アブソリュート・エンコーダ —センサの紹介と今後の動向について—*

Current and Future Trends of the Encoders

森田 徹**
Toru MORITA

Key words

absolute rotary encoders, maximum-length sequence, linear feedback shift register, high resolution, digital interpolation

1. はじめに

長年、日本はロボット大国と呼ばれ、主として産業用ロボットが日本のロボットの進化を牽引してきた。

ここにて欧州を中心として第4次産業革命、インダストリー4.0の掛け声の下、ものづくりそのものを根底から変えようとする動きが注目されている。日本にとっても製造業の国内の空洞化問題等が叫ばれるなか、大きなビジネスチャンスであると考えられる。従来、産業用ロボットで強みを発揮してきた日本であるが、より大きな追い風が吹いていると考えられるのである。

さて、ここで産業用ロボットとは異なるアプリケーションに目を向けてみる。経産省が公表した「2012年ロボット産業の市場動向 調査結果概要」によれば、サービス分野、さらに広義のRT（ロボット・テクノロジー）製品の伸びが目覚ましく、2025年にはこれらのロボットが従来の製造分野のロボットの数量を上回ると予測されている。「サービスロボット」と呼ばれる分野のロボットを例にとってみる。例えば、介護の分野に目を転じると、超高齢化社会を支える役割を、次世代ロボットが担うというシナリオである。潜在的に大きな需要があり、確実な成長が見込まれる分野である。介護と並んで用途が拡大基調にある医療用途ロボットも、今後ますます成長が期待される分野であろう。

2. ロボットを支えるエンコーダ

ロボット用のアクチュエータとして最も多く用いられているのが、ACサーボモータである。ACサーボモータはかつてのブラシ付きモータに比して圧倒的な高信頼性化、高寿命化を達成し、産業用途では不可欠なアクチュエータとして広く認知されている。このACサーボモータと組み合わせ使用され、モータシャフトの回転（位置変位）を

検知するセンサが、エンコーダである。

一口にエンコーダと言ってもその用途、分解能、大きさ、検出原理などからさまざまな種類のエンコーダが存在する。表1に、簡単なエンコーダの種類を類別する方式を記す。この分類方法は比較的分かりやすく、産業界でも広く通じる呼称である。

表2の分類方法には少々説明が必要である。一般的に、インクリメンタル・エンコーダとは、電源を投入したのみではエンコーダの信号はまったく出力されない。すなわち、位置情報を得ることができない。つまり、位置変位が生じた場合のみ、すなわち、「動いてはじめて」増減（インクリメント/デクリメント）情報を外部出力することができるエンコーダである。

これに対してアブソリュート・エンコーダは、絶対値エンコーダとも呼ばれ、読んで字のごとく、電源が投入された時点で現在の絶対位置情報が識別できる。直線変位系でいえば、数直線上の絶対位置情報を、回転方向でいえば、角度情報を出力する。相対的な位置変位が生じなくとも、絶対値としての位置情報が得られるのである。この動作の根本的な違いが、絶対値（アブソリュート）・エンコーダと呼ばれるゆえんである。

アブソリュートについて少し補足する。一般的に、ロボ

表1 エンコーダの分類方法：その1

名 称	特 徴
リニア・エンコーダ	直線方向の位置変位を検出
ロータリ・エンコーダ	回転方向の位置変位検出

表2 エンコーダの分類方法：その2

名 称	特 徴
インクリメンタル・エンコーダ	電源投入だけでは位置情報は得られず、位置の変位が生じた際のみ、位置の増減情報が分かるタイプのエンコーダ
アブソリュート・エンコーダ	電源投入直後、絶対位置の検知が可能なエンコーダ

*原稿受付 平成28年6月16日

**（株）ニコンエンコーダ事業室技術部部长（東京都港区港南2-15-3品川インターシティC棟）

図1 グレイコードを用いたアブソリュート・ロータリ・エンコーダのディスクの構成例

ットをはじめとする機器は、運転開始の際に、各ワークなり関節の角度なりが所定の範囲にあるか否か？という初期確認動作を行った後に、初めて通常の動作に移行することができる。通常「原点出し動作」などと呼ばれる。この動作は機器の操作にとって、オーバーヘッドとなる操作でもある。昨今のスループット向上の観点からも、これらの初期動作はないに越したことはない。このような背景から、最近のロボットに求められるエンコーダの仕様としては、アブソリュート・エンコーダが望まれる事例が非常に多いのである。

3. アブソリュート・エンコーダの原理

アブソリュート・エンコーダについては比較的歴史が古く、回転ディスクのパターニング（符号化）の技法としてグレイコードが有名である。図1に、実際のグレイコードの符号化を施したディスクを示した。ビット数としては4ビットであり、絶対番地0から15番地まで、絶対位置情報を識別可能としている。図を見れば明白であるが、一つの番地から隣の番地へ変化する際の0⇔1に切り替わるビットは、常に1ビットのみであるように工夫されている。これは微視的に観測した場合に、絶対番地が一瞬たりとも異常な値を取らぬようにするための古典的な手法である。また、この特徴こそが、グレイコードによる符号化の定義そのものである。対比する例として2進数を想起されたい。例えば0から-1へ変化する場合、具備したビット数だけ同時に0から1へ変化する。しかし、グレイコードによる符号化では、このようなことがないように符号化されているのである。

このグレイコードの出現によって、アブソリュート・エンコーダの古典的な原理は完成を見たといわれている。

しかし、図からも明らかなおとおり、例えば一回転当たりの分解能を上げるため、ビット数を上げようすると、増加ビット相当分だけセンシングエリアを広げねばならず、結果として受光素子の大型化が不可避である。これは、機

器の小型化を図る上では致命的である。つまり、分解能を上げると、必然的に機器も大型化するという制約があったのである。

4. 最近のアブソリュート・エンコーダの動向

前述のような制約を回避し、機器の小型化を達成したエンコーダが'90年代より幅広く用いられている。例えばM系列による符号化を行った多回転アブソリュート・エンコーダは、その適用範囲が広範である。

M系列とは、線形最大周期列（Maximum-Length Linearly Recurring Sequence）の略であり、限られた大きさのビット列に、ある操作をある回数繰り返せば、必ず元の値に戻るデータ列のことを指す。簡単にいえば、M系列はこの回数が最大であることが保証された系列、ともいえる。

ここで、M系列を用いたシングルトラック型アブソリュート・エンコーダについて、少し詳しく説明を加える。上述のとおりM系列とは、古くから通信の分野等で用いられてきた技術であり、白色雑音生成器としての用途でも有名である。データを生成する方法としては、ある決められた生成多項式により n ビットのデータ列を生成するのである。一般的には、生成多項式の設定次第で、 $(2^n - 1)$ を周期とするデータ列を作り出すことができる。

電子回路で処理する利便性を考えると、 2^n で巡回する周期の方が処理が簡便であるため、工業用途では元来M系列のみではとり得ない特定データ、1種類を加えて、その結果周期を 2^n とする工夫を行っている。例えば4ビットのデータ列であるとしてみよう。元来のM系列の定義に従って生成したデータは、15通りである。「生成多項式」という概念からも容易に想像できることであるが、全ビット、「ゼロ」となるデータは存在し得ない。つまり、いかなる生成多項式を採用しても、元となるデータがすべて“0”では、排他的論理和の値は1にはならない。ここがポイントである。そのため、M系列の生成されたデータの中に、敢えてゼロのデータを挿入することにより、電子回路で扱う際に便利な、 2^n 通りのデータとすることができるのである。

図2は、模式的に4ビットに簡略化して書いたM系列を用いたシングルトラック型アブソリュート・エンコーダの円板の例である。 θ 方向に4ビットを読み出すことにより、円板内のどの位置に存在するのかが認識できる構成である。1回転内、 360° を16のエリアに細分化して絶対値の検知が可能であることが、図より直感的にお分かりであろう。

実際の動作では、主電源（+5V）投入直後、円周の周方向に最低限のビット数に相当する複数のビットを順次読み出す操作を行う。例えば筆者らでは、アブソリュート・エンコーダの主電源投入時、周方向に、決められたビット数の絶対位置データの読出しを行っている。このビット数であるが、M系列の特徴を利用した「読み誤り検出」を

図2 M系列を用いたシングルトラック型・アブソリュート・エンコーダのディスクの構成例。原理的な生成多項式は $X^4 + X^1 = 0$ 、ただし記号“+”は排他的論理和を表す

実行し、データの信頼性を高めるために、必要最低限のビット数に、幾ばくかの冗長ビットを加え、冗長性をもたせて読み出しを行っている。これは、M系列の特徴を生かした使い方であり、前述のグレイコード方式では成し得なかった、新たな付加価値と捉えている。当然ながら、エンコーダの信頼性向上に貢献している。

図2で示した符号化の例について、さらに詳説を加える。それはこの符号ないしデータ列を生成する際の生成多項式および生成方法についてである。前述のとおりM系列のデータ列は、 $(2^n - 1)$ 種類であり、 n を4とすると、原理的に15通りのデータが生成されるはずである。

ここで表3に着目されたい。生成多項式は、 $X^4 + X^1$ と略称する場合が多いのだが、厳密に記すならば、下記のようにすべきであろう。

$$X^4 + 0 \cdot X^3 + 0 \cdot X^2 + X^1 = 0$$

(ただし、記号“+”は排他的論理和を示す)

表1では(1, 1, 1, 1)を初期値として、表の両端の2ビットの排他的論理和演算の結果を求め、次段の最上位ビットに代入する。他のビットはこの例にならって、次段では紙面で右シフトしていくようにデータを生成していく。15回目のデータ生成で、ちょうど初期値と同じデータ、(1, 1, 1, 1)が現れる。換言すれば、このデータ列の周期は15であり、生成されるデータの種類も同様に15通りである。簡単な作表によっても、M系列の原理どおりであることが確認できよう。

さて次に、工業的な応用の容易さに鑑み、データ列の種類を 2^n とする操作について詳説する。理解を容易にするため、表3と表4とを見比べられたい。

表3の参照番号“11”と“12”との間に、4ビットすべてでゼロとなるデータ列、(0, 0, 0, 0)を挿入することにより、表4を完成することができる。このデータを挿入することにより、データは24通りとなり、データ繰り返し

表3 4ビット M系列データの生成例。生成多項式 $X^4 + X^1$ による実際のコード生成例

参照番号	生成ビット	X^4	X^3	X^2	X^1	
0	0	1	1	1	1	初期状態
1	1	0	1	1	1	
2	0	1	0	1	1	
3	1	0	1	0	1	(2 ⁴ -1) 通り 15通りのデータ列
4	1	1	0	1	0	
5	0	1	1	0	1	
6	0	0	1	1	0	
7	1	0	0	1	1	
8	0	1	0	0	1	
9	0	0	1	0	0	4ビット (ALL-ZERO) を挿入すべき箇所
10	0	0	0	1	0	
11	1	0	0	0	1	
12	1	1	0	0	0	15回データを生成後、 初期状態と同じデータが出現
13	1	1	1	0	0	
14	1	1	1	1	0	
(15)		(1)	(1)	(1)	(1)	

4ビットのデータ列から考えてみる。生成多項式を $X^4 + X^1$ とし、初期値としてまずは、4ビット共に1となるデータを採用する。次段の最上位ビットを生成するための欄を左に設け、生成される各ビットの値は右シフトしていくこととする。表から明らかとなっており、 $2^4 - 1$ 通り、すなわち15通りの値をとる。

表4 M系列データを 2^n とする場合の実例。

参照番号	X^4	X^3	X^2	X^1	
0	1	1	1	1	⇒付加したデータ列
1	0	1	1	1	
2	1	0	1	1	
3	0	1	0	1	
4	1	0	1	0	
5	1	1	0	1	
6	0	1	1	0	
7	0	0	1	1	
8	1	0	0	1	
9	0	1	0	0	
10	0	0	1	0	
11	0	0	0	1	
12	0	0	0	0	
13	1	0	0	0	
14	0	1	0	0	
(15)	0	0	1	0	
(0)	(1)	(1)	(1)	(1)	

既出の表の参照番号“11”と“12”との間に、「ゼロ」なるデータ列を挿入する。この結果、得られるデータ列の種類は全部で16通り(2^4 通り)となる。M系列の原理的な制限から逃れ、工業的な応用容易性を維持することが可能となる。

周期も 2^4 、すなわち、16となる。これは表4の参照番号を見ても明白であろう。

以上説明したとおり、簡単な操作でM系列データをベースに 2^n 通りのデータ列を得ることができる。 2^n とすることにより、工業的な処理の容易性を達成できるのである。また、既にお気づきかもしれないが、表4で完成を見たデータ列は、図2で示したM系列を利用したシングル

図3 LFSR（リニア・フィードバック・シフト・レジスタ）による表現

トラック型アブソリュート・エンコーダ用の符号そのものである。扇型の4ビット検出器が周方向に移動していく様子を想像されたい。

次に M 系列を実際の電子回路で処理，ないし生成する実例を紹介しておく。

図3に示した，デジタルの電子回路図がそれである。LFSR (Linear Feedback Shift Register, リニア・フィードバック・シフト・レジスタ) による M 系列の表現と解釈してもよい。また，生成多項式と電子回路とを結びつける糸口でもある。

図はDタイプ・フリップ・フロップによるシフト・レジスタである。図の1個のBOXが1個のフリップ・フロップだと考えられたい。各々の出力を図のように結線し、データが巡回するようにタップを選んでやると、同様のM系列を得ることができる。このような構成をLFSRと呼び、デジタル通信分野では幅広く用いられている。

初期値として4個のデータに“1”を与えてデータを巡回させると、 2^4-1 、すなわち15周期でデータが繰り返される。

このハードウェアで生成されるデータ列は、表4に示した、定義に忠実な15通りのデータ列、M系列そのものである。ここで注目すべきは、簡単なシフト・レジスタと排他的論理和だけの組み合わせで、ほとんどの種類のM系列データが生成できることである。M系列は電子回路が大いに得意とするところであり、極めて電子回路との親和性が高い。図では単純化のために4ビットとしているが、ビット数を増やした場合にもたやすく任意のビット長の、 $(2^n - 1)$ 周期のデータ列を得ることが可能である。

なお、これらの M 系列データは次の特徴を有していることも補足しておく。0 と 1 の発生確率がほぼ同じであり、自己相関のピークが 1 周期に 1 度だけある。換言すれば n を十分大きくしていくと、ほとんど白色雑音として近似して扱うことが可能となる。

つまり、この図3の単純なハードウェアは、白色雑音発生器としても立派に機能するのである。ハードウェアのシンプルさと成し得る機能の複雑さは、大きな魅力を感じさせるに十分である。

5. 高分解能化の手法について

近年のセンサに求められる市場の要求として、「高分解能化」が挙げられる。高分解能化のため、アブソリュート

トラックの1ビット相当のエリアを微細化すれば、結果としてビット数が向上し、分解能は上げられる。しかし、この方法のみでは、周方向の1ビット相当エリアを狭くしていく。つまり、この絶対値トラックの θ 方向の値を小さくしていくと、1ビット相当のセンシングエリアの面積が小さくなり、光学式エンコーダの例で述べるならば、十分な受光が得られなくなるという制約がある。何も光学式に限ったことではなく、例えば磁気式エンコーダの場合だとしても、原理的に同様の足かせが生じる。そこで、エンコーダの分解能を向上させるため、アブソリュート・トラックと併設したインクリメンタル・トラックを組み合わせ、細分化読み取り、高分解能化を図る策が有効となる。

インクリメンタル信号を併用してエンコーダの高分解能化を図る具体例を紹介する。よく知られたとおり、インクリメンタル・エンコーダでは 90° 位相差を有する擬似正弦波信号 (A 相, B 相の, 2 相信号と呼ばれることが多い) をそれぞれ, 算術的に正弦信号, 余弦信号とみなすことができる。

すなわち、A 相信号を、 $A = \sin \theta$ と置き、同様に B 相信号を、 $B = \cos \theta$ と置く。ただし、 θ は位相角であるとする。ここで、A、B をそれぞれ a/d 変換し、以下の除算を実行する。

$$A \div B = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \tan \theta = Q \text{ (“商”)}$$

$$\theta = \tan^{-1} \quad (\text{Q})$$

つまり、除算の結果 Q (商) の逆正接関数を求めれば、位相角 θ [rad] を求めることができる。高分解能とすることは、この θ のビット数を上げることと等価である。そのためには、 a/d コンバータのビット数の設定も重要なパラメータとなってくる。

以上，初歩的な三角関数の知識を用いて，原理的にはいかようにでも細かく細分化して（高分解能化をして）位置情報を得ることができる．ことに近年のデジタル技術の進歩により，以前は理論上可能でも仕様として最適化できなかった方式が容易に，高速に実現される時代となってしまった。

かつては二つの擬似正弦波を正弦，余弦とみなし，除算実行後に逆正接関数の TABLE 参照を行うなどという手のかかる方式は，少なくともリアルタイム性を意識する用途には適用不可能であった．しかし近年は，ハードウェア技術の進歩により，ほぼリアルタイムな制御にもこの方式は用いられている．

この方式の大まかな概念を図4に記す。ここでポイントとなる点は、 $\tan \theta$ の取り得る値は $0 \sim \pi/4$ までは比較的直線的に変化するが、 $\pi/4 \sim \pi/2$ の範囲では $+\infty$ まで変化してしまう。つまり、関数の値としては非常に多くのリソースをこの領域に浪費せねばならないということである。このような愚を避けるため、テーブル参照する範囲を $0 \sim \pi/4$ であるように選択的に切り替えながら、位相角を求めていく方式が有名である。根本的な概念自体は公知で

図4 $\tan^{-1}\theta$ 内挿の原理

あり、また、古典的なものでもある。しかし、近年のデジタル処理技術の進歩がより一層、この方式を進化させている側面は否めないのである。

さて、位置データの「高分解能化」は、位置データの「高精度化」とは別物である。また、「高精度化」を伴わない「高分解能化」には、工学的な意味はないとされることが多々あった。つまり、数値上の分解能アップのみでは、制御上の意味がないとする解釈である。もちろん、これは厳密には正論ではある。しかし、ここへきて、速度制御上の情報量を向上させる目的に端を発する「高分解能化要求」が目立つようになってきている。

例えば、速度が緩やかに変化し、ゆっくり停止に至る動作をイメージされたい。つまり、なめらかな速度制御、または速度リップルの少ない速度制御を行う上で、位置データのビット数（≒情報量）が多いほうが、滑らかな速度制御が可能になるという理屈である。位置データの差分が速度情報であり、速度情報量を多くするためには、位置データのビット数が多いに越したことはない。

また、近年の研究によれば、電気自動車の制御性能の向上にも高分解能エンコーダが有用である。

6. 今後のエンコーダの動向について

産業界から求められる仕様およびエンコーダとしてのあるべき姿を考慮すると、最終的には以下のように収束していくものと考えられる。

- ・小型化、薄型化
- ・高分解能化
- ・高精度化
- ・低消費電力化
- ・ネットワーク化、IoT対応

例えば、ヒューマノイド型ロボットを想起されたい。駆動源はバッテリーであることが望ましく、低消費電力であることが必須となろう。加えて「歩く/走る」等の高度な運動制御には、当然ながら位置制御上の偏差、速度制御上の偏差が少ないに越したことはない。これらの理由から、高精度、高分解能である必要がある。当然であるが、位置データ確定までの時間バラツキが少ないことも重要である。また、手、指等の関節への適用を視野に入れた場合、より一層の小型化薄型化が求められよう。

ここで、薄型化を達成した反射光学系について説明する。図5は反射光学系の概念を示す。受光素子と同一面

図5 反射光学系の概念図

に配置された光源（LED）から発散光がエンコーダディスクパターンを照らし、その反射光を受光素子で受ける構成となっている。従来の透過光学系では、投光光学系と受光素子までの距離が必要であったが、反射光学系では、投光、受光の光路高さ方向で同一線上にありコンパクトにできる。図6に反射光学系によるエンコーダと透過光学系によるエンコーダを示す。反射光学系の導入により高さは約1/3になっている。

上述に加えて、近年、重要視されるようになりつつある、「機能安全」にシステムとしてどこまで対応できる

図6 光学・反射式エンコーダ（左）と光学・透過式エンコーダ（右）

か？ エンコーダ単体として、どこまでの仕様が達成されていけば、機器の最適バランスが図れるのか？ このような視点が、ますます重要となっていくものと考えられる。「人とロボットの共存」という非常に大きなテーマを掲げて産業界全体が取り組んでいる昨今、新たな切り口の一つとして、機能安全への取り組みが求められていくであろう。

参考文献

- 1) 沢辺雅二 監修：知りたい測定の自動化，ジャパンマシニスト社，（1986）
- 2) 柏木潤：M 系列とその応用，昭晃堂，（1996）
- 3) 省力と自動化編集部 編：サーボ技術活用マニュアル，オーム社，（1992）

森田 徹

北海道大学工学部電気工学科 1983 年 3 月卒業、1983 年 4 月日本光学工業（株）（現・（株）ニコン）入社。エンコーダの電子回路設計、製品開発業務に従事、現在に至る。