

## 回転軸振れ量の検出が可能なロータリーエンコーダの開発

東京電機大学 ○上山裕理 国立研究開発法人産業技術総合研究所 ◎渡部司 東京電機大学 古谷涼秋 小崎美勇

### 要旨

産業技術総合研究所が開発した「SelfA」は、角度誤差要因を検出し補正することで角度  $0.1''$  を超える精度を実現することができる自己校正機能付きロータリーエンコーダであり、さらに回転軸振れ量を検出する機能「SelfA+」を追加できる。本報では、開発した軸振れを定量的に発生させる装置を用いて、レーザ変位計で計測した回転軸振れ量を基準として SelfA+ が検出した軸振れ量を比較することにより、回転軸振れ検出能力を評価した結果を報告する。

### 1. 序論

回転軸振れは、モータなどの回転軸に取り付けられた軸受（ベアリング）が引き起こす軸のラジアル方向への局所的な並進運動のことであり、タービンや風力発電、工作機械といった回転部品を有する機械において、故障の原因や加工精度に影響を及ぼすものである。従来、回転軸振れを検出する装置は、レーザ変位計や静電容量センサが使用されてきた。しかし、これらの価格は1軸あたり100万以上と高く、また広い設置空間が必要であるため、より小型で低価格な軸振れ検出センサの開発が期待されている。

産業技術総合研究所が開発した、自己校正機能付き角度検出器の原理「SelfA（セルフア）」に軸振れ検出機能を追加した SelfA+ の性能評価を行った結果を報告する。

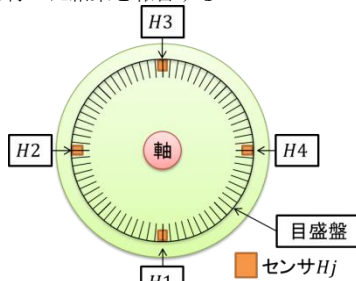


図1 SelfAの概略図

### 2. SelfA+の測定原理

まず、SelfAの原理を説明する。目盛数  $N$  本の目盛盤の周りに  $M$  個のセンサを等角度間隔に配置する。例として、図1に示すように  $M = 4$  個のセンサを  $90^\circ$  間隔に配置した場合で説明する。目盛盤の  $N$  本の目盛位置は、それぞれ理想的な目盛線位置からのずれとして  $A_i (i = 1, 2, 3 \dots N)$  で表される角度誤差を持つものとする。センサ  $H1$  が角度誤差  $A_i$  を持つ  $i$  番目の目盛線を検出しているときに、他のセンサ  $H2, H3, H4$  は、それぞれ  $90^\circ$  度位相のずれた  $A_{i+\frac{N}{4}}, A_{i+\frac{2N}{4}}, A_{i+\frac{3N}{4}}$  の角度誤差を持つ目盛線を検出している。角度誤差  $A_i$  は、理想的な角度位置がわからないため直接検出することはできないが、(1)式に示すように、センサ  $H1$  を基準として各センサが検出した角度信号の差  $\delta 1. j_i$  は測定することができる。(1)式に示す4つの角度信号の差を平均した値を  $\mu 1_i$  とすると、 $\mu 1_i$  は(2)式で示すことができる。(2)式の右辺第一項は、角度誤差であるが、右辺第二項を含むため、左辺の測定量  $\mu 1_i$  は完全な角度誤差ではない。(2)式の右辺第二項は、 $A_i$  を  $90^\circ$  位相ずらすした値の平均値となっており、これは  $A_i$  の  $4n$  次成分となっている。そのため測定量  $\mu 1_i$  は、 $4n$  次成分を含んでいない。

$$\begin{aligned} \delta 1.1_i &= A_i - A_i = 0 \\ \delta 1.2_i &= A_i - A_{i+\frac{N}{4}} \\ \delta 1.3_i &= A_i - A_{i+\frac{2N}{4}} \\ \delta 1.4_i &= A_i - A_{i+\frac{3N}{4}} \end{aligned} \quad \dots (1)$$

$$\mu 1_i = A_i - \frac{1}{4} \left( A_i + A_{i+\frac{N}{4}} + A_{i+\frac{2N}{4}} + A_{i+\frac{3N}{4}} \right), \quad \dots (2)$$

したがって、配置するセンサ数  $M$  を増やすことにより、右辺第二項は、 $A_i$  の  $Mn$  次成分となり高次側にシフトし影響が小さくなるため、より高精度に角度誤差  $A_i$  を検出することができるようになる。これが SelfA の原理である。図2に各センサを基準とした場合に検出した角度誤差を示す。各センサ位置は  $90^\circ$  ずつ位相が異なるため、解析された角度誤差も  $90^\circ$  ずつ位相のずれた

値が得られている。

次に SelfA+ の原理を説明する。図2に示された角度誤差は、検出を開始した位置が  $90^\circ$  ずつ位相がずれただけであるから、角度位相に合わせれば、同じ値となるはずである。しかし、図3に示すように位相を合わせてみると、若干の差があることがわかる。この差の要因は、目盛盤が軸振れによる並進運動を各センサが角度誤差として検出してしまうからである。図3の各センサの平均値からの差分の値を図4に示した。対向したセンサ  $H1$  と  $H3$ 、 $H2$  と  $H4$  での解析において符号が反転した値を示している。ロータリーエンコーダで検出されている軸振れ量は、回転方向の接線方向のみを検出するため、例えば回転軸が  $H1$  の正の方向に並進運動した場合、対向したセンサでは、負の値として検出してしまうからである。

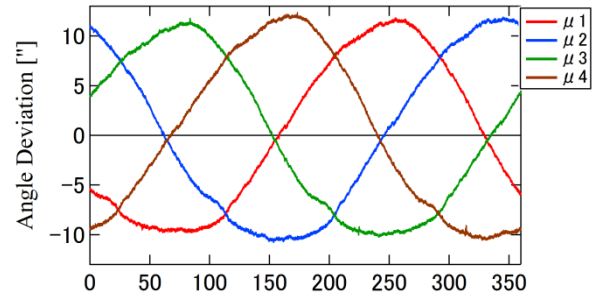


図2 SelfAの解析結果

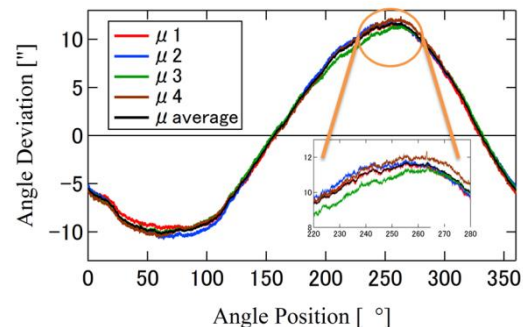


図3 SelfAの位相合わせ

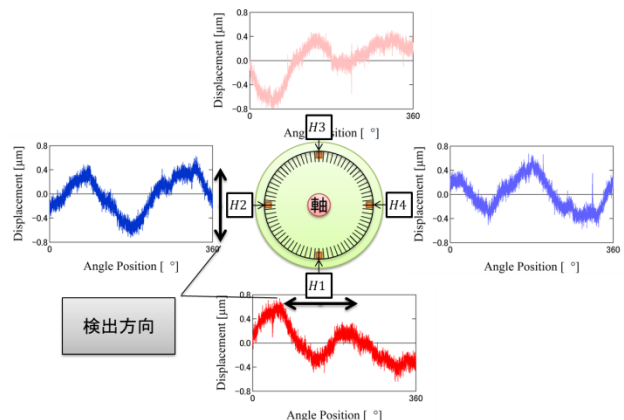


図4 SelfA+解析結果

### 3. 実験装置

軸振れ発生装置 (図 5) は、エアベアリングの上部にのびた回転軸に SelfA+ が 2 台 (下から SelfA\_Low, SelfA\_High) と軸の上端にレーザ変位計測定対象の球が設置され、軸振れ発生部により発生させた軸振れ量をそれぞれ計測することができる。軸振れ発生部 (図 6) は、フランジが回転中心に偏心するように取り付けられており、偏心したフランジがその周りに配置した球に接触することで、回転軸に対して軸振れを発生させている。軸振れ量はマイクロメータで球を押し込む量を調整することで実現している。

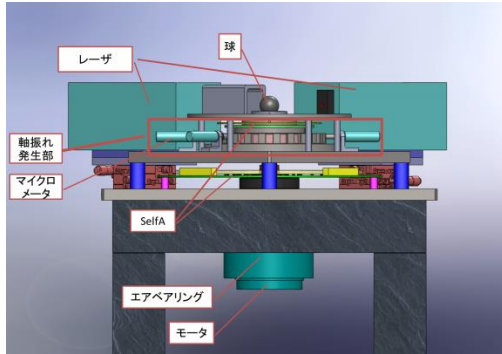


図 5 軸振れ発生装置概要

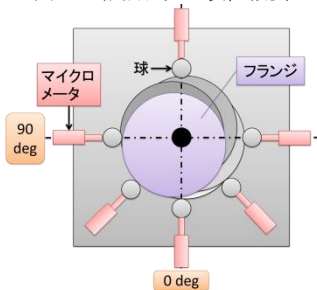


図 6 軸振れ発生部

### 4. SelfA+の評価実験

#### 4.1 実験方法

実験は、レーザ変位計の測定に必要である、軸振れ発生部で軸振れを起こした状態 (Run-Out) と軸振れをやめた状態 (Null) の 2 種類の測定を行う。レーザ変位計の測定値は、Run-Out で 3 つの変位 (球の偏心, 発生した軸振れ, 球の形状) を、Null では 2 つの変位 (球の偏心, 球の形状) を含んでおり、それらの差をとることで Run-Out 時に発生した回転軸振れのみを解析できる。一方 SelfA+ は、Null を必要としない、Run-Out のみのデータで SelfA+ のアルゴリズムに適用し、発生した軸振れ量を検出することが可能であるか評価した。

一般にベアリングの軸振れを評価する時に Null を測定することは難しく、偏心による 1 周期成分と軸振れによる 1 周期成分が分離できないことから議論しないことが多い。したがって、レーザと SelfA+ それぞれの測定値から 1 次フィッティングを行い、1 周期成分を除いた 2 次成分以上の測定値で回転軸振れ量を評価する。

実験において SelfA+ の解析で使用したセンサの個数は  $M=8$  個であり、各センサは  $45^\circ$  等角度間隔に配置してある。

#### 4.2 SelfA+ とレーザ変位計の値の比較

実験装置 (図 5) には、軸振れ発生部の上下に、2 台の SelfA (SelfA\_High, SelfA\_Low) が設置されている。2 台の SelfA を使用して SelfA+ の解析をしたものをそれぞれ SelfA+\_High, SelfA+\_Low とする。

レーザ変位計が検出する回転軸振れ量を基準として、SelfA+ がどの程度の検出能力があるか実験した。SelfA+ とレーザ変位計の比較を図 7 に示す。図 7 は、明らかにレーザ変位計と 2 つの SelfA+ の値が全て違うことがわかる。これは、軸振れが図 8 のようにエアベアリングの上端を中心に高さ按比例して発生すると考えられるため、それぞれの回転軸振れ量を検出している高さが違うことが原因である。本研究では、SelfA+ の性能評価を行うため、レーザが検出した軸振れ量を各 SelfA の高さにスケールして比較を行った。SelfA+\_High と高さの比を考慮したレーザ変

位計の比較を図 9 に SelfA+\_Low と高さの比を考慮したレーザ変位計の比較を図 10 に示す。

図 9, 10 より、SelfA+ とレーザ変位計で検出された軸振れ量の差分は、 $\pm 0.1[\mu\text{m}]$  程度であり、2 次成分以上の検出能力は高いことがわかる。しかし、図 9, 10 に示す差分は、レーザ変位計で検出されていない凹凸がある。SelfA+ には、まだ軸振れ量の未検出要因があり、それがこの凹凸に表れていると考えられる。

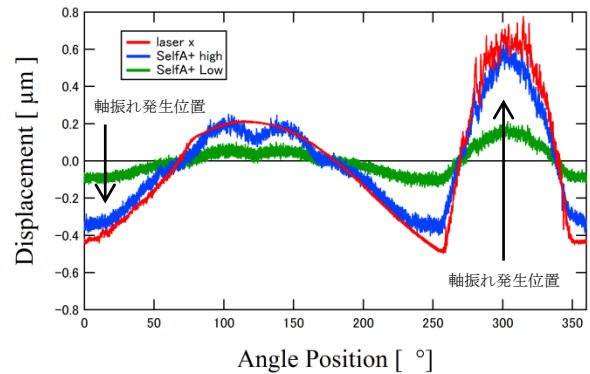


図 7 SelfA+ とレーザ変位計の比較

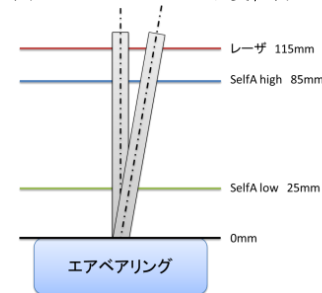


図 8 幾何学的な軸振れの動き

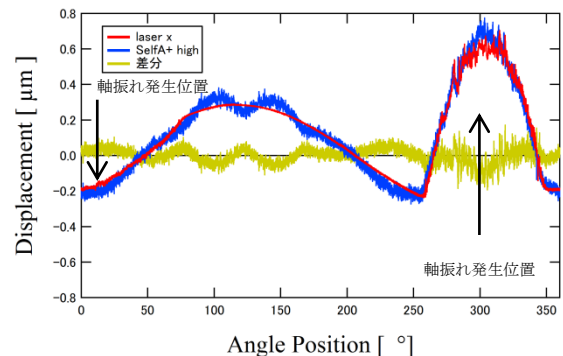


図 9 SelfA+\_high と高さの比を考慮したレーザ変位計の比較

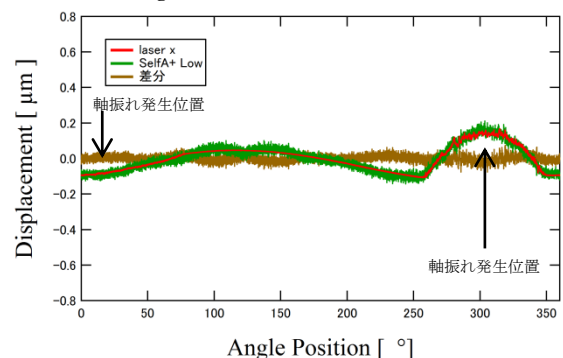


図 10 SelfA+\_Low と高さの比を考慮したレーザ変位計の比較

### 5. 結論及び展望

軸振れ評価手法 SelfA+ は、 $\pm 0.1[\mu\text{m}]$  の検出能力があることがわかった。しかし、レーザ変位計と差分は、凹凸の未検出量が発生してしまうといった、SelfA+ の問題点がある。

Null 測定を必要としない、SelfA+ の解析を高精度化するために今後の展望として、SelfA+ の原理からこの問題を解決する必要がある。また、SelfA+ の未検出部分を補正する新たな解析方法の導入が必要である。