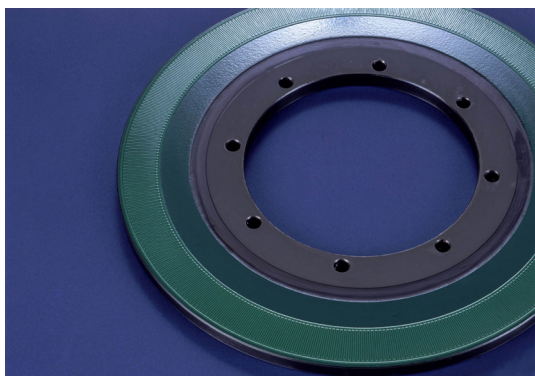


非接触超精密スケール(MP スケール)の 安全機能(異常検出機能)

Safety Function (Malfunction Detection) of Open Type Precision Scale



石井 浩^{*1}
Koh Ishii

当社の非接触超精密スケール(MP スケール)は、耐環境性に優れた高精度スケールとして、工作機械のモータドライブシステムに展開している。近年、同時5軸マシニングセンタや汎用サーボシステムにおいて普及しつつあるダイレクトドライブモータは、ギヤの摩耗やバックラッシュがなく、中空構造で省スペース、ハイゲインで滑らかな回転ができるという特徴があるが、位置検出器を内蔵してないため、別置スケールが必要不可欠である。MP スケールは非接触構造でバックラッシュがなく、中空構造で省スペース、高速高精度であり、ダイレクトドライブモータに最適である。このダイレクトドライブシステムの安全性向上に貢献するものとして、当社は、異常検出機能を強化したスケールを開発した。安全かつ高精度な当社スケールをダイレクトドライブモータのアプリケーションに提案するものである。

1. はじめに

モータドライブシステムとして、工作機械を主とした NC 制御によるモータドライブシステムと、ロボット・液晶パネル搬送装置等のシーケンサ制御による汎用サーボシステムとがあり、両分野において近年ダイレクトドライブモータが普及しつつある。

NC 制御によるサーボモータシステムにおいては、MP スケールは、サーボモータ内蔵エンコーダの別置検出器として付加され、フルクローズドループ制御により機械の高精度化を実現する。この場合、NC システムにてエンコーダ位置とスケール位置との比較により異常検出がなされる。

NC 制御、汎用サーボいずれにおいても、ダイレクトドライブモータの場合、サーボモータシステムと異なり、モータに対して位置検出器が1つであるため、位置検出器そのものの異常検出が重要である。

一般に、スケール内で2つの検出ヘッドを設け上位コントローラ側で2つの位置データを相互チェックする方式もあるが、必然的に部品点数が増えてしまうととも、上位コントローラへ2つの位置データを伝送する必要があり通信プロトコルの制約が生じる。そこで、当社は、従来の特徴を継承しつつハードの追加なく、上位コントローラに依存せずに異常検出機能を強化したスケールを開発したので報告する。

*1 工作機械事業本部技術部主席

2. MP スケールの用途と特徴

MP スケールは、機械の直線位置や角度を検出する耐環境性に優れた検出器であり、移動体に直接取付け、フルクローズドループ^(注)(図1)を形成することができる。機械端を直接検出することができるため、減速ギヤの精度、減速ギヤのバックラッシュ、ボールスクリューの精度、ボールスクリューの熱膨張等、駆動系の精度悪化の影響を受けることなく機械の精度を向上させることができる。

MP スケールの構造は、稼動側と固定側が非接触であるため、摩耗やバックラッシュがなく、長期間安定した繰り返し精度が得られる。また、厚さが薄いので、機械の低重心化が計れる。角度検出を行うロータリスケールは内径を大きくした中空構造で、配線や配管を通すことができ、ダイレクトドライブモータに適している。

(注) フルクローズドループ制御:NC 制御で機械を目標位置(角度)に移動させるために、機械の最終位置(角度)をスケールで検出してNC に戻す制御方式

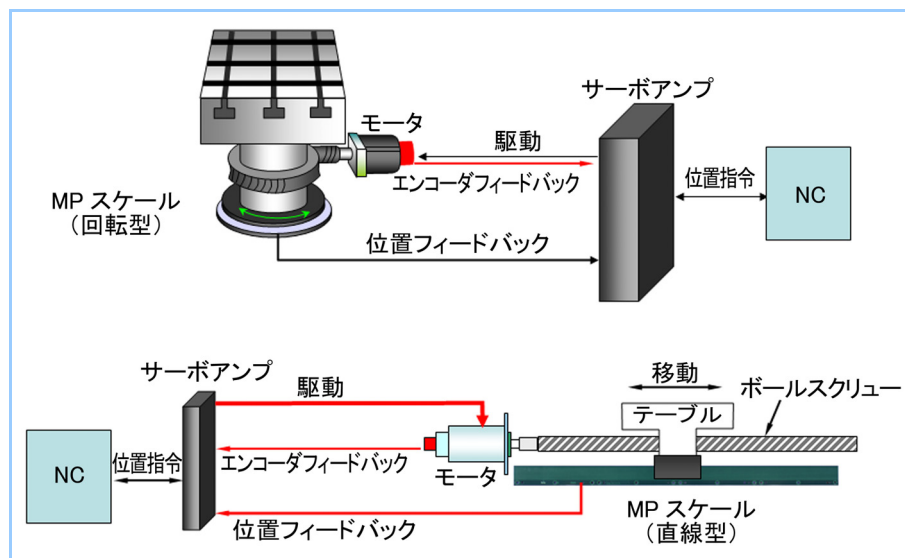


図1 MPスケールを用いたフルクローズドループ

その他、MPスケールの特徴を表1に示す。このような特徴からNC 工作機械やテーブルに幅広く採用されている。

表1 MPスケールの特徴

項目	説明
絶対精度	ロータリスケール:2秒(12 インチサイズ) リニアスケール:5 μ m(全長1m)
高速	ロータリスケール:~10 000rpm リニアスケール:3 600m/min
堅牢	鋼材ベースに銅箔が形成されており、振動や衝撃で割れることがない ・耐振動:1.5mm 振幅 10~55Hz ・耐衝撃:55G 11ms
省スペース	厚さ約 20mm と取付けスペースが小さく、精度が必要な場所に取付け可能で機械を高精度かつコンパクトにできる
温度変化に対する誤差が少ない	機械と同じ鉄のスケールで、温度変化があっても機械とフィットして伸縮するため、温度によるスケール歪が発生せず、精度劣化がない
塵、油に強い	電磁誘導式のため、塵や切削油の影響を受けない
耐久性	非接触であるため、摩耗やバックラッシュがなく、長期間安定した繰り返し精度が得られる

3. MP スケールの原理

MP スケールは、コイルを微小なギャップを隔てて平行に向かい合わせ、電磁誘導によって位置を検出する。

図2に動作原理を示す。一方のコイルに交流電流(励磁電流)を流すと、電磁誘導作用により、他方のコイルに誘導電圧が発生する。この誘導電圧の大きさは、電磁結合度、すなわち、2つのコイルの相対位置により変化する。この変化を取り出すことで位置検出する。

コイルを移動させていき、2つのコイルパターンが重なったときは電磁結合度が強くなり、離れれば弱くなる。コイルパターンを等ピッチPにすることで、誘導電圧の強弱はコイルの変位Xに応じて正弦波 $\cos(2\pi X/P)$ で繰り返し変化する(図3)。しかしながら、この誘導電圧の変化は、コイルの変位によるものか、ギャップ変動や励磁電流のドリフトによるものか区別がつかない。そこで、ギャップ変動や励磁電流の変化を排除するため、図4に示すように、1/4ピッチずれた2つの励磁コイルを組み合わせる。2つの励磁コイルに同じ電流を流した場合の変位Xと各々の誘導電圧は図4に示すように $\cos(2\pi X/P)$ 、 $\sin(2\pi X/P)$ の関係となる。両者を合成したものが誘導電圧として現れる。ここで、一方の励磁コイルに流す電流の振幅と、もう一方の励磁コイルに流す電流の振幅との関係を変位Xに対して $\cos(2\pi X/P)$ 、 $-\sin(2\pi X/P)$ となるようにすれば、合成した誘導電圧を打ち消して0にすることができる。

つまり、誘導電圧が0となるように、励磁電流の振幅を調整することで、励磁電流の位相から、ギャップ変動や励磁電流のドリフトの影響なく、変位Xが検出できる。停止しているときは、誘導電圧が0になっており、変位が発生すれば、誘導電圧が発生し、それを再び0にするよう励磁電流を調整するというフィードバック制御を行っている。こうすることで、外乱の影響を抑制しつつ正確な位置を安定に検出するものである。

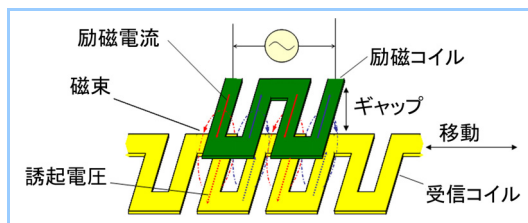


図2 MPスケールの動作原理

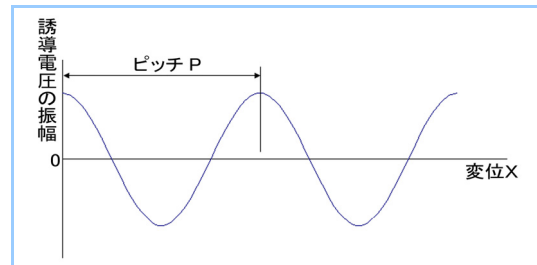


図3 移動量と誘導電圧の振幅

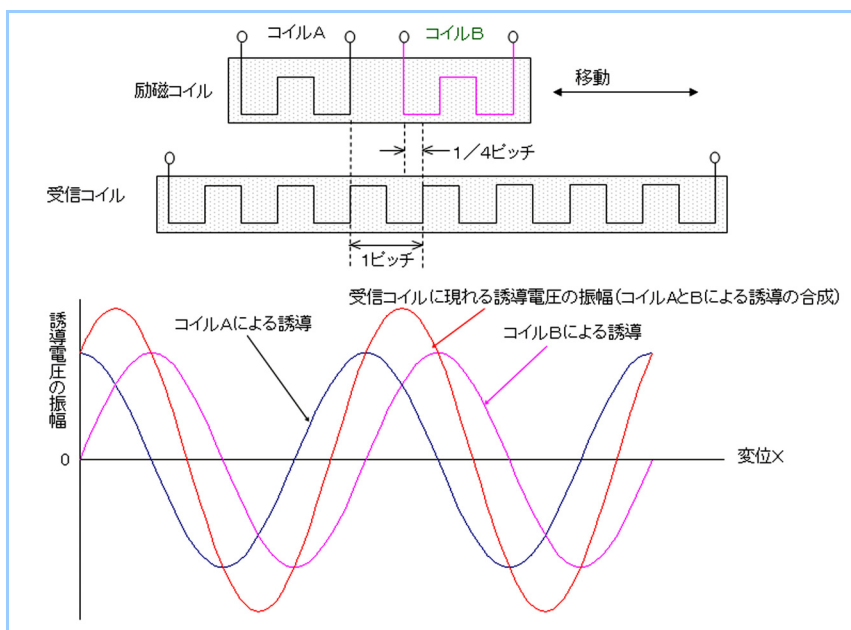


図4 MPスケールのコイル配置と各コイルの誘導電圧

4. MP スケールの異常検出機能

4.1 従来の異常検出機能と課題

MP スケールにおける異常モードとしては以下の4つがある。

- (1) コイルや配線の断線
- (2) ギャップ過大 (= 位置検出に十分な誘導電圧が得られない)
- (3) コイルや配線の地絡, 絶縁不良
- (4) 外乱 (強い磁場) による位置検出不能

このうち, (1)から(3)については, 従来より, 異常検出機能を具備している。

(1)はコイルに直流電圧を重畳させ, その直流レベルにてコイルや配線の断線を検出するものである。(2)は起動時に誘導電圧レベルを検出し, 誘導電圧が低い場合に異常と判断するものである。しかしながら, 起動後は, 位置検出のため, 誘導電圧が0になるようにコイルに流す電流を調整するので, 起動時しか異常検出できない。(3)のコイルや配線の短絡は誘導電圧不足をもたらすので, (2)と同様に異常検出可能である。

MP スケールの異常検出の課題としては, 次の2つである。

- (4)の異常検出を可能にすること
- (2)の異常検出を常時行えること

(4)の異常モードのメカニズムは, 外乱 (強い磁場) が加わり誘導電圧が検出回路のアンプの動作レンジを越えて飽和した場合, 交流成分は0となり, 移動に対し誘導電圧が変化しなくなり, 停止状態と区別がつかなくなるため, 位置検出不能となる。この異常は, スケールにもう一系統コイルパターンを設け2重化し, 各々で位置検出し相互比較するという方法では検出できない。なぜなら, 誘導電圧が飽和して変化しなくなってしまうと, 2系統とも異常として検出できないだけでなく, 位置検出回路等のハードも2系統分必要になり故障率が増加する。また, 飽和電圧を監視する方法だとその検出回路の追加が必要となる。

(2)の異常のメカニズムは, ギャップが広くなり移動に対し誘導電圧が変化しなくなって位置検出不能となることで, (4)の異常検出が可能となればこれもおのずと検出可能となる。

4.2 異常検出機能強化

異常検出強化の手段として, 位置検出用の励磁電流 (周波数 f)とは異なる周波数 f_a の励磁電流を重畳させ, 周波数 f の成分から位置検出を行い, 周波数 f_a の成分の信号レベルから異常検出を行う手法をとった。ブロック図を図5に示す。

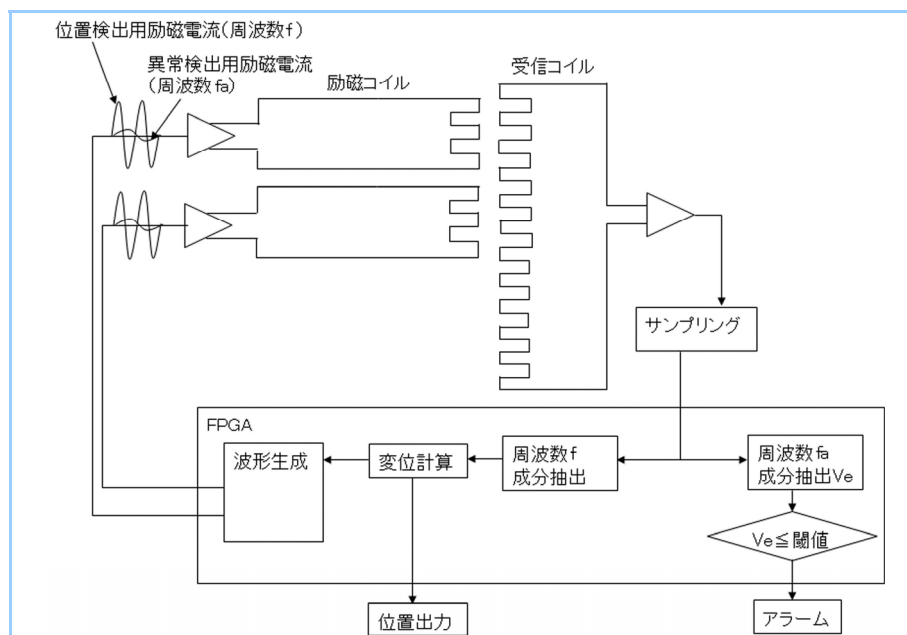


図5 ブロック図

まず周波数 f_a の信号を重畳させる方法としては、元々、励磁電流信号は FPGA (Field-Programmable Gate Array: プログラムにより構成を設定できる集積回路) により波形生成しているため、FPGA のソフトウェアにて既存の位置検出用の周波数 f の信号に、周波数 f_a の信号を加算することで実現した。

次にスケールの精度を維持するためには、異常検出用周波数 f_a の電磁誘導が位置検出に影響を与えないように周波数分離する必要がある。通常、周波数分離手段としてはフィルタ回路による方法が挙げられる。精度に影響を与えないよう十分な信号分離のためには、周波数 f と f_a を十分分離して、なおかつ高次のフィルタ回路の追加を要す。当社ではこのようなフィルタ回路を用いず、誘導電圧のサンプリング点と周波数 f_a を工夫した。

誘導電圧には周波数 f と f_a の成分が含まれる。図6のようにサンプリングして各データの組合せを演算することで、位置検出用の成分と異常検出用の成分を分離した。位置検出用の成分は、従来同様、変位に対してフィードバック制御により0調整することで変位を検出する。

異常検出用の成分は、閾値による判定にて異常を検出する。

以上の検出方法により、精度は、図7に示すように、従来品と本開発品と同等で、ハードの追加変更なく、異常検出の強化を実現した。

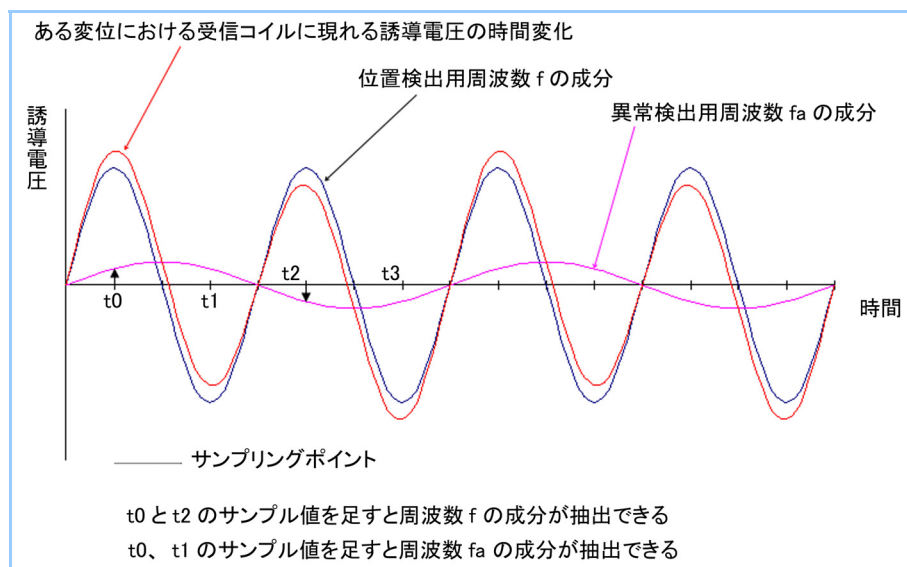


図6 周波数分離

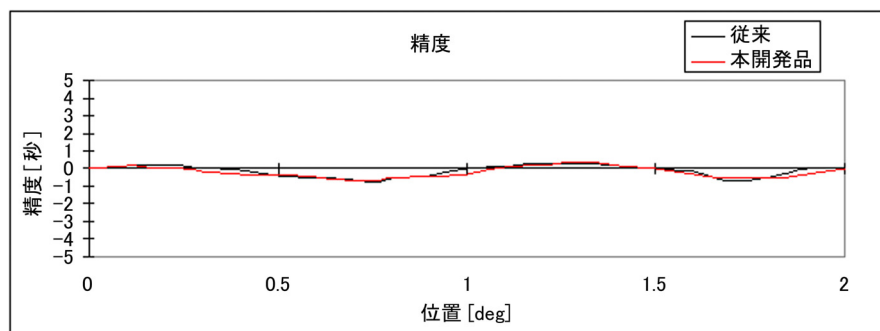


図7 精度比較

5. まとめ

ダイレクトドライブシステムの安全性向上に貢献するものとして、異常検出機能を強化したスケールを開発した。今後は、各社サーボインタフェースへの展開をしていくとともに、工作機械のみならず、汎用サーボシステムを用いた FA マシンの精度向上に当社の MP スケールを提案していきたい。