

セミアブソリュート型ストロークセンシングシリンダ

Semi-Absolute-Type Stroke Sensing Cylinder

永井 勇 牙
NAGAI Yuki

要 旨

昨今、油圧機器や輸送機器に使用される、油圧アクチュエータや油圧ダンパの電動化が進んでいる。

電動モータなどによって発生させた油圧でシリンダなどを駆動するElectro-Hydraulic Actuator（以下EHA）や、自動車や鉄道車両などの車両挙動に応じてその減衰力や推力を調整するアクティブサスペンションなどが好例である。

これら油圧シリンダの電子制御における制御パラメータのひとつとして、シリンダの「ストローク量（伸縮変位量）」がある。油圧シリンダのストローク量をリアルタイムに検出することで、より細かな動作や異常時のフェールセーフ機構に活用できるため、その重要性は大きい。

一方で、油圧機器は振動、温度範囲などにおいて、厳しい環境下で使用されることが多いため、付随する制御機器も耐環境性が求められる。

そのような厳しい外部環境に対応できるストロークセンサの方式として磁気スケール方式を採用した。

しかし、磁気スケール方式は、ストロークの変位量を相対的に検出する「インクリメント型」のセンサであるため、通常はストローク量の絶対値を出力する「アブソリュート出力」ができないという課題がある。

アブソリュート出力は油圧機器の制御において、必須機能として求められる。

そこで、ストローク量の絶対値の基準点を検出可能な磁気スケールを採用し、磁気スケール方式でありながらストローク量のアブソリュート出力が可能なストロークセンシングシリンダを開発した。

Abstract

In recent years, the electrification of hydraulic actuators and dampers used in hydraulic equipment and transportation equipment has been progressing.

Electro-Hydraulic Actuators (EHA) that drive cylinders with hydraulic pressure generated by electric motors, and active suspension that adjusts damping force and thrust according to the behavior of automobiles and railroad cars, are typical. "Displacement" is one of their control parameters. By detecting the displacement of the hydraulic cylinder in real time, it can be used for more detailed operation and fail-safe mechanisms in case of abnormalities, so its importance is considerable.

On the other hand, hydraulic cylinders are often used in harsh environments under vibration, operating temperature range, etc., so the mounted control equipment is also required to have environmental resistance.

KYB adopted the "Magnetic Scale Method" as a stroke sensor method that can handle such harsh external environments. However, since it is an "Increment Type" sensor that relatively detects the displacement amount of the stroke, there is a problem in that normal output that outputs the "absolute value" of the stroke amount cannot be performed.

"Absolute output" is required as an essential function for hydraulic equipment control.

Therefore, we adopted a magnetic scale that can detect the reference point of the absolute value of the displacement, and developed a Stroke Sensing Cylinder that can output the absolute value of the stroke amount even though it is a magnetic scale method.

1 緒言

アクチュエータやダンパなどの油圧機器は、建設機械や自動車、鉄道車両、航空機などの輸送機器で多く使用されている。昨今では、省エネや高機能化の観点から、従来は機械的に制御していた油圧機器の電動化及び高機能化が進んでいる。

EHAと呼ばれるシステムでは、従来原動機などを用いて発生していた油圧源を電動モータなどへ置き換え、シリンダなどを駆動する。また電磁切替弁などを用いることで、油圧回路の電子制御も可能である。

これによって、従来よりも高効率かつ複雑な制御が可能となる。

また、自動車や鉄道車両などには、走行中の車体の挙動に応じて減衰力や推力を適切に制御し、乗り心地や操縦安定性などを向上するアクティブサスペンションの採用が進んでいる。

EHAもアクティブサスペンションも油圧アクチュエータやダンパなどの状態（制御パラメータ）をセンサで検出しながら電子制御を行う。

このとき、センサで検出するパラメータのひとつにシリンダの「ストローク量（伸縮変位量）」がある。

油圧シリンダの電子制御において、シリンダのストローク量はピストンロッドがどの位置にあるのかを把握するための重要なパラメータとなる。定常時にはストローク量を用いたフィードバック制御を行い、万一制御範囲外にシリンダが変位した場合のフェールセーフ機構などに用いるためである。

特に、建設機械や輸送機器などにおいては、安全性の確保は最重要項目であることから、フェールセーフ機構の重要性は高い。

そこで、建設機械や輸送機械などへ適用可能なストローク量を検出する、ストロークセンシングシリンダ（以下SSC）の開発に着手した。

建設機械や輸送機器用のセンサにおいては、振動や高温または低温環境などに対する高い耐久性が求められる。また、搭載するスペースが限られることが多いため、小型化も同時に求められる。

これらの要求を満足する方式として、油圧シリンダのピストンロッドに等間隔に刻んだ磁気スケールをセンサで読み取りストローク量を検出する「磁気スケール方式」を採用した。

しかし、採用した磁気スケール方式のセンサは、物理的な構造上インクリメント型のセンサとなるため、アブソリュート出力ができないという課題がある。

一般に、ストロークセンサのような距離センサにおいて、その出力形式は「インクリメント型」と「ア

ブソリュート型」に大別される。

前者は、パルスカウンタに代表されるように、一定間隔毎に入力される信号をカウントすることで、ある地点からの位置の変化分（変位量）を検出する方式である。一方後者は、常時基準点からの絶対位置を出力する方式である。

したがって「アブソリュート出力可能」とは、「油圧シリンダの絶対位置を検出可能」と同義となる。

そこで、磁気スケールの形状の工夫と、センサ信号の処理アルゴリズムによって、絶対位置検出が可能な磁気スケール方式の「セミアブソリュート型SSC」を開発したため、その詳細について解説する。

なお、一般的な「アブソリュート型」という呼び名に対し、「セミ」という言葉が付加されている理由についても併せて後述する。

2 システム概要

2.1 システム構成

セミアブソリュート型SSCのシステムは、後述する磁気スケールの施されたピストンロッドと、磁気スケールをセンシングする磁気センサ、並びに磁気センサの信号を演算処理し、油圧シリンダのストローク量へデータ変換する信号処理ボードの3つの要素から構成される（図1）。

磁気センサは、油圧シリンダの側面に取り付けられ、先端の検出部がピストンロッドと摺動するように配置される。磁気センサが検出した信号は、後段の信号処理ボードへと入力され、ストローク量へデータ変換した後、実際に油圧シリンダの制御を行う上位コントローラへ送られる。

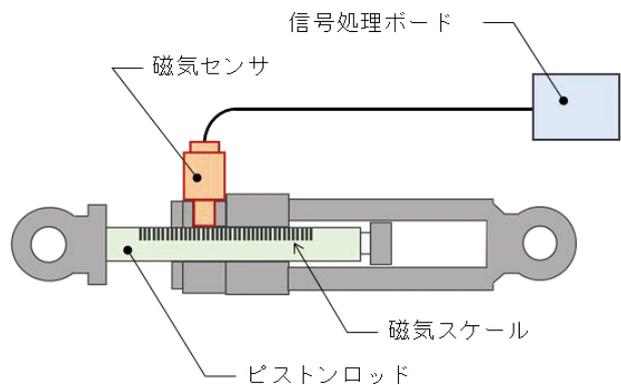


図1 システム構成

2.2 ピストンロッド及び磁気スケール

磁気スケール加工を施したピストンロッドの試作品の外観を写真1に示す。写真中央部の縞状に見える箇所がピストンロッド表面を溝状に彫り刻まれた磁気スケールである。その後、非磁性材料のめっき材料で溝を埋めるように加工を行い、図2のような構造となる。

したがって、ピストンロッドの断面を見たとき、磁性材料と非磁性材料が一定間隔で交互に並ぶ形状となり、それらが磁気スケールとなる。

なお、本報のシステムに用いるピストンロッドには、2mm間隔で磁気スケールが施される。



写真1 めっき前ピストンロッドの試作品外観

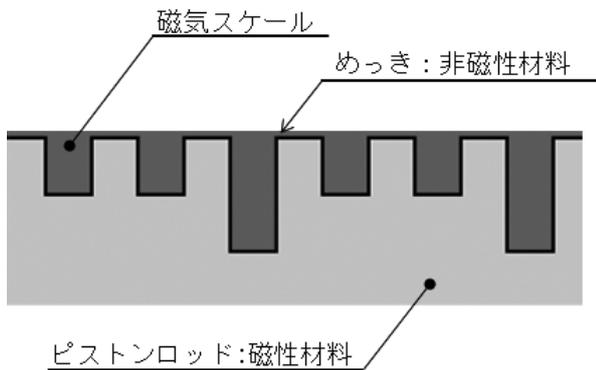


図2 磁気スケールの構造

2.3 磁気センサ

磁気センサは、写真2に示す検出部の先端がピストンロッドに接する形で取り付けられ、磁気スケールを検出する。

また、磁気スケールの検出部は、図3の断面図に示すような内部構造となっている。内部に設けられた永久磁石からヨークを介して、磁気抵抗ICを貫通する形でピストンロッド表面へと磁束線が通過する構造となる。

検出原理については後述するが、磁気センサは、ピストンロッド上に設けられた磁気スケールとの位置関係によって生じる、この磁束線の変化を検出するセンサとなる。

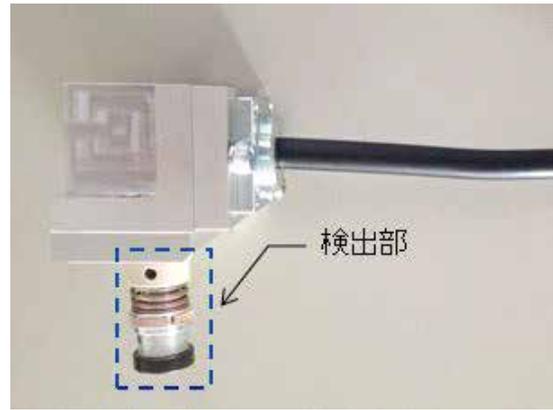


写真2 磁気センサ（試作品）外観

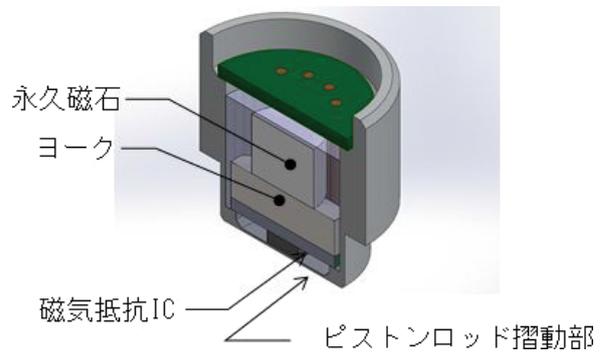


図3 磁気センサ検出部の断面図

3 ストローク量の検出原理

3.1 磁気抵抗ICによる磁気スケール検出

磁気センサ内部の磁気抵抗ICには、4個の磁気抵抗素子が搭載されている。4個の磁気抵抗素子は、ピストンロッド上の磁気スケールの施工間隔である2mmの4分の1に相当する0.5mm間隔で配置される。また2個で1対となり、それぞれの対をA相磁気抵抗素子及びB相磁気抵抗素子と称する。A相及びB相磁気抵抗素子の配置は図4に示す通りとなる。

前述の通り、磁気センサは永久磁石からヨークを介して磁気抵抗ICへ磁束線を貫通させる構造をしている。磁束は磁性体へ向けて多く流れる特性があるため、図4の例のように磁気スケールとの位置関係で各磁気抵抗素子内を通過する磁束線の傾きが変化する。

磁束線の傾きによって、磁気抵抗が変化するため、磁気センサの検出値もそれに伴い変化する。

したがって、油圧シリンダの動作により、磁気スケールが移動すると、各磁束線の傾きも時系列的に変化する。

ここで、A相磁気抵抗素子及びB相磁気抵抗素子の出力値をそれぞれA相信号、B相信号とすると、ピストンロッド（磁気スケール）がある一定速度で

移動した場合、図5に示すように、磁気スケールの間隔2mmを移動する毎に1周期となる正弦波状の出力波形を得られる（以降、解説の便宜上、特別な断りがない場合はピストンロッドが一定速度で移動するものとする）。

更に、A相磁気抵抗素子に対し、B相磁気抵抗素子は0.5mm（磁気スケール間隔の4分の1）オフセットして取り付けられているため、B相信号はA相信号に対して90度位相のずれた余弦波となる。

なお、ここでのA相とB相の信号は、それぞれ各2個の磁気抵抗素子で検出した磁束線の傾きの差分を取った値としている。図5のような正弦波、余弦波を得るには、磁気抵抗素子は1個ずつでも構わないが、その場合、実使用上の振動などによって磁気抵抗ICと磁気スケールとのギャップが変動しても検出値が変化してしまい、正確な検出が困難となる。そのため、2個の磁気抵抗素子を対とし、差分を取ることで磁気スケールとのギャップの変動による影響を排除している。

また、これらA相信号及びB相信号は、磁気抵抗ICと磁気スケールとの位置関係によって大きく左右されるため、図6に示すような磁場解析を用いて設計の最適化を行った。

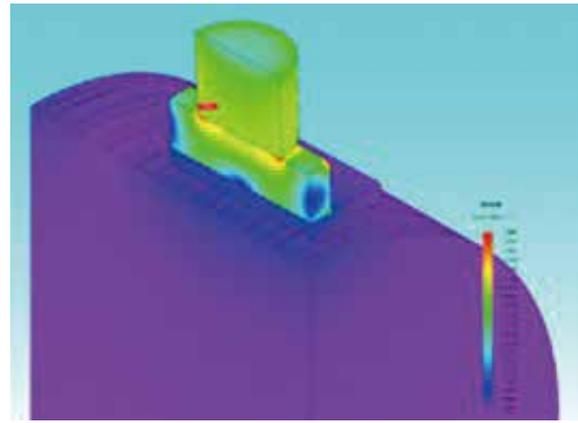


図6 磁気センサの磁場解析

3.2 ストローク量検出の基本原則

前述の3.1節で得られた磁気スケール検出信号（A相信号及びB相信号）は、システム構成機器のひとつである信号処理ボードによって、油圧シリンダのストローク量へ換算する。

まず、A相信号及びB相信号の振幅の中央値をゼロクロスレベルと称する。そして、A相信号またはB相信号がゼロクロスレベルと交差する度に1パルスが発生するパルス発生回路を信号処理ボード内に備える。このときのパルスをゼロクロスパルスと称する。

したがって、ゼロクロスパルスは、ピストンロッド（磁気スケール）が0.5mm移動する毎に発生することになる（図7）。

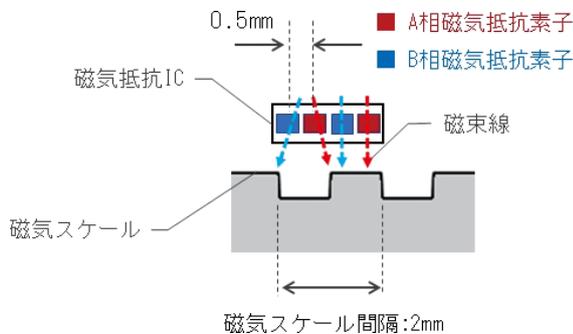


図4 磁気抵抗素子と磁気スケールの位置関係

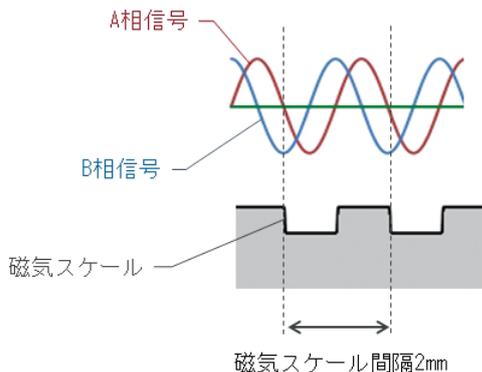


図5 磁気スケールと出力信号

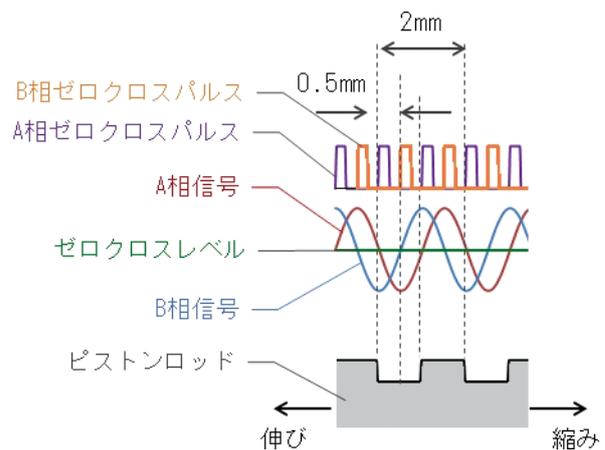


図7 ゼロクロスパルス

このゼロクロスパルスが入力された数をマイコンなどの演算装置で取得することで、0.5mm分解能のストローク量を計測することが可能になる。

また、油圧シリンダのストローク方向（伸び側または縮み側）についての判定は、A相信号とB相信号の位相がずれている特性を利用する。A相ゼロクロ

スパルスが検出された際、A相信号の極性が正から負への切り替わりか、負から正への切り替わりかという条件と、その時のB相の極性が正か負かという条件の組み合わせでストローク方向は一意に決まる。

例えば、図7において、向かって左側に磁気スケールが移動する場合を「伸び」、右側に移動する場合を「縮み」と定義すると、A相信号が正から負へ切り替わる際、B相信号が負であれば「伸び」を示し、逆にB相信号が正であれば「縮み」を示すことになる。

同様の判定をB相ゼロクロスパルスの検出時にも行うことで、常時ストローク方向を判定できる。

このような磁気スケール方式のストローク量検出は、機械的な寸法から、ゼロクロスパルスの発生周期が一意に定まる。そのため、本報のシステムにおいては $\pm 0.5\text{mm}$ の精度が確約されるというメリットがある。

一般的に、油圧シリンダは、屋外使用が多いことや、作動油の温度変化などによって、使用される温度範囲が広いと、付随するセンサ類は温度ドリフトによる影響を受けやすい。

しかし、磁気スケール方式を採用することで、温度ドリフトによる影響をほとんど無視することができる。このことも磁気スケール方式を採用する理由のひとつとなる。

3.3 セミアブソリュート出力

一般的に、アブソリュート型のセンサとは、「常時」ストローク量の絶対値を出力する方式を指す。

例えば、センサの電源が切られた状態（ストローク量の検出が不能な状態）において、油圧シリンダが動作し、変位したとしても、再度センサを起動した際には、即時変位後の値を出力可能ということである。

しかし、本報のストロークセンサは3.2節にて既述の通り、基本的にゼロクロスパルスのカウントによりストローク量を計測するインクリメント型のセンサである。したがって、通常は油圧シリンダの絶対位置を検出することは不可能である。

そこで、以下のような原理を用いて絶対位置の検出を可能にしている。

まず、図8に示すようにピストンロッド上の磁気スケールを、深さの浅い通常スケールと、より深い基準スケールの2種類を施工しておく。これにより、基準スケール部は非磁性材料が厚くなるため、A相及びB相信号の振幅が増加する。この振幅の差から基準スケールを判別する。

次に、基準スケールは、油圧シリンダの絶対位置0mm基準点となる箇所と、その両方向に複数箇所配置する。同時に基準スケール同士のピッチは、それ

ぞれ1ピッチ、2ピッチ、3ピッチのように同じピッチとならないようにしておく。

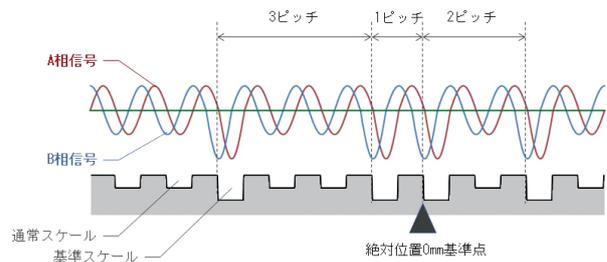


図8 基準スケールの配置例

こうすることで、油圧シリンダが動作し、磁気センサがいずれか2箇所の基準スケールを検出した際、2箇所目の基準スケールを検出するまでのピッチ数をゼロクロスパルスの取得数から求めることで、どの基準スケールを検出したのか一意に定まる。つまり絶対位置を把握できる。

例えば図8において、向かって左方向へ磁気スケールが動き、かつ2つ目の基準スケールを検出するまでに磁気スケールを2ピッチ（ゼロクロスパルスを2回）検出した場合は、最も右側の基準スケールを検出したことになるため、絶対位置0mmの点から右に4mmという絶対位置が確定する。

絶対位置が確定してからは、その絶対位置を基準にしてストローク量を検出すればよい。

したがって、本報のSSCは、システム起動直後はインクリメント型センサとして動作するものの、その後の油圧シリンダの稼働に伴い2箇所の基準スケールを検出した直後からアブソリュート型として動作する。ゆえに本報のSSCは「セミアブソリュート型」としている。

また、この基準スケールは複数箇所設けなくとも、絶対位置0mmの位置に1箇所のみ配置しても原理的には絶対位置の検出は可能である。

しかし、実際の使用条件を想定した際、例えば輸送機器のサスペンションのダンパとして用いた場合は、車体の振動が少ない平地走行時など、微量のストローク量でのみ伸縮する場合は考えられる。その場合、1箇所のみ基準スケールでは、必ずしもそれを検出するとは限らず、絶対位置出力が不可能になってしまうことが懸念される。

油圧アクチュエータの場合であれば、基準スケールから離れた位置で起動した際には、基準点検出のために機器を大きく動かさなければならなくなってしまふ。

そのため、ピストンロッド全体にわたって、複数箇所に基準スケールを分散して配置することで、シ

システムの起動後、可能な限り早急に基準点の検出が行えるようにした。

なお、図8の例では絶対位置0mmの基準をピストンロッドの中間部に置いて、伸び及び縮みの双方向への動作を想定しているが、起動時の位置が片端寄りになるような用途の場合は、そこへ絶対位置の0mmを置き、1方向のみの検出とすることも可能である。

3.4 計測分解能の細密化

ここまで、A相及びB相信号から取得するゼロクロスパルス数をカウントすることで、0.5mm分解能のストローク量を計測できる原理について述べた。

しかしながら、実際の油圧シリンダの制御を行う際、0.5mm分解能では性能面で不足する場合がある。そこで、ソフトウェアの演算によって、計測分解能をより細密にする処理が施されている。まず、マイコンなどの演算装置にゼロクロスパルスの他、A相信号及びB相信号のアナログ電圧値も同時に取り込む。取り込んだA相及びB相信号をそれぞれX軸（横軸）、Y軸（縦軸）とした2次元平面上にプロットすると、図9に示す点A1、B1、A2、B2と順に辿る形状のリサージュ円を描く。

前節3.3に記載した通り、磁気スケールが通常スケールと基準スケールの2種類あり、それぞれで異なった振幅のA相及びB相信号を出力することから、二重円のような形を描いている。

リサージュ円は、1周でA相及びB相の1周期、つまり2mmのストローク量に相当するため、リサージュ円の90度がゼロクロスパルスの発生間隔である0.5mmに相当する（0.5mmストロークする毎にセンサ出力値はリサージュ円上を90度移動する）。

したがって、取得したA相及びB相の電圧値によって定まるリサージュ円の軌跡上の点と、中心点を結ぶ線分と水平線が成す角を求めることで0.5mm以下の分解能のストローク量が求められる。

また、磁気スケールの通常スケールの検出値（内側のリサージュ円）から基準スケールの検出値（外側のリサージュ円）への移行時（またはその逆）では、リサージュ円の波形が著しく変形するため、位置検出精度が劣化する。

しかし、基準点検出後のアブソリュート型として動作中は、検出しているA相及びB相信号が、リサージュ円の変形部であることを認識可能なため、例外処理として個別に設定した補正マップなどによって歪みの影響を排除可能である。

本報のセミアブソリュート型SSCにおいては、この演算によって、分解能0.1mmでのストローク量検出が可能となっている。

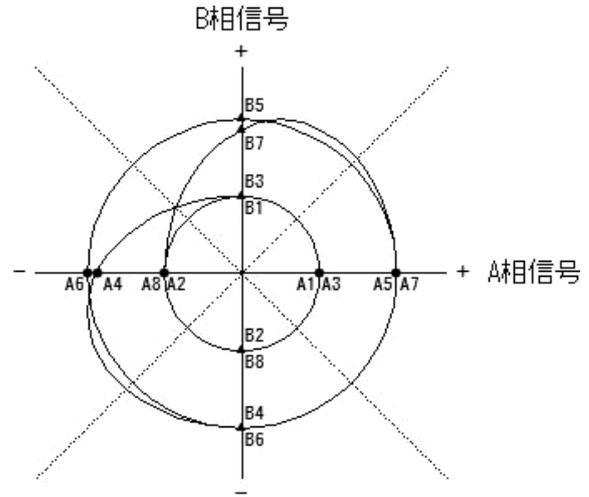


図9 磁気抵抗素子出力のリサージュ波形

3.5 ゼロクロスレベルの自動調整

磁気センサとピストンロッドが摺動する形で運用される本報のセミアブソリュート型SSCは、経年劣化などによって、磁気センサ先端の検出部が摩耗し、磁気スケールと磁気抵抗素子間のギャップが変化してしまうことが懸念される。また、磁気スケールの加工寸法のバラつきもある。

そのため、A相及びB相信号の中央値や振幅が必ずしも一定とはならない。

また、ゼロクロスレベルがA相及びB相信号の中央値から外れると、ゼロクロスパルスの発生タイミングにずれが生じ、ストローク量の検出精度が劣化するため、ゼロクロスレベルは、常時実際の信号に合わせ、A相信号及びB相信号の振幅の中央値に調整する必要がある。

ゼロクロスレベルの調整は、信号処理ボード上のマイコンなどの演算部にて適正な値を都度算出し、自動で行われる。このゼロクロスレベルの調整機能のブロック図を図10に示す。

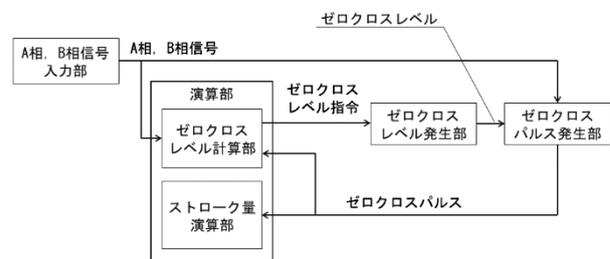


図10 ゼロクロスレベル調整ブロック図

具体的には、例えばA相のゼロクロスレベルを調整する場合、A相信号とB相信号には90度の位相差があるため、図11に示すようにB相のゼロクロスパルスが入力された時点のA相信号の値を取得すると、

その値は必然的に振幅の極大値または極小値となる。

よって、そこからA相信号の振幅値を算出することができる。B相の振幅値においても同様にA相のゼロクロスパルス入力時のB相信号の値を取得すればよい。

なお、この機能は基準スケール検出後のアブソリュート型センサとしての機能が有効になった後に作動することが前提となる。

アブソリュート型として動作することで、ピストンロッド上のどの磁気スケールを参照しているか判別可能なため、磁気スケール毎に振幅値の測定結果を学習することができるためである。

そして、磁気スケール毎の振幅値の測定データを基に適正な振幅中央値を算出し、ゼロクロスレベルとして出力する。

この制御を常時実行し続けることで、適正なタイミングでゼロクロスパルスが発生させることができ、ストローク量検出精度を確保できる一方、ゼロクロスレベルが自動的に補正されることによって、ユーザ操作によるゼロ点補正などのチューニング無しに長期にわたって安定したストローク量の検出が可能となり、保守も容易になる。

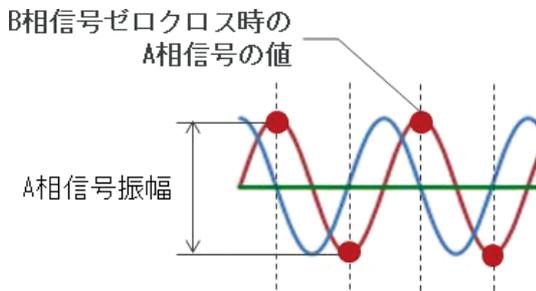


図11 A相信号の振幅取得

4 ストローク量検出結果

ピストンロッドの中間部を絶対位置 0 mmの基準点と置き、伸び方向及び縮み方向へそれぞれ40mmずつ等速で変位させた場合のストローク量検出の例として、横軸に時間、縦軸にストローク量をプロットしたグラフを図12に示す。

評価用の基準として設置した基準変位計の出力値（図12の青線）と、セミアブソリュート型SSCの出力値（図12の赤線）が重なり合っている様子から、安定したストローク量が検出できていることが分かる。

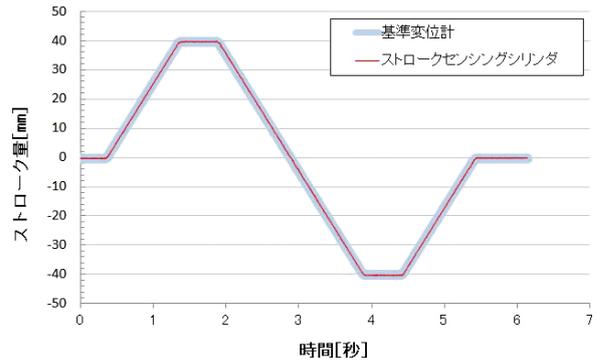


図12 ストローク量出力の例

なお、このセミアブソリュート型SSCの出力は、アナログ電圧信号によるものであるが、母機のインターフェースに合わせて、信号処理ボードの仕様を変更することにより、CANやシリアル通信などのデジタル出力にも対応可能である。

5 将来展望

昨今、自動車や建設機械の分野における、高速通信を用いた遠隔操縦やAI（Artificial Intelligence：人工知能）やIoT（Internet of Things：モノのインターネット）を活用した自動運転など、新しいソリューションが展開されている。

その中で、油圧機器においても今後は更に高付加価値化が求められ、そこに用いられる電子制御は、従来よりも多彩な情報（制御パラメータ）を様々なセンサから取得することで、より高度で緻密になると考えられる。

そのため、機器の状態を検出する様々なセンシングデバイスは、油圧機器の高付加価値化に対し、非常に重要な要素となり、セミアブソリュート型SSCで検出するストローク量もそのひとつである。

例えば、アクティブサスペンションにおいては、従来加速度センサから入力される加速度（車体の揺れ）の大きさからダンパの動きを推定し、減衰力や推力などを制御していたが、ストローク量を直接検出できることによって、より高精度な制御が可能になり、乗り心地向上の効果が見込める。

開発したセミアブソリュート型SSCは、現時点では試作レベルであるため、量産化にあたっては、ピストンロッド上の磁気スケールの加工工程や磁気センサの組立性など、課題はあるものの、将来的に油圧機器の高付加価値化に大きく寄与するセンシングデバイスとしての活用が期待できる。

6 結言

ドイツが提唱した「Industry4.0」に始まり、日本においても政府が「Society5.0」を提唱している。

このような社会情勢の下、様々な情報を高速で通信するIoTや、収集した情報を処理するAIの技術も急速に進歩している。

これら「通信」、「情報処理」に「センサ」を加えた3要素はIT（Information Technology：情報技術）3種の神器と言われており、それぞれ非常に重要なものとなる。

「センサ」を単に電子制御のパラメータを取得す

るための部品としてだけでなく、3種の神器として「通信」や「情報処理」と組み合わせることで、新しいソリューションを築くことが可能である。

例えば、油圧機器の分野においても、カメラ（画像センサ）によって取得したデータを遠隔地へ送信（通信）し、AIで分析（情報処理）して行う、自動運転や遠隔操縦などが実用化されつつある。

その中で、本報のセミアブソリュート型SSCも、その有用性は高まっていくと考え、AI×IoTソリューションを築き上げる一つの要素として活用していきたい。

著者



永井 勇牙

2008年入社。技術本部基盤技術研究所情報技術研究室。

主にセンサ用ソフトウェア開発に従事。