

ユビキタス環境のための光レゾルバ

常盤拓司^{†1,†2} 吉積将^{†3} 新居英明^{†4}
杉本麻樹^{†4} 稲見昌彦^{†4,†5}

ユビキタス・コンピューティングを実現するうえで、ユーザや情報機器の位置を検出する技術はユーザの場所や状況に応じた情報の入出力を実現するうえで重要な要素となる。そこで我々は新たに複数の面光源と受光素子という簡便な装置と単純な計測原理に基づく位置計測の手法を提案する。提案手法では、複数の面光源を同一周波数と異なる位相で明滅させ、実空間上で各光源からの光を合成し、位置ごとに位相の変化する光の信号場を生成する。受光素子で各位置での光を計測し基準信号と比較することでその位置に応じた位相差を得ることができる。受光素子による計測は、信号場とは独立しているため、複数の受光素子で同一の信号場を計測することができる。本稿では、受光素子と2つのLEDアレイで構成される角度計測システムを実装し、提案手法の基本原則について確認をしたので報告する。

Development of Optical-resolver for Ubiquitous Environment

TAKUJI TOKIWA,^{†1,†2} MASASHI YOSHIDZUMI,^{†3}
HIDEAKI NII,^{†4} MAKI SUGIMOTO^{†4}
and MASAHIKO INAMI^{†4,†5}

In this article, we report novel measurement method designed by a couple of plane light sources made by IR-LED array and a photo interrupter. Light sources emit light by the same frequency and the different phase. And optical axis of the sources is set up as orthogonal. Then, the signal place is diffused with the space where phase is different in each position. And the signal which is received by photo interrupter is analyzed, the position is analyzed from the signal which is received by photo interrupter.

1. はじめに

情報支援が浸透し必要なコンピューティングがその時、その場所で容易に手に入るような社会、ユビキタス社会が実現されると、ユーザはさまざまなインタフェースを介して情報の入出力を行う。その際、画一化されたインタフェースだけではなく、その場に最適化され、効果的な情報の入出力が可能となるインタフェースが求められる。このようなインタフェースは、単に情報の入出力が容易になるだけではなく、情報の入出力行為そのものを効果的に演出し、ユーザに新しい発見を提供することを可能にする。このような仕組みを実現するうえで重要となるのは、基本的な機能は同一でも多様なデザインを可能とし、必要に応じて機能を組み合わせることができる端末やセンサの仕組み、必要に応じて情報機器が組み合わせられる環境などである。

このような仕組みが実現されると、ユーザは情報端末を通じて要求を環境に伝えるだけではなく、環境が必要に応じてユーザの位置や行動を設置された多種多様なセンサシステムで検出できるようになる。また、専用の端末を通じてだけではなく、ユーザの要求や状況、サービスの内容に応じて環境を構成する情報家電やロボットなどのさまざまな情報機器を組み合わせさせて情報を提示できるようになる¹⁾。

このような環境を実現する際に重要な要素の1つとして、ユーザや環境を構成する情報機器の位置を環境が容易に把握することができる仕組みがある。そこでこれまでユーザやものの位置を検出する方法として、IDタグによる手法や動画撮影カメラと画像解析技術によるマーカの計測、超音波などによる距離測定などの方法が提案されてきた。しかし、これらの方法は精度が計測にかかる時間に依存していたり、装置構成が複雑になったり、使用可能な環境の制約が大きかったり、高性能なコンピュータによる解析・処理が必要になったり

†1 東京大学大学院工学系研究科

Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

†2 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科附属メディアデザイン研究所

Media Design Institute, Graduate School of Media Design, Keio University

†3 電気通信大学大学院電気通信学研究所知能機械工学専攻

Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, The University of Electro-Communications

†4 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

Graduate School of Media Design, Keio University

†5 JST ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクト

JST ERATO IGARASHI Design UI Project

し、簡便に利用できるとはいいい難いものであった。

本稿では一定の位相差を保って同じ周期で点滅する2つの面光源を用いて、特定の方向に位相差が変化する信号場を空間上に展開し、受光素子で信号を計測することで位置の検出を行う手法を提案する。この手法は装置構成が簡便であり、カメラ撮影のようなフレームレートに依存せず、高速で連続的に位置を検出することを可能とする。

本稿は、続く2章において本研究の関連研究について述べる。3章において提案する手法について説明する。4章において提案した手法の実証を目的とする評価実験について報告する。5章において考察として提案手法の応用と今後の課題についてまとめる。

2. 関連研究

2.1 位置検出手法

コピキタス・コンピューティング分野やヴァーチャル・リアリティ分野などにおいてこれまでさまざまな位置検出手法が提案されている。いずれの手法でも環境側が「どこに、なにが」あるのかを把握するために行われる。アクティブ型やパッシブ型のIDタグ、2次元バーコードなどの画像マーカをユーザやオブジェクトに付与し環境に設置した多数のIDタグリーダやカメラで検出する、もしくは逆にIDタグや画像マーカなどを環境に埋め込み、IDリーダやカメラをユーザやオブジェクトに取り付ける手法などが提案されている。

2.1.1 IDタグ

IDタグのIDは一意である。そこでユーザやオブジェクトにIDを付与し、環境に設置された複数のIDタグリーダで検出し、その結果や履歴を統合し、分析することでIDの位置や行動を推定することができる。中村らは室内でユーザに赤外線発信型のタグを装着し、環境側に設置した複数のID受信装置でIDを受信し、ユーザの位置や向いている方向を検出・推定する手法を提案している²⁾。楠らはRFIDタグリーダがグリッド状に埋め込まれたテーブル型インタフェースを提案している³⁾。平井らはユニットパスのさまざまな場所にRFIDリーダを埋め込み、RFIDを付与したふるおけなどの入浴用具の位置を検出することで浴室内のユーザの状況を推定する手法を提案している⁴⁾。

これらの手法の場合、位置検出のための環境は多数の読み取り装置とそれらを接続しデータを集積するためのネットワーク、IDの位置を推定するために必要となる読み取り装置の場所情報、推定のためのソフトウェアなどのさまざまな要素によって構成され複雑である。また、それらを実際組み合わせて構築するにはそれぞれに関して高度な知識が必要となる。

一方、これらとは逆の手法として環境に埋め込まれたIDタグを読み取り装置で検出する

手法が提案されている。ユーザやものに読み取り装置を搭載した端末を付与し、検出されたIDを端末IDとともに環境側に伝えることで環境側が端末の位置を把握することができる⁵⁾。しかし、連続的に位置検出を行うためには実空間上での位置と対応付けられたIDタグを高密度で埋め込む必要がある。また端末には読み取りのための装置やネットワークで通信するための仕組みが必要となる。

2.1.2 画像マーカ

印刷された特殊な画像をカメラで撮影し、画像の種類や埋め込まれたIDの検出と同時にカメラの画角内での位置や大きさ、傾きなどを認識する手法が提案されている^{6)–8)}。しかし、画像マーカには一定の大きさが必要となる。明るさの変化する環境では使用が難しいなど使用環境が制限される、またカメラを用いるためIDの検出と位置計測の速度が動画撮影時のフレームレートに依存する。小さなバーコードを検出し、計測するためには高解像度のカメラが必要となる。加えて撮影された画像からバーコードを検出する際、高性能なコンピュータが必要となる。

2.1.3 空間への情報重畳による位置計測

前述とは考え方の異なる手法として、ディスプレイやプロジェクタなどの画像提示装置を用い、実世界に光学パターンを重畳して提示し、受光装置でパターンを読み取ることで位置の計測を行うDisplay-Based Computing (DBC)^{9),10)}やRFIG¹¹⁾が提案されている。これらの手法の場合、IDは受光装置が組み込まれた装置が位置情報を環境に送信する際に環境側に伝えられる。

DBCはパターンの提示に単純な光学系を用いることが可能である。通常の実空間や顕微鏡下のような微小空間にも投影などが可能である¹²⁾。しかし受光装置を高速で動かすためには大きな光学パターンやパターンの切替えが必要になる¹³⁾、最初にキャリブレーションを行い、受光装置の絶対位置を把握する必要があるなど、使用に際しての制約条件がある。またディスプレイやプロジェクタで目視できる指標を環境に投影するため、位置計測のための映像が目視可能である。一方、RFIGはプロジェクタを用いて空間にGraycodeを応用した明暗パターンを順次投影し、受光装置で明暗を読み取る。これによって、投影範囲内の位置をビットの列としてエンコードすることができる。しかし、徐々に細くなるパターンを投影するため、1回の計測にbit長分の投影フレームが必要となり、高速な検出が難しい。

2.2 信号場を用いた位置検出

信号の位相差を利用して位置を検出する手法として、電磁気による手法としてレゾルバやポヒマス¹⁴⁾がある。また光による手法として近接センサ¹⁵⁾や3次元位置姿勢センサ¹⁶⁾が

提案されている。

電磁気による手法の場合、強い磁場を環境側に設置した装置で発生させ、受信機に組み込まれたコイルを用いてそれを検出することで位置の計測を行う。しかし、たとえばビルの鉄筋のような金属などが環境にあると計測に影響が及ぶなどの問題から、利用できる環境に制約がともなう。対して光を用いる手法の場合、日光下では使用が難しいという問題と遮蔽の問題があるが、これらは目視で容易に確認できる要素であり、利用者にとって問題として容易に把握することができる。光による手法のほうが容易である。

しかし近接センサは近距離でしか使用できない。位相差を検出してから距離を算出するまでに計算コストがかかる。また、位置姿勢センサは位相差を算出するために光源の点滅周期と同期したサンプリングを行う必要がある。

これらに対してレゾルバは使用している媒体は異なるが位相差を角度に換算すればそのままステータの角度となる。サンプリングレートは信号源の駆動に対して独立である。しかし先に述べたように磁気による方式は精密機器などに影響を与えることがあり、利用できる環境に制限が生じる。

3. 提案手法

本提案手法では、一定の位相差を保って同じ周期で明滅する2つの面光源を用いて特定の方向に位相差が変化する信号場を展開する。本提案手法は以下の3つの原理によって実現される。

- 有限の大きさを持つ面光源の照射する光には指向性があるため、光の強度は受光素子との距離が一定で、受光素子がつねに面光源の中心を向いているならば、受光素子の受信する光の輝度は面光源と素子との角度に応じて変化する。
- 複数の光源から出力された光が重なった場所を計測すると合成された光が計測できる。
- 同一周波数、同一波形で位相のみ異なる2つの信号を合成すると、2つの信号の強度の比に応じて位相のみずれた信号が得られる。

これらの原理から実現される1軸の角度検出システムを図1-(a)に示す。また、角度検出システムでの、面光源と受光素子の角度によって生じる輝度の変化に相当する変化を空間方向にマスクパターンを用いて与えることで直線方向に位相差を展開するシステムを実現することができる(図1-(b))。

3.1 角度検出システム概念

図1-(a)において、面光源 S_1 、および S_2 の輝度をそれぞれ $A \sin(\omega t)$ と $B \cos(\omega t)$ (A ,

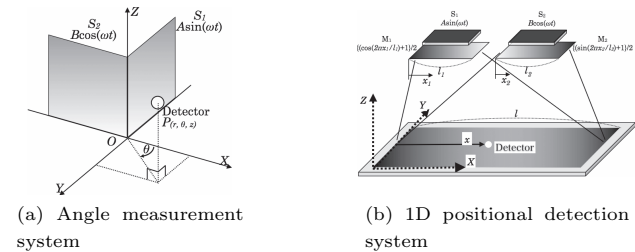


図1 位置検出システム

Fig. 1 Positional detection system.

B は振幅, ω は変調角周波数) で点滅させる。ただし輝度は負にならないため、正のオフセットを設けて交流分を正弦波状に変化させる。以下の記述ではこの交流による変化分のみ注目するものとし、今後、他の光源の輝度を交流で変化させる場合も同様とする。

原点 O 、 X 軸、 Y 軸、 Z 軸、回転角度 θ を図1-(a)のように定める。このとき $X, Y > 0$ (Z は一定)となる領域に配置した受光素子で計測される輝度 L_s は式(1)で表される。

$$L_s = A \sin(\omega t) \times \cos \theta + B \cos(\omega t) \times \sin \theta \quad (1)$$

$$= \sqrt{A^2 + B^2} \sin(\omega t + \phi)$$

ただし、位相差 ϕ は $\phi = \tan^{-1}(B \sin(\theta)/A \cos(\theta))$ であり、 $A = B$ とできれば $\phi = \theta$ 、すなわち X 軸正方向からの角度 θ が受光素子での合成信号と光源の駆動信号との位相差に等しくなり、等位相面が XY 平面の第1象限に Z 軸中心の放射状に展開する。このときの位相差 ϕ は位相検波により適宜計測可能であるため、光源の変調周波数に依存しないサンプリングレートを確保することができる。

また、式(1)では、受光素子の指向性は考慮していない。受光素子の全面に拡散板を取り付ける受光素子として無指向性の球状太陽電池などの素子を用いることで指向性の問題を排除できる。

3.2 1次元位置検出システム概念

1次元位置検出システムでは図1-(b)に示すように、光源の向きが平行になるように配置し、光源 S_1 、および S_2 の輝度をそれぞれ $A \sin(\omega t)$ と $B \cos(\omega t)$ (A, B は振幅, ω は変調角周波数)で駆動させる。2枚のマスク(M_1, M_2)は同一の方向へ 90 [deg]の位相差を保って正弦波状に、2分の1波長分変化する。ここではそれぞれ、 $\{\cos(2\pi x_1/l_1) + 1\}/2$ および $\{\sin(2\pi x_2/l_2) + 1\}/2$ の割合で輝度を透過させるものとする。ただし、 l_1, l_2 は各マスクの濃度が変化している方向の幅、 x_1, x_2 は同一方向で、各マスクの濃度が変化してい

る軸方向の端からの距離とする。

このとき、2つの光源からマスクを透過した光がマスクの濃度が変化する方向で同じ幅となって重なる面を考える。この面の幅 l とその方向の端からの距離 x を図 1-(b) のようにとると、面上に配置した受光素子で計測される輝度 L_l は式 (2) で表される。

$$\begin{aligned} L_l &= \frac{1}{2}A \sin(\omega t) \times (\cos(2\pi x/l) + 1) + \frac{1}{2}B \cos(\omega t) \times (\sin(2\pi x/l) + 1) \\ &= \frac{1}{2}\sqrt{A^2 + B^2} \sin(\omega t + \phi) + \frac{1}{2}\{A \sin(\omega t) + B \cos(\omega t)\} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{B \sin(2\pi x/l)}{A \cos(2\pi x/l)} \right)$$

$A = B$ のとき $\phi = 2\pi x/l$ 、つまり投影面内における 1 次元上での位置 x が合成信号と光源の駆動信号との位相差で表せることになる。この場合、等位相面はなく、等位相となる直線が投影面上の X 軸に対して垂直に存在している。位相差 ϕ に関しては角度検出システム同様、光源の変調周波数に依存しないサンプリングレートを確保することができる。

3.3 提案手法の補足

3.3.1 光源の同期

提案する手法の原理は、光源の明滅が同期する必要がある。明滅の同期をとる方法としては、コピキタスコンピューティングのための情報環境の中であれば、ネットワークを介して同期のための信号や情報をやりとりする方法がある。ネットワークがない場合は、無線ラジオを用いた同期信号のブロードキャストが想定される。また、一般家庭などで使用される電源は一定周波数の交流波であることから、光源を駆動するための電源を同一の系から取得している場合には、同期のための信号源として使用することもできるだろう。

3.3.2 光源と受光素子の同期

位相差を検出するためには、受光素子が受光した結果得られる信号のほかに、比較元として面光源と同期した信号が必要である。計測装置と光源との同期は光源間の同期と同様の方法で実現できる。電磁波が使用できない場合には、信号場を生成するための光源とは異なる波長で明滅する光源から、同期のための信号をブロードキャストし、計測用のものとは別途用意した受光素子と波長に対応した光学フィルタを用いて、同期信号を取得する方法がある。受光素子が 1 つしか使用できない場合は、信号場を生成するための光源と同期信号をブロードキャストするための光源の明滅に異なる変調を、受光素子が受信した信号からそれぞれをバンドパスフィルタなどを用いて分離する方法がある。

3.3.3 受光素子の指向性

式 (1) および式 (2) は、受光素子の指向性を考慮していない。素子の指向性は、受光素子として球状の太陽電池を使用したり、受光素子の前面に拡散パネルや極小の穴（ピンホール）を開けた板を設置したりすることで回避することが可能である。もし受光素子として指向性のある素子を使用する必要があるならば、角度検出システムは、2つの光源からの光が受光できる方向を向いている必要がある。至近距離においては、光源の指向性が最も高くなる方向が光源 S_1, S_2 の交線に向いている必要がある。しかし、光源と受光素子との距離が離れるにつれて、2つの光源と受光素子のなす角度が小さくなり、受光素子の指向性の影響は縮小する。1次元位置検出システムにおいて、指向性のある受光素子を使用する場合、理想的には、受光素子は指向性が最も高くなる方向が計測面に対して垂直となっている必要がある。理想的な状態に受光素子の方向を設定できない場合は、実際の位置と計測結果の間にずれが生ずる。しかし、本章の冒頭において述べたように、適切な素子を選択する、もしくは拡散パネルなどを用いることでずれは解決可能である。

4. 評価実験

4.1 検証システムの実装

提案の検証を目的に実装した角度検出システムについて説明する。

4.1.1 面光源

実装するシステムでは、光源として広い指向性を持つチップ LED をアレイ状に並べ、面光源の代用とした。LED にはシチズン電子株式会社製赤外 LED「CL-190IRS-X」を用いた。LED アレイによる面光源の概観を図 2 に示す。また LED チップの指向性を図 3-(a) に示す。

3章において提案した基本原理では光源を正弦波で駆動しているが、LED の輝度を正確に正弦波状に変化させることは容易ではなく、また装置構成も複雑になる。そこで実装にお

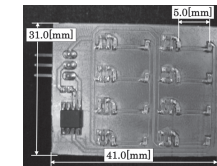


図 2 チップ LED アレイによる面光源
Fig. 2 Plane light sources with chip LED-array.

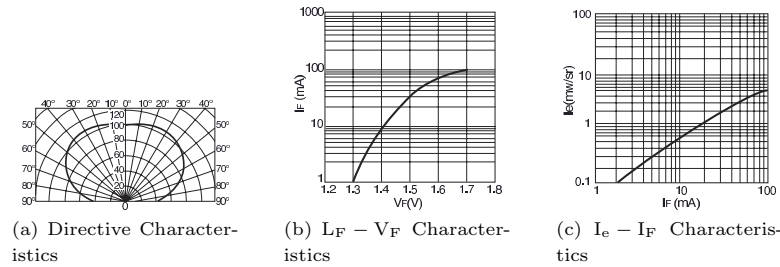


図 3 CL-190IRS-X の特性
Fig. 3 Characteristics (CL-190IRS-X).

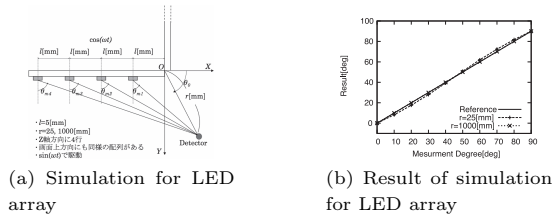


図 4 LED アレイの場合のシミュレーション
Fig. 4 Simulation for LED array.

いては矩形波で LED を明滅し、受光部でフィルタを用いて高調波の遮断をした。具体的には、光源駆動用信号源には Tektronix 社製ファンクションジェネレータ「AFG 3022」を使用し、0~5[V]の範囲で周波数 1[kHz]，duty 比 0.5，位相差 90[deg]となる 2つの矩形波を生成し、それぞれの光源を駆動した。LED の電気的な特性を図 3-(b)，(c) に示す。

LED アレイを光源として用いる場合、検出距離を近づけすぎると、面光源を使用した場合と理論値に差が生じる。そこで、原点からの距離 25[mm]と 1,000[mm]でシミュレーションを行い、LED アレイでの理論値と理想的な面光源による理論値との誤差について検討した。計測には、後述する受光部で使用する受光素子を用いた。

LED アレイの概略を図 4-(a) に示す。受光素子の配置角度を 10[deg]ずつ変化させた場合の結果を図 4-(b) に示す。距離が 1,000[mm]であれば理論値(実線)との誤差が非常に小さくなる。そこで、今回のシステムでは光源と受光素子の距離を 1,000[mm]と設定し実験を行った。

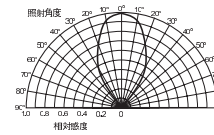


図 5 受光素子の指向性 (TPS615)
Fig. 5 Directive Characteristics (TPS615).

4.1.2 受光部

本実装では受光部に搭載した受光素子には東芝セミコンダクタ社製フォトトランジスタ「TPS615」を使用した。この素子は指向性を持つ(図 5)。3.3.3 項において検討したように、理想的には受光素子として指向性のない素子を使用することがのぞましい。しかし、球状の太陽電池は実験の段階では入手が難しくまた、電気的特性が不明である。そこで受光素子として指向性のあるものの電気的特性が既知である TPS615 を使用した。またピンホールなどを使用することで指向性の影響を抑えることができるが、ピンホールの大きさや、ピンホールと受光素子の位置なども実験のパラメータになってしまう。この実装は基本原理の確認を目的とするものでピンホールの大きさなどのパラメータは本実験において本質的な要件ではない。そこで実験では受光素子が光源の交線方向をつねに向くように受光素子を設置した。

また、2つの面光源と受光素子は同期する必要がある。本提案の前提となるコピキタス・コンピューティングが実現されるような環境下においてはネットワークを介した通信や無線ラジオなどを用いた同期が想定される。しかし、本実装は基本原理の検証を目的とするものである。そこで、電氣的に信号をそれぞれに送り同期をとることとした。

光源は装置の簡単化のために矩形波で駆動させることから、高調波成分の除去が必要となる。また環境光はノイズとなる。そこでこれらのカットするためのフィルタ、および位相差検波回路用素子としてエヌエフ回路設計ブロック社製位相検波器「CD-505R2」を使用した。

CD-505R2 には入力差動アンプ、2つのポスト増幅器、バンドパスフィルタ、移相器、位相検波器、ローパスフィルタが含まれており、外付けの抵抗やキャパシタによって各回路の特性を決めることができる。本システムでは入力差動アンプを非反転増幅器、ポスト増幅器は半固定抵抗器で調整可能な信号増幅器、バンドパスフィルタは中心周波数を 1[kHz]、移相器は半固定抵抗器で調整可能とした。位相検波器は矩形波を参照信号としてバンドパスフィルタを通過した信号との内積を取り、その後、ローパスフィルタを通すことで直流として出力する。

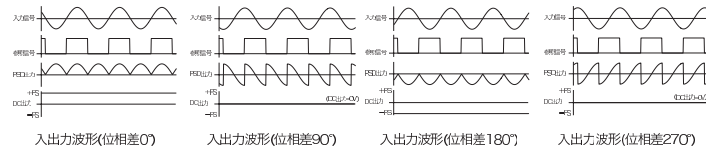


図 6 CD-505R2 の出力
Fig. 6 Output of CD-505R2.

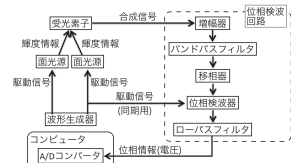


図 7 角度検出システムブロック図
Fig. 7 Block diagram.

図 6 に入力信号ごとの位相検波器からの出力例を示す。

このように、0 [deg] から 90 [deg] への変化と 0 [deg] から 270 [deg] への変化、および 180 [deg] から 90 [deg] への変化と 180 [deg] から 270 [deg] への変化において直流出力が重複しており、180 [deg] 分の变化しか検波することができない。しかし本システムで生じる位相差は最大で 90 [deg] のため、移相器で変化する範囲の上下限を調整すればこの点は問題にならず、そのまま使用可能である。

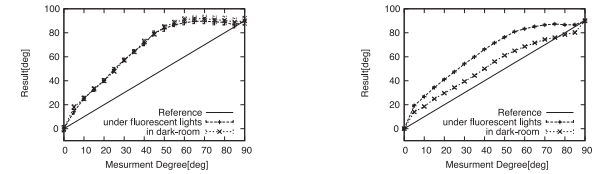
もともと 90 [deg] の位相が加わる仕様のため、本システムではそこから半固定抵抗器で調整を行い、配置角度を 0 [deg] とした際に図 6 右下に示す位相差 270 [deg] となるようにした。ここから配置角度を 90 [deg] まで変化させた場合、位相差 0 [deg] の状態へ移ることになり、理論上、出力電圧は配置角度に比例して増加するようになる。

そして、最終的な出力電圧値が位相差に比例して増加するように移相器を調整した。なお、出力電圧は最大抵抗値 1 [MΩ] の半固定抵抗器で電圧に変換した。また位相検波器の出力となる直流電圧は Interface 社製 12 bit A/D 変換ボード「PCI-3166」を用いて PC へ取り込んだ。作製したシステムのブロック図を図 7 に示す。

4.2 評価実験

4.2.1 実験概要

今回実装したシステムの性能評価として、受光素子の位置を固定したときの角度検出精



(a) Arrangement angle and result
(b) After noise measures are applied

図 8 計測結果

Fig. 8 Arrangement angle and result.

度、および実際の配置角度に対する検出角度の線形性を確認することとし、以下のような実験を行った。

原点、X 軸、Y 軸を図 1-(a) と同様に設定し、受光素子までの距離を一定に保った状態で光源の角度を変化させることで、受光素子の配置角度を移動させた場合と等価な条件とした。また、原点から受光素子までの距離は 1,000 [mm] である。

照明条件は暗室と蛍光灯下の 2 種類、受光素子の配置角度は 0 [deg] から 90 [deg] まで 5 [deg] ごとに 19 点、光源に対する受光素子の高さは LED アレイの中央とその上下 50.0 [mm] の 3 種類（以下、それぞれを上段、中段、下段とする）とした。各角度におけるサンプリングレートは 100 [Hz]、サンプリング件数は 6,000 件とし、全データの平均をシステムによる検出角度とした。

なお、 θ [deg] における検波回路からの電圧値 V_θ から検出角度 ϕ への変換は、 θ [deg] での出力値を V_θ 、90 [deg] での出力値を V_{90} として式 (3) によって行った。

$$\phi = \left(\frac{V_\theta - V_0}{V_{90} - V_0} \right) \times 90 \quad (3)$$

4.2.2 実験結果

前項において示した条件の下、蛍光灯下と暗室で受光素子を中段に配置して得られた結果を図 8-(a) に示す。破線と点線、エラーバーはそれぞれシステムによる検出角度と標準偏差を、また実線は理論値を表している。

図 8-(a) から、角度算出のための仮定として固定した 0 [deg]、および 90 [deg] 以外すべての位置で検出角度が理論値を大きく上回っていること、60 [deg] 以上の位置では検出角度が変化せず飽和し、さらに標準偏差が高くなっていることが分かる。これらの原因として、光源からの信号が距離減衰を受けたことによる相対的なノイズ成分の増加があげられる。そ

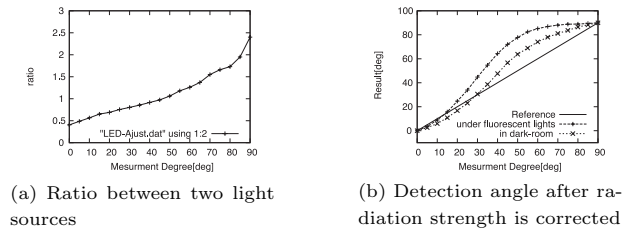


図 9 放射強度比
Fig. 9 Ratio between two light sources.

のため、バンドパスフィルタで除去できないオフセットが検波回路への入力信号に加わり、その後のローパスフィルタからの出力電圧が配置角度の変化に対して線形に変化しなくなったと考えられる。このようなノイズ対策として検波回路の CD-505R2 入力ピン直前にキャパシタをはさむこととした。図 8-(b) にノイズ対策後の結果を示す。

図 8-(b) について説明する。図 8-(a) 同様、破線と点線、エラーバーはそれぞれシステムによる検出角度と標準偏差を、また実線は理論値を表している。低周波ノイズ対策を施していなかった図 8-(a) のグラフよりも理論値に近い結果が得られていること、各点における標準偏差が低くなっていることが分かる。したがって、前述のノイズに関する考察と対策は妥当であった。

4.3 放射強度の指向性による補正

ノイズ対策を施した結果、検出角度の誤差は改善されたが、依然出力結果は線形とはいえず、偏りが見られる。この偏りは光源から各配置角度における受光素子への放射強度が理論式と異なることが大きな原因である。そこで、LED アレイ基板を片方ずつ点滅させたときの受光素子の出力から、配置角度ごとに 2 つの光源の放射強度の比を求めて検出角度を補正した。一方の光源のみを点滅させ、中段に固定した受光素子を 0 [deg] から 90 [deg] まで 5 [deg] 刻みに配置し、各配置角度で検波回路のバンドパスフィルタ出力の振幅 [V] を計測した。そこから配置角度 θ における補正角度 ϕ_c を、放射強度比を C_θ 、検出角度を ϕ_θ として式 (4) により算出した。算出結果を図 9-(a) に示す。また図 9-(b) に補正後のデータを示す。

$$\phi_c = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi_\theta}{C_\theta} \times \tan \theta \right) \quad (4)$$

図 9-(b) において、破線と点線が補正後の検出角度を、そして実線が理論値を表してい

る。補正後のグラフは S 字曲線を描いており、補正前と比較して明確な傾向が見られる。このデータに対して n 次関数によるフィッティングを行えば、そこで得られた関数から理論式への変換関数を算出することができる。放射強度比による補正はハードウェア構成に依存しているため固定であり、実際の位置検出を行う際には得られた電圧値にこれらの変換式を適用するだけで角度が検出可能なことから、高速な応答が期待できる。

4.4 1次元位置検出システムのキャリブレーション

前章において述べた角度検出システムでは面光源と受光素子のなす角度によって受光素子の受光する光の強度が変化する。この角度による変化に相当する変化を平面上に展開し信号場を作り、それを受光素子で計測することによって直線 (1次元) での位置の検出が可能となる。

このようなシステムを実現する際、キャリブレーションは重要な技術となる。1次元位置検出システムにおいてはキャリブレーションには 2 つの方法がある。1 つはすでに展開されている信号場において、使用する範囲とズレなどの状態を計測し、その結果を用いて受光素子の計測した信号そのものや信号処理の結果を補正する方法である。もう 1 つは光源の設置時に光源の向きなどを信号場を展開する空間に対して調整し、正しく設置する方法である。

前者の場合、位置検出システムを使用する際に光源の設置にかかる作業は少ない。計測の結果に対する補正のための計算は、受光素子の組み込まれた装置が少ない場合は問題とはならない。しかしコピキタス・コンピューティングのための環境では、多数の光源と受光素子の組み込まれた情報機器を使用する可能性がある。光源ごとに補正を行う場合、どの光源からの信号かを分離し、それぞれについて処理をする必要が生じる。一方、後者の場合、設置の際の作業は増える。しかし、いったん設定してしまうと受光素子の組み込まれた装置の設定をする必要がない。そこで本稿では、後者の光源のキャリブレーションの方法について検討する。

4.4.1 信号場のずれ

計測対象となる空間に対し、信号場を未調整で照射すると空間に対して位置や向きのずれが生じる。本項ではこのずれの原因について検討する。

以降、説明の便を図るため、信号場が展開されている平面を XY 平面とする。各光源より提示される輝度情報の変化する方向を X 軸と定める。 XY 平面に直交する軸を Z 軸とする。また、投影面に提示される輝度の情報をそれぞれ L_1, L_2 とする。光源とマスクパターンを S_1, S_2, M_1, M_2 とする (図 1)。

X, Y, Z のそれぞれを軸軸とする光源の傾きは、 L_1, L_2 を変形させる。また、傾きに

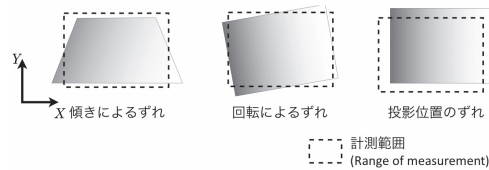


図 10 傾き・ずれの例

Fig. 10 Samples of inclination and shear.

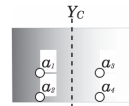


図 11 センサの位置

Fig. 11 Position and layout of sensors for calibration.

よるずれのほかにも L_1, L_2 の提示位置がずれる場合がある。ずれは X 軸, Y 軸の各方向に発生する。加えて、 Z 軸のずれは L_1, L_2 の大きさに影響を与える。各軸での傾きによる L_1, L_2 の変形の例を図 10 に示す。

4.4.2 ずれの調整手法の提案

X, Y 軸のそれぞれを中心とする傾きの場合、 L_1, L_2 が投影される平面と光源 S_1, S_2 が水平かつ平行であるならば、水平器を用いることで調整が可能である。しかし、 L_1, L_2 が投影される面が傾斜しているような場合水平器は使用できない。また、 Z 軸を中心とする傾きによるずれの場合、水平器での計測はできない。加えて、垂直方向のずれの調整は水平器ではできない。これらから、水平器を用いない調整方法が必要となる。

そこで、本稿では杉本らの提案する DBC の手法を応用した調整の手法を提案する。

DBC を応用した計測位置 a_1, a_2, a_3, a_4 を図 11 に示す。 a_1, a_2 および a_3, a_4 は投影される計測範囲の中線 Y_c をはさんで線対称な位置にある。また a_2, a_4 は計測範囲の下端にあるものとする。

4.4.3 傾きの調整

X 軸、および Z 軸を中心とする傾きは、 $a_1 - a_2$ および $a_3 - a_4$ の絶対値が最小となるように S_1, S_2 の傾きを調整することで補正される。また $a_1 - a_3$ および $a_2 - a_4$ の差が最小となれば Y 軸を中心とする傾きは調整される。

4.4.4 平行方向のずれ

先に述べた手法により傾きによるずれが調整されているならば、 X 軸については a_1, a_2 および a_3, a_4 において、2 つの光源のそれぞれから提示される光の強度の差が最大となればよい。しかしマスクパターンによって両端ではいずれかの光源からの光は完全に遮蔽されるため、差を求めることはできない。

そこで $L_{1,2}$ の投影位置が適切に設定されている場合 Y_c に対して L_1 と L_2 は線対称となることに着目すると、 L_1 での a_1 と L_2 での a_3 、および L_1 での a_3 と L_2 での a_1 が同じ値となる。これらを計測し差を最小とするように調整することで、 X 軸のずれは修正される。またこの条件は L_1, L_2 の X 軸方向の大きさが同じときのみ成り立つ。したがって、 Z 軸方向のずれもこれらの値をもとに修正することができる。なお、 Y 軸方向のずれの修正は、 a_2, a_4 に着目することで調整することができる。

5. 考 察

5.1 提案手法の応用

5.1.1 2次元位置検出システム

面光源の対を 2 つ、信号場の展開する方向が直交するように設置することで、2次元での計測が可能となる。面光源の対ごとに異なる周波数で明滅させ、受光部で合成光を受信し、直交検波や急峻なバンドパスフィルタなどの方法で周波数ごとの位相差を検出すればそれぞれの面光源の対が対応する軸での位置や角度の検出ができる。光源と受光部は位相を検出するための信号が同期できればよいため、同期方法を工夫することで、1 つの光源の対に対して多数の受光部を持つ装置を使用することができる。ゲーム機器などのインタフェースを構成するシステムの一部として利用できるだろう。

5.1.2 コピキタス端末への組み込み

本提案手法は、屋内のコピキタスコンピューティングが可能な環境で利用する場合であれば、照明機器に光源を組み込み、環境を構成する情報機器に受光素子を搭載した装置を組み込むことで機器の位置を簡便に計測することができるようになる。

CoBIT^{17),18)} のような情報源の方向をユーザが知覚できるコピキタス情報端末と組み合わせることで、従来の情報端末ではユーザが情報源の方向を知覚できなかったのに対して、端末自体が情報源の方向を把握することができるようになる。

また、可視光通信技術などと併用することによって、多数の光源を識別し位置の検出を行うことができるようになるだろう。工場や屋内のような場所で移動するロボットなどの位置

計測といった目的にも利用できる。

5.2 今後の課題

5.2.1 フィルタの実装

1次元位置検出システムにおいても光源と受光素子のなす角度による光の減衰がともなう。フィルタのグラデーションパターンの設計においてそれを考慮する必要がある。またグラデーションの生成方法として、一様に色が濃くしていく、ドットパターンの密度を変化させる、スリットの大きさの変化させるなど、さまざまな方法がある。これらについて別途実験を行う必要がある。

5.2.2 システムの簡略化

実装したシステムでは位相の検出にアナログ回路を用い、位相差を電圧として得ている。これをDSPユニット内での演算などに置き換えることで受光部の部品構成などをコンパクトにすることが可能である。さまざまな機器に組み込んで使用する場合にはコンパクト化は重要な課題となる。

6. ま と め

本稿では高速、かつ安価で場所を選ばず使用可能な位置検出システムとして、光源の輝度に時空間変調を加えることでできる位相変調型の信号場を利用する手法を提案した。提案の検証を目的に2つの面光源と受光素子を用いた角度検出システムを実装し評価を行った。また1次元位置検出システムを実現する際重要となる、投影面の調整方法について検討した。最後に今後の課題についてまとめた。

謝辞 本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的基礎研究推進事業（CREST）における研究領域「デジタルメディア作品の制作を支援する基盤技術」の研究課題「オンラインゲームの制作支援と評価」の支援のもとで実施しました。また、本稿を執筆するにあたり、名城大学の柳田康幸先生、東京大学の杉本雅則先生に多大なご支援とご指導を頂戴いたしました。ここに、心より感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 常盤拓司, 楠 房子, 矢入 (江口) 郁子, 西村拓一, 岩竹 徹: インタラクティブボードとコピキタス空間の協調, 人工知能学会全国大会 2004, 人工知能学会 (2004).
- 2) 中村嘉志, 並松祐子, 宮崎伸夫, 松尾 豊, 西村拓一: 複数の赤外線タグを用いた相対位置関係からのトポロジカルな位置および方向の推定, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.3, pp.1349-1360 (2007).

- 3) 楠 房子, 杉本雅則, 橋爪宏達: 同時多入力デバイスを用いた電子ボードゲームの構築, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.7, No.4, pp.487-494 (2002).
- 4) 平井重行, 小川浩司: RFID を用いた浴室での行動計測, ヒューマンインタフェース 2005 論文集, ヒューマンインタフェース学会, pp.407-410 (2005).
- 5) 椎尾一郎: RFID を利用したユーザ位置検出システム, 情報処理学会研究報告, ヒューマンインタフェース研究会報告, 社団法人情報処理学会, pp.45-50 (2000).
- 6) Kato, H.: Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system, *Proc. 2nd IEEE/ACM Int. Workshop on Augmented Reality (IWAR'99)*, IEEE/ACM (1999).
- 7) Rekimoto, J. and Ayatsuka, Y.: CyberCode: Designing Augmented Reality Environments with Visual Tags, *Designing Augmented Reality Environments (DARE 2000)* (2000).
- 8) Kaltenbrunner, M. and Bencina, R.: reacTIVision: A Computer-Vision Framework for Table-Based Tangible Interaction, *Proc. 1st international conference on "Tangible and Embedded Interaction" (TEI07)* (2007).
- 9) 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).
- 10) 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・ヒューマンインタフェース研究会報告, 社団法人情報処理学会, pp.53-56 (2006).
- 11) Raskar, R.: Rfing lamps: Interacting with a self-describing world via photosensing wireless tags and projectors, *ACM Trans. Graphics (TOG) SIGGRAPH*, Vol.23, pp.406-415 (2004).
- 12) 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, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, ヒューマンインタフェース学会, pp.93-96 (2007).
- 13) 川本 海, 蔵田武士, 酒田信親, 大隈隆史, 葛岡英明: 光センサと加速度計を組み込んだテーブルトップインタフェース用タグの位置・回転計測手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.13, No.2, pp.207-216 (2008).
- 14) Polhemus: Motion Tracking, 3D Scanning, and Eye Tracking Solutions from Polhemus. <http://www.polhemus.com/>
- 15) 増田良介, 佐々修一, 長谷川健介: 位相情報に注目した光学式近接センサ, 計測自動制御学会論文集, Vol.17, No.9, pp.945-950 (1981).
- 16) 小林 彬, 大山真司: 光学的信号場の利用に関する研究—光学的回転信号場による位置および回転角計測, 計測自動制御学会論文集, Vol.21, No.11, pp.1202-1209 (1985).
- 17) 西村拓一, 中村嘉志, 常盤拓司, 伊藤日出男, 中島秀之, 小山慎哉, 矢入 (江口) 郁子, 猪木誠二: 無電源小型情報端末 CoBIT の音源定位方式および視覚情報提示方式の提案,

日本赤外線学会誌, Vol.13, No.2, pp.43-52 (2004).

- 18) Tokiwa, T., Tokuhisa, S., Honna, Y., Shinozaki, T., Kusunoki, F., Nishimura, T. and Iwatake, T.: Surround CoBIT: A method for presenting auditory information as a virtual acoustic field, *International Workshop on Smart Appliances and Wearable Computing (IWSAWC2004)* (2004).

(平成 20 年 7 月 2 日受付)

(平成 21 年 1 月 7 日採録)



常盤 拓司 (正会員)

2001 年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士課程修了。2007 年同博士課程退学。産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センター特別研究員, 日本科学未来館科学技術スペシャリスト, 東京大学大学院新領域創成科学研究科産学官連携研究員を経て, 現在, 東京大学大学院工学系研究科特任研究員および慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科附属メ

ディアデザイン研究所訪問研究員。実世界指向インタフェースの研究開発に従事。



吉積 将

2008 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。



新居 英明 (正会員)

1995 年東京工業大学大学院理工学研究科博士前期課程制御工学専攻修了。同年株式会社トキメック入社。2003 年 4 月同社退社。2003 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入学。2006 年同大学単位取得退学。博士(工学)。東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻助教を経て, 現在, 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科講師。情報投影技術を利用したヒューマンインタフェースの研究に従事。



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等を経て, 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, 同大学教授, 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。JST ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクトグループリーダーを併任。