

偏心構造を有する高分解能磁気式エンコーダの開発

— 機械学習の適用と評価 —

Development of High-Resolution Magnetic Absolute Encoder with Eccentric Structure

— Application and Evaluation of Machine Learning —

電気電子情報通信工学専攻 出口 祐輔

Yusuke DEGUCHI

1. 緒言

1.1 背景

現在、モータ技術はロボットや自動車、オートメーション機器等、幅広い分野で利用される。このような応用分野の発展とともに、「高効率」「高トルク」「高性能」等、モータに課せられる要求は増大し、モータ技術の高度化が期待されている[1]。それに伴い、モータの制御技術への関心も高まり、モータ制御に必要な不可欠な測定技術も重要なトピックの一つである。モータ制御の精度は、エンコーダから得られる角度・角速度の精度に依存しており、それ故に高精度な制御には、高い信頼性と高い精度を持つエンコーダが必要不可欠である。一般的にエンコーダは光学式と磁気式の二つが存在するが、光学式は塵や埃、油分に弱く耐環境性や信頼性が低い。さらに、高分解能化のためには大型化が避けられないため、磁気式エンコーダがアクチュエータには採用されやすい[2]。しかし、磁気式エンコーダの精度は信号の精度に依存するため、高精度化が難しいという問題がある[3]。そこで、他の研究ではマグネットの極数を増やすことで高精度化を実現しているが[4]、オフセット n の特定ができず、絶対角度が算出できなくなる。ここで極対数を P とし、絶対角 θ_m と電気角 θ_e の関係を以下に示す。

$$\theta_m = \frac{\theta_e}{P} + \frac{2n\pi}{P} \quad (1)$$

この問題に本研究室の先行研究では、偏心構造に注目し特徴づいた信号から絶対角度の算出を実現した[5][6]。しかし、偏心構造により信号に歪みが生じることで、角度算出精度が低くなることや、信号歪みを抑えるためにホールセンサが極数分必要になり、アクチュエータの高コスト化・大型化に繋がる等のデメリットがある。

1.2 研究目的

本研究では偏心構造とニューラルネットワークによる機械学習を適用した磁気式エンコーダを提案する。偏心構造により特徴づけられた信号を得ることができ、絶対角度の算出を可能にした。しかし、偏心構造を適用することで生じる信号の歪みにより、角度算出の精度は悪化してしまう。これは磁気式エンコーダの角度算出精度が、直交信号の精度に依存するためである。そこで、提案手法ではニューラルネットワークにより信号補正を行うことで、信号の歪みを抑えた完全直交信号を生成することができた。この直交信号を使い、電気角を高精度に算出することを実現した。また、絶対角度の算出に必要なオフセットを事前に学習させることで、容易に絶対角度の算出を可能にした。

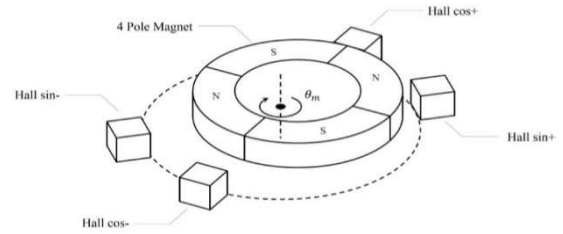


Fig.1 偏心構造を有する磁気式エンコーダ

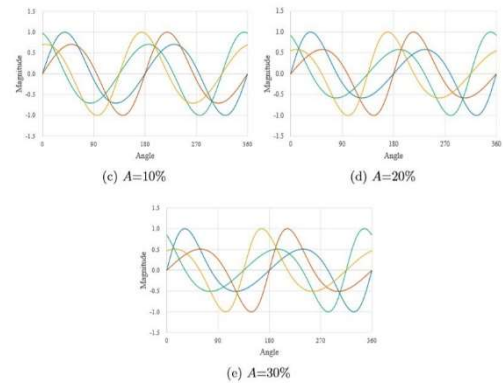


Fig.2 ホールセンサの出力信号

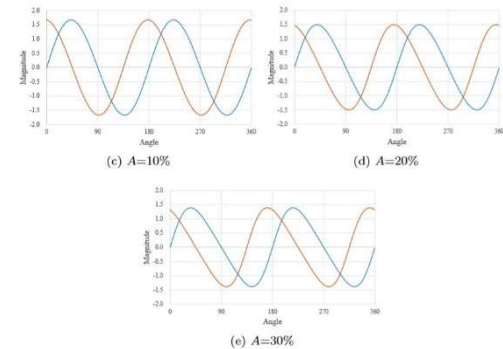


Fig.3 ホールセンサの加算信号

2. 偏心構造を有する磁気式エンコーダ

2.1 偏心構造と特徴づけられた信号

偏心構造を有するエンコーダの概要図を Fig.1 に示す。モータの回転に同期し偏心回転する多極マグネットと、加算した時に \sin 波, \cos 波を得るように配置されたホールセンサ4つで構成されている。先行研究では、極数が4のマグネットを使用している。ここで、偏心率を変えた時の

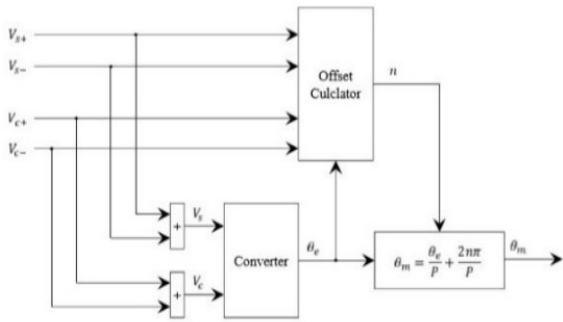


Fig.4 従来の絶対角度算出システム

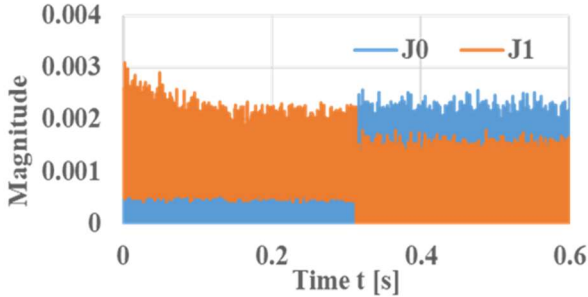


Fig.5 従来の絶対角度算出システム

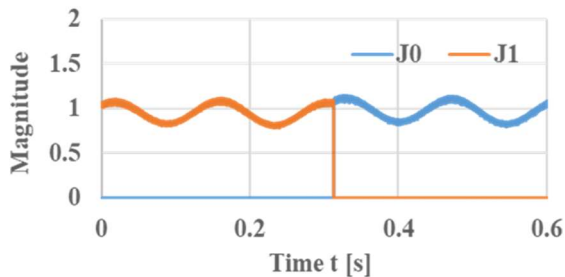


Fig.6 従来の絶対角度算出システム

多極マグネットの偏心回転により得られるホールセンサの出力信号を Fig.2 に示す。Fig.2 からわかるように、偏心率の増大により信号の歪みが大きくなっていることがわかる。また、加算信号を Fig.3 に示す。Fig.3 から加算することで直交信号に近い信号を得ることができた。以下ではこの加算することで得られる信号を擬似直交信号と定義する。

2.2 従来システムにおける絶対角度算出

先行研究における角度算出手法を Fig.4 に示す。前節で説明した擬似直交信号と既存のコンバータを使い、電気角の算出を行う。また、この電気角の情報と偏心構造により特徴づけられた信号をもとに、最小二乗法を使いオフセットを算出する。算出された電気角とオフセットからモータの回転角、つまり機械角が算出される。次節でオフセットと電気角の算出手法について説明する。

2.3 オフセット算出と偏心率

前述したように、コンバータにより得られる電気角とモータの回転角度は(1)式のような関係にある。そのため、絶対角度の算出にはオフセットの算出が必要である。そこで、偏心により特徴づけられた 4 つの信号とコンバータにより算出される電気角を用いることでオフセットを特定する。予めオフラインにホールセンサの出力信号

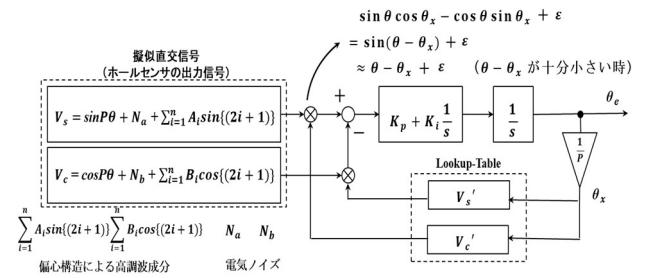


Fig.7 PLL 法を用いたコンバータ

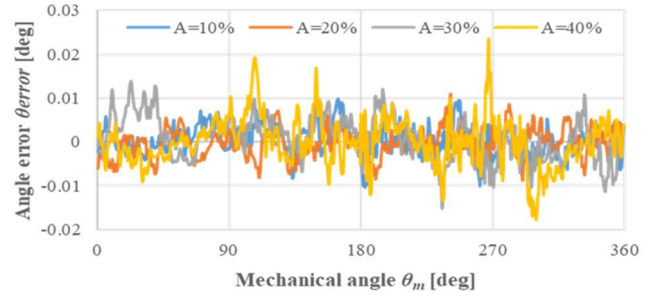


Fig.8 偏心率と絶対角度算出精度

とモータの回転角の関係を Look-up Table に保存しておく。この Look-up Table を用い、以下のように誤差の二乗和を全ての n に関して計算する。

$$J_n = \sum_{i=1}^h \left\{ V_i - f_i \left(\frac{\theta_e}{2} + n\pi \right) \right\}^2 \quad (2)$$

ここで、 V_i は偏心により特徴づけられたホールセンサの出力信号、 f_i は Look-up Table である。この J_n を最小にするような n を選ぶことで絶対角、つまりモータの回転角度の算出が可能となる。

ここで偏心率を変えた時の J_n の信号を Fig.5 と Fig.6 に示す。結果からわかるように、偏心率が大きいほどオフセットの判別がしやすくなる。しかし、前述したように偏心率が大きくなることで、信号の歪みは大きくなり角度算出精度は下がってしまう。次節ではエンコーダの角度算出精度に起因する電気角算出の仕組みを説明する。

2.4 電気角算出と擬似直交信号

電気角の算出に使用するコンバータを Fig.7 に示す。

ここでは未知の外乱に対し、高いロバスト性を示す PLL 法によるコンバータを使用した。このコンバータは事前に保存した一周期分の電気角とホールセンサの出力信号を Look-up Table を使用する。この Look-up Table とホールセンサから得られる擬似直交信号をもとに、加法定理を使用することで電気角が算出される。ここで A をモータ角加速度、 K_i をゲインとしエンコーダの角度誤差の式を以下に示す。

$$\theta_{error} = \frac{A}{K_i} + |\epsilon| \quad (3)$$

角度算出精度は加法定理の近似誤差 ϵ に比例することがわかる。これは擬似直交信号が偏心構造によって生じる高調波成分を含むからである。Fig.8 に偏心率を変えた時の角度算出誤差の結果を示す。結果から偏心率の増大は角度算出精度を悪化させることがわかる。

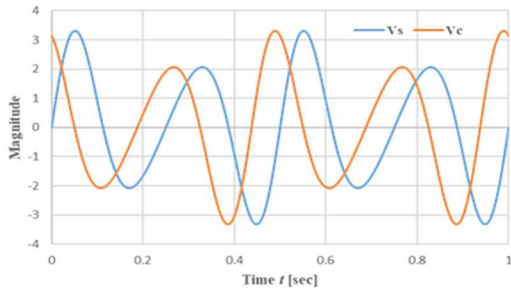


Fig.9 従来の絶対角度算出システム

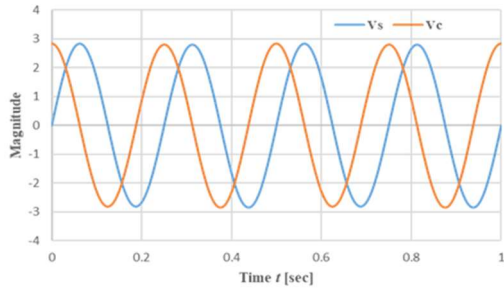


Fig.10 従来の絶対角度算出システム

偏心構造による信号歪みを抑える方法として、ホールセンサを極数分使用することが挙げられる。Fig.9に4極マグネットと極対数分である2つのホールセンサを使用した時の加算信号、Fig.10に極数分である4つのホールセンサを使用した時の加算信号を示す。結果からホールセンサが極対数分では加算した信号は特徴的な信号のままである。このことから、信号の歪みを補完できていないことがわかる。一方、ホールセンサが極数分である4つの時は出力信号を加算することで、直交信号に近い信号を得ることができた。以上のことから、ホールセンサはマグネットの極数分必要であることがわかる。このように先行研究では、極数分のホールセンサの出力信号を加算することで直交信号に近い擬似直交信号を生成した。これにより、従来のコンバータを使い電気角を算出することができた。しかし、更なる高分解能のために4極ではなく128極のような多極マグネットを使用する場合、ホールセンサの数が増えてしまう。これは、アクチュエータの高コスト化や物理的な制約から好ましくない。したがって、ホールセンサの数は最小限で高精度な絶対角度を算出することが好ましい。

ここで、8極マグネットと4つのホールセンサを使用した時の絶対角度算出誤差をFig.11に示す。極対数分のホールセンサでは厳密には加算して得られる擬似直交信号は完全な直交信号ではない。そのため、Look-up Tableに保存した信号と異なるホールセンサの出力信号を加法定理による近似をすることで特徴的な角度誤差が生じている。以上のことから、偏心構造を適用することはエンコーダの絶対角度算出を実現する一方で、エンコーダの精度を悪化させる要因にも繋がる。そこで、偏心率とセンサ数に依存しない新しい絶対角度算出システムを提案する。

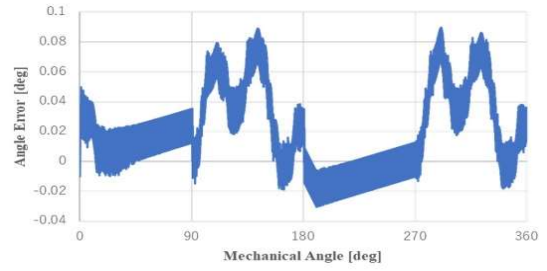


Fig.11 従来システムにおける角度誤差

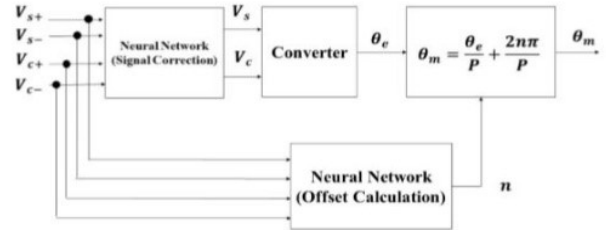


Fig.12 提案するシステム

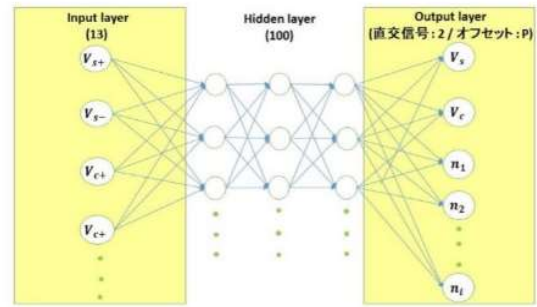


Fig.13 使用するニューラルネットワーク

出することができる一方で、ホールセンサの出力信号は歪みを含んだ信号になってしまう。そのため、外乱に対しロバスト性の高いPLL法によるコンバータを使用しても、信号歪みによる影響により、角度算出精度は低下してしまう。また、更なる高分解能化のために多極マグネットを使用する場合、極数分のホールセンサを物理的に配置できないため、角度算出精度は大きく下がってしまう。これは、ホールセンサの出力信号を加算し得られる信号は、ホールセンサが極数分無い場合、完全な直交信号ではないからである。

そこで、本章では偏心構造により生成される特徴づけられた信号とニューラルネットワークを利用した新しいシステムを紹介する。提案する角度算出手法をFig.12に示す。多極マグネットと4つのホールセンサを使用した時、加算した信号がニューラルネットワークにより完全な直交信号に変換される。これにより、極数分のホールセンサを必要とせず、既存のコンバータから高精度な電気角算出が実現することを示す。

3.2 ニューラルネットワーク

Fig.13に使用するニューラルネットワークを示す。入力データは4つのホールセンサから生成される13次元のデータである。また、Fig.14にニューラルネットワークによ

3. 提案システム

3.1 絶対角度算出

偏心構造により特徴づけられた信号からオフセットを算

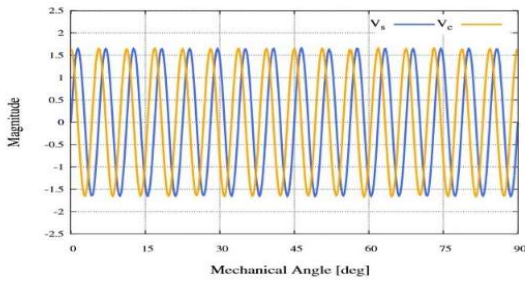


Fig.14 完全直交信号

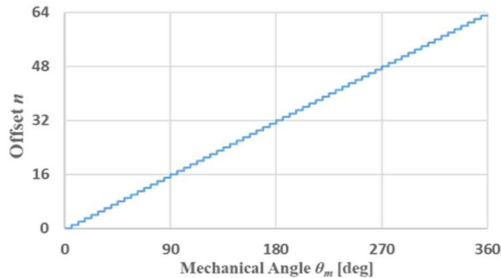


Fig.15 オフセット算出

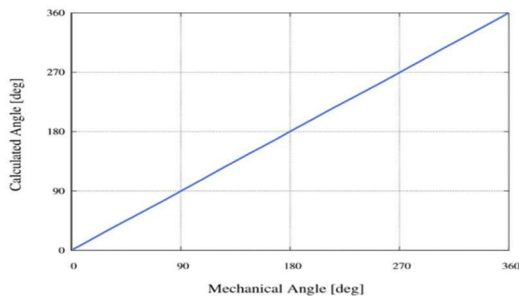


Fig.16 絶対角度算出

り信号の歪みを補正し生成された完全な直交信号を示す。結果はシミュレーション上でマグネットの極数が 128 の場合における出力信号を提案システムにより補正したものである。また、オフセットの情報を事前に学習させることで容易にオフセットを算出することができた。オフセット算出の結果を Fig.15 に示す。

5. 評価

この提案システムを用い、実験を行った。実験では 8 極マグネットを使用し、4 つのホールセンサから得られる特徴づけられた信号からニューラルネットワークを用いることで絶対角度が正確に算出できるか評価を行った。提案するシステムを利用した時の絶対角度算出の結果と角度算出の精度をそれぞれ Fig.16 と Fig.17 に示す。また、比較として、8 つのホールセンサから得られる信号をもとに従来システムを利用した時の絶対角度算出誤差の結果を Fig.18 に示す。結果から提案システムを利用することで、極数分のホールセンサを必要とせず、高精度な絶対角度の算出ができることがわかる。

5. 結言

本研究では、分解能の向上のために多極化した場合においても、高精度に絶対角度を算出する偏心構造とニューラルネットワークを利用した、新しい磁気式エンコーダを提案した。提案するエンコーダは、1 つのマグネットと 4 つの

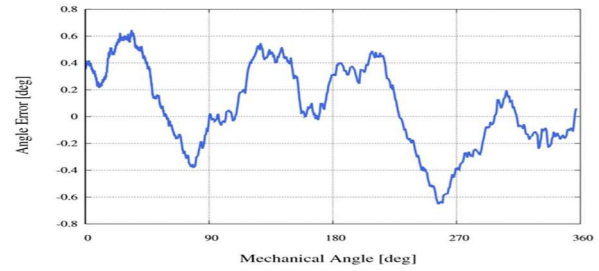


Fig.17 提案システムの角度算出精度(ホールセンサ数 : 4)

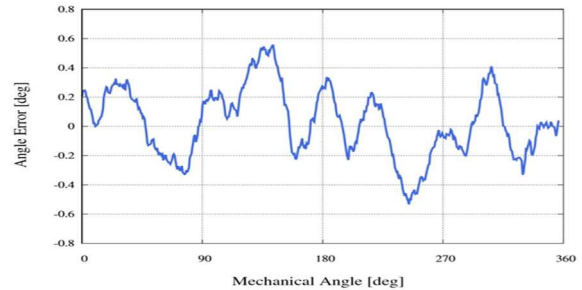


Fig.18 従来システムの角度算出精度(ホールセンサ数 : 8)

ホールセンサのみで構成されており、小型かつ低コストに構成することが可能である。また、偏心構造により特徴づけられた 4 つの信号とニューラルネットワークを利用することで、容易かつ高精度に絶対角度の算出が可能となる。

本方式の最大の利点は二つある。一つ目は、事前に学習させるだけで容易にエンコーダの高精度化とアブソリュート化を実現することである。二つ目は、マグネットの極数を増加した場合においても、絶対角度の算出に追加の機構を必要としないことである。

参考文献

- [1] モータ技術実用ハンドブック編集委員会: “モータ技術実用ハンドブック”, 日刊工業新聞社, (2001)
- [2] T. Kojima, Y. Kikuchi, S. Seki, and H. Wakiwaka: “Study on High Accuracy Optical Encoder with 30 bits”, in Proc. The 8th Workshop IEEE Advanced Motion Control, pp.493-498, (2004)
- [3] Hung Van Hoang, and Jae Wook Jeon: “Signal Compensation and Extraction of High Resolution Position for Sinusoidal Magnetic Encoders”, in Proc. IEEE International Conference on Control, Automation and Systems, pp.1368-1373, (2007)
- [4] Yong Liu, Shuanghui Hao, and Minghui Hao: “A Novel Absolute Magnetic Encoder based on Pseudorandom Code”, in Proc. IEEE International Conference on Information and Automation, pp.385-390, (2009)
- [5] Kodai Yamamoto, Kazuki Otomo, Yusuke Deguchi, Hideki Hashimoto: “Development of Absolute Magnetic Rotary Encoder with Eccentric Rotation”, IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, (2018)
- [6] Kazuki Otomo, Yusuke Deguchi, Yuki Nagatsu, Hideki Hashimoto: “Development of Magnetic Absolute Encoder using Eccentric Structure with Multipolar Magnet”, IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, (2019)