

**レゾルバ/デジタル変換 — 光シャフト・エンコーダに代わる簡単でコスト効率の良い方法
著者：John Gasking**

はじめに

人間は車輪を発明して以来、その車輪の位置を様々な精度で知ろうとしてきました。この角度位置測定の方法は年月を経て洗練され、更に製造方法や制御方法がより精巧になるにつれ急速に進展しています。ほとんどの形態の動力は回転シャフトで伝えられるもので、その最も一般的な例が電気モータです。直線運動でさえ、回転運動をねじ山やクランクなどで機械的に変換することによって生成されます。したがって、ほとんどの機械的位置決めシステムの基礎は、シャフト角度の測定値にあると言えます。角度から位置を推定する方法は、20世紀以上も前にギリシャから伝わったものですが、今日のコンピューティング・パワーにより、位置をより迅速に推定することが可能となっています。

角度と直線の測定 — デジタル出力のためのエンコーダとレゾルバ

設計者が角度変換器のタイプを選択する際には、基本的に2つの選択肢があり、それぞれに固有の特徴があります。レゾルバの利点がよく理解できるように、この2つの方式を説明していきます。

エンコーダはインクリメンタルとアブソリュートの2つに分類されます。インクリメンタル・エンコーダは、円を分割した各部分が通過するごとに、それを単にカウントしてパルスを出力します。そのパルスによってカウントを保存し、回転方向を知ることができます。これはA quad B出力システムとして知られており(図1)、方向をAパルス列とBパルス列のエッジの発生から推測します。一方の回転方向では、"A"の0から1への遷移が"B"の遷移の前に発生しており、逆方向の回転ではその逆になります。シャフトがゼロを通過して回転すると、AとBに同期して基準パルスが生成されます。インクリメンタル・エンコーダは、通常、光電デバイスからこうしたパルスを生成します。このため、軍事や航空宇宙のアプリケーションで必要とされる放射線危険区域では使用できません。

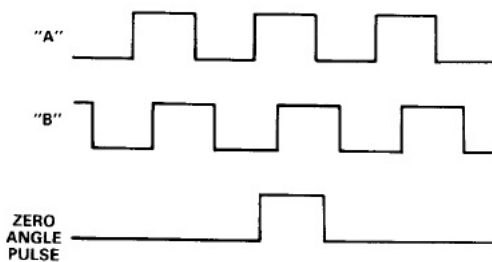


図 1.

インクリメンタル・エンコーダには欠点が2つあります。その位置が「パワーアップ」時に不明であることと、電氣的干渉によってカウントに誤差が出る可能性があることです。

アブソリュート・エンコーダは、その名が示すとおり、シャフトに取り付けられた回転ディスク上のパターンからパラレル・デジタル出力を生成します。センサーには、電気接触または光電システムを使用できます。様々なコードを利用できますが、バイナリとグレイが最もよく使用されています。分解能と精度は16ビット(20秒角)以上と非常に高いものの、1000ドルを上回るほど高額であり、エンコーダが測定対象の電子機器から離れている場合、パラレル・データ伝送の問題があります。

恐らく、エンコーダを使用する主な理由の1つは、動作の仕組みが明確であり、デジタル出力が得られるためです。一方、レゾルバはあまり理解されておらず、変換の仕組みも複雑に思われます。近年における当社の変換技術と製造技術の進歩により、その応用が非常にシンプルになったことから、完全に理解する必要性はなくなりつつあります。

レゾルバは回転変換器であり、アナログ出力電圧がその入力シャフト角度に一意に対応します。したがって、0~360°の回転位置に対応する絶対位置変換器となります。

角度測定変換器としてのレゾルバには多くの利点があります。第1に、レゾルバは埃、油、温度、衝撃、放射線の厳しい環境に耐えることのできる堅牢な機械装置であることです。第2に、トランスであるため、信号のアイソレーションと本来の電氣的干渉の同相ノイズ除去を実現できることです。こうした特長は、角度データ伝送には4本のワイヤだけで済む点と相まって、角度測定においては優れた利点であり、重工業や航空宇宙分野の過酷な環境での使用に理想的です。今日では、ロータにスリップ・リングを接続しないブラシレス・レゾルバを使用できるため、寿命と信頼性も大幅に向上しています。

アナログ・デバイセズ社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイセズ社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標は、それぞれの所有者の財産です。※日本語版資料は REVISION が古い場合があります。最新の内容については、英語版をご参照ください。

レゾルバは角度を測定する場所に配置し、電子機器はデジタル出力が必要な場所にプロセッサを搭載したカード・フレームに収めて配置することができます。

レゾルバを使用してシャフト角度に応じた出力電圧を得るには、2つの方法があります。

第1の方法では、ロータ巻線（図2）が交流信号によって励磁され、出力が2つのステータ巻線から取り出されます。ステータ巻線が機械的に直角に配置されるので、出力信号の振幅はシャフト角度のサインとコサインによって関係付けられます。サイン出力信号とコサイン出力信号はどちらも元の励磁信号と同じ位相を持ち、その振幅のみがシャフトの回転に応じてサインとコサインで変調されます。

シャフト角度に一意に対応する出力信号を得る第2の方法は、2つのステータ巻線を励磁することです。2つのステータ巻線が、位相が互いに直交する2つの交流信号によって励磁されると、ロータ巻線に電圧が誘起されます。この電圧は、振幅と周波数が固定されますが、位相がシャフト角度によって変化します。図2を見てみましょう。シャフトがロータ巻線 R_1R_2 をステータ巻線 S_1S_3 と整列させると、ロータ出力信号は 0° 位相の励磁信号で最大になります。ロータ巻線 R_1R_2 が巻線 S_2S_4 と整列すると、出力信号は 90° 位相の励磁信号で最大になります。これらの2つの位置間の角度では、出力信号の位相は 0° から 90° までの位相で直線的に変化します。シャフトが 360° 全周を回転すると、出力ロータ信号の位相は、 0° から 90° 、 180° 、 270° に変化し、そして 360° 、すなわち 0° に戻ります。

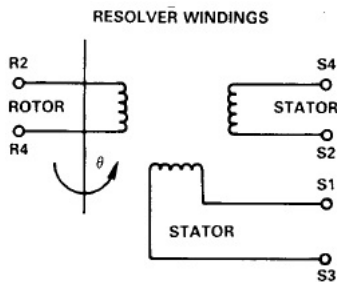


図2.

デジタル変換

ほとんどのインテリジェント・ロボットや数値制御工作機械では、システムの計算と記憶要素にデジタル・コンピュータを使用しています。したがって、コンピュータが状況を理解するためには、測定するすべての角度をデジタル・ワードに変換しなければなりません。

トラッキング・レゾルバ/デジタル・コンバータの利点を十分に理解するには、他の主要な方式を理解する必要があります。

トラッキング・コンバータとは別に、業界で広く使用されている変換方法が2つあります。どちらの方法も、業界からの高精度化の要求が高まるにつれて、いくつかの深刻な弱点が生じています。

これまではトラッキング・コンバータとは別の方式のほうがコスト効率に優れていましたが、当社の技術改善によりコンバータのコストが削減されたことで、多くのユーザがトラッキング・コンバータを再評価し、これに切り替えるようになりました。

現時点で最も広く使用されている方法は、「位相アナログ法」として知られている方法です。この方法は、図3に示すように、位相直交した2信号によってステータ巻線を励磁するモードを採用しています。シャフト角度を測定するためには、励磁信号に対するロータ信号の正確な位相を測定することが必要です。このような方式のブロック図を図3に示します。

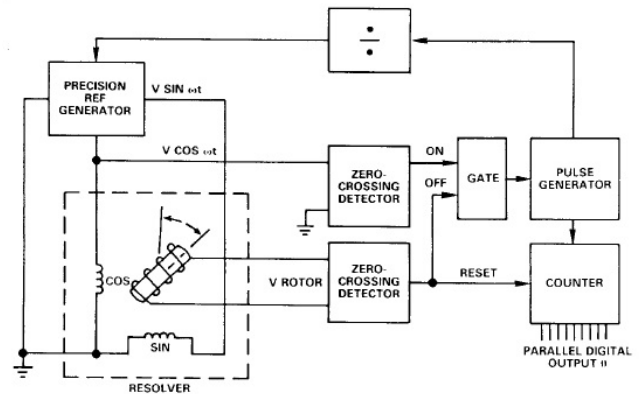


図3.

実際には、サイン信号あるいは 0° 励磁信号のゼロ交差とロータ信号のゼロ交差との間の時間間隔が測定されます（図4を参照）。これは、2つのゼロ交差の間に発生する発振元のリファレンス・クロック発振器からのパルスの数をカウントすることによって行われます。リファレンス・クロック発振器と2つの励磁発生器の間の分周比を変えることによって、測定の際の分解能を変えることができます。

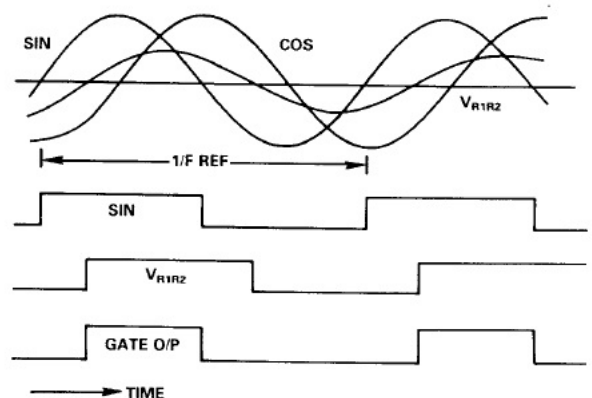


図4.

*脚注：円は360度に分割され、更に分と秒に分割されます。弧の分と秒が時間の分と秒と混同されないように、分割の単位は常に分角および秒角と呼ばれます。60秒角=1分角。60分角=1度。

この分周比は、ゼロ交差間隔の測定精度によって決まる精度には、ほとんど影響を与えません。第 1 の最も顕著な誤差源はレゾルバの環境によって発生する電気ノイズで、ロータ信号にノイズを生じさせ、ゼロ交差点を不確定にします。第 2 の、そしてより微小な誤差源は、励磁信号の変動によって生じます。2 つの励磁信号の相対的な振幅または位相の変化は、出力信号の位相に直接影響します。ほとんどのシステムでは内蔵回路分周器による方形波クロックが使用されるため、必要とされる純粋なサイン波信号を得るには、高精度の信号フィルタ処理が必要です。こうした高精度のフィルタは複雑であり、良好な温度対位相係数を得ることは困難です。励磁信号のいずれかまたは両方の高調波歪みも、ロータ信号の位相に影響します。これらの誤差の合計によって、「位相アナログ」方式の精度は約 10 ビットあるいは 21 分角に制限されます。

レゾルバ/デジタル変換方式で 2 番目に広く使用されている方法は、サンプリング法です。この手法には多くのバリエーションがありますが、基本的にはすべてロータ励磁レゾルバのサインとコサインの出力信号のサンプルを生成します。リファレンス入力の振幅のピークで信号振幅のサンプルが取り込まれ、A/D コンバータによってデジタル信号に変換されます。得られたデジタル・ワードは、プロセッサ内でシャフト角度を「ルックアップ」するためのメモリ・アドレスとして使用されます。

この方法は単純に見えますが、ノイズを全く処理できないことが問題です。サンプリング時に信号線にノイズの擾乱が発生すると、誤った結果が生じます。ノイズによって誤った読出しが 1 回しか生じない場合は、サーボモータ駆動システムの周波数通過帯域がフィルタとして作用するため、誤差はほとんど生じません。しかし、ノイズがひどい場合、誤差は受け入れ難いほどになる可能性があります。

トラッキング・レゾルバ/デジタル変換

当社のすべてのコンバータで使用されているトラッキング変換技術は、他の方法で生じるすべての問題を克服するものです。特に新しい 1S シリーズのコンバータは、他の方法とコスト面では競合するものの、優れた精度とノイズ耐性を提供します。動作と接続の基本的な方法を図 6 に示します。

トラッキング・コンバータはレシオメトリックに動作します。つまり、ロータ励磁レゾルバのサイン出力とコサイン出力の比にのみ関係します。レゾルバはトランスとして機能するので、励磁波形の歪みや振幅の変化はサインとコサインの双方に正確な比率で現れるため、精度にほとんど影響しません。トラッキング・コンバータには位相復調器が内蔵されているため、周波数変動とインコヒーレント・ノイズは精度に影響しません。トラッキング・コンバータは方形波から三角波へのリファレンス励磁で動作可能で、その際の精度のばらつきはごくわずかです。同相ノイズ除去は、レゾルバが本来有するアイソレーションによって実行されます。これにより、トラッキング・ループの統合と共に、優れたノイズ耐性を備えた角度からデジタルへの変換システムが実現します。

トラッキング・コンバータは、制御ループに積分を含む内部サーボ・システムを使用するため、1 分間に 40,000 回転以上の高い入力回転数でも精度の低下はほとんどありません。

レゾルバとトラッキング・コンバータの適用

レゾルバに関する最も一般的な誤解は、動作電圧と周波数に関係するものです。

レゾルバは、1 次巻線が 2 次巻線の内部で回転する線形トランスであるため、通常のトランスとして動作します。変換比は、製造元が指定した特定の周波数制限内で固定されています。ロータへの励磁入力あるいはリファレンス入力は、コンバータ入力に直接接続する必要のあるステータ出力電圧が得られるように変化させることができます。

リファレンス周波数の変動は、ステータ・ロータ出力あるいは信号出力とリファレンス入力あるいはロータ入力との間の位相角の変動を引き起こす可能性があります。トラッキング・コンバータは位相と振幅の両方に耐性があるため、多くの場合、補正は必要ありません。ただし、デジタル位置に加えて高品質の速度信号を提供する 1S64 または 1S74 シリーズのコンバータを使用する場合は、位相シフトがゼロであることが不可欠です。これは、適切な周波数を選択するか、コンバータのリファレンス入力に抵抗/コンデンサの位相シフト・ネットワークを使用することで実現します。(レゾルバとコンバータ間の最大リード長のセクションも参照)。

リファレンス周波数

コンバータのトラッキング速度、つまり入力角にコンバータが追従できる最大速度は、リファレンス周波数と直接関係があります。

回転時にロータ励磁式レゾルバが、変調された搬送波信号である出力を与えます。

$$V_{S153} = \sin\omega_2 V_R \sin\omega_1 t$$

ここで、 V_R = ピーク・リファレンス電圧。

ω_1 = リファレンス周波数 (ラジアン/秒)。

ω_2 = シャフト回転周波数 (ラジアン/秒)。

情報を伝達するためには、 ω_1 は常に ω_2 より大きくなければなりません。

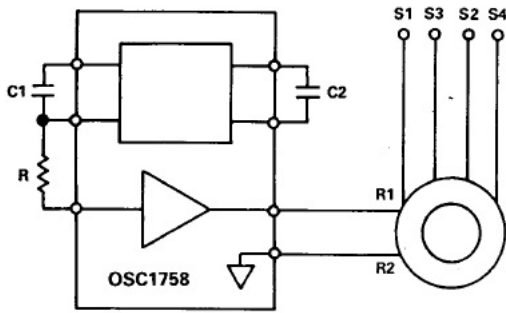
リファレンス発振器

当社では、現在 1.4VA を供給可能なハイブリッドのパワー・オシレータ OSC1758 を提供しています。

OSC1758 は、実際にはオシレータと電力増幅器の 2 つのセクションに分かれています。これらは個別にアクセス可能です。

このデバイスの周波数は、2 つのコンデンサ C1 と C2 によって決まります。

トラッキング変換技術は振幅や周波数の安定性の面で高い耐性を持つため、コンデンサのドリフトがシステム全体の精度や性能に過度に影響することはありません。ただし、50ppm/°C 以下の温度係数を持ったハイグレードのシルバマイカ・コンデンサを使用することが推奨されます。



FREQUENCY	= 5kHz
RESOLVER ROTOR IMPEDANCE (Z_{SO})	= $850 + j1250$
$ Z_{SO} $	= $\sqrt{850^2 + 1250^2}$
	= 1511Ω
TRANSFORMATION RATIO	= 0.5 = T.R.
RESOLVER PHASE SHIFT @ 5kHz	= -5°
REFERENCE VOLTAGE REQUIRED (V_R)	= 2/T.R. (NOTE 2V rms IS REQUIRED BY THE 1S CONVERTER)
V_R	= $2/0.5 = 4V$ rms
REFERENCE CURRENT	= $\frac{V_R}{Z_{SO}} = \frac{4}{1511} = 2.6mA$
RESISTOR R	= $\frac{37.5 \times 10^3}{\frac{V_{OUT}}{V_R}} = 5350\Omega$
	= $\frac{37.5 \times 10^3}{4} = 5350$
	= 4025Ω
CAPACITORS C1 = C2	= $\frac{1}{F_{OSC} \times 10^3}$ FARADS
	= $\frac{1}{5.0 \times 10^3 \times 10^3} = 0.002\mu F$

図 5.

代表的なブラシレス・レゾルバへの接続を図5に示します。

上記から、駆動条件は OSC1758 の能力範囲内にあり、マルチチャンネル角度測定が必要な場合には、同じ電源でより多くのレゾルバに電力を供給できることがわかります。

レゾルバとコンバータ間の最大リード長

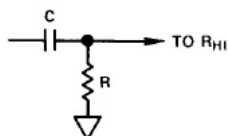
レゾルバとコンバータ間のリードの最大長に関する質問が、しばしば寄せられます。

以下の簡単な予防措置を講じると、この距離を非常に長くすることができます。

1. サイン/コサイン信号とリファレンス信号間の位相シフトがゼロである限り、配線に用いるリード線の容量性効果による追加誤差がゼロになることは、数学的に示すことができます。位相シフトをゼロにすることは、レゾルバ全域で位相シフトがゼロになる周波数を選択するか、位相進みまたは位相遅れをコンバータのリファレンス入力に導入することによって可能です。

単純な位相進みと位相遅れの回路を以下に示します。

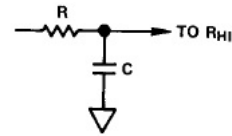
位相進み



$$\text{進み} = \text{ARCTAN} \frac{1}{2\pi fRC}$$

ここで、fは周波数。

位相遅れ



$$\text{遅れ} = \text{ARC TAN } 2\pi fRC$$

2. リファレンス周波数を、

$$\frac{1}{2\pi fCL}$$

が X より大きくなるように設定します。ここで、

f = リファレンス周波数。

c = ケーブルの1メートルあたりのリード容量。

L = レゾルバとコンバータ間の距離 (メートル単位)。

X = レゾルバの出力インピーダンスのリアクティブ成分。

3. 信号 (サイン/コサイン) の減衰によって、コンバータの入力に現れる電圧が、仕様規定されている公称電圧の 10% 未満にならないようにします。
4. サイン信号、コサイン信号、リファレンス信号には、個別にスクリーニングしたツイスト・ペア線を使用します。「サイン」、「コサイン」、および「A GND」入力のみを持つコンバータを駆動する 4 線式出力レゾルバでは、コモン接続はコンバータの「A GND」で行う必要があります。

上記の予防措置を講じれば、精度を失うことなく、高ノイズ耐性という非常に大きな利点を有しながら、角度データを数百メートルにわたって送信できます。

まとめ

このアプリケーション・ノートの目的は、コスト効率の高い位置測定を行う上で、レゾルバを使用することがシンプルで利点が多いことを示すことです。このような測定デバイスは高性能な制御システム内で使用されますが、デジタル・インターフェース以外の推奨事項については、コンポーネント・メーカーである当社の説明の範疇を超えます。ただし、そのような推奨事項が存在すること、およびその推奨事項には変換器システムの条件があることは認識しています。このため、当社は最高の性能を提供し、システム設計者が制御回路内のコンバータの性能を計算できるように、伝達関数と動的仕様をデータと共に公開しています。

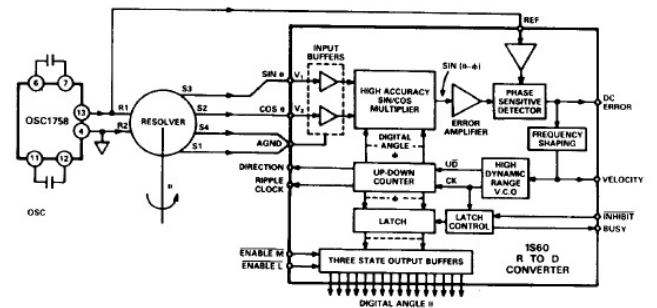


図 6.