

ソレノイドをリニアアクチュエータ化するための 駆動電流からの位置のセンサレス計測・制御方式

秋田純一^{†1}

概要：直動方向のアクチュエータとして用いられるソレノイドは、一般には ON・OFF の二状態で使用される。ソレノイドのコイルのインダクタンスはソレノイドのストローク位置によって変化する特性があることを用いて、外付けのセンサを用いずに位置を計測する方法についてはいくつかの研究がある。本稿では、ソレノイドの PWM 駆動時に流れる電流の 2 点の値からソレノイドのストローク位置を計測する方法について述べる。またそれを用いてソレノイドのストローク位置を任意に制御できるリニアアクチュエータとして用いる事例について述べる。

1. はじめに

コイルと鉄心からなるソレノイド（図 1）は、通電時・非通電時の 2 つの状態でも動鉄心（プランジヤ）の位置を制御できるアクチュエータである。ストロークの鉄心は磁性体であり、その位置によってソレノイドのコイルのインダクタンスが変化する。このことを利用し、ストローク位置を電気的な方法で計測する方法について、多くの研究がある[1-9]。本稿では、ソレノイドの PWM 駆動時に流れる電流の 2 点の値から、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を用いる機械学習によってストローク位置とコイルの温度を推定する手法について述べ、その評価を行う、またそれを利用して、ソレノイドのストローク位置を制御してリニアアクチュエータ化する方策についても述べる。なお本稿の内容は、arXiv に公開済みプレプリント[11]の内容に基づく。



図 1: ソレノイドの例 (Takaha CBS07300580)

2. 関連研究

ソレノイドのセンサレス制御に関する研究はいくつかある。基本的にはソレノイドのコイルのインダクタンスを計測するものであり、その計測方法について様々なアプローチがある。主なものは、PWM 駆動の過渡応答の時間特性を用いるもの[1,2,3]、電流の位相を用いるもの[5]、交流電圧を印加してインピーダンスを計測する方法[4,8]、内部モデルを推定するもの[6]、共振特性を用いるもの[9]、発生する力を計測する方法[7]などである。いずれも過渡応答などの駆動時の電圧波形などを詳細に計測する必要がある。

3. ソレノイドの駆動回路と PWM 電流波形

本研究で用いるソレノイドの駆動回路を図 2 に示す。一般的な nMOSFET を用いた PWM 駆動回路に、電流計測用の R_{sense} を付加し、その両端電圧をオペアンプを用いる非反転回路で増幅する。 R_{sense} の両端電圧のソレノイドの駆動への影響が無視できるように $R_{sense}=0.2[\Omega]$ とした。また用いるソレノイド (Takaha SSBH-0830-01) の $V_s=5[V]$ での駆動時の電流から、 $R_i=1[k\Omega]$ 、 $R_f=16[k\Omega]$ とした。ON 時には、図 3 のようにソレノイドに流れる電流が徐々に増加するが、その初期値と電圧増加の時定数は、ソレノイドのインダクタンスと PWM の周期 T_{cycle} と ON 時間 T_{on} によって決定されることが導かれる[10]。

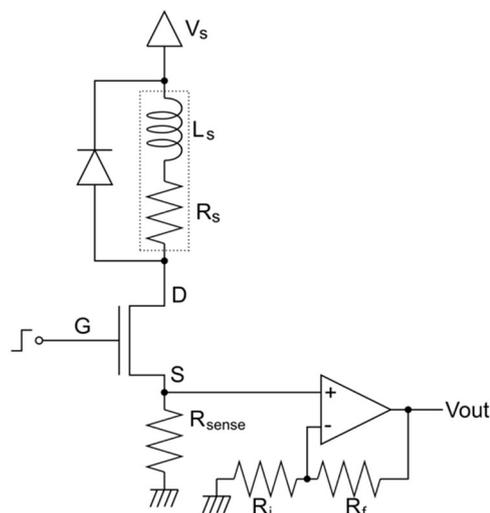


図 2: ソレノイドの駆動回路と電流計測回路

^{†1} 金沢大学 融合学域 融合科学系

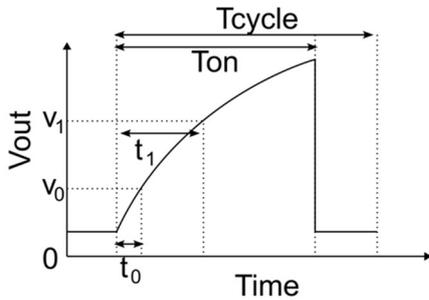


図 3: ソレノイドの PWM 駆動時の電流波形 (図 2 の回路から V_{out} はソレノイドに流れる電流に比例する)

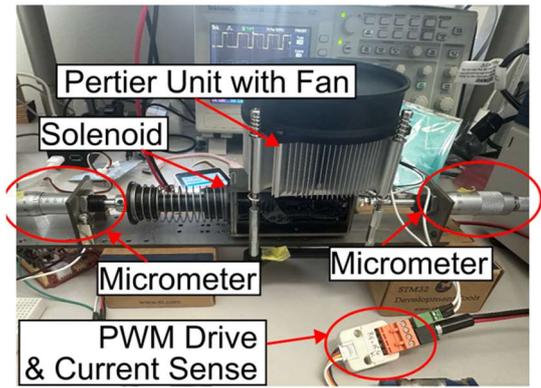


図 5: ソレノイドの特性計測システム

4. ソレノイドの位置推定モデルとその評価

4.1 ソレノイド位置推定モデルの構築

本研究では、図 3 の PWM 駆動波形のうち、ON から t_0, t_1 [s] 後の計測回路の出力電圧 (ソレノイドの電流に比例、それぞれ v_0 と v_1 とする) の値と、PWM デューティ比 r (これは T_{on}/T_{cycle} と求められる) から、ソレノイドのストローク位置 x [mm] を推定する。なおソレノイドの温度 T [°C] によってコイルの巻線抵抗や鉄心の透磁率が変化することから、駆動時の電流波形も変化する。そのため T も推定対象とする。つまり解くべき問題としては、 (v_0, v_1, r) から (x, T) を推定することになり、これを図 4 のような構成の畳み込みニューラルネットワーク (CNN) で推定することとする。

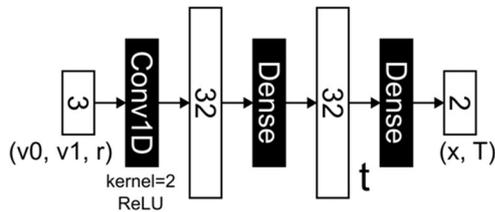


図 4: ソレノイド位置推定のための CNN の構造

この CNN の学習のため、図 5 のような計測システムを構築し、ペルチエ素子でコイル温度 T を 25[°C] から 40[°C] の範囲で 5[°C] 刻み、またマイクロメータでストローク位置 x を 0[mm] から 10[mm] まで 1[mm] 刻みで設定し、 r を 0.1 から 0.9 まで 0.1 刻みで変化させたときの v_0 と v_1 を測定して記録した。なお $T_{cycle}=10$ [ms], $t_0=100$ [μs], $t_1=700$ [μs] とし、PWM 生成・ V_{out} の A/D 変換取得には Arduino UNO を、その制御には M5Stack Core2 を用いた。

その後、計測した値を用いて図 3 の CNN をエポック数 1000 で学習させた結果、 x と T の MSE (平均二乗誤差) はそれぞれ 0.1528[mm] と 0.3136[°C] であった。

4.2 ソレノイド位置推定モデルの評価

4.1 節で得られたソレノイド位置推定モデルの評価を行った。図 5 と同様の構成でソレノイドの位置 x と温度 T を一定に保ち、制御 PWM 比 r を 0.1 から 0.9 まで 0.1 刻みで変化させつつ、それぞれで計測された v_0 と v_1 から、 x と T を求め、その誤差を求めた。その結果を表 1 に示す。この結果から、ソレノイドの位置 x と温度 T を、それぞれ 0.216[mm] と 2.219[°C] 程度の誤差で推定することが可能であることがわかる。

5. ソレノイドのリニアアクチュエータ化

このモデルを用いて、ソレノイドの位置制御を行い、リニアアクチュエータ化することを試みた。ソレノイドの位置制御は、単純な P 制御とし、目標位置 x_T と推定位置 x_P の誤差をゲイン K_p 倍した値分だけ、PWM 比 r を変化させることとした。 K_p は予備実験から 5.0 と設定した。またソレノイドの実際のストローク位置 x_m は、レーザー変位計 (Keyence LK-H050, 誤差は 0.025[μm]) を用いて計測した。目標位置 x_T を様々に変化させたときの推定位置 x_P と実測位置 x_m の例を図 6 に示す。おおむね正しくストローク位置の制御が行われていることが確認できる。

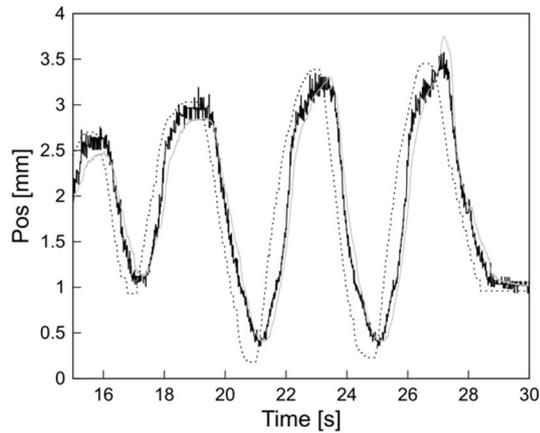


図 6: ソレノイドの位置制御の例. 点線:目標位置, 実線:モデルによる推定位置, 灰色線: 実測位置

6. まとめと今後の課題

本稿では, ソレノイドの電流波形上の 2 点の電流値と PWM のデューティ比から, ソレノイド位置とコイル温度を推定する手法とその評価について述べた. またそれを用いてソレノイドをリニアアクチュエータ化する試みについて述べた. ソレノイドの位置制御のアルゴリズムは単純な P 制御であり, ソレノイドの非線形性を考慮しておらず, また外力に対する摂動も考慮していない. そのため位置制御の安定化については, これらの点を考慮する必要がある.

表 1: ソレノイドの位置 x と T の推定誤差

T_{ON} [ms]	e_x [mm]						e_T [°C]					
	$T = 25$ [°C]	$T = 30$ [°C]	$T = 35$ [°C]	$T = 40$ [°C]	$T = 45$ [°C]	Avg	$T = 25$ [°C]	$T = 30$ [°C]	$T = 35$ [°C]	$T = 40$ [°C]	$T = 45$ [°C]	Avg
1	0.031	0.101	0.156	-0.045	0.136	0.106	7.045	2.686	-1.276	-6.563	-7.406	0.262
2	0.044	0.109	0.180	1.432	0.206	0.135	6.572	2.340	-1.492	-11.60	-7.329	0.023
3	0.017	0.061	0.145	-0.017	0.157	0.095	3.642	1.404	-1.074	-4.233	-5.263	-0.323
4	-0.065	0.097	0.207	0.134	0.338	0.144	-0.558	-0.241	-1.169	-1.796	-1.834	-0.951
5	0.062	0.091	0.133	-0.080	0.151	0.109	-1.491	-1.301	-1.779	-2.578	-2.324	-1.724
6	0.193	0.153	0.163	-0.142	0.089	0.149	-1.752	-1.731	-2.329	-3.693	-3.034	-2.212
7	0.448	0.345	0.306	-0.101	0.170	0.317	-2.094	-1.999	-2.384	-4.118	-2.860	-2.334
8	0.410	0.401	0.364	0.028	0.307	0.371	-2.532	-2.556	-3.080	-4.313	-3.221	-2.847
9	0.589	0.898	0.414	0.879	0.030	0.482	-1.783	-4.772	-3.375	-6.856	-3.743	-3.418
Avg	0.192	0.251	0.230	0.232	0.176	0.216	0.783	-0.685	-1.995	-5.083	-4.112	-2.219

参考文献

- [1] M.F.Rahman, N.C.Cheung, "Position estimation in solenoid actuators," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.32, No.3, pp.552-559, 1996.
- [2] D.Pawelczak and H.R.Tranker, "Sensorless position control of electromagnetic linear actuator," 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2004.
- [3] J.C.Renn and Y.S.Chou, "Sensorless Plunger Position Control for a Switching Solenoid," JSME Int. Journal Series C Mech. Systems, Machine Elements and Manufacturing, Vol.47, No.2, pp.637-645, 2004.
- [4] I.Duelk and T.Kovacshaz, "A sensorless method for detecting spool position in solenoid actuators," ICC2013, pp.36-43, 2013.
- [5] S.T.Wu and W.N.Chen, "Self-sensing of a solenoid valve via phase detection," 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.1165-1170, 2009.
- [6] F.Straussberger et al., "New results for position estimation in electro-magnetic actuators using a modified discrete a/b model reference approach," Int. Conf. on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), pp. 229-234, 2014.
- [7] B.Hanson and M.Levesley, "Self-sensing applications for electromagnetic actuators," Sensors and Actuators A: Physical, Vol.116, pp.345-351, 2004.
- [8] S.Nagai et al., "Real Time Sensorless Estimation of Position and Force for Solenoid Actuators," IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.5, No.2, pp.32-38, 2016.
- [9] J.Maridor et al., "Sensorless position detection of a linear actuator using the resonance frequency," ICEMS 2009, pp.15-18, 2009.
- [10] J.Akita, "Measurement and Control of Solenoid Stroke using Its Electrical Characteristics," <https://arxiv.org/abs/2405.11721>.
- [11] J.Akita, "Sensorless Measurement of Solenoid Stroke and Temperature using Convolution Neural Network with Two Points of PWM Driving Current," <https://arxiv.org/abs/2411.07270>.