

ロータリエンコーダに角度標準は必要か

—— 角度偏差の「見える化」を可能にしたロータリエンコーダの開発 ——

渡部 司

ロータリエンコーダは360度の分度器のように円周上に目盛スケールが刻まれ、それを検出することにより角度位置情報を出力する装置である。しかし、ロータリエンコーダの目盛スケールのずれや、回転軸の偏心の影響により理想的な角度位置から偏差が存在するため、ユーザーはエンコーダから得られる角度情報の信頼性をどのように確保して良いのか困っていた。この問題を解決するべく、さまざまな角度偏差の要因を、自分自身で検出し角度校正値として出力することができる自己校正機能付きロータリエンコーダ (Self A: Self-calibratable Angle device) を開発した。このエンコーダはこれまでブラックボックス化していた角度偏差要因を検出、分離し、そしてそれら要因を定量的に評価できる「見える化」を実現した。

1 はじめに

ロータリエンコーダは角度計測器の1つであり、その用途は機械産業分野では工作機械や半導体製造装置あるいは産業ロボットの角度計測や制御に用いられ、「長さ」で構成される直交座標に、「角度」の極座標の自由度を与えることで、より複雑で精巧な製造を可能としている。またオフィスにあるプリンターには、正確な紙送りロールのためにロータリエンコーダが内蔵され、精密な印刷を可能としている。このように先端科学の測定装置から身近な電化製品にいたる幅広い分野において、ロータリエンコーダは「角度」の計測装置として利用されている。そのため、ユーザーはロータリエンコーダに対して更なる高分解能化、小型化、高機能化への要求を高めており、企業側もアブソリュートとインクリメントエンコーダ、磁気式と光学式、モジュラー型とホロウシャフト型とシャフト型、ベアリングの有無といったさまざまな形状と機能を持った製品や、0.1秒(1秒=1度/3600=約5 μ rad)を超えた高分解能な製品を開発し市場に送り出すことで、ユーザーの要求に応じてきた。

しかし、近年、ユーザーが要求し始めたのがロータリ

エンコーダから出力される角度情報の正確さの信頼性である。ロボットの腕を滑らかに制御するためには一周360度内に刻まれる目盛スケールの数を増やし分解能を高めることで達成することができるが、腕の位置を正確に制御するためにはロータリエンコーダから出力される角度情報と理想的な角度位置とのずれ(偏差)量の大きさを評価し、その角度偏差を補正することで正確な角度位置制御を達成することができる。そのためには図1、図2に示すロータリエンコーダが出力する角度情報の偏差の要因を検出しなければならない。しかし、これまでエンコーダメーカーは、目盛スケール数10本の偏差を検出する技術は持ち合わせていたが、数千から数10万本の全目盛スケールを検出する技術を持ち合わせていなかったため、さまざまな角度偏差要因を総合的に、そして定量的に評価することができなっていた。その結果、エンコーダの製品カタログに記された「精度」は図3に示された角度偏差を示した校正曲線ではなく、角度偏差を0とし、それを2つの上下の線で挟んだ大きな安全許容幅を「精度」と称して載せている場合が

- 先天的偏差要因(エンコーダ内部構造に起因する要因)
 - 目盛スケールの偏差
 - エンコーダ軸と目盛盤との偏心
- 後天的偏差要因(ユーザーの使用状況に起因する要因)
 - 機械構造要因
 - エンコーダ軸と装置軸の偏心
 - 取付け時のゆがみ
 - 軸ぶれ、ベアリング等
 - 測定環境要因
 - 温度変化、経年変化等

図1 角度情報の偏差要因

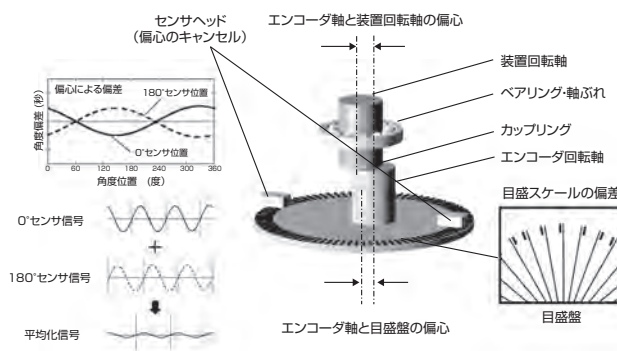


図2 ロータリエンコーダの角度偏差要因の概念

産業技術総合研究所 企画本部、計測標準研究部門 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 つくば中央第2 産総研つくばセンター
E-mail: t.watanabe@aist.go.jp

多いのである。このため、各メーカーが独自に定義した「精度」は、どの角度偏差要因をどこまで含んだ値を示しているかわからないブラックボックスと化した値となっており、ユーザーはこの「精度」を信用してエンコーダを使うことを強いられ、実際に使用状態で角度情報に含まれる角度偏差をどのように検証し、その信頼性をどのように確保して良いのかわからずに困っていた。

このように、ユーザーが要求する角度計測の信頼性の確保を行うためには、これまでエンコーダメーカーが行ってきた部品の高精度化や高剛性化等の技術開発による角度偏差の低減への取り組み以外に、ユーザー自身が利用できる角度偏差の検出とその信頼性の向上へと導く新しい技術要素へのブレークスルーが必要となってきた。そして本稿で説明する角度偏差の「見える化」こそが、そのブレークスルーに他ならない。

産業技術総合研究所では、これまで計量標準供給のためのトレーサビリティ体系の確立のために、より高精度な計測機器の研究開発を行っている。角度標準においても1997年より角度の国家標準器^[1]の開発に着手し、現在、独自に開発した角度校正装置は、ロータリエンコーダの数10万本の全ての目盛スケールの角度偏差を校正値として短時間に検出することができる。その校正値の不確かさは、0.01秒であり世界最高精度の国家標準器である。本稿では、その中で培ってきた自己校正法による角度偏差の校正技術と開発された自己校正機能付きロータリエンコーダ「SelfA」^{[2][3]}の実用化を目指した取り組みについて触れつつ、研究の方法論を紹介する。

2 角度偏差と現状

まず、ロータリエンコーダが出力する角度信号にはどのような角度偏差が含まれているのであろうか。ロータリエンコーダが角度偏差を生ずる要因には、図1、図2に示すように大きく分類して先天的偏差要因と後天的偏差要因とがある。

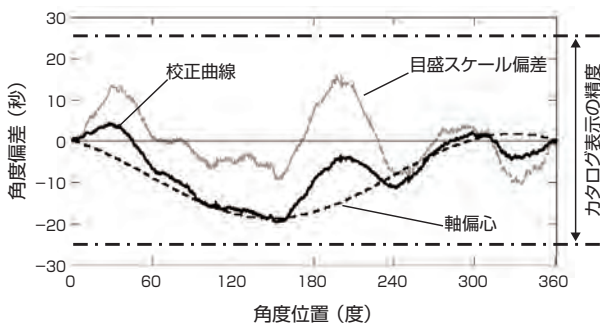


図3 校正曲線に含まれる偏差要因の例

先天的偏差要因は、主にロータリエンコーダ自身の構造的欠陥が要因となるものであり、メーカーの製造時に決まってしまう要因である。これには目盛スケールの偏差要因とエンコーダ軸と目盛盤との偏心要因がある。目盛スケール偏差要因は、図2（右下図枠内）に示すように等角度間隔の理想的な目盛スケール位置に対して実際目盛スケールがずれているために起こる角度偏差である。エンコーダ軸と目盛盤との偏心要因は、ロータリエンコーダの回転軸中心と目盛盤の中心とがずれている偏心が起因する角度偏差である。

後天的偏差要因は、ユーザーが使用装置にロータリエンコーダを取り付けた時、またはその後の使用時に起こる角度偏差の要因である。これにはエンコーダ軸と装置回転軸との取り付け偏心によるものや、取り付け時のエンコーダのゆがみや、使用時の温度変化による装置筐体のゆがみの伝播によるエンコーダのゆがみや、さらに、装置回転軸のベアリングの品質に依存した軸ぶれなども動的な偏心のように振舞い、角度偏差の要因となる。

先天的、後天的偏差要因に挙げられている軸と目盛盤、軸と軸の偏心誤差は、図3のように1周期のサイン関数で示される偏差として出力される。

これまで高精度化の方法

これまでロータリエンコーダの高精度化のためには、先天的偏差要因と後天的偏差要因をできるだけ小さくする技術として以下の方法が採られてきた。

- ① 目盛スケールの線の品質向上（等角度間隔、目盛り線の直線度等）
- ② 取り付け治具やカップリングの機能向上による偏心の低減
- ③ 温度変化にロバストな部材、剛性が高い部材を用いたゆがみの低減
- ④ 2つのセンサヘッドを用いた軸偏心のキャンセル技術

①～③はロータリエンコーダの部品の加工精度を上げることで、根本的に角度偏差要因を低減する方法である。しかし、④の2つのセンサヘッドを用いた軸偏心のキャンセル技術とは、たとえば図2に示すように目盛スケールの180度対抗した位置に2つのセンサヘッドを正確に配置し、それぞれのセンサヘッドが検出した信号を平均することにより、図2（左中図）のように偏心による偏差をリアルタイムにキャンセルするという方法論による偏差の低減技術である。センサヘッドは図2（左下図）に示すように目盛スケールの目盛間隔ごとにサインの電圧信号を出力する。偏心があると0度と180度位置にあるセンサヘッドが検出し出力するサイン電圧信号に位相差が出るため、2つの電圧の和を求めることにより偏心をキャンセルすることができる。し

かし、偏心の大きさが目盛りの間隔の1/4を超えたり、またはセンサヘッドの配置精度が目盛りの間隔の1/4を超えたりすると、出力される電圧強度が減少し信号が出力されない可能性がある。例えば目盛り間隔を20 μm とすると、軸偏心やセンサヘッドの配置精度を約5 μm 以内にする必要があることから、①～③と同様に部品の高精密化であるともいえる。したがって複数個のセンサヘッドを配置する案^[4]もあるが、このセンサヘッドの配置精度の問題から実質的に4個以上のセンサヘッドを配置するのは難しい。

3 研究シナリオ

ブラックボックス化したカタログ「精度」の情報しか得られないため、ユーザーは、装置に組み込んだエンコーダが取付けの軸偏心や使用環境の変化により、その角度偏差がカタログ「精度」の許容範囲内に収まっているかが不明なまま、いつも不安視しながら利用している。しかし、もし図3に示すロータリエンコーダの校正值(曲線)を求め、角度偏差の「見える化」ができれば、その校正值を用いて角度信号を補正することで、カタログの「精度」に比べてさらに数倍から数10倍の精度向上を達成し、高精度な計測と制御が可能になる。

産業技術総合研究所が開発した角度の国家標準器は、ロータリエンコーダの数10万本の目盛スケールの角度偏差を検出することが可能である。これにより図1に示す先天的偏差要因と、後天的偏差要因の測定環境要因などを、定量的に評価することが可能となった。しかし、後天的偏差要因の他のほとんどの要因は、エンコーダの個体差や取り付け状況や使用環境により一定ではなく変化してしまう。したがって、実際に使用する装置に組み込んだ状態で校正值を検出し、ユーザー自らが「見る」ことが重要となる。そこで、ロータリエンコーダ自身に角度偏差を自ら検出し校正值として出力できる自己校正機能を付加することで角度偏差の「見える化」を実現することにした。

4 自己校正機能付きロータリエンコーダ「SelfA」

表1に示すように、ロータリエンコーダの角度偏差を検出する自己校正法の原理^{[5]-[7]}は、これまでにいくつか考案されている。角度の国家標準器では等分割平均法^[8]を用

いて、国家標準器内部の参照用ロータリエンコーダと校正器物であるユーザーのロータリエンコーダとの2個のエンコーダ間で自己校正法を行うことで、両エンコーダの角度偏差を同時に検出する方法を採用してきた。そこで、ユーザーが使用するロータリエンコーダに、国家標準器と同様に別のエンコーダを取り付け2つのエンコーダ間で等分割平均法の自己校正を可能とする国家標準器型小型校正装置^[9]の開発を検討した。しかし、すでにユーザーが使用機器に組み込んでいるロータリエンコーダの周りに、小型の国家標準器を設置する空間の確保は難しく、サイズダウンには限界があるであろうという観点からこの開発は断念した。

次に、1個のロータリエンコーダ単体で自己校正法が適用できる原理について検討した。マルチ再生ヘッド法^{[10][11]}、3点法^[12]は複数個のセンサヘッドを目盛盤の周りに配置し、図3に示す角度偏差を連続的な360度の周期曲線と考えて、そのフーリエ成分を検出する方法である。複数個配置したセンサヘッドの1つを基準とし、マルチ再生ヘッド法の場合には180度、90度、45度、22.5度・・・と配置し、3点法の場合には、例えばマルチ再生ヘッド法の配置の中から2箇所を選び配置させる。基準センサヘッドに対して他のセンサヘッドの配置により検出できるフーリエ成分が求まり、逆フーリエ変換により校正曲線を求める方法である。そのため、センサヘッドの個体差や設置精度により検出されるフーリエ成分の精度に大きく影響する。したがって開発においても、また実用化する場合においても、多くの労力が必要と考えられる。そのためこの方法も開発には及ばなかった。

そこで、これまで国家標準器に採用してきた等分割平均法を拡張し、ユーザーの1個のロータリエンコーダだけ等分割平均法を実現する方法を考案することにした。図4(a)は等分割平均法の原理図である。下部に示している目盛盤の周りに複数個のセンサヘッドが等角度間隔に配置された装置内部の参照用ロータリエンコーダと上部の校正したいユーザーのロータリエンコーダとの間で自己校正を行う。図4(b)は等角度間隔に配置されたセンサヘッドの中に基準となるセンサヘッドを配置することで1個のエンコーダで等分割平均法を可能にしている。図4(c)は図4(b)の基

表1 ロータリエンコーダの校正原理

校正方法	クロスキャリブレーション法	等分割平均法	マルチ再生ヘッド法	2,3点法	デバイダ法
エンコーダ個数	2		1		
特徴	総当り比較法	フーリエ成分検出法			逐次検出法
長所	高精度	高精度・短時間	高精度・短時間	短時間	短時間
短所	長時間・作業量大	エンコーダ2個	ヘッド個体差の影響	ヘッド個性的影響 ヘッド間隔が厳密	不確かさの累積

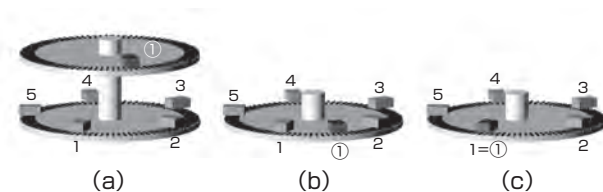


図4 等分割平均法の変化

準センサヘッドを等角度間隔に配置したセンサヘッドの1つに代用させることで、等分割平均法を可能にしている。

4.1 SelfAの原理

ここで1個のロータリエンコーダで自己校正が可能な等分割平均法について簡単に解説する。図4(c)のようにロータリエンコーダの目盛盤の周りに5個のセンサヘッドを配置した場合、それぞれのセンサヘッドが出力する角度信号には、角度偏差 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 が含まれているとする。ただし各センサヘッドは同一目盛盤を検出しているため、 A_2, A_3, A_4, A_5 はそれぞれ A_1 に対して72度間隔ずつ位相がずれているだけである。直接には各角度信号から角度偏差を分離することはできないため、基準とする一番のセンサヘッドの角度信号との差 δ を計算すると、差 δ は式(1)のように角度偏差だけで表現することができる。一周360度の δ の計測値例を図5に示す。

$$\begin{aligned} \delta_1 &= A_1 - A_1 \\ \delta_2 &= A_1 - A_2 \\ \delta_3 &= A_1 - A_3 \\ \delta_4 &= A_1 - A_4 \\ \delta_5 &= A_1 - A_5 \end{aligned} \quad (1)$$

次に、この5個の δ の平均値 μ を求めると次式のようになる。平均値 μ を図5の5個の δ から求めると図6のようになる。

$$\mu = \sum_{j=1}^5 \delta_j = A_1 - \frac{1}{5} (A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5) \quad (2)$$

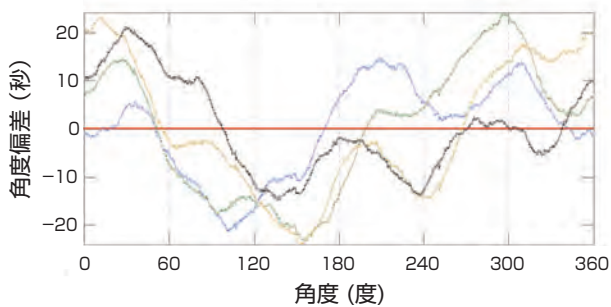


図5 SelfAからの出力データ

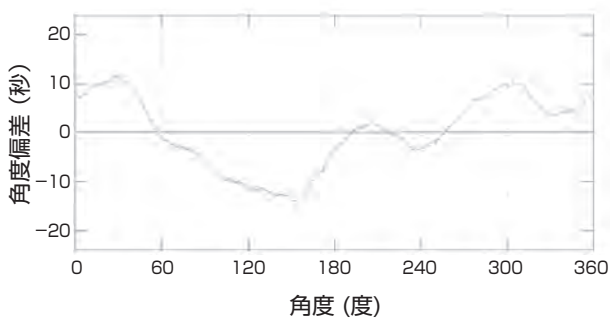


図6 SelfAの解析結果

右辺第1項は、このロータリエンコーダの角度偏差つまり校正値であるが、第2項があるため解析値の平均値 μ はそのままでは校正値とはいえない。ここで第1項と第2項の関係を調べるために、仮に A_1 の校正値が求まり、その値を72度位相ずつずらした A_2, A_3, A_4, A_5 を作成し、それらから第2項を計算すると、そのフーリエ成分は図7のような関係になる。右辺第2項は A_1 のフーリエ成分の5の倍数次成分と同じであることがわかる。つまり5個のセンサヘッドを配置した場合には、平均値 μ は第2項により5の倍数次成分を含んでいない A_1 の校正値となる。5の倍数次成分の校正値への影響が大きい場合には、異なる数たとえば7個のセンサヘッドを配置することで、より高精度に校正値を得ることができる。このように得られた校正値は、特定のフーリエ成分を検出していることになるため、本原理は表1に示されるようにフーリエ成分検出法に分類されている。

この原理の特徴は、先に紹介したマルチ再生ヘッド法や3点法が、1つの基準センサヘッドとその他センサヘッドといった関係ではなく、等角度間隔に並んだ各センサヘッドをそれぞれ基準として計算できることにより統計精度を上げることができるため、多少のセンサヘッドの配置にずれがあっても、角度偏差に影響が少ない点である。また、解析はフーリエ変換や逆フーリエ変換を用いずに四則演算のみで計算できる点である。

4.2 SelfAの応用例

図8に示すように、下部に10個のセンサヘッドを配置した自己校正機能付きロータリエンコーダを備えた回転テーブルを開発した。図9はテーブルの上部に何も載せないで自己校正を行った場合と、5kgの重量物を置いて再校正した場合の校正値である。明らかに校正値が変化していることがわかる。これはテーブルへの加重がテーブルの筐体をゆがませ、結果的にロータリエンコーダを変形させてしま

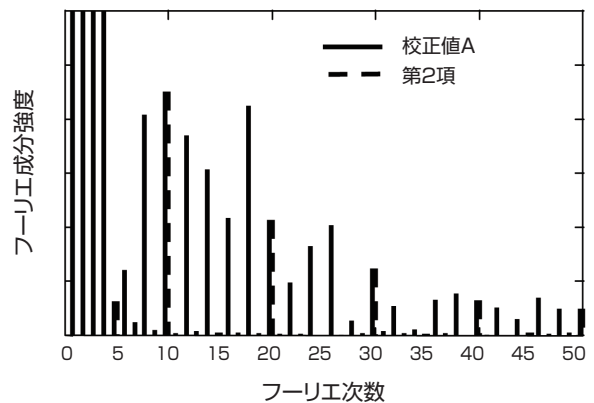


図7 解析結果とそのフーリエ成分の関係

っているためである。新しい校正値を得ることで高精度な角度偏差の補正が可能になる。

図10は回転テーブルを10回転させ、各回転の校正値を求めたデータを図示したものである。校正値が求められなければ、カタログの「精度」としては±10秒としか表現できないが、校正値を用いることで校正値自体の再現性である±0.3秒の高精度な角度位置を検出できることがわかる。図11は図10で示した10本の校正値の平均値からの再現性（ばらつき）を示した図である。実はこの±0.3秒のばらつきの原因は、回転テーブルのボールベアリングの内部ボールの回転の非再現性が原因であることがわかっている。

このように、この自己校正機能付きロータリエンコーダ（SelfA）は、装置に取り付けた後に、先天的偏差要因の目盛スケール偏差要因とエンコーダ軸と目盛盤の偏心要因ばかりでなく、これまで検出が不可能であったエンコーダ軸と装置軸の偏心要因、取付け時のゆがみ要因、測定環境要因を検出し校正値として出力できることがわかった。

5 今後のシナリオ

前節で述べた自己校正機能付きロータリエンコーダ（SelfA）は、これまでの部品の精密化と異なり、自己校正という方法論により高精度化とその角度偏差の「見える化」を可能にしたロータリエンコーダと呼ぶことができる。

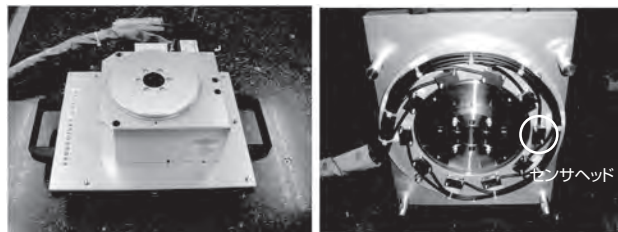


図8 自己校正機能付きロータリエンコーダ (SelfA) 内臓の回転テーブル

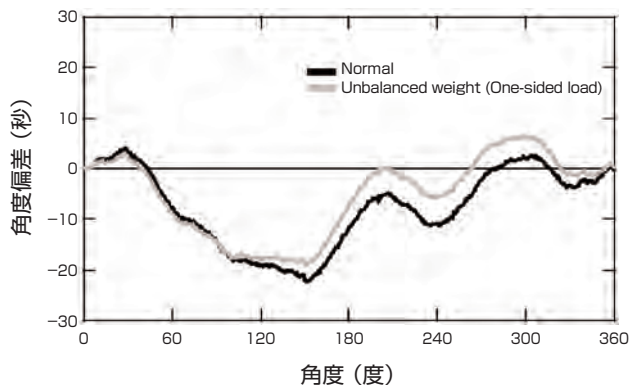


図9 加重による内部ロータリエンコーダの校正値の変化

現在、市販されているロータリエンコーダの中で、最も高精度とされる製品の精度は約±0.2秒である。しかし、SelfAは図11に示すようにボールベアリングの性能評価ができる能力を持ち、取付け偏差要因、測定環境要因、機械構造要因等を検出した上で±0.3秒の再現性を定量的に確保している。もし、ボールベアリングよりも軸ぶれの小さいエアベアリングを用いていたならば再現性が±0.1秒を超える角度偏差を検出することが可能である。また応用例で明らかなように、SelfAは単純にロータリエンコーダ自身の角度偏差を検出するだけでなく角度偏差の「見える化」の特性により、装置の耐荷重に対する装置筐体の剛性、軸ぶれ評価やベアリングの品質評価など、角度以外の新たなセンサとしての応用も考えられる。つまり、この方法論はさらに高精度なハードウェア技術へ適用して、より高い信頼性をユーザーに提供できるであろう。

例えば、SelfAの持つさまざまな角度偏差要因を検出できる機能を応用すると、野外の温度差が激しい現場で行う測量機器（トータルステーションやセオドライト^{用語1}）や電波望遠鏡の角度制御、偏加重がかかるX線装置やエリプソメータ^{用語2}等のゴニオテーブル、加工加圧やトルク変動等の外力がかかる工作機械や産業ロボットのアーム角度制

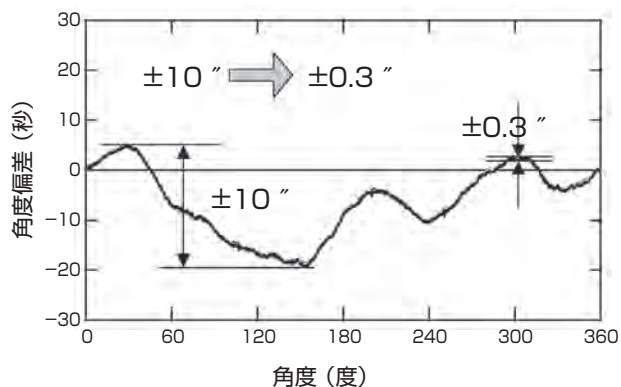


図10 回転テーブルの校正値（静的角度偏差）

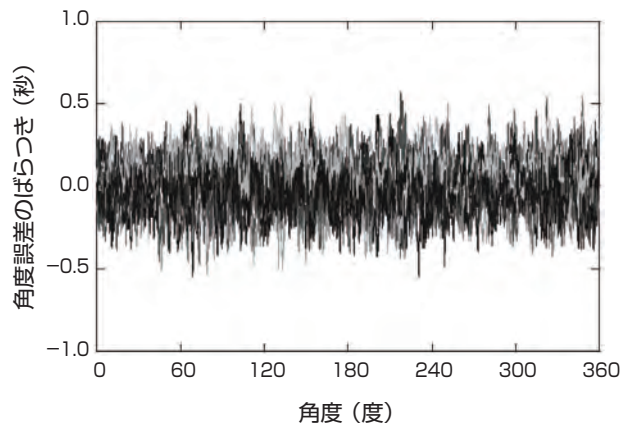


図11 回転テーブルの校正値の再現性（動的角度偏差）

御、そして使用しているベアリングの精度評価など、これまでのロータリエンコーダと交換することにより、さまざまな現場でさらに高精度な計測と制御が可能になる。

そのためには、ユーザーがすでに使用している装置を改造することなしに、内蔵しているロータリエンコーダをここで紹介した SelfA に交換するだけで良いように、さまざまなサイズの SelfA の開発が必要である。

6 実施のためのノウハウ

ここでは、自己校正機能付きロータリエンコーダ (SelfA) を活用するに当たって必要な技術的ノウハウを紹介する。

6.1 センサヘッドの数

SelfA の原理により求めた角度偏差は図 7 に示したように、センサヘッドの数に依存したフーリエ成分が求まらない。例えば 5 個のセンサヘッドを配置した場合は、5、10、15・・・と 5 の倍数次のフーリエ成分が求まらない。6 個の場合は、6、12、18・・・の成分が求まらない。また角度偏差のフーリエ成分は一般的に高次になるほど小さくなる傾向がある。したがって配置するセンサヘッドの数を増やせば、それだけ影響の大きい低次成分項を検出し、高次の項までフーリエ成分の抜けない校正値を求めることができる。図 12 は、センサヘッド数と到達精度の関係を示している。例えば、到達精度が 0.1 秒の場合は 10～15 個のセンサヘッドが必要であるが、1 秒の場合は 5 個で十分である。したがって、ユーザーが目指す精度により、むやみに多くのセンサヘッドを用いる必要はなく、最低限必要なセンサヘッド数を選択すれば良いことがわかる。

6.2 センサヘッドの配置精度

従来のロータリエンコーダが偏心による角度偏差をキャンセルするために、目盛り間隔の 1/4 以下という厳しい制限の中で 2 つのセンサヘッドを配置しなくてはならなかった。さらに述べれば軸偏心や目盛りスケールの偏差のばらつきも同様に目盛り間隔の 1/4 以下という制限があるのであ

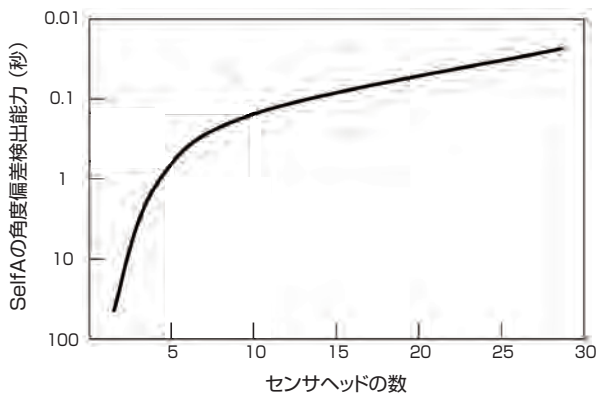


図 12 SelfA のセンサヘッドの数と到達精度の関係

る。これに対して SelfA は、2 個ではなくさらに多い複数個のセンサヘッドを等角度間隔に目盛盤に配置する必要があるため、本当に SelfA は実用化が可能なのであろうかといった疑問が出てくる。その答えは「可能」である。SelfA にはリアルタイム性は必要なく、各センサヘッドが検出した目盛スケール位置の角度信号をまずはコンピュータに収納し、測定終了後に式 (1)、(2) の差を計算するため、たとえ偏心による角度偏差が目盛り間隔を超えた大きさであっても計算することができる。またセンサヘッドはそもそも目盛り線 1 本 1 本に対して角度信号を出力しているのではなく、図 13 のように数 10 から数 100 本の目盛り線の平均値として角度信号を出力している。そのため近接した角度信号間の角度偏差の変化量は小さいため、たとえ数目盛りずれた位置に配置しても、校正値に特大大きな影響を与えないのである。

7 まとめ

これまでメーカーが行ってきたロータリエンコーダの開発は、部品の精密化により角度偏差を小さくし、さらにキャンセル技術で見えなくするといった方法論であった。しかし、本研究における開発は、これとは異なり、全ての角度偏差を積極的に出力することで見える状態にするといった方法論である。より角度偏差が小さい製品開発を目標とするメーカーと、角度の国家標準器開発により角度偏差を評価することを目標とした本研究との立場の違いが、新しい自己校正機能付きロータリエンコーダ (SelfA) の開発を可能にしたと考えられる。

角度の国家標準器は、最高精度の角度標準ではなく等分割平均法という自己校正法の 1 つによる方法論によりロータリエンコーダを校正している。これはユーザーやメーカーの誰もが国家標準器と同等な「角度標準器」を持つことを意味している。さらに、自己校正機能付きロータリエンコーダ (SelfA) は校正装置が無くとも角度偏差を自ら検出できる機能を持っている。これはユーザーやメーカーがもはや「角度標準器」を持つ必要がない状態が到来してい

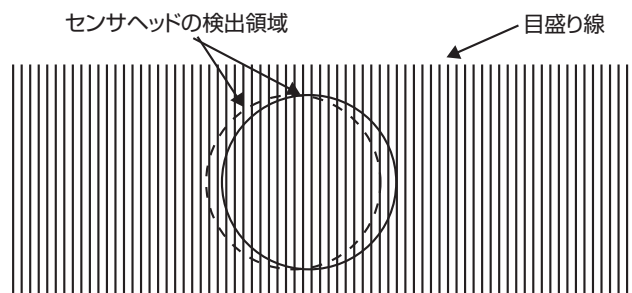


図 13 ロータリエンコーダの目盛り検出サイズ

ることを意味している。しかし、不要になるのは上位標準となる「角度標準器」であり、『角度標準』は自己校正機能付きロータリエンコーダ (SelfA) とともにさらに身近なものになると考えられる。

「計れないものは作れない」というように、ものづくりの分野において高精度な計測技術の確立は必要不可欠である。さらにその高精度化された状況の「見える化」は、これまで手探りだった精度評価の信頼性をさらに高め、これまで以上に高度なものづくりに貢献できると考えられる。

用語説明

用語1: トータルステーション・セオドライト: セオドライトは角度を計測する測量機器の1つで、三角測量において水平方向と垂直方向の回転角を測定する光学機器。トータルステーションはセオドライトにさらに対象物までの距離を計測する機構が付いている。

用語2: エリプソメータ: エリプソメータは光を試料に照射し、試料から反射される光の楕円偏光状態を測定することで、薄膜の厚さ、屈折率や吸収係数などの光学定数などを解析する装置。反射角度を計測するためにロータリエンコーダが使われている。

キーワード

ロータリエンコーダ、角度標準、偏差評価、自己校正

参考文献

- [1] 渡部司, 益田正, 梶谷誠, 藤本弘之, 中山貫: ロータリエンコーダの高精度校正装置の開発 (第一報) - 校正システムと基礎実験 -, *精密工学会誌*, 67 (7), 1091-1095(2001).
- [2] T. Watanabe, H. Fujimoto and T. Masuda: Self-calibratable rotary encoder, *J. Physics: Conference Series*, 13, 240-245 (2005).
- [3] 特許3826207: 自己校正機能付き角度検出器.
- [4] 特開平6-313719: ロータリエンコーダ.
- [5] X.-D. Lu, D.L. Trumper: Self-calibration of on-axis rotary encoders, *Annals of the CIRP*, 56 (1), 499-504 (2007).
- [6] K. Štěpánek: Messung der Genauigkeit von Getrieben und Winkeln mit magnetischen Maßstäben, *acta IMEKO, Proc. Int. Meas. Conf., Ist*, 258 (1958).
- [7] E.W. Palmer: High-accuracy angle measurement, *NPL, Teddington, U.K.* (1984).
- [8] T. Masuda and M. Kajitani: High accuracy calibration system for angular encoders, *J. Robotics and Mechatronics*, 5 (5), 448-452 (1993).
- [9] 特開2000-258186: 自己校正型角度検出装置及び検出精度校正方法.
- [10] 特開2003-262518: 自己校正型角度検出器.
- [11] 益田正, 梶谷誠: 角度検出器の精密自動校正システムの開発, *精密工学会誌*, 52 (10), 1732-1738 (1986).
- [12] 特開平6-317431: エンコーダの校正方法.

(受付日 2008.8.21, 改訂受理日 2008.10.28)

執筆者略歴

渡部 司(わたなべつかさ)

1993年東北大学大学院理学研究科物理学科博士課程修了。博士(理学)。米国標準技術研究所(NIST)の客員研究員を経て、1998年に工業技術院計量研究所(現産業技術総合研究所)入所。角度の国家標準器の開発などに従事。現在、自己校正機能付きロータリエンコーダを用いた新しい角度標準器の普及とともに角度の世界標準を目指している。市村学術賞、つくば奨励賞などを受賞。

査読者との議論

議論1 研究の狙いとタイトルについて

質問・コメント(赤松 幹之)

角度標準のための角度校正技術を、製品としてのロータリエンコーダの信頼性を確保するための技術として展開した本研究は、基礎研究を社会に活かした良い研究例だと思います。製品として組付けられた状態のエンコーダの精度が随時校正できることで、その時点での精度を確保することができる、というのが信頼性向上というこの開発の狙いですが、一般読者には「信頼性向上」が研究成果の社会導入によるインパクトであることがわかりにくいように思います。少し説明を加えて、社会インパクトの強さを強調されたいかがでしょうか? また、同様に、これによる社会的インパクトを少し強調したタイトル/サブタイトルをご検討下さい。

回答(渡部 司)

長さの標準には約100年以上の歴史があり、世界が同歩調で同じ原理を用いて国家標準器を開発してきた状況に対して、角度標準は約20年の歴史しかありません。産業技術総合研究所も10年前からようやく国家標準器の開発が始まるなど、諸外国の国家標準器の原理も今もってばらばらでまとまっていない状態です。さらに加えますと、諸外国は国家標準器の精度を向上させるために部品の精度を上げ、その結果、高価で複雑な機構を持った装置と化してきました。これが今もって共通の原理を共有できない原因となっています。しかし、産業技術総合研究所の国家標準器は、本文でも述べましたが、等分割平均法という方法論です。この原理に基づけば誰でも国家標準器と同じ装置を持てることになります。

本研究は、この原理をもっとコンパクトにして、誰でも簡単に安く使える装置にできないかというところが始まりです。標準器を作るかわら、標準器を必要としない装置も作っているという矛盾と葛藤があったのも事実です。

角度標準の歴史がまだ浅く、角度計測器にはどのような角度偏差を引き起こす要因があるのか、さらに、どのようにすればその要因を推定できるのか、まだまだブラックボックスとなっている部分が多いのです。「信頼性向上」とは、このブラックボックスの蓋を開ける手がかりが得られることにより、これまでカタログに記載されていた「精度」とは異なる定量的な評価を可能とすることで、メーカーもユーザーも安心して角度偏差を引き起こす要因を同じ土俵で議論できる場を設けることができることを示しています。それこそが角度にとっての標準ではないかと考えています。

そこで思い切って次のタイトルとサブタイトルに変更してみました。

自己校正機能付きロータリエンコーダの開発

— 誤差要因の「見える化」により角度精度と信頼性向上の実現 —

↓

ロータリエンコーダに角度標準は必要か

— 角度偏差の「見える化」を可能にしたロータリエンコーダの開発 —

質問・コメント(田中 充)

「はじめに」の部分、第2パラグラフで、近年のユーザーがなぜ精度の信頼性が無いので困っているかがわかりません。エンコーダの

ユーザーが求めるべき機能が、従来の分解能ではなく本来何であるべきだったかを示すことが重要です。また、ユーザーにとって重要な「取り付け後」に着目した表現は大変良いと思います。ただ、取り付け後の角度値の信頼性を顧客に対して保証するのはユーザーの仕事ですから、「ユーザーは取り付け後のエンコーダから得られる角度情報の信頼性をどのように保証して良いかできないで困っている。」とした方が良くないでしょうか？

回答（渡部 司）

「1.はじめに」の中盤でロボットの腕の制御を例に、分解能、角度偏差とそのブラックボックス化した理由等の説明を加えました。また、「2.角度偏差と現状」に述べたように、ロータリエンコーダの製造時に決まる先天的角度偏差と、ユーザーがロータリエンコーダを使用するときに決まる後天的角度偏差とに分類しました。これにより現在市販されているロータリエンコーダが持つ角度偏差とカタログの「精度」の隔たりを説明することができました。これにより、ユーザーが困っている内容を特定できるようになり、ご指摘の文面に導入が可能になりました。

したがって、次の文章に変更しました。「ユーザーはこの「精度」を信用してエンコーダを使うことを強いられ、実際に使用状態での角度情報に含まれる角度偏差をどのように検証し、その信頼性をどのように確保して良いのかわからずに困っていた。」

議論2 ブレークスルーとしての「見える化」について

質問・コメント（赤松 幹之）

第1章の第3段落で、信頼性向上のための新しい技術導入の必要性がうたわれ、そのブレークスルーとして「見える化」が必要であると書かれています。信頼性向上に「見える化」が必須のことであるか、それとも他にも選択肢がある中で「見える化」を導入したのか、など技術の選択のシナリオを記述できませんでしょうか？

回答（渡部 司）

ロータリエンコーダから出力される角度信号には角度偏差を引き起こすさまざまな要因があります。その分類を静的、動的角度誤差要因と分けてきましたが、これは本稿の内容には適さない分類方法であったと考えました。つまりメーカー（作る現場）とユーザー（使う現場）の異なる状況で発生する角度偏差が、最終的には合成され分離不可能な角度偏差として出力されます。したがって分類方法を先天的・後天的角度偏差要因と変えました。しかし、もっとも問題となるのはメーカーもユーザーも、これまで角度偏差を定量的に評価するすべを持ち合わせていなかったことが角度偏差のブラックボックス化を招き、角度の信頼性を低下させていた原因といえます。

メーカーとしてはこのブラックボックスの部分をできるだけ小さくすべく、「部品の精密化」と「(偏心)偏差のキャンセル」の2枚のカードを使ってきました。この2つの技術は今後も重要な技術であることは間違いありません。しかし、本論文では3枚目のカードとして「自己校正機能」＝「見える化」を提案しました。

「2.角度偏差と状況」の内容を膨らませることで、「見える化」の導入意図を示してみました。

先天的・後天的角度偏差要因の名前については、もっと良い分類名が欲しいところです。

質問・コメント（田中 充）

このパラグラフにある、静的角度誤差要因と動的角度誤差要因とを分けることは方法論記述の上では、要素論に含まれます。しかし、この区別を明確に述べれば述べるほど、「これまで」と「見える化」との関係を理解しようと苦慮する事態に陥ります。何か工夫はないでしょうか？静的＝メーカー・他力校正＝これまで、動的＝ユーザー・自力校正＝見える化の図式のどこがどうなっているのかをはっきりするのが良いと思います。

回答（渡部 司）

「静的角度誤差要因・動的角度誤差要因」の分類から「先天的角度偏差要因・後天的角度偏差要因」に変更し、さらに先天的角度偏差要因の低減に対するメーカーの取り組みである①～④を説明しました。

質問・コメント（田中 充）

研究シナリオについてこの記述が方法論の本質と言えますが、ユーザー自らが「見る」ことが大切であればそのように書くべきではないでしょうか？「見える化」といっても誰が見るのかがはっきりしていませんか。さらに、「見る」ためには、これまでは、時間も人もコストもかかっていたのが簡単になった（つまり、自己校正）ことが方法論の展開ではないでしょうか？

回答（渡部 司）

メーカーには先天的角度偏差を出荷前に評価する装置がない、ましてやユーザーには全ての角度偏差がブラックボックス化しているため、どのような方法でカタログの「精度」と本来の角度偏差の対応付けを行ってよいかわからない、このことが問題となっています。メーカーもですがユーザー自ら角度偏差を検出し、角度偏差の「見える化」を行える技術の導入が必要です。そのためには、装置内部に取り付けられたロータリエンコーダを外部につけた装置で評価するのではなく、ロータリエンコーダ自身が角度偏差を出力することで、他の装置を必要とせずに簡単に、そして短時間に角度偏差の「見える化」を実行することができました。

質問・コメント（田中 充）

研究シナリオ部分でさらに、国家標準とメーカーの「作る」エンコーダ、ユーザーの「使う」エンコーダ、校正してもらった「エンコーダ」の関係をあらかじめ説明しておかないと読者は混乱します。その中で、なぜサイズダウンが必要なかわかりません。

回答（渡部 司）

「ロータリエンコーダ」の前に「ユーザー」、「国家標準器、参照用」などの言葉を付け加え、どのロータリエンコーダについて述べているかを明確にしました。角度偏差を「見える化」できる技術が複雑で、その装置が巨大になるとメーカーもユーザーも導入に対して及び腰になります。したがって、実用化と普及を目指すならば、現在使用しているロータリエンコーダの体積容量とほぼ同じサイズでありながら角度偏差の「見える化」が可能な技術が必要となります。本文の内容を次のとおりもう少し具体的にしました。「しかし、すでにユーザーが使用機器に組み込んでいるロータリエンコーダの周りに、小型の国家標準器を設置する空間の確保は難しく、サイズダウンには限界があるであろうという観点からこの開発は断念した。」

議論3 「見える化」技術について

質問・コメント（赤松 幹之）

この技術開発は「見える化」がポイントとなっている、という論旨になっていますが、一般に使われている「見える化」すなわちデータのビジュアライズによって状態を把握する、という意味と若干異なるように思います。本論文の記載内容から、平均値を求めたものを校正データとして使えば精度が求まるというのが開発技術であると理解したのですが、もしそうだとするとビジュアライズする必要がないように思われます。もし「見える化」をビジュアライズを元にした分析、とは異なる意味で使われているのでしたら、それを説明する記述を記載してください。

回答（渡部 司）

これまでも、センサヘッドを2個、4個と配置したロータリエンコーダが市販されています。しかし、これらは軸偏心など一部の角度偏差のキャンセルに用いられてきました。これは式(1)の右辺第1項

が無く、第2項のみの平均操作になります。実はこの式のちょっとした違いが、「キャンセル」から「見える化」への実現を担っています。したがって平均は統計精度を上げるための計算ではなく、何も基準が無いロータリエンコーダ自身から校正值を導き出すために用いられています。しかしながらこの効果は絶大であり、図3の2つの線で挟まれた「カタログ精度」に対して、まさに校正曲線として角度偏差のビジュアライズに成功したことになります。

質問・コメント（田中 充）

見える化技術についての記述で、「センサヘッドの個体差や設置精度」は致命的な死の谷で、「温度変化や取り付けのゆがみ」などは乗り越えられた死の谷だという判断を説明する必要はないでしょうか？さもないと、乗り越えられたという結果論になってしまいますが・・・

回答（渡部 司）

「国家標準器（2個のロータリエンコーダで自己校正）」「マルチ再生ヘッド法、3点法」「偏心のキャンセル法」の方法は、「センサヘッドの個体差や設置精度」「温度変化や取り付けのゆがみ」など角度偏差検出に対して致命的な死の谷を持っていました。「国家標準器の小型化」は致命的な死の谷ではありませんでしたが、サイズが死の谷でした。したがって、等分割平均法を1つのロータリエンコーダでできるかどうかが鍵でした。

議論4 自己校正機能の内容について

質問・コメント（赤松 幹之）

第4章第3段落の記述から、SelfAの特徴は、等間隔に複数のセンサヘッドをロータリエンコーダ内に配置し、そのうちの1つを基準とするセンサヘッドとするものであると理解しました。しかし、見かけ上からは、国家標準器で使われている等分割平均法のための標準器（図4aの下側の部分）と同じものように見えます。すなわち図4cの方法は、第2段落に書かれている「複数のセンサヘッドを目盛り盤の周りに配置することと同じように見えます。第2段落のその次の文章で、複数のセンサヘッドを付けることの困難性が説明されていますが、このSelfAでは、複数のセンサヘッドを付ける困難性は問題にならなかったのでしょうか？それは例えば(2)式の方法をとることで回避できたのでしょうか？このことも含めて、SelfAに導入した方法を見出したプロセス（思考のプロセスかもしれません）を記載していただけますでしょうか。また、それと表1に示す校正原理の表とを関連させて導入された方法の比較などを記載していただくと、表1の位置付けが明確になります。

回答（渡部 司）

図4で示す国家標準器（図4aの下側の部分）は、実はセンサヘッドが5個並んでいるのではなく、図では省略されておりますが、さらに下部にもう1つのロータリエンコーダがあり、それをういて1つのセンサヘッドを5箇所（1, 2, 3, 4, 5の順番に制御しながら式(1)の測定を別々に行っています。また最下部のロータリエンコーダは目

盛りの間隔の1/4の位置制御が可能なのが選定されており、理想的な測定ができるようになっております。その結果不確かさ0.01秒の世界最高精度を達成しています。

しかし、この理想的な装置を開発したため「等分割平均法は2個のロータリエンコーダで行うものである」、「理想的なセンサヘッド配置」という概念が固定し、図4のa→d→cの発想の展開ができずにいました。しかし、目標とする不確かさを1秒と設定しなおすことで、さまざまな発想が可能になったのではないかと思います。目標を不確かさ1秒程度にしますと、多少センサヘッドがずれていても、校正曲線に大きくは影響しないとか、国家標準器とは異なった解析アルゴリズムが考えられるようになりました。キャンセル技術では「目盛りの間隔の1/4」は必須です。

マルチ再生ヘッド法、3点法は、基準センサヘッドに対して他のセンサヘッドの位置により検出できるフーリエ成分が決まります。それだけに基準センサヘッドと他の個々のセンサヘッドの位置関係は重要です。しかし等分割平均法は等角度に等方的に配置されているため、ある程度の平均化効果が働きます。さらに定量的に表現することは極めて難しいものとなっています。

質問・コメント（田中 充）

校正技術の内容について、図7が添えられているものと本文での説明が「センサーヘッドの数に依存したフーリエ成分が求まらない」では不十分なので、肝心の技術内容を読者は想像できません。

回答（渡部 司）

図7を参照し、具体的な説明を加えました。「例えば5個のセンサヘッドを配置した場合は、5, 10, 15・・・と5の倍数次のフーリエ成分が求まらない。6個の場合は、6, 12, 18・・・の成分が求まらない。また角度偏差のフーリエ成分は一般的に高次になるほど小さくなる傾向がある。したがって配置するセンサヘッドの数を増やせば、それだけ影響の大きい低次成分項を検出し、高次の項までフーリエ成分の抜けのない校正值を求めることができる。」

議論5 用語説明・表現の改善について

質問・コメント（赤松 幹之・田中 充）

トータルステーション、セオドライト、エリプソメータ、校正など専門外の人にはなじみのない用語が出てきますので、用語説明を加えていただけませんか。特に、校正という言葉は角度誤差の見える化という本題と密接な関係があるのできちんと説明してはどうでしょうか？その他、誤差や精度という言葉の使い方が、標準専門家として偏っているので訂正してはどうでしょうか？

回答（渡部 司）

トータルステーション、セオドライト、エリプソメータの用語説明を加えました。また、角度の偏差を校正值として求めることが校正の意味であることが分かるように改訂しました。さらに、誤差や精度については、それぞれ偏差、カタログの「精度」として是正しました。

訂正（2巻2号にて）

1巻4号の研究論文「ロータリエンコーダに角度標準は必要か」の中の式に誤りがありましたので訂正いたします。

ロータリエンコーダに角度標準は必要か 一角度偏差の「見える化」を可能にしたロータリエンコーダの開発—（渡部 司 著）
299頁 左段 23行目

誤

$$\mu = \sum_{j=1}^5 \delta_j = A_1 - \frac{1}{5} (A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5) \quad (2)$$

正

$$\mu = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 \delta_j = A_1 - \frac{1}{5} (A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5) \quad (2)$$