

多軸性関節による回生エネルギーを用いた歩行発電機の開発

Development of Electric Generator using Regenerative Energy by Multiaxial Joints Motion while Walking

知能機械システム工学コース

ヒューマンメカトロダイナミクス研究室 1225034 竹谷 梓

1. 緒言

片麻痺患者の歩行では、麻痺側爪先が垂れ下がり転倒などの危険がある。対策としてはプラスチック製短下肢装具(図1)の着用が有効であると臨床上よく知られている⁽¹⁾が、その高剛性により足関節が固定され自然な歩行ができない⁽²⁾。この改善には足関節への歩行状態に合わせた制動モーメント供給が考えられるが、ウェアラブルな福祉介護用装具全般においてこのようなアクティブ装具を実装する場合、軽量化や長時間の制御のための電力源確保などが課題となる。

よって本研究グループではこれまで図2に示すインテリジェント短下肢装具(以下、IAFO)を開発してきた⁽³⁾。これは足関節が自由に動作する短下肢装具をベースとしており、歩行状態に合わせDCモータより制動モーメントを生成し足関節へ供給する。同時にDCモータを介して歩行時の運動エネルギーを回生し制御用電力を賄っているため、外部電源を必要とせず小型バッテリーのみで駆動する。

しかし、現行IAFOは離地中において供給する制動モーメントの不足が提言されており⁽⁴⁾、解決への課題としては高出力のDC

モータへの置換や使用のための電力確保、最適化などがあげられる。

以上からIAFO改良のための電力確保を目的とし、図3に示す発電機を製作した。これは歩行時に動作する関節のうち最大の自由度(3自由度)を有する、多軸性関節よりエネルギーを回生可能とするため、入力が1自由度であるIAFOの機能を3自由度へ拡張し発電可能とした装具である。本研究ではこれを用いて足関節補助のためより大きなバッテリー電圧を獲得することを目指す。本報では製作した発電機のコントローラ回路が要求通り動作し充電が可能であるか、また安定してより大きな電圧を獲得可能であるか実験を行い確認した。

2. DC モータによるエネルギー回生と3自由度への拡張

本研究において発電機は足関節以外への取り付け(本研究では股関節側面)を想定し製作した。これは前述のとおりIAFOの機能を3自由度へ拡張したものであるため、まずIAFOの原理について説明する。

DCモータは足関節の1自由度回転に伴い、回転速度 ω に比例した電圧が端子間に生成される。このとき生じた誘導電圧 E_{mi} は次の式で表すことができる(K : アクチュエータ係数, ω : 角速度)。

$$E_{mi} = K\omega \quad (1)$$

式(1)より、DCモータは回転による運動エネルギーから電気エネルギーへ変換する発電機として利用可能である。このとき変換した電気エネルギーは回生エネルギーと呼称される。

しかしDCモータを発電機とみなす場合、回生エネルギー充電のためDCモータとバッテリーを単純に接続しても、電圧 E_{mi} がバッテリー電圧よりも低いと充電はできない。よってDCモータ-バッテリー間に昇圧チョップ回路(図4)を挿入し、昇圧チョップ回路を用いて切り替え制御をおこなうことによって電圧 E_{mi} より常に大きなバッテリー電圧 E_b を得ることを可能としている。

昇圧チョップ回路は、on回路とoff回路を高速でPWM制御することで入力電圧よりも高い出力電圧を獲得可能である。このとき入力電圧 E_{mi} とバッテリー電圧 E_b の関係は、スイッチ Q_i のon時間に対する周期の比であるDuty比 d を用いると次の式より表される。

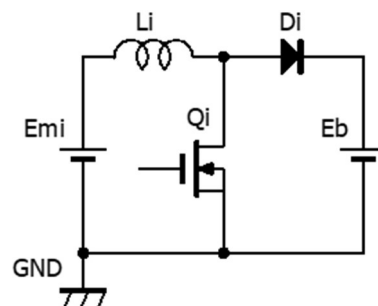


Fig.4 Boost chopper circuit



Fig.1 Plastic ankle foot orthosis

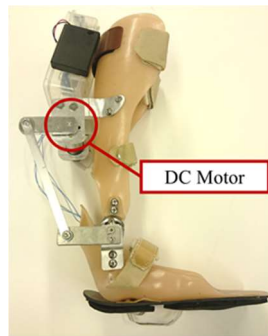
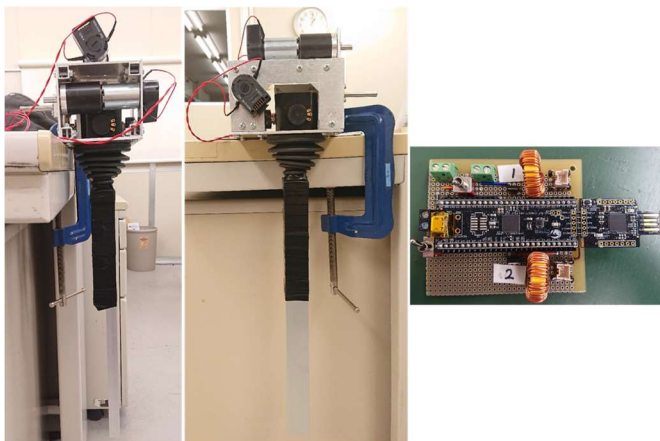


Fig.2 Intelligent AFO



(a)Side view of the body. (b) Front view of the body. (c)Controller board

Fig.3 Electric Generator by Multiaxial Joints Motion

$$E_b = \frac{1}{1-d} E_{mi} \quad (2)$$

よって、Duty比 d を制御することで任意のバッテリー電圧 E_b は常に充電可能となる。以上より現行IAFOは駆動する際、歩行時のエネルギーを回生し制御用電力を賄っている。

これまで述べた原理より、IAFOは1自由度を持つ足関節に対し1本のDCモータを対応させ発電を行っている。これを3自由度まで拡張できれば、歩行中動作する主な関節全てで発電可能である。しかし人間への着用を考慮すると、将来的な軽量化のしづらさからDCモータの増加は避けるべきだと考えた。よって、本研究では歩行時に動作する関節の回転軸の最大値を3軸とおいたうえで、軽量化の観点から入力軸は3自由度を有し、かつ出力軸を1自由度の回転運動2つとなるように発電機の機体を製作し、この2つの回転運動によって生じる誘導電圧を昇圧チョップの入力として用いる⁽⁶⁾ものとした。

以上より発電機のコントローラ基板上に要求する点は、(a)昇圧チョップ回路であること、(b)2つのDCモータから生成した電力を1つのバッテリーに充電可能であることの2点となる。これらを踏まえ考案した、2つの入力電圧 E_{m1} 、 E_{m2} を、昇圧チョップ回路を介し並列にバッテリー E_b へ接続する発電機のコントローラ回路を図5に示す。なお実際にはDCモータの入力軸の両回転方向に対応するため、全波整流回路としてダイオードブリッジが各入力電圧-回路間に挿入される。

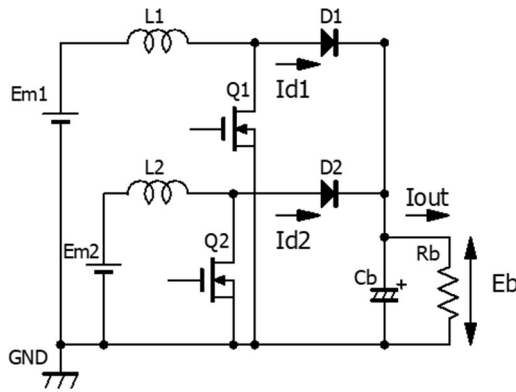


Fig.5 Developed parallel boost chopper circuits

3. 充電確認実験

3.1 定電圧入力による充電実験

Smithらの報告⁽⁵⁾より、昇圧チョップ回路を並列接続したとき図6のようにスイッチング波の片方を180°ずらすインターリーブ方式を採用することで効率が向上することが提言されている。この結果を踏まえ、まず製作した発電機によって発電が可能か確認し、次にインターリーブ方式の有効性を確認するため、入力に定電圧を用いて充電実験を行った。

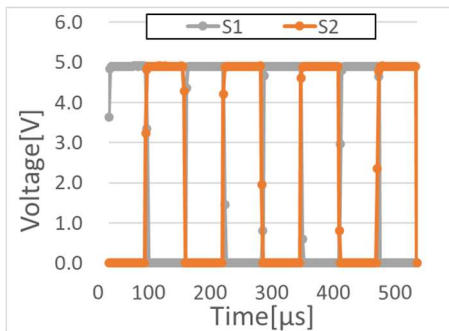


Fig.6 Switching wave of condition "Shift".

Table 1 Input voltage pattern

Input[V]	a	b	c
Em1	1.00	1.00	1.00
Em2	1.00	0.50	0.00

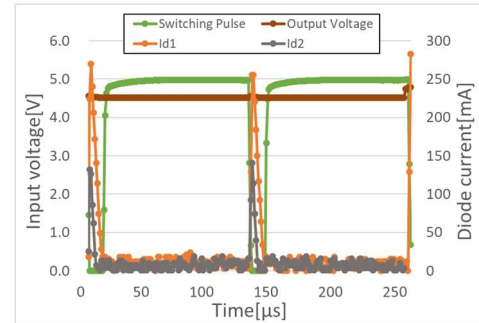
回路図(図5)のMOSFET Q_1 、 Q_2 へ周波数8[kHz]⁽⁶⁾のパルス波を入力しDuty比を0.1,0.5,0.9と変更、2つの入力電圧 E_{m1} 、 E_{m2} に表1に示す3パターンの定電圧を入力し、1分間充電を行った。出力電圧 E_b を、サンプリング周波数100[kHz]、充電時間60秒のうち最後の4秒間測定し、この時間平均と標準偏差を算出した。そして Q_1 、 Q_2 を同期させたとき(以下、Sync)と、 Q_2 の位相を180°ずらすインターリーブ方式としたとき(以下、Shift)の比較を行った。

結果について表2にまとめた。また、一例としてMOSFET Q_1 の入力波2周期分の、入力条件bにおけるDuty比90[%]の出力電圧 E_b と各ダイオード D_1 、 D_2 におけるダイオード電流 I_{d1} 、 I_{d2} の時刻歴波形を図7に示す。

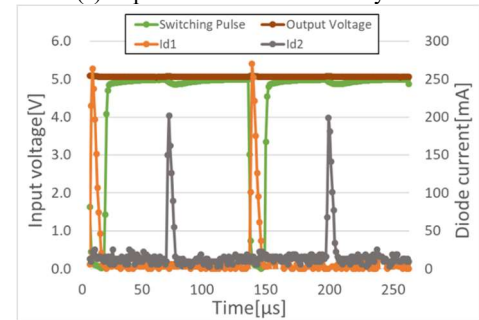
Table 2 Output for each term

Pattern	Output voltage Vb[V]			Standard deviation σ [mV]		
Duty[%]	10	50	90	10	50	90
a_sync	1.71	3.84	4.52	3.20	6.43	7.26
b_sync	1.47	3.51	4.38	2.64	5.28	6.33
c_sync	1.46	3.65	4.62	2.59	5.09	6.55
a_shift	1.75	4.34	5.06	4.42	5.66	6.86
b_shift	1.49	3.75	4.54	3.90	4.89	7.08
c_shift	1.43	3.57	4.70	4.04	5.72	7.55

図7(a)より、スイッチング波が0[V]となりMOSFETがoffになった瞬間、各ダイオード電流が流れている、すなわちバッテリーに電流が流れ充電できていることが確認できた。また図7(b)よりスイッチング波の片方が設定どおり180°ずれ、ダイオード電流 I_{d2} が流れるタイミングが異なっていることが読み取れる。このときダイオード電流 I_{d2} はSyncが約130[mA]、Shiftが約200



(a) Experimental condition is "Sync".



(b) Experimental condition is "Shift".

Fig.7 Output voltage E_b , current of diode I_{d1} and I_{d2} , and switching waves Q_1 for duty is 90[%] and input voltage pattern shown in TABLE 1 is "b".

[mA]となり、Shiftの方がバッテリーへ流入する電流量がより大きくなった。

ここで出力電圧 E_b について Shift/Sync の比をとると、最大増加率 12.9[%]、最大減少率 2.3[%]となった。電力は電圧の2乗を内部抵抗で除算した値であり、9条件中7条件で Shift/Sync 比が大きくなっていることから、本実験においては出力電圧 E_b についてインターリーブ方式が有効に作用しているといえる。

標準偏差 σ については Shift/Sync 比が小さいほうがばらつきは少ない、すなわちリップルが少なく安定しているといえるため、インターリーブ方式が有効であるといえる。しかし標準偏差 σ の Shift/Sync 比は9条件中6条件で上昇し、Shiftにおいて有効性が見られるとはいえない。ただし、出力電圧増加率 E_b がより大きくなる Duty 比 50, 90[%]に着目すると、最大増加率は 55.9[%]から 15.9[%]に下がり、最大減少率は 11.9[%]の据え置きとなる。よって本実験結果からはより Duty 比が大きくなると電圧を獲得できるときほど、標準偏差 σ に対しインターリーブ方式は有効に作用しているといえる。

以上より、定電圧入力時に考案した図5の回路が正しく動作し、またインターリーブ方式によって出力電圧 E_b が向上し、標準偏差 σ が減少することが確認できた。

3.2 等角速度DCモータ入力による充電実験

3.1節では図5の回路について、定電圧入力時にインターリーブ方式が有効に作用することが確認できた。本節ではDCモータ入力時において同様の結果が得られるか確認を行う。

DCモータを入力とするため製作した装置についての、昇圧チョップ回路1つ当たりの概略を図8に示す。DCモータ同士はカップリングで連結しており、モータBに生じる誘導電圧が表1に示す3条件と同一になるよう、連動するモータAに安定化電源から電力を供給した。実験では図5に示す通り、出力電圧 E_b に対し図8の回路を並列接続するものとした。実験条件は3.1節と統一しつつ、さらに詳細なデータを獲得するためDuty比30, 70[%]で追加測定を行った。

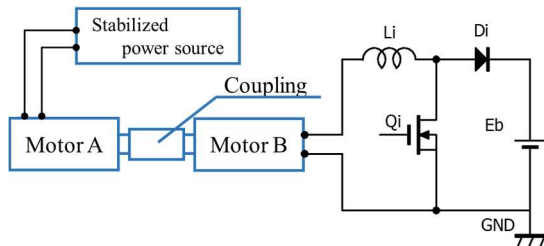


Fig.8 Circuit outline for DC motor input per one boost chopper circuit.

Table 3 Output voltage for each term

	Duty[%]	10	30	50	70	90
Output voltage[V]	a_sync	0.978	1.29	1.66	1.78	1.97
	b_sync	0.882	1.15	1.47	1.57	1.65
	c_sync	0.893	1.19	1.39	1.64	1.63
	a_shift	1.03	1.38	1.73	1.82	1.92
	b_shift	0.880	1.27	1.59	1.65	1.71
	c_shift	0.865	1.24	1.44	1.59	1.62
Standard deviation [mV]	a_sync	18.2	26.4	34.6	40.2	21.3
	b_sync	19.8	21.9	29.7	35.7	16.9
	c_sync	17.9	16.4	31.7	29.7	12.8
	a_shift	14.1	16.9	15.0	22.8	18.3
	b_shift	18.6	22.0	23.1	30.6	19.5
	c_shift	20.7	21.7	22.9	22.5	13.0

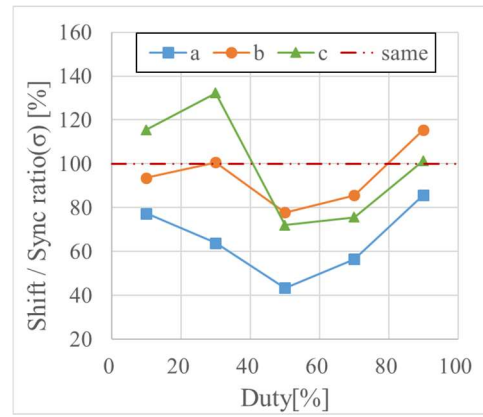


Fig.9 Shift/Sync ratio of Standard deviation σ each duty.

結果について表3にまとめた。出力電圧 E_b について Shift/Sync 比を取ると、実験条件 15 条件中 10 条件において Shift/Sync 比が大きくなった。また、各入力電圧条件のピークは Duty 比 30[%]、最大増加率は 10.6[%]、最大減少率 3.0[%]となったことから、特に Duty 比 30-50[%]においてインターリーブ方式が効果的に作用したといえる。

DCモータ入力時の標準偏差 σ について Shift/Sync 比をとる(図9)と最大減少率 56.7[%]の大きな減少が見られた。減少のピークは Duty 比 50[%]、特に Duty 比 50-70[%]において標準偏差はインターリーブ方式が効果的に作用し、リップルが抑えられたと考えられる。

DCモータ入力時の標準偏差 σ においてインターリーブ方式が有効に作用した理由としては、DCモータを昇圧チョップの入力として用いることで生じる制動モーメントの影響と推測する。DCモータ入力時に回路内へ入力される電機子電流 I は、チョップ制御により一定の値をとらず振動しているといえる。このとき式(2)より図8に示すDCモータBにモーメントが生じ、モータAに作用することで、昇圧チョップ回路の入力 E_{m1} , E_{m2} は一定にならず定電圧入力時よりも不安定であると考えられる。また既報より、充電時間の短さが効率に悪影響を及ぼす可能性が報告されていることから、タイミングをずらすことで結果的に充電時間がSyncの2倍になるShiftのほうが安定してバッテリーに電流が流れると考えられる。よって、DCモータ入力時は特に標準偏差 σ に対しインターリーブ方式が有効に作用したと考えられる。

以上の結果より、本研究におけるコントローラ回路(図5)の2つのスイッチング波入力にはインターリーブ方式を採用する。

4. 結言

本報ではIAFO改良にあたり不足する電力を補うため、IAFOの機能を3軸まで拡張した発電機を提案し、発電に必要な要件を満たすコントローラ回路を製作、回路が要求通り動作することを確認した。これにより歩行発電機を用いて多軸性関節より発電し、IAFOへの更なる電力供給について見通しを立てることができた。また安定してより大きな電圧を獲得するため並列接続した2つの昇圧チョップ回路のうちスイッチング波の片方を180°ずらすインターリーブ方式を採用することを決定した。

今後は大腿部側面に試作した発電機を取り付け、歩行時の股関節を対象に発電量の実測を行う。また、更なる小型軽量化やより効率の良い回路パラメータを設定し製作することで、より容易に発電可能な歩行発電機の製作を目指す。

参考文献

- (1) 山本澄子, 海老名政彦, 川合秀雄, 岩崎満男, 宮崎信次, 窪田俊夫, 山口 恒弘: 短下肢装具の可撓性と初期角度が片麻痺患者の歩行に及ぼす影響; 12.生体の運動機能とその復元一,

バイオメカニズム, pp.253-263(1994)

- (2) 江原義弘, 窪田俊夫, 土屋辰夫, 野坂利也, 山本澄子: 下肢装具のバイオメカニクス-片麻痺歩行と装具の基礎力学-, 医歯薬出版株式会社, pp.26(1996)
- (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, pp. 3471-3475 (2006)
- (4) 亀山裕生, 井上喜雄, 芝田京子, 金澤一成, 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期日本機械学会中国四国支部総会・講演会 講演論文集, 日本機械学会, pp.81201-81202 (2012)
- (5) N. Smith, R. McCann “Analysis and simulation of a multiple input interleaved boost converter for renewable energy applications”, 2014 IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference, 2014, pp1-7
- (6) 竹谷梓, 芝田京子, 多軸性関節を対象とした歩行発電機の回路設計, 第62回自動制御連合講演会, 2019, 講演番号1M1-03
- (7) 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