

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

平木 剛史[†] 高橋 一成^{††} 福嶋 政期^{††} 苗村 健[†]

[†] 東京大学大学院 学際情報学府 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

^{††} 東京大学大学院 情報理工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

E-mail: [†]{hiraki,naemura}@nae-lab.org, ^{††}{issei,shogo}@nae-lab.org

あらまし 映像に連動させてロボットの群れを制御することでタンジブルメディアとするテーブルトップシステムにおいて、映像との時間・空間的整合を保ちながら制御信号をロボット群に伝送することは重要である。本稿では、可視光通信プロジェクトを用いて、投影映像にピクセル単位で不可視ビット情報を埋め込み、テーブルトップディスプレイ上のロボット群がその情報を受信、解析することで、群ロボット制御を実現するシステムを提案し、その実現のための技術的検討を行う。

キーワード 可視光通信, テーブルトップディスプレイ, インタラクティブサーフェス, フィジカルコンピューティング, タンジブルインターフェース, 群ロボット制御

Controlling Swarms of Robots using a PVLC Projector.

Takefumi HIRAKI[†], Issei TAKAHASHI^{††}, Shogo FUKUSHIMA^{††}, and Takeshi NAEMURA[†]

[†] Graduate school of Interdisciplinary Information Studies, The Univ. of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

^{††} Graduate school of Information Science and Technology, The Univ. of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

E-mail: [†]{hiraki,naemura}@nae-lab.org, ^{††}{issei,shogo}@nae-lab.org

Abstract These days, many systems that control a swarm of robots in synchronization with videos have been proposed as interactive tabletop displays. It is important for these systems to communicate control signals while keeping the time and spatial alignment. In this paper, we propose the system for controlling a swarm of robots by using a PVLC(Pixel-level Visible Light Communication) projector, and make an basic evaluation of our system.

Key words Visible Light Communication, Tabletop Displays, Interactive Surfaces, Physical Computing, Tangible User Interface, Swarm Robotics

1. はじめに

長らくの間、ディスプレイは平面的な形状のものであったが、近年、実物体デバイスとディスプレイを組み合わせることで、より現実感のあるインタフェースを構成する手法が提案されている [1]。中でも、ディスプレイ上の実物体を自由に制御できるアクティブなテーブルトップシステムは、より豊かなコンテンツ体験を与えるものとして広く研究されている。

このようなシステムにおいては、

- 実物体デバイスとディスプレイ上の情報が位置ずれなく存在する
- 情報が移動した際、実物体デバイスもずれなく情報に追

従可能

というふたつの要件を、人間が周囲に存在する環境下でありながら、できるだけ意識させないように行うことが、人間に与えるリアリティの観点から重要である。

そのための課題は、実物体デバイスの移動制御や、デバイス-情報間の位置整合性向上である。それらの課題を解決すべく様々な手法が提案されてきたが、大きな外部装置やデバイス認識用のマーカ画像表示が必要であったり、実物体デバイスの追加時に観測と初期化処理を要したりなど、実物体デバイス-情報ディスプレイ間に介在するシステムの存在を人間が意識せざるを得ず、結果、リアリティを損ねてしまっていた。

一方、筆者らは、画素の高速明滅によって投影映像に不可視情

報を埋め込む空間分割可視光通信 (PVLC: Pixel-level Visible Light Communication) の研究を行ってきた。本研究では、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、同位置に提示し、その不可視情報でロボット制御を行うことで、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。このシステムの目標は、初期化レスかつマーカレスで動作し、外部装置に依存せず、原理的に位置ずれや追従の問題が発生しないテーブルトップインタフェースの実現である。

本稿ではその実現に向けて、可視光通信プロジェクトによって送信された情報をもとに、ロボットを制御するシステムを提案、実装し、その基礎的な性能評価を行った。

2. 関連研究

2.1 実物体制御を伴うテーブルトップシステム

仮想空間内の位置に対応させて実物体を配置、制御することで重層的に情報を表示するテーブルトップシステムは広く研究されている。中でも Actuated Workbench [2] や Madgets [3] は、ディスプレイ下に置かれた電磁石アレイにより磁力を制御し、これによってテーブル上の磁性体デバイスの位置・姿勢制御を行うことで、実物体の動的状態を表現している。これらのシステムではデバイス側の制約は磁性体であるということのみであるが、ディスプレイ側は電磁石アレイが組み込まれた大型の装置が必要で、同時に外部カメラなどによるデバイス認識を行う必要もある。

一方で、Planar Manipulator Display [4] や Augmented Coliseum [5] においては、テーブル上のデバイスとしてロボットが用いられており、前者については IrDA と赤外線照射によって、後者に関しては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実現している。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デバイスは複雑化するが、テーブルディスプレイ側は外部カメラなどを必要としない簡便な構造となり、特に Augmented Coliseum に関しては、一般的なディスプレイやプロジェクトによる投影面上で動作が可能である。これは稲見らが提唱する、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) の概念に立脚したものである [6]。

2.2 パターン投影と位置制御

映像パターンを解析し、物体の位置制御を行う研究は盛んに行われている。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。これは、底面に表示されているライン情報を読み取り、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。しかし、ラインレースロボットは自己位置を推定する手段を持たないので、ライン上しか走行できないという画一的、物理的な制約が存在する。

これらの問題を解決するため、DBC の枠組みの下で、杉本らは投影したマーカ画像を用いた自己位置推定に関して提案

し [7]、安らは自己位置推定に基づくロボットの位置・姿勢制御に向けて、マーカ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 [8]。

これらの手法においては、各時刻におけるロボットの位置・姿勢制御がマーカ表示により簡易に行える反面、マーカ部にコンテンツ映像を表示することは原理上不可能である。また、大域的なマーカ画像を用いる場合はそもそもコンテンツ映像の表示が不可能であり、用いない場合には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という問題が存在する。

また、Lee らはグレイコードパターンの投影とそのフォトセンサによる受信によってプロジェクトと投影面の自動位置合わせ手法を提案し [9]、Xiao らは M 系列信号のパターンを映像として投影することで頑健な空間位置・姿勢の推定手法を提案している [10] が、これらについてもパターンとコンテンツ映像を同時的な表示は実現されていない。

2.3 可視光通信プロジェクト

一方、北村らにより提案された、空間分割可視光通信 (PVLC) では、DMD を用いた DLP[®] プロジェクトを可視光通信プロジェクトとして用い、映像の画素を人間に知覚不可能な速度で高速点滅させることで、映像中にバイナリデータを埋め込むことが可能である [11]。これにより、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 種類を提示することができる。

また、可視光通信プロジェクトによる投影情報を運動する物体が受信するシステムは、岸らによって提案されている [12]。ただこのシステムは、駆動部を持っていないボール型発光デバイス群によって構成されているため、駆動部を持つロボットの制御に可視光通信プロジェクトを用いた研究は今まで行われて来なかったと言える。

また、これらの研究で用いられている可視光通信プロジェクトの光源は単色であったため、プロジェクトの投影映像はグレースケールでしか表示できないという、表現上の課題が存在した。カラー映像表現については深澤らが透明液晶を用いてカラー部を表現し、バックライトとして可視光通信プロジェクトを用いることで実現する手法を提案している [13]、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。

3. 提案システム

3.1 概要

本システムは、可視光通信プロジェクトによってテーブル上のスクリーンに投影された映像上で群ロボットを制御することができるテーブルトップ型のディスプレイシステムである。

本システムでは、可視光通信プロジェクトによって映像中にバイナリデータを埋め込み、それをロボットが受信、解析することで自己位置推定を行う。これにより、テーブル上での初期

化レスかつマーカレスなロボット制御が実現可能となっている。テーブル側には可視光通信プロジェクタ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。また、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。

3.2 実装

本システムの実現に向け、可視光通信プロジェクタ側のハードウェア、ソフトウェアと、群ロボット側のハードウェア、ソフトウェアに関して、必要に応じ選定、設計を行った上でその実装を行った。システムの概略を図1に、実際の様子を図2に示す。

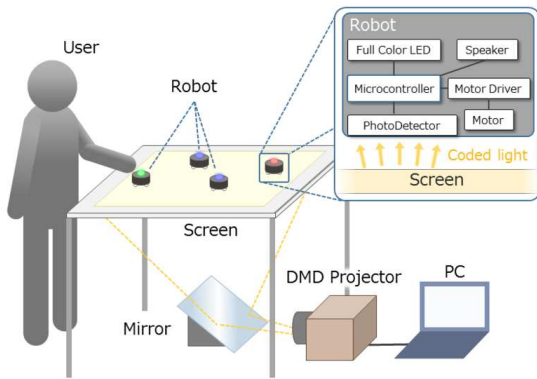


図1 システムの概略図

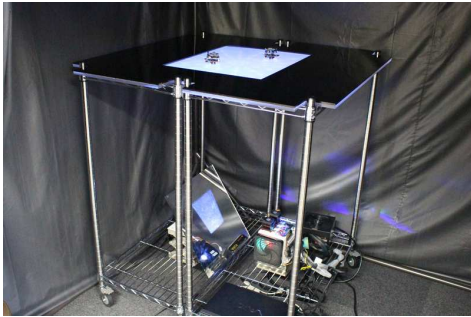


図2 システムの様子

3.2.1 可視光通信プロジェクタ

a) ハードウェア

先述のように、従来のPVLCシステムは単色光を用いた可視光通信プロジェクタによって実現されてきたが、グレースケール映像しか表示できないという課題があった。本システムではDMD制御と同期して、R, G, B3色の光源制御が可能なDLP®プロジェクタであるViALUX社V7000を可視光通信プロジェクタとして使用することで、カラー映像を表示できるPVLCシステムを構築した。

b) ソフトウェア

本システムで埋め込む不可視情報は、次の図3のような模式図で表すことができる。ここで、 N_S は同期フレーム数、 N_D はデータフレーム数、 N_L は輝度調整フレーム数であり、その合計が送信単位あたりのフレーム数となる。

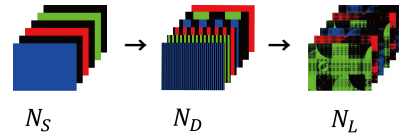


図3 埋め込み情報フレームの模式図

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、同期フレーム数を12、データフレーム数を32、輝度調整フレーム数を106とし、計150フレームが送信単位となるよう設定した。また、映像のちらつきと、ロボットの制御周期を10ms程度に設定することを考慮し、可視光通信プロジェクタの明滅周波数は12500Hzに設定した。

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[14]。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情報に関しては、データフレームに対してグレイコードによる符号化を行った上で送信するよう設計した。

3.2.2 群ロボット

a) ハードウェア

本システムのロボットに要求される仕様は、可視光通信プロジェクタによる投影光を受信できること、信号を解析した上で自己位置を計算できることの2点である。この実現のため、以下のようなハードウェア構成で実装を行った。

- 受光器回路 (PVLC 信号受信用)
- マイクロコントローラ (Atmel 社 ATmega328P)
- 受光器調整回路 (コンパレータ回路)
- モータドライバ回路 (Rohm 社 BD6211 使用)
- マイクロモータ
- 情報提示素子 (フルカラーLED, スピーカ, アンプ回路)
- LiPo バッテリー (3.7V, 800mAh)

また、拡張性を考慮し、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、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、情報提示素子群からなる拡張ボードの3ボードによる構成を採用した。これにより、情報提示素子の置換が容易に可能な設計を実現している。図4にロボットの様子を示す。

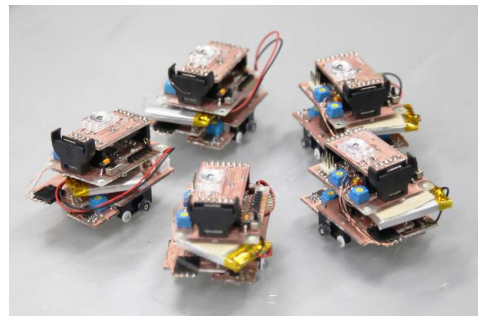


図4 ロボットの様子

従来の PVLC システムにおいては、フォトトランジスタを図 5 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} をマイコンの A/D 変換機能によって計測することで通信を行っていた。

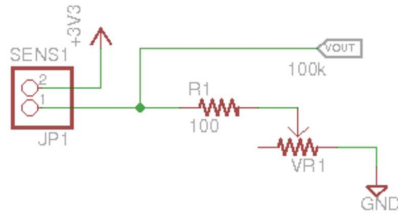


図 5 従来の受光器回路図

一方, 一般に小規模ロボットでは, $V_{cc}=3.3V$ or $5V$, 定常消費電流が $10mA$ オーダーといったように, 比較的低電圧・低消費電力での運用が要求される。よって, 計測のための R_L の抵抗値を少なくとも $10k\Omega$ オーダー以上のもを選択しなければならない。この影響により, 回路の立ち上がり, 立ち下がり時間が増大し, 設定した点滅周波数である $12500Hz$ におけるセンシングが困難になるという問題が発生した。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。また, 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) を設計, 実装することで, 安定した信号受信が可能な受光器回路を実現した。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 (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, 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。回路図を図 6 に, 実装した回路基板の様子を図 7, 図 8 に示す。

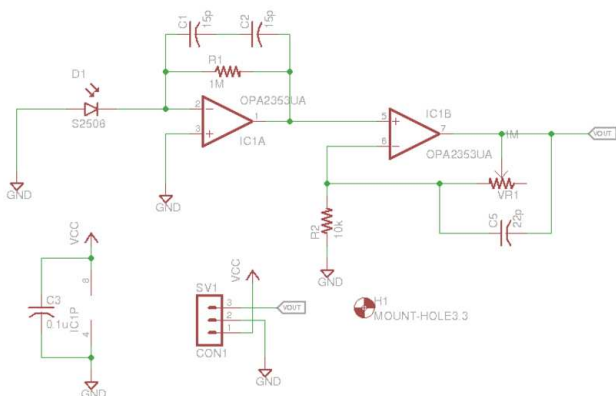


図 6 受光器の回路図

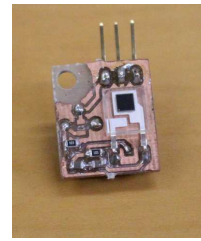
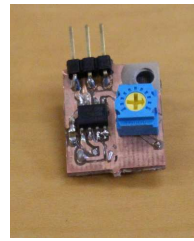


図 7 受光器回路の様子 (表面) 図 8 受光器回路の様子 (裏面)

b) ソフトウェア

ロボット側のソフトウェアは以下のような手順で自己位置情報を取得する処理を行うよう実装した。

- (1) 同期信号の検出
- (2) データ信号をパースしデータ群を取得
- (3) グレイコード符号化情報をデコード
- (4) メディアンフィルタによるノイズキャンセル処理
- (5) 座標情報を取得, 逆三角関数により角度情報を計算

また, 実装は C 言語により行った。

4. システム評価

本システムを用いて測定を行い, 時間分解能, 輝度特性, 空間分解能についてそれぞれ基礎的な評価を行った。

測定は $520mm \times 400mm$ のテーブルトップスクリーンを投影面として用い, 組立式暗室 (アズワン社 ADR-F2) 内で行った。プロジェクタの解像度は XGA ($1024pixel \times 768pixel$) 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 $0.521mm \times 0.507mm$ と計算できる。以後, 現実空間の座標系 (mm) と映像の座標系 (pixel) の変換にはこの値を用いることとする。

受光器は Edmund Optics 社のラック&ピニオンレールに作製したマウンタを介して取り付け, 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 $66.5k\Omega$ に設定した。測定系の様子を図 9 に示す。また, 便宜上, 図 9 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た。

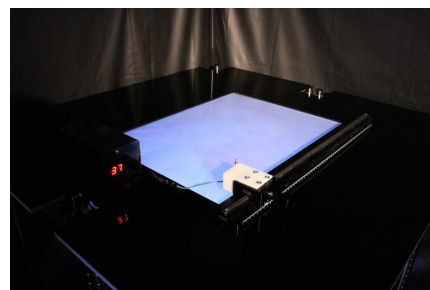


図 9 測定系の様子

4.1 時間分解能の評価

設定した可視光通信プロジェクタの明滅周波数に, 受光器が対応できているかについて明らかにするため実験を行った。映像に埋め込まれた $12500Hz$ の周期パルス信号情報を, フォトトラ

ンジスタ (TPS615) を使い、図 5 の通りに構成された従来の受光器と、今回設計、製作した受光器の 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 (Tektronix 社 TDS2024C) で測定した。なお、従来の受光器の感度調整用半固定抵抗 (VR₁) は 51.2kΩ に調整した。測定結果のグラフは次の図 10 の通りである。

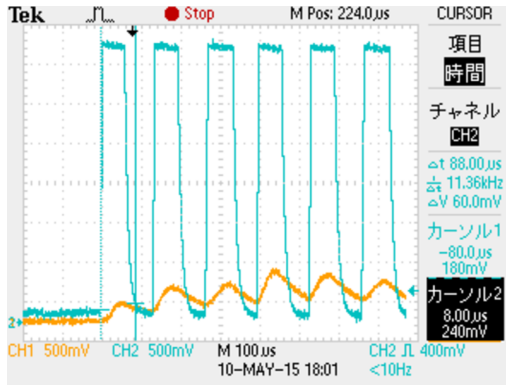


図 10 時間分解能の測定結果

CH1 が従来の受光器からの入力、CH2 が今回作製した受光器からの入力である。視認性のため、グラフの電圧方向には -1.75V のオフセットをのせている。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。解析の結果、CH1 のレンジは 720mV であり、CH2 のレンジは 3.58V であった。また、立ち下がり時間の影響で周期 Δt が 88 μ s と、理論値 (80 μ s) よりも 8 μ s 大きいが、見ての通り信号受信に大きな影響はなく、作製した受光器は 12500Hz での通信に十分な時間分解能を有していることが確認された。

4.2 輝度特性の評価

本システムについて、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った。作製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実験を行った。

また、直線の長さ (Y 軸方向) は 768px (400mm) とし、幅 (X 軸方向) は 1pixel から 10pixel の範囲で 1pixel ずつ変化させた。ルール上で受光器を X 軸方向に 1mm 刻みで動かしながら、各座標において 600 点をサンプリングし、その平均値をその座標における測定値として採用した。測定結果のグラフは次の図 11 の通りである。グラフの X 軸はそのままシステムの X 軸であるが、プロジェクタ側で投影する直線の中心線と X 軸との交点に (投影にずれがなければ) 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 8px 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

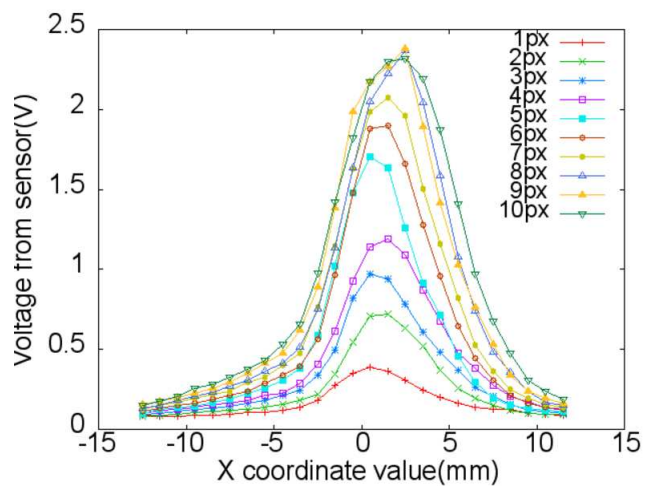


図 11 輝度特性の測定結果

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。

電圧の最大値がレンジ幅である 3.54V でなく、2.35V 付近で収束しているのは、使用しているプロジェクタ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 6pixel 以上の場合においては、測定の最大値はレンジ幅である 3.54V を示しており、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 5pixel 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、本システムで通信に必要な埋め込み情報の最小画素サイズは 6pixel であり、高い空間分解能を必要としない用途であれば、8pixel 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。

4.3 空間分解能の評価

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主張が深澤らによって行われている [13]。図 11 の結果について、埋め込める情報の空間分解能の目安となる、各線幅における測定値の半値幅 (HWHM) を計算によって求めた結果のグラフが次の図 12 である。視認性のため、線幅に関しては理想的な値である 1pixel=0.521mm の値を用いて mm に変換した上でグラフ化した。線幅に対応する半値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る場合、送信情報の位置精度は画素サイズの増大によって悪化し、

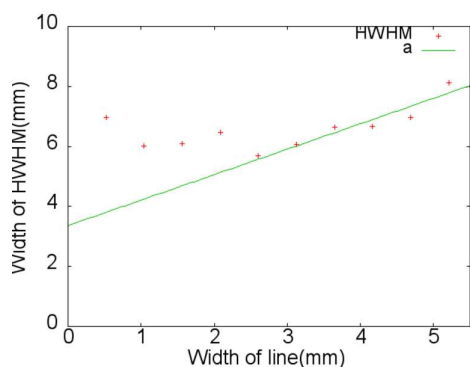


図 12 空間分解能の測定結果

この結果は深澤らの主張に一致していると考えられる。

5. まとめと今後の展望

5.1 まとめ

本稿では、可視光通信プロジェクタを用いた投影映像上における群ロボット制御システムを提案した。また、その基礎となるロボット上での空間分割可視光通信について、時間分解能、輝度特性、空間分解能の基礎的な評価を行った。

提案システムでは、群ロボットの自己位置推定に空間分割型可視光通信によって送信される座標情報を用いた。これにより、既存のロボットを用いたテーブルトップディスプレイ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、かつテーブル側の環境依存性が低く、さらに送信/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に成功した。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ると考えられる。提案システムの確立は、現実空間と仮想空間をより密接に融合させるといった目標の実現に大きく寄与していくと考えている。

5.2 今後の展望

現在はプロジェクタのメモリ制約のため、数十枚の静止画によって構成される簡単なアニメーション表現のみしか提示することができないが、Zhou らの開発した RPVLC (Reconfigurable Pixel-level Visible Light Communication) プロジェクタとフレームワーク [15] を本システムに適用すれば、リアルタイムな動画上での群ロボット制御を行うことができる。また、現在はプロジェクタ側のプログラムは各ロボットの自己位置を把握できないため、各ロボットの位置に応じて映像表現を変化、拡張させる表現は不可能である。そこで、各ロボットの自己位置を無線通信によってプロジェクタ側システムにフィードバックする機能を、周辺回路やソフトウェアの設計、実装することで、これらの表現の実現を目指す。これらの開発が完了すれば、より豊かなヒューマン-ロボットインタラクションが設計できると考えている。

またアプリケーションに関しては、教育やエンターテインメント用途に向けたサンプルを製作しているが、まだ十分な検討がなされていない状況である。プラットフォームの特徴を生かしたアプリケーションについても研究を進めていきたいと考えて

いる。

謝辞 本研究の一部は JST CREST 「共生社会に向けた人間調和型情報技術の構築」領域「局所性・指向性制御に基づく多人数調和型情報提示技術の構築と実践」による助成を受けた。

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, 1997.
- [2] 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, p.181, 2002.
- [3] 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, p.293, 2010.
- [4] 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, 2004.
- [5] M. Kojima, M. Sugimoto, A. Nakamura, M. Tomita, M. Inami, and H. Nii, "Augmented Coliseum: An Augmented Game Environment with Small Vehicles," First IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (TABLETOP '06), pp.3-8, IEEE, 2006.
- [6] 稲見昌彦, 富田正浩, 杉本麻樹, 新居英明, 小島 稔, "Display-Based Computing の研究 第六報 : Display-based Computing によるロボットとのインタラクション," 情報処理学会研究報告. CVIM, vol.2006, no.115, pp.77-84, 2006.
- [7] 杉本麻樹, 小島 稔, 中村享大, 新居英明, 稲見昌彦, "画像提示装置で表示した指標画像を用いた位置・姿勢計測," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.10, no.4, pp.485-494, 2005.
- [8] 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, 2011.
- [9] J.C. Lee, P.H. Dietz, D. Maynes-Aminzade, R. Raskar, and S.E. Hudson, "Automatic projector calibration with embedded light sensors," Proceedings of the 17th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '04, p.123, 2004.
- [10] 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, 2013.
- [11] 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, 2007.
- [12] 岸 遼, 寛 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.
- [13] 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. MVE, vol.111, no.479, pp.145-150, 2012.
- [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, pp.21D-2, 2011.
- [15] 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, p.89790J, 2014.