

## 基礎論文

## 画像提示装置を用いたロボットの制御手法

安 謙太郎<sup>\*1</sup> 永谷 直久<sup>\*2</sup> 常盤 拓司<sup>\*1,\*3</sup>杉本 麻樹<sup>\*1</sup> 稲見 昌彦<sup>\*1,\*4</sup>

## A Control Method for Robots with Display-Based Computing

Kentaro Yasu<sup>\*1</sup>, Naohisa Nagaya<sup>\*2</sup>, Takuji Tokiwa<sup>\*1,\*3</sup>,  
Maki Sugimoto<sup>\*1</sup> and Masahiko Inami<sup>\*1,\*4</sup>

**Abstract** --- This paper proposes a method to control robots using an imaging display. In this method, a multi-robot controlling system can be constructed with a simple method. Graphic displays are no longer screens just for human, but are also for robots. It is able to consider display as a device that provide visual information to human and robots simultaneously. Additional to that, people who don't have any programming skills can manipulate robots by editing images using an animation software. We think this method enhances and enriches interaction around table-top displays. Tangible devices that can be manipulated by humans can also be controlled by this system.

**Keywords:** DBC, display, robot, control, method

## 1 はじめに

本研究では画像提示装置上に表示する画像を用いて、ロボットの動作制御を行う手法を提案する。提案手法では様々な画像提示装置を用いて複数のロボットを同時に制御する機構をシンプルに構成できる。

従来から、ロボットの位置・軌跡を制御するための方法として、無線通信やカメラ計測などによる手法が提案されている。これに対して本研究では一般的に人間への視覚情報提示装置として扱われてきたディスプレイを、ロボットをはじめとする機器を対象とした制御装置として扱い、指標画像を用いてロボットの位置・姿勢を制御する。

提案手法を用いることで、ロボットの動作を Adobe Flash をはじめとするアニメーション編集ソフトによって、プログラミングの技術を持たない人でも簡単に設計することができる。また、Surface[1] などのテーブルトップシステム上で人間が操作できるタンジブルなデバイスとして容易にロボットを制御することも可能となり、インタラクションを多様なものにできる。

本論文では特に、局所的な指標画像を用いた制御システムと大域的な指標画像を用いることで複数のロボットを同時に制御する手法に関して述べる。

## 2 関連研究

移動ロボットの制御ではロボットの状況に応じてアクチュエータを駆動することで、複雑な制御を行うことができる。そして、ロボット自身や周辺の状況把握のため、光学情報をコンピュータで解析する Computer Vision(CV) が一般的に用いられている。CV では入力装置であるカメラによって取得した画像情報を用いてロボットの活動領域における計測や制御を行う。しかし、画像取得のフレームレートがカメラの性能に左右されてしまい、複雑な情報を取得するために高い解像度の画像を処理する場合には制御装置に高い処理能力が必要とされる。

ロボットの行動指示に光や画像を用いる研究としては、フォトランジスタをロボットの底部に配置し、床面に描かれた線をよみとり行動を制御するライントレーサロボットが挙げられる。ライントレーサは軌跡に沿った制御を実現したロボットであるが、床に描かれた指標が時間的に変化しないため、時刻に併せてロボットの位置・姿勢制御を変更するなどの用途に使用することが出来ない。しかし、本手法では、ロボットの追従速度を考慮しながら指標を動かすことにより、各時刻におけるロボットの位置と姿勢を制御可能である。さらに、2次元平面上において、ロボットの動きを任意に指定できる。

また、原らはロボットの上部に受光素子アレイを設けることで、外部からレーザ光を照射するとそのスポットをロボットが追従するという、ロボット単体に対する動的な経路誘導方式を構築した[4]。これに対し、本手法は一

\*1 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

\*2 電気通信大学大学院電気通信学研究科

\*3 公立はこだて未来大学

\*4 科学技術振興機構 ERATO

一般的なディスプレイを光提示装置として用いることで複数のロボットの同時制御を可能とするものである。

複数ロボットの同時制御という観点から検討すると、画像提示装置は、時間的・空間的に光を変調する装置であり、ロボットの行動範囲に信号の場を提供するものと考えることができる。藤沢らは蟻をモデルにエタノールを滴下するロボットを複数台用いてロボットの行動範囲にフェロモン場を形成し、それによってロボット群に行動ルートの最適解を導かせる手法を提案している[5]。また、大山らはロボットの行動範囲を LED アレイで「囲い込み」することで光信号場を形成し、複数台のロボットを対象とした制御を実現した[6]。この光信号場の形成を本手法では一般的なディスプレイによって行う。そのため、光信号場の生成だけでなく人間に対する表現も同時に行うことができる。

Malte らはタッチディスプレイ上で認識されるマークを設けたタンジブルデバイスに対し、ディスプレイ下より磁力を変調し、デバイスの位置、姿勢制御を行うシステムを構築した[7]。それによってディスプレイとタンジブルデバイスを通したインタラクションに加え、デバイスが自ら動くという新しいインタラクションを提案した。このシステムではタンジブルデバイスに動力を持たせることなく制御できるため、ほぼメンテナンスを必要としない。しかし、電磁石アレイが組み込まれた特別なディスプレイと複数のカメラによるデバイス認識が必要となる。一方で、本手法ではディスプレイ上で動くデバイス側に動力や制御機構を持たせるため、電池の交換やメンテナンスを必要とするが、行動範囲となるディスプレイには一般的なものを使用することができる。また、位置認識のためのカメラは不要である。

### 3 画像提示装置を用いたロボット制御

著者らは、画像提示装置を主体とした概念として Display-Based Computing (DBC) [2] [3] を提案している。DBC では、画像提示装置を用いることで、実世界へ指標となる時空間的に変調された光学情報を提示し、効率的に通信、計測、制御を実現する。

画像提示装置は、年々、高精細化、低価格化が進み、液晶、プラズマ、EL、LED、レーザなどの素子を用いて壁掛け TV や、携帯プロジェクタなど薄型、軽量の装置が誕生している。これらの画像提示装置を時間的、空間的に光情報を変調できるデバイスとして使用し、画像提示装置から発せられる光信号に従ってロボットの制御を行う。これにより、ディスプレイに提示する映像を編集するだけで、ロボットを制御することができる。

加えて、ロボット自体の構成が単純になること、ロボットに対する情報の提示と人間に対する情報の提示を同時に行えること、複数のロボットを同時に制御できることなどが本提案手法の大きな特徴である。

簡便かつ柔軟なロボットの動作制御を実現するため、画像提示装置を用いて空間に提示する指標画像および計測手法の設計について述べ、またその手法を用いて制御可能なロボットを制作し性能の検証を行う。本章では提案する制御システムについて述べる。

#### 3.1 システム概要

本研究の制御システムはロボット、画像提示装置、画像描画のための制御用 PC の 3 つの要素で構成されている(図 1)。画像提示装置の画面上にはロボットを制御する信号として特定の画像を表示する。この姿勢・位置制御のための特別な画像のことを「指標画像」と呼称する。ロボットは画像提示装置からの映像情報をセンサから読み取ることができ、この指標画像を追従するように動く。このため、制御側は指標画像の位置および姿勢を設定するだけでロボットの位置および姿勢を制御することができる。以下の項目でロボットおよび指標画像について詳しく述べる。

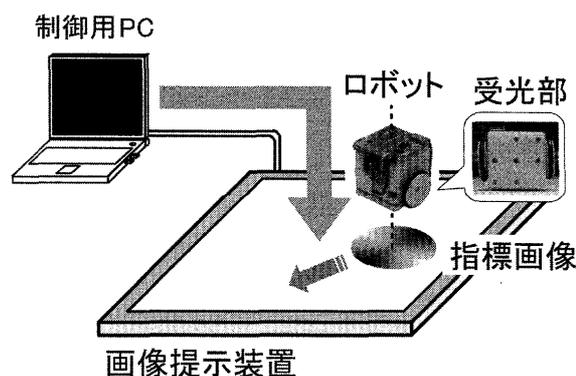


図1 システム概要

Fig.1 System Overview

#### 3.2 ロボット

ロボットは画像提示装置であるディスプレイ上を移動することを考慮し、大きさと重量ができるだけ小さく、軽くなる必要がある。そこで大きさが一辺を 40mm とする立方体内に収まるように設計した。その結果、バッテリーを含めても 86g という重量とすることができた(図 2, 表 1)。

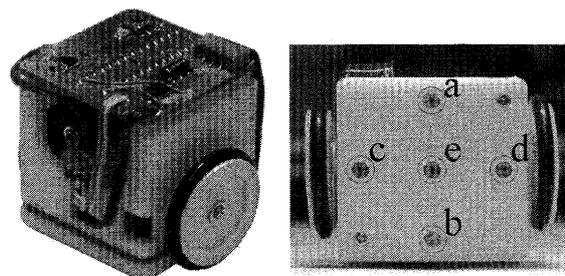


図2 ロボットの外観

Fig.2 Robot's Appearance

表1 ロボットの仕様

Table 1 Robot's Specification

寸法(長さ, 幅, 高さ)	40mm×40mm×40mm
重量(バッテリー含む)	86g
操舵方式	左右独立2輪駆動
最高走行速度	36.5mm/s
CPU	PIC16F872SS(16MHz)
センサ	フォトトランジスタ×5
モータドライバ	2ch/ドライバ ×2
電源	単5 アルカリ電池 1.5V×2

ロボットは左右独立2輪駆動方式で走行する。駆動モータには小型のDCギヤドモータを用いた。

ロボットには画像提示装置からの指標画像の位置および姿勢を把握するため5つのフォトトランジスタ(東芝製TPS615)をセンサとして搭載した。ロボットの最上部にはMicro Controller Unit(マイコン, 以下MCU)やモータドライバなどが実装されたメイン基板を配置した。フォトトランジスタが配置されたセンサ基板とメイン基板とをフラットケーブルで接続した。センサの出力はメイン基板のMCUへと送られる。MCUにはmicrochip technology社のPIC16F872SSを用い、16MHzで動作させた。また、モータドライバには三洋製のLB1836M(ドライバ2ch内蔵)を2個用いた。左右両輪を駆動するために1個のドライバを割り当て、一方のドライバは作業用のアームなどの機能を拡張するために利用することができる(図3)。

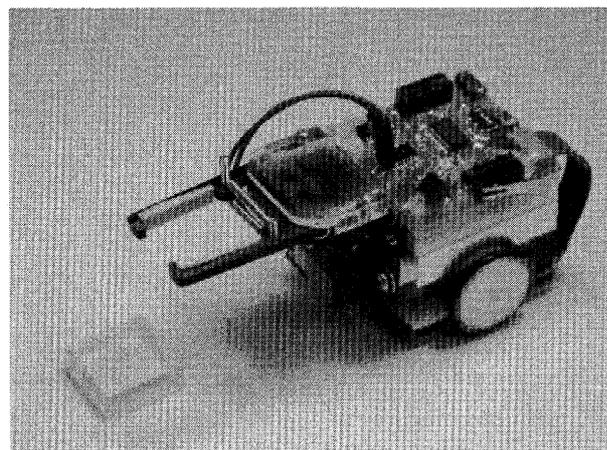


図3 作業用アームを取り付けたロボット

Fig.3 Robot with Arms

試作したロボットはテーブルトップディスプレイ上で動作することを想定しているため、底面に制御の為の情報計測するセンサを設けた。底面を一边が40mmの正方形として設計し、中央にセンサを一個配置した。残りの4つのセンサは中央のセンサを中心とした直径30mmの円上に90度間隔で配置した。ロボット底面に浅い角

度で入射する外乱光の影響を受けないよう、センサ基板には各センサと同じ位置に穴を開けた黒いアクリル板を貼り付け、センサの先端がアクリル板の表面から1mm程度内側になるように配置した(図4右)。ロボットの位置、姿勢制御には周囲4つのフォトトランジスタのみを用いるため、中心のフォトトランジスタは前述のアームの開閉など、追加機能の制御情報の受信に用いることができる。

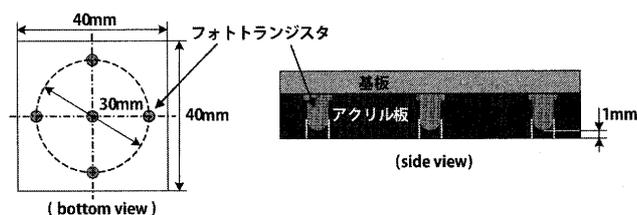


図4 センサの配置

Fig.4 Sensor Arrangement

次に、回路について説明する。ロボットの回路は電源回路、センサ回路、MCU、モータ駆動回路で構成されている(図5)。重量をできるだけ抑えるため、電源には単5電池1.5Vを2本直列にして使用した。これにより電源電圧として3Vを確保した。しかし、MCUなどの制御系の電源電圧には5Vが必要となることから、電源回路として5V出力のチャージポンプ式昇圧回路を設け昇圧した。昇圧ICにはmicrochip technology社製のMCP1252を使用した。

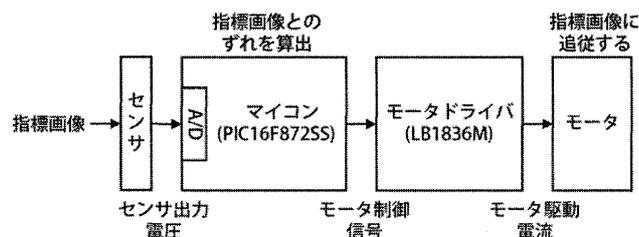


図5 回路ブロック図

Fig.5 Circuit Block Diagram

制御信号は、センサ回路、MCU、モータ駆動回路の順に伝達される。センサ回路では5つのフォトトランジスタの出力を120kΩの抵抗により、電流から電圧に変換する。次に、そのセンサ出力はMCUに内蔵されたADコンバータを介して、MCUに読み込まれる。MCUは5つのセンサの出力から、指標画像とロボット自身との位置・姿勢のずれを算出する。そして、MCUはそのずれを解消するように、モータドライバに指令を送る。この一連の流れがメインループで常に繰り返されることにより、ロボットは指標画像を追従することができる。

### 3.3 計測原理

本手法ではロボットに複数のフォトトランジスタを配置し、液晶ディスプレイなどの画像提示装置からの光信号をロボットの位置・姿勢制御に利用する。

指標画像の移動に応じて受光部のセンサ出力が変化するので、その変化量に簡単な演算をすることで指標画像の変位が求められる。移動量を求める演算は受光部に内蔵されたMCUによって処理される。

センサは離散的に配置してあるが、各センサの出力から指標画像の重心位置を求めることにより、指標画像との変位を連続的に計測することも可能である。また、受光部周辺にのみグラデーションパターンを提示する方式は、画面全体にグラデーションパターンを表示する方式よりもグラデーションが密になるので計測の分解能が高くなる。しかし、指標画像が受光部から外れると計測が不可能になるので、ロボットは常に指標画像に追従しながら計測と制御を行わなければならない。指標画像が受光部から外れた場合については後述する。

図6に示した指標画像と受光部を用いれば、非常に簡易な演算で位置と角度を同時に独立して計測することができる。

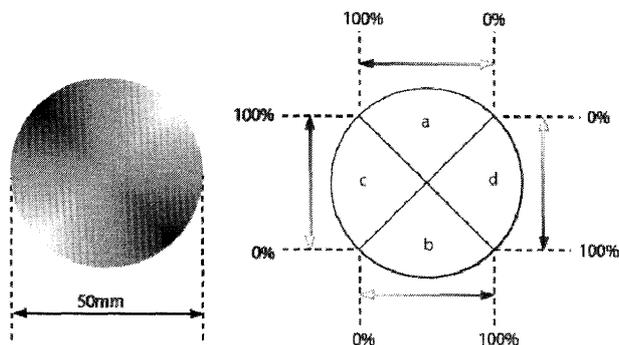


図6 指標画像

Fig.6 Marker Design

まず、本指標画像を用いた移動体の位置計測の原理を簡単に説明する。図7左下のように、受光部がX軸方向に並進移動した場合は、センサaとセンサbに注目する。たとえば受光部がX軸正方向に移動した場合は、センサaで受ける光は明るくなりセンサbは暗くなる。逆に、受光部がX軸負方向に移動した場合は、センサaの部分は暗くなりセンサbは明るくなる。また、この指標画像にはグラデーションパターンを用いているので、各センサの出力が線形補正されていれば、センサaとセンサbの出力の差は受光部と指標画像との変位に比例する。したがってセンサaとセンサbの出力の差を見れば、受光部がどれくらい移動したか、またどの方向に動いたのかが分かる。X軸方向の並進の場合にはセンサcとセンサdの値は変化しない。受光部がY軸方向に並進移動した場合は、X軸方向の並進の場合と同様にセンサcとセンサdとの出力の差を見ればよい。

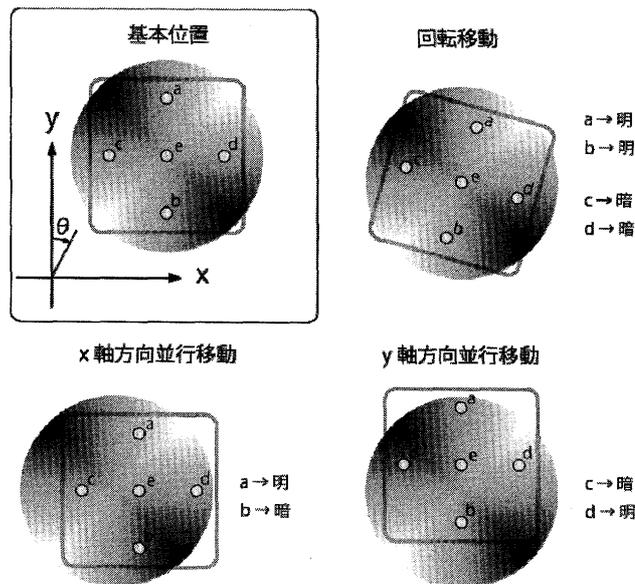


図7 計測原理

Fig.7 Position Detection

次に角度計測の原理を簡単に説明する。図7右上のように、受光部が回転した場合には、センサa, b, c, dすべての出力に注目する。例えば、受光部が時計回りに回転した場合は、センサa, bが明るくなるのに対し、センサc, dは暗くなるので  $a + b - c - d$  の値が大きくなる。逆に、受光部が半時計回りに回転した場合は、 $a + b - c - d$  の値は小さくなる。

したがって、センサa, b, c, dの出力を単純に加算、減算することで、受光部と指標画像の相対的な位置・及び角度の変位を算出できる。

以上のことから、本指標画像と受光部を用いた場合の指標画像と受光部の相対的な変位は次の式で求めることができる。

$$x \propto a - b \quad (\text{式1})$$

$$y \propto d - c \quad (\text{式2})$$

$$\sin\theta \propto a + b - c - d \quad (\text{式3})$$

上式ではX軸方向正の変位をx, Y軸方向正の変位をy, 時計回り方向の角度変位を $\theta$ , センサa, b, c, dにおける出力をそれぞれa, b, c, dとしている。

なお、上式により得られる位置、角度ともにセンサ値の差分を利用しているため、全センサに均一に入力する外乱光の影響が低減される点も着目に値する。

### 3.4 制御アルゴリズム

ロボットと指標画像との前後方向のずれをy, 横方向のずれをx, 角度方向のずれを $\theta$ とする。yの絶対値があらかじめ設定した閾値よりも大きい場合、yに比例した速さで前進あるいは後進することとする。この時、左右

両輪の回転数の間には、横方向のずれ  $x$  と角度方向のずれ  $\theta$  に比例した差をつけている。その結果、前進あるいは後進しながら、 $x$  と  $\theta$  を打ち消すように走行する。

試作したロボットは左右独立 2 輪駆動方式であり、横方向には直接移動することが出来ない。 $y$  の絶対値が閾値よりも小さい場合、横方向のずれを打ち消すことが難しいので、その場で回転して  $\theta$  だけを打ち消す。この時、ロボットが回転する速度は  $\theta$  とその変化率に比例することとする。

## 4 検証

### 4.1 指標画像との相対変位計測

本研究で提案する画像提示装置を用いたロボットの制御は、ロボットが表示されている指標画像との相対変位を正確に計測できることが前提となる。そのため本節では、製作したロボットのディスプレイ上の指標画像との相対変位計測の正確さを明らかにする。

#### 4.1.1 実験装置

図 8 に実験装置の外観を示す。実験にはノート PC を 2 台と製作したロボットを用いた。2 台のノート PC のうち 1 台はロボットに対し指標画像を提示するためのものである。そして、もう 1 台のノート PC はロボットが計測した指標画像の位置情報を、シリアル通信で受信し表示するためのものである。



図8 実験装置

Fig.8 Experiment Setup

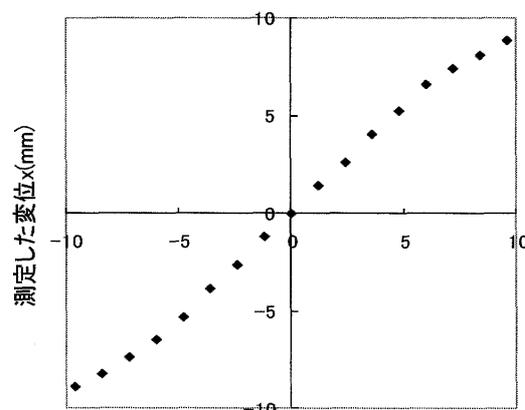
#### 4.1.2 実験手順

ロボットをノート PC のディスプレイ上に静止させた状態で、ロボットに対し提示する指標画像の位置・姿勢を操作した。ロボットはデバックモードで動作させ、センサ出力より算出された指標画像の変位情報をもう一方のノート PC へと送信した。実際の指標画像の変位とロボット側から算出された指標画像の変位をグラフにプロットした。尚、算出された指標画像の変位は 30 回計測し、平均を示している。位置に関する実験として X 軸方向にのみ指標位置を変更する実験と、角度のみを変更する実験を行った。環境光は蛍光灯を点灯した状態で 850Lux

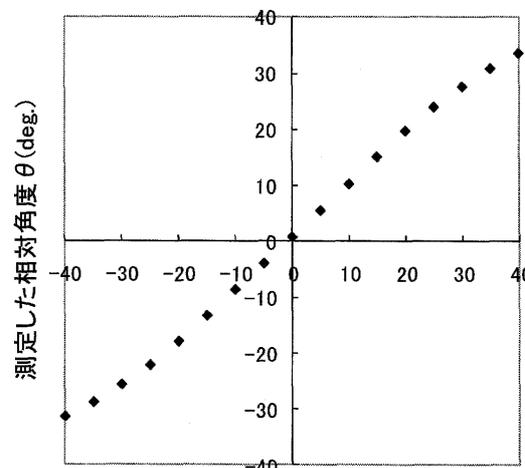
であった。指標画像は直径 50mm に設定した。また指標画像を提示する間隔は X 軸方向変位 1.2mm 刻み、角度  $5^\circ$  刻みで設定した。

#### 4.1.3 実験結果

実験結果を図 9 に示す。X 軸の変位が  $\pm 6$ mm 前後まで、算出した値と実際の指標画像との変位との直線性が高い。それ以降は、変位量が大きくなるにつれ誤差が増加する。また角度については、 $\pm 25$  度前後までは計測結果と実際の角度に誤差が少なく、ほぼ直線的な変化が読み取れる。



実際の指標画像の変位  $x$  (mm)



実際の指標画像の角度  $\theta$  (deg.)

図9 実験結果

Fig.9 Experimental Result

### 4.2 指標画像の追従速度限界測定

本手法によってロボットをコントロールする場合、提示する指標画像の移動速度が速い場合、ロボットが指標画像を追従できなくなることがある。そこで本実験では、ロボットが追従できる指標画像の最高速度を求めた。

#### 4.2.1 実験方法

ノート PC のディスプレイを水平に設置し、そのディスプレイ上でロボットを指標画像に追従させた。測定はロボットの直進時の追従可能最高速度および旋回時の追従可能最高速度に分けて行った。直進時の追従可能速度測定では、指標画像の直進移動速度を変え、指標画像に対して追従できているかどうかを目視で確認した。また、旋回時の追従可能速度測定では、指標画像の旋回速度を変えてロボットが指標画像に追従できているかどうかを目視で確認した。

#### 4.2.2 実験結果

指標画像の追従速度限界について以下の表 2 に示す。追従速度限界以下の速度では、ロボットは指標画像を追従することができた。

表2 指標画像追従速度限界

Table 2 Speed Limitation of Marker Following

	追従可能速度
直進	24mm/s
旋回	1.5rad/s

#### 4.3 大域的な指標画像による制御

追従速度に限界がある以上、指標画像をロボットが追従できなくなる可能性は否定できない。そこで画面全体に以下のような指標画像を提示することで、画像提示装置上のどの位置にロボットが配置されていても、ロボット側のアルゴリズムを変更することなく特定の箇所にロボットを誘導する手法を提案する。また、この手法を用いれば複数のロボットを同時に特定の地点へ誘導することができる。

ここでは、大域的指標画像の例として 3 種類の指標画像(図 10)を作成し、実際にロボットの制御を行ったことについて述べる。

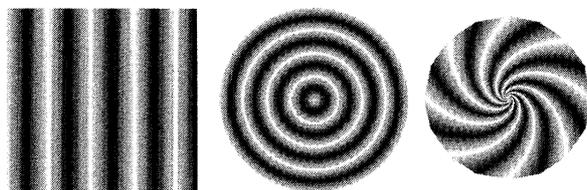


図10 大域的指標画像  
Fig.10 Globally Marker

##### 4.3.1 縞模様グラデーションパターン

連続する縞模様のグラデーションパターンを画像提示装置全体に表示し、そこへロボットを乗せると、ロボットは白縞上で白縞に対し 45 度の傾きで安定した(図 11)。さらに、このグラデーションパターンを左右に動かすとロボットは縞模様の移動方向に対して 45 度の向き

に並進移動した。つまりこのパターンによって縞模様に対して 45 度の向きに直進させる場を構成することができる。

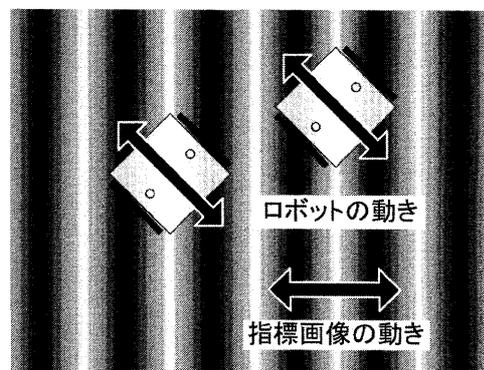


図11 縞模様グラデーションパターン  
Fig.11 Gradation Pattern -Stripe-

##### 4.3.2 同心円グラデーションパターン

次に、連続する縞模様のグラデーションパターンを同心円状にし、中心方向へ変化させると、ロボットは白縞同心円上に於いて接線方向と 45 度の角度を保ちながら、中心の一点へと集まった(図 12)。つまりこのパターンでは複数ロボットを特定の一点へ集める場を形成することができる。

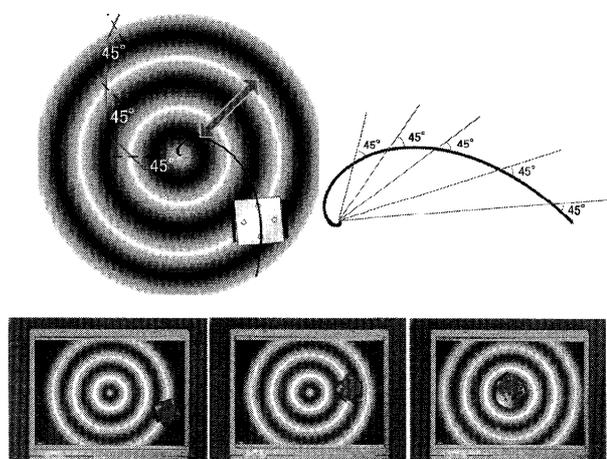


図12 同心円グラデーションパターン  
Fig.12 Gradation Pattern - Circle-

##### 4.3.3 等角螺旋グラデーションパターン

同心円グラデーションパターンでは、複数ロボットを特定の一点へ集める場を形成できるが、その移動軌跡は等角螺旋状であり、中心までの最短距離ではない。

そこで、逆関数として等角螺旋状のグラデーションパターンを作成した(図 13)。図のグラデーションパターンを画面全体に表示し時計回りに回転させることにより、複数ロボットをグラデーションパターンの中心へと直進させることができた。つまりこのパターンにより特定の一点へ直進させる場を形成することができる。

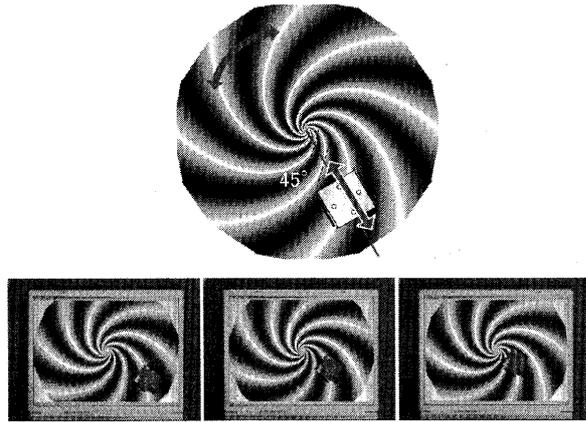


図13 等角螺旋グラデーションパターン  
Fig.13 Gradation Pattern - Spiral-

これらの大域的指標画像のうち、縞模様グラデーションパターン以外のもものでは、ロボットが中心に近づき、パターンのスケールが受光部に対して小さくなるにつれて、追従は難しくなった。そのため、これら2つのパターンでは、完全に一点にロボットを誘導するには至らないことも明らかになった。

## 5 考察

### 5.1 位置・姿勢計測の直線性について

#### 5.1.1 受光部の出力特性

本手法では画像提示装置から空間変調したグラデーションパターンを投影し、受光素子によって検出することで制御を行う。しかし、画像提示装置に提示する明度とセンサの出力は図 14 のように一般的に直線性の低い特性を示す。図 14 では提示画像の明度最小を 0 (R:G:B=0:0:0)、最大を 1 (R:G:B=255:255:255)とした場合の特性を図示している。

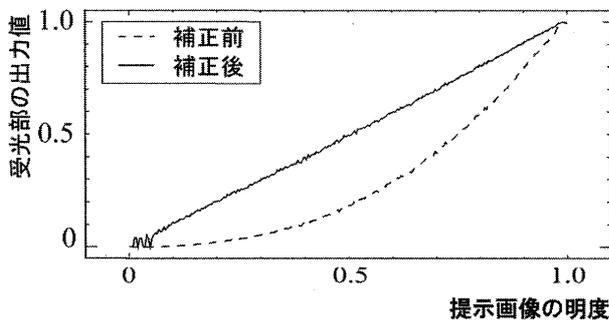


図14 受光部の出力特性  
Fig.14 Output Characteristic of Sensors

この特性に対し、図のようにガンマ補正をかけることで直線性の高い特性へ補正することも可能である。しかしロボットに搭載した MCU では演算能力が低く、ガンマ補正を行うことは難しい場合がある。提案手法では補正を行わずとも位置・姿勢の追従が実現できている。その理由について検討する。

#### 5.1.2 モデル化

図 14 の特性を考慮して、センサ出力  $a$  をモデル化すると(式4)となる。このとき、図 6 の指標画像を提示することで、位置  $x=1.0$  においてセンサ  $a$  に対する提示画像の明度を 1.0、 $x=-1.0$  において 0.0 としている。

$$a = \left(\frac{x+1}{2}\right)^n \quad (式 4)$$

同じ軸の位置検出に対応するセンサ出力  $b$  は指標画像の輝度が反転しているため(式 5)として求まる。

$$b = \left(\frac{1-x}{2}\right)^n \quad (式 5)$$

このとき各センサの補正前の特性から算出される計測結果  $x_s$  は二つのセンサの差分に比例して求まるため、(式 6)の特性を持つと考えられる。

$$x_s \propto \frac{(x+1)^n - (1-x)^n}{2^n} \quad (式 6)$$

位置の直線性は、 $n$  の値に応じて図 15 に示す様に変化する。 $n$  が 1 に近いほど直線性が高い。

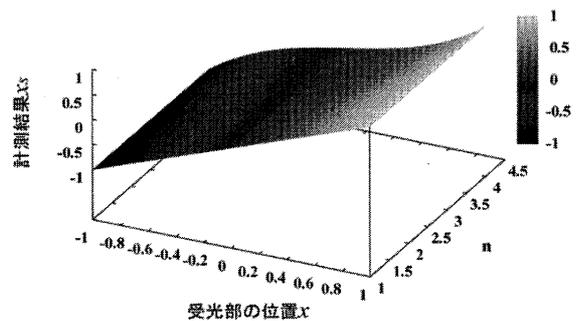


図15  $n$  の値による直線性の変化  
Fig.15 Linearity Changed by n Value

実験中に最小自乗法で求めた実測値の  $n$  を確認したところ、周囲が暗闇の場合に  $n=2.7$  であった。この場合のデータから求まる直線性を図 16 に示す。

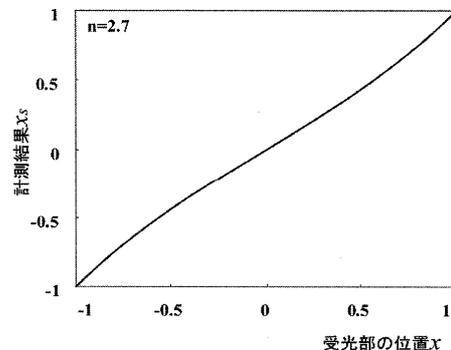


図16  $n=2.7$  における直線性  
Fig.16 Linearity at  $n=2.7$

センサ自体の出力が非線形であるにも関わらず、線形補正を用いずとも複数のセンサ出力の差分として位置・姿勢の制御が可能な計測結果を得られている。これは本手法の非常に優れた点だといえる。

## 5.2 指標画像を用いたロボット制御について

提案手法の計測方法では、指標とロボットのずれが大きくなると誤差が大きくなる傾向が示されているが、計測結果の極性が正しければ、ずれを解消するようにロボットは動作を行うことができる。

製作したロボットでは横方向に移動が行えないため、前後方向のずれが十分大きい場合のみ、横方向のずれの解消を行うアルゴリズムを提案した。任意の動きを指定する際には、指標の動きに横方向の拘束を与えることが必要となるが、全方向移動可能なロボットを用いることで、横方向への拘束が不要となる。

## 6 結論と今後の展望

本稿では Display-Based Computing の概念に基づき実環境のロボットを制御する手法を提案した。2次元平面上の位置・姿勢を時刻に応じて指示する局所的な指標画像を用いてロボットの制御を実装し、処理能力の低いロボットでも位置・姿勢制御可能な計測を実現できていることを確認した。また、単一の画像で複数ロボットの制御を可能とする大域的指標画像についても述べた。

これまでは画像提示装置に表示した画像が実環境に物理的な働きかけを行うことは難しかったが、提案手法を用いることで、指標画像を描画するだけでロボットの制御を実現できる。CG とロボットを連携させた多様なコンテンツを制作することが可能となると考えられる。

(2010年12月12日)

## 参考文献

- [1] Microsoft Surface  
<http://www.microsoft.com/surface/en/us/Default.aspx>
- [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 CD-ROM, 10巻, 3C1-1 (2005)
- [3] 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)
- [4] Keigo Hara, Masahiro Inoue, Shoichi Maeyama, and Akio Gofuku: Navigation Using One Laser Source for Mobile Robot with Optical Sensor Array Installed in Pan and Tilt Mechanism; Advanced Intelligent Mechatronics, 2008. AIM 2008. IEEE/ASME International Conference on, 257-262 (2008)
- [5] 藤沢隆介, 今村光, 橋本敬, 松野文俊: フェロモン場を用いて誘引を行うロボット群の開発; 情報処理学会論文誌 Vol.2, No.2, 80-91 (2009)
- [6] 大山真司, 信号場の概念を導入した能動的計測に関する研究, 東京工業大学 学位論文 (1998)
- [7] Malte Weiss, Florian Schwarz, Simon Jakubowski, Jan Borchers: Madgets: Actuating Widgets on Interactive Tabletops; Proceedings of UIST '10, 293-302 (2010)

## [著者紹介]

### 安 謙太郎 (非会員)



2010年慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科修了。2010年同学科後期博士課程在籍。光を利用したロボットのインタフェースデザインの研究に従事。

### 永谷 直久 (正会員)



2007年電気通信大学大学院電気通信学研究科博士前期課程知能機械工学専攻修了。現在、同大学大学院電気通信学研究科。知能機械工学専攻博士後期課程在籍。視覚拡張および前庭感覚提示を利用したインタフェースの研究に従事。日本学術振興会特別研究員(DC1)。

### 常盤 拓司 (正会員)



2001年 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修了, 2007年 同博士課程退学。産業技術総合研究所特任研究員, 日本科学未来館科学技術スペシャリスト, 東京大学大学院工学系研究科特任研究員を経て, 現在, 公立はこだて未来大学 CREST 研究員, 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科付属メディアデザイン研究所訪問研究員。

### 杉本 麻樹 (正会員)



2006年 電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程機械制御工学専攻修了。博士(工学)。電気通信大学電気通信学部知能機械工学科特任助教などを経て, 現在, 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科講師。画像提示装置を用いた計測と制御の研究に従事。

### 稲見 昌彦 (正会員)



1999年東京大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。東京大学リサーチ・アソシエイト, 同大学助手, 電気通信大学講師, 同大学助教授, JST さきがけ研究者, MIT コンピュータ科学・人工知能研究所客員科学者, 電気通信大学知能機械工学科教授を経て, 現在慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科教授。ロボット, エンタテインメント工学等インタラクティブ技術に関する研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会理事。