コード補正によるロータリエンコーダの高精度化

非会員 小倉 五十 司 (防衛庁海上幕僚監部)

正 員 鈴木 義 久 (防衛大学校)

正 員 萩 原 述 史 (防衛大学校)

A Method of Improving the Accuracy of Rotary Encoders Using a Code Compensation Technique

Isoji Ogura, Non Member, Yoshihisa Suzuki, Member, Nobumi Hagiwara, Member
(National Defense Academy)

This paper describes a method of improving the resolution and accuracy of incremental type rotary encoders by interpolating the scale pitch interval using the phase encoding and code compensation system. Several interpolation methods have been proposed which stand on the assumption that the scale intervals are accurate. But the experiment on an optical encoder system revealed that the scale pitch intervals include error.

The interpolation method proposed in this paper compensates the error in the pitch intervals as well as the error caused by the nonlinearity of the detected signals. By applying this system to an optical incremental type rotary encoder whose scale pitch is 1/360 rotation (1 degree resolution), finer than 1/45000 rotation (0.008 degree) resolution has been obtained.

キーワード：エンコーダ、ロータリエンコーダ、角度測定、分解能、内挿法

1. まえがき

回転角度の高分解能計測には、アブソリュート型あるいはインクリメンタル型ロータリエンコーダが用いられる。前者は1回転において絶対角度を与えることができるのに対して⁽¹⁾、後者は絶対角度は与えないが高分解能化には適している⁽²⁾。近年、ロータリエンコーダの高分解能化は、工作機械の正確な回転角度あるいは位置の制御等の多くの分野で求められている。ロータリエンコーダの分解能の向上には、さらに微細なスケールを持つロータリエンコーダを開発する方法と^{(3)・(4)}、現用のロータリエンコーダのスケールピッチを内挿する方法とがある^{(2)・(5)}。本論文では後者の方法をさらに発展させ、既設のロータリエンコーダに簡単な回路を付加することにより、その分解能を向上させることを目的とする。

筆者らはこれまで、高分解能化の方法としてインクリメンタル型エンコーダのスケールピッチの中を内挿する位相エンコーディング法を提案してきた⁽⁶⁾。また、その出力

に対してスケールピッチは正確であるという仮定の下にコード補正を実施してきた^{(7)・(8)}。しかし、ロータリエンコーダ全周分のデータを分析した結果、ピッチの間隔にはその回転軸の偏心等を原因とする誤差が存在することが判明し、さらに角度測定精度を向上させるためにはこの誤差は無視できないことが分かった。このため、ここではこのピッチ間隔の誤差をも含めた新しいコード補正方法を提案し、実際に装置を試作し回転角検出精度の検討を行った。

2. 位相エンコーディング法

インクリメンタル型ロータリエンコーダから出力される2相信号は、その歪を無視すれば次式で表される。

$$V_a = V_p \cos K\omega t \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$V_b = V_p \sin K\omega t \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで V_p は出力電圧の大きさ、 ω はエンコーダ軸の回転角速度、 K は1回転あたりのピッチ数である。この2相信号を理想正弦波と考えリサージュ図を描かせると、2相信号によって定められる点 P は図1に示すように円軌跡を

描く。点Pは、エンコーダ軸が1ピッチ回転する毎に円軌跡上を1回転する。したがって、エンコーダの1ピッチを 2π ラジアン of 電気的位相空間に対応させることができる。また、点Pの電気的位相角 θ は次式で与えられる。

$$\theta = \tan^{-1} (V_b / V_a) \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

いま、 $(360/K)^\circ$ の回転角に対応する 2π ラジアン of 位相空間を $N=2^n$ 個の扇形のセクタに分割する。セクタには図1に示すように $0 \sim N-1$ の番号をつけ、以後この番号を位相コードと呼ぶ。

図1 位相コード
Fig.1. Phase code.

$\pi/2$ ラジアン位相の異なる出力信号は、 T 秒ごとにそれぞれA/D変換器により m ビットオフセットバイナリコード D_a 、 D_b に変換される。 D_a 、 D_b は 2π ラジアン of 位相平面を図2に示すように $2^m \times 2^m$ 個のセルに分割する。 V_a 、 V_b がA/D変換器のフルスケール電圧の範囲内であれば、 D_a 、 D_b によりセルが定まり、このセルの中心位相角度 θ_c は (4) 式で与えられる。

$$\theta_c = \begin{cases} \tan^{-1} \frac{D_{bm}}{D_{am}} : \begin{cases} D_a \geq 2^{m-1} \\ D_b \geq 2^{m-1} \end{cases} \\ \pi - \tan^{-1} \frac{D_{bm}}{D_{ah}} : \begin{cases} D_a < 2^{m-1} \\ D_b \geq 2^{m-1} \end{cases} \\ \pi + \tan^{-1} \frac{D_{bh}}{D_{ah}} : \begin{cases} D_a < 2^{m-1} \\ D_b < 2^{m-1} \end{cases} \\ 2\pi - \tan^{-1} \frac{D_{bh}}{D_{am}} : \begin{cases} D_a \geq 2^{m-1} \\ D_b < 2^{m-1} \end{cases} \end{cases}$$

ただし、

$$\begin{cases} D_{am} = D_a - 2^{m-1} + 1/2 \\ D_{bm} = D_b - 2^{m-1} + 1/2 \\ D_{ah} = 2^{m-1} - D_a - 1/2 \\ D_{bh} = 2^{m-1} - D_b - 1/2 \end{cases} \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

θ_c は特定の位相コードに対応するので、この位相コードをリードオンリメモリ (ROM) の D_a 、 D_b に対応したアドレス $2^m D_a + D_b$ に書き込んでおけば、各サンプル周期 T でサンプルされたデジタルコード D_a 、 D_b によってそれに対応した位相コード P_i を直ちに読み取ることができる。また、エンコーダ軸の基準点で 0° にリセットさ

れるようなピッチ数を計数する可逆計数器の出力を C_i とすると、これらは基準点を 0° とする絶対角度を与える。

図2 状態セルの説明図
Fig.2. An explanation of the status cell.

位相コードはエンコーダの1ピッチ内を N 分割するので、エンコーダの分解能を N 倍し、 $1/NK$ 回転とすることができる。6ビットA/D変換器2個と、4kバイトROMを用い、位相コード分解能を8ビット ($N=256$) として内挿システムを構成する。市販の $K=360$ の光学式ロータリエンコーダを精密回転ステージを用いて等速回転させ、このシステムを用いて検出した位相コードの一部を図3に示す。

図3 位相コード出力例と理想値
Fig.3. Example of measured and ideal phase code outputs.

位相コードは 256 が1ピッチ即ち電気位相角 2π ラジアンに対応する。等速回転であるから位相変化は直線的になるべきであるが、検出位相コードの直線性は良くなく、また4. で説明する理想直線から得られるピッチと比較すると、図4に示すようにロータリエンコーダのピッチ自体も正確ではないことも分る。

図4において、横軸はロータリエンコーダの軸の回転角度、縦軸は理想ピッチとの誤差を角度で表している。

図4 ピッチ誤差の測定例
Fig.4. An example of the pitch detecting error.

ピッチ誤差は最大 0.08° であり、ピッチ内の歪とを合わせると約 0.10° の誤差が2相正弦波信号に存在することになる。したがって、結果として得られる位相コードはエンコーダの軸の回転角度に正確に対応せず、スケールピッチ内の分割数を大きくしても測定精度の向上は期待できない。

3. コード補正法

ロータリエンコーダの回転角度と位相コードを正確に対応させるためのコード補正法について述べる。ロータリエンコーダの2相正弦波から得られる位相コード出力を補正するための最も正確な方法は、本システムの各コード出力に対し、正確な角度測定を行い校正を行うことであるが、ここではこのような校正法によらない補正方法を提案する。

ロータリエンコーダは2相正弦波信号および1回転中一定の角度で1回基準パルスを出力する。このロータリエンコーダを等速回転させ、基準パルスから次の基準パルスま

での2相正弦波信号を一定サンプル時間 T でサンプルすることにより、エンコーダ1回転分の位相コードデータを得ることができる。1ピッチの位相コード数は 2^n 個であるので総位相コード数は $2^n K$ となる。これはロータリエンコーダを等速回転させて得られたデータであるから、図5に示すようにこの1回転分の総ピッチ間を直線で結んだものは正しい回転角度を与えることになる。したがって、この直線を位相コードの理想直線とし、回転角度の測定において得られた位相コードに理想直線上の値を対応させることにより補正を実施する。

図5 補正值算出原理
Fig.5. Method of obtaining the Compensated Code.

たとえば、図5のエンコーダの第2ピッチにおいてエンコーダから得られる位相コード P_i に対しては P_{ci} を正しい位相コードとする。ここで総サンプル数を M とすると、第 i サンプル時点の位相コード P_i に対応する正しいと考えられる位相コード P_{ci} は(5)式で与えられる。

図6 ロータリエンコーダ用内挿システムの構成
Fig.6. An interpolation system with compensation for rotary encoders.

$$P_{ci} = \left[\left(\frac{2^n K}{M} \right) i - 2^n C_{ci} \right] \dots \dots \dots (5)$$

ただし、 $[]$ はガウス記号である。
ここで C_{ci} は基準位置から数えたピッチ数で、 $M > 2^n K$

であれば、全ての P_i について P_{ci} を得ることができる。

エンコーダ自体のピッチ数は、A/D変換器出力のMSBパルスを可逆計数器で計数することにより C_i として得られる。(5)式で得た P_{ci} をROMのアドレス $2^\circ C_i + P_i$ に書き込んでおけば、可逆計数器の出力 C_i と実際に測定された位相コード P_i から直ちに正しい位相コード P_{ci} を知ることができる。そしてこの P_{ci} と C_{ci} から、エンコーダの基準パルス発生点を基準位置とする補正された絶対角度を得ることができる。図6に提案するロータリエンコーダ用内挿システムの構成を示す。

4. 位相コード出力の再現性

位相コードの補正が正しく行われるためには、ロータリエンコーダの2相正弦波出力に再現性がなければならない。そこで、以下に述べる方法で再現性についての検討を行った。最初に、ロータリエンコーダとそれを回転させる回転ステージとの接続位置や、ロータリエンコーダの回転方向などの条件を変えないで1回転分の位相コードデータを2回測定し、両者の測定位相コードデータを比較する。次に、回転方向を変えて位相コードデータを測定し、回転方向による位相コードデータの比較を行った。

図7 回転方向と位相コード出力

Fig.7. Phase code for CW and CCW rotation.

図8 回転方向によるピッチ誤差

Fig.8. Pitch error for CW and CCW rotation.

回転方向を変えた場合の位相コードデータの比較の一部を図7に、また全周分のピッチ誤差の比較を図8にそれぞれ示す。図7から、同一方向に回転させた場合の位相コード出力の再現性はほぼ ± 1 コード以下であり、最大でも ± 2 コード以下であることが分かる。

これをロータリエンコーダ軸の回転角度に換算すると、それぞれ $\pm 0.0039^\circ$, $\pm 0.0078^\circ$ 以下となる。

また、ピッチ誤差の再現性は、ロータリエンコーダ軸の回転角度にして $\pm 0.005^\circ$ 以下であった。なお、同一回転方向の場合の再現性は、回転方向を変えた場合より良好で、これらのことから再現性には問題はないといえる。

次に、ロータリエンコーダと回転ステージとの相対位置が 90° づつ異なる4通りの位置で固定し、4種類の位相コードデータを測定した。そのピッチ誤差の比較を図9に示す。この図から、ロータリエンコーダと回転ステージの接続位置を変えると、その位相コード出力の再現性はなくなることが分かる。

図9 接続位置によるピッチ誤差の比較

Fig.9. Pitch error due to the mechanical coupling.

また、接続位置が同じであってもロータリエンコーダを回転ステージに固定するボルトの締め付け具合を変えることにより、ピッチ誤差の発生状態が変化することも実験により確認した。つまり、ロータリエンコーダを使用する状態に固定してから、3.の手順でコード補正用データを取得する必要がある。

このピッチ誤差の原因をロータリエンコーダの回転軸とそのメインスケールとの偏心およびロータリエンコーダの回転軸と回転ステージとの偏心の合成されたものであると仮定すると、前者を原因とするピッチ誤差は、上記のように回転ステージとの接続位置を変えても変わらないが、後者を原因とするピッチ誤差は、ロータリエンコーダと回転ステージの接続位置を変えると、接続位置の変化分だけその位置が移動すると考えられる。

ここで、メインスケールの偏心を原因とするピッチ誤差の大きさを δ_1 、回転ステージとの偏心を原因とするピッ

チ誤差の大きさを δ_2 とすると δ_1 、 δ_2 は (6) 式で表される。

$$\begin{cases} \delta_1 = A \sin(x + a) \\ \delta_2 = B \sin(x + b + c) \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

上式で、 x はロータリエンコーダの基準位置を 0° とする回転角度、 a 、 b は基準位置と各偏心との相対角度、 c はロータリエンコーダと回転ステージとの相対角度である。 A 、 B は偏心を原因とするピッチ誤差の最大値で次式で与えられる。

$$A = \tan^{-1} \frac{\nu}{r}, \quad B = \tan^{-1} \frac{\nu'}{r} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 ν 、 ν' は偏心量、 r はメインスケールの半径である。また、合成されたピッチ誤差の大きさ δ_3 は、次式で求められる。

$$\delta_3 = \delta_1 + \delta_2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$A = 0.030^\circ$ 、 $B = 0.030^\circ$ 、 $a = 190^\circ$ 、 $b = 200^\circ$ とした時の δ_3 の計算値を図 10 に示す。ここで、 c としては 0° 、 90° 、 180° 、 270° の 4 つの場合について求めた。

図 10 ピッチ誤差シミュレーション波形
($A = 0.03$, $B = 0.03$, $a = 190$, $b = 200$)
Fig. 10. Simulated pitch error.

図 9 の実測値と図 10 のシミュレーション結果がよく一致することから、ピッチ誤差の原因はロータリエンコーダの回転軸に対するメインスケールおよび回転ステージの偏心であることが推定できる。また、(6)～(8) 式から偏心の方向、大きさを計算することができる。

5. 実験結果

6 ビット A/D 変換器 $\times 2$ 、位相コード変換用 4 k バイト ROM、補正用 64 k バイト ROM 及び 360 進可逆計数器 $\times 2$ を用い、8 ビット分解能の内挿システムを構成した。図 11 に市販の $K = 360$ (分解能 1°) の光学式エンコーダの等速回転時の、図 3 と同じ回転軸位置における補正された位相コード P_{ci} と理想直線からの偏差を示す。位相コードで表した理想直線からの偏差は ± 2 、回転角度にして $\pm (7.8 \times 10^{-3})^\circ$ 以内であった。これはエンコーダ自体の分解能 1° を約 128 倍に向上させたことに相当する。

図 11 補正後の位相コード及び偏差
Fig. 11. Compensated phase code and deviation.

図 12 に補正前のピッチ及び補正後のピッチの直線から計算されるピッチからの偏差を示す。今回は補正用に 64 k バイト ROM を用いたため、補正範囲は $0 \sim 255^\circ$ であるが、その範囲内でのピッチの偏差は $\pm (5.0 \times 10^{-3})^\circ$ 以内に収まっている。

図 12 補正前後のピッチ誤差の比較
Fig. 12. Error in pitch position before and after the compensation.

6. まとめ

ピッチ内の回転角度を絶対式で計測するインクリメンタル型エンコーダの内挿法に、ピッチ間隔の誤差をも含めたコード補正を加えることによって、1 ピッチ 1/360 回転の市販の光学式エンコーダの分解能および精度を 100 倍強向上させることができた。また、ロータリエンコーダの角度の検出はハードウェアのみで処理されるため、2 相正弦波出力を試作装置に入力してから補正された位相コードを出力するまでに要するむだ時間は、サンプリング周波数を 2 MHz としたとき $0.75 \mu s$ となり高速処理が可能となった。

本方式は 2 相正弦波信号を出力する既設のインクリメンタル型エンコーダに適用でき、応答速度を損なうことなくその分解能を向上させることができる。

また、試作装置に簡単な回路を付加することにより、回

転角速度の検出も可能である。

(平成5年4月22日受付)

文 献

- (1) 右近他:「多回転式絶対値エンコーダの開発」,電気学会産業計測制御研究会資料, IIC-87-5, pp. 35-42 (1987.5)
- (2) 杉浦他:「正弦波エンコーダを用いた高分解能デジタル速度検出法」,電気学会産業計測制御研究会資料, IIC-87-4, pp. 25-34 (1987.5)
- (3) K. Ishizuka et al., "Development of a High Precision Rotary Encoder", Denshi Tokyo, No. 30, pp. 67-69 (1991)
- (4) 大野他:「3600万パルスアブソリュートエンコーダ」,精密工学会誌開発資料, Vol. 58, pp. 55-60 (1992)
- (5) 松永:「高精密測定用光学式エンコーダ」, JSPE-51-04, pp. 722-728 (1985)
- (6) 萩原他:「高分解能レーザ干渉変位計と速度計測」,平成元年電気学会全国大会論文集, No. 44
- (7) 萩原他:「コード補正によるロータリエンコーダの高分解能化」,平成3年電気学会全国大会論文集, No. 54
- (8) N. Hagiwara et al., "A Method of Improving the Resolution and Accuracy of Rotary Encoders Using a Code Compensation Technique", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 38, pp. 482-485 (1989)

小倉 五十司 (非会員) 昭和38年4月8日生。

61年3月防衛大学校卒業。
平成5年3月防衛大学校理工学研究科卒業。
同4月防衛庁海上幕僚監部勤務。

鈴木 義久 (正員) 昭和9年11月15日生。30年

3月東海高等通信工学校技術本科卒業。直ちに船舶無線電信電話(株)入社。31年5月防衛大学校電気工学教室に勤務。36年同助手。レーダによる反射断面積、距離、速度の精密測定および防錆用塗膜の非破壊劣化試験、自動計測などの研究に従事。

萩原 述史 (正員) 昭和12年11月20日生。35

年3月防衛大学校卒業。44年3月東京工業大学理工学研究科博士課程修了。同4月防衛大学校電気工学教室講師、51年4月同助教授、平成2年4月同教授。この間、電子計測回路、光応用計測の研究に従事。工学博士。