〔原著論文〕

微分処理により抽出された特徴点の3次元位置 を検出するレーザ光走査型センサ

山田陽滋* 土田縫夫* 駒井又二* 平川竜一**

A Position Sensor with Laser Beam Scan which Detects 3-D Points Extracted by Image Differentiation Function

Yoji YAMADA* Nuio TSUCHIDA* Mataji KOMAI* Ryuichi HIRAKAWA**

This research deals with an active three-dimensional position sensor with laser beam. The sensor has a unique function of differentiation processing of a linear image to extract only the points to be detected at which luminous intensity changes. Since it is composed of a linear image sensor and a one-dimensional PSD, both with high resolution, it is designated to be of high speed and accuracy.

In the present paper, the structure of the sensor and the sensing mechanism with image processing are described and a signal processing circuit to improve the accuracy of position detection is considered. Finally, the sensor is installed as a vision to a manipulator, to detect points on a stair-shaped object.

Key Words : Three-dimensional Position Sensor, Active Scanning, Trigonometric Principle, Image Differentiation Processing, PSD Output Characteristics

1. 緒 言

近年、時々刻々にあるいは頻繁に変更されるような作業環境においてもロボットマニピュレータが稼働できることが要求されるようになり、そのため高い性能を有する視覚センサの開発が望まれている¹⁾。この要求を満たす1つのアプローチとして、レーザビームなどを検出対象に照射してその反射光から得られた情報を処理する能動タイプの視覚センサが提案された²⁾。その後、情報取得の高速化を実現するために、格子状³⁾、スリット状⁴⁾、あるいはリング状⁵⁾などのビームパターンが利用され、対象物の3次元位置を始めとして、様々な幾何学的情報が得られるようになってきている。

上に掲げた視覚センサにおいては、反射光を捉える手段としてTVカメラを併用する場合が多く、安定した検出結果が得られるが、検出分解能が高くとれない、あるいは処理に時間がかかるなどの問題を残している。また

レーザビームはあらかじめ定められた位置や間隔で照射されるために、検出データのうち不要なものを検出動作後にとり除く情報処理が必要になる。

筆者らはビームスポット走査型の位置検出センサに画像処理機能を付加することによって、走査の全領域でなく検出したい点だけの3次元位置を求めることができるセンサを開発した⁷⁾。本センサは高速に3次元位置検出を行うことができ、また分解能も高く、小型化が図れる構造になっている。

以下、本論文ではこのセンサの構造、位置検出メカニズム、信号処理について述べ、最後にマニピュレータの視覚として位置検出を行った結果を示す。

2. 位置検出のメカニズム

2.1 センサの構造

本センサの位置検出原理を説明するために、まずセンサ本体の構造を示す。本体部は、a) 発光部と2つの受光部から成る光学系、b) ビームを走査し、またセンサ全体を回転させるための駆動系に分けて考える。Fig. 1に全体の構成図を示す。また、Fig. 2はセンサの外観写

原稿受付 1989年1月17日

* 豊田工業大学

** アイシン高丘株式会社

Fig. 1 Structure of the sensor

真である。

2.1.1 光学系

Fig. 1 において、発光源 L_D には小型の半導体レーザー（波長 830 nm, 標準光出力 30 mW）を用い、光軸を Z 軸とほぼ平行にしてレンズ L_M の横側に取り付けている。その出力はコリメータレンズによって $1\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ の楕円断面をもつ平行ビームにしている。ビームは同図に示す回転ミラーによって反射され、 L_M の物体側主点 O_M を通る水平軸 $O'O''$ を中心として垂直に回転走査される。また外乱光の影響を除去するために、光源には振幅変調をかけている。

受光部は、検出領域内の画像信号を取り込むリニアイメージセンサ S_M と、照射されたレーザービームスポットの位置 P を検出する 1 次元 PSD S_P で構成されている。それぞれの受光素子の前には焦点距離 25 mm の平凸型プラノレンズ L_M, L_P （物体側主点 O_M, O_P は光軸とレンズ曲面の交点にある）が置かれている。 S_M としては、周辺回路が比較的簡単で、ブルーミング現象のない MOS 型（受光面長 25.6 mm, 8 ビット階調出力）を用いている。またその画素数 $Ng=1024$ であり、これにより、通常の TV カメラに用いられるイメージセンサと比較して S_M の分解能が 2~4 倍高くなっている。

後節 2.2 の検出原理で述べるように、本センサにおいては走査されるレーザースポットに対応する結像位置がもう一方の S_P 用センサ上で瞬時に検出されなければならない。この要求を満たすものとして非走査型の PSD（受光面長 33 mm）を使用した。

2.1.2 駆動系

レーザービームを走査させる反射ミラーを回転させるた

Fig. 2 Photograph of the sensor

め、 L_M の横側に $O'O''$ 軸と同軸で小型 DC モータを取り付けた。また、モータの回転角をモニタするために 7200 パルス/rev のオプティカルエンコーダを用いている。レーザービーム走査のスピードは、後節 3.3 に述べる検出動作時間を考慮して、15 rev/S に設定した。さらに、センサ本体を Z 軸回りに回転させるためにステッピングモータ（ステップ角 $= 0.036^\circ$ ）を使用している。

2.2 位置検出原理

Fig. 3 は以下の説明のための座標系である。位置検出にあたってはまず、ステッピングモータを制御して垂直（Z）軸のまわりの回転角でレーザービームの照射点 P の θ 座標を決定する。対物レンズ L_M, L_P の主点 O_M, O_P と P の 3 点を通る平面は θ 一定の面である。この θ 平面上にある点 P の座標 (r, z) をセンサで検出することによって、3 次元的な位置 $P(\theta, r, z)$ を円柱座標系で求めることができる。

さて本センサの特徴は、イメージセンサの出力を画像処理して θ 平面内で明るさが大きく変化する特徴点 P_j

Fig. 3 Coordinate system used by the sensor

Fig. 4 Optical system of MOS image sensor

($j=1, 2, \dots$)を抽出しておき、PSDを併用することによってこの特徴点 P_j だけの位置を実時間的に検出できるところにある。

Fig. 4 はリニアイメージセンサ S_M 周辺の光学系を示している。レンズ L_M によって検出視野を S_M 上に結像させて画像信号系列 $g(k)$ ($k=1, 2, \dots, N_g$; k は画素番号, N_g は全画素数) を得る。 $g(k)$ に微分処理や二値化などを施し、特徴点 P_j として j 番目の画素を抽出したとする。このとき、Fig. 4 に示すように、その画素に対する角 ϕ_j は j を用いて次式により求められる。

$$\phi_j = \tan^{-1} \frac{(j - N_g/2) \cdot \Delta l_M}{F} \quad (1)$$

ここで、 j は S_M の画素ナンバー、 F はレンズの焦点距離、 Δl_M は各画素間ピッチであり、また、 $(j - N_g/2) \cdot \Delta l_M$ は S_M の中心位置から特徴点 j までの距離 ($=l_M$) を表している。

この関係から、抽出された j 番目の画素に対応するレーザ照射角度 ϕ_j をそれぞれ求めて順番に記憶しておく。なお、式(1)の関係はあらかじめテーブルにして与えられており、特徴点の画素ナンバー j から対応する ϕ_j すなわちエンコードの値が高速に参照できるようになっている。

次に、抽出された特徴点 P_j の2次元位置を検出するための光学系が Fig. 5 に示されている。2つのレンズ L_P と L_M の光軸は基線長 S の間隔を持つように配置されている。光源から照射されたレーザビームは回転ミラーによって Fig. 4 のレンズの物体側主点 O_M を回転中心として θ 平面内で走査される。ビームの照射角(つまり、反射ミラーの回転角)はエンコードによって常に監視できる仕組みになっている。そして照射角度 ϕ が記憶されている ϕ_j のいずれかに等しくなった瞬間、つまり特徴点 P_j と、 O_M を結ぶ入射光束の入射角度とレーザビームの出射角度が一致してビームが特徴点を照らした瞬間

Fig. 5 Trigonometric principle applied to the optical system of the sensor

に、その像を1次元 PSD (S_P) 上に結像させて位置 l_P を検出する。三角測量の原理により、点 P_j の2次元位置座標 (r_j, z_j) は次式によって求めることができる。

$$r_j = \frac{F \cdot S}{l_{Pj} + F \cdot \tan \phi_j} \quad (2)$$

$$z_j = \frac{l_{Mj} \cdot S}{l_{Pj} + F \cdot \tan \phi_j} \quad (3)$$

ここで F は受光部のレンズ L_M 及び L_P の焦点距離である。

式(1)~式(3)より点 $P_j(r_j, z_j)$ は、両センサ S_M 及び S_P 上の長さ l_{Mj} 及び l_{Pj} を検出すれば、

$$r = \frac{F \cdot S}{l_j} \quad (4)$$

$$z = \frac{l_{Mj} \cdot S}{l_j} \quad (5)$$

として算出することができることになる。但し、

$$l_j = l_{Mj} + l_{Pj} \quad (6)$$

である。

そして、 θ 平面内で点 $P_j(j=1, 2, \dots)$ の検出が終わると、ステッピングモータが角 $\Delta\theta$ だけ回転され、 $(\theta + \Delta\theta)$ 平面における検出動作に移行し、以下同じ手順が繰り返される。

3. 信号処理系

以下の節では、イメージセンサ及び PSD によって得られた光信号の処理方法について述べる。

3.1 イメージセンサの信号処理

イメージセンサから得られた信号系列 $g(k)$ は、メイン CPU が 68000 のホストコンピュータに転送される。ホストコンピュータでは、 $g(k)$ の1画素を入力するご

とに、画像処理によって特徴点 $j(j=1, 2, \dots)$ を抽出し、それぞれの点 j に対応する ϕ_j をテーブルから参照してメモリ上に記憶するまでの処理をリアルタイムで行うようにしている。これに対応させるため、イメージセンサの駆動クロック周期を $50 \mu\text{S}$ に設定している。

Fig. 6 は、後節 4.2 で位置検出の対象として取り上げる階段状の物体をイメージセンサで捉えたときの画像信号を示している。同図から、2段の階段のエッジ部における $g(k)$ の急峻な変化が認められる。そこで、画像処理としては、

$$gkk = g(k+1) - 2g(k) + g(k-1) \quad (7)$$

なるラプラスアンオペレータを用いることによって、エッジ部分を検出の対象点として抽出するようにしている。このとき、ホストコンピュータにおいて、1画素の入力から ϕ_j の参照に至る一連の処理に要する時間は $43 \mu\text{S}$ (430 クロック) である。

3.2 PSD 受光回路

PSD の受光回路では PSD 素子からの2つの電圧に変換された出力を、発光部の変調周波数と等しい中心周波数をもつ帯域通過フィルタに通すことによって、外乱光に起因する雑音電圧を除去している。この変調周波数はレーザビームの走査スピードを考慮して 20 kHz に設定した。

ところで、本センサをロボットに应用するとき、検出対象までの距離範囲を 1 m 程度と設定すれば、その出力信号電圧の変化は 40 dB 以上となる。これに対応する方法として Fig. 7 に示すような、a) 発光量を受光量によって制御する方法⁹⁾及び b) 受光側信号電圧増幅率の増幅率を制御する方法が考えられる。これらのうち、前者の方法では発光部の制御の遅れ及び PSD の応答の遅れが余分に加わるために全体としての応答がそれだけ遅れる。本研究ではこれらの遅れを伴わない後者の方法を採用した。

さて、後者の方法における可変増幅率アンプの出力は、

Fig. 6 Linear image signal for a stair-shaped object (1V/div, 2mS/div)

整流及び平滑回路によって直流電圧に変換された後で、光重心位置を求めるための演算処理を受ける。本システムではこの段階で、次節3.2.1に述べるような高精度化のための改善を行っている。

3.2.1 PSD 受光回路の改善

一般に PSD に入射した光スポットの重心位置は、PSD の出力（電流を変換した）電圧 V_1, V_2 から光量によらないアナログ電圧値 V_3

$$V_3 = \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} \quad (8)$$

を求めることによってその線形関数値として検出することができる⁹⁾。PSD 素子自体の非線形性は補正が可能であり、また、分解能は有効受光面長の 5000 分の 1 程度である。従って、光重心の検出位置精度は後段の A/D 変換器の分解能で決定されることになる。ここで、この位置分解能に起因する誤差を考える。

まず、特徴点の結像位置 l_M 及び l_P に関する両センサ素子の分解能で決まる誤差 Δl_M (MOS の画素ピッチであるので一定) 及び Δl_P が算出値に及ぼす伝播誤差 Δr および Δz は式 (4) 及び (5) より、

$$\Delta r = \frac{-F \cdot S}{l^2} (\Delta l_M + \Delta l_P) \quad (9)$$

(a)

(b)

Fig. 7 Possible block diagrams of PSD light-receiving circuits

Fig. 8 Transient errors when both Δl_M and Δl_P are constants

$$\Delta z = \frac{S}{l^2} (l_P \Delta l_M - (l - l_P) \Delta l_P) \quad (10)$$

となる。誤差の大きさを評価するために、

$$\varepsilon^2 = \Delta r^2 + \Delta z^2 \quad (11)$$

なる量を定義し、式(9)、(10)を用いて Δl_P も一定とした場合の誤差 ε を l_P の関数として Fig. 8 に与える。同図から 1) 検出点までの距離が遠くなるほど、また、2) 光重心が PSD の端部に位置するほど ε が大きくなることが分かる。

そこでまず、 ε を極力小さくするために、A/D 変換器の定格入力レンジ (0V~5V) と検出範囲における PSD の出力電圧範囲を一致させることによって、できるだけ分解能が高くなるようにした。次に、2) の傾向を改善し、PSD の検出範囲における誤差 ε を一定にするために、端部における光スポットの変位に対する PSD の出力変化が大きくなるようにした。 ε が検出領域内におい

Fig. 9 Calculated $l_P - V_{Sp}$ characteristics of PSD

て変動しないための条件を求めるために、

$$\varepsilon^2 = K \quad (\text{一定}) \quad (12)$$

とおいて $\Delta l_P(l_P)$ を求めると、

$$\Delta l_P(l_P) = \frac{1}{F^2 + (l - l_P)^2} \cdot [\Delta l_M F^2 + l_P \Delta l_M (l - l_P) \pm \sqrt{\{\Delta l_M F^2 + l_P \Delta l_M (l - l_P)\}^2 - \{F^2 + (l - l_P)^2\} (\Delta l_M^2 l_P^2 + F^2 \Delta l_M - K(l^4/S^2))}] \quad (13)$$

となる。式(13)を PSD の出力電圧の単位変化量あたりの分解能と考えて、これを $\Delta l_P / \Delta V_{Sp}$ と置きなおし、得られた微分方程式を数値計算によって解くと、必要とされる PSD の出力電圧特性 $V_{Sp}(l_P)$ が得られる。

検出範囲を $r=1000$ mm として、以上の検討に基づいて得られた $V_{Sp}(l_P)$ を Fig. 9 にプロットした。このとき、本システムの光学系における基線長 $S=100$ mm に対して、理論的には誤差 $\varepsilon=63$ mm 程度となることが分かった。同図から PSD 回路の出力特性は近似的に 3 次曲線にすればよいことが分かる。本センサの回路では、式(8)に示される線形の出力 V_s からさらに乗算器を用いて 3 次曲線を作り出し、これを $V_{Sp}(l_P)$ として A/D 変換器に出力している。Fig. 10 に実際の $V_{Sp}(l_P)$ を表す。この出力から l_P を求めることになるが、ここでもテーブルを用意することによって V_{Sp} に対応する l_P の位置が即座に参照できるようにしている。

Fig. 10 Actual non-linear output from PSD

4. マニピュレータの視覚としての応用

本センサを垂直多関節型のムーブマスター EX に装着して、位置検出を行った。

4.1 マニピュレータへの設置

本センサの検出領域は、リニアイメージセンサ受光部および1次元 PSD 受光部それぞれの視野の重なり部分で表される。これらは、おもに受光部単レンズの収差によって制限を受けるが、実測でそれぞれ 44° 程度であることが分かった。そこで、センサ S_v を Fig. 11 に示すような位置に取り付けることによって、図中の破線で示されるようなマニピュレータの動作範囲をカバーできる検出領域を得た。ここで各寸法は、

$$h_v = 560 \text{ mm}, l_v = 60 \text{ mm}, \rho_v = 70^\circ$$

となっており、2章の式(4)及び(5)で得られた検出点 $P' = (r, z, 1)^T$ は、

$$B = \text{Trans}(z, h_v) \cdot \text{Rot}(\rho_v) \cdot \text{Trans}(Z, l_v) \cdot P' \quad (14)$$

によってマニピュレータの絶対座標系 $B(r_0, z_0, 1)^T$ に変換される。但し、

$$\text{Trans}(Z, s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & s \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Fig. 11 Installation of the sensor on a manipulator

$$\text{Rot}(\rho) = \begin{bmatrix} \cos \rho & -\sin \rho & 0 \\ \sin \rho & \cos \rho & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

である。このときセンサは、同図に見られるようにその z 軸がマニピュレータの第1ジョイント θ_1 軸と同軸になるように設置した。これは、マニピュレータの動作を θ_1 の値をパラメータとする準空間の集合として表現する場合¹⁰⁾に、本センサによる検出位置の表し方が一致するため、余分な座標変換をすることなくデータが利用できるという利点を持つためである。

4.2 3次元位置検出結果

幅 170mm、高さ 110mm のサイズを有する階段形状の箱を検出対象として、センサの回転角 θ を $\Delta\theta = 2^\circ$ ずつ変化させながら3次元位置検出を行った結果を Fig. 12 に示す。対象物は同図中の実線で示すように、マニピュレータの絶対座標系で $y_0 = 250 \text{ mm}$ 、 $z_0 = 150 \text{ mm}$ の位置に暗幕を背景にして固定した。また、照明には白色光を用い、これを絶対座標系の原点方向からほぼ均一に照射した。

同図から、対象物のエッジ部分だけについて位置検出が行われていることが分かる。本実験では、照明及び、対象物と背景とのコントラストが良好であったため、先

Fig. 12 Result of 3D position detection for a stair-shaped object

に Fig. 6 で示したような画像が得られ、顕著な雑音は含まれていなかった。従って、雑音除去のための特別な処理は行わなかった。しかしながら、照明が不十分な場合などでは画像に雑音が含まれることが予想される。特に、ラブラシアンフィルタでは雑音が強調されるため、内挿などの平滑化処理が必要になる¹¹⁾と考えられる。

Fig. 12 に示す位置検出の結果、最大誤差は R 方向で 17.1mm、 Z 方向で 14.7mm であった。これらはおもに PSD 出力の分解能及び光学系の組立精度に起因するものと考えられる。前者に関しては、より高分解能の A/D 変換器を使用し、また後者に関しては、キャリブレーションを繰り返して各寸法を最小 2 乗法などで推定する¹²⁾ことによって、精度はさらに改善することができる。

ところで、レーザ光を投射する能動タイプのセンサを使用する場合、対象物の表面は、光学的な完全拡散性あるいはそれに近い性質を有していることが条件となる。本実験で用いた箱以外に、金属板でも表面粗さ $10\mu\text{m}$ 程度 (#80 の紙やすりで磨いたもの) 以上あれば、この条件を満たし、位置検出が可能であることを確認した。また、検出対象が曲面である場合は、画像処理の段階で検出点が抽出されないの、本センサは検出位置を出力しないことになり、そのままでは適用が困難である。しかし、微分処理をしきい値処理などに変更すれば、曲面上の位置検出も可能になると考えられる。この他、対象物の表面の反射率が低い場合は、リニアイメージセンサがこれを捉えることができないために、特徴点が抽出されず、本センサは他の TV カメラの場合と同様に出力を与えない。

4.3 設置検出時間

本センサでは 1 平面内の位置検出動作の中で、画像信号を取り込んで画像処理するのに 52ms 程度、検出視野においてレーザビームの走査が終わるまでに 10ms 程度を要する。これは、通常、走査型の TV カメラを用いて 1 点を検出するのに 33ms を要する場合¹²⁾と比較して高速であることが分かる。また、センサの検出動作がすべて終了した後で、得られた I_M 及び I_P から第 2 章の式 (4) 及び (5) を単純な四則演算だけで算出するのに要する時間は 1 点あたりおよそ 6.7ms であった。

5. 結 言

本研究では、画像の微分処理機能を持った 3 次元位置検出センサを開発し、これをマニピュレータの視覚として利用できることを示した。本論文は、以下の 3 点に要約することができる。

(1) 画像の微分処理機能を 3 次元位置検出センサに付加することによって、抽出された特徴点だけの位置検

出を実時間的に行うことができるセンサについて検出原理及び構造を示した。

(2) 開発したセンサにおいて、三角測量にともなう誤差を解析し、これを軽減する対策として PSD の出力を非線形化する手法を提案した。

(3) 垂直多関節型マニピュレータに視覚センサとして実装し、階段状の物体の位置検出を行い、その結果に考察を加えた。

今後は、本センサの特徴を生かして小型化し、また、より高分解能の A/D 変換器を用いることによってさらに高精度化を図る予定である。

本論文をまとめるにあたり、適切な御助言を頂きました東京工業大学工学部教授の梅谷陽二先生に心から感謝致します。また、本センサの原型とも言うべき 2 次元領域センサ¹³⁾を製作してくれた大学院生の野間康男君 (現 ヤンマーディーゼル株式会社) に感謝します。なお、本研究の一部は昭和 63 年度文部省科学研究費奨励研究 A (課題番号 63750428) の援助によって達成された。

参 考 文 献

- 1) 出澤正徳：ロボットののための距離検出法、計測と制御、Vol.26, No.2, pp.103-110, 1987.
- 2) Shirai, Yoshiaki: Recognition of polyhedra with a range finder, Pattern Recognition, Vol.4, No.2, pp.243-, 1972.
- 3) 中沢和夫、大矢晃久、中島真人、油田信一：マニピュレータに装着したファイバグレイディング視覚センサによる三次元形状計測、電気学会論文集C, Vol.107, No.7, pp.659-665, 1987.
- 4) 小関修、中野倫明、山本新：光切断法を用いた実時間距離検出装置、電子通信学会論文誌、Vol.68-D, No.5, pp.1141-1148, 1985.
- 5) 二宮、広井、中川：斜め十字型スリット光を用いたロボット用小型 3 次元センサ、計測自動制御学会論文集、Vol.23, No.10, pp.1009-1016, 1987.
- 6) 木下源一郎、山口卓、出澤正徳：ロボット用光学的距離センサの開発、計測自動制御学会論文集、Vol.22, No.11, pp.1204-1209, 1986.
- 7) 平川竜一、山田陽滋、土田縫夫、駒井又二：画像の微分処理機能を持った 3 次元位置検出センサ、第 5 回ロボット学会学術講演会予稿集、pp.379-380, 1987.
- 8) 安田博彦、森下耕次、堀井孝佳：圧延鉄板の傾斜面でも測定可能なレーザ変位計、OMRON TECHNICS 80-83 DIGEST, Vol.26, No.4, pp.35-42, 1987.
- 9) 半導体位置検出素子、浜松ホトニクスカタログ、p.3.
- 10) Tomas Lozano-Perez: Motion Planning for Simple Robot Manipulators, Robotics Research 3, pp.133-140, 1985.
- 11) 長尾真他訳：ディジタル画像処理(訳本)、近代科学社、第 9 刷、pp.198-201, 1986.
- 12) 長谷川勉：ロボットののための作業環境データ入力システム、電気学会論文誌、Vol.107-C, No.7, pp.666-672, 1987.
- 13) Yoji Yamada, Nuiro Tsuchida, Minoru Ueda, "A Two-Dimensional Range Sensor", Proc. of THE 4TH SENSOR SYMPOSIUM, pp.265-268, 1984.