円形回折格子のレーザ回折光を用いた 基準位置検出法*

伊藤昌文** 河口寿夫** 羽根一博*** 松田文夫† 後藤俊夫††

Specified Position Sensing Technique by using the Light Diffracted
from a Circular Grating

Masafumi ITO, Hisao KAWAGUCHI, Kazuhiro HANE,
Fumio MATSUDA and Toshio GOTO

A position sensing technique by using the light diffracted from a small circular grating is proposed. The circular grating is attached to the surface of the object as a reference for the measurement (reference point). The grating is irradiated by laser light and the elliptical pattern generated by diffraction is measured by a CCD image sensor. By processing the diffraction pattern, the distance from the detector to the reference point is obtained. In addition, it is possible to derive the three dimensional position of the reference point and the inclination of the work surface. The experiments were carried out by using a circular grating of 20 μm pitch and 0.6 mm diameter. The accuracies of the measurements are also discussed.

Key words: distance measurement, three dimensional position measurement, circular grating.

1. はじめに

ロボット等の産業用自動機械において、柔軟に作業を行うためには対象物との相対距離を検出できることが重要である。光学式距離センサとしては、これまでにいろいろなタイプのものが提案されている。大別すると、位置検出素子を用いる三角測量法¹⁾²⁾と、焦点深度や投影像の変化を利用する合焦点検出法³⁾⁴⁾が用いられている。これらの方法は比較的せまい範囲の距離を精度よく測定できるが、対象物上の、ある基準点の三次元位置を検出するためには応用し難い。産業用ロボット等で高精度な位置決めを行うためには、ロボットの先端と対象物上のある基準点との位置関係を容易に測定できることが望ましい⁵⁾。対象物の角のような特徴点をステレオ画像センサ⁶⁾で検出して、その点に対して手先の位置決めを行うことも可能である。しかしながら複雑な認識アルゴリズムを必要とする上、特徴点の検出精度が画像の濃淡や処理法に大きく

依存する。

これに対し、対象物上に特定形状のマークや反射鏡を設けて利用する方法は対象物上の基準位置を簡単に検出するために有効であると考えられる。これまでに長距離の応用に対してはコーナキューブと三角測量法とを組み合わせたもの⁷⁾、光パルスの往復時間を計測できる距離計と拡散板とを組み合わせた測定装置⁸⁾等が報告されている。また極短距離に対しては、特殊マークを用いたマスクとウエハの自動位置決め法が提案されている⁹⁾¹⁰⁾。マークや反射鏡を取り付ける利点としては測定が容易になること、照明条件等環境にあまり依存しないこと等があげられる。

本研究では、特殊マークとしてリソグラフィ加工により作成した円形回折格子を用いた。レーザを照射した際に生じる回折像を利用し、特殊マークまでの距離や三次元位置、さらにマークを取り付けた面の傾きが検出できる。特殊マークを取り付けることにより対象物は幾分制限されるが、より簡単に対象物の位置、傾きの測定ができる。また本研究で利用する特殊マークはエンボスホログラムの複製法と同様にして容易にステッカ状に加工できると考えられる。

* 原稿受付 平成2年7月23日。1990年度精密工学会春季大会学術講演会(平成2年3月28日)にて発表

** 学生会員 名古屋大学工学部(名古屋市千種区不老町)

*** 正会員 名古屋大学工学部

† 正会員 岐阜工業高等専門学校(岐阜県本巣郡真正町)

†† 名古屋大学工学部

Fig. 3 Photograph of a circular grating

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental set-up

に述べた (1) 距離 L , (2) 面の傾き α のほかに, (3) 面の最大傾斜角方向 β , (4) 観測面に照射される 0 次光の座標 (X_0, Y_0) の計 5 個である。以上の値を用いて, 基準点の座標 (X_R, Y_R, Z_R) はセンサ座標系において以下のように得られる。

$$X_R = X_0 - L \sin 2\alpha \cdot \cos \beta \quad (6)$$

$$Y_R = Y_0 - L \sin 2\alpha \cdot \sin \beta \quad (7)$$

$$Z_R = L \cos 2\alpha \quad (8)$$

3. 実験装置及び信号処理方法

円形回折格子の作成においては, まずガラス基板上にアルミニウムを真空蒸着し, その上に電子線レジストである PMMA を塗布した。電子線描画及び現像を行うことにより, PMMA 上に円形回折格子像を作成した。PMMA をマスクとしてアルミニウムのエッチングを行い, PMMA を除去し円形回折格子を作成した¹¹⁾。図 3 に円形回折格子の写真を示す。今回作成した円形回折格子は格子周期 $p = 20 \mu\text{m}$, 格子周期と格子の反射部分の幅 (リングの幅) との比 1/2, 直径約 0.6 mm である。

実験装置の概略図を図 4 に示す。レーザには He-Ne レーザ (波長 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$) を用いた。ビームエキスパンダを用いてレーザビームを約 10 mm 径に拡

大した。対象物面上に取り付けた円形回折格子にレーザビームを照射し, CCD カメラを用いてスクリーン (約 $60 \times 60 \text{ mm}$) 上に観測される回折像を検出した。スクリーンは照射ビームに対して垂直に配置した。

円形回折格子は機械式ステージに取り付けた。ステージは XYZ ステージと回転ステージとを組み合わせで構成した。XYZ ステージは分解能が $10 \mu\text{m}$ のものを用いた。また回転ステージは回折格子の傾き角度 α を設定するために用いた。分解能は 0.083° であった。

距離 L 及び面の傾き α の測定精度は, 主に d_L, d_s の測定精度に依存する。それらの値を画面上の 2 点の距離により直接測定すると, 測定誤差は画像の分解能 (画像の 1 画素の大きさ) の半分程度になるため, 十分な精度は得られない。また楕円全体が画面に入っていないと測定が行えない等の問題点が生じる。

そこで本研究では, センサ座標系 $O_S-X_S Y_S Z_S$ に対して得られた回折像の方程式を最小二乗法により求め, その方程式から d_L, d_s 等を導いた。

楕円の方程式は二次曲線であるため, 次式のように置くことができる。

$$AX_S^2 + BY_S^2 + CX_S Y_S + DX_S + EY_S = \pm 1 \quad (9)$$

ここで, A, B, C, D, E は定数である。ただし A の符号は正となるように定める。

具体的な画像処理方法として, まず得られた画像を二値化する。二値化より選ばれた点に対して, 求めたい楕円の画素を追跡する。画素追跡することで, 楕円を表す点とノイズにより生じる楕円から離れた点を分離する。分離されたすべての点の座標から最小二乗法により式 (9) の係数 A, B, C, D, E を決定した。この場合, 楕円はある幅を持っているが, 最小二乗法により楕円方程式が決定されるので, 楕円の幅に関係なく楕円の中央を通る一つの方程式に近似される。この近似は, より多くの点を用いる程ノイズに対して安定になり理論からの誤差を小さくできる。係数 A, B, C, D, E を用いて長径 d_L , 短径 d_s を表すと, 次式のような

$$d_L = \sqrt{\frac{2(A+B+\sqrt{(A-B)^2+C^2})}{F}} \quad (10)$$

$$d_s = \sqrt{\frac{2(A+B-\sqrt{(A-B)^2+C^2})}{F}} \quad (11)$$

ここで,

$$\begin{aligned} 1/F = & [\pm 1 + (A(CE - 2BD)^2 + B(CD - 2AE)^2 \\ & + C(CE - 2BD)(CD - 2AE)) / (4AB - C^2)] \\ & \times 4 / (4AB - C^2) \end{aligned} \quad (12)$$

式 (4) が $\cos 2\alpha$ の三次方程式になるので α を求め

るためにカルダノ法を用いた¹²⁾。 L は式 (5) から求めた。

同様に最大傾斜角方向 β と回折像の局所座標系原点 (X_0, Y_0) を求めた楕円の方程式から導出した。楕円の中心座標 (X_C, Y_C) 、方向 β は次式で与えられる。

$$X_C = \frac{CE - 2BD}{4AB - C^2} \quad (13)$$

$$Y_C = \frac{CD - 2AE}{4AB - C^2} \quad (14)$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{A - B + \sqrt{(A - B)^2 + C^2}}{C} \quad (15)$$

式 (13), (14), (15) から (X_0, Y_0) は次式で与えられる。

$$X_0 = X_C - \delta \cos \beta \quad (16)$$

$$Y_0 = Y_C - \delta \sin \beta \quad (17)$$

ただし、 $\delta = \frac{d_1 n \lambda \tan 2\alpha}{2\rho \cos \alpha}$

以上の計算を行い、面の傾き α 、距離 L 、方向 β と (X_0, Y_0) を求めた。以上の値を用いて式 (6), (7), (8) より基準点座標 (X_R, Y_R, Z_R) を導いた。

4. 実験結果及び考察

距離 L_1 ($= L \cos 2\alpha$, 図 4 参照) を 80 mm にとり、傾き α を 10° とした。この場合の楕円の回折像の計算結果を図 5 (a) に示す。また実際に観測された回折像の写真を図 5 (b) に示す。楕円は同心ではなく、次数が高くなるにつれて回折像の局所座標系において x 軸の正方向に中心がずれている。また、 $\alpha = 0^\circ$ でないため x 軸方向に伸びた楕円になっている。実験により観測された回折像は計算により得られた回折像とよく一致した。

回折光の次数が高いほど楕円は大きくなるので楕円の変形具合を精度よく測定できる。しかしながら一般に次数が高いほど光強度は弱くなり CCD カメラで回折光を検出できなくなる。よって CCD カメラで検出するに十分な強度を持つ回折光の中で最高次数のものをを用いる方が精度上有利である。以上の理由により実験では 4 次光を測定対象とした。

次に基準点を Y_s 方向に移動させ、回折像から基準点の座標 (X_R, Y_R, Z_R) を導出した結果の一例を表 1 に示す。ただし表 1 の右側の値は XYZ ステージであらかじめ設定した基準点の三次元位置の値である。測定において二値化された楕円上の約 3 000 点の座標から基準点の座標を計算するのに、計算機 (NEC, PC-9801 RA) により約 4 秒程の時間を要した。

(a) Calculated diffraction pattern

(b) Photograph of the diffraction pattern
Fig. 5

Table 1 3D positions of the reference point

Derived position mm			Preset position mm		
X_R	Y_R	Z_R	X_R	Y_R	Z_R
1.04	-1.67	80.78	0.93	-1.82	80.75
1.27	-0.88	80.79	0.93	-0.82	80.75
1.00	0.53	80.80	0.93	0.18	80.75
0.57	0.98	80.68	0.93	1.18	80.75
0.76	1.89	80.75	0.93	2.18	80.75

三次元位置の導出にあたり基本的な量となる傾き α 及び距離 L についてさらに詳細な測定を行った。基準点の取り付けに於ける面の傾きを変えて長径に対する短径の比 R を測定し α の値を導出した。その結果を図 6 に示す。距離 L_1 はパラメータとしてそれぞれの測定において ($L_1 = 78.4$ mm, 83.4 mm, 88.4 mm) 一定とした。測定範囲において距離 L_1 の値によらず、 α の値が求められている。また実線は計算結果を示しており、実験結果と良い一致が得られている。図 6 より 0° 付近では α の精度が幾分悪くなっているが、 α が増加するに連れて精度が良くなっている。63 回の測定に対して、長径に対する短径の比 R の測定誤差を標準偏差で評価すると約 0.0013 であった。この値より α の測定誤差を標準偏差で評価する

Fig. 6 Ratio R as a function of the angle α Fig. 7 Minor axis d_s as a function of the distance L_1

と、 $\alpha=5^\circ$ の時約 0.18° であった。

次に距離 L_1 を変えて短径 d_s を測定した結果を図7に示す。 α はパラメータとしてそれぞれの測定において一定 ($\alpha=0^\circ, 5^\circ, 7^\circ$) にした。実線は計算結果を示しており、実験結果と良い一致が得られている。 $\alpha=0^\circ, 5^\circ$ における54回の測定に対して短径 d_s の測定誤差 Δd_s は標準偏差で約 $13 \mu\text{m}$ であった。一般に画面上で2点間の距離より直接 d_s を測定する場合には Δd_s の値は画像の1画素の半分に対応する長さ (約 $115 \mu\text{m}$) にほぼ等しくなると考えられる。これに比較し、本研究の手法では $\Delta d_s \approx 13 \mu\text{m}$ であるので、誤差は約 $1/10$ 程度に改善されている。

Fig. 8 Minor axis d_s as a function of the distance L_1 for an imperfect ellipse

距離 L の測定誤差を ΔL とすると、 $\alpha \approx 0^\circ$ のとき、式(5)を用いると ΔL は次式になる。

$$\Delta L \approx \frac{p}{2n\lambda} \Delta d_s \quad (18)$$

式(18)から ΔL を標準偏差で評価すると、約 $50 \mu\text{m}$ となる。

以上の実験ではスクリーン内に楕円状の回折像全体が入っている場合に測定を行った。しかし、実際には楕円の全体がスクリーンに入らない場合も考えられる。そこで観測される楕円の一部が欠けている場合に対して同様に短径 d_s の測定 ($\alpha=0^\circ$) を行い、その測定精度に対する影響を調べた。楕円の $1/3$ が欠落した場合の結果を図8に示す。図8に示すように楕円パターンの欠落部分があると短径 d_s の測定値のばらつきが大きくなり理論値からずれた。楕円全体が観測される場合、観測される部分が全体の $5/6, 3/4, 2/3, 1/2$ の場合に対して、 d_s の誤差から距離 L の測定誤差を評価すると標準偏差ではそれぞれ $0.055, 0.066, 0.11, 0.27, 1.5 \text{ mm}$ であった。測定精度は楕円が欠けるに従って悪くなっているが、欠けた部分が $1/2$ 未満の場合は比較的よい精度であったと言える。

以上に述べた実験結果から面の傾き α の測定範囲は、0次光がスクリーンに入る範囲から評価できる。そこでスクリーンの1辺の長さを l とすると、

$$L \sin 2\alpha \leq \frac{l}{2} \quad (19)$$

と表すことができる。これより、距離 L が小さいほど α の測定範囲は大きくなる。例えば本研究の場合、 L の値を 100 mm とすると α の測定範囲は約 $\pm 8^\circ$ と

なる。また、距離 L は d_s から導出されるため、少なくとも一回折光がスクリーンに入っている必要がある。この条件は、おおよそ次式のように表せる。

$$d_{s(n=1)} \leq l \quad (20)$$

式(20)と式(5)から距離 L の測定可能範囲を評価すると、本研究の場合、最大値は約 90 cm となる。

また、 α を変えて β を測定した。 α が 5° 付近での β の測定値の標準偏差は約 0.67° であった。次に α , β を一定にして円形回折格子を X_s 方向に移動し (X_0, Y_0) を測定した。 X_0, Y_0 の測定値の標準偏差は約 $36 \mu\text{m}$ であった。

式(6), (7), (8)を偏微分して、 $\alpha=5^\circ$, $\beta=45^\circ$, $L=80 \text{ mm}$ として三次元位置の精度を考察すると以下ようになる。

$$\begin{pmatrix} \Delta X_R \\ \Delta Y_R \\ \Delta Z_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |\sin 2\alpha \cos \beta| \\ |\sin 2\alpha \sin \beta| \\ |\cos 2\alpha| \end{pmatrix} \Delta L + \begin{pmatrix} |2L \cos 2\alpha \cos \beta| \\ |2L \cos 2\alpha \sin \beta| \\ |2L \sin 2\alpha| \end{pmatrix} \Delta \alpha + \begin{pmatrix} |L \sin 2\alpha \sin \beta| \\ |L \sin 2\alpha \cos \beta| \\ 0 \end{pmatrix} \Delta \beta + \begin{pmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ 0 \end{pmatrix} \doteq \begin{pmatrix} 0.51 \text{ mm} \\ 0.51 \text{ mm} \\ 0.14 \text{ mm} \end{pmatrix} \quad (21)$$

式(21)より Z_R の誤差 ΔZ_R は β の誤差 $\Delta \beta$ と X_0, Y_0 の誤差 $\Delta X_0, \Delta Y_0$ に依存しないが、 X_R, Y_R の誤差 $\Delta X_R, \Delta Y_R$ はそれらの誤差に依存する。これは Z_R に比較し、 X_R, Y_R を導出する方法が間接的なためである。表1の X_R, Y_R の誤差が Z_R に比較して幾分大きい理由もこのことによる。

カメラの画像ひずみによる誤差を検討するためにスクリーン上のいくつかの位置に直径 22 mm の円を描きその画像より d_s を測定した。画像の中心部分と周辺部分とでは d_s の測定値の差が最大 $78 \mu\text{m}$ (画素の約 1/3) となった。今回の実験では画像ひずみによる誤差も表1の結果等に影響したと考えられる。しかし本方法においてはスクリーンとカメラの距離が一定である。そこであらかじめ画像ひずみを測定して補正しておけば、画像ひずみによる誤差は取り除けると考えられる。

5. 結 論

本論文では、基準点として円形回折格子の中心を用い、レーザを照射した際に生じる回折像から基準点の位置とその面の傾きを測定することのできる方法を提

案し以下の結果を得た。

- (1) リソグラフィ加工により作成した微小な円形回折格子を基準位置検出用の基準点として利用できることを示した。
- (2) レーザ照射系及び観測系とも比較的簡単に装置が構成できた。特に照射系においては基準点がレーザに照射されているだけでよい。従ってビームエキスパンダを用いてビーム径を太くすることにより容易に基準点を照射できた。
- (3) 観測される回折像の方程式を最小二乗近似を用いて求めることにより測定範囲及び測定精度の向上をはかり、距離測定に関しては 77.4 mm から 90.4 mm の範囲で約 $50 \mu\text{m}$ の精度が得られた。対象物面の最大傾斜角に関しては 5° のところで約 0.18° の精度が得られた。また三次元位置測定に関する実験を行い距離が 100 mm 程度において数百 μm の精度で三次元位置が検出できることを示した。

本論文で行った測定では回折光の4次光のみを用いた。いくつかの次数の回折像を同時に利用したり、円形回折格子の周期を小さくすることでさらに精度を向上できると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 出澤正徳：光学的距離センサ小型化のための一方法，日本ロボット学会誌，**3**, 5 (1985) 87.
- 2) 鈴木信幸ほか：ロボットハンド装着型非接触距離センサ，第一回ロボットセンサシンポジウム予稿集，(1988) 33.
- 3) C. J. R. Sheppard et al.: The Extended Focus and Surface Profiling Techniques of Confocal Microscopy, J. Modern Opt., **35**, 1, (1988) 145.
- 4) 木下源一郎ほか：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，**22**, 11 (1986) 1204.
- 5) 石井 優ほか：3次元モデルに基づくロボットシステムのためのマニピュレータ・キャリブレーション，日本ロボット学会誌，**7**, 2 (1989) 182.
- 6) 北村善文ほか：三眼視による三次元情報の計測，日本ロボット学会誌，**5**, 2 (1987) 131.
- 7) 津村俊弘ほか：レーザとコーナキューブを用いた移動体の能動位置計測のためのレーザ追尾手法，計測自動制御学会論文集，**23**, 10 (1987) 1017.
- 8) Ilkka Kaisto et al.: Optical Range Finder for 1.5-10 m Distances, Appl. Opt., **22**, 20, (1983) 3258.
- 9) 服部秀三ほか：モアレ干渉法を用いた超精密自動位置決め技術，精密機械，**51**, 9 (1985) 1795.
- 10) V. T. Chitnis et al.: Moiré Signals in Reflection, Optics Commun., **15**, (1985) 207.
- 11) 羽根一博ほか：リソグラフィ・パターンのレーザ回折光を用いたロボット用3D位置検出法，1990年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1990) 415.
- 12) 戸川隼人：計算機のための数値計算，サイエンス社，(1984) 6.