

機能性流体を用いた小形制動装置に関する研究：小形ロボット搭載のための電源回路の検討

佐藤，悠太 / SATO, Yuta

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院デザイン工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

Bulletin of graduate studies. Art and Technology / 法政大学大学院紀要. デザイン工学研究科編

(巻 / Volume)

12

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

3

(発行年 / Year)

2023-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030240>

機能性流体を用いた小形制動装置に関する研究 － 小形ロボット搭載のための電源回路の検討 －

Study on small-sized braking device using functional fluid
- Design and fabrication of on-board power supply for the mobile robot -

佐藤 悠太

Yuta SATO

主査 田中 豊 副査 岩月 正見

法政大学大学院デザイン工学研究科システムデザイン専攻修士課程

As robots continue to get smaller and lighter, one of them is the Micromouse. Micromouse is a mobile robot used in micromouse competitions and turns corners at steep angles. In addition, the recent competitions have seen a noticeable increase in speed. However, braking by motor current control has limitations in running performance. Therefore, we developed a mechanical brake device using Electro-Rheological (ER) fluid. Electro-rheological (ER) fluid actuators have a potential of soft brake function for the small autonomous mobile robot as the ER fluid can control quickly the viscosity change by changing the electric field. In this study, we numerically simulated the characteristics of the on-board power supply for a small brake model using ER fluid and conducted experiments on an actual device.

Key Words : Braking device, Electro-rheological fluid, High voltage, Small mobile robot, Power supply

1. 緒論

近年、ロボットの小型化、軽量化の研究が進んでいる。小型化、軽量化することで、省エネルギー・省スペース・省資材といった環境にやさしいテクノロジーとして関心が高まっている。これらの技術はマイクロ・ロボティクス(Micro robotics)と呼ばれ、既存のロボットやドローンでは不可能な、狭い場所での作業を行うことを目的とする。

このような小形ロボットの1つにマイクロマウス[1]と呼ばれるロボットがある。マイクロマウスとは、小形の自立型ロボットが自律的に迷路を探索し、スタート地点からゴール地点までに達する最短時間を競うマイクロマウス競技に使用されるロボットである。この競技は年々、走行に対する技術力が高くなっており、特に機体の高速化が顕著である。機体の僅かなコントロールの結果で順位が決まることが多くなってきており、ブレーキコントロールによる制動技術を有する機体とその調整が重要となる。しかし、一般的なマイクロマウスは機体の寸法が小さいうえ、簡易な操作や構造が求められるため、大掛かりな機械的ブレーキなどの制御装置は搭載できない。また従来のモータの電流制御だけでは走行性能の向上にも限界がある。以上を踏まえ、マイクロマウスの新たなブレーキを構成する要素の小型化、軽量化が課題である。

これらの課題を解決すべく、先行研究では機能性流体

を用いた流体制御による制動装置を提案、試作が行われた[2][3]。機能性流体の一種である ER 流体は、電気的の見かけ上の粘性を変化させることができる。その粘性は短時間で可逆的に変化するという特徴を持っており[4]、これにより可変減衰力や粘性抵抗力を得ることが出来る[5]。

一方、ER 流体を制動装置に用いるには電極間に高電圧を印加する必要がある。本報では、マイクロマウス競技用小形自律移動ロボットへの搭載を念頭にした、ER 流体を用いた小形制動装置のための新たな高電圧印加用電源の設計と試作、およびその性能の検討結果について報告する。

2. 小形制動装置

図 1 に先行研究で試作された多重円盤形の制動装置の構造[2]を、図 2 に二重円筒形の制動装置の構造[3]を示す。小形制動装置は回転軸に固定された正電極と、筐体に固定された同軸の負電極で構成されており、電極板間に満たされた ER 流体の電圧印加による見かけ上の粘性を短時間で可逆的に変化させる特性を用いる。電圧を印加していない状態では ER 流体の粘性抵抗力は流体の基底粘度に依存して小さいが、電圧を印加することにより見かけ上の粘性が大きく変化し、粘性抵抗力が大きくな

る。この抵抗力が DC モータの回転角速度を減少させ、制動装置として機能する。

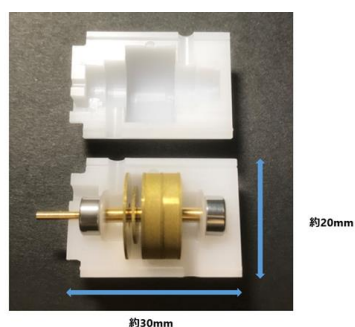


図1 多重円盤形の制動装置の構造

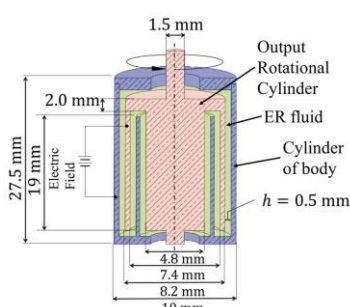


図2 二重円筒形の制動装置の構造

3. 印加電圧用電源

(1) 電源回路の必要性

ER 流体はせん断速度とせん断応力の関係から、粒子分散系と高分子液晶均一系の大きく 2 種類に分けられる。分散系 ER 流体は電圧の印加で分極しやすい微粒子を油性媒体に分散されたものである。本研究では、基底粘度の値が小さく、印加した電圧でマイクロマウスを完全に停止させることができる分散系 ER 流体を使用した。図3に装置に用いた粒子分散系 ER 流体の電界強度とせん断応力の関係を示す。この ER 流体は電界強度が大きくなるにつれて、指数関数的に見かけ上の粘性が大きくなる特性を持つ。マイクロマウスに使用する DC モータの制動効果を得るには、1 kV 程度の高電圧の印加が必要である。

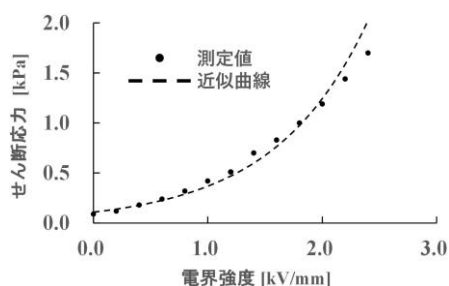


図3 粒子分散系 ER 流体の電界強度とせん断応力の関係

(2) 電源回路の概要

小形制動装置をマイクロマウス競技用の移動ロボットに搭載するにあたり、ロボットへ搭載する基板の面積は限られており、制動装置を作動させるための大掛かりな印加電圧用電源を搭載することはできない。そのため、マイクロマウスに搭載する DC モータを駆動する小形リチウムイオン電池の電源電圧 (7.4 V) を昇圧して高電圧を生成し、小形制動装置に動作させるための電圧印加用電源回路を設計した。

電源回路には一次側で高速なスイッチングを行う昇圧用トランスとチャージポンプを用いた。トランスはコイルを用いた電磁誘導により交流電圧の大きさを変換する電気部品であり、チャージポンプはコンデンサとダイオードを組み合わせることで出力電圧を昇圧する回路である。これらを含めた適切な電子回路部品を選定し、短時間 (30 ms 以内を目安) で目標とする 1 kV への昇圧を可能とする昇圧回路を設計した。またチャージポンプ回路に使用するコンデンサや小形制動装置がコンデンサと同様に電荷を蓄積するため、昇圧用の回路に加えて放電回路も設計し、昇圧と放電を 1 つの電源回路として構成した。図4に昇圧回路のシミュレーションモデルを示す。合計 10 段のダイオードとコンデンサから成るチャージポンプを選定した。

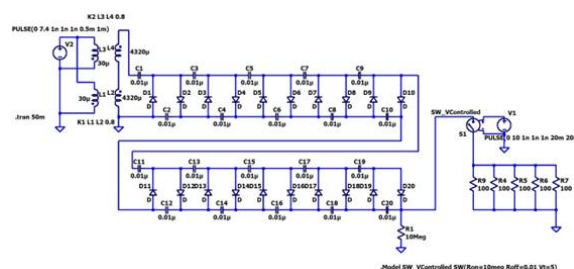


図4 昇圧回路のシミュレーションモデル

(3) 昇圧回路のシミュレーション結果

図5に図4の回路による昇圧シミュレーションの結果を示す。横軸は時間、縦軸は電圧である。供給電圧源であるリチウムイオン電池の電圧 7.4 V を昇圧し、小形制動装置の等価抵抗 R_1 にかかる電圧を 1 kV 付近まで昇圧できることが確認された。しかし 1 kV までの昇圧時間は約 40 ms であった。

マイクロマウスの制動装置として機能するためには 30 ms 以内の応答時間が必要である。目標の応答時間で 1 kV に到達できていないため、供給電圧を徐々に変化 (スweep) させることで目標時間内に昇圧可能な電源回路の改良を試みた。

表1にスweep時間の違いによる立ち上がり時間と昇圧電圧を示す。スweep時間が 100 ms で一次側のスイッチング周波数を 100 kHz から 10 kHz に変化させることで速い立ち上がり時間 (19 ms) で昇圧できることが確認

された。

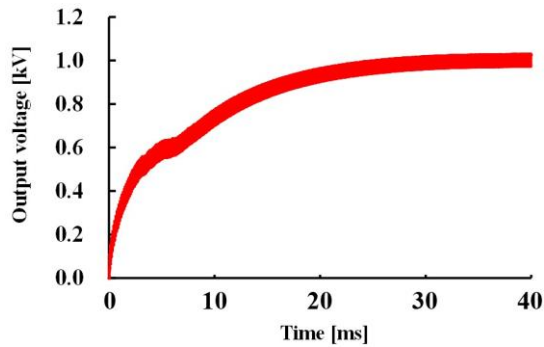


図5 昇圧シミュレーションの結果

表1 スイープ時間の違いによる立ち上がり時間と昇圧電圧

変化時間 [ms]		周波数変化 [kHz]						応答時間 [ms]	昇圧電圧 [V]
		低 ⇒ 高			高 ⇒ 低				
		1 ⇒ 10	10 ⇒ 100	1 ⇒ 100	1 ⇐ 10	10 ⇐ 100	1 ⇐ 100		
10	67	39			78	34			
20	76	40	50		73	37	38		
50	64	45	28		75	46	32		
100	71	21	25		63	19	49		
		1 ⇒ 10	10 ⇒ 100	1 ⇒ 100	1 ⇐ 10	10 ⇐ 100	1 ⇐ 100		
10	980	740			1000	780			
20	1000	760	680		1000	780	820		
50	980	780	800		1000	820	860		
100	980	800	820		1000	860	900		

4. 実機用昇圧回路の実験

(1) プリント基板の設計

これまでのシミュレーション結果、ブレッドボードを用いた実機実験結果を踏まえ、巻き数比 1:12 のトランス 2 つ、チャージポンプ回路 6 段、チャージポンプ内のコンデンサのキャパシタンスを 0.01 μF 、放電回路に用いる抵抗を 10 個に設定し、プリント基板のモデルを設計した。図 6 に試作した電源回路のプリント基板を示す。寸法が縦横 58 mm、質量がトランス 2 つ接続した状態で約 37 g である。

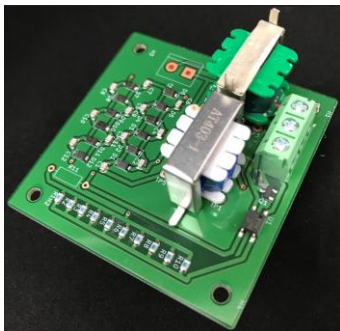


図6 試作した電源回路のプリント基板

(2) 実機実験結果と考察

このプリント基板を用いて実機実験を行った。小形制動装置の等価抵抗にかかる電圧を確認した結果、最大で 86 V への昇圧結果となった。供給電圧源である小形電池 (リチウムイオン電池) の電圧 7.4 V を昇圧はしたが、目標である 1 kV には及ばなかった。

トランスの 2 次側の電圧を測定した結果、最大値が 72 V となり、トランスによる昇圧はできているため、コンデンサのキャパシタンスが小さく、チャージポンプ回路の充電が足りないことが昇圧できていない要因の一つであると考えられる。また、コンデンサは 1 kHz と 100 kHz での使用時で特性が変化する。そのため、コンデンサのキャパシタンスや周波数特性を考慮して、改めて設計を行う必要があることがわかった。

5. 結論

シミュレーションにより電源回路におけるトランス・チャージポンプの最適な組合せを選定し、スイープ等の工夫を行うことで電池の電圧を昇圧できることが確認できた。今後は、実装用プリント基板を再設計し、制動効果と制動時間を確認する必要がある。さらに小形自律移動ロボットの駆動回路と電源回路を統合して 1 つの回路で加速と減速を両立できるようにする予定である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、様々なご指導を頂きました法政大学大学院デザイン工学研究科システムデザイン専攻の田中 豊教授に心から感謝申し上げます。

また、マイクロマウスや電源回路の注意点など、多くの知識や示唆を頂戴いたしました法政大学大学院ポストドクターである外川 貴規氏に深く感謝致します。

最後に、修士論文の作成にあたり、多くの助言を頂きました、法政大学の岩月 正見教授に御礼を申し上げます。

参考文献

- 小島宏一, 加藤雄資, 福井善朗, 中村文一, 開かれた環境が育むマイクロマウスの技術進化, システム/制御/情報, Vol.55, No.7, pp.265-270 (2011).
- Takanori Togawa, Takuma Tachibana, Yutaka Tanaka, Jinghui Peng, Hydro-Disk-Type of Electrorheological Brakes for Small Mobile Robots, International Journal ofHydromechatronics, Vol.4, No.2, pp.99-115 (2021).
- 北野友規, 佐藤悠太, 外川貴規, 田中豊, 小形ロボット用二重円筒形 ER ブレーキの提案, No.220-3 山梨講演会 2022 予稿集, A13(2022).
- Tan, K. P., Stanway, R., Bullough, W. A., Braking Responses of Inertia/Load by Using an Electro-Rheological (ER) Brake, Mechatronics, Vol.17, No.6, p.277-289, (2007).
- 横田眞一, 機能性流体を応用したマイクロアクチュエータ, 日本 SEM 学会誌, Vol.14, No.2, pp.184-185, (2006).