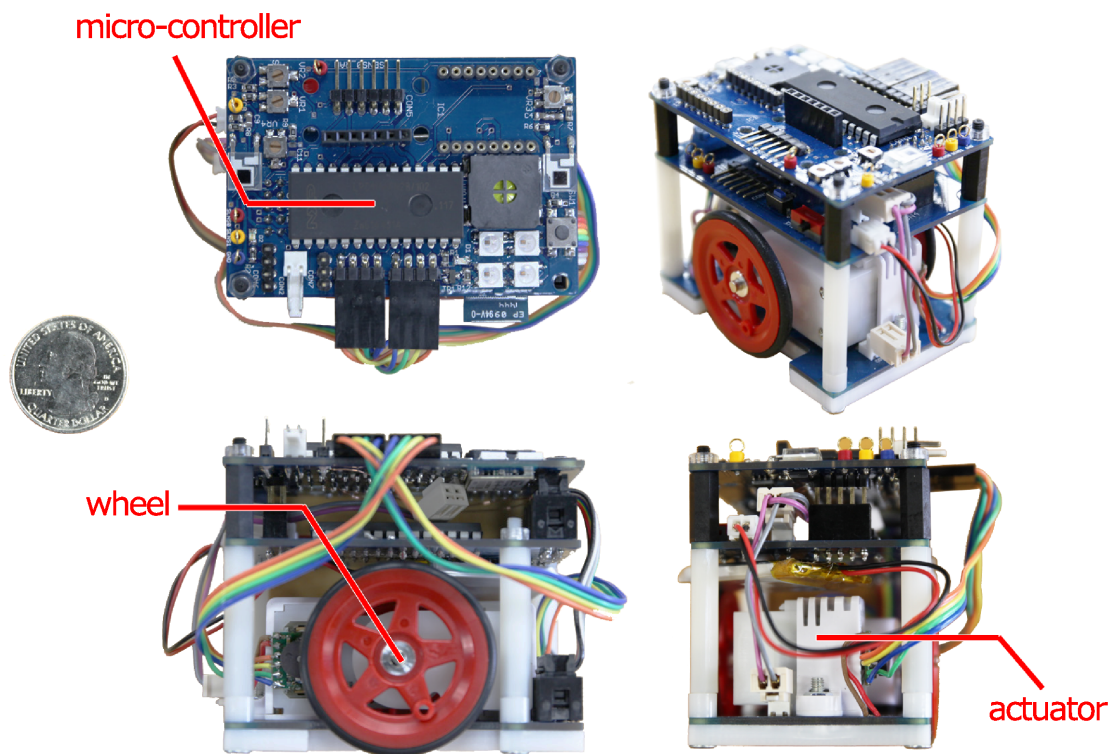


図 4.11: 製作したロボットの様子 (右上: 全体図、左上: 上面図、左下: 横断面図、右下: 正面図)

用の受光器回路からなる拡張ボードの3ボードによってロボットを構成することとした。これにより、情報提示素子の置換など各種構成の変更容易に可能な設計を実現している。

### シャーシボード

本項では、受光器回路とモータドライバ回路によって構成されるシャーシボードについて述べる。受光器回路については、本章で設計した受光器回路と同じものを組み込むこととした。受光

器回路の受光部の様子を図 4.12 に示す。この受光器回路は、ロボットの底面に PVLC 映像が存在する、リアプロジェクション環境において使用される。拡散光による外乱を防止するため、受光部はピンホール構造となっており、フォトダイオードの受光面のみが露出する構造となっている。

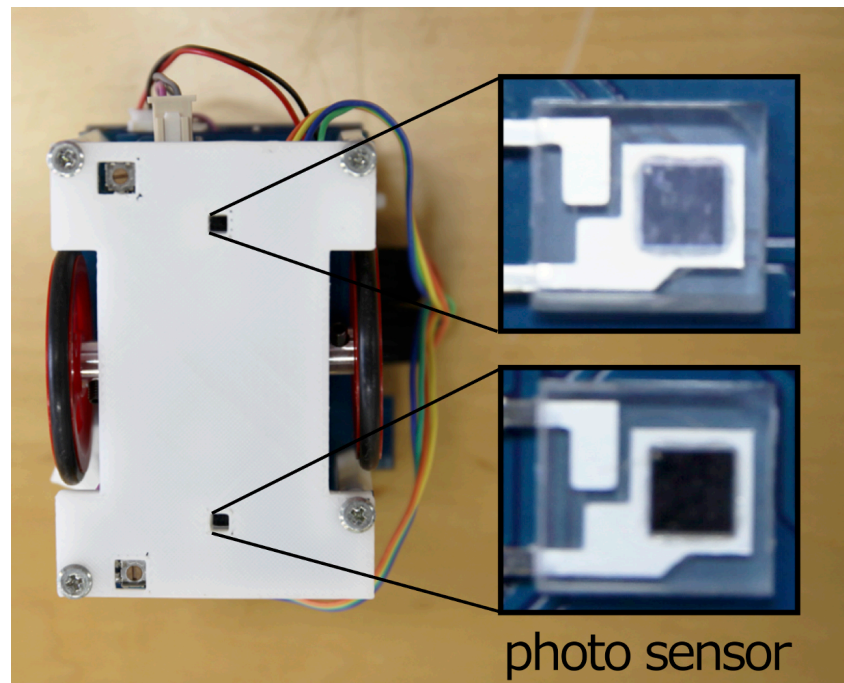


図 4.12: ロボット底面における受光部の様子

モータドライバ回路については、モータドライバ IC (BD6211F、ローム) と汎用ロジック IC (TC74HC08AF、東芝セミコンダクタ) を使用し、モータ 1 つあたりに 2 本の正逆制御用信号線と 1 本の速度制御用 PWM 信号線を用いることで、正 / 反転制御と速度制御を実現した。また、アクチュエータであるギヤードモータ (120:1 Mini Plastic Gearmotor HP, Offset 3 mm D-Shaft Output, Extended Motor Shaft, Pololu) 自体もシャーシボードにネジ止めする構造とした。ギヤードモータにつけるホイールにはプラスチックプーリ (35 mm,  $\Phi$  3 mm 用) (レインボープロダクツ) を使い、タイヤには市販の  $\Phi$  30 mm O リングを使用した。シャーシボードの回路図を図 4.13 に、基板のボード図を図 4.14 に、実際に実装した基板に、モータとホイール、タイヤを取り付けた様子を図 4.15 に示す。

## メインボード

本項では、マイクロコントローラと受光器調整回路、電源回路で構成されるメインボードについて述べる。受光器調整回路はコンパレータ回路によって構成されている。コンパレータにはオペアンプ (NJM2732M, JRC) を使い、しきい値となる基準電圧は半固定抵抗で調整可能な実装とした。マイクロコントローラには、LPC1114FN28 (ARM Cortex-M0 48 MHz, NXP Semiconductor) を使用し、mbed 互換ボードとして構成することで、プログラムの開発が容易になるよう配慮した。バッテリーにはリチウムポリマーバッテリー (3.7 V, 800 mAh) を使用し、3 端子レギュレータ

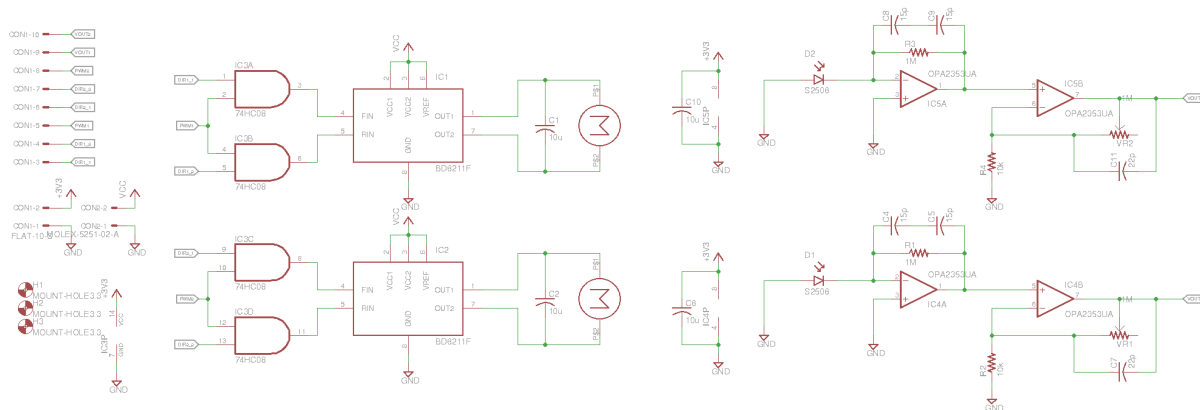


図 4.13: シャーシボードの回路図

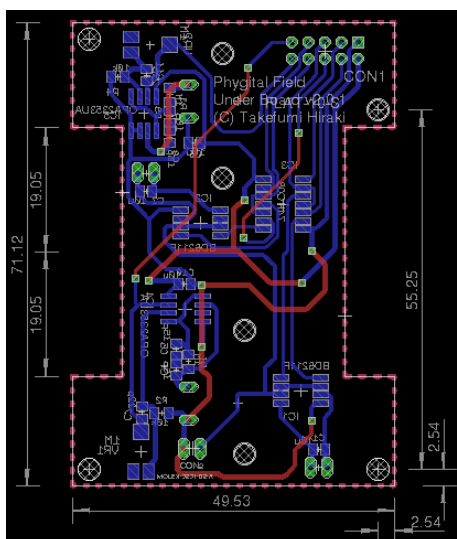


図 4.14: シャーシボードのボード図

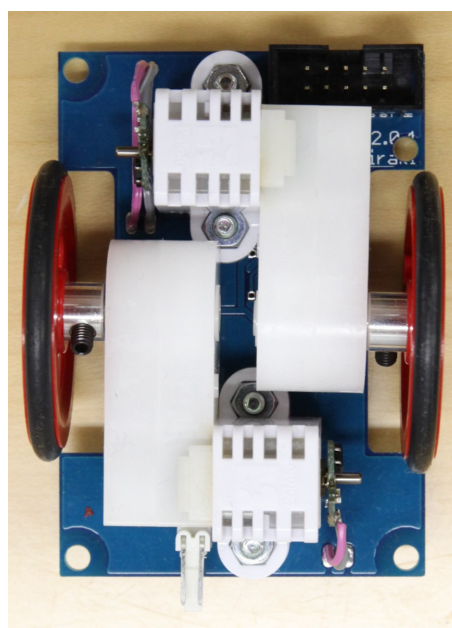


図 4.15: シャーシボードに部品を実装した様子

を用いた電源回路により 3.3 V を供給することで各種回路の駆動を行っている。メインボードの回路図を図 4.16 に、基板のボード図を図 4.17 に、実際に実装した基板の様子を図 4.18 に示す。

### 拡張ボード

本項では、マイクロコントローラ、情報提示素子、上面用受光器回路とその調整回路、無線通信モジュールによって構成される拡張ボードについて述べる。マイクロコントローラには、メインボードと同様に LPC1114FN28 を使用し、mbed 互換ボードとして構成している。情報提示素子としては、フルカラー LED (WS2812B, WorldSemi) とスピーカ (UM1515IA, DB Products)、mp3 再生モジュール (WTV020M01) を実装し、RGB 光の明滅と mp3 サウンドの再生が可能な仕様とした。また、上面用受光器回路とその調整回路は、ロボットの上面から PVLC 映像が投影されるフロ

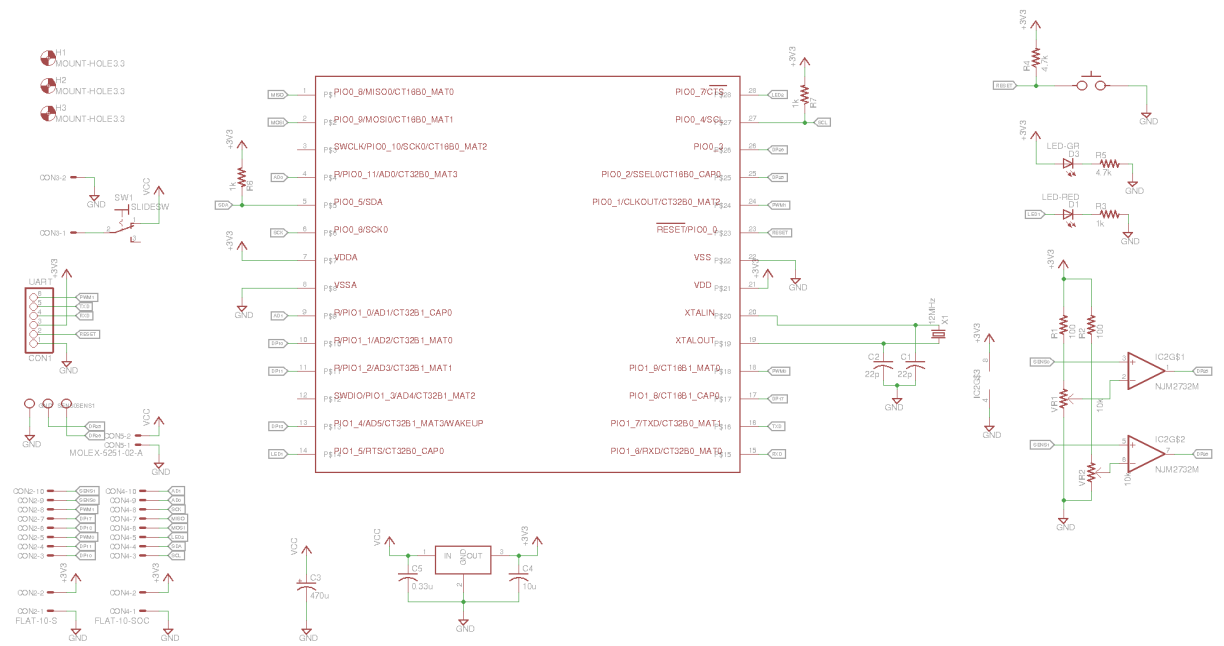


図 4.16: メインボードの回路図

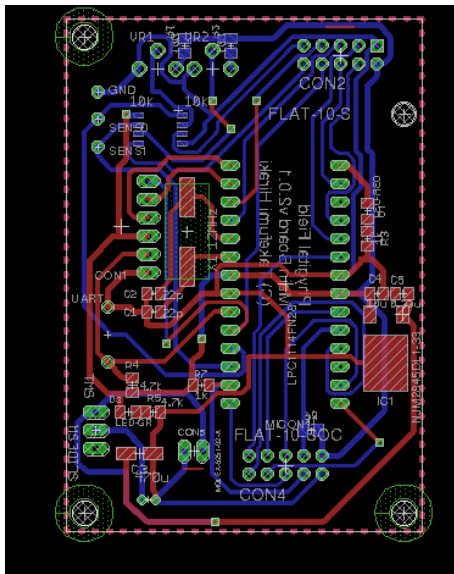


図 4.17: メインボードのボード図

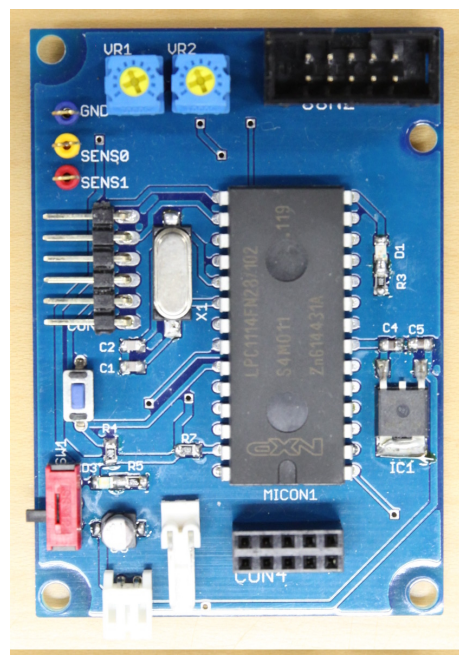


図 4.18: メインボードに部品を実装した様子

ントプロジェクション環境において使用する。この回路の受光素子にはフォトダイオード (S6775, 浜松ホトニクス) を使用しているが、その他の回路はシャーシボードの回路と同一である。無線通信モジュールについては、Bluetooth 通信モジュール (RN42-I/RM, Microchip) を使用し、状況に応じて無線通信によるロボットからプロジェクト制御用 PC へのフィードバックが可能な仕様とした。また、メインボードと拡張ボードはピンヘッダにより接続可能な実装とし、両ボードは I<sup>2</sup>C



通信で通信可能な仕様とした。拡張ボードの回路図を図 4.19 に、基板のボード図を図 4.20 に、実際に実装した基板の様子を図 4.21 に示す。

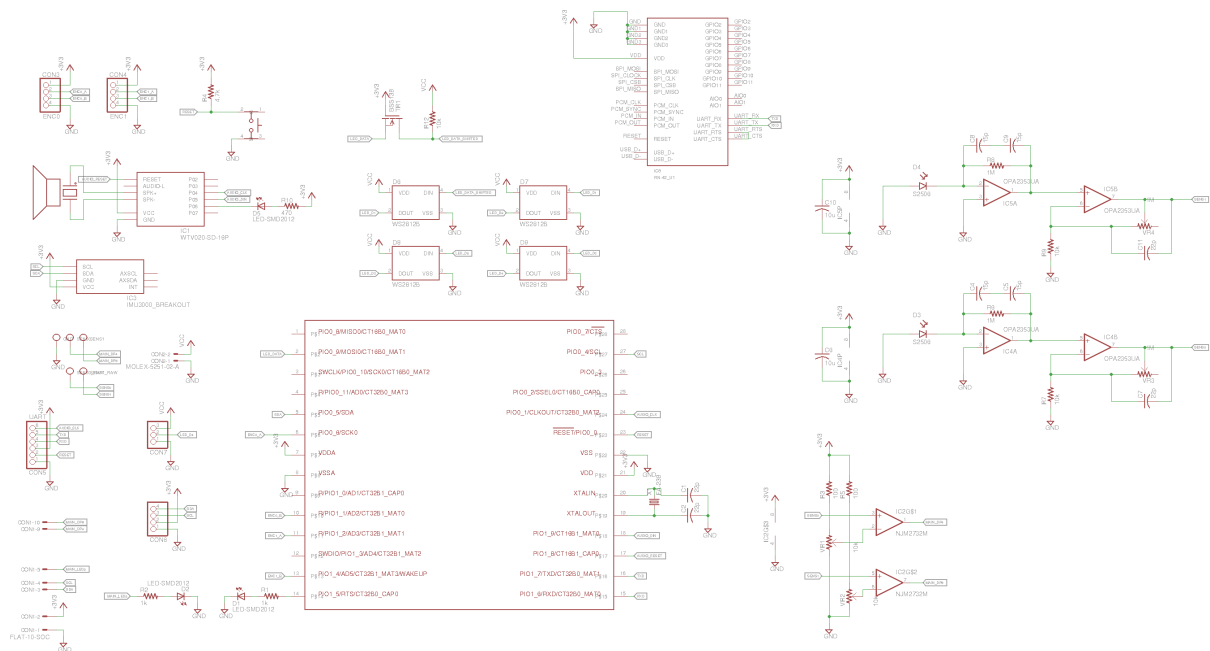


図 4.19: 拡張ボードの回路図

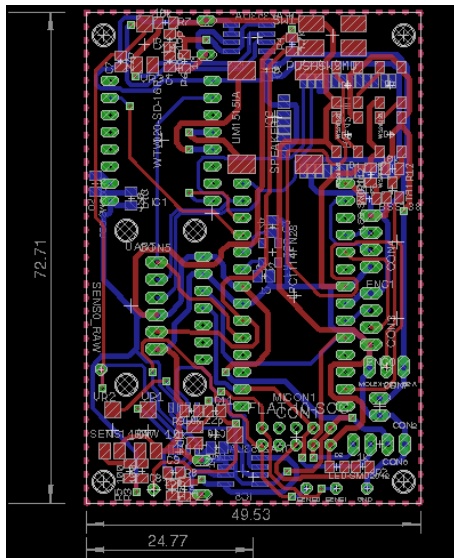


図 4.20: 拡張ボードのボード図

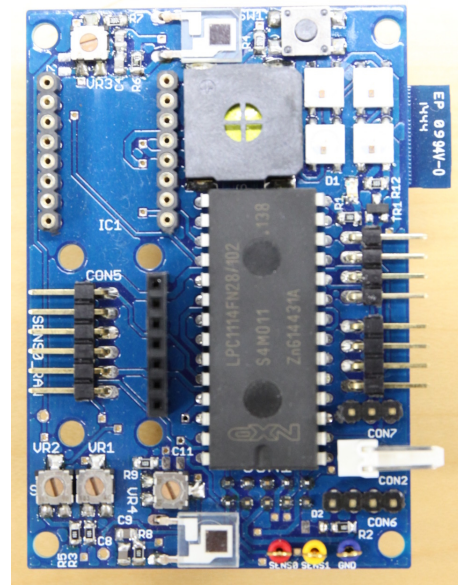


図 4.21: 拡張ボードに部品を実装した様子

### データ受信のアルゴリズムと処理

データ受信については以下のような手順で処理を行うよう実装した。

- (1) 同期信号の受信
- (2) データフレーム部を受信、格納した上でパースし、データを取得
- (3) データがグレイコード符号化情報であった場合はデコード処理
- (4) 位置座標情報と速度ベクトル場情報を取得、逆三角関数により角度情報を計算

この処理のフローチャートを図 4.22 に示す。同期信号の受信においては、同期信号を ON / OFF を繰り返すパルス信号で構成し、毎周期において立ち上がりと立ち下がりを検出し、そこから半周期分遅れた時点で光を受信することで、マイコン内部タイマの積算誤差の影響を極力排除する実装を行っている。プログラムの開発には mbed プラットフォームを使用し、言語は C++を用いて実装した。

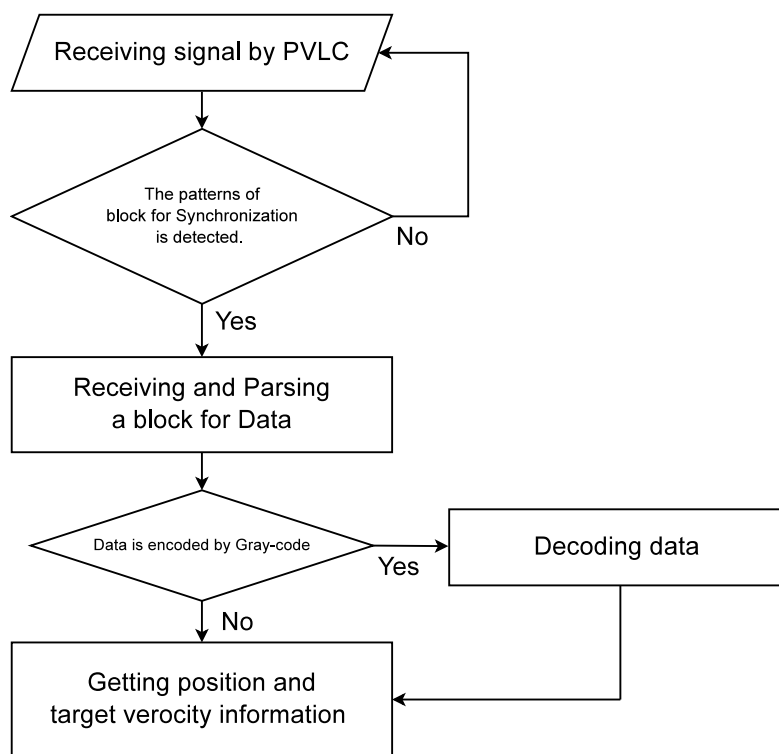


図 4.22: PVLC データ受信におけるプログラム処理のフローチャート

### 4.3 評価実験

Phygital Field システムの各種性能について評価を行うために実験を行った。まず、受光器の特性を評価するために、その時間分解能、輝度特性、空間解像度について実験を行った。そして、ロボットの自己位置推定と制御の評価するために、ロボット静止状態における自己位置推定の精度、ロボット動作状態における自己位置推定の精度、速度ベクトル場を用いた目標点へのロボットの動作制御について実験を行った。

### 4.3.1 受光器の特性評価実験

受光器の特性評価実験においても、可視光通信プロジェクトの明滅周波数は 12,500 Hz に設定し、制御ソフトウェアには ALP Ver. 4.2 コアプログラムを使用した。また、520 mm × 400 mm のテーブルトップスクリーンを投影面として用いた。テーブルトップスクリーンは透明なアクリル板に白色リアプロジェクションフィルム(シアターハウス)を貼り付けることで構成した。外乱光の影響を排除するために、組立式暗室(ADR-F2、アズワン)の中に測定装置を設置して測定を行った。測定系の様子を図 4.23 に示す。また、図 4.24 に示すように、図 4.23 の長辺方向軸を  $x$  軸、短辺方向軸を  $y$  軸とし、 $x$  軸は図の手前から奥に向かう向きを正として設定した。

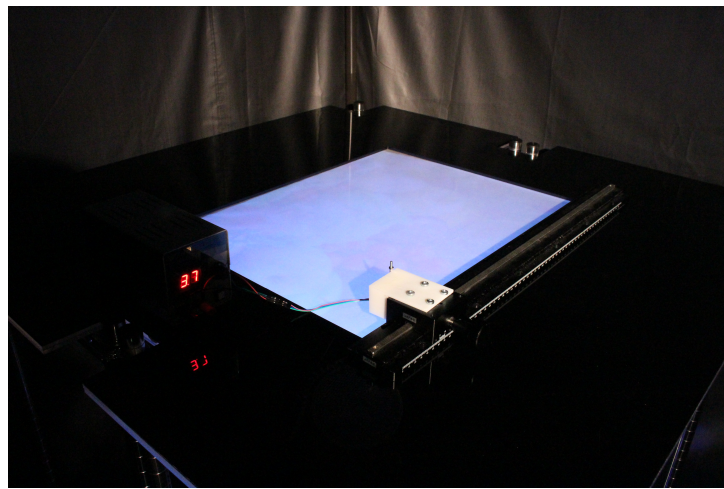


図 4.23: 評価実験における測定系の様子

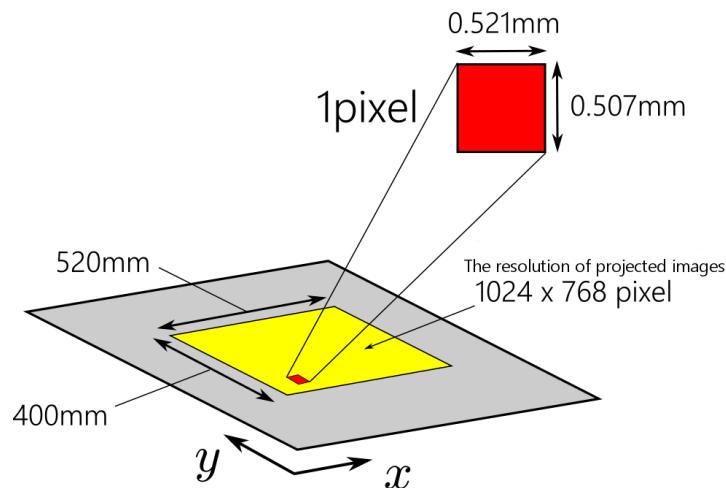


図 4.24: スクリーン座標系

プロジェクトの解像度は XGA (1,024 px × 768 px) であるので、投影面のひずみを無視すれば、現実空間における映像の画素サイズは、スクリーンのサイズから 0.521 mm × 0.507 mm と計算できる。受光器の特性評価実験においては、現実空間の座標系 (mm) と映像の座標系 (px) の変換に

はこの理想値を用いることとした。

また、ラック&ピニオンレール (Edmund Optics 社製) に作製したマウンタを介して受光器回路を単体で取り付け、正確な位置調整を行った。増幅倍率調整用の半固定抵抗は 66.5 k $\Omega$  に設定した。

**受光器の時間分解能の評価** 設定した可視光通信プロジェクトの明滅周波数に、受光器回路が対応できているかについて評価するため実験を行った。映像に埋め込まれた 12,500 Hz の周期パルス信号情報を、フォトトランジスタ (TPS615) を用い、図 4.6 の通りに構成された従来の受光器回路と、本章で新規に設計、実装した受光器回路の2種類の受光器で受信し、その入力信号をオシロスコープ (TDS2024C, Tektronix) で測定した。なお、従来の受光器回路における感度調整用半固定抵抗 (VR<sub>1</sub>) は 51.2 k $\Omega$  に調整した。測定結果を図 4.25 に示す。

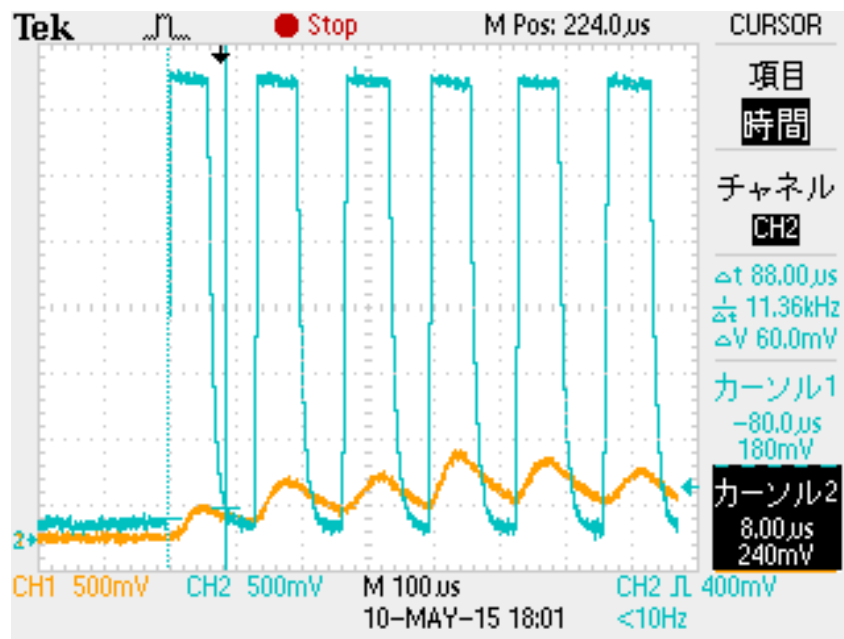


図 4.25: 受光器における時間分解能の測定結果

CH1 が従来の受光器からの入力信号、CH2 が今回製作した受光器からの入力信号である。視認性のため、グラフの電圧方向には -1.75 V のオフセットを設定している。CH1 の信号はレンジが小さく、波形もなまっている一方で、CH2 の信号はほぼパルス波として検出できていることが見て取れる。取得信号を解析した結果、CH1 のレンジは 720 mV であり、CH2 のレンジは 3.58 V であった。また、センサの立ち下がり時間の影響で周期  $\Delta t$  が 88  $\mu$ s と、理論値 (80  $\mu$ s) よりも 8  $\mu$ s 大きいが、信号受信に大きな影響はなく、実装した受光器は高速な明滅光への対応に十分な時間分解能を有していることを確認することができた。

**受光器の輝度特性の評価** 輝度の観点から通信が可能な最小の画素サイズについて明らかにするため評価を行うために実験を行った。製作した受光器を用いて、 $x$  軸と垂直に交わる直線の形で常時点灯している様々な幅の信号パターンを測定することで、画素サイズと輝度の関係性を評価した。本実験においては、受光面以外の部分を遮光しピンホール構造とすることで、周辺光の影響

を排除して行った。また、直線の長さ ( $y$  軸方向) は 768 px (400 mm) とし、幅 ( $x$  軸方向) は 1 px から 10 px の範囲で 1 px ずつ変化させた。その後、レール上で受光器を  $x$  軸方向に 1 mm 刻みで動かしながら、各点において 600 点をサンプリングし、その平均値をその点における輝度の測定値として採用した。操作の手順と概要を図 4.26 に、測定結果のグラフを図 4.27 に示す。

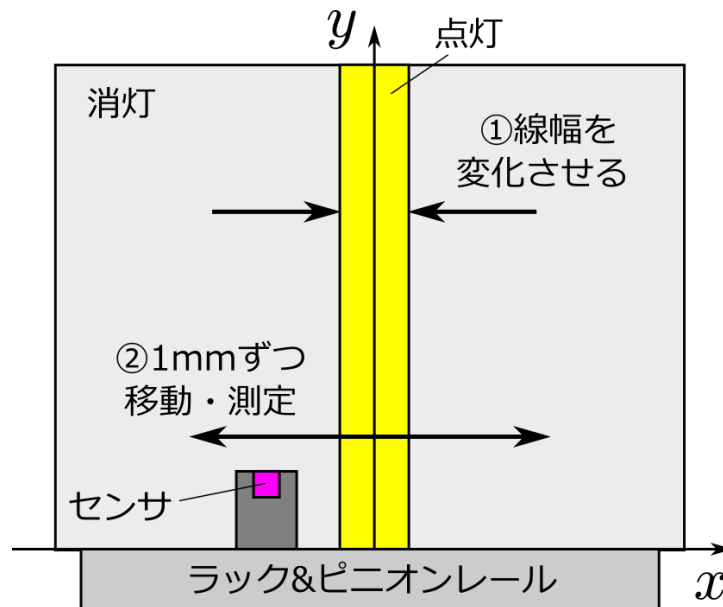


図 4.26: 輝度特性の評価実験における操作手順

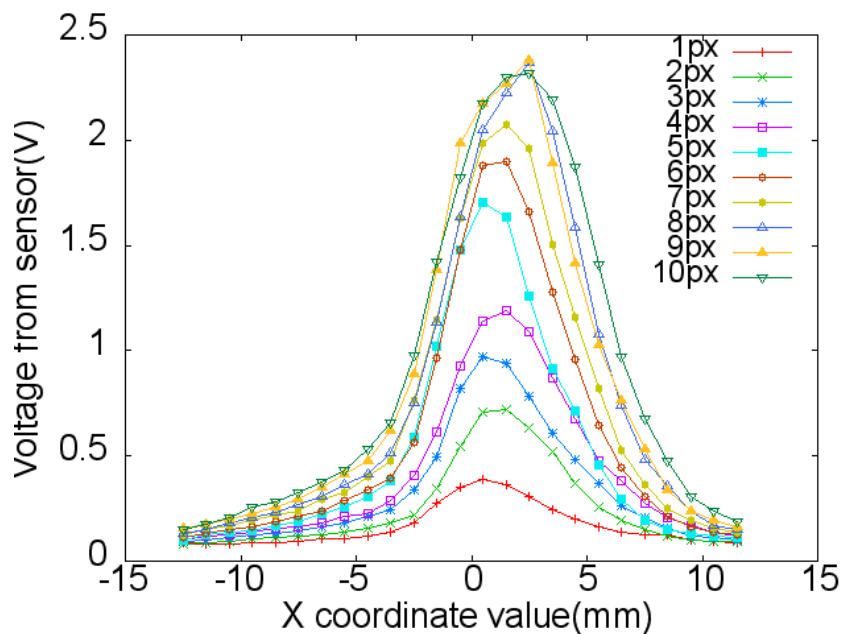


図 4.27: 輝度特性の測定結果

グラフの  $x$  軸はそのままシステムの  $x$  軸であるが、プロジェクト側で投影する直線の中心線の  $x$  軸との交点に該当する座標を原点とした。線の幅を大きくしていくに従って、測定された電圧

値が大きくなっており、これはすなわち輝度値が大きいことを示している。また、直線の太さが 8 px 以上の測定においては電圧値がほぼ飽和していることが見て取れる。電圧値が最大値を取る  $x$  座標の値が、線幅が奇数の時と偶数の時の時でずれが生じているが、これは奇数時と偶数時で各線の中心線が異なることが影響していると考えられる。

そして、電圧の最大値がレンジ幅である 3.54 V でなく、2.35 V 付近で収束している様子も見て取れる。これは、使用しているプロジェクトの光源制御の仕様上、常時点灯として制御していても、輝度調整のため強制的に一定の割合で消灯されており、その瞬間に信号が立ち下がってしまうためと考えられる。また、オシロスコープによる解析では、直線の太さが 6 px 以上の場合においては、測定の最大値はレンジ幅である 3.54 V を示していた。これにより、点灯によって輝度が測定可能な最大の値まで到達していることがわかった。逆に線幅が 5 px 以下の場合は幅が小さくなるに従って最大値が小さくなっていった。よって、輝度の観点からは、今回使用したテーブルトップスクリーン環境において、通信に必要な埋め込み情報の最小画素サイズは 6 px であり、高い空間分解能を必要としない用途であれば、8 px に設定すれば十分な性能を発揮できると考えることができる。今回使用したテーブルトップスクリーンにおいて、6 px 四方の正方形は約 3.1 mm × 3.0 mm の大きさであり、これは受光器に使用したフォトダイオードの大きさと非常に近い値である。よって、使用した可視光通信プロジェクトとテーブルトップスクリーン投影環境において、受光器回路にて設定した増幅率の設定は適切であったと言える。

**受光器の空間解像度の評価** 製作した受光器で通信を行うにあたっての設定値として適している埋め込み情報の画素サイズに関して、フォトセンサの物理的大きさの観点から評価を行うために実験を行った。フォトセンサの大きさと埋め込み情報の画素サイズの下限值に関しては、画素サイズがフォトセンサの受光面サイズより小さい場合は受光面サイズが、大きい場合は画素サイズが埋め込める情報の位置精度の下限となるという知見が知られている [16]。この関係の模式図を図 4.28 に示す。

ここで、実際に信号を受信する場合を考えた時、各測定値において、ON と OFF を判定するためのしきい値を設定する必要がある。今回は、半値全幅 (FWHM) の範囲内に入っている場合を ON、入っていない場合を OFF とすることで ON と OFF の判定基準を設定した。この時、各測定値における半値全幅の幅は、測定時において受光器が判定した線幅と考えることができる。

図 4.27 の結果について、各線幅と、その時の測定値における半値全幅の幅の比較を示したグラフを図 4.29 に示す。視認性のため、線幅に関しては理想的な値である  $1 \text{ px} = 0.521 \text{ mm}$  の対応値を用いて、単位を mm に変換した上でグラフを描画した。線幅に対応する半値全幅の大きさが各点の値である。この点群に関して、線幅が必要な輝度を満たしている領域において、最小二乗法による直線フィッティングを行った結果の直線が a である。a の傾きは 0.848 であり、この領域における点群の傾向をよく表していることが見て取れる。よって、単一画素の輝度がセンサの測定にあたって十分であり、かつ投影した線の線幅が受光器の受光面の面積の幅より広い場合、送信情報の空間解像度は画素サイズの増大によって低下していることがわかる。この結果より、提案した受光器回路についても、受光器の空間解像度については深澤ら [16] の報告に沿う形で変化するということが言える。

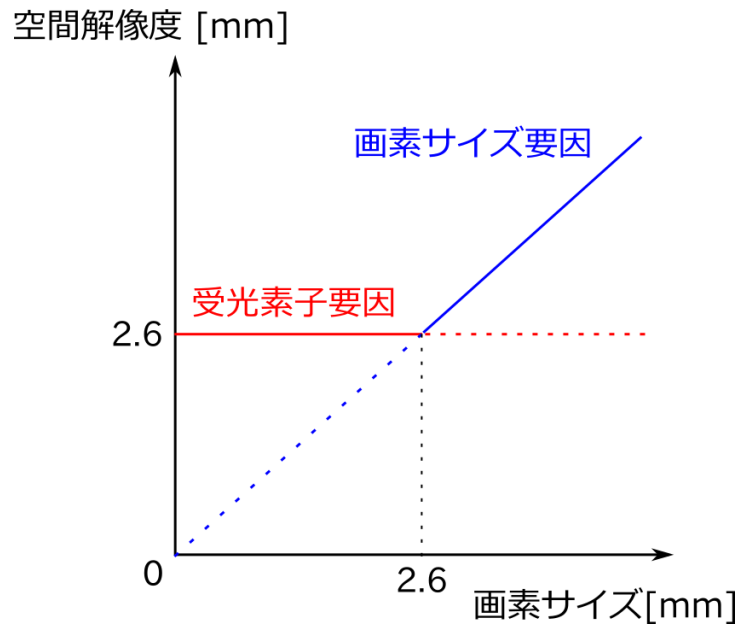


図 4.28: 画素サイズと空間解像度の制約の関係

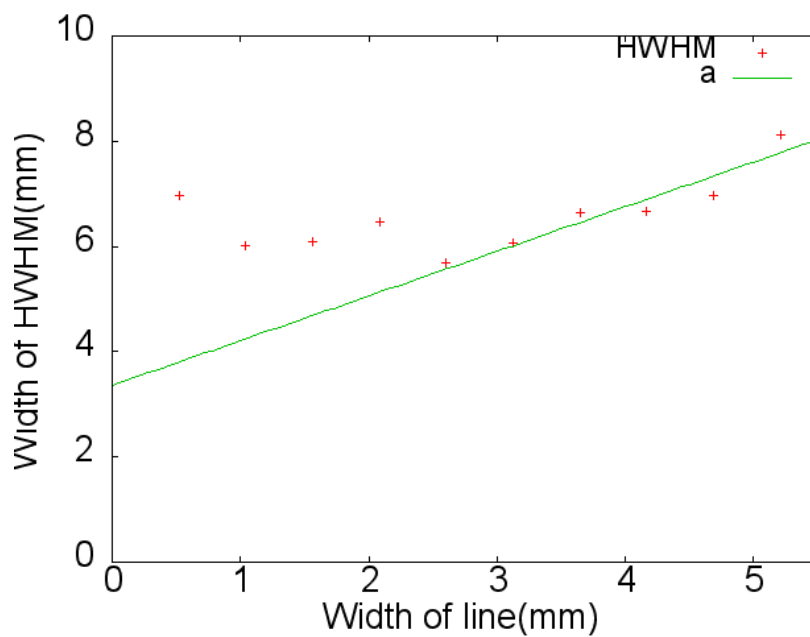


図 4.29: 空間解像度の測定結果

### 4.3.2 ロボットの自己位置推定と制御の評価実験

ロボット静止状態における自己位置推定の精度、ロボット動作状態における自己位置推定の精度、速度ベクトル場を用いた目標点へのロボットの動作制御の3点について評価を行うため、それぞれについて実験を行った。

実験は、ロボットの上面に対して映像が投影されるフロントプロジェクション環境で行った。

また、実験は組み立て式暗室 (MEDR-2518, 森本化成) 内で実施し、投影面から 2.5 m 離れた位置に 프로젝タを設置した。この時、投影面のサイズは、1340 mm × 1010 mm であった。ロボットで取得したデータをデータ処理用 PC (ThinkPad X240, Lenovo) に転送するために、無線通信モジュール (XBee 802.15.4, Digi International) を別途使用した。取得したデータの処理は、Ubuntu Linux 15.04 上で行った。

#### ロボット静止状態における自己位置推定の精度評価

ロボットが静止している状態における自己位置推定の精度を評価するために本実験を行った。投影面上に静止された状態で配置されたロボットは PVLC によってデータを受信し、そこに含まれる位置座標情報を用いて自己位置推定を行う。また、投影面上において等間隔で測定を行うために、全体を 4 × 4 の領域に分割した格子をもつ画像を投影し、この 9 点の格子点上にロボットを配置することとした。ここでは、格子点を順に、左上、中央上、右上、左中央、中央、右中央、左下、中央下、右下と呼ぶこととする。プロジェクトからの投影に用いた画像を図 4.30 に、実際に左上の格子点に受光器が一致するようにロボットを配置して測定を行っている様子を図 4.31 に示す。また、測定は各点においてそれぞれ 1000 回、合計 9000 回行った。

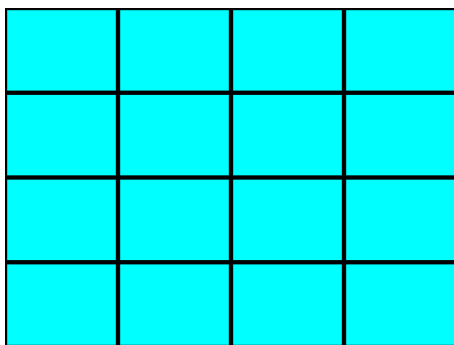


図 4.30: プロジェクトからの投影に用いた画像 図 4.31: 左上の測定点で実験を行っている様子

測定を行った結果、すべての点において、ロボットはそれぞれ 1000 回同じ位置座標情報を受信した。各測定点の投影画像における座標値と実際に受信した座標値、それらの差分を表 4.1 に示す。表 4.1 より、座標値の差分の絶対値は最も大きい値でも 6 px であることが見て取れる。投影面の大きさと投影映像の解像度 (XGA) を用いた単純な計算によって、この実験環境における映像の 1 画素の大きさは 1.31 mm 四方であることから、6 px は 7.87 mm 四方の大きさに相当すると言える。ロボット上のフォトダイオードの受光面の大きさが約 8 mm であることから、この差分の大きさはセンサの物理的な大きさに起因する離散化誤差によって説明することが可能である。これらより、ロボットは静止状態において安定して自己位置推定を行うことができ、提案手法は静止状態において有効な自己位置推定手法であることが示された。

#### ロボット動作状態における自己位置推定の精度評価

ロボットが動作している状態における自己位置推定の精度を評価するために本実験を行った。本実験では、リニアアクチュエータ (EZSM6D085AZMC, オリエンタルモータ) の上にロボットを



表 4.1: 各測定点の投影画像における座標値と実際に受信した座標値、それらの差分。座標値の単位は px である。

測定点	投影画像の座標値 ( $x, y$ )	受信した座標値 ( $x, y$ )	座標値の差分 ( $x, y$ )
左上	(256, 192)	(258, 186)	(2, -6)
中央上	(512, 192)	(514, 186)	(2, -6)
右上	(768, 192)	(765, 189)	(-3, -3)
左中央	(256, 384)	(258, 378)	(2, -6)
中央	(512, 384)	(514, 378)	(2, -6)
右中央	(768, 384)	(765, 378)	(-3, -6)
左下	(256, 576)	(258, 581)	(2, 5)
中央下	(512, 576)	(514, 581)	(2, 5)
右下	(768, 576)	(762, 581)	(-6, 5)

設置し、一定の速度で動作させながら提案手法を用いて位置情報を取得した。ここで、使用したリニアアクチュエータの可動域は 850 mm であり、速度は 100 mm/s と設定した。

ロボットが静止している状態と異なり、ロボットが走行することで、受光器が投影映像の画素の境界をまたぐことにより、受信時に複数画素の情報を受信してしまい混信が発生することが考えられる。画素をロボットの受光器がどのような位置関係(角度)で通過するかによって、混信の発生や状態が変化すると考えられるため、測定にあたっては画素に対してロボットがどのように通過するかについて複数の条件で評価を行う必要がある。画素の形状は正方形でかつ直交座標系で並んでいるため、対称性を考慮し、座標系に対し、 $x$  軸に対してなす角が  $0$  rad から  $\frac{\pi}{4}$  rad の範囲で設定した角度でロボットを走行させることで複数の条件を設定することとした。実際の測定においては、ロボットの長辺が投影座標系の  $x$  軸に対してなす角度を  $\theta$  とした時、 $\theta = 0, \frac{\pi}{12}, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{4}$  rad の 4 つの実験条件を設定した。

投影座標系における位置を把握するため、投影座標系の  $x$  軸に対してなす角度が  $\theta$  である 4 本の直線が引かれた画像をプロジェクタから投影し、各条件についてリニアアクチュエータをその直線に合わせて設置して実験を行った。プロジェクタからの投影に用いた画像を図 4.32 に、実際にリニアアクチュエータとロボットを配置して測定を行っている様子を図 4.33 に示す。

ここで、提案手法による自己位置推定における座標の単位は px であるのに対し、オドメトリによる自己位置推定における座標の単位は mm である。これらの単位を合致させた上で比較を行う必要があるため、ふたつの手法により取得する座標の値 ( $x, y$ ) の初期値を  $(0, 0)$  となるように設定した上で、提案手法により取得した座標の値をアフィン変換を用いて変換し、単位系を合致させることとした。px と mm の単位の変換に用いる値は、測定した 4 つの条件で、ロボットが走行後静止した状態における  $x$  座標と  $y$  座標のそれぞれの値について、提案手法によって取得した単位が px の値とリニアアクチュエータによって取得した単位が mm の値の対応から求め、計算された計 8 個の値の平均値を用いることとした。また実験において、ロボット上の受光器がデータを受信する周期は 10 ms であり、リニアアクチュエータが制御ログを出力する周期は 100 ms で

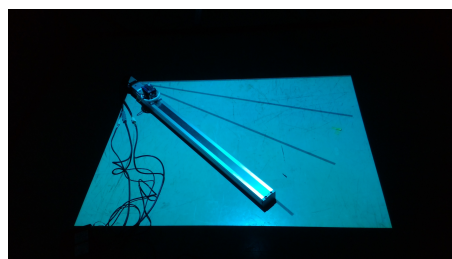
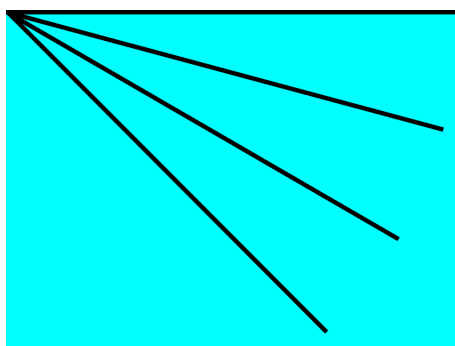


図4.33: リニアアクチュエータとロボットを配置

図4.32: プロジェクタからの投影に用いた画像として測定を行っている様子

あった。

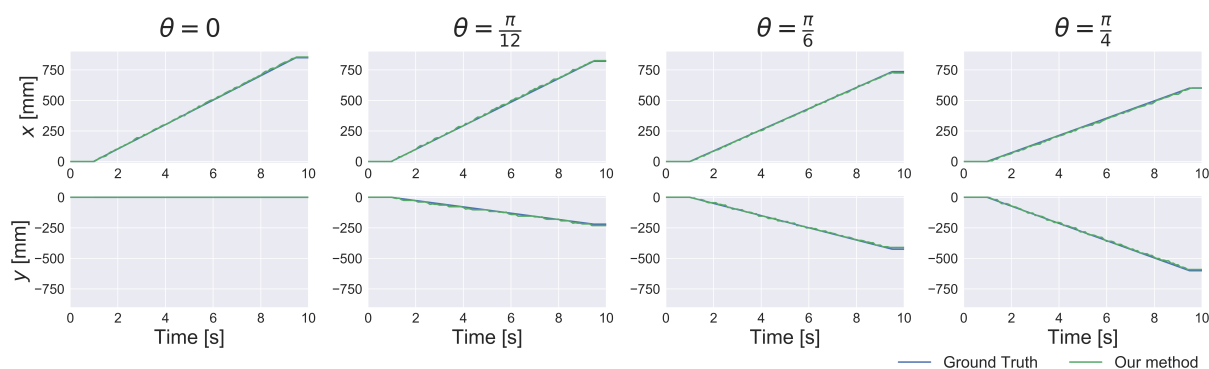


図4.34: ロボット動作状態における、提案手法による自己位置推定の座標値とリニアアクチュエータ位置の比較

投影座標系における、提案手法によるロボットの自己位置推定の座標値と、対応する時間のリニアアクチュエータによる位置の比較を図4.34に示す。緑線が提案手法による自己位置推定による座標値であり、青線がリニアアクチュエータの位置 (ground truth) である。図4.34より、提案手法による自己位置推定はオドメトリによる自己位置推定とほぼ同等の精度を有しているということが見て取れる。一方、提案手法による自己位置推定の座標値はリニアアクチュエータの位置の値と比較して変化がなめらかでは無いことも見て取れる。これは、受光器に使用したフォトダイオードの受光面の物理的サイズ (約8 mm) による離散化誤差に起因すると考えられる。これらより、提案手法を用いたロボットの動作状態における自己位置推定は、ロボットアームの制御など精密な位置制御が求められるような状況以外では、十分な精度で自己位置推定が可能であると言える。

### ロボット制御の評価

提案手法を用いたロボット制御を評価するにあたり、投影するPVLC映像に埋め込まれた速度ベクトル場によって設定された目標点へのロボットの追従性を確認する2つの実験を行った。ロボットの最高速度は、前項の実験におけるリニアアクチュエータの動作速度と同じ速度である、

約 100 mm / s とした。

まず、時間的には変化せず一定である速度ベクトル場を埋め込んだ PVLC 映像を投影した場合に、ロボットの目標点への追従性を確認する実験を行った。本実験において、各画素に埋め込まれた速度ベクトル情報はある一点、つまり目標点を向くように設定されており、目標点に近づくほどベクトルの大きさが小さくなるよう設定されている。よって、各画素の情報は空間的に変化する値として設定されており、画像全体で見た時には速度ベクトル場が構成された状態となる。実験において、ロボットは異なる 2 点に配置して走行させることとした。投影した映像に埋め込まれた速度ベクトル場と、映像上でロボットが走行した軌道の様子を図 4.35 に示す。ロボットは目標点に向けて安定した軌道を走行し、最終的に目標点に到達して静止していることが見て取れる。これより、提案手法を用いることで、投影映像上において、固定された目標点を追従するようにロボットを制御可能であると言える。

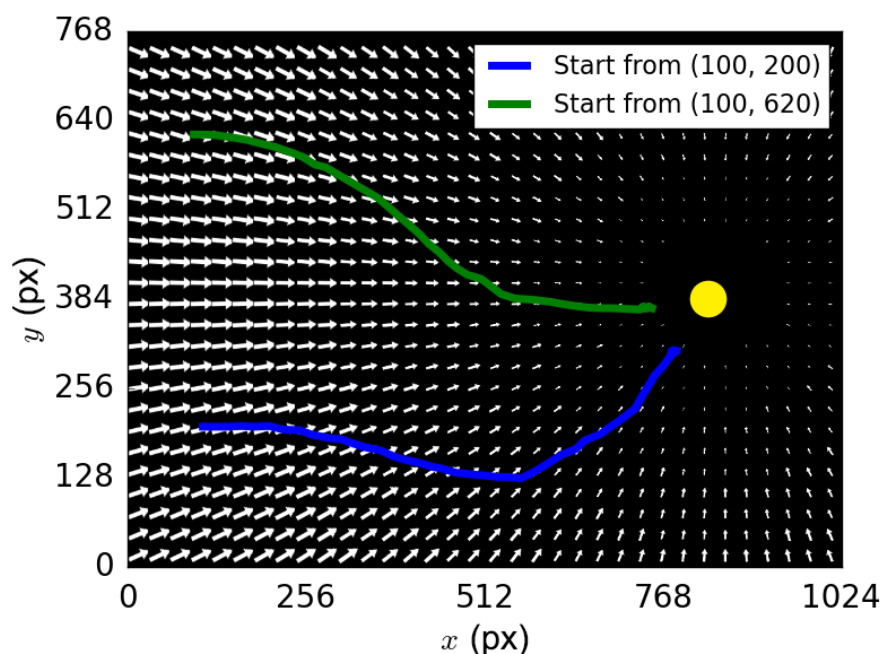


図 4.35: 投影した映像に埋め込まれた速度ベクトル場とその目標点、映像上でロボットの走行した軌道の様子

次に、時間の経過によって変化するベクトル場を埋め込んだ PVLC 映像を投影した場合に、ロボットの目標点への追従性を確認する実験を行った。各時間における速度ベクトルは、前の実験と同様、決められた目標点を向き、かつ近づくほどに大きさが小さくなるよう設定されることでベクトル場を構成している。本実験において、目標点は時間経過に伴って反時計回りに映像上を 1 秒周期で移動するよう設定した。目標点と速度ベクトル場が変化する様子を図 4.36 に、時間ごとの目標点の座標とその図中の色を表 4.2 に示す。本実験においては、ロボットを画面左下隅、つまり座標 (0, 0) 付近に設置して走行を開始させた。

各時間において、映像上でロボットが走行した軌道の様子を図 4.37 に示す。図 4.37 においては、ある時間にロボットが走行した軌道が、その時における目標点の色と同じ色で描画されてい

る。ロボットは各時間において目標点に向けて走行し、目標点に到達した後はその移動に追従して走行している様子が見て取れる。これらふたつの実験の結果より、速度ベクトル場の投影によってロボットを目標点に追従させることで、ロボットの制御が可能であると言える。これは、提案手法が群ロボットの制御を簡便な記述で実現可能であるということを示している。

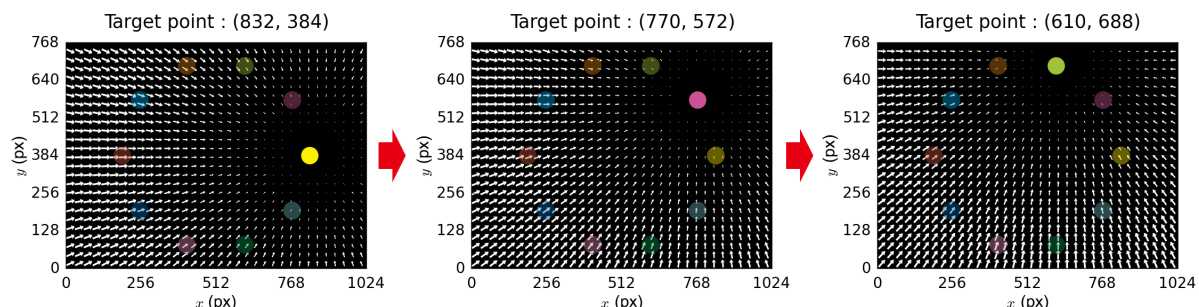


図4.36: 時間経過に伴って移動する目標点と変化する速度ベクトル場の様子。図の左から時間  $t$  がそれぞれ  $t=0 \sim 1$  秒、 $t=1 \sim 2$  秒、 $t=2 \sim 3$  秒の時の状態を示している。

表 4.2: 時間ごとの目標点の座標とその図中における描画色

時間: $t$ (s)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5
目標点の座標 (px)	(832, 384)	(770, 572)	(610, 688)	(414, 688)	(254, 572)
描画色	黄色	ピンク	緑	茶色	青

時間: $t$ (s)	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
目標点の座標 (px)	(192, 384)	(254, 196)	(414, 80)	(610, 80)	(770, 196)
描画色	赤	青	ピンク	緑	水色

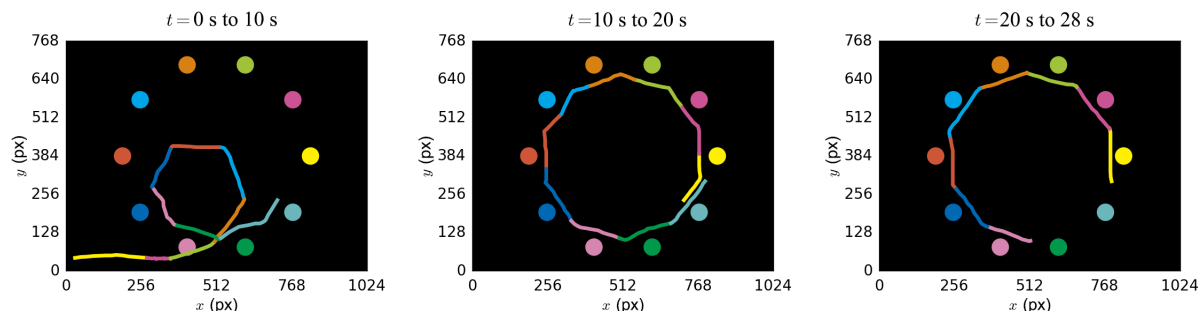


図 4.37: 各時間における目標点の移動と、映像上でロボットが走行した軌道の様子

## 4.4 アプリケーション

Phygital Field を使用した、映像とロボットが協調して動作するアプリケーションについて提案した。ここで、ロボットがバーチャル環境、つまり映像の影響を受けて動作する場合と、現実環境、つまりそこに存在する物体の影響を受けて動作する場合の2種類に分けてアプリケーションの設計と実装を行った。

Phygital Field によるロボット制御では、可視のマーカパターンやロボットの追加時における事前の初期化処理が不要である。そのため、ユーザがロボットを動かしたり、手で払ったりするといった操作を行っても、ロボットは走行を継続することができ、自由なタイミングでロボットの追加や削除を行うことができる。

また、Phygital Field ではロボットを制御する時のシステム負荷は一定であるため、投影空間内に存在する限り何台でもロボットを制御することができる。この時、速度ベクトル場を空間的な情報として投影することによって群ロボットを制御しているので、ロボットは単純かつ単一のプログラムで動作することが可能であり、従来必要であった動的な経路の設計などは不要となる。そして、速度ベクトル場の情報を更新することで、群ロボットの動作を同時、かつ即座に変更することができる。

これらの特徴により、映像と群ロボットが密接に協調することによる新しいコンテンツ表現を実現することができる。実際に Phygital Field システムを用いて群ロボットを制御しているアプリケーションの様子を図 4.38 (a) に示す。ここで、ロボット同士がぶつかった時にロックして止まってしまうことを防ぐために、ロボットには外径が 103 mm であるスカートを着着することとした。

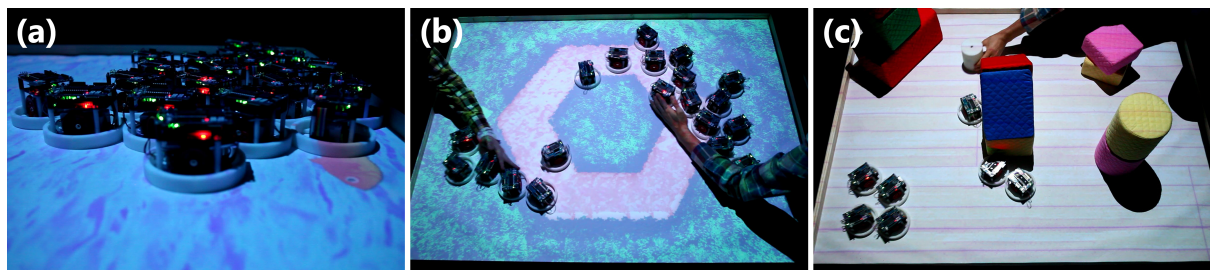


図 4.38: Phygital Field システムにおけるアプリケーションの様子。(a) 投影映像に埋め込まれた情報によって群ロボットが制御されている様子。(b) ロボットがバーチャル環境の影響を受けるアプリケーションの様子。道路上を走行するロボットをユーザが手で払っても、ロボットは走行を継続することができる。(c) ロボットが現実環境に存在する物体の影響を受けるアプリケーションの様子。ユーザはコントローラとなる円柱物体を操作することで、群ロボットをコントローラを目標点として誘導することができる。ロボットはブロックに衝突しても走行を継続することができる。

### 4.4.1 バーチャル環境の変化によってロボットが影響を受けるアプリケーション

ロボットがバーチャル環境の影響を受けるアプリケーションの様子を図 4.38 (b) に示す。映像中の茶色の領域は六角形型の道路を、緑色の領域は森林を表現しており、道路の領域には道路を時計回り方向に周回するような速度ベクトル場が、森林の領域には道路の方向に走行するような

速度ベクトル場が埋め込まれている。このアプリケーションにおいて、すべてのロボットは道路の領域に向かって速やかに移動し、その後、時計回りに道路を周回した。結果として、速度ベクトル場の設計と投影によって、意図した動作を実現することが可能であることを確認できた。また、走行しているロボットをユーザが手によって進路を塞いだ場合でも、ロボットはその方向への走行を継続するよう動作していた。このことから、ロボットは映像に埋め込まれた情報のみによって制御されていることを改めて確認することができた。



図 4.39: シーソーを模したアプリケーションの様子。バーチャルなシーソーの模様と平行な方向にシーソーは傾き、ユーザーがシーソー板を傾けると、群ロボットは斜面を滑り降りるように動作する。(a) シーソー板が平行になっている状態で、ロボットはその場に留まる。(b) シーソー板が右に傾いている状態で、ロボットは傾きに応じて右方向に動作する。(c) シーソー板が左に傾いている状態で、ロボットは左方向に動作する。

シーソーを模したアプリケーションの様子を図 4.39 に示す。ユーザーが映像として表現されているバーチャルなシーソー板を傾けると、群ロボットはその斜面を滑り降りるように動作する。このアプリケーションにおいては、シーソー板の映像を変更すると同時に、ロボットを制御するための速度ベクトル場の情報を更新することで、投影映像と協調した群ロボットの制御を実現している。これら 2 つのアプリケーションは、群ロボットはバーチャルな環境、つまり映像の変化によって動作の形態を変化させるように設計されているという点で共通している。

#### 4.4.2 現実環境の変化によってロボットが影響を受けるアプリケーション

ロボットが現実環境に存在する物体の影響を受けるアプリケーションの様子を図 4.38 (c) に示す。このアプリケーションでは、ユーザがコントローラとなる円柱状の物体を操作することで、群ロボットを誘導することができる。ここで、システムは映像を  $4 \times 4$  の領域に分割した時の格子点を目標点とする速度ベクトル場の情報を事前に計算した上でメモリ上に格納している。そして、コントローラから無線通信によって送信された位置情報から、最も近い格子点の位置を計算し、その格子点を目標点とする速度ベクトル場を投影することで、擬似的なコントローラへの追従制御を実現している。

また、フィールド上には現実環境に存在する障害物としてブロックが配置されている。ここで、ロボットとブロックが衝突すると、その影響でロボットの姿勢や経路は乱れるが、システムの特長によってロボットは走行を継続し、走行すべき経路に復帰することができる。

### 4.4.3 バーチャル環境と現実環境の双方の変化によってロボットが影響を受けるアプリケーション



図 4.40: サンプルゲームアプリケーションの様子。プレイヤーはコントローラとなる円柱状の物体を操作し、ロボットをスタートエリア (ゲームフィールドの左下隅) からゴールエリア (フィールドの右上隅) に誘導する。(a) 通常のフィールドでは、ロボットはコントローラの方向に移動する。(b) 川となっているフィールドでは、ロボットはコントローラの方向に向かうが、同時に川の流れに流される。(c) フィールド上に敵キャラクターがいる場合、ロボットは敵を避けながらコントローラの方向に移動する。

バーチャル環境と現実環境の双方の変化によってロボットが影響を受けるアプリケーションとして実装した、サンプルゲームアプリケーションの様子を図 4.40 に示す。ここで、プレイヤーはコントローラとなる円柱状の物体を操作し、スタートエリア (ゲームフィールドの左下隅) からゴールエリア (フィールドの右上隅) までロボットを誘導することによってゲームをクリアすることができる。ここで、コントローラはユーザのアバターとしての役割を果たしており、ロボットはアバターの後ろを追従するようなキャラクターとしてデザインされている。

また、ロボットはキャラクターとして、ゲームフィールドに存在する川の流れや敵キャラクターからの影響を受ける形で、バーチャルな環境の変化からも影響を受ける。システム的には、前項で説明したようにコントローラに最も近い格子点を目標点とする速度ベクトル場と、川の流れや敵から逃げる方向といった、バーチャルな環境に基づく速度ベクトル場を重ね合わせたベクトル場を投影することで、意図した群ロボット制御を実現している。よって、プレイヤーはバーチャル環境からロボットが受ける影響を考慮しながらコントローラを操作する必要がある。

## 4.5 実演展示

### 4.5.1 実演展示の概要

2016年12月にマカオにて開催された SIGGRAPH Asia 2016 の Emerging Technologies セッションにおいて、提案したアプリケーションの実演展示を行った。SIGGRAPH Asia は、ACM SIGGRAPH が主催する、2008 年以来毎年開催されている国際会議である。会議で扱われるメインピックはコンピュータグラフィックスとインタラクティブ技術であり、出席者の総数は 5,200 人であった。Emerging Technologies セッションにおける実演展示は 3 日間行われ、総展示時間は 18 時間 (毎日午前 10 時から午後 4 時) であった。展示では、図 4.38 (a) に示した、群ロボットが映像上のバーチャルなキャラクター (魚) を追いかけるアプリケーションと、図 4.38 (b) に示した群ロボットが

道路を周回するアプリケーションの2種類を切り替えながら、ユーザがシステムを体験する形とした。実演展示における体験者の様子を図4.41に示す。



図4.41: 実演展示における体験者の様子

また、展示と合わせて、以下の観点から体験者のふるまいの観察を行った。

- 投影映像に対するふるまい: 体験者が、人間には知覚できないように情報が埋め込まれた投影映像を見た際に、どのような行動や態度を示すかについて観察した。
- アプリケーションに対するふるまい: 体験者が、映像とロボットが協調して動作する2種類のアプリケーションに対して、どのような行動や態度を示すかについて観察した。

#### 4.5.2 実演展示における気付きと議論

3日間の実演展示において、Phygital Fieldシステムはトラブルなく順調に動作した。また、展示中に体験者から投影映像のちらつきなどの違和感についての報告を受けることはなかった。これは、PVLCによる情報の埋め込みが設計通りに機能していることを表している。

展示の体験者のほとんどは、ロボットが投影映像と違和感なく協調して動作していると認識していた。この結果は、投影映像とロボットをシームレスに接続して協調動作させるという、システムの目標が達成されていることを示している。さらに、一部の体験者は、群ロボットの動作が生き物のように感じられるという感想を述べていた。例をあげると、ある体験者は、図4.38(a)のアプリケーションについて、ロボットが児童向け絵本「スイミー」の魚のように感じられるとコメントした。(「スイミー」はレオ・レオニ作の絵本であり、作中に小さな魚が集まって大群で泳ぐことで、大きな魚のような形態をとるという場面が登場する。)

また、他に見られた特筆すべき行動として、一部の体験者が自分の手や体で投影光を遮ることで、投影映像内に影を作っている様子が観察された。この行動は特に小さな子どもがアプリケーションを体験した時に頻繁に観察された。Phygital Fieldシステムでは、投影光でロボットを制御しているため、映像を遮られた影の領域に存在するロボットはその位置で動作を停止する。つまり、この行動によって体験者はフィールド上のある領域に存在する群ロボットの動作を、自由かつ簡単に停止させることができる。また同時に、腕や手を上下に動かすことで影の大きさを変え、実際の体の大きさよりも大きな影を作ることによって、広範囲に存在するロボットの動作を停止させる様子が観察された。この行動は、直感的に位置および形状を変化させることが可能なインタフェー



スとして影を使用しすることで、ユーザが直感的に群ロボットの操作と制御を行うことができる可能性を示唆している。

展示中、数人の体験者から、図 4.38 (b) のロボットが道を周回するアプリケーションについて、「ロボットは映像上の道路をカメラで認識して走行しているのか？」と質問を受けることがあった。Phygital Field システムでは、ロボットは投影映像に埋め込まれた情報によって制御されるので、この認識は不正確である。この誤った認識は、投影映像と埋め込まれた情報に位置ずれが存在しないため、ロボットが道路の領域自体を認識しながら走行していると体験者が受け取ったことを示唆していると考えられる。

## 4.6 本章のまとめ

本章では、可視光通信プロジェクトを用いた投影光への情報埋め込みによって、投影映像上における群ロボットの自己位置推定と制御を実現するシステム Phygital Field を提案した。特に、グレイコードを用いた位置座標情報の埋め込みによる安定したロボットの自己位置推定と、速度ベクトル情報の埋め込みによる場の概念を用いたロボットの移動制御について検討を行った。また、システムを実現するために可視光通信プロジェクト、アプリケーション開発のためのソフトウェアフレームワーク、新規の受光器回路について新規で実装し、この受光器回路の搭載に適した小型ロボットの設計と実装についても取り組んだ。

提案手法の各種性能について評価を行うために、受光器の特性評価実験とロボットの自己位置推定と制御の評価実験を行った。

受光器の特性評価実験では、3つの実験を行った。受光器の時間分解能を評価する実験では、従来の PVLC システムで使用されていた受光器と比較し、高速な明滅光による通信に対応可能であることが示された。輝度特性を評価する実験では、投影環境において必要な画素の光量について明らかにし、結果、投影環境における受光器回路の設定は適切であったことが示された。空間解像度の特性評価では、画素サイズがセンサ受光面より広い場合、空間解像度は画素サイズの増大に比例して低下することを明らかにした。

ロボットの自己位置推定と制御の評価実験についても、3つの実験を行った。ロボット静止状態における自己位置推定の精度を評価する実験では、提案手法が静止状態における自己位置推定において有効な手法であることが示された。ロボット動作状態における自己位置推定の精度を評価する実験では、提案手法が動作状態においても、通常の走行用途には十分な精度で自己位置推定が可能であることが示された。ロボット動作制御の評価実験では、固定、もしくは時間的に変化する速度ベクトル場情報によって、ロボットを目標点に追従させることで群ロボットの移動制御が可能であることが示された。加えて、投影映像と群ロボットが協調した制御によって実現された新しいコンテンツを表現するアプリケーションのプロトタイプを提案し、それらの実演展示を通じてユーザ体験の観察を行った。

提案システムでは、可視光通信プロジェクトによる投影映像に埋め込まれた情報を用いてロボットの自己位置推定と制御を実現している。そのため、既存の映像とロボットの協調システムでは困難であった、初期化レスかつマーカレスなロボット制御が可能で、かつ送信/提示情報のカスタマイズが容易なシステムを構築することが可能となった。これにより、ユーザはシステムの存在

や制約を意識することなく、ロボットとインタラクションを行うことができ、現実空間とバーチャル空間をより密接に融合させたインタラクティブティの実現に寄与することが期待される。

## 参考文献

- [1] D. Rosenfeld, M. Zawadzki, J. Sudol, and K. Perlin, “Physical Objects as Bidirectional User Interface Elements,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol.24, no.1, pp.44–49, jan 2004.
- [2] J. Patten, “Thumbles - Robotic Tabletop User Interface Platform,” 2014. <http://www.pattenstudio.com/thumbles/>
- [3] M. Le Goc, L.H. Kim, A. Parsaei, J.-D. Fekete, P. Dragicevic, and S. Follmer, “Zoids: Building Blocks for Swarm User Interfaces,” *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '16*, pp.97–109, 2016.
- [4] J. Alonso-Mora, A. Breitenmoser, M. Rufi, R. Siegwart, and P. Beardsley, “Multi-Robot System for Artistic Pattern Formation,” *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.4512–4517, may 2011.
- [5] J. Alonso-Mora, A. Breitenmoser, P. Beardsley, and R. Siegwart, “Reciprocal Collision Avoidance for Multiple Car-like Robots,” *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.360–366, may 2012.
- [6] A. Sudsang, F. Rothganger, and J. Ponce, “Motion planning for disc-shaped robots pushing a polygonal object in the plane,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol.18, no.4, pp.550–562, aug 2002.
- [7] A. Becker, G. Habibi, J. Werfel, M. Rubenstein, and J. McLurkin, “Massive uniform manipulation: Controlling large populations of simple robots with a common input signal,” *Proceedings of 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.520–527, nov 2013.
- [8] O. Kilinc, G. Kucukyildiz, S. Karakaya, and H. Ocak, “Image processing based indoor localization system,” *Proceedings of 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference*, pp.1654–1657, apr 2014.
- [9] D. Navarro, G. Benet, and M. Martinez, “Line based robot localization using a rotary sonar,” *Proceedings of 2007 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (EFTA 2007)*, pp.896–899, sep 2007.
- [10] S. Yilmaz, H.E. Kayir, B. Kaleci, and O. Parlaktuna, “Mobile Robot Localization via Outlier Rejection in Sonar Range Sensor Data,” *Proceedings of 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, pp.II-434–II-438, 2011.
- [11] M.J. Segura, V.A. Mut, and H.D. Patino, “Mobile robot self-localization system using IR-UWB sensor in indoor environments,” *Proceedings of 2009 IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments*, pp.29–34, nov 2009.
- [12] M. Kojima, M. Sugimoto, A. Nakamura, M. Tomita, H. Nii, and M. Inami, “Augmented Coliseum: An Augmented Game Environment with Small Vehicles,” *Proceedings of the First IEEE Interna-*

- tional Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems, TABLETOP'06, pp.3–8, 2006.
- [13] M. Sugimoto, K. Kodama, A. Nakamura, M. Kojima, and M. Inami, “A Display-Based Tracking System: Display-Based Computing for Measurement Systems,” Proceedings of 17th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT 2007), pp.31–38, nov 2007.
- [14] 深澤尚史, 苗村 健, “可視光通信プロジェクタによる映像表現のための符号化方式の検討,” 日本バーチャルリアリティ学会第16回大会論文集, pp.21D-2:1–21D-2:4, 2011.
- [15] T. Wang and B. Erhman, “トランスインピーダンス・アンプの直感的な補償方法 (Rev. A 翻訳版),” dec 2009. <http://www.ti.com/jp/litv/pdf/jaja201>
- [16] 深澤尚史, 前川 聡, 苗村 健, “可視光通信プロジェクタの通信路における結像光学系の検討: 位置情報を埋め込んだ映像の空中像提示とプロジェクタ投影,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.111, no.479, pp.145–150, mar 2012.

## 第5章

---

# 可視光通信プロジェクトの 映像表現力向上と情報の動的更新を 実現する基盤技術開発

本章の内容は5年以内に出版される予定である。

## 第6章

---

# Naviga Torch: ハンドヘルドな 可視光通信プロジェクタを用いた ロボット操作インタフェース

## **第6章 NavigaTorch: ハンドヘルドな可視光通信プロジェクタを用いたロボット操作インタフェース71**

本章の内容は5年以内に出版される予定である。

## 第7章

---

## 結論



## 7.1 本研究の主たる成果

本論文では、空間分割型可視光通信 (PVLC) を用いた、投影される映像と連携する移動ロボットの投影型制御を提案した。このために、人間が直接ロボットに触れる操作を実現するためのロボット制御、PVLC の映像表現力と情報の空間解像度の向上、ロボットを照らす映像を動かすことによるロボット操作インタフェースの3項目の実現に取り組んだ。以下に本論文の主たる成果について述べる。

第2章では、関連研究として、映像と実物体の連携した拡張現実感システムと、光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御手法、また光の投影を用いた手法の1つであり、本研究の基盤技術となっている空間分割型可視光通信の3つについて、研究動向をまとめた。映像と実物体の連携した拡張現実感システムは、本論文で提案する、映像と連携する移動ロボットの投影型制御の主要な応用領域であり、研究動向の紹介を通じてその特徴と有用性を紹介した。光の投影を用いたデバイスの位置推定と制御手法は、映像と連携した移動ロボットの投影型制御に直接関連する分野であり、研究動向の紹介によってその位置づけを行った。空間分割型可視光通信 (PVLC) とその実装としての可視光通信プロジェクタは、本論文で提案する、映像と連携する移動ロボットの投影型制御を実現する基盤技術であるため、その技術的背景について詳細な説明を行った。

第3章の内容は5年以内に出版予定である。

第4章では、可視光通信プロジェクタを用いた投影光への情報埋め込みによって、投影映像上における群ロボットの自己位置推定と制御を実現するシステム *Phygital Field* を提案した。特に、グレイコードを用いた位置座標情報の埋め込みによる安定したロボットの自己位置推定と、速度ベクトル情報の埋め込みによる場の概念を用いたロボットの移動制御について検討を行った。実験では、受光器の特性評価とロボットの自己位置推定と制御の評価を行った。受光器の特性評価では、受光器の時間分解能、輝度特性、空間解像度を評価した。

- 時間分解能については、従来の PVLC システムで使用されていた受光器と比較し、高速な明滅光による通信に対応可能であることを示した。
- 輝度特性については、投影環境において必要な画素の光量について明らかにし、結果、本投影環境における受光器回路の設定は適切であったことを示した。
- 空間解像度については、画素サイズがセンサ受光面より広い場合、空間解像度は画素サイズの増大に比例して低下することを明らかにした。

ロボットの自己位置推定と制御の評価では、静止状態における自己位置推定の精度、動作状態における自己位置推定の精度、動作制御を評価した。

- 静止状態における自己位置推定の精度評価では、提案手法が静止状態における自己位置推定において有効であることを示した。
- 動作状態における自己位置推定の精度評価では、提案手法が動作状態においても、通常の走行用途には十分な精度で自己位置推定が可能であることを示した。
- ロボット動作制御の評価実験では、固定、もしくは時間的に変化する速度ベクトル場情報によって、ロボットを目標点に追従させることで群ロボットの移動制御が可能であることを示した。

加えて、投影映像と群ロボットが協調した制御によって実現された新しいコンテンツを表現す

るアプリケーションのプロトタイプを提案し、それらの実演展示を通じてユーザ体験の観察を行った。提案システムでは、可視光通信プロジェクトによる投影映像に埋め込まれた情報を用いてロボットの自己位置推定と制御を実現している。そのため、既存の映像とロボットの協調システムでは困難であった、初期化レスかつマーカレスなロボット制御が可能で、かつ送信/提示情報のカスタマイズが容易なシステムを構築することが可能となった。これにより、ユーザはシステムの存在や制約を意識することなく、ロボットとインタラクションを行うことができ、現実空間とバーチャル空間をより密接に融合させたインタラクティブティの実現に寄与することが期待される。

第5章の内容は5年以内に出版予定である。

第6章の内容は5年以内に出版予定である。

## 7.2 今後の課題と展望

本節の内容は5年以内に出版予定である。

# 謝辞

---

苗村 健 教授には、本研究を進めるにあたり、指導教員として、修士・博士課程の5年間にわたって研究・生活の両面で懇切丁寧な御指導を頂きました。深く感謝し、厚く御礼申し上げます。修士課程においては、研究の方針がなかなか定まらなかった私を導いてくださった一方で、博士課程においてはほぼ自由に研究活動をさせて頂けたことは、研究者としての成長と自立につながりました。折に触れて先生から頂いた“Festina Lente”の言葉を胸に、これからも研究者として邁進していきたいと思っております。

川原 圭博 准教授には、博士課程の3年間にわたって、JST ERATO 川原万有情報網プロジェクトの一員として加えて頂き、さらに学位論文の審査において主査をお引き受け頂きました。本論文をまとめることができたのは、要所要所で頂いた先生の御指導・御助言と、川原万有情報網プロジェクトからの金銭面での御支援があつてのことだと思っております。深く感謝し、厚く御礼申し上げます。

矢谷 浩司 准教授には、Advanced Topics in Human-Computer Interaction の講義において、プロジェクトの立ち上げから国際会議への論文投稿まで御助言と御指導を頂き、さらに学位論文の審査において副査をお引き受け頂きました。また国際会議において、私の研究分野に関連する海外の研究者の方を多数御紹介下さり、研究者としてのネットワーク構築に多大な御支援を頂きました。厚く御礼申し上げます。

稲見 昌彦 教授、小川 剛史 准教授、入江 英嗣 准教授には、学位論文の審査において副査をお引き受け頂き、本論文をまとめる上で貴重な御助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

福嶋 政期 助教には、修士・博士課程の5年間にわたって、研究の方針や実装、評価、論文の添削、発表の仕方に至るまで懇切丁寧な御指導を頂きました。また、研究を紹介する動画の作成や学会出張、デモ展示などの様々な場面で御助力を頂きました。深く感謝し、厚く御礼申し上げます。

川上 玲 特任講師には、その卓越した論理構成力と英語力で論文内容や英語表現について手厚い御指導を頂き、小泉 直也 助教(現：電気通信大学)、Hautasaari Ari 助教、阪口 紗季 特任研究員には研究や論文の内容について貴重な御助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。

寛 康明 准教授、梅舘 拓也 特任講師、山岡 潤一 特任助教、鳴海 紘也 氏(大学院情報理工学系研究科 博士2年)をはじめとする、JST ERATO 川原万有情報網プロジェクトのメンバーの方々には、ミーティングなどを通じて研究や論文の内容について貴重な御助言を頂きました。深く感謝致します。

また、研究に共同で取り組んだ周 磊杰 氏、小泉 実加 氏、荒見 篤郎 氏、阿部 知史 氏、松本 晟 氏、亀井 郁夫 氏をはじめとする、情報投影グループ、および苗村研究室のメンバーおよびOB/OGの方々には、研究室での生活から開発のノウハウ、論文の書き方まで、様々な場面で多大なる

御支援・御指導を頂きました。SIGAR 研究グループでのミーティングや、情報投影グループでの活発な議論は非常に楽しく刺激的で、本当に良い仲間恵まれたことを深く感謝致します。

吉橋 亮太 氏には、修士・博士課程の5年間、高橋 一成 氏、山本 紘暉 氏、長徳 将希 氏、吉田 夏子 氏には、修士課程の2年間、中村 鮎葉 氏には修士課程の1年間にわたって、苗村研究室で共に研究を行う過程で様々な御支援を頂きました。全員が電気系の同期であったせいか、日々場所を問わず忌憚のない意見を述べ合うことができ、その時間は本当に有意義で楽しいものでした。深く感謝致します。

苗村研究室の土田 有里 氏、JST ERATO 川原万有情報網プロジェクトの對尾 健二 氏、金井 英之 氏、水野 典子 氏には、快適で充実した研究した研究環境の整備にご尽力頂きました、厚く御礼申し上げます。

また、本研究を進めるにあたっては、独立行政法人 日本学術振興会から御支援を頂きました。心より感謝いたします。

最後になりましたが、私をここまで育て、好きなことに好きなように取り組む様子を暖かく見守ってくれた家族に、この場を借りて深く感謝致します。

2018年12月7日

平木 剛史

# 発表文献

---

## 本博士論文に関連する発表文献

### 論文誌等

- [1] Takefumi Hiraki, Shogo Fukushima, Yoshihiro Kawahara, and Takeshi Naemura: “Phygital Field: An Integrated Field with Physical Robots and Digital Images using Projection-based Localization and Control Method,” *Journal of Control, Measurement, and System Integration*, vol. 11, no. 4, pp. 302 – 311 (2018.7).
- [2] 平木 剛史, 小泉 実加, 周 磊杰, 福嶋 政期, 苗村 健: “可視光通信プロジェクタの表現力向上に向けたデータ転送と光源制御の研究,” *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol. 21, no. 1, pp. 197 – 206 (2016.3).

### 査読付き国際会議

- [3] Takefumi Hiraki, Shogo Fukushima, Hiroshi Watase, and Takeshi Naemura: “Pixel-level Visible Light Communication Projector with Interactive Update of Images and Data,” *Proceedings of International Display Workshops (IDW 2018)*, pp. PRJ6-2:1 – PRJ6-2:4 (2018.12).
- [4] Takefumi Hiraki, Yoshihiro Kawahara, and Takeshi Naemura: “Projection-based Localization and Control Method of Robot Swarms for Swarm User Interfaces,” *Adjunct Proceedings of the 2018 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp 2018)*, pp. 584 – 589 (2018.10).
- [5] Takefumi Hiraki, Shogo Fukushima, and Takeshi Naemura: “Projection-based Localization and Navigation Method for Multiple Mobile Robots with Pixel-level Visible Light Communication,” *Proceedings of the 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2016)*, pp. 862 – 868 (2016.12).
- [6] Takefumi Hiraki, Shogo Fukushima, and Takeshi Naemura: “Phygital Field: an Integrated Field with a Swarm of Physical Robots and Digital Images,” *ACM SIGGRAPH Asia 2016 Emerging Technologies, Talk on (SA 2016)*, pp. 2:1 – 2:2 (2016.12).

- [7] Takefumi Hiraki, Shogo Fukushima, and Takeshi Naemura: “Sensible Shadow: Tactile Feedback from Your Own Shadow,” Proceedings of 7th Augmented Human International Conference (AH 2016), pp. 23:1 – 23:4 (2016.2).
- [8] Takefumi Hiraki, Issei Takahashi, Shotaro Goto, Shogo Fukushima, and Takeshi Naemura: “Phygital Field: Integrated Field with Visible Images and Robot Swarm Controlled by Invisible Images,” ACM SIGGRAPH2015 Posters on (SIGGRAPH 2015), p. 85:1 (2015.8).

## 国内研究会

- [9] 平木 剛史, 福嶋 政期, 渡瀬 宏, 苗村 健: “映像と情報の動的更新を実現する可視光通信プロジェクトの開発”, 第 23 回 日本バーチャルリアリティ学会大会, pp. 32B-2:1 – 32B-2:4 (2018.9).
- [10] 亀井 郁夫, 平木 剛史, 福嶋 政期, 苗村 健: “赤外領域まで拡張した可視光通信プロジェクトの開発”, 第 23 回 日本バーチャルリアリティ学会大会, pp. 32B-3:1 – 32B-3:4 (2018.9).
- [11] 荒見 篤郎, 平木 剛史, 福嶋 政期, 苗村 健: “可視光通信プロジェクトの高画質化・高効率化を実現する符号化方式”, 電子情報通信学会技術研究報告, MVE2017-62, vol. 117, no. 392, pp. 307 – 312 (2018.1).
- [12] 平木 剛史, 福嶋 政期, 川原 圭博, 苗村 健: “ハンドヘルドプロジェクトを用いた空間分割型可視光通信の提案”, 第 22 回 日本バーチャルリアリティ学会大会, pp. 1B3-02:1 – 1B3-02:4 (2017.9).
- [13] 荒見 篤郎, 高橋 一成, 平木 剛史, 福嶋 政期, 苗村 健: “空間分割型可視光通信におけるグレイ符号を拡張したマッピングによる MPPM 方式の提案”, 電子情報通信学会総合大会, p. A-9-19:1 (2016.3).
- [14] 高橋 一成, 平木 剛史, 福嶋 政期, 苗村 健: “可視光通信プロジェクト映像の色表現向上に向けた色空間選択手法”, 電子情報通信学会技術研究報告, MVE2015-44, vol. 115, no. 415, pp. 149 – 154 (2016.1).
- [15] 小泉 実加, 平木 剛史, 福嶋 政期, 苗村 健: “可視光通信プロジェクトにおける複数光源の点滅制御”, 電子情報通信学会技術研究報告, MVE2015-11, vol. 115, no. 125, pp. 23 – 28 (2015.7).
- [16] 平木 剛史, 高橋 一成, 福嶋 政期, 苗村 健: “可視光通信プロジェクトを用いた映像上における群ロボット制御の基礎検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, MVE2015-3, vol. 115, no. 76, pp. 31 – 36 (2015.6).

## 受賞等

- [17] MVE 賞, 荒見 篤郎, 平木 剛史, 福嶋 政期, 苗村 健: “可視光通信プロジェクトの高画質化・高効率化を実現する符号化方式”, 電子情報通信学会 メディアエクスペリエンス・バーチャル環境基礎専門研究委員会 (2018.1).

- [18] 経済産業省 Innovative Technologies 2016, 東京大学 苗村研究室: “フィジカルフィールド”, (2016.10).
- [19] MVE 賞, 平木 剛史, 高橋 一成, 福嶋 政期, 苗村 健: “可視光通信プロジェクタを用いた映像上における群ロボット制御の基礎検討”, 電子情報通信学会 メディアエクスペリエンス・バーチャル環境基礎専門研究委員会 (2015.6).

## 本博士論文に関連しない発表文献

### 査読付き国際会議

- [20] Takefumi Hiraki, Masaaki Fukumoto, and Yoshihiro Kawahara: “Touchable Wall: Easy-to-Install Touch-Operated Large-Screen Projection System,” Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces (ISS 2018), pp. 465 – 468 (2018.11).
- [21] Satoshi Abe, Takefumi Hiraki, Shogo Fukushima, and Takeshi Naemura: “Screen–Camera Communication via Matrix Barcode Utilizing Imperceptible Color Vibration,” Adjunct Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology (UIST 2018), pp. 166 – 168 (2018.10).
- [22] Satoshi Abe, Atsuro Arami, Takefumi Hiraki, Shogo Fukushima, and Takeshi Naemura: “Imperceptible Color Vibration for Embedding Pixel-by-Pixel Data into LCD Images,” Proceedings of the 2017 ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA 2017), pp. 1464 – 1470 (2017.5).
- [23] Takefumi Hiraki \*, Koya Narumi \*, Koji Yatani, and Yoshihiro Kawahara: “Phones on Wheels: Exploring Interaction for Smartphones with Kinetic Capabilities,” In Adjunct Proceedings of the 29th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology (UIST 2016), pp. 121 – 122 (2016.10). (\* Joint First Authors)
- [24] Takefumi Hiraki, Yasuaki Kakehi, and Yoshihiro Kawahara: “Basic Estimation of Internal Power Harvesting in the Mouth Cavity,” In Adjunct Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp 2016), pp. 954 – 957 (2016.9).

### 国内研究会

- [25] 阿部 知史, 平木 剛史, 福嶋 政期, 苗村 健: “不可視の色振動を用いた2次元パターンによるディスプレイ-カメラ間通信”, 映像メディア処理シンポジウム (IMPS 2018), 2 pages (2018.11).
- [26] 松本 晟, 阿部 知史, 平木 剛史, 福嶋 政期, 苗村 健: “不可視の色振動を用いた AR マーカによるカメラ位置推定の基礎検討”, 第 23 回 日本バーチャルリアリティ学会大会, pp. 11D-1:1 – 11D-1:4 (2018.9).

- [27] 松本 晟, 阿部 知史, 荒見 篤郎, 平木 剛史, 苗村 健: “不可視の色振動を用いた M 系列による映像上の位置情報伝送の基礎検討”, 電子情報通信学会総合大会, p. H-3-5:1 (2018.3).
- [28] 阿部 知史, 荒見 篤郎, 平木 剛史, 福嶋 政期, 苗村 健: “不可視の色振動を用いた 2 次元パターンによるディスプレイ-カメラ間通信の基礎検討”, 第 22 回 日本バーチャルリアリティ学会大会, pp. 2B2-02:1 – 2B2-02:4 (2017.9).
- [29] 阿部 知史, 荒見 篤郎, 平木 剛史, 福嶋 政期, 苗村 健: “LCD カラー映像に情報を重畳するための不可視な色変調方式の基礎検討”, 第 21 回 日本バーチャルリアリティ学会大会, pp. 21C-02:1 – 21C-02:4 (2016.9).