

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

稲見昌彦^{1),2)}, 富田正浩¹⁾, 杉本麻樹¹⁾, 新居英明¹⁾, 小島稔¹⁾

1)電気通信大学, 2)科学技術振興機構さきがけ

Display-based Computing とはプロジェクタや液晶など画像提示装置を映像提示だけでなく、計測、制御、通信等に用いることを目指す概念である。画像提示装置を用い時空間変調可能な指標画像を表示することでカメラに代わり複数の受光素子のみで高速に位置計測を行う事が可能となる。本技術はディスプレイを人のためなく計測や機器制御に用いるという点で、カメラを人が鑑賞するためだけでなく計測に用いた Computer Vision と双対をなす概念である。

本講演では画像提示装置を用い複数台の小型移動ロボットの動きを同時に制御することを可能とするシステムを提案し、その試験的実装に関し報告を行う。

Display-Based Computing (VI) Robot-based Interaction System Using Display-based Computing

Masahiko INAMI^{1),2)}, Maki Sugimoto¹⁾, Hideaki NII¹⁾, Minoru KOJIMA¹⁾
and Masahiko Tomita¹⁾

1) The University of Electro-Communications, 2) JST PREST

Abstract

Display-based Computing (DBC) is a concept to achieve communication, measurement, control and appropriate presentation that exert influence on the real world by using display devices.

DBC presents optical information superimposed onto the real world by projecting the images. Computer Vision (CV) uses the camera not only to record optical information but also for image-based control of robotic devices and information instruments. Similarly, it is also possible to control a robot based on optical information projected by DBC. In this paper we present a robot-based interaction using DBC. We also achieved a multi-robots control system.

1. 緒言

Display-Based Computing(DBC)とは、ディスプレイを利用することによって通信や計測・制御を実現するため情報システムである。

ディスプレイは「人」に視覚的情報を提示するための装置として主に利用されていた。DBC はディスプレイを用い人だけでなく「人工物」に対し情報を提示することで実世界指向の新たな情報システムを構築することを目的としている。

筆者らは DBC に関する一連の研究により小型ロボットの位置・角度の計測手法、複合現実感と小型ロボットを用いたゲーム環境などを開発してきた[1][2]。本報告では PC の画面上で指標画像を動かすだけで、複数台のロボットの位置・姿勢を簡便に制御することを可能とする手法を提案する。

2. ディスプレイを用いた計測と制御

ディスプレイとはその名の通り時・空間で光を変調することにより人に対し画像情報を提示するための装置である。あるいは VR の観点では情報世界と実世界とをつなぐ窓ととらえることができる。我々はこのディスプレイという窓を通して情報世界を覗くことができる。

テレビや携帯、PDA、ノートパソコン等我々は日々ディスプレイに囲まれディスプレイを持ち歩きながら生活している。すでに生活空間にはエビキタスにディスプレイが存在しておりわれわれの日常生活においてもディスプレイは無くってはならないものとなっている。

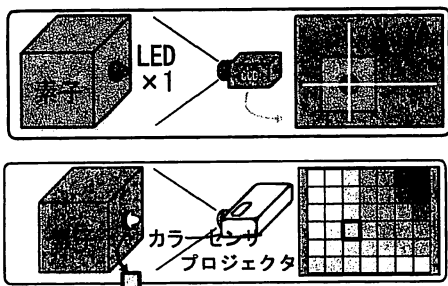


図 1 位置計測におけるカメラと

プロジェクタの双対性

このようなディスプレイの普及を背景に筆者らは DBC という概念を提案している。これは画

像提示装置を用いることにより、実世界への影響を与えながら対象との通信、計測、制御また適切な視覚情報の提示を実現する概念である。この DBC の概念は Computer Vision(CV)とは以下のような双対性を持っている。CV では入力装置のカメラを用いて画像情報をコンピュータの中に取り込む事によって計測等の目的を達成する。一方 DBC では出力装置である画像提示装置を用い、画像情報を現実世界に配置している機器に重畳して提示することにより目的を達成する。(図 1)

本研究は DBC の一環として、画像提示装置によるロボットの制御を試みるものである。本手法はディスプレイを空間光変調素子ととらえた光通信システムと換言することも可能である。

3. ディスプレイを用いたロボットの制御

画像情報によりコントロールされるロボットとして、ラインレースロボットがある。これは黒地に描かれた白線、あるいは白地に描かれた黒線にそって走行する自立型ロボットで、工場内の自動搬送車として実用化されている。最近では、単に線に沿って走るだけではなく、線に埋め込まれたバーコードからの情報により速度の制御などが可能なものも開発されている。しかし、従来のラインレースロボットはあらかじめ用意されたラインに沿って走行するのみで、走行中に経路を動的に変化させることは不可能だった。それはロボットが追従するためのラインが床などに印刷されており、空間的・時間的に固定されていたからである。

ここで画像提示装置は時・空間光を変調可能なデバイスである。この特徴をラインレースロボットに応用した場合、つまりラインを画像提示装置で提示した場合、ラインを空間的・時間的に任意に提示することが可能になり、Jarvis らが試験的な実装を行っている[3]。Jarvis らの手法によりロボットは動的に変化する任意のライン画像に沿って走行可能となる。しかし、ロボットの軌跡のみの指示に留まっており、位置・姿勢・速度等の制御は実現していない。

筆者らは画像提示装置により指標画像を表示し、表示された画像に従って適切な動作をするようにプログラムされたロボットを用いることでロボットに対し多様な動作を指示する手法を提案する。

ラインレースロボットの例では、指標画像は白黒のラインであった。この指標画像は文字通りラインなので、ロボットに対しラインからの変位

x しか情報として与えることができない。しかし、指標画像を工夫することにより、さらに多くの情報をロボットに与え、より複雑な動作をロボットに指示することが可能となる。

指標画像はモノクロ 2 階調だけではなく、グレースケール画像やカラー画像、時変画像を利用することで、目的に応じ情報量を増やすことが可能である。また、指標画像に関しても多様なパターンを用いることが可能となる。

提案手法は指標画像に工夫を加えることで計測側は単純な受光素子にて構成できる。よって、従来の Computer Vision による計測速度はカメラのフレームレートによって制約されたが本手法は画像提示装置のフレームレートではなく受光素子のサンプリングスピードにより制約されるという特徴も有する。

本研究では画像提示装置と安価なフォトセンサを利用して、ロボットを制御することを試みる。

なお、本手法はディスプレイを用いることで従来の人に対しての画像提示と容易に組み合わせることができるという点も大きな特徴である。

4. 指標画像

筆者らは、画像提示装置を用いて表示する指標画像として図 2 に示すようなグレースケール画像を提案している[1]。また、同図に示すように十字に 5 つの受光素子を配置することで指標画像と受光素子との相対的な位置・角度のずれの計測を行う。

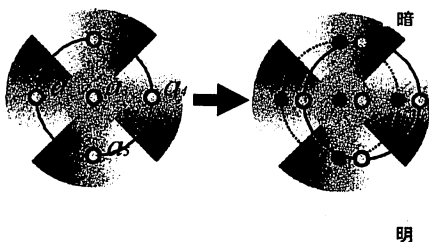


図 2 受光部と指標画像のずれ（平行移動）

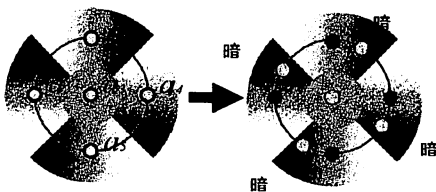


図 3 受光部と指標画像のずれ（回転移動）

$$x \propto a'_1 - a'_3 \quad (1)$$

$$y \propto a'_2 - a'_4 \quad (2)$$

$$\sin \theta \propto a'_1 + a'_2 + a'_4 + a'_5 \quad (3)$$

$$(a'_i = a_i - a)$$

例えば、受光部が x 軸方向に平行移動した場合を考えると、図 2 左では 5 個の受光素子の出力は均衡が取れているが、図 2 右では受光部が右に移動し、受光素子 a_1 と a_5 が指標画像内の濃淡を移動している。すると受光素子の出力に変化が生じ、指標画像に対する受光素子の相対位置は式(1)に示すように a_1 と a_5 の差分として求められる。y 軸方向に平行移動した場合も式(2)のように同様に求めることができる。

次に受光部が回転した場合を図 3 に示す。回転角は式(3)のように各受光素子の値から中心輝度である a_3 の値を引くことにより与えられる。

本研究では、先の指標画像を改良し計測の安定化を図った[4][5]画像(図 4)を用いた。

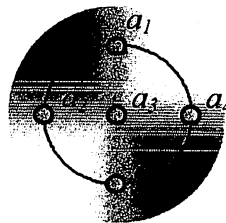


図 4 改良版相対位置・姿勢同時計測用指標画像

5. 指標画像を用いたロボットの制御

画像提示装置を用いてロボットを制御するためのシステムを図 5 に示す。ロボットに受光部を取り付け、ロボット上の受光部に対し指標画像を表示する。ロボットは受光部のセンサ出力から指標画像とのずれを算出し、そのずれを修正するようにプログラムしておけば、ロボットは指標画像に追従する。したがって指標画像の位置姿勢をコントロールすることで、間接的にロボットの位置姿勢をコントロールすることができる。

なお、このシステムはオープンループであるためロボットが指標画像から外れた状態では制御することはできない。

ロボットをコントロールするための画像提示装置にはプロジェクタや液晶ディスプレイなど

様々な装置を利用することが可能である。例えば、プロジェクタを利用する場合は受光部をロボットの上面に配置し、ロボットの上から指標画像を投影すればよい。また、液晶ディスプレイを利用する場合には受光部をロボットの底面に配置し、水平に設置したディスプレイ上でロボットを走行させ、ロボットの下面から指標画像を提示すればよい。

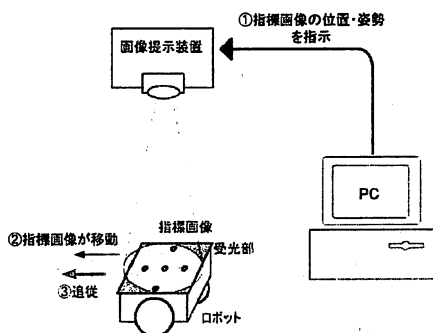


図 5 画像提示装置を用いたロボットの制御

6. 実験装置

システム概要

本研究のコントロールシステムは基本的にロボットと画像提示装置、制御用 PC の 3つの要素で構成されている。画像提示装置としてプロジェクタを用いた場合には、指標画像の制御用に別途 PC も必要になるが、ノート PC を利用すれば PC に画像提示装置が内蔵されているので、システムはロボットとノート PC だけで構成することができる。今回は実験装置としてロボットとノート PC でシステムを構成した。

小型ロボット

今回試作したロボットはノート PC の画面上で制御することを想定したので、センサはロボットの底面に配置し、ロボット本体は 40mm 角と小型に設計した。(図 6)

このロボットは、ノート PC のディスプレイに表示された指標画像に追従することが可能である。また、本ロボットはシリアル通信によるデバッグ機能を備えているので、ロボットと PC を RS232C ケーブルで接続すれば、各センサの生データ、および算出された指標画像からのずれを PC でモニタすることができる。

試作したロボットの仕様を表 1 に示す。



図 6 試作した小型ロボット

表 1. 小型ロボットの仕様

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
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

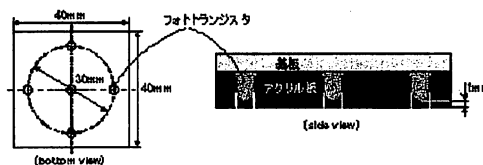


図 7. センサの配置

ロボットは左右独立 2 輪駆動方式で、左右 2 つのタイヤにより走行する。駆動モータには小型の DC ギヤドモータを用いた。ロボットの底面には 5 つのセンサを配置したセンサ基板が固定されている。センサには東芝製のフォトトランジスタ TPS615 を用いた。ロボットの最上部にはマイコンやモータドライバなどが実装されたメイン基板が配置されている。センサ基板とメイン基板はフラットケーブルで接続されており、センサの出力はメイン基板のマイコンへと送られる。マイコンは microchip technology 社の PIC16F872SS を 16MHz で用いている。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 個用いている。したがって、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を拡張することができる。

センサの配置については図 7 のようになっている。ロボットの底面は一辺が 40mm の正方形であり、その中心にセンサが一個配置されている。また、残りの 4 つのセンサは、真ん中のセンサを中心として、直径 30mm の円上に、90 度間隔で配置されている。センサがむき出しのままでは、

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やすいので、今回は図 7のように、各センサと同じ位置に穴を開けた黒いアクリル板を基板に貼り付け、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各センサを配置した。この工夫により、センサに指向性を持たすことができ、浅い角度で入射する外乱光の影響を受けにくくすることが出来る。

次に、回路について説明する。ロボットの回路は図 8のように電源回路、センサ回路、マイコン、モータ駆動回路で構成されている。

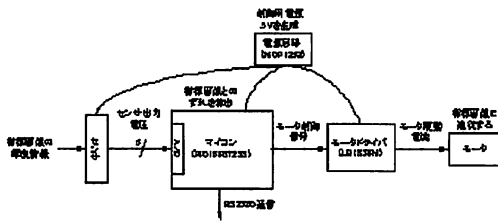


図 8. 回路ブロック図

制御信号の流れとしては、センサ回路、マイコン、モータ駆動回路の順に信号が伝達される。まず、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、そのセンサ出力はマイコンに内蔵された AD コンバータを介して、マイコンに読み込まれる。マイコンは5つのセンサの出力から、指標画像とロボット自身とのずれ (x-y 方向のずれ、角度のずれ) を算出する。そして、マイコンはそのずれが 0 になるように、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に追従することができる。

小型ロボット側ソフトウェア

本ロボットの CPU には microchip technology 社のマイコン PIC16F872SS を使用している。

ロボットは前後方向および角度のずれに対し、ずれが小さくなる方向へロボットが動くように各モータを駆動する。また、前後方向および角度のずれに対し若干の不感帯を設けている。今回製作したロボットは PID 制御ではなくバンバン制御を用いているので、ずれの大きさに比例して制御量を与えることができない。もし、不感帯を設けないと前後方向および角度のずれを修正する際に、目標値付近でハンチングを起こすのでロボットはその場で細かく振動する。このハンチングを防ぐために今回は前後方向および角度のずれ

に対し若干の不感帯を設けた。

PC 側ソフトウェア

ロボットを制御するために必要な PC 側のソフトウェアについて説明する。今回開発したコントロールソフトは、マウスやキーボードの入力によって指標画像の位置・角度を自由に動かす機能を持っている。ロボットは指標画像に追従するので、結果としてディスプレイを介してロボットの位置・姿勢を自由にコントロールすることができる。

また、図 9に示すように複数の指標画像を用いることで複数台のロボットを同時に制御することも可能である。

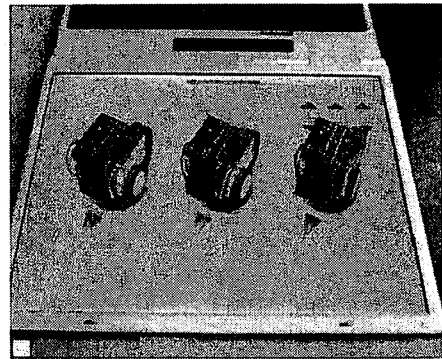


図 9 複数台のロボットの同時制御

PC 側のコントロールソフトの開発には Macromedia 社の FLASH MX を用いた。FLASH は主にインタラクティブな web コンテンツを製作するためのデファクトスタンダードのソフトウェアであり、FLASH を利用することで初心者でも、簡便にアニメーションを作成することができる。また、ActionScript というアニメーションを制御するスクリプトを記述することにより、単調なアニメーションだけではなく、例えばマウスやキーボードの操作によって複雑に変化するアニメーションも簡単に製作することができる。もちろん FLASH が得意とする音楽と同期した動作も可能である。

つまり本システムはインタラクティブな web オーサリングの要領で、モータの制御や通信に関する詳しい知識が無くても小型ロボットを制御することを可能とするフレームワークととらえることもできる。

本コントロールシステムでは、ノート PC のディスプレイ上に指標画像を描画し、その指標画像を動かすことによって間接的にロボットをコントロールすることができる。今回開発したコント

ロールソフトでは、ロボットを操作するために3つの方法を用意した。1つ目はキーボードを用いた手動操縦である。操縦者はキーボードの方向キーで、自由にロボットを前進・後進、左右回転させることができる。この、キーボードによる手動操縦はロボットの位置を細かく調整するのに適している。2つ目の方法はマウスによってロボットの移動先を指示する方法である。操縦者がマウスによってロボットの移動先をクリックして指示すると、ロボットは指示された地点まで自動的に移動する。この操縦法ではロボットに一旦移動先を指示すると、目標地点にたどり着くまで新たな目標地点を指示することができない。従って、このマウスによる半手動操縦はロボットを大まかに、大きく移動させるのに適している。3つ目の方法は、あらかじめ指定したパスに沿ってロボットを自動的に走行させるものである。操縦者はロボットを動かしたい経路を考え、あらかじめその経路をマウスによって設定する。するとロボットは、その経路に沿って自動的に走行し目的地で停止する。この自動走行機能は、比較的長い経路を何度も繰り返し移動させるのに適している。

また、本コントロールソフトは提示する指標画像の大きさを自由に調節することができる。

操縦者は上に挙げた3つの操縦法を用いて、ノートPC上のロボットを自由に操縦することができる。

7. 位置・姿勢計測性能評価

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を動かした。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PCへ送信した。

計算により算出された指標画像の変位と実際の指標画像の変位をグラフにプロットした。実験は指標画像をx方向にのみ動かす場合とy方向のみに動かす場合、そして角度のみを動かす場合について行った。指標画像は直径50mmに設定した。

また指標画像をx方向、y方向に移動させる距離はそれぞれ $x=\pm 8\text{mm}$ 、 $y=\pm 8\text{mm}$ の範囲で設定した。ロボットが指標画像の変位を計測するためには各センサがそれぞれ対応した指標画像の

グラデーション部上に位置している必要があり、そのためには指標画像の中心の円内に受光部の真ん中のセンサが入っていることが必要である。

図10に受光部と指標画像の位置関係を示した。指標画像の直径は50mmで、その中心部分の直径は全体の直径の3分の1になっているので16.6mmである。フォトトランジスタの半値角を考慮すると、実際は受光部の中心のセンサは直径16mm未満の円内にあればいいので、今回の指標画像の移動範囲は $x=\pm 8\text{mm}$ 、 $y=\pm 8\text{mm}$ に設定した。

計測した結果を図11、図12、図13に示す。

図11は指標画像をロボットに対しx方向へ動かしたときの場合、図12はy方向へ動かした場合、図13は角度を動かした場合の計測結果である。

指標画像をx方向に動かした場合、y方向に動かした場合の両方において指標画像の変位をリニアに計測できていることが分かる。算出した指標画像の変位と実際の指標画像の変位は比例関係にあることが分かったので、その比例係数を最小二乗法で求めた。その結果をそれぞれ0.99、0.98となり、指標画像をx方向に動かした場合、y方向に動かした場合の両方において算出した指標画像の変位と実際の指標画像の変位の間の比例係数は、ほぼ1になっていることが分かる。

つまり実際の指標画像の変位をほぼ実寸で計測できているといえる。また、実際の指標画像の変位が大きくなるほど算出した指標画像の変位の誤差は大きくなるが、指標画像とロボットの変位は最大で $x=\pm 8\text{mm}$ 、 $y=\pm 8\text{mm}$ なので、求めたグラフの直線の傾きよりこの範囲では算出した指標画像の変位の誤差は最大でx方向は0.08mm、y方向は0.16mmである。

次に角度についての計測結果を見てみると、図13より角度の変化はリニアに計測できていないことが分かる。角度は単に4つのセンサ出力の平均を取ることで求めている。したがって、その計測結果にはセンサの非線形特性が現れてしまう。また正確には、4つのセンサ出力から求められるものは比例した量なので、本来4つのセンサ

出力から角度を求められる範囲は、角度が微小という近似が成り立つ範囲である。この範囲でセンサ出力線形に変化していればいい訳だが、実際は指数変化をしている。よって角度も正確に求めるためには、各センサの出力特性が線形になるようにガンマ補正をする必要があると考えられる。

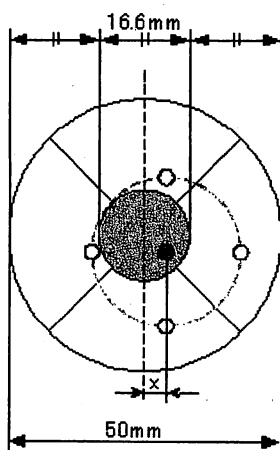


図 10. 受光部の移動範囲

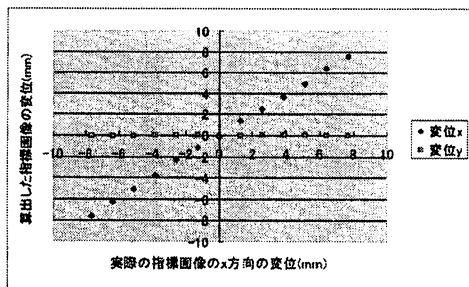


図 11. 指標画像を x 方向に動かしたときの計測結果

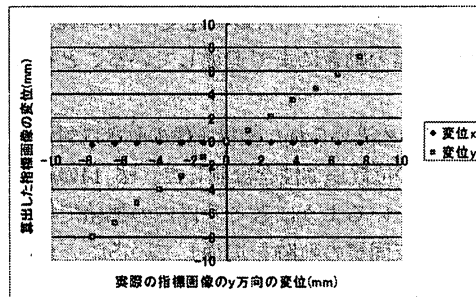


図 12. 指標画像を y 方向に動かしたときの計測結果

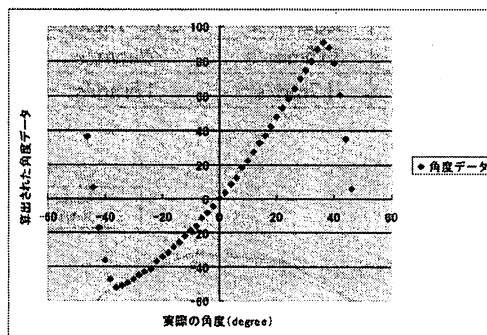


図 13. 指標画像の角度変化に対する計測結果

8. 追従性能評価

ノート PC のディスプレイを水平に設置して、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と、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を測定する場合には、指標画像の直進移動速度を変えて、ロボットをディスプレイの長手方向に走らせ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を測定する場合には、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。

直進時および旋回時のロボットの最高速度と、本実験により求めた直進時および旋回時のロボットの追従可能速度を表 2 に示した。

追従速度はロボットの最高速度により規定され

るが本システムの場合最高速度の 75%程度の速度の指標の動きにまで追従していることを確認できた。

次に予め決められた指標画像の動きに対するロボットの位置追従性を計測した。図 14の結果に示されているように数ミリ以内の誤差で指標画像とほぼ同等の軌跡を追従していることが確認できた。

表 2. ロボットの最高速度と追従可能速度

	最高速度	追従可能速度
直進	36.5mm/s	24mm/s
旋回	1.7rad/s	1.5rad/s

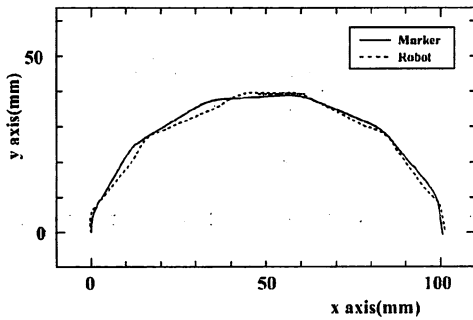


図 14 指標画像の軌跡(実線)とロボットの軌跡(点線)

9. 結言

本稿ではディスプレイを時空間変調素子ととらえ、ディスプレイを用い空間を光学的に構造化するための手法 Display-Based Computing に基づき、指標画像を用いることで簡便に複数台の小型ロボットを制御するための手法を提案し、試作システムの評価を行った。今後は追従性能の安定化を試みると共に多様なアプリケーションを作成する予定である。

参考文献

- [1] 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.
- [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, CD-ROM, 2005
- [3] R. A. Jarvis, Video Plane Robot Swarms, European Robotics and Intelligent Systems Conference, pp.401-416, 1994
- [4] 川本海, 蔵田武志, 酒田信親, 大隈隆史, 葛岡英明, 光センサと加速度計を用いたタグの位置・姿勢計測に基づくタンジブルテーブルトップインタフェース, 情報処理学会研究報告, 2006-HI-118, pp.45-52, 2006
- [5] 小島稔, 児玉和樹, 中村享大, 杉本麻樹, 稲見昌彦, Display-Based Computing の研究 第五報: ライトペンの試験的実装, 情報処理学会研究報告, 2006-HI-118, pp.53-56, 2006