

# 電動車椅子のマイコン制御の基礎研究

斎藤彰利\*, 大口國臣\*\*

(昭和62年8月21日受理)

## Basic study of a microcomputer-controlled wheelchair

Akitoshi SARTO\* and Kuniomi OGUCHI\*\*

*Abstract* – Improvement of performance and operation of electric wheelchairs is discussed. The field investigation showed that existing wheelchairs had many problems such as a short driving range, difficulty in operation. Most of these problems are overcome by introducing four-quadrant chopper systems and a microprocessor-based controller. The speed control algorithms and the speed-sensorless speed detecting method are proposed. The preliminary experiments showed that the proposed controller would be successfully applied to electric wheelchairs.

### 1. まえがき

現在、歩行の困難な人々のために電動車椅子が実用化され、多くの使用者に大変に喜ばれている。しかし、種々の点で、使用者から現状の電動車椅子についての不満を聞く。例えば、思い通りに直進しない、速度のコントロールが困難である、1回充電当りの走行距離が短い、等々である。これらの不満は、従来の電動車椅子に十分な制御がかけられていない点に起因するものであろう。

本論文は、電動車椅子にマイクロコンピュータを搭載し、適確な制御を行うことにより、誰もが思い通りに操作することが可能のように改良するアプローチについての基礎研究の成果をまとめたものである。主に、DCモータのコントロールの基本的な方法、コンピュータに入力するための電圧・電流の検出方法とそれらの制御、また付随して問題となる電力部分と制御部分の絶縁、ノイズ混入の対策等について報告する。

### 2. 従来の電動車椅子の構成とその問題点

現在実用化されている電動車椅子の構成をFig. 1に示す。2台の永久磁石界磁型DCモータからの回転をギア、プーリー等で減速し、左右各々の車輪を駆動している。電源としては、12V、36Ah程度の鉛蓄電池を2個程搭載しているものが多い。

モータのコントロールは、右手の肘掛け近くに設置されたコントロールボックスのジョイスティックにより行われる。このスティックを進行したい方向に倒すことにより、モータが駆動される。

このような電動車椅子を実際に使用している2名から使用中の電動車椅子の不満点を聴取した。それぞれの不満を、その原因であると考えられる項目別にまとめると次のようになる。

- ① モータの回転数を適確に制御していないためによるもの
  - ・加減速時のスムーズさに欠け、ショックが大きい。
  - ・下り坂でブレーキが十分に効かず危険。

\* 茨城大学大学院工学研究科電気工学専攻（日立市中成沢町）

Graduate student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

\*\* 茨城大学工学部電気工学科（日立市中成沢町）

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

- ・坂を横切るとき、進路が下り側に曲がってしまう。
  - ・道の湾曲等で直進できなくなる。
- ② 電源の容量不足, または電源の利用効率が悪いことによるもの
- ・一回充電での走行距離が短い。
  - ・充電に時間がかかる。
  - ・バッテリーが大形で重く, 取扱が不便。
- ③ その他の理由によるもの
- ・騒音が大きく, 室内での使用に不適当。
  - ・操作が難しく, 使いこなせるまでに時間がかかる。
  - ・故障が発生すると危険(暴走等)。

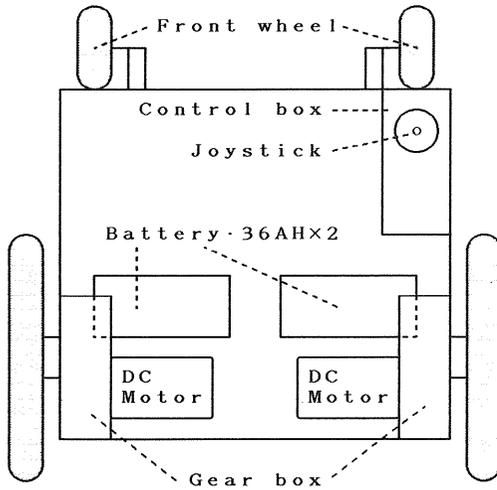


Fig. 1 Structure of electric wheelchair.

①に分類した問題は, 従来の電動車椅子がモータの回転数フィードバック制御を実施していないためであると考えられる。モータ回転数のフィードバック制御を適確に行うことにより解決されるであろう。②に挙げた問題は, 従来のものがエネルギーの利用効率が悪く, 無駄になっている電力が多いためであろう。これは, 電動車椅子が坂等を下る時モータが回転させられる事により発電機として働き, 発生する電力をバッテリーに還元する回生制動を行うことにより改善される。

③に分類した問題の騒音については, モータへの電流制御をPWMにて行う際, パルス周波数を可聴域より高く設定することが必要である。また操作が困難である点については, 従来のものは, レバーを倒した角度と走行速度が必ずしも一致しないという点に問題があるが, これはマイクロコンピュータを搭載し, レバーを倒した

角度と速度の関係を適切に設定することで解決されよう。また, 充電時のスイッチ操作等も極力簡素化し, フールプルーフ化することが必要である。故障時の危険性の低減についてはノイズに強い等の信頼性が高いシステムを構築することと併せ, 自ら故障を判断し, 暴走等危険な状態に陥らないようにするフェイル・セーフ設計が必要である。

以上のような点に留意し, 電動車椅子のシステムに必要なであろう要素をまとめて示す。

- ・戸内外の種々多様な環境に適応し, 適確な動作を行う制御アルゴリズム
- ・省電力化, 回生動作の実行
- ・信頼性の高いシステム, また万一のトラブルにも安全なフェイル・セーフ動作
- ・ノイズ対策, また制御部と電力部を絶縁するシグナルアイソレーションの実施
- ・小型, 軽量, 堅牢, 静粛

### 3. DCモータのコントロール法

実際に既存の電動車椅子に搭載されているモータに新たに回転計を取り付けることは構造的にも経済的にも困難であり, 機器構成も複雑になる。また, 機器の性質上, 超高精度の回転数検出は不要であると考えられる。そこで, ここではモータの両端電圧 $V_m$ と電機子電流 $I_m$ をセンシングし, これらのデータよりコンピュータ内で回転数を計算により求める方法を取っている。

一般にDCモータでは,

$$\begin{aligned} \omega_m &= \frac{1}{\phi} (V_m - I_m \cdot R_a) \\ &= \frac{1}{pMI_f} (V_m - I_m \cdot R_a) \quad [\text{rad/s}] \end{aligned} \quad (1)$$

$p$ : 極対数,  $M$ : 電機子巻線と界磁コイルの相互誘導係数〔H〕

$I_f$ : 界磁電流〔A〕,  $I_m$ : 電機子電流〔A〕,  $V_m$ : モータ端子電圧〔V〕

$R_a$ : 電機子抵抗〔 $\Omega$ 〕,  $\omega_m$ : モータ回転角速度〔rad/s〕

$\phi$ : 磁束鎖交数(=  $pMI_f$ )

なる関係式が成立する<sup>(2)</sup>。

$I_f$ —一定(実際の電動車椅子のモータは永久磁石界磁を行っているため)だから, あらかじめ実験により各定

数  $p, M, R_a$  を決定しておけば, モータの端子間電圧  $V_m$  と電機子電流  $I_m$  を計測することによりモータの回転数を演算から求めることが可能となる。

モータへの供給電流の制御法として, ここではPWM (Pulse Width Modulation) 方式を採用している。PWMのパルス周波数  $f_p$  は455Hzと設定した。また通流率の分解能は0~255の256段階となっている。

フィードバック制御の方式としては, 積分制御を用いている。積分制御を式で表すと,

$$\begin{aligned} e(k) &= r(k) - n(k) \\ u(k) &= u(k-1) + K_i e(k) \end{aligned} \quad (2)$$

である<sup>(3)</sup>。ここに,  $u$  は通流率指令値,  $e$  はエラー値,  $n$  はモータ回転数,  $r$  は指令回転数である。 $K_i$  は積分ゲインである。

#### 4. 主回路

##### 4.1 システム全体の動作

実際に電動車椅子にコントロール回路を組み込む前に, DCモータの制御法の基礎を確立するため, 100V, 1kW級のDCモータをコントロールする為のシステムを構成した。全体の回路構成をFig. 2に示す。モータを正転, 正転回生, 逆転, 逆転回生にて運転するために4象限チョッパシステムとなっている。

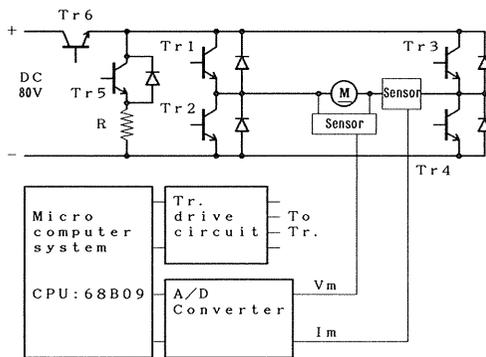


Fig. 2 Motor drive circuit.

正転駆動時の電流の流れをFig. 3に示す。この時にはTr 4は常にONとしておく。ここでTr 1をPWM指令によりON-OFFすると, 電流は実線で示すように流れ, モータが駆動される。回生運転を行う際には, Tr 2をONとし, 他はOFFとしておく。この時電流はモータの

起電力によりFig. 3の点線で示すように流れる。電流が適当な値まで立ち上がった時点でTr 2をOFFすると, モータ内部のインダクタンスにより電流はすぐには減衰することはない, D 1 - バッテリー - D 4 と一点鎖線で示すように流れ, バッテリーが充電される。

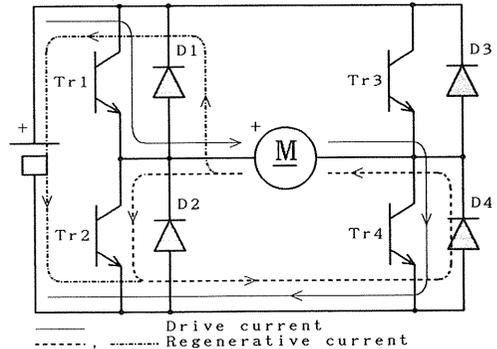


Fig. 3 Current flow pass in chopper circuit.

実験回路の場合は, 電源をバッテリーからでなく, 三相交流の整流により得る構成となっており, 回生電流を吸収することは不可能である。この為, Tr 5を電源側に並列に入れ, Tr 6を電源に直列に挿入している。回生動作を行う際には電源を切り離すためにTr 6をOFFとし, Tr 5をONとして, Tr 5のエミッタに接続された抵抗により回生電力を吸収している。

##### 4.2 モータ電圧・電流検出部

モータの回転数をモータの端子電圧と電機子電流により計算する方法では, 電圧, 電流の双方をコンピュータに同時に取り込む必要がある。そのための計測をFig. 4で示すように計測器のマイナス側が共通(共通)となるように行うと(マイコンによる計測ではこのようにせざるを得ない), 被測定回路をショートしてしまう。通常のメータのように, 回路のどこに挿入しても正しく計測することが出来るようにするためには, 測定回路の特定箇所がGNDとならないアイソレーションアンプの必要性が出てくる。

また, 測定回路(この場合はコンピュータ)と被測定回路(この場合はチョッパ回路)の電源は双方ともAC 100Vより取られている。この双方が電圧電流検出回路等のGNDを介して接続されたとき, チョッパ側から電流がGNDを通して流れ込んでくる恐れがある。特に実際の電動車椅子では, コンピュータの電源とモータの電

源とを共用する必要があり、絶縁型計測アンプの必要性は非常に大きい。

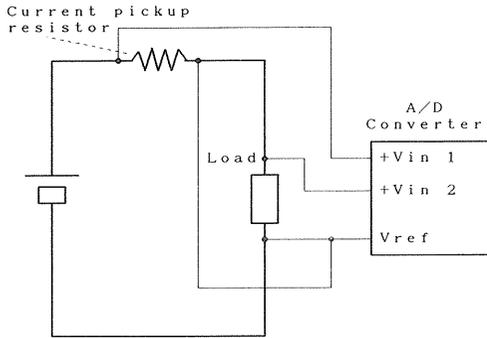


Fig. 4 Poor example of current and voltage instrumentation.

本回路では、電圧計測にはBi-FET入力を持つオペアンプを使用した絶縁増幅器として働く差動増幅器を使用した。差動増幅器を使用することでコモン・モード・ノイズの混入を最小限にすることができる。電流検出にはホール効果を利用した原理的に入出力間が絶縁された直流電流検出モジュール(東北金属工業製MDCS,タイプA07-051)を使用した。

電圧検出回路の出力電圧レンジは、

$$V_{out} = 1.26 + \frac{V_{in}}{100} \quad [V] \quad (3)$$

(但し  $0 \leq V_{out} \leq 2.5[V]$ )

となっている。つまり約±120Vの計測が可能である。分解能は、コンピュータのA/Dコンバータの仕様より、1V/divとなっている。電流検出回路の出力電圧レンジは、

$$V_{out} = 0.5 + \frac{|I_m|}{10} \quad [V] \quad (4)$$

(但し  $0 \leq V_{out} \leq 2.5[V]$ )

となっており、約±20Aの計測が可能である。分解能は100mA/divである。

## 5. ソフトウェア

### 5.1 概説

PWMパルスが発生させる方法として、ハードウェアにてパルスが発生させ、コンピュータ側からは通流率の

みを指令する方法と、パルスを全てコンピュータから発生させる方法の2通りが考えられる。ここでは後者の、パルスをソフトウェア・タイマにより発生させる方法を取った。この方法は、ハードウェアに多くを頼らないため、仕様の変更を容易に行うことができ、また故障箇所が少ないため信頼性が高い。反面、ソフトウェアの負担が大きくなり、高速処理を要求されることと、また特にフィードバック制御を必要とするアルゴリズムを記述する際には複雑なインターバル割り込み処理が必要となる等の問題がある。しかし、今回は、予備実験であることと、ソフトウェアの可能性を追求するため、後者を採用した。この結果、後述のようにパルス周波数を可聴域に設定せざるを得なくなった。次の研究段階では、PWM ICの使用により、非可聴域のパルス周波数の設定を予定している。

今回使用したプログラムでは、高速処理が必要とされる部分には全てアセンブリ言語を使用し、処理の能率化をはかっている。

### 5.2 オープンループ運転用ソフトウェア

オープンループ実験に用いたプログラムの構成図をFig. 5に示す。プログラムAはBASIC語で記述されており、オープンループ運転を行う際に必要なPWM通流率、回転方向、回生動作の有無などの情報をオペレータの指示に従いメモリ上に展開する。プログラムBは68B09CPUのアセンブリ語で記述されており、プログラムAでメモリ上に展開されたPWM指令データを順次読み込み、I/Oポートを通じてTr.1~Tr.6のトランジスタをスイッチングし、PWMを行う。同時にPWMの1周期毎にモータの端子電圧 $V_m$ と電機子電流 $I_m$ をA/Dコンバータより読み込みメモリ上に書き込んで行く。

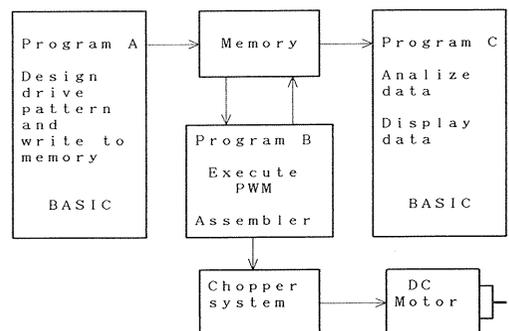


Fig. 5 Structure of open-loop control.

PWMのパルス周波数はソフトウェアの処理能力に若干の余裕を持たせ、455Hzと設定した。通流率は、ON期間が0から最大255までの256段階指定でき、したがって256の分解能を持つ。

プログラムCは、プログラムBにより計測されメモリ上に書き込まれたモータ電圧と電機子電流、そしてプログラムAで与えられたPWM通流率指令値を読み込み、回転数を計算し、PWM指令値等と共にコンピュータの画面上にグラフとして表示する機能を持っている。

### 5.3 フィードバック運転ソフトウェア

フィードバック運転に用いられたプログラムの構成をFig. 6に示す。プログラムDは、モータ運転の回転数指令をメモリ上に展開し、併せてプログラムEの動作管理を行う。回転数指令は、①一定速運転②ステップ状運転③ランプ指令状④パターン運転、をそれぞれ回転数や運転時間を設定し与えることができる。このプログラムはBASIC語で記述されている。

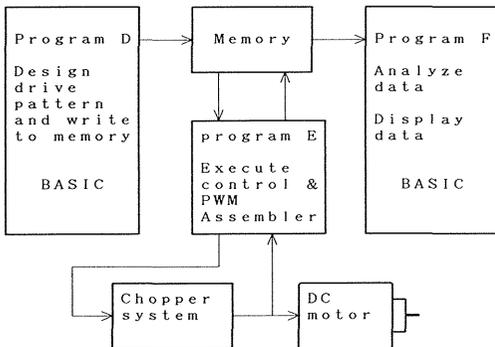


Fig. 6 Structure of feedback control.

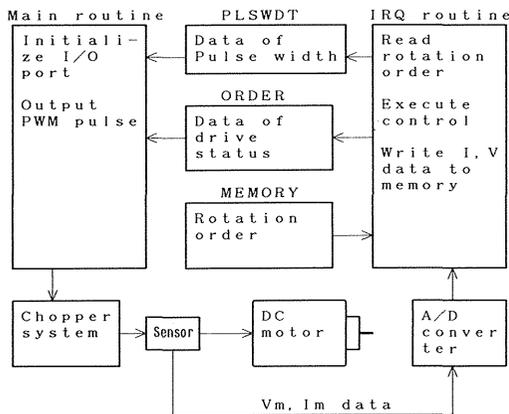


Fig. 7 Structure of the core of feedback control program.

プログラムEはアセンブリ語で記述されており、プログラムDで与えられた回転数指令を読み込み、フィードバック制御を実行しつつPWMパルスを発生する。このプログラムの構成をFig. 7に示す。

フィードバック制御を行う際、モータの回転数を必要とするため、A/Dコンバータより読み込んだモータ電圧・電流情報より回転数を計算しなければならない。処理プログラムは高速処理の必要性から全てアセンブリ語で記述されており、回転数計算は全て整数演算のみで実行する必要がある。

モータの回転数  $n$  とモータの端子電圧  $V_m$ 、電機子電流  $I_m$  の間の関係式は

$$n = \frac{60(V_m - I_m R_a)}{2\pi p M I_f} \text{ [rpm]} \quad (5)$$

である。予備実験によりこの式中のモータ固有の定数である  $p, M, R_a$  を決定し、(5)式に代入すると、

$$n = 11.254 V_m - 10.995 I_m \text{ [rpm]} \quad (6)$$

となる。アセンブリ語での演算に適するようにこの式を変形すると、

$$n = (360 V_{A/D} - 351 I_{A/D}) / 32 \text{ [rpm]} \quad (7)$$

となる。ただし、

$V_{A/D}$  : モータの端子電圧をA/D変換して得られるデータ

$I_{A/D}$  : モータの電機子電流をA/D変換して得られるデータ

コンピュータ内での演算は、(7)式を使用することにより乗算と減算のみで実行することが可能となる。(7)式では、32による除算を必要とするように見えるが、コンピュータ内の数値表現が2進数を使用しているため、実際には下位ビットの方向へ5回シフトを行うことで簡単に回転数  $n$  を得ることができる。

次に、プログラムEの全体の動作を説明する。このプログラムは、大別して2つの部分によりなる。片方はPWMパルスを発生する部分で、主プログラムとなっている。他方はメモリより回転数指令を読み込み、またモータの電圧電流情報から回転数を計算し、これらのデータより制御を実行し、結果として得られたPWM通流率を主プログラムに渡すIRQルーチンである。このプログラムは、コンピュータ内部のインターバルタイマにより50.75msに1回呼び出され、実行される。

プログラムFは、プログラムCと同じく、プログラムD、Eによりメモリ上に展開された回転数指令、モータの電圧電流情報を順次読み込み、これらのデータをグラフとして画面に表示するためのプログラムであり、BASIC語で記述されている。

## 6. 実験結果

### 6.1 実験条件

本実験では駆動したDCモータの負荷として同期発電機を用いた。駆動用DCモータの界磁電流は $I_f = 1A$ としている。

駆動したDCモータの規格を示す。

出力：1 kW            最大回転数：1500 rpm  
 電圧：100 V        電流：10 A  
 極数：2

### 6.2 実験結果

運転指令としてFig. 8, Fig. 9で示されるパターンを与えた。これは実際の電動車椅子の運転パターンを考慮

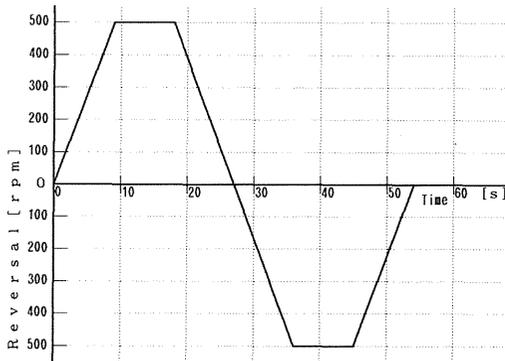


Fig. 8 Motor drive pattern 1.

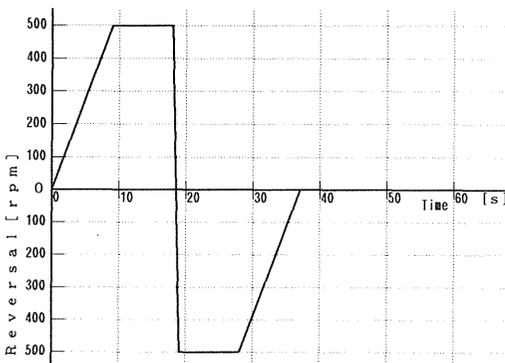


Fig. 9 Motor drive pattern 2.

したものである。それぞれについてオープンループ、フィードバック運転を行っている。ただし、オープンループ運転時には、指令はモータの回転数ではなく、通流率を与えている。(500 rpmが100%に当る。)

Fig. 10, Fig. 11ではオープンループ制御を行っている。指令に回転数がよく追従しているが、減速時に若干制動が不足気味で、加速時と減速時とで同一の通流率指令であっても回転数が違っている。また、両グラフ共正転→逆転時に大きな電流が流れている。全体的に加速時、定常運転時の安定性、追従性等は良好だが、負荷が小さい場合には制動力が不足する。また負荷の変化による回転数の変化が大きくなるのはオープンループ運転のためである。

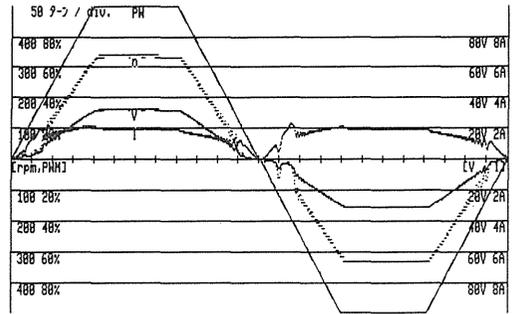


Fig. 10 Experimental result of open-loop control (drive pattern 1).

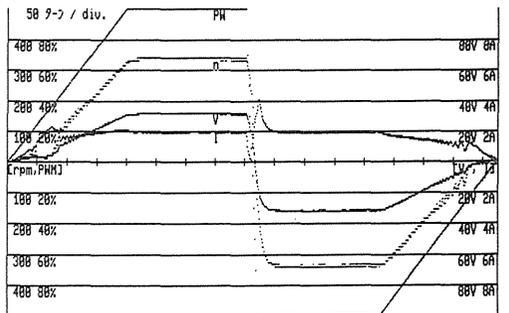


Fig. 11 Experimental result of open-loop control (drive pattern 2).

Fig. 12, Fig. 13では、フィードバック制御を行っている。指令に対する追従性は双方とも良好である。Fig. 12では正転から減速してゆく過程で若干の回転数のふらつきが見られるが、これは制御プログラムが再生-非再生動作を繰り返しているためである。またFig. 13では正転から逆転に移った際に若干の振動がみられる。また、この時に大きな電流が流れているが、これは再生電流に

よるものと、オーバーシュートに見られるようにP型制御のゲインが負荷に対して大きめである為であろうと思われる。

rpmと、回転計を用いない構成にも拘らず実用上十分な精度が得られている。

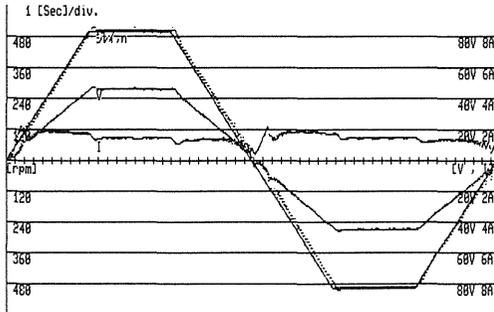


Fig. 12 Experimental result of feedback control (drive pattern 1).

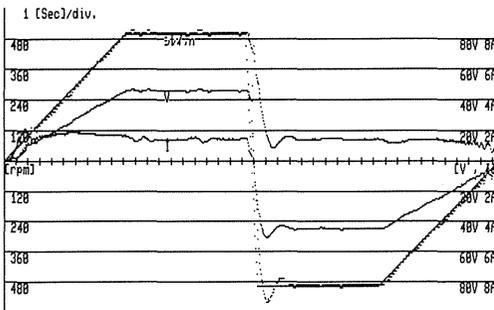


Fig. 13 Experimental result of feedback control (drive pattern 2).

指令回転数に対する実際の回転数の誤差は、定常状態で指令回転数が500rpmに対し実際の回転数は約502

### 7. 結 論

電動車椅子の制御に必要な基本的手法を検討し、提案したシステムと制御アルゴリズムの有効性を、DCモータを用いた予備実験により確認した。フィードバック制御では、モータの回転数を直接計測する方法を持たないために当初心配された回転数制御の誤差は十分に小さく、これから更に高級な制御アルゴリズムを使用してゆく際にもこの回転数検出法で充分役目を果たすことが可能であろう。また、回生動作についてもその効果を確認しており、最適電力回生率を得るアルゴリズムを開発することにより、走行距離を増加することが可能になる。

本研究では更に、電流制御による過大電流の抑制、最大の電力回生率を得るための回生デューティ比の計算法、更に高級な最適制御、適応制御等の実行、フェイルセーフシステムの設計等を行い、実際に電動車椅子に搭載し、運転を行う予定である。

電動車椅子の使用状況調査に便宜を与えて戴いた日立市役所障害福祉課長石川平氏に謝意を表す。

### 参 考 文 献

- 1) ライネル・イエーガー: 「パワーエレクトロニクス」, p. 204 (1984) 森北出版社
- 2) 宮入: 「最新電気機器学」, p. 40 (1985), 丸善
- 3) 相良: 「基礎自動制御」, p. 181 (1983), 森北