位相情報に注目した光学式近接センサ[†]

増田 良介*・佐々 修一**・長谷川 健介*

Optical Proximity Sensor by Using Phase Information

Ryosuke MASUDA*, Shuichi SASA** and Kensuke HASEGAWA*

Recently, the proximity sensors which are able to detect the situations of objects at a close range, are paid an attention and are used in the flexible automation system.

In this paper, the authors propose a new principle of proximity sensor, and evaluate its characteristics by the experiments.

The optical proximity sensors, so far, have been based on detecting the intensity or timing of reflex light, but here, we made up the simple sensor based on measuring the phase shift of modulated reflex light from the object. It can measure the distance and the inclination angle of the object as well without being affected by the reflection factor.

Basic elements of the proposed sensor consist of light sources and one optical detector faced to the object respectively. In case of distance measurement, two light sources are located asymmetrically to the optical detector, and driven by $\sin \omega t$ and $\cos \omega t$ signal. The distance can be obtained as the function of the phase angle of reflex light signal detected.

In case of inclination angle measurement, two light sources are located symmetrically differing from above configuration. The inclination angle can be measured as the function of the phase angle of reflex light signal.

The proximity sensor and its signal processing circuit are made combining the two principles mentioned above, and the effectiveness of the sensor is confirmed by the result of the experiments.

1. ま え が き

生産システムにおける多様化に対処するためのフレ

キシブルオートメーションにおいて、外界の状況を検出して制御する感覚制御の技術が要求されている。産業用ロボットを用いたシステムでは、大局的な情報を検出する視覚と、対象との力学関係を検出する触覚だけでなく、中間的な機能をもつ近接覚が重要である。

この近接覚のためのセンサは、対象に数 mm から数十 mm に近づいた時点で、その距離や対象面の傾きなどの状態を非接触で検知するものである。現在、光学式、磁気式、静電容量式、超音波・マイクロ波式など各種の原理のものが開発され、取り扱う対象や目的に応じて使い分けられている。

これらのうち光学式に関しては、金属材料以外でも使用でき、センサが小型軽量であり、測定レンジが比較的広くとれることから多く使われている。精密測定の分野では、レーザー光の干渉や、出力光と反射光の位相ずれ、時間差を検出する方法が用いられる¹⁾。

ロボット制御に利用される簡単な光学的近接センサの例としては、1個または数個の発光素子からの反射光量により距離を検出する方法がある^{2),3)}。また、直線上に並べた数個の発光素子を順次発光させ、ピンホールを通して受光素子に入射する光の反射タイミングから光路を推定し距離を求める方法が提案されている⁴⁾。

反射タイミングによる方法は、反射光量による方法に比べて、対象面の特性や傾きに影響されないという特長をもっている。しかしながら、分解能をあげるための発光素子数の増加や、連続的に距離を求めるための補間処理の必要性の問題があった。

本論文で提案する方法は、乱反射面を対象にしたもので、基本的には反射光量を測定する原理であるが、2個の発光素子の反射光量差を変調信号の位相差として検出しているため、対象面の反射率や傾きに影響されない特徴をもっている。また、ロボット制御でしばしば要求される対象面の傾きの測定が、発光信号の切替によって実現できる実用的な方法である⁵⁾⁻⁷⁾。

[†] 第19回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭55・8)

* 東京工業大学工学部 東京都目黒区大岡山 2-12-1

** 航空宇宙技術研究所 調布市深大寺町 1880

* Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo

** National Aerospace Laboratory, Chofu

(Received November 14, 1980)

(Revised March 20, 1981)

2. 距離検出原理

はじめに、本センサの基本原理由る位相差による距離検出について説明する。

Fig. 1 において、LED 1, LED 2 は光源であり、 γ の位置にある受光素子 PHTR に関して非対称の位置 α, β に置かれている。対象物体は、受光素子の前方 x の距離にあるとする。ここで使用する素子および対象においては、つぎの仮定が成り立つとする。

- (1) 光源は点光源で無指向性である。
- (2) 受光部は鋭い指向特性をもち、対象面の微小部分のみを観測している。
- (3) 対象物体の表面は乱反射特性をもつ。すなわち、光源により照射された面の照度が面の傾き角度の余弦に比例し、かつ、照射された面を新たに光源としてみたとき、面内の点の輝度はどの方向から観測しても一定であるとする。

以上の仮定は、実際センサを構成する場合に大きな障害となる問題ではなく、(3)の仮定により鏡面的性質をもつ物体が対象から除かれるという点だけで、一般に近似的に成立すると考えてよい。なお、これらの性質の測定精度への影響については、後に検討する。

いま、光源 LED 1, LED 2 の光度を G_1, G_2 とすれば、 P 点における照度に対する光源の寄与 L_1, L_2 は、つぎのように表わされる。

$$L_1 = G_1 \cdot \cos \theta_1 / \bar{P}_\alpha^2 \quad (1)$$

$$L_2 = G_2 \cdot \cos \theta_2 / \bar{P}_\beta^2 \quad (\text{Lambert の法則}) \quad (2)$$

つぎに、 P 点を含む面を新たな光源とみなすと、 P 点の輝度 L_P は、照度と面の反射率 C の積に比例すると考えられるので、次式で与えられる。

$$L_P = C \cdot (L_1 + L_2) \quad (3)$$

α, β 点から P 点までの光路長さ $\bar{P}_\alpha, \bar{P}_\beta$ は、発光素子-受光素子間距離 a, b と x により、

$$\bar{P}_\alpha^2 = a^2 + x^2, \quad \bar{P}_\beta^2 = b^2 + x^2 \quad (4)$$

Fig. 1 Principle of the proximity sensor

Fig. 2 Characteristics of distance sensor

で表わされ、また、照射角度の余弦 $\cos \theta_1, \cos \theta_2$ は、

$$\cos \theta_1 = x / \sqrt{a^2 + x^2}, \quad \cos \theta_2 = x / \sqrt{b^2 + x^2} \quad (5)$$

で表わされる。

さらに、光源の輝度 G_1, G_2 を互いに 90° 位相のずれた正弦波状に変化させる（パワーの交流分を正弦波で変化させる）。以下、その変化分だけに注目する。

$$G_1 = A \cdot \sin \omega t, \quad G_2 = B \cdot \cos \omega t \quad (6)$$

ただし、 A, B は振幅、 ω は変調角周波数である。

したがって、点 P の輝度 L_P は (1)~(6) 式より、

$$L_P = C \cdot \left\{ \frac{A \cdot x}{(a^2 + x^2)^{3/2}} \cdot \sin \omega t + \frac{B \cdot x}{(b^2 + x^2)^{3/2}} \cdot \cos \omega t \right\} \quad (7)$$

$$= D \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

となる。ただし、その振幅と位相は、

$$D = C \cdot x \sqrt{\frac{A^2}{(a^2 + x^2)^3} + \frac{B^2}{(b^2 + x^2)^3}} \quad (9)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left\{ \frac{B}{A} \cdot \frac{(a^2 + x^2)^{3/2}}{(b^2 + x^2)^{3/2}} \right\} \quad (10)$$

である。さらに、 P 点から受光部までの距離 x による減衰のため、実際に受光素子で観測されるパワー M は、

$$M = \frac{K}{x^2} \cdot D \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

となる。ただし、 K は定数、 φ は (10) 式のままである。

この位相ずれ φ は、距離 x の関数となり、物体の反射率に影響されない値である。この距離 x と位相ずれ φ の関係を、発光素子の光度の振幅比 B/A をパラメータとして計算した結果を **Fig. 2** に示す。

3. 傾きの補償と傾き検出

前章では、対象面が受光軸に対して垂直であるとして、距離検出を考えた。ここでは、面の傾きの影響について検討し、距離検出における傾き補償と傾き検出の方法について述べることにする。

距離検出において、**Fig. 3** で示したように対象面

Fig. 3 Compensation for inclination angle

が発光素子の並んでいる面に対して、角度 δ だけ傾いているとすると、受光素子の観測する P 点の輝度は、発光素子 LED 1, LED 2 について $\cos(\delta - \theta_1)/\cos \delta$ および $\cos(\delta + \theta_2)/\cos \delta$ の係数がかかり、両者の合成によって次式となる。

$$L_P' = \frac{C}{\cos \delta} \left\{ \frac{\cos(\delta - \theta_1)}{a^2 + x^2} \cdot A \sin \omega t + \frac{\cos(\delta + \theta_2)}{b^2 + x^2} \cdot B \cos \omega t \right\}$$

$$= C \sqrt{A^2 \left\{ \frac{x + a \tan \delta}{(a^2 + x^2)^{3/2}} \right\}^2 + B^2 \left\{ \frac{x - b \tan \delta}{(b^2 + x^2)^{3/2}} \right\}^2} \cdot \sin(\omega t + \varphi') \quad (12)$$

ただし、 φ' は x と δ の関数となる。

$$\varphi' = \tan^{-1} \left\{ \frac{B}{A} \cdot \frac{(a^2 + x^2)^{3/2}}{(b^2 + x^2)^{3/2}} \cdot \frac{(x - b \tan \delta)}{(x + a \tan \delta)} \right\} \quad (13)$$

さて、(13)式の φ' に対する傾きの影響は、発光素子位置の非対称性から生じてくるので、Fig. 3 に点線で示したように、直線 $\overline{P\gamma}$ について α, β にそれぞれ対称な位置に2個の発光素子 LED 1', LED 2' を付加し、 $A \sin \omega t, B \cos \omega t$ で駆動して補償する。

すなわち、この場合の P 点の輝度は、

$$L_{P-2}^{L_P+L_{P-1-2}} = \frac{C}{\cos \delta} \cdot \left\{ \cos(\delta - \theta_1) + \cos(\delta + \theta_2) \right\} \cdot \frac{A \sin \omega t}{(a^2 + x^2)} + \left\{ \cos(\delta + \theta_2) + \cos(\delta - \theta_2) \right\} \cdot \frac{B \cos \omega t}{(b^2 + x^2)} \quad (14)$$

Fig. 4 Principle of angle sensor

Fig. 5 Characteristics of angle sensor

$$= 2Cx \sqrt{\frac{A^2}{(a^2 + x^2)^3} + \frac{B^2}{(b^2 + x^2)^3}} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (15)$$

となり、位相ずれ φ は(10)式と等しくなり、傾きの影響が取り除かれることがわかる。

つぎに、2個の発光素子により傾き情報が得られることを利用した傾き検出について述べる。いま、Fig. 4 に示したように等距離（受光素子に対して対称の位置）にある発光素子を $\sin \omega t, \cos \omega t$ で駆動することを考える。

LED 2 と LED 2' をそれぞれ $A \sin \omega t, B \cos \omega t$ の信号で駆動した場合、位相 φ'' は次式のように求められる。

$$L_{P''} = \frac{C}{\cos \delta} \cdot \left\{ \frac{\cos(\theta - \delta)}{b^2 + x^2} \cdot A \sin \omega t + \frac{\cos(\theta + \delta)}{b^2 + x^2} \cdot B \cos \omega t \right\} \quad (16)$$

$$= \frac{C}{(b^2 + x^2)^{3/2}} \cdot \sqrt{A^2(x + b \tan \delta)^2 + B^2(x - b \tan \delta)^2} \cdot \sin(\omega t + \varphi'') \quad (17)$$

$$\varphi'' = \tan^{-1} \left\{ \frac{B}{A} \cdot \frac{x - b \tan \delta}{x + b \tan \delta} \right\} \quad (18)$$

(18)式の関係を図示すると、Fig. 5 のようになる。この式は、距離のパラメータ x を含んでいるが、 x, y ともに未知の場合は、傾きを補正した距離データ x を先に求め、その値から傾き δ を求めればよい。また、特に $b = x$ すなわち、発光-受光素子間距離と対象までの距離が等しいとき、

$$\varphi'' = 45^\circ - \delta \quad (19)$$

となって、完全な線形関係となる。

垂直方向の傾きについては、Fig. 4 の点線で示したように、4個の発光素子を受光素子を中心とした十字形に配置し、はじめに片側の1組を $\sin \omega t$ と $\cos \omega t$ で駆動して傾き δ を求め、つぎに直交する1組を $\sin \omega t$ と $\cos \omega t$ で駆動してその方向に対する傾き δ' を時系

Fig. 6 Block diagram of detecting circuit

的に求めればよい。なお、この配置でも、内側の 2 個を $\sin \omega t$ 、外側の 2 個を $\cos \omega t$ で駆動すれば、すべての方向の傾きに影響されない距離データが得られる。

4. 検出装置の構成

2 章と 3 章で述べた、近接距離・傾きセンサの発光素子切替駆動および受光信号処理回路の構成を、Fig. 6 に示す。4 個の発光ダイオードは、2 相の矩形波信号でモード切替回路を通して駆動される。距離モードは 2 組の発光ダイオードの傾き補償駆動であり、傾きモードは、等距離の発光ダイオードの 2 相駆動である。これらのモードは、内部または外部の信号で切り替えられる。

受光素子であるフォトトランジスタからの信号は、増幅されたのち、バンドパス・フィルタで基本周波数成分が抽出される。この信号が再び 2 値化されて基準信号と比較され、位相差が求められる。位相検出はここでは、カウンタによるクロックパルスの計数による方法をとっており、距離および傾きデータは 8 ビットの並列信号として出力される。

センサヘッドは Photo. 1 に示す外観のもので、GaAs 赤外発光ダイオード 4 個と Si フォトトランジ

Photo. 1 View of the sensor head

Fig. 7 Experimental data of distance measurement

スタを、 $70 \times 10 \times 5 \text{ mm}$ の基材上に $a = 10 \text{ mm}$ 、 $b = 30 \text{ mm}$ の間隔で横に配置したものである。

装置の簡単化のため、正弦波の代りに矩形波を用いているが、フィルタリングによって基本周波数成分 (周波数 $f = 1 \text{ kHz}$, $\omega = 2\pi f$) のみを抽出しているの、前章の議論はそのままあてはめられる。

つぎに、試作したセンサと処理回路による、白色紙と数種の色紙を対象にした測定結果を示そう。

Fig. 8 Compensated and uncompensated data of distance measurement

Fig. 9 Experimental data of angle measurement

Fig. 7 は、距離モードにおける、距離-位相ずれ特性で、(a)が2組の発光ダイオードの光度の比、 B/A をパラメータとしたデータ、(b)が同質の対象で反射率の異なる場合の位相変動のデータである。(a)における実線は、(10)式による計算値である。なお、発光ダイオードの光度は、個別に校正用フォトランジスタで測定し調整した。また、対象の反射率は、センサと平行に対象面を置き、センサのフォトランジスタの出力電圧振幅を測定し、白色紙の場合を100%とする相対反射率として求めた。

実測の結果、10mm～60mmの範囲で単調増加する距離測定データが得られた。また、その間では反射率の違いによるデータの変動、測定系の外乱によるデータのばらつきが、ともに誤差 $\pm 2\text{mm}$ 以内で計測できた。

Fig. 8 は、距離モードでの対象面の傾きの影響と、その補償効果を測定したものであり、補償によって $\pm 30^\circ$ の傾きに対して4%以下の変動におさえられている。

Fig. 9 は、傾きモードの場合の、傾き-位相ずれ特性である。距離によってゲインが異なっているが、位相ずれ 45° を原点として、直線誤差9%以下、ばらつき $\pm 2^\circ$ 以下のデータが得られている。実線は(18)式によって計算した値である。

5. 精度および特性に関する考察

ここでは、測定の精度に対する素子の指向特性の影響、対象の反射特性の影響について考察し、さらに過渡特性について述べる。

5.1 素子の指向性の影響

これまで発光素子は無指向性、受光素子は理想的に鋭い指向性をもつとして取り扱ってきた。しかし、実際の素子はある指向特性をもつため、測定結果に影響する。

はじめに、発光ダイオードの指向特性の影響について考える。発光特性の相対強度分布を $F(\eta)$ (ただし、 η は正面からの角度)とすると、距離測定の場合、角度による強度の変化により(10)式における B/A の値が次式のようになる。

$$(B/A)^* = (B/A) \cdot \left(F\left(\tan^{-1} \frac{b}{x}\right) / F\left(\tan^{-1} \frac{a}{x}\right) \right) \quad (20)$$

実際に使用した発光ダイオードの指向特性を測定した結果を用いて、位相ずれを求めると、Fig. 10の曲線①に示す位相誤差となる。

つぎに、フォトランジスタの指向特性については、

Fig. 10 Phase error of the sensor

(a) Distance to angle mode (b) Angle to distance mode

Fig. 11 Step response of the sensor

ある幅の感度特性をもっているため、対象面のある範囲の面積の光量を観測していることになる。このフォトランジスタの指向特性角度幅(この角度範囲内では感度が一定とみなせる)を ϕ とすると、一つの発光ダイオード(たとえば、Fig. 1のLED 1)によって照射されるフォトランジスタ視野内の対象面の平均照度は、次式で求められる。

$$L_1^* = \frac{E}{2Y} \int_{-Y}^Y \frac{x \cdot G_1}{\{x^2 + (a+y)^2\}^{3/2}} dy \quad (21)$$

ただし、 E は定数、 y は対象面上でのフォトランジスタ視野中心からの距離、 $Y = x \cdot \tan(\phi/2)$ である。

使用したフォトランジスタの感度特性の測定結果から、 ϕ を10度とし位相誤差を求めると、Fig. 10の曲線②のようになる。この値は発光素子の影響と比較して1/20以下であり、受光素子の指向特性を特に鋭くするための方策は必要がないと思われる。参考のために、 ϕ が20度の場合について同図③に示した。

5.2 乱反射特性

対象が理想的な乱反射特性を有していない場合について考える。ここでは、受光素子が対象面を垂直にみるように固定し、発光素子を回転させたときの受光特性が、余弦特性からどれだけずれるかを調べて、乱反射特性の評価基準とした。ここで測定に用いた対象の反射特性を考慮して距離モードでの位相ずれの変化を計算すると、Fig. 10④のようになる。さらに、光沢紙の場合にはこの反射特性の影響が大きい(Fig. 10⑤)。

傾き測定モードでの影響は、同様な考え方から計算すると、使用した測定対象で最大9%、光沢紙で20%の位相変化となって現れる。

以上の考察結果から、実験データにおける計算値からのずれの主な原因は、発光ダイオードの指向特性と、

対象面が理想的な乱反射特性を示さないことであると考えられる。

5.3 センサの過渡応答特性

つぎに、本センサの応答性について調べることにする。距離および傾きの測定における応答性は、1 kHz のサンプリング周期とフォトセンサの遅れおよびフィルタの遅れに支配されている。測定モードを切り替えて等価的にステップ状の位相変化を与えたときの応答波形を Fig. 11 に示す。この結果から本センサは、時定数 4 msec の一次遅れ特性で表わすことができた。この特性は、通常のサーボの応用に対しては十分な高速性をもっているといえる。

6. む す び

本論文では、光学的素子を用いた近接距離および傾きの検出できるセンサを提案し、その特性について述べた。本センサは、受光素子に対して非対称または対称に置かれている発光素子の発光パワーを 2 相信号で変化させ、受光反射信号の位相変化を調べることによって距離と傾きを求める方式をとっている。この方式によるセンサは、距離と傾きが高速に検出できること、対象面の反射率に影響されにくいこと、センサヘッドが軽量小型でかつ処理回路が簡単であることなどの特徴をもち、実験により基本的な特性が確かめられた。

なお、鏡面反射に近い特性をもつ対象の取扱い、測定レンジの拡大方法、精度の向上についての実際的な面での問題が残されている。

ここで提案した近接センサは、つぎのようなロボッ

ト制御への応用が可能である。

- (1) ハンド先端部に取付け、移動物体への追従、曲面のトレース、物体への一定方向からの接近など、アームおよび手首部制御への応用。
- (2) ハンド内部に取付け、把握時の対象物体の位置や形状、傾きを測定することによる、手首部および指部制御への応用。

特に (1) の応用では、手先と対象面との距離を一定に保ちながら、手首を常に対象面に垂直にすることが、本センサの特徴から容易に実現できる。

上記のセンサ自体の改良およびセンサ応用については、現在検討・実験中であり、つぎの機会に発表する。

本研究を行うにあたり、実験に御協力いただいた、東京工業大学 小林 信也氏に感謝する次第である。本研究は、昭和 55 年度文部省科学研究費補助金の交付を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) 黒岩, 小林: レーザ-応用計測, 計測と制御, **13**-1, 44/56 (1974)
- 2) Alan R. Johnston: Optical Proximity Sensors for Manipulator, J. P. L. Technical Memorandum, **33**-612 (1973)
- 3) J. Y. Catros et al.: Automatic Grasping Using Infrared Sensors, 8th ISIR, 132/142 (1978)
- 4) Tokuji Okada: A Short Range Finding Sensor for Manipulator, Bulletin of E. T. L. **42**-6, 492/504 (1978)
- 5) 長谷川, 増田, 佐々: 位相情報を用いた簡易型近接センサ, 第 18 回 SICE 学術講演会予稿集 2401 (1979)
- 6) 長谷川, 増田, 佐々: 位相情報を用いた簡易型近接センサ, 電気学会電子計測研究会資料, **EM 79**-97 (1979)
- 7) 増田, 長谷川, 佐々: 位相情報を用いた近接傾きセンサ, 第 19 回 SICE 学術講演会予稿集, 3418 (1980)