

光学式ロータリエンコーダの高精度化 - 組立技術面から -

High Resolving Optical Rotary Encoder

山田和明 K. YAMADA 茅野大二郎 D. CHINO

As the approaches for developing high resolving optical rotary encoder, various new optical methods are being investigated. Regardless of being new optical methods or old ones, improvement in assembling precision is inevitably important. This paper reports an automatic high precision assembling system for the rotary main scale and the fixed index scale of a typical rotary encoder, which has been realized by using visual servo positioning technology adopted image processing, so-called normalized gray scale correlation pattern matching.

Key Words: optical rotary encoder, high precision positioning, rotary main scale, fixed index scale

1. はじめに

サーボモータ用など計測制御センサとして多様な分野で使用されるようになったロータリエンコーダは、適用機器の小型化あるいは精密化が進むに伴い、自身も小型でかつ高分解能であることが要求されるようになってきた。これに対し我々は、新しい光学方式での対応を検討すると同時に、従来の光学方式であってもさらなる高分解能化が可能となる手段として、高精度な自動組立技術の研究にも取り組んだ。

今回は、ロータリエンコーダ組立工程の中でも、その精度が性能・品質に大きく関わるスリット板の位置決め工程をターゲットにして、画像処理を用いた高精度な自動位置決めシステムを開発し、高分解能化に対応できる組立技術により現行製品の品質向上が実現できたので、その内容について紹介する。

2. 光学式ロータリエンコーダの原理

図1に、現在主流となっているスリットシャッタ方式ロータリエンコーダの構成を示す¹⁾。

ロータリエンコーダは通常スピンドル構造になっており、発光素子から照射された光は、まずハウジング側に固定されたインデックススケール板上の微細なスリットパターン(以下固定スリット板および固定スリットと称す)を通過するが、他方、シャフトに取り付けられ回転するメインスケール板上にも微細スリット(以下回転スリット板および回転スリットと称す)が全周に渡って切ら

れており、これら両スリットの相対位置によって光が受光素子まで到達したり、遮断されたりする。このとき受光素子からは三角波状の出力が得られ、これを電氣的にコンパレートしてエンコーダパルスを生成している。

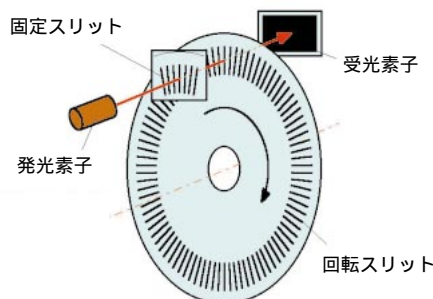


図1 代表的な光学式ロータリエンコーダの構造
Typical optical rotary encoder

さらにスリット板には通常A相、B相などと呼ばれるスリット群が数組設けられ、異なった周期や位相を持った数種類のパルスが出力されるように設計されている。それらによってロータリエンコーダは回転位置、方向、速度などを検出するセンサとなるが仮に回転スリットと固定スリットの相対位置が設計値から外れてしまった場合、それらの相互位相がずれてしまい、エンコーダとしての性能を損ねてしまう。

3. スリット板の位置決め要素

ロータリエンコーダの小型化あるいは高分解能化とはすなわち、両スリットのさらなる微細化である。たとえば回転スリット板直径 32mmの

2 048パルス / 回転の製品ではスリット幅は約 20 μmであるが、分解能を維持してサイズを 1 / 2 に、あるいはサイズを維持して分解能を 2 倍の 4 096パルス / 回転にしたときスリット幅は半分約 10 μmになり、それに伴って両スリットの相対位置にもさらなる高精度が要求されることは容易に理解できるであろう(図 2) .

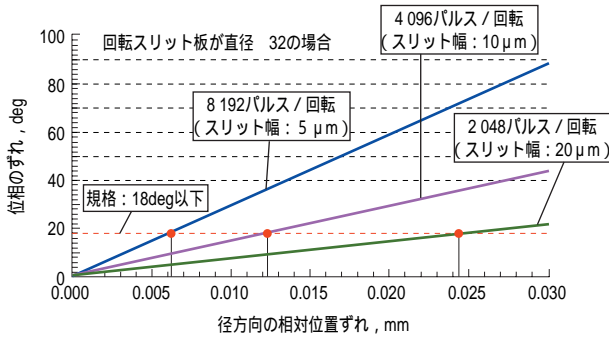


図2 ロータリエンコーダの分解能と要求される位置決め精度

Relation between resolution of rotary encoder and positioning precision required

このとき、回転スリットについては、シャフト回転位置とパルスの原点の位相シャフト回転中心(シャフトの形状中心ではないことに注意)に対する回転スリットの偏心(すなわち回転時のラジアル振れ) シャフトの回転軸に対する直角度(すなわち回転時のアキシャル振れ) などが位置決め要素となり(図 3)、その精度が問われる .

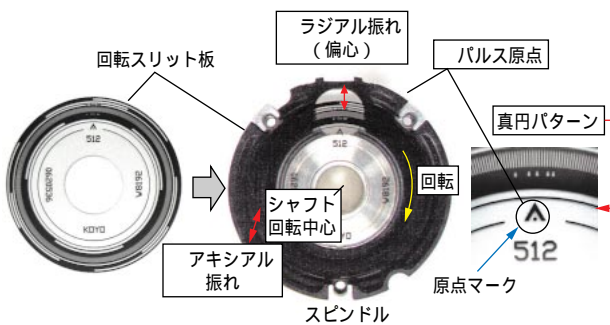


図3 回転スリットの位置決め要素
Positioning elements of rotary main scale

一方、固定スリットについては、回転スリットに相対してどれだけ位置がずれているかを問題とするのが原理的に妥当であるが、今回ターゲットとした製品の構造上、固定スリットを先に位置決めする必要があったので、こちらもシャフト回転中心を基準とし、

- 径方向位置ずれ、 接線方向位置ずれ、
- 傾き、 面の倒れ

を位置決め要素とした(図 4) . この方法には、回転スリットの偏心精度には影響されないというメリットもある .

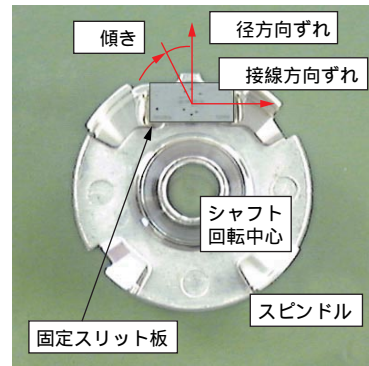


図4 固定スリットの位置決め要素
Positioning elements of fixed index scale

これらのうち および については、部品精度・機械精度によるところが大きいため本テーマの対象外とし、回転スリットの および固定スリットの ~ について、精度の高い自動位置決めが実現できる方法を検討した .

4. 回転スリット板自動位置決めシステム

4.1 パルス原点の位相合わせ

パルス原点の位相合わせは、シャフトのすり割りやカット形状などを基準とした回転位置とパルスパターンの起点を一致させるために行う . 通常は回転スリット板上に矢印などのマーク(以下原点マークと称す)が施されており、それを用いて位置決めする .

ターゲットとした製品では、従来この工程を目視による手動調整で行っており、今回はこれを画像処理を使って自動化した . その手法は以下の通りである .

- CCDカメラにマクロレンズをつけ、回転スリット板が回転したとき原点マークが撮像範囲を通過する位置にカメラを固定する .
- あらかじめ原点マークの画像を正規化相関パターンマッチングのモデルとして登録しておく、画面上の原点マークの通過域を連続サーチすることで素早く横切る原点マークを捕捉し、そこで回転を停止させる . (図 5 a)
- 引き続きパターンマッチングで原点マーク矢印先端の位置を精密に計測しながら、矢印先端が画面上の目標位置と一致するように微速回転で正確に位置決め制御する . (図 5 b)

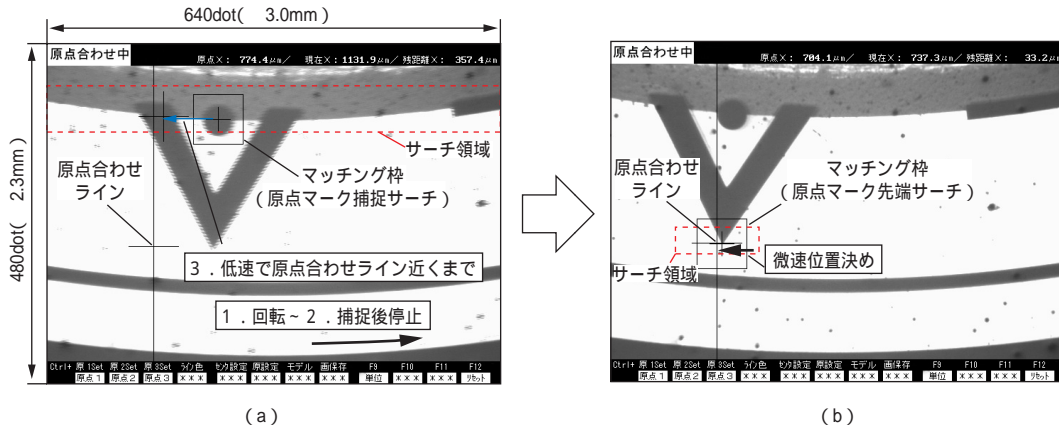


図5 パルス原点の位相合わせ画像
Picture in matching phase of pulse origin

従来の画像を用いた同様の位置計測は、一定の明度をしきい値にした2値化画像から、形状の重心や白/黒の境界位置などを利用することが多く、その低い分解能と明度に対する低ロバスト性(明度のむらや分布変動の影響)から計測位置の正当性自体が問題となったが、ここで用いている濃淡8ビット画像の正規化相関パターンマッチングでは、明度に対するロバスト性も高く、位置分解能も1/10画素以下(ここでは $0.5\mu\text{m}$ 回転位置 0.02deg)が得られ、位置精度は格段に向上した。

4.2 回転スリットの偏心修正

4.2.1 位置決め手法の検討

回転スリットの偏心を小さくするためのアプローチには、以下の2通りがある。

- a) シャフト回転中心位置を計測し、それを基準に定めた幾何的な位置に、回転スリット板上の位置決め用マークが来るように位置調整する方法。
 - b) シャフトに回転スリット板を仮置きし、実際に回転させたときのスリットのラジアル振れが最小となるように位置調整する方法。
- 上記a)の手法は、要求される位置精度のオーダが μm であるのに対し、数十mm範囲に位置する2~3点間の距離を計測する必要があるため、十分な精度を得るためには複数の位置計測系を準備しなければならないが、それらの座標系の一致や変動(たとえば、温度による相互距離の変化や振動など)あるいはアクチュエータ系の繰り返し誤差などを保証することは相当に難しい。

一方、b)の手法は、未調整時でせいぜい数百 μm の振れ部分にのみ注目すればよいので、1つの計測系で十分誤差の少ない高精度な計測が可能である。ここではこの手法を用いた。この手法では通常、以下の手順で位置決めを行った。

紫外線硬化接着剤を塗布したシャフトに回転スリット板を仮置きし、回転させる。CCDカメラ等を使って回転スリットのラジアル振れを計測し、変位の最大位置で回転を停止。アクチュエータを使い、変位最大位置から振幅の1/2だけ精度良く修正する(図6)。

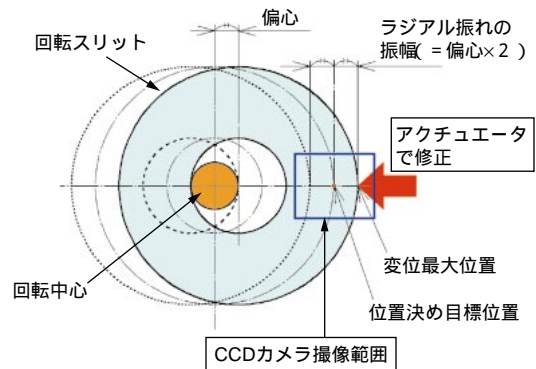


図6 回転スリットの偏心修正方法

Correcting method of rotary main scale eccentricity

シャフトを再度回転させ、同様にラジアル振れを計測したとき、振幅が必要精度以下に収まっていれば接着剤を硬化させて固定する。(精度不十分な場合は、再度を行う。)

実際、これと同様のことを作業者の目視計測と手動調整で従来から行ってきたが、精度(品質)、生産能率のいずれにも課題を残してきた。今回これらの手順をすべて画像処理計測と自動調整に置き換えることで、位置決めの高精度化とともに、品質の安定化や生産能率を向上させることも目的とした。

4.2.2 自動位置決めの内容

まず、回転スリット群と同心に描かれている真円パターンの円弧の一部を、固定した38万画素CCDカメラで連続撮像する。仮置きされた回転スリットの偏心はせいぜい数百 μm であるため、マクロレンズで拡大し、約 $1\mu\text{m}/\text{画素}$ の画像分解能(正規化相関パターンマッチングの位置分解能 $0.1\mu\text{m}$ 以下)を得た。

拡大撮像された真円パターンの円弧は、回転時のラジアル振れに伴って画面上を往復するが、それをパターンマッチングで径方向に追尾し、振れ変位とその最大位置および振幅の計測を行った(図7)。

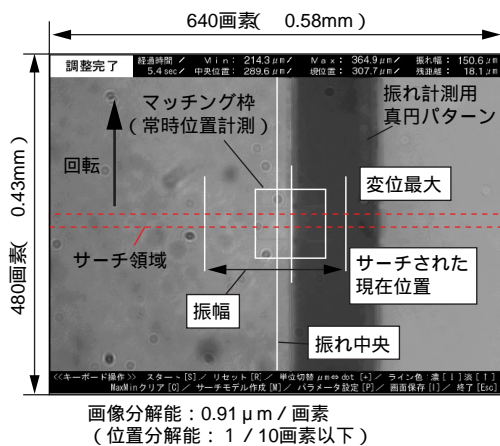


図7 ラジアル振れの計測画像

Picture of radial displacement measurement

偏心の修正は、パルスモータを制御してラジアル振れ変位が最大となる回転位置でスリットの回転を精密に停止させた後、引き続きパターンマッチングで真円パターンの位置を連続して取得しながら、回転スリット板の外径端をアクチュエータで少量ずつ押し進め、真円パターンが振幅の $1/2$ となる位置に正確に来るように動かした。このときアクチュエータが回転スリット板に接触するまでは比較的高速で動かすが、目標位置に近づくと段階的に押し速度を遅くするなどの制御も行い、精度とスピードが両立するようにした。

4.3 位置決め性能

この回転スリット板自動位置決めシステムは、実際に現行製品の生産ラインに導入され、導入時の100ヶ流動テストでは、原点の位相合わせが $\pm 0.2\text{deg}$ 以下、偏心が $3\mu\text{m}$ 以下になった時点で調整完了とする設定で、所要時間はいずれも従来の目視/手動調整に比べ約 $1/2$ という性能を示した。

5. 固定スリット板自動位置決めシステム

5.1 位置決め手法の検討

固定スリットについては第3章で述べたように、製品の構造的な理由から今回はスピンドルのシャフト回転中心位置を基準とした位置決めを行うことにした。そのため回転スリットの場合には不採用とした4.2.1のa)項の手法と同様の問題が懸念された。

そこでそれらの要因を減らすために、マスタ登録方式と呼ばれる手法を採用し、さらに今回は高分解能CCDカメラ1台の画像を位置計測のベースにすることで、複数台カメラを使用したときに煩わしい精密な相互位置調整を不要とした。その概要は以下の通りである。

すでに固定スリット板が精度良く貼り付けられているスピンドルを基準ワーク(以下マスタスピンドルと称す)として準備する。

治具で固定したマスタスピンドルのシャフトを回転させ、シャフトの回転中心位置を高精度に計測し、登録。

同時に高分解能CCDカメラでマスタスピンドルの固定スリットを撮像、画像上の位置を高精度に計測し、登録。

その後、所定の位置に固定スリット板を仮置きした実際のワークスピンドルを同じ治具で固定し、前同様の位置計測を行いながら、シャフト回転中心と固定スリットパターンの相対位置関係がマスタ登録したものと一致するように、ワークのシャフト回転中心位置のずれ分を画像上の目標位置に加味して、固定スリット位置をアクチュエータで修正する。

この方式によって懸念された広範な距離を計測する必要がなくなり、マスタスピンドルに対してワークスピンドルのシャフト回転中心位置のずれ(ワーク個別のばらつきと固定位置の繰り返し誤差、数十 μm 以下)と仮置きした固定スリットのずれ(数百 μm 以下)だけを別個に精度良く計測すればよいことになった。

5.2 自動位置決めの内容

5.2.1 マスタ登録

まず最初にマスタ登録を行うが、シャフト回転中心位置については、汎用のレーザ外径測定器を応用し図8に示す方法で行った。この方法では、シャフトの振れ回りも考慮された真の回転中心が計測され、ごみ付着などの影響も小さい。

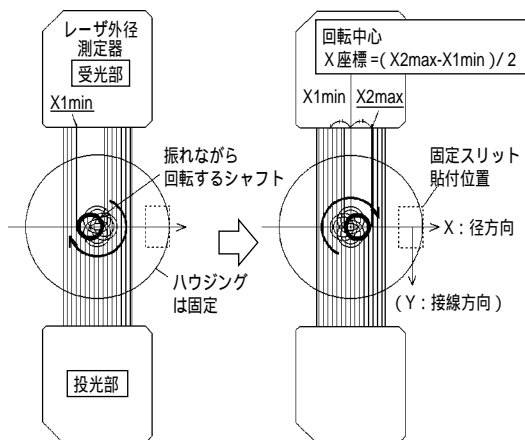


図8 シャフト回転中心位置の計測方法
Measurement of shaft rotation center

今回は固定スリットに対して径方向のみの計測を行った。本来ならば直交する接線方向の回転中心位置も計測してしかるべきところであるが、数十μm以下のシャフト回転中心位置のずれは、接線方向に限っては性能への影響度がかなり小さい(径方向のずれの0.1%以下)ことが確認できたので省略することにした。

固定スリットの撮像には130万画素CCDカメラを用い、1台で適切な撮像範囲と十分な画像分解能(約2μm/画素 正規化相関パターンマッチングの位置分解能0.2μm以下)を両立させた。マスタ登録ではマスタスピンドルのシャフト回転中心位置計測と同時に、固定スリット画像のパターンの一部領域を選択し、その領域の画像と位置をパターンマッチングのモデルとして登録する。モデルとしては特別な位置決めマークは不要で、既存のスリットパターンが使用できるため、汎用性が高いものとなった。

5.2.2 固定スリットの位置決め

まず、マスタスピンドルと同一の方法で固定されたワークスピンドルについてシャフト回転中心を計測する。このときマスタ登録されているシャフト回転中心位置と比較し、ずれ量を取得しておく。

次にスピンドルの所定位置に仮置き(接着剤塗布済み)された固定スリット板のCCDカメラ画像から、マスタ登録したモデルと一致するパターンをサーチして、マッチングしたパターンの位置ずれ量(X, Y)と傾き()を取得する(図9)。

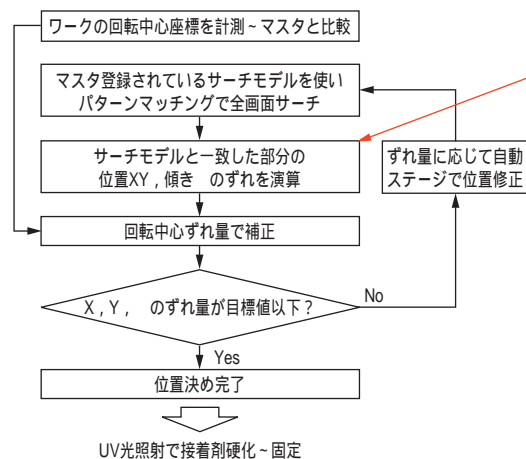
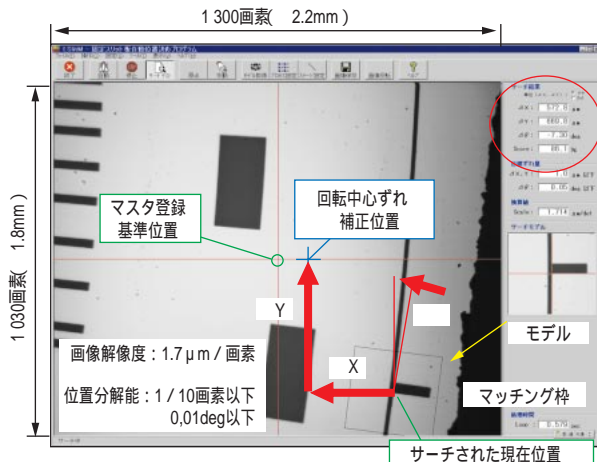


図9 固定スリットの位置修正画面
Picture in correcting fixed index scale position

取得した画像上の位置ずれにシャフト回転中心の位置ずれを加算し、アクチュエータ(4軸自動精密ステージ・Z軸は固定スリット板の押付け圧をビーム型ロードセルと組み合わせて制御)で位置ずれおよび傾きを修正する。制御は傾き取得 傾き修正 位置ずれ量取得 位置修正を連続して繰り返すループ制御で、位置ずれ量と傾きが設定された許容値以下に収束するまで行った。画像上では最終的に、マスタ登録された位置からシャフト回転中心の位置ずれ分だけオフセットされた位置に位置決めされることになる。

5.3 位置決め性能

固定スリットの位置決め精度は、高精度に貼り付けられた回転スリットと実際に組み合わせたときの相対位置をリニアステージ付き光学顕微鏡で評価した。

位置ずれ量1μm以下、傾き0.1deg以下に収束するように設定し、サンプル10ヶについて位置決めした結果、径方向のずれ平均0.8μm、傾き平均0.03degとなり、位置決めのみ(シャフト回転中心

計測から位置修正完了まで)の所要時間は約10秒であった。

なお、この固定スリット自動位置決めシステムについては、パターンマッチングモデルが自由に選べるなど汎用性が高いため、多型番汎用のスリット板自動位置決め貼付機としてロータリエンコーダの生産ラインに導入されている。

6. おわりに

開発したロータリエンコーダの回転/固定スリット板自動決めシステムによって、組立技術的には現行ロータリエンコーダの2~4倍の高分解能化あるいは小型化に対応できるようになったと言える。また現行製品においても、スリット板の位置決め精度が向上したことで出力パルスの相互位相差やデューティ、フラッタなどの特性が向上し、安定した品質が得られるようになった。

紹介した事例は、正規化相関パターンマッチングを応用した位置決めシステムであり、従来、このような処理を実用速度で行うには高価な画像処理装置が必要であったが、今回は近年進歩が著しいパソコンをベースにシステムを構築することで、安価かつ高速に処理することができた。また高分解能カメラ、高速カメラなども次々と登場し低価格化が進んでいることから、高速・高精度が要求される組立設備に画像処理技術を活用する場面が、今後ますます増えていくと考えられる。

参考文献

- 1) 服部 昌, 山田和明, 桑野俊貴, 小館香椎子: Koyo Engineering Journal, no. 160 (2001) 44.

筆 者



山田和明*
K. YAMADA



茅野大二郎**
D. CHINO

* 総合技術研究所 システム技術研究所
F Aシステム研究部

** 光洋電子工業株式会社
エンコーダ事業部