

研究種目：若手研究（B）
研究期間：2006～2008
課題番号：18700189
研究課題名（和文）学習による精度補償機能をもつ超高速・高精度光学的ポジションセンサの開発

研究課題名（英文） Development of a high-speed, high-accuracy optical position sensor having the ability of accuracy compensation based on learning

研究代表者

大谷 幸三 （OHTANI KOZO）
広島工業大学・情報学部・准教授
研究者番号：40351978

研究成果の概要：本研究では、光位置センサにおける高速、高精度および高信頼性などの要求に対して、アナログ回路とデジタル回路およびニューラルネットワークを組み合わせた光位置検出原理とその回路構成を提案し、プロトタイプを作成した。実験では、外来光の存在する種々の環境下において、最大線形誤差約1.5%、サンプリング時間約50 μ sで2つの光源位置を同時に検出可能であることを確認した。本センサの適用分野としては、生産ラインにおける3次元外観検査や、室内監視あるいは部品搬送用の自律移動ロボットの視覚などが有効であると考えられる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,200,000	0	2,200,000
2007年度	700,000	0	700,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	150,000	3,550,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：センシングデバイス、光位置センサ、センシング情報処理、環境適応・学習

1. 研究開始当初の背景

スポット光やスリット光を利用した光応用計測において、信号光位置は測定対象の空間位置情報を与える最も基本的かつ重要な要素である。たとえば、三角測量原理に基づくレーザレンジファインダでは、測定対象に照射したレーザ光の反射ビームを光学的ポジションセンサで捕らえ、その検出位置から測定対象の3次元位置を算出する。したがっ

て、光学的ポジションセンサの位置検出精度と検出時間は光応用計測システムの性能を左右すると言っても過言ではない。

このような背景から、光学的ポジションセンサには、(1)複数信号光の同時検出、(2)高速検出、(3)高精度検出、および(4)背景光補償による高信頼性などが要求される。しかし、一般に利用される PSD (Position Sensitive Detector) や CCD (Charge Coupled Device)

は、次のような理由から、上記4つの要求を同時に満たすことはできない。まず、PSDは非分割型の位置検出素子であるため複数信号光を同時検出できない。一方、CCDは多数画素の逐次走査に時間がかかり、PSDに比較すると応答性が大きく劣る。両センサとも外来光を補償する手法はいくつかあるが、補償処理が高速測定の大きな障害となっている。このように4つの要求を同時実現するポジションセンサは存在しないのが実状であった。

2. 研究の目的

本研究では、前述の4つの要求すべてに対応する新たな光学的ポジションセンサの開発を目的とした。申請期間内では、当初構想していたポジションセンサの基本的な仕様に基づき、まずソフトウェアシミュレーションによって動作を検証し、次に、ハードウェアの詳細設計を行うこととした。最終的には、プロトタイプを作成し、実機によりその光位置検出特性を検証していくことを計画した。研究計画の具体的な項目は以下通りである。

- (1)アナログ走査回路の設計と作成
- (2)A/D変換部の設計と作成
- (3)ニューラルネットワークによる外来光補償アルゴリズムの検討
- (4)外来光補償アルゴリズムのハードウェア化
- (5)プロトタイプセンサシステムによる位置検出特性の検証

3. 研究の方法

(1)概要

本研究では、背景で述べた光位置センサに対する4つの要求を、それぞれ次のような方針で実現した。

①複数光位置の同時検出

少数のセンサ素子を2次元配置したアレイ型センサを用い、全画素データを同時サンプルする。ただし、高速化を狙ってセンサ素子数は少数とし、その配置間隔はCCDなどと比較して大きくとる。この場合、空間分解能の低下が懸念されるが、③④に後述する方法により要求される位置検出精度が実現できれば、必ずしも画素数を多くして密に配置する必要はない。

②高速検出

2次元アレイ型センサを並列走査し、位置検出に必要な光入射付近のセンサ素子出力のみを抽出する。並列処理に加え、データを精選することでA/D変換時間の短縮が期待できる。ここでは、並列処理に適したアナログ回路を導入する。

③④高精度検出および外来光に対する補償

機能

外来光によって歪を生じた光強度分布のピーク位置は、少なからず真の光入射位置に対してずれを生じている。そこで本手法では、位置検出にニューラルネットワークを導入し、測定環境における光位置とその光強度パターンとの関係を学習することで、位置ずれ問題の解消を図る。これにより、センサ配置に伴う空間分解能低下の問題も同時に解消できるものと期待される。ここでは、正確性と柔軟性をもつデジタル回路を導入する。

(2)光強度パターンの高速抽出法

アナログ並列処理による2次元アレイ型センサの走査方法を図1に示す。図は、 x, y 方向にセンサ素子を2次元配置したアレイ型センサに、大小2つの光強度をもつ信号光が入射した場合の出力分布を模式的に表している。提案手法では、図のようなアレイ型センサの出力分布から、ピーク付近の光強度パターンのみを抽出する。その走査原理は、以下のような手順となる。

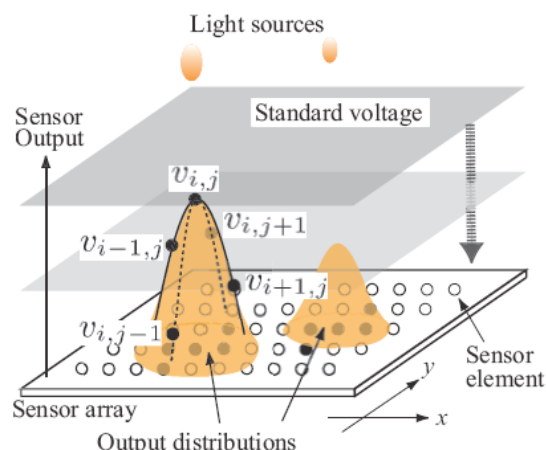


図1：2次元センサアレイの走査方法

①基準電圧の初期設定

まず、全センサ素子の出力電圧よりも大きな電圧を初期値とする基準電圧を設定する。図1では、基準電圧を平面で表している。

②基準電圧降下による並列走査

基準電圧を初期値から一定速度で降下させながら、全センサ素子の出力電圧と並列に比較していく。このとき、 $i \times j$ のアレイ型センサのうち、あるセンサ素子 s_{ij} の出力 v_{ij} と、 s_{ij} に x および y 方向に隣接する4つのセンサ素子 $s_{i-1,j}$, $s_{i+1,j}$, $s_{i,j-1}$, $s_{i,j+1}$ の出力 $v_{i-1,j}$, $v_{i+1,j}$, $v_{i,j-1}$, $v_{i,j+1}$ が条件式(1)と(2)を同時に満たすならば、センサ素子 s_{ij} をピークセンサ素子とみなす。そして、ピークセンサ素子を中心として x, y 方向に十字状に隣接する合計5つのセンサ素子出力を入射光強度パターンとして検出する。

$$V_{i-1,j} < V_{i,j} > V_{i+1,j} \cdots \cdots (1)$$

$$V_{i,j-1} < V_{i,j} > V_{i,j+1} \cdots \cdots (2)$$

同様の比較走査を基準電圧の値が 0 になるまで行い、すべてのピークセンサ素子を 1 回の走査で探索する。探索が終了すると基準電圧を初期値に復帰させ、再び手順①に戻り走査を続ける。検出されたピークセンサ素子付近の画素データは順次 A/D 変換され、後述するニューラルネットワークへ送られる。このように、位置検出に必要なセンサ素子出力のみを抽出することで、無駄な A/D 変換時間やメモリ使用量を抑えることが可能となり、高速処理が期待できる。ただし、このような原理ゆえ、本手法で扱う光強度分布はセンサ受光面で x, y 方向ともにセンサ素子 3 つ分以上の広がりをもつこと、および複数のスポット光が 3×3 センサ素子内に重複しないことが前提条件となる。実用面において、スポット光幅の制約についてはレンズ系の構築で対応可能であるが、スポット光の重複における検出不能問題については本手法の限りではなく、CCD などでも同様のことが言える。

(3)ニューラルネットワークによる高精度位置検出法

本研究では、外来光を含んだピーク付近の光強度パターンと真の信号光位置に何らかの相関があるものと考え、この関係をあらかじめニューラルネットワークで学習しておく、学習に基づいた位置検出を行う。ここで、外来光とは、たとえば室内における蛍光灯の光や窓から差し込む太陽光などが該当する。その光強度は信号光強度の半分以下であり、また、強度変化は時間オーダーのゆるやかなものとする。一般に、スポット光を利用した能動的な光計測では、信号光強度を外来光強度よりも大きく設定することは容易であり、このような前提条件は多くの場合で満たされるものとする。

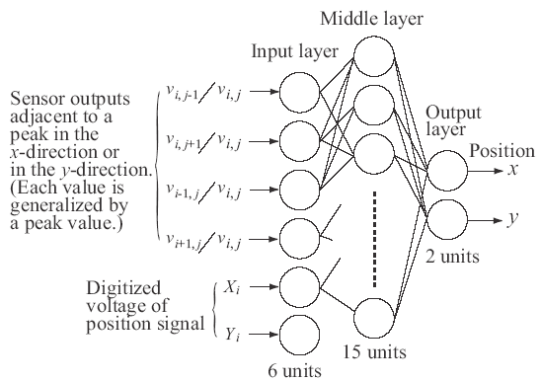


図 2 : ニューラルネットワークの構成

まず、測定の前処理として、測定環境下

設置した 2 次元アレイ型センサで、既知の位置から投影される参照用光源を観測し、その光強度パターンを得ておく。そして、この光強度パターンをニューラルネットワークの理想入力、参照用光源の位置を理想出力とする。アレイ型センサの測定範囲内で、これらの理想入出力のパターンを複数取得しておき、ニューラルネットワークの学習を行う。ニューラルネットワークにはいくつかのタイプがあるが、本研究では、図 2 に示すように、最も基本的かつ単純な 3 層の階層型ニューラルネットワークを用いる。各層のユニット数は、入力層 6 個、中間層 15 個、出力層 2 個である。入力層に与えるデータは、図に示すように、ピークセンサ素子に隣接する 4 つのセンサ素子出力をピークセンサ素子の出力で正規化した値、および後述する位置情報電圧をデジタル化した値である。出力層は x, y 座標値をアナログ値で出力する。学習には誤差逆伝播法を用い、各ユニットの出力関数にはシグモイド関数を用いた。

4. 研究成果

(1)実験方法

図 3 に示すプロトタイプを試作し、開発手法の位置検出特性を測定した。実験では、複数光の同時検出が可能かどうかを検証するため、その最も基本的な場合である 2 点検出実験を行った。そこで、センサアレイ部には、5×5 のセンサ配列をもつ 2 次元フォトダイオードアレイを写真のように 2 台並べて構成した。フォトダイオードアレイの素子サイズは 1.3×1.3mm で、センサ素子間隔は 1.5mm である。各フォトダイオードアレイの有効測定範囲は 4.5×4.5mm となる。

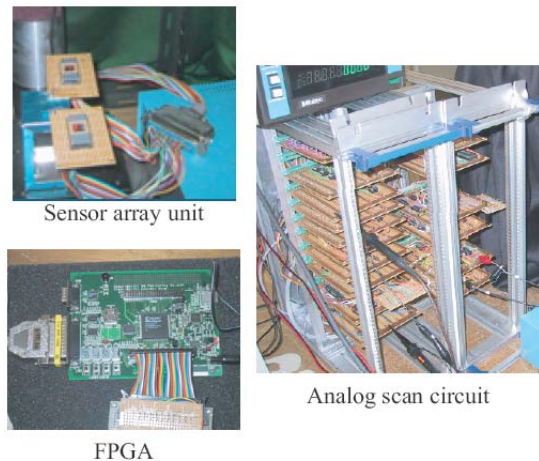


図 3 : 試作システムの概観写真

実験は、比較検討のため開発システムと従来のアナログ式センサシステム、PSD(S1200, 浜松ホトニクス社製)、CMOS イメージセンサ

(SV9M001C, アルゴ社製) を使用し、後述する 3 種類の環境下で、それぞれの位置検出特性を測定した。ただし、PSD は 2 点検出が困難なため 1 点のみの検出とした。開発システムでは、あらかじめ各環境下において、参照光源 LED を精密移動ステージで移動させて教師データを得ておく。そして、精密移動ステージの位置と、その位置で取得した光強度パターンを理想入出力としてニューラルネットワークの学習を行う。理想入出力データは、センサアレイ部の有効受光範囲内を x, y 方向ともに 0.18mm ごとに学習用光源を移動させて取得した。実際の測定は、信号光源を 0.09mm 間隔で移動させて行った。

(2) 測定環境

測定は、下記の環境 A-C の条件下で行った。

- ・環境 A 外来光が存在しない暗室
- ・環境 B 蛍光灯による一様な外来光が存在
- ・環境 C LED によるスポット外乱が存在

図 4 は、環境 A-C で観測した LED スポットの受光分布である。図中の受光分布は、ピーク付近の光強度パターンの違いを明確にするため、それぞれの最大出力値で正規化している。また、図の下方には外来光のみを観測した受光分布をあわせて示している。ここで、外来光は暗室環境で観測した信号光 LED の最大強度で正規化している。この場合、外来光として与えた LED の強度は、信号光 LED の約 40%程度であることがわかる。図から、信号スポット光が同じ位置と輝度で投影されたとしても、センサアレイ部で観測される受光強度パターンは外来光の影響で歪んでいることがわかる。たとえば、環境 C の場合には、信号光のピークがスポット外乱のピークの方へ大きく移動している。したがって、この光強度分布の頂点位置を光入射位置として検出すれば、必然的に位置検出誤差を生じる。

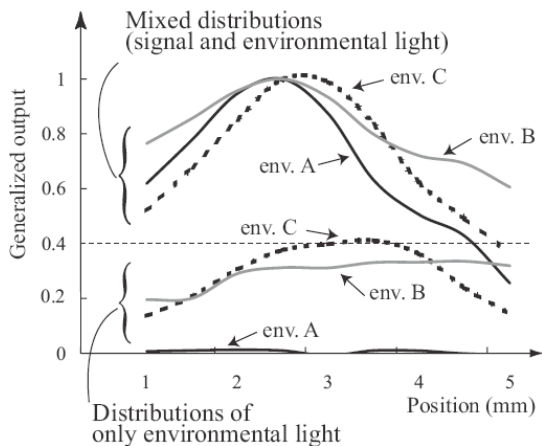
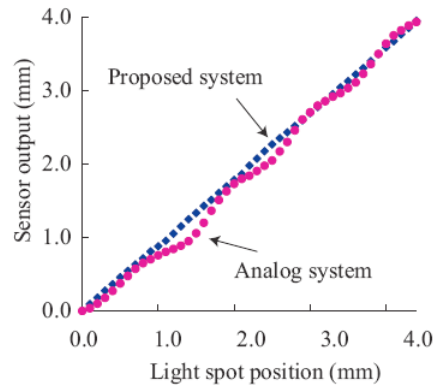
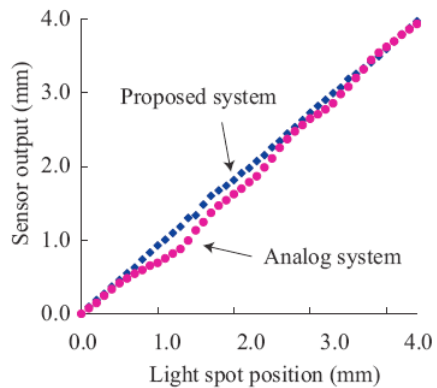


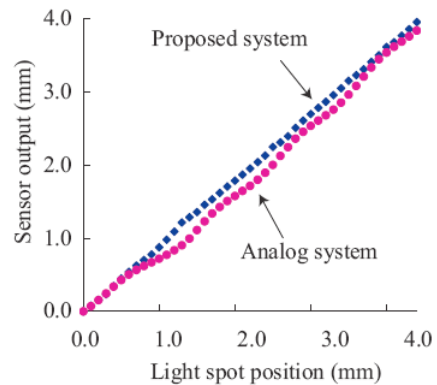
図 4 : 環境 A~C における受光分布



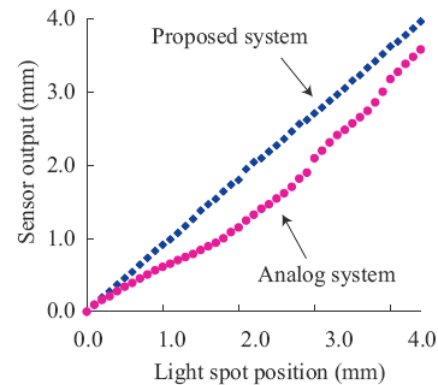
(a) LED 1 in Environment B



(b) LED 2 in Environment B



(c) LED 1 in Environment C



(d) LED 2 in Environment C

図 5 : 位置検出特性

(3) 実験結果

実験では、信号光の強度がスポット外来光に対して約 4.0 倍の LED1 と約 2.5 倍の LED2 を使い、2 つの光源を x 方向に 0.09mm ごとに 3.96mm 移動させたときの線形性を測定した。環境 B, C における、開発システムとアナログ式システムの位置測定結果を図 5 (a) ~ (d) にそれぞれ示す。また、環境 A~C における開発システム、アナログ式システム、PSD および CMOS の最大線形誤差を表 1 にまとめる。ここで、信号光としている LED1 と 2 は、両者の同時検出において、互いが外来光として影響を及ぼしあうことはない。表から、いずれの環境下においても、開発システムの線形誤差は約 1.4%以内に入っており、ニューラルネットワークによって外来光の影響が排除されたものと考えられる。とくに環境 C では、アナログ式システムの最大線形誤差が約 8.8%であるのに対し、開発システムでは約 1.3%まで改善されている。また、PSD では環境 C において最大線形誤差 13.4%となり、スポット的な外来光が存在すると位置検出は困難であることがわかる。

表 1 : 位置検出の最大線形誤差

Sensor	Proposed system		Analog system	
	LED 1	LED 2	LED 1	LED 2
Environment A	1.3%	0.8%	2.8%	2.7%
Environment B	0.7%	1.4%	4.7%	4.1%
Environment C	1.4%	1.3%	3.3%	8.8%

Sensor	PSD		CMOS	
	LED 1	LED 2	LED 1	LED 2
Environment A	0.8%	-	0.9%	1.0%
Environment B	2.2%	-	2.8%	3.5%
Environment C	13.4%	-	3.5%	7.9%

ただし、PSD の場合でも、外来光補償回路等を用いれば精度の改善は見込まれる。しかし、補償回路によってサンプリング時間は数 ms 程度にまで低下し、本来の高速応答特性が損なわれてしまう。同様に、CMOS の場合でも背景光画像を用いた補償処理によって、開発システムと同等の精度が見込まれるが、多数画素データの読み出しと、背景光画像の差分処理に要する時間を考慮すると、画素数や駆動クロックの周波数にも依存するが、やはりサンプリング時間は ms オーダーとなる。一方、開発システムのサンプリング時間は図 5 に示すように、約 50 μ s (20kHz) を確認した。これは、現在までに報告されている高速 CMOS の 10000fps と比較しても遜色ない処理速度である。開発システムでは、前処理としてニューラルネットワークの学習をコンピュータ上で行っているものの、学習後は FPGA 上で処理している。そのため、学習に要する時間を除けば高速測定が可能となる。

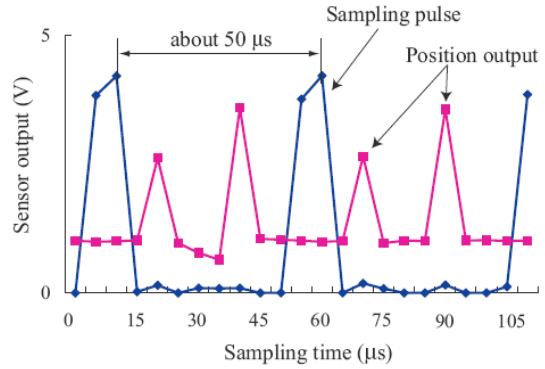


図 6 : サンプリング時間

以上より、開発システムは当初の目標であった、光位置センサに要求される 4 つの要求を同時に実現することができたとと言える。

本センサの適用分野としては、生産ラインにおける 3 次元外観検査や、室内監視あるいは部品搬送用の自律移動ロボットの視覚などが挙げられる。一般に、3 次元概観検査では精度や信頼性を確保する目的で厳しい照明条件を必要とするために暗室を設備するケースが多く、検査装置の導入に関してラインの改装が伴う。既設ラインへの導入が困難であれば、オフラインでの検査工程を設ける場合もある。一方、自律移動ロボットでは、環境光が異なる複数の空間を移動しても、一定の視覚精度が要求される。前者の場合、本センサを適用した 3 次元計測装置を導入すれば暗室の整備が不要となり、既存のラインへ比較的容易に装置を構成することが可能となる。また、後者においては、移動が予想されるフロアの環境光を予め学習しておけば、どのフロアにおいても高精度な位置検出を行うことができる。ただし、いずれの場合においても無数の環境光パターンを学習することは現実的ではなく、学習パターンの増加に伴う誤差の増大が危惧される。そこで、たとえば外観検査では作業時間帯によって FPGA を更新し、その時間帯における環境光を学習したニューラルネットワークに書き換える、また自律移動ロボットでは、ロボットが存在するフロアに応じて FPGA を更新するなどすれば、多くの環境光に対応できるものと考えられる。今後は、このような分野に対する高速高精度な 3 次元計測系への応用が期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① 大谷幸三, 馬場充, "アナログ・デジタル複合構成による高速高精度な光位置センサ,"

電気学会論文誌 C, vol.129, no.4, pp.678-685, 2009.4.

〔学会発表〕(計7件)

① K.Ohtani and M.Baba, "A Sensor Fusion Technique Utilizing a Genetic Approach for Networked Sensing Systems - Application to a Recognition System for Object Shapes -," Proc. of SICE - ICASE International Joint Conference 2006, pp.3571-3576, Busan, KOREA, Oct., 2006.

② 大谷幸三, 馬場充, "遺伝的プログラミングに基づく環境適応機能をもつ光学的ポジションセンサ," 第11回知能メカトロワークショッフ講演論文集, pp.138-143, 湯布院公民館, 2006.9.

③ K.Ohtani, Daisuke Narita and M.Baba, "Measurement Method of Optical Properties By Use of a Rangefinder," Proc. of SICE Annual Conference 2007, pp.406-411, Kagawa, Japan, Sep., 2007.

④ K.Ohtani and M.Baba, "A Rangefinding Approach for Speeding Up the Three-Dimensional Shape Measurement of a Specular Object," Proc. of SICE Annual Conference 2007, pp.412-416, Kagawa, Japan, Sep., 2007.

⑤ 大多和秀典, 大谷幸三, 馬場充, "光位置センサのための遺伝的プログラミングによる外来光の影響除去法," 第16回計測自動制御学会中国支部学術講演会, pp.252-253, 山口大, 2007.11.

⑥ K. Ohtani, D. Narita, M. Baba, "3-D shape measurement by inverse raytracing approach," SICE Annual Conference 2008, pp.1531-1535, Tokyo, Japan, Aug., 2008.

⑦ 横山 充, 大谷幸三, 馬場充, "スポット光の2次元位置・角度検出センサ," 第17回計測自動制御学会中国支部学術講演会, pp.52-53, 広島大, 2008.11.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大谷 幸三 (OHTANI KOZO)
広島工業大学・情報学部 准教授
研究者番号: 40351978

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

馬場 充 (BABA MITSURU)
茨城大学・工学部・教授
研究者番号: 80156538