

# 卒業論文要旨

## インテリジェント短下肢装具における蹴り出し動作アシスト回路の設計

システム工学群

ヒューマンメカトロダイナミクス研究室 1210120 中野 翔輝

### 1. 緒言

脳卒中等による片麻痺患者は、麻痺した足先の垂れ下がり（下垂足）による転倒の危険性を抱えている。この下垂足を防止するために装着する図 1 に示す従来のプラスチック製短下肢装具（以下 AFO）はその剛性により足関節の底屈、背屈を妨げるため健常者のような自然な歩行が困難である。以上の背景より、従来の AFO では装着者へのリハビリ効果が低く、また心身への負担が大きいといった問題が挙げられる。

次に、本研究グループで開発しているインテリジェント短下肢装具（以下 IAFO）<sup>(1)(2)</sup>を図 2 に示す。この IAFO は歩行時の足関節の減衰力を、昇圧チョッパ回路による DC モータの可変な減衰トルクによって制御することで、下垂足を防ぎつつ、自然な歩行に近づける。また、制動によって生ずる電力を昇圧チョッパ回路により回生することで、長時間の使用を可能にした。

しかしながら、現行の IAFO では DC モータによって足関節の制動を行っているが、健常歩行における蹴り出しのプロセスでは足関節が底屈方向に加速するよう動作する<sup>(3)</sup>ので、IAFO で蹴り出し動作を行うには DC モータの駆動による積極的なアシストが必要である。

そこで本研究では、従来の IAFO の機能に加え、蹴り出し動作のアシストが可能な IAFO の提案と共に、IAFO に実装するコントローラ回路の動作確認を行った。



Fig. 1 AFO



Fig. 2 IAFO

### 2. 提案するインテリジェント短下肢装具

現在開発している IAFO を図 3 に示す。

この IAFO は、麻痺側（Paralyzed side）の蹴り出し時を除いては従来の IAFO のように昇圧チョッパ回路を用いて足関節を制動する。麻痺側の蹴り出し動作については、まず健側（Healthy side）の蹴り出し時の足関節動作を角度センサにより記録し、麻痺側の蹴り出し時に、記録した健側の蹴り出し動作を、麻痺側の IAFO に取り付けられた降圧チョッパの PWM 制御により DC モータの回転速度を可変とすることで再現する。このとき降圧チョッパの PWM 制御では、健側の足関節動作を入力値として、PD 制御によりデューティ比を決定することを構想している。

以上を繰り返すことにより、健側の足関節動作に対して、

麻痺側を半周期遅れで追従する動作を実現する。

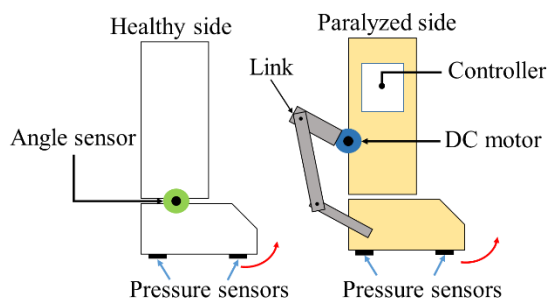


Fig. 3 IAFO model

蹴り出し期間の認識は足裏 2 箇所に取り付けられた感圧センサによって行う。立脚期において、踵が地面より離れてからつま先が離れるまでが蹴り出し期間であるので、この期間でモータによるトルク印可を行う。

### 3. 可逆チョッパ回路

DC モータでの力行と制動を切り替えて行うため、モータ制御には図 4 に示す可逆チョッパ回路を用いる。

この回路は、蹴り出し期間 MOS-FET  $Q_1$  をスイッチングすることで降圧チョッパ回路による力行として、蹴り出し以外では MOS-FET  $Q_2$  をスイッチングすることで昇圧チョッパ回路による制動として動作する。

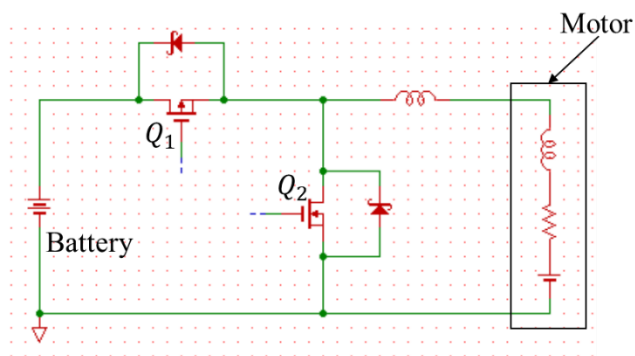


Fig. 4 Two-Quadrant Chopper

降圧チョッパでは、スイッチングのデューティ比  $d$  ( $0 \leq d < 1$ ) を制御することで、バッテリーからモータに負荷される電圧を平均的に下げることによって角速度  $\omega$  を可変に制御する。この時のモータに負荷される平均電圧  $V_{Dout}$  を式 (1) に示す。バッテリー電圧を  $V_b$  とする。

$$V_{Dout} = dV_b \quad (1)$$

アクチュエータ係数を  $K$  とすると、モータの関係式より、逆起電力  $V_c$  は式 (2) となる。

$$V_c = K\omega \quad (2)$$

回路内の平均電流を  $I$ 、抵抗値を  $R$  とすると、モータ周辺の回路方程式は、

$$dV_b = RI + K\omega \quad (3)$$

となる。式 (3) より、デューティ比を制御することでモータの角速度を可変にすることができる。

昇圧チョッパでは、デューティ比を制御することでモータ電流を変化させモータのトルクを制御する。これを利用して、足関節制動トルクを可変に制御する。また、モータの回転によって生ずる逆起電力を昇圧させることで、バッテリーに電流を流入させ、エネルギーの回生を行う。

昇圧チョッパの出力する平均電圧  $V_{Uout}$  を式 (4) に示す。

$$V_{Uout} = \frac{1}{1-d} V_c \quad (4)$$

よって、回路方程式は、逆起電力と角速度の関係式 (2) を用いて、

$$K\omega = RI + \frac{1}{1-d} K\omega \quad (5)$$

となる。ここで、モータの回転運動方程式を (6) のように表す。モータの慣性モーメントを  $J$ 、粘性摩擦係数を  $B$ 、負荷トルクを  $T$  とする。

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega = T \quad (6)$$

モータ電流とトルクの関係式を (7) に示す。

$$T = KI \quad (7)$$

式 (5) ~ (7) をまとめて以下となる。

$$J \frac{d\omega}{dt} + \left( B + \frac{d}{1-d} \cdot \frac{K^2}{R} \right) \omega = 0 \quad (8)$$

式 (8) より、デューティ比を制御することで、モータの制動トルクを可変制御することができる。また、式 (4) より、出力電圧をバッテリー電圧より大きくすることで、モータの逆起電力がバッテリー電圧より低くともバッテリーに電流を流し充電することができる。

#### 4. 動作確認実験

図 4 の模式図に示す可逆チョッパ回路について、MATLAB/Simulink を用いた回路シミュレーションを行った。その後、実装回路にて安定化電源を用いて入力電圧の降圧と昇圧動作を確認した。シミュレーション、実験共に MOS-FET のスイッチング周波数は 10[kHz]、測定時のサンプリング周波数は 1[MHz] で行った。デューティ比は 70[%] とした。それぞれの実験では、電力供給を始めた後 1 分程待機することで、十分な定常状態として測定を行った。

##### 4.1 降圧動作確認

図 4 の可逆チョッパ回路に、バッテリーの代わりに定電圧 5.0[V] を接続 (図中左側) し、出力側のモータ部分に 10[Ω] の抵抗を接続した。測定した出力電流、及び PchMOS-FET  $Q_1$  へ

の入力電圧の測定値 2 周期分を図 5 に示す。青の波形が MOS-FET への入力電圧を示し、オレンジの波形が抵抗に流れる電流を示している。

降圧時にスイッチングする MOS-FET は Pch なので、ゲート電圧が 0[V] となる Low 入力 のときに MOS-FET は電流を流す。よって、FET が on になったときに電流値が立ち上がり、ピーク値となった後スイッチングの切り替わり点である 70[μs]、および 170[μs] で FET が off になり、電流が立ち下がるという動作が確認できる。入力パルスに対して、出力の立ち上がりが遅れるのは、回路内のインダクタがエネルギーを蓄えるためである。

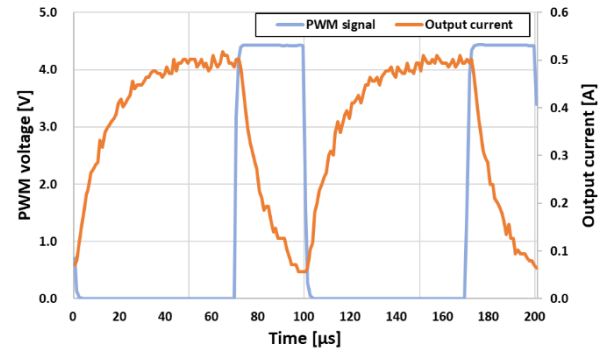


Fig. 5 Step-down wave measurement

次に、降圧動作時の電圧の測定値とシミュレーション値との比較を図 6 に示す。シミュレーションによって得られた波形を黒、測定値をオレンジで示している。

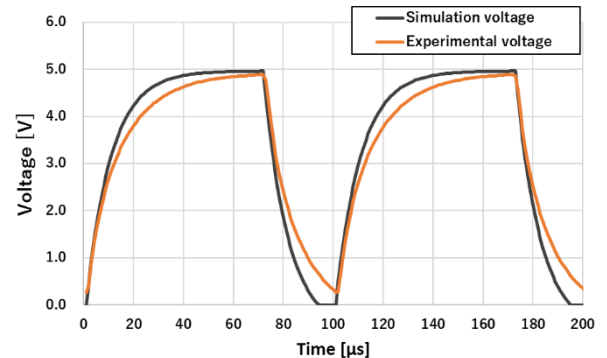


Fig. 6 Compare of step-down wave simulation and experimental voltage

シミュレーションも測定値と同様、on 時間 (図中 0~70[μs]、100~170[μs]) 中に電圧が上昇、off 時間中に電圧が下降するという傾向を示している。よって、シミュレーションと測定値がともに入力電圧を平均的に下降させていることがわかる。図 6 に示された時間範囲の測定値を平均すると 3.4[V] であり、実際に 5.0[V] から降圧されているとわかった。

以上の動作より、降圧チョッパ回路として動作しているとわかる。

##### 4.2 昇圧動作確認

図 4 の可逆チョッパ回路のモータ部分 (図中右側) に入力電圧 1.0[V] を接続し、出力電流を測定した。出力側には 4.8[V] のニッケル水素バッテリーを接続した。測定した出力電流と NchMOS-FET  $Q_2$  への入力電圧の測定値を図 7 に示す。凡例は図 5 と同様、出力波形をオレンジで、スイッチング波形を青で示している。

昇圧時にスイッチングする MOS-FET は Nch なので、ゲート電圧が 4.5[V] となる High 入力 のときに MOS-FET は電流

を流す。そのため、MOS-FET の on と off の切り替わる 70[ $\mu$ s]、および 170[ $\mu$ s]のタイミングで電流がバッテリー方向へ流れている。よって、一定電圧のバッテリーに対して電流が流れ込んでいるため昇圧されており、また、バッテリーが充電されていることがわかる。

次に、同様の電源を接続した状態で入力側の電流を測定した。入力電流の測定値とシミュレーションとの比較を図 8 に示す。測定値をオレンジで、シミュレーションを黒で示す。

PWM の on 時間で電流値が上昇し、off 時間の間に電流値が 0 に下降する傾向が同様であるので、シミュレーションした可逆チョップパ回路の昇圧動作と同様に入力電圧を昇圧できているとわかる。

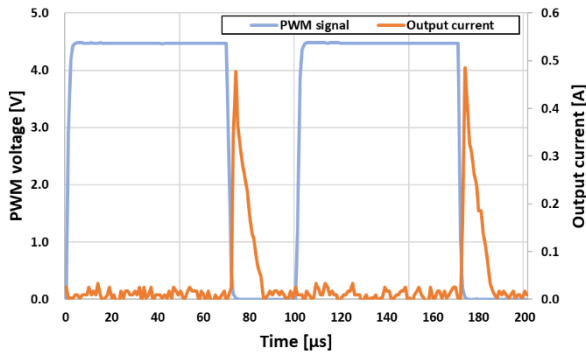


Fig. 7 Step-up wave measurement

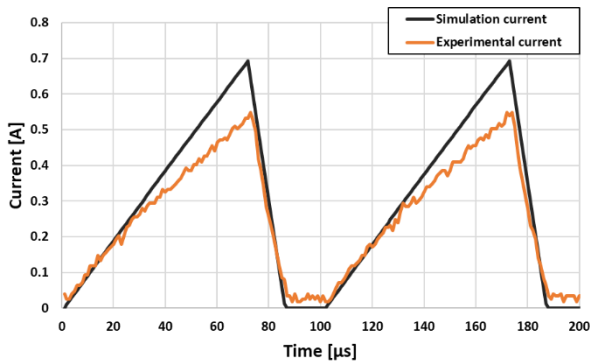


Fig. 8 Compare of step-up wave simulation and experimental current

## 5. 結言

本研究では、IAFO に新たに蹴り出し動作のアシストを行うための機能を提案した。

これを実現するため、DC モータをコントロールする可逆チョップパ回路の実装、動作確認を行った結果、降圧時は、出力電圧の on、off を制御することにより、入力電圧を平均的に下げていることから、降圧チョップパとしての動作を行っていることを確認した。昇圧時は、MOS-FET に入力するパルス信号が Low の時に入力電圧が昇圧されることにより、バッテリーへ電流が流れていることから、昇圧チョップパとしての動作を行っていることを確認した。

以上の結果から、降圧チョップパによるモータ駆動、昇圧チョップパによる制動と電力回生が可能であり、IAFO による蹴り出し動作アシストの実現が期待できる。

今後は、歩行 1 周期ごとに計測した健側の足関節回転角を麻痺側に出力するシステムの開発を行い、可逆チョップパ回路とともに IAFO に実装する。

## 文献

- (1) 亀山裕生, 井上喜雄, 芝田京子, 金沢一成, 河辺裕隆, 吉門潤 “エネルギー回生を考慮した短下肢装具の開発

における実験評価” 第 50 回中国四国支部総会・講演会講演論文集, 日本機械学会, (2012), pp. 81401-81402

- (2) 江口翔平, 井上喜雄, 芝田京子, 村上翔太郎, 四方大輝 “インテリジェント短下肢装具におけるエネルギー回生効率の数値シミュレーション” 第 53 回中国四国支部総会・講演会 講演論文集, 日本機械学会, 講演番号 616 (2015)
- (3) 芝田京子, 井上喜雄, 栗原正嗣, 松村圭介 “エネルギー回生可能な短下肢装具の開発研究” Dynamics & Design Conference 2006, 日本機械学会, (2006), pp.3471-3475