

IPMC アクチュエータのキャパシタンスを考慮したPWM駆動

山口直哉 (名大院) 高木賢太郎 (名大・理研) 安積欣志 (産総研)

PWM Drive of IPMC Actuators with the Consideration of the Capacitance

*Naoya YAMAGUCHI, Kentaro TAKAGI(Nagoya Univ.), Kinji ASAKA(AIST)

Abstract— In this paper, we consider to drive an IPMC actuator using a PWM amplifier, in order to shed light on the characteristics of PWM driving of IPMCs. Generally, it is said that an efficiency of a PWM amplifier is higher than that of a linear amplifier. However, the impedance of IPMC in the high frequency voltage is small, a large current flows in IPMC, and it is supposed to become the power consumption large. We solve this problem by putting an appropriate filter circuit between a PWM amplifier and IPMC. We show that the filter circuit solves the problem of voltage and current in PWM driving. The simulation and the experiment results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key Words: Ionic Polymer-Metal Composite, Pulse Width Modulation, Amplifier, Filter

1. はじめに

柔らかいアクチュエータとして、イオン導電性高分子貴金属複合体 (Ionic Polymer-Metal Composite: IPMC) アクチュエータが近年注目されている [1]. IPMC アクチュエータは、電磁モータに代表される従来のアクチュエータとは異なり、材料自体が柔らかく、外部からの力に対して自身が変形することができる柔軟性がある。生体筋に近い特徴を持つことから、ロボットのための人工筋肉として研究が進められている。IPMC アクチュエータを用いた応用も進みつつあり、他のアクチュエータと比べ低い電圧 (数 [V]) で駆動できるという利点を活かし、小型のリニアアンプによりロボットを駆動した報告などがされている [2]。しかし、リニアアンプを用いた駆動では消費電力が大きく、例えばバッテリー駆動の際に駆動時間が短いという問題がある。

本論文では、PWM アンプを用いて IPMC アクチュエータを駆動することを試みる。そして、PWM 駆動における特徴を明らかにすることを目的とする。PWM アンプはスイッチングアンプとも呼ばれ、入力信号を 2 値または 3 値の矩形波である、高い周波数の信号に変換し出力するアンプであり、その特徴として電力効率が高いことが挙げられる。しかし、IPMC は高周波電圧に対するインピーダンスが小さく、高周波成分を含む PWM 電圧に対して大きい電流が流れてしまい、消費電力も大きくなると考えられる。そこで、PWM アンプと IPMC の間に適切に設計されたフィルタ回路を置くことで、IPMC に入力される PWM 電圧の高周波成分を取り除き、大きな電流が流れる問題を解決する。本論文では、フィルタ回路を選定し、回路の伝達関数を導出して周波数特性を求める。そして、選定した回路のシミュレーションを行い、実験により実際の動作を確認する。

2. IPMC の電気系モデル

IPMC は金電極を接合する際、化学めっきにより電極がイオン交換樹脂に食い込み、電極と樹脂の境界部分が複雑に入り組んだフラクタルな構造をしている [3]。すると、電圧を加えたときに、電極とイオン交換樹脂の界面に電気二重層を形成する。電気二重層は電荷を充電する働きがあり、キャパシタのような振舞いをする。そこで、本研究では IPMC の電気系モデルとして、最も簡単な RC 直列回路を用いることとする。このとき、直流抵抗を R_{ipmc} 、キャパシタンスを C_{ipmc} とすると IPMC のインピーダンス $Z_{ipmc}(s)$ は次のようになる。

$$Z_{ipmc}(s) = R_{ipmc} + \frac{1}{C_{ipmc}s} \quad (1)$$

3. PWM 駆動のためのフィルタ回路

3.1 フィルタ回路の選定

フィルタ回路に求められる条件は、入力 PWM 電圧から IPMC に流れる電流までの伝達関数において高周波のゲインが小さいこと、また入力 PWM 電圧から IPMC の両端電圧までの伝達関数において低周波のゲインが 1 倍 (0[dB]) であり、高周波のゲインが小さいことである。これらの条件は、PWM 信号に含まれる高周波であるキャリア周波数成分の影響を小さくし、かつ低周波である指令信号周波数の成分は 1 対 1 で出力させるためである。

そこで、フィルタ回路として直列接続したインダクタを考える。インダクタは誘導性インピーダンスをもち、高周波に対するインピーダンスは大きく、一方で低周波に対するインピーダンスは小さい。したがって上で述べた条件を満たすと考えられる。Fig.1 に PWM アンプ、フィルタ回路と IPMC を示す。

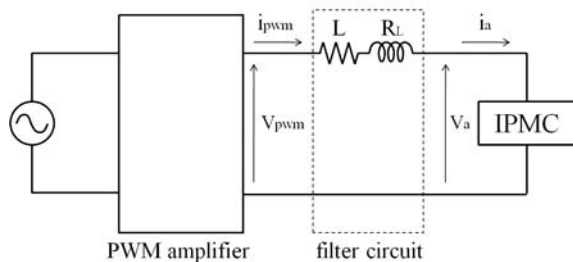


Fig.1 PWM drive circuit for IPMC

3.2 回路の伝達関数

Fig.1の回路において，PWM 電圧 v_{pwm} を入力とし，IPMC の両端電圧 v_a を出力としたときの伝達関数 G_{v_a} および IPMC に流れる電流 i_a を出力としたときの伝達関数 G_{i_a} を求める．2章で述べたように，本論文では IPMC の等価回路を RC 直列回路とする．インダクタの直流抵抗を R_L ，インダクタンスを L とすると，インダクタのインピーダンス $Z_L(s)$ は次のようになる．

$$Z_L(s) = R_L + Ls \quad (2)$$

(1) 式，(2) 式を用いて伝達関数を求めると次のようになる．

$$G_{v_a}(s) = \frac{Z_{ipmc}(s)}{Z_{ipmc}(s) + Z_L(s)} \quad (3)$$

$$G_{i_a}(s) = \frac{1}{Z_{ipmc}(s) + Z_L(s)} \quad (4)$$

となる．パラメータとして Table1 の値を用いて伝達関数のボード線図を描くと，Fig.2 および Fig.3 のようになる．ここで Table1 中の R_{ipmc} ， C_{ipmc} は，LCR メータで求めた値の 1[Hz] の場合の値である．後で述べる実験での PWM 周波数は 20[kHz] であり，ボード線図を見ると 20[kHz] の周波数成分のゲインは十分に小さくなっていることがわかる．よって Fig.2 および Fig.3 のボード線図は前述の条件を満たしており，選定したフィルタ回路は適切であると考えられる．以下では，このフィルタ回路を用いてシミュレーションと実験を行う．

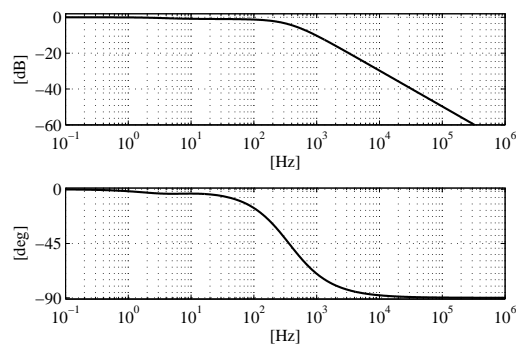
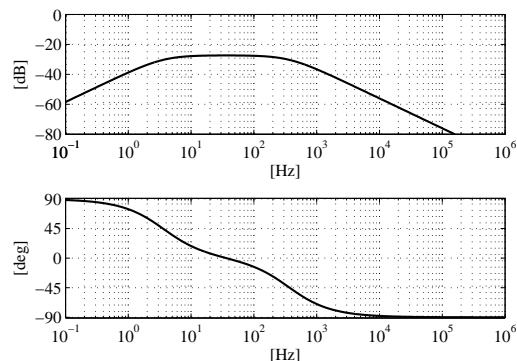
Table 1 Parameters of equivalent circuit of IPMC and inductor

$R_{ipmc}[\Omega]$	$C_{ipmc}[\text{mF}]$	$R_L[\Omega]$	$L[\text{mH}]$
20.71	1.90	2.6	10.1

4. シミュレーション

4.1 シミュレーションの方法

シミュレーションは MathWorks 社の simulink にて行う．入力は，振幅 6[V] の 3 値の PWM 電圧とし，キャ

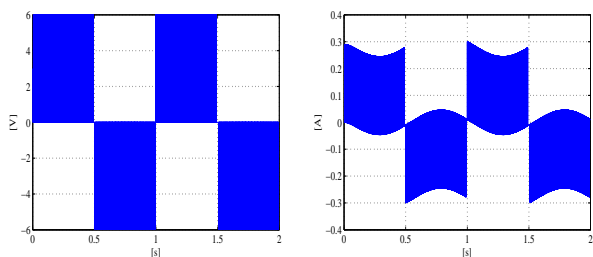
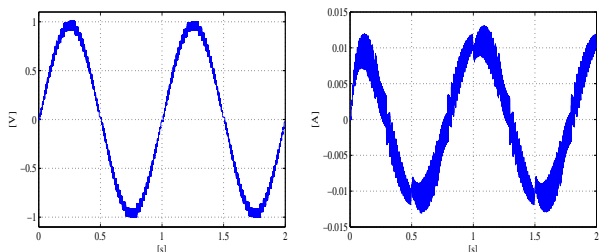
Fig.2 Bode diagram of G_{v_a} Fig.3 Bode diagram of G_{i_a}

リア周波数は 20[kHz] とする．指令信号は 1[V]，1[Hz] の正弦波とする．回路のパラメータは Table1 の値を用いる．また，シミュレーション時間は 2 秒とする．駆動回路は Fig.1 である．

4.2 シミュレーション結果と考察

IPMC に PWM 電圧を直接印加した場合の IPMC の両端電圧 v_a と，そのときに流れる電流 i_a を Fig.4 に示す．また，フィルタ回路を用いた場合の IPMC の両端電圧 v_a と，そのときに流れる電流 i_a を Fig.5 に示す．

電圧に関しては，フィルタ回路を用いた場合の v_a は，ピークがほぼ 1[V]，波形もほぼ正弦波であり，高周波成分がカットされ指令信号通りの電圧が IPMC に印加されている．電流に関しては，PWM 電圧を直接印加した場合，ピーク電流が 0.3[A] 程度である．これに対して，フィルタ回路を用いた場合の i_a は振幅 0.013[A] ほどの正弦波に近い波形である．ピーク電流に関していえば，フィルタ回路を用いることで IPMC に直接 PWM 電圧を加えた場合の 1/10 以下にすることができる．またこれは，正弦波電圧を IPMC に加えた場合に流れた電流に，ほぼ一致する波形である．シミュレーション結果から，フィルタ回路を用いることで高周波の影響を抑えることができ，IPMC に流れる電流を小さくできると確認できた．

Fig.4 v_a (left) and i_a (right) without filter circuitFig.5 v_a (left) and i_a (right) with filter circuit

5. 実験

5.1 実験装置と方法

実験装置の構成図を Fig.6 に示す．インダクタは Table1 の値のものを用いる．本実験で用いる IPMC は、イオン導電性高分子としてフッ素系イオン交換樹脂である Dupont 社の Nafion N-1110 を、電極として金を用い、化学めっきを 5 回繰り返して接合したものである．カウンターイオンは水素イオンを用いる．IPMC は長さ 50[mm]、幅 5[mm] の梁状のものを使用し、クリップで固定する．クリップは接触部分が金めっきされており、金めっき部分に電圧をかけることにより IPMC を屈曲させる．実験は、IPMC が乾かないように適宜純水を加えて行う．実験に用いる PWM アンプ (ZDCMD-1C3008, ZUCO 社) は、指令電圧を入力するとそれに対応した PWM 電圧を出力する．PWM 振幅は電源電圧とほぼ等しく、本実験では 6[V] である．指令電圧は 2.5[V] を中点として 0 ~ 2.5[V]/2.5 ~ 5[V] の指令値で正負の信号を入力する．本実験では、指令信号電圧が 1[V]、1[Hz] の正弦波となるように、振幅 0.42[V]、周波数 1[Hz] の正弦波に、2.5[V] のバイアスを加えた電圧を指令値とする．また、実験に用いる PWM アンプには不感帯が存在する．不感帯とは出力 PWM 電圧が 0[V] となる区間のことであり、用いる PWM アンプでは指令電圧が 2.5 ± 0.1 [V] の区間である．指令電圧はファンクションジェネレータにより作成する．電圧測定はオシロスコープで行い、電流測定はシャント抵抗を直列に接続し、シャント抵抗の両端電圧から電流値を計算する．なお、シャント抵抗の抵抗値は 93.3[m Ω] のものを用いており、シャント抵抗での電圧降下が非常に小さいので、倍率が 97.4 倍の計装アンプにより電圧を増幅して計測

することとする．

実験方法は、IPMC 駆動回路に、指令信号が 1[V]、1[Hz] の正弦波である、振幅 6.0[V]、キャリア周波数 18.6[kHz] の PWM 電圧を加え、そのときの IPMC の両端電圧と流れた電流を計測する．さらに、計算によって回路全体での消費電力を求める．

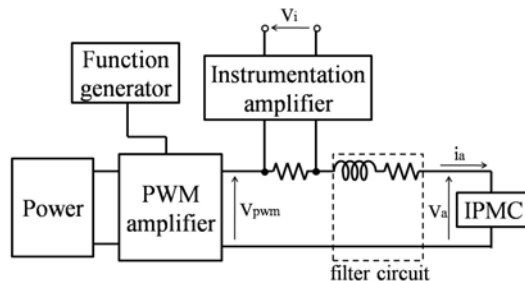


Fig.6 Experimental setup

5.2 IPMC のインピーダンス測定

IPMC のインピーダンスを LCR メータで測定する．測定周波数は 1[Hz]、10[Hz]、100[Hz]、20[kHz] とする．測定結果を Table2 に示す．

Frequency	Resistance	Capacitance	Magnitude(Phase)
1[Hz]	20.71[Ω]	1.90[mF]	86.2[Ω](-76.1 [deg])
10[Hz]	4.81[Ω]	1.30[mF]	13.2[Ω](-68.6 [deg])
100[Hz]	2.22[Ω]	0.94[mF]	2.82[Ω](-38.0 [deg])
20[kHz]	1.80[Ω]	0.46[mF]	1.80[Ω](0.55 [deg])

Table 2 Measurement result of the impedance of IPMC by LCR indicator

インピーダンス測定の結果を見ると、IPMC の直流抵抗とキャパシタンスは周波数によって変化していることがわかる．このように、実際の IPMC のインピーダンスは、単一の RC 回路では表現できない．

5.3 実験結果と考察

Fig.7 に、フィルタ回路を用いない場合の IPMC の両端電圧と、そのときに IPMC に流れる電流を示す．Fig.8 に、フィルタ回路を用いた場合の IPMC の両端電圧と、そのときに IPMC に流れる電流を示す．また、Fig.9 に、フィルタ回路を用いない場合と用いる場合それぞれの回路の消費電力 p を示す．なお、消費電力 p は回路の直流抵抗成分が R であるとき、 Ri_a^2 として計算している．すなわち、

$$p = R_{ipmc} \cdot i_a^2 \quad (\text{without filter circuit}) \quad (5)$$

$$p = (R_{ipmc} + R_L) \cdot i_a^2 \quad (\text{with filter circuit}) \quad (6)$$

である．また，平均電力 P は次の式で与えられる．

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt \quad (7)$$

ここで， T は指令信号の周期である．なお，フィルタ回路を用いない場合は，入力電圧の主な周波数成分が 20[kHz] であるため $R_{ipimc}=1.80[\Omega]$ を，フィルタ回路を用いる場合は，入力電圧の主な周波数成分は 1[Hz] であるため $R_{ipimc}=20.71[\Omega]$ を用いる．

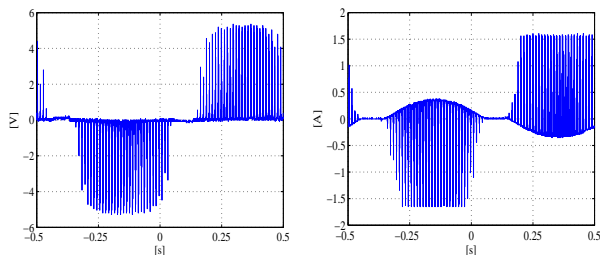


Fig.7 v_a (left) and i_a (right) without filter circuit

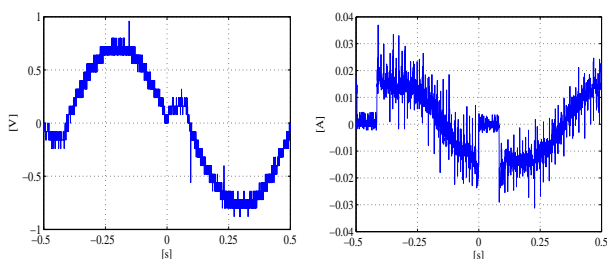


Fig.8 v_a (left) and i_a (right) with filter circuit

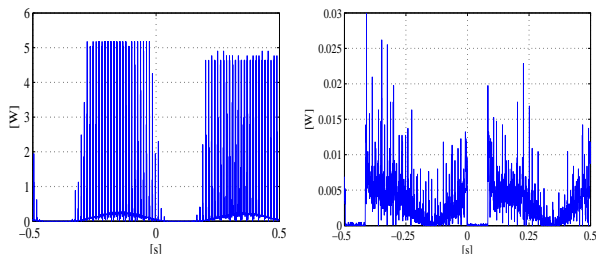


Fig.9 power consumption without and with filter circuit

まず，結果全体を通して波形が 0[V] 付近で歪んでいるのは，PWM アンプが不感帯を持ち，PWM アンプからの出力が 0[V] となる区間があるからである．また，直接 PWM 電圧を IPMC に印加した場合の結果は，PWM 周波数に比べサンプリング周波数 (2500[Hz]) が低く，エイリアシングが起きている．しかし，グラフから高速に変化する電圧は確認でき，定性的な比較検討はできると考える．IPMC に直接 PWM 電圧を印加した場合を考察する．結果を見ると，ピーク電流が 1.6[A] あたりで頭打ちとなっている．これは，計装アンプの計測限界が 1.65[A] であるためそれ以上の電流に対しては計装アンプの出力電圧が飽和してしまうからである．平均電力を (7) 式から求めると $P=365.4[\text{mW}]$ である．次に，フィルタ回路を用いた場合を考察する．IPMC

の両端電圧は，ピークがほぼ 0.8[V] であり，波形も正弦波と見ることがができる．これは，シミュレーションでも見られるように PWM 電圧の高周波成分をカットできていると考えられる．フィルタ回路を用いた場合の IPMC を流れる電流のピーク値は，0.015[A] であり，正弦波のような波形である．ピーク電流に関しては，直接 PWM 電圧を印加した場合の 1/100 以下である．また，平均電力 $P=2.9[\text{mW}]$ であり，フィルタ回路を用いない場合の 1/100 以下である．PWM 駆動の実験結果からフィルタ回路を用いることで，IPMC に流れる電流を，直接 PWM 電圧で駆動する場合と比べて大幅に小さくすることができ，さらに消費電力についても小さくできることが確認できた．

6. おわりに

本論文では，IPMC の PWM 駆動において直接 PWM 電圧を印加すると大きな電流が流れてしまう問題に対して，フィルタ回路を用いて解決することを提案した．IPMC の動作原理から，IPMC の等価回路を抵抗とキャパシタを直列接続した線形システムで近似し，PWM 駆動時に大きな電流が流れてしまうのは PWM 信号の高周波成分の影響であると考え，高周波成分をカットすることができるフィルタ回路を選定した．そして入力 PWM 電圧から出力までの伝達関数のボード線図を求め，フィルタ回路が低周波のゲインに対しては影響を与えず，高周波に対してはゲインが小さくなることを確認した．また，シミュレーションを行ない，PWM 駆動時に流れる電流が，フィルタ回路を用いることで正弦波を入力した場合と同程度にできることを確認し，実験によって，実際の動作においてもフィルタ回路を用いることで，IPMC に流れる電流が小さくできたこと，それに伴い回路の消費電力も小さくできたことを確認した．本研究により，IPMC の PWM 駆動時のエネルギー効率を良くできると期待される．

参考文献

- [1] 編著代表 長田義仁：“ソフトアクチュエータ開発の最前線”，エヌ・ティー・エス，2004
- [2] Kentaro Takagi, Masanori Yamamura, Zhi-Wei Luo, Masaki Onishi, Shinya Hirano, Kinji Asaka, Yoshikazu Hayakawa：“Development of a Rajiform Swimming Robot using Ionic Polymer Artificial Muscles”，Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1861-1866, 2006
- [3] S.H.Liu：“Fractal Model for the ac Response of a Rough Interface”，PHYSICAL REVIEW LETTERS, VOLUME 55, NUMBER 5, pp.529-532, 1985