

磁力差型磁気式アブソリュートエンコーダの高精度化に関する研究

Research on Improving the Accuracy of Absolute Magnetic Encoder Using Magnetic Difference Type Multi-pole Magnet

電気電子情報通信工学専攻 佐久間 裕介

Department of Electrical, Electronic and Communication Engineering, Yusuke SAKUMA

1. 序論

1.1. 研究背景

近年の AI, IoT デバイスの継続的な発展に伴い、小型ロボットに適用できる小型のロボットセンサのニーズが拡大している。エンコーダは、ロボット工学において位置や速度のフィードバック情報を提供する重要なセンサであり、現在でも多くの種類のエンコーダが市販されている。その中でも現在最も広く利用されているのは、光学式のエンコーダである。光学式エンコーダは、発光素子、光検出器、コードホイールと呼ばれるスリットが開いた円盤によって構成されている。光学式は、他のエンコーダと比較しても精度が高いという利点を持つ。その一方で、その複雑な構成から大型化しやすく、高コストであり、また埃や塵などのある環境下では弱点が顕在化する。対して、磁気式のエンコーダは磁石とセンサという単純な構成からなる。光学式と比較すると精度は劣るものの、コストが低く、また磁場変化を利用する検出技術により、汚れや湿気、埃や塵に対して強い耐性を持つ。また、その単純な構造から小型かつ軽量の角度算出器を設計するのに適している。

磁気式エンコーダを高精度にするためには、マグネットの極数を増やすことが有効である [1]。しかし、単に多極化を行っただけでは、磁石の 1 回転に伴い、同様の信号が繰り返し出力されてしまうため、絶対角度算出が不可能になる。そこで現在では、偏心回転や、バーニア型という特殊な構造を用いることで、高精度化と絶対角度算出を同時に実現したが、それぞれ特有の問題を抱えている。

1.2. 研究目的

本研究では、磁力差型磁気式アブソリュートエンコーダにおける高精度化手法を提案する。先行研究では、磁石を磁極対ごとに磁束密度の異なる磁力差型構造にすることで、信号に特徴を付け、絶対角度算出と高精度化を同時に実現した [2]。一方で、異なる磁束密度を要する磁石の着磁が難しいことから、物理的な制約が存在し、形状を保持したままでの多極化に限界がある。そこで本研究では、センサ部に AMR センサを用いた新たな構造の磁気式エンコーダを提案する。これにより、磁石の形状を維持したまま、従来よりさらに高精度な角度算出が実現できることをシミュレーションと実験にて検証を行った。

2. 磁力差型磁気式アブソリュートエンコーダ

磁力差型磁気式アブソリュートエンコーダは、モータの回転に同期し、回転する 4 極磁石と、その周囲に配置される極数分のホールセンサで構成される (Fig.1)。この 4 極磁石は通常の磁石とは異なり、磁極対ごとに磁束密度の大きさが異なるという特徴を持っている。

Fig.2 に絶対角度算出過程を示す。磁石の周りに置かれている 4 つのホールセンサでは、磁石の回転に伴った磁束変化が測定される。これらの信号は加算することで、直交信号 V_{\sin} , V_{\cos} になる。この直交信号から Quadrature PLL コンバータによって電気角 θ_e に変換される。しかし、ここで得られる信号は磁石の 1 回転の中で同じ信号を繰り返し出力してしまう。そこで、特徴づけられた 4 つの信号とシャフトの回転角 θ_m を予めオフラインで Look-Up Table に保存し、それをリアルタイムで得られる信号と比較することによって回転角度の区間判別を行う。これにより絶対角度 θ_m が算出可能となる。

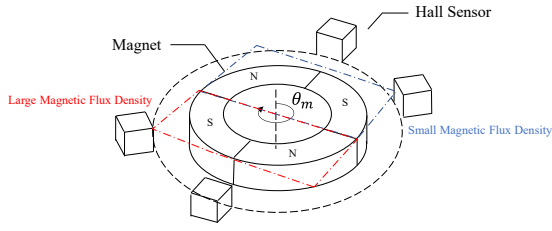


Fig. 1: Proposed Magnetic Encoder

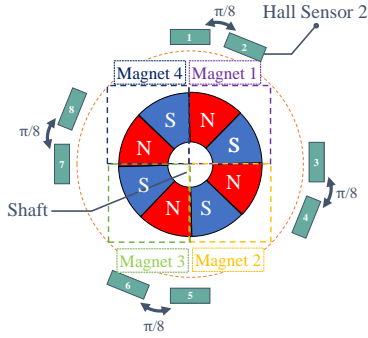


Fig. 3: Simplified Model(8 pole)

3. 多極化による分解能の向上

磁力差型構造において、多極化が有効であることを確認するため、8極マグネットを利用した際の磁力差型アブソリュートエンコーダの検証を MATLAB/Simulink によって確認した。Fig.3 に 8 極磁石を利用した際の磁力差型磁気式アブソリュートエンコーダのモデル図を示す。従来の角度算出システムを用いて絶対角度を算出する。ここで先行研究である、4 極磁石のシミュレーション結果との比較を Fig.4 に示す。この結果より、多極化によって誤差が低減出来ていることがわかり、磁力差型においても多極化が有効であることがわかる。

4. AMR センサ

AMR センサは、シリコン基板上にパーマロイ (NiFe 合金) 薄膜を蒸着することで形成される。Fig.5, Fig.6 に示すように、外部磁界がこのパターンニングされた膜に印加されると、磁区の向きが変化し、それに伴ってパーマロイの抵抗値が変化する [3]。このようにセンサに強い外部磁界が印加されるにつれ、抵抗値が減少していく。この抵抗変化率は、ゼロ磁界に対して対称であるという特徴を持つ。また一定の磁界強度以上になると、抵抗値が変化しなくなり、この領域を飽和感度領域と呼ぶ。

また、Fig.7 に示すように、AMR センサは以上に示したパーマロイ抵抗器を 4 つずつを組み合わせたホイートストンブリッジ構造によって構成されている。相対的に 45 度ずつ回転して配置されている 2 つのブリッジからはそれぞれ以下のような出力が得られる。

$$V_{AMR_sin} \propto \sin 2\theta \quad (1)$$

$$V_{AMR_cos} \propto \cos 2\theta \quad (2)$$

これにより、AMR センサは外部磁界の角度変化に対して、倍の角度周波数信号となる 2 つの出力を持つ。この倍の角周波数信号を持つという特徴を活かすことで、AMR センサによる高精度化を実現することが可能となる。

5. AMR センサを用いた磁力差型磁気式エンコーダの提案

Fig.8 に、提案する磁気式エンコーダを示す。まず取得される信号についての分析と検証を行った結果、本手法では、3 つの AMR センサがあれば角度算出が可能であることが確認できた。それを踏まえ、磁束密度の異なる磁

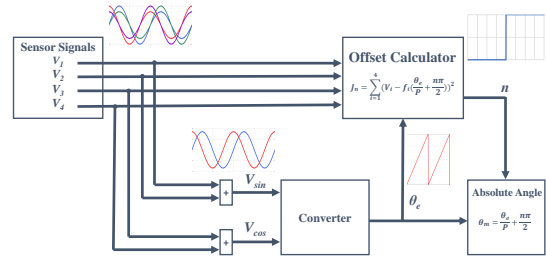


Fig. 2: Absolute Angle Calculation

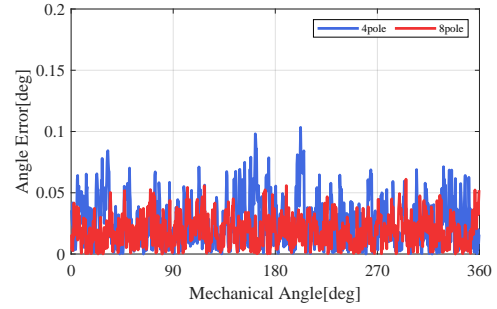


Fig. 4: Absolute Error(4pole & 8pole)

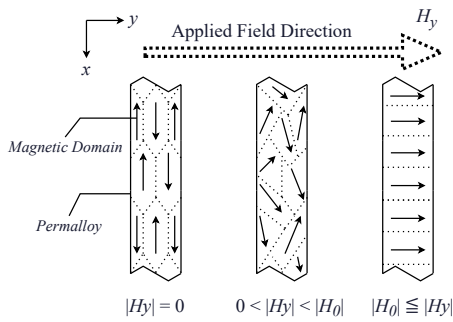


Fig. 5: Magnetic Domain in Permalloy

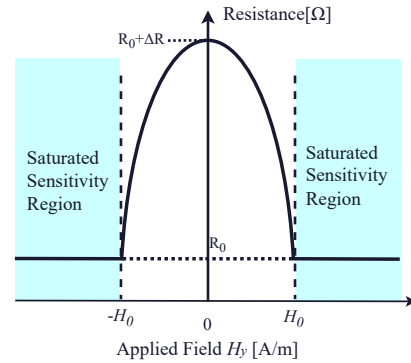


Fig. 6: Graph of Resistance Value Change Rate

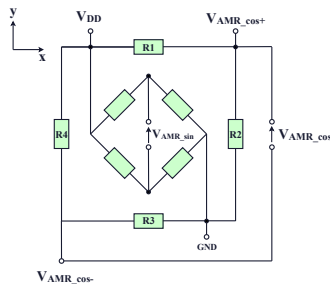


Fig. 7: Internal Circuit of AMR Sensor

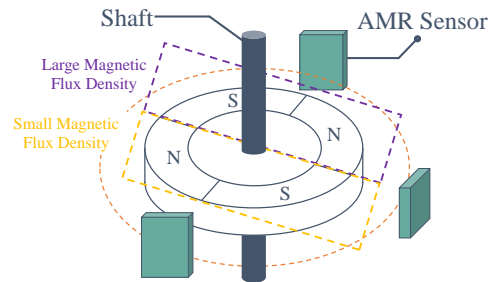


Fig. 8: Proposed Encoder

石と AMR センサによって得られる信号から、絶対角度算出が可能であるかの確認、および角度算出精度を先行研究と比較するために、MATLAB/Simulink を用いてシミュレーションを行った。その結果、絶対角度算出が可能であることが示された。また、先行研究であるホールセンサを用いた手法では、最大角度誤差が約 0.1 度であったのに対し、本提案手法では、最大角度誤差が約 0.06 度であり、従来手法に対する有効性が示された。

6. 実験

提案する磁力差型磁気式アブソリュートエンコーダの評価を行うため、上述のシステム構成に従って磁気式アブソリュートエンコーダを製作した。実験環境を Fig.9 に示す。はじめに磁石とセンサの位置関係についての検証を行った。磁石を近づけた場合は、磁束密度の差によって生じるはずの特徴が失われており、振幅の大小が捉えられなかった。これは先の飽和感度領域が原因である。そのため、ある程度磁石を離して角度算出を行う必要があるが、この場合得られる直交信号に歪みが発生している。(Fig.10) これを補正するために本提案手法では、テーブルによる補正を行うことにした。これにより、4 つの AMR センサ信号から歪みの無い $\sin 4\theta$, $\cos 4\theta$ の信号が得られた。最後に、計算されたオフセット n と絶対角度 θ_m を Fig.11 に示す。この図から 3 つの AMR センサを用いて異なる磁束密度を持つ 4 極マグネットに対するオフセットおよび、絶対角度を算出することが可能であることが示されている。

提案手法を用いて得られた絶対角度誤差の絶対値を、先行研究におけるの取得信号で PLL を用いて算出された絶対角度誤差の絶対位置と比較した。Fig.12 に示されるように、先行研究において $180^\circ \sim 360^\circ$ によって発生していた大きな誤差を取り除くことに成功した。これは直交信号の振幅が揃わない問題を加算ではなく、ルックアップテーブルを用いて直交信号を計算することによって抑制したためである。以上より、角度誤差が減少したことが示されており、本提案手法の有効性が確認できる。

7. 結論

本稿では、AMR センサを用いた磁力差型磁気式アブソリュートエンコーダを提案した。先行研究で提案された磁力差型磁気式エンコーダは、特殊な磁石を用いることで、機械的な偏心を用いずに高分解能化と絶対角度算出を

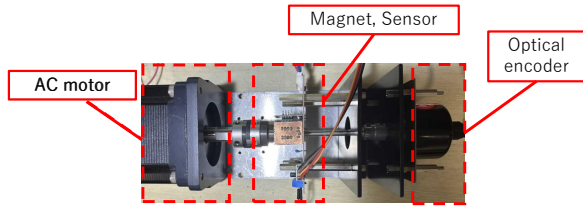


Fig. 9: Experiment Environment

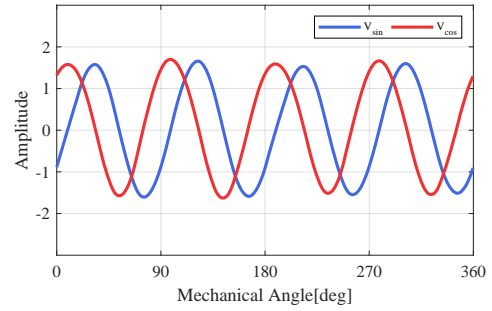


Fig. 10: Quadrature Signals(unsaturated)

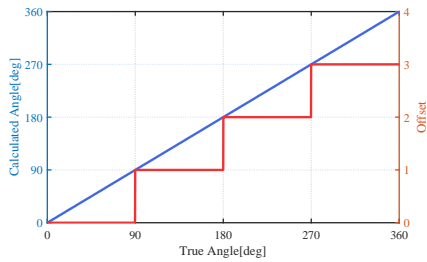


Fig. 11: Estimated Offset(Experiment)

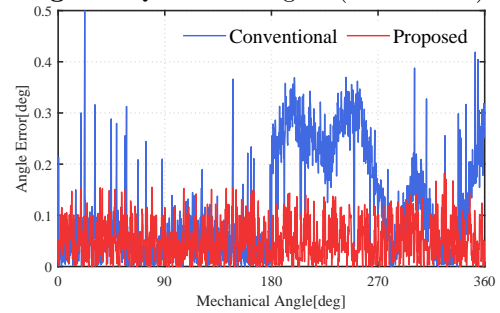


Fig. 12: Angle Error(Experiment)

実現した手法である。しかし、磁束密度の異なる磁石の多極化には物理的な制約があり、小型を維持したままでの高精度化に限界がある。この問題を解決するため、AMR センサを利用することにより、擬似的に多極化された信号を取得し、高分解能化を試みた。AMR センサと磁束密度の異なる磁石では、位置関係やオフセット算出の問題が発生するが、これらの問題を解決するための手法についても検討を行った。シミュレーションおよび実験では、AMR センサによって得られる特徴づいた信号から絶対角度の算出が可能であることが示され、さらに従来の精度よりも高い精度で角度算出出来ることが確認された。今後は、磁力差型磁気式アブソリュートエンコーダの内部システムの改良などによって形状を維持したままでの、さらなる高精度化が求められる。

参考文献

- [1] Y. Liu, S. Hao, and M. Hao. A novel absolute magnetic encoder based on pseudorandom code. In *2009 International Conference on Information and Automation*, pp. 385–390, 2009.
- [2] S. Komatsuzaki, A. Takeyama, K. Sado, Y. Nagatsu, and H. Hashimoto. Absolute angle calculation for magnetic encoder based on magnetic flux density difference. In *IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2021.
- [3] P. Ripka and A. Tipek. *Modern Sensors Handbook*. ISTE Ltd, UK, 2007.