

## ホワイトペーパー

# セーフティファースト: RESOLUTE™ 光学式アブソリュートエンコーダの位置特定/確認アルゴリズム

本ホワイトペーパーでは、RESOLUTE アブソリュートエンコーダの動作の概要と、位置特定/確認アルゴリズムの安全面の詳細について解説する。

### はじめに

RESOLUTE アブソリュートエンコーダでは、従来のアブソリュートエンコーダとは異なる基本動作原理を採用しており、位置出力が不正の場合にエラーフラグをセットしたうえでそのエラーフラグを出力する。この動作原理により、組み込み先のモーションシステム設計が簡略化し、使用時の安全度も向上する。

従来のアブソリュートエンコーダが常時位置を算出し続けるのに対し、RESOLUTE はオンデマンドで位置を算出する。実際の動作時、リードヘッドがホストコントロールシステムからリクエスト信号を受信し、一般的な原因故障のリスクを回避しつつ、2 種類のアルゴリズム (互いにまったく異なる原理で別々に作用する。詳細は後述) を介して位置を算出する。そして算出した位置同士を比較し、コントロールシステムへの位置情報に付加するエラーフラグを、セットしておくかどうかを決定する。つまり、コントロールシステム側が、位置出力が正しいかどうかを、エラーフラグを基準に判定できるということである。

### 位置の算出方法

RESOLUTE は、図 1 のような明るい表面の機材とその上に刻んだ暗いラインからなるスケールを測定の基準として使う、光学式エンコーダである。基本ピッチは 30 $\mu$ m だが、絶対値情報を組み込むために任意のラインが適宜省略された構造になっている。

RESOLUTE は位置リクエストを受信すると、スケールの一定領域の画像を正確なタイミングで撮影する。具体的には、図 2 に図

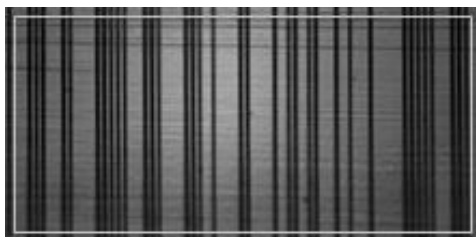


図 1: アブソリュートスケールの画像

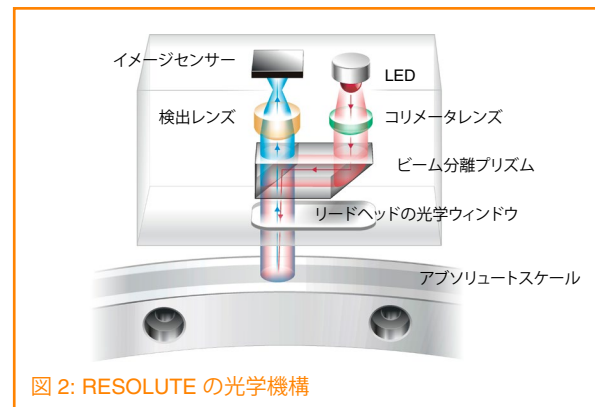


図 2: RESOLUTE の光学機構

示のように、発光ダイオード(LED)とイメージセンサーの電子シャッターが約 100ns 起動し、リクエストの前後 20ns の鮮明な画像を取得する。そしてその画像がリードヘッド内部のデジタル信号プロセッサ(DSP)に転送され、2 種類のアルゴリズムで位置が計算される。

**アルゴリズム 1** は、過去の位置情報を一切参照せずに 1 点の画像をデコードすることで位置を計算する。具体的には、まず画像の位相を求める処理(インクリメンタルエンコーダでの処理と類似)を行う。この処理により、スケールピッチのごく一部に相当する画像(幅0~30 $\mu$ m)から、最大分解能 1nm が得られる。測定方向に約 2mm 幅の画像を取得し、画像内に位相を正確に算出できる黒線が刻まれている。この位相算出処理によって、エンコーダの短距離精度、分解能そしてノイズ性能が決まる。

この位相情報を基に、スケールの各電位ラインの中心が特定される。そして画像上の特定した各電位ラインを互いに紐づけて、黒線の有無がそれぞれ判定される。その判定結果が、リードヘッド直下のスケールパターンを表す 65bit のバイナリ数値データとして出力され、このデータの 4 分の 1 のビットを基に位置が定義される。なお、残りのビットは、スケールの一部が読み取れなかった場合に、適切な位置を正確に伝達するための予備情報として機能する。その後、エラー検出/修正アルゴリズムにより、ビットの並びがリードヘッドの仮の絶対位置に変換される。この仮位置(おおよかな位置)に位相情報(細かい位置)を組み合わせることで、アルゴリズム 1 では最終的な位置が算出される。

**アルゴリズム 2** は、直近の位置データ 2 点を基にした直線外挿法により位置を算出する。このとき、1 回前と 2 回前の測定位置から速度を割り出し、同じ速度でリードヘッドが動いていると仮定して処理が行われる。この算出処理では、読取り処理間隔、過去の読取り値の精度、タイミングの不確かさ、そしてリードヘッドとスケール間の相対加速度によって誤差が決まる。例えば、リードヘッドとスケール間の最高加速度が  $100\text{m/s}^2$  (10G) で、位置リクエスト間隔が  $62.5\mu\text{s}$  の平均的なシステムの場合で、アルゴリズム 2 の最大誤差は  $\pm 1.2\mu\text{m}$  となる。なお、画像と画像の間に  $75\mu\text{s}$  以上あかないよう、リードヘッドはリクエストとリクエストの間でも画像を補助的に取得する。

### 位置の比較

各アルゴリズムが仮位置を算出したら、出力する位置データとエラーフラグの状態の決定処理が行われる。アルゴリズム 1 による位相を基にした位置情報の算出は汚れによる影響をほとんど受けない。スケールが汚れていると位相情報のノイズが大きくなり、位相情報が乱れる可能性もある。だが、極端に汚れていても、汚れが原因で発生する位置誤差は  $1\mu\text{m}$  にも満たない。汚れがひどい場合であっても位相情報の信頼性は依然として高いが、仮位置算出中の誤差補正では、正確な絶対位置の算出に至らないことがある。

アルゴリズム 2 が算出する仮位置は外部の影響をほとんど受けない。極めて高い加速度 ( $2000\text{m/s}^2$  超) のとき以外、仮位置を変化するほど大きな誤差が発生しないためである。しかし、アルゴリズム 2 が算出する詳細位置 (位相) は、速度が一定であるという前提を基にしているため、正確さには欠ける。

動作中、両アルゴリズムが算出した仮位置が一致した場合 (すなわち、仮位置同士のずれが  $\pm 15\mu\text{m}$  (スケールピッチの半分) 以内だった場合)、アルゴリズム 1 が算出した位相と仮位置とがリードヘッドから出力される。同時に、内部カウンタの値が 0 にセットされる (内部カウンタの役割については後述する)。仮位置同士が不一致の場合、アルゴリズム 1 が算出した位相とアルゴリズム 2 が算出した仮位置とがリードヘッドから出力される。また、内部カウンタの値がひとつカウントアップする。そして内部カウンタの値が 5 になると、位置出力が正確でない可能性があるとして、エラーフラグがセットされる。以下に、エラーフラグがセットされる場合について考察する。

#### 例 1

リードヘッドがスケールコードの誤差補正許容値を超えるほど汚れた領域を通過した場合、不正な仮位置がアルゴリズム 1 によって算出される。ただし、汚れによりサブミクロン単位の誤差は生じるものの、位相には問題がない。仮位置間に差異があったことがリードヘッド内に記録され (内部カウンタのカウントアップ)、アルゴリズム 2 により算出された正しい仮位置とアルゴリズム 1 により算出された正しい位相が出力される。アルゴリズム 1 により算出された仮位置が 5 回連続で不正と判定された場合、位置が正確でないとして、エラーフラグがセットされる。仮位置の不正が 4 回以下のうちにアルゴリズム 1 による

仮位置が適切と判定されると、カウンタはリセットされ位置出力はそのまま継続する。

#### 例 2

機械がストッパにあたるなどで通常動作中のリードヘッドに約  $10,000\text{m/s}^2$  の加速度がかかった場合 ( $2\text{m/s}$  で移動中に  $100\mu\text{m}$  での停止に相当)、アルゴリズム 1 からは正確な位置が常に算出される一方で、アルゴリズム 2 からの仮位置は最大で数スケールピッチ分本来の位置からずれる。リードヘッドは、アルゴリズム 2 により算出された仮位置が適切であると (誤って) 認識したまま、その仮位置をアルゴリズム 1 が算出した位相と一緒に出力する。これ以降、両アルゴリズムから算出された仮位置同士は常に不一致となる。そして、実位置から若干ずれた位置が 5 回算出された後、エラーフラグがセットされる。

#### 例 3

両アルゴリズムの出力結果がどちらも不正になることもある。あまりないことではあるが、イオン化放射によりリードヘッド内部のメモリ領域が破損し、両アルゴリズムからの位置情報が破損する場合などである。アルゴリズム同士で位置の算出方法が大きく異なっているため、両方のアルゴリズムが破損して同一の出力を返すことは考えられない。そのため、リードヘッド側は仮位置の不一致として認識し、カウンタの値をカウントアップする。そして、アルゴリズム 2 の仮位置とアルゴリズム 1 の位相から成る不正位置を出力する。アルゴリズム 2 は過去の読取り値を基準にしているため、以降は常に出力が不正になる。従って、アルゴリズム 1 からの出力が適正に戻っても、リードヘッドが位置を 5 回読み取った後、エラーフラグがセットされる。

### エラーフラグの反応

上記では、エラーフラグがセットされるまでに 5 点の不正位置が出力される例を示した。位置のリクエスト間隔が  $62.5\mu\text{s}$  のシステムの場合、最初の不正位置が出力されてからエラーが判定されるまで  $312.5\mu\text{s}$  かかる。リクエスト間隔が  $500\mu\text{s}$  のより低速なシステムの場合は、エラーまでの時間が  $500\mu\text{s}$  になる。画像取得の間隔が  $75\mu\text{s}$  以上あかないよう、リードヘッドがリクエストとリクエストの間に 6 点の画像を追加処理するためである。いずれの場合でも、不正位置の出力からエラー判定までの時間は十分短いため、不正データが制御システムに影響を与える前にエラーフラグに対して適切な対処を施すことが可能である。

図 3 および 4 に、位相の判定は可能だが絶対位置コードの読取りは不可能な場合の、汚れたスケールの例を示す。このような場合、上述の機構により、位置が保護されるか、またはエラーフラグがセットされてコントローラ側に警告が示される。

## システムの立上げ

ここまで、アルゴリズム 2 が位置を外挿するために十分なデータが常時存在するという前提で、話を進めてきた。しかしリードヘッドの電源 ON 直後はこの前提が当てはまらない。電源 ON 直後はスケールから読み出した位置と比較するための位置情報がないからである。そこで、電源 ON 直後は 2 種類の方法で、スケールに対するリードヘッドの位置を確実に検出する。

まず、画像のコントラストが許容範囲を超過している場合、リードヘッドによりエラーフラグが自動的にセットされる。そして次に、誤差補正の許容量に制限がかかる。スケールコードには、読み出したデータ同士を明確に区別できるような冗長性を持たせてある。そのため、補正対象のビットを少なく抑えておくことで、データ(ビットの並び)が不正位置として誤読み出しされるリスクが実質的に抑制される。この 2 種類の制限によって立上げ中のリードヘッドは、若干汚れの影響を受けやすくなる。だが、汚れがあっても位置検出性能を維持できるよう、リードヘッドは電源 ON 中に多数の画像を取得するため、この影響は相殺される。

また、スケールコードは、リードヘッドの電源 ON 時に不正位置が検出されるという極めてまれなことが起きたときに、500 $\mu$ m 以下の移動で不一致が検出されるように設定されている。同時にこの不一致の検出時にエラーフラグがセットされる。



図 3: 大部分が汚れで覆われたスケール(位相の特定は可能)

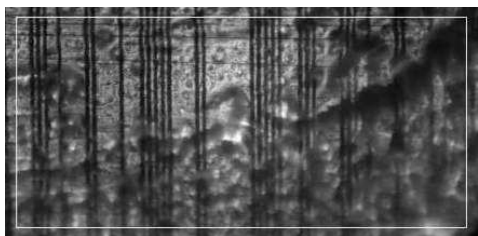


図 4: グリースにより光の拡散が発生する(位相情報への影響はごくわずか)

## CRC

リードヘッドによって位置信号とエラー信号が算出されると、各信号がホストコントローラに送信される前に、CRC (Cyclic Redundancy Check: 巡回冗長検査) が算出および付加される。そして各信号は、ダブルシールドケーブルを通してディファレンシャル形式で送信される。受信時、CRC が再計算され送信された値と比較される。差異は送信中にデータが破損したことを示す。すなわち、位置信号またはエラー信号の破損が検出される。従来の矩形波方式と比較したシリアルプロトコルのメリットとしては、各通信が独立しているため、送信処理における誤差が累積していかないことが挙げられる。このメリットが、RESOLUTE の独自の動作原理と相まって、極めて高い安全性につながる。ミスカウント、位置ドリフトそしてカウントロスが発生しないからである。

## 最後に

RESOLUTE は、通常動作時における高い測定性能を備えているだけでなく、不具合が起きたときや異常動作のときでも信頼できる位置出力を行えるよう特別に最適化されている。RESOLUTE の位置出力とエラーフラグを参考にした、システム設計が可能である。また、予期せぬ動作や衝突のリスクの心配なく使用できるし、さらに生産性と最優先事項である安全性の向上につながる。