

平成 14 年度

卒業論文

歩行支援機における吊り上げ装置の制御実験

指導教員

井上 喜雄 教授

甲斐 義弘 助手

高知工科大学 知能機械システム工学科

1030158 山内 勉

目次

第 1 章 緒言	1
第 2 章 実験装置	3
2.1 歩行支援機	
2.2 ACサーボモータの動力部	
2.3 実験装置の諸元及び計測値の求め方	
2.4 ACサーボモータとDCサーボモータの比較	
2.5 ACサーボモータの原理	
第 3 章 基礎実験 1	11
3.1 目的	
3.2 基礎実験 1 の実験方法	
3.3 無負荷時の巻き上げ，巻き下げ時の制御に必要な電圧と速度に関する実験	
3.3.1 実験方法	
3.3.2 結果	
3.3.3 考察	
3.4 巻き下げ時の摩擦に対する負荷の影響に関する実験	
3.4.1 実験方法	
3.4.2 結果	
3.4.3 考察	
第 4 章 基礎実験 2	14
4.1 目的	
4.2 基礎実験 2 の実験方法	
4.3 巻き上げ，巻き下げ時の電圧変化に対する速度変化	
4.1.1 実験方法	
4.1.2 結果	
4.1.3 考察	
4.4 巻き上げ，巻き下げ速度の再現性に関する実験	
4.4.1 目的	
4.4.2 実験方法	
4.4.3 結果	
4.4.4 考察	
4.5 巻き上げと巻き下げの割合に関する実験	
4.5.1 目的	
4.5.2 実験方法	

4.5.3	結果	
4.5.4	考察	
4.6	巻き上げ，巻き下げ速度調整実験 1 (1[kg]の場合)	
4.6.1	目的	
4.6.2	実験方法	
4.6.3	結果	
4.6.4	考察	
4.7	巻き上げ，巻き下げ速度調整実験 2 (4[kg]の場合)	
4.7.1	目的	
4.7.2	実験方法	
4.7.3	結果	
4.7.4	考察	
第 5 章	歩行時の人間の引っ張り時の力検討	20
第 6 章	吊り上げ装置の理論計算	21
6.1	吊り上げ装置の力計算	
6.1.1	目的	
6.1.2	結果	
6.1.3	考察	
6.2	吊り上げ装置の摩擦及び速度に対する考察	
6.2.1	目的	
6.2.2	考察	
第 7 章	トルクベース系による人に優しい制御系の設計	25
第 8 章	結言	27
謝辞		27
参考文献		28
付録		29

第1章 緒言

日本の高齢化のスピードは、世界に類を見ないほど急激に変化している。これからの高齢化社会にいくつかの留意すべき問題が生じてくる。たとえば核家族化がいつそう進み、高齢単身世帯や高齢夫婦世帯が増えるなどの事情によって、家族形態や家族機能が変化し、経済構造の変化、高学歴化、女性の社会参加の機会の増大などが顕著になっていく。このために一方では、80歳以上の高齢者の増加に伴う虚弱あるいは障害老人の激増が予想され、他方では家族介護や女性の介護負担によって支えられてきた介護問題が深刻化し、介護の社会化は避けることのできない問題となってきている。介護問題を解決するためには、事前に歩行リハビリテーションにより、負担を軽減することが考えられる。そのため今後、高齢化が進むにつれ、高齢者の歩行リハビリテーションの必要性が高くなっていく。歩行リハビリテーションは、高齢者を寝たきりにさせないようにするために非常に有効である。現在、歩行リハビリテーションは、理学療法士の支援により行われているが、身体的に大きな負担になっている。そこで、理学療法士に代わる歩行リハビリテーションを支援する歩行支援機が必要であると考えた。しかし、その場合、患者の安全を確保する必要がある。

本研究では、安全を確保する方法として吊り上げ装置を取り上げる。これまで、本研究室では、ロードセル、ポテンシオメータなどの複数のセンサを用いて、速度で指令値を与える仮想コンプライアンス制御を利用した例があり、仮想コンプライアンス制御により、吊り上げ装置を制御できるように試作されている。仮想コンプライアンス制御は、数学モデルで計算した速度応答に合うように速度指令を出して、制御する方法である。本研究では、方向性を変えトルクベース系の制御について検討することにする。

トルクベース系の制御の速度は、負荷や摩擦などによって大きく影響されるため、トルクベース系の制御を行う場合には、摩擦特性を十分考慮する必要がある。まずトルクベース系の摩擦などについて基礎実験を行い、トルクベース系の特性を明らかにする。さらに、その結果をふまえて、簡単な吊り上げ装置の制御アルゴリズムを提案する。そして実際に、その制御特性を確認する。

具体的な実験の流れとして、まず基礎実験1として、動き始めの電圧測定及び速度測定を行う。次にモータ側の摩擦の把握をする。次に基礎実験2として、電圧ごとの速度測定、同電圧での速度の再現を調べ、ロープの動きが人の動きに追従させるための電圧決定を行う。次に理論計算として、モータ側のトルクがロープ側の力にどのように変換されているか計算し、モータ側のトルクとロープの張力との関係、電圧と速度の関係などについて理論的に考える。次に人間が歩行時にどのくらいの肩の力で、吊り下げられたロープを引っ張るのか引っ張り力検討を行い、最後に今までの実験結果などから考慮し

て、人に優しい制御系の設計を行う。

第 2 章 実験装置

2.1 歩行支援機

本研究で実験する歩行支援機には、駆動用モータ、制御装置（制御用コンピュータ、サーボドライバ等）、非常停止ボタン、患者用ブレーキ、ハンドル部力覚センサ、肘掛け部力覚センサ、位置検出センサ、患者吊り下げ装置等が取り付けられており、種々のセンサ情報に基づいて内蔵した制御用コンピュータにより制御できるようにしている。また、バッテリーが搭載されており、自立走行可能である。

本歩行支援機に取り付けた吊り上げ装置は、患者が巻き上げるための左右 2 つのモータ（バッテリー対応 AC サーボモータ ANR020B, (株) ワコー技研）、減速機（1/50）、ポテンショメータ、ロードセル（LTZ-100KA, (株) 共和電業）および支柱部からなる。左右のモータは、制御用コンピュータからの指令信号が AC サーボドライバ（ABEDUO-460, (株) ワコー技研）を介して、それぞれ独立に制御することができる。



図 2.1 歩行支援機

2.2 吊り上げ装置の動力部

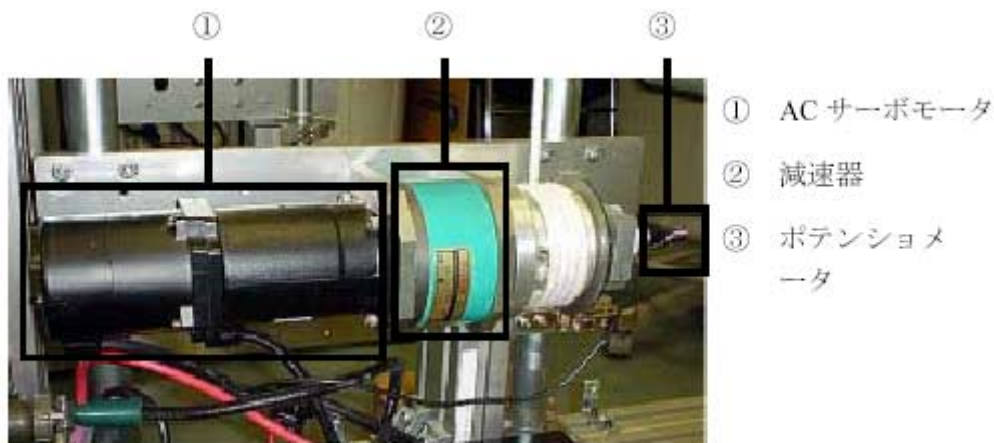


図 2.2 吊り上げ装置の動力部

2.3 実験装置の諸元及び計測値の求め方

実験に際して、必要な測定計算を示す。

< 既知の数字 >

- ・ ギア比 (G) 1/50
- ・ 車輪直径 (d) 81[mm]
- ・ 使用電圧 (V) -10 ~ +10 [V]
- ・ 回転数 (rpm) 10[V]の時 2000[rpm]
- ・ エンコーダの分解能 軸 1 回転で 4096 パルスをカウントする
- ・ 割り込み間隔(t) 0.1 秒
- ・ 定格トルク 9.7 [kg cm]
- ・ 定格電圧 16 [V]

式の導出

巻き上がり、巻き下がり速度を求める。

カウンタパルス数から、実際の速度 A[mm/sec]を計算する式を求める。

$$y = x / 4096 \cdot \cdot \cdot \cdot (2.1)$$

0.1秒でy回転するとして1秒間の回転数 z を求める。(xパルスというのは0.1秒間に
変化した値のことなので,(2.1)式の x を現パルス数 x1 と旧パルス数 x2 で表すと $x=x_1 - x_2$
となる.)

$$z = 10 \times (x_1 - x_2) / 4096 \dots \dots \dots (2.2)$$

$$\text{速度 } A = 3.14 \times 81 \times 10 \times (x_1 - x_2) / (4096 \times 50) \dots \dots \dots (2.3)$$

式の導出

電圧を求める.

$$4096 : x = 20 : V$$

$$x \times 20 = 4096 \times V$$

$$x = 4096 / 20 \times V$$

式の導出

電圧からトルクを求める.

$$\text{トルク} = 4.85 / 8 \times V \times 1 / G$$

$$= 4.85 / 8 \times V \times 50 \text{ [kgf} \cdot \text{cm]}$$

2.4 AC サーボモータと DC サーボモータの比較

表 2.3 AC サーボモータと DC サーボモータの比較

	AC サーボモータ(同期機式)	DC サーボモータ
モータ構造	比較的簡単	複雑
整流機構	トランジスタインバータ	ブラシ，整流子あり
ピークトルクの制約	磁石の減磁	整流火花，磁石の減磁
放熱	ステータコイルのみの発熱で有利	回転子の発熱，放熱上不利
高速化	比較的容易	やや困難
大容量化	やや難	難
非常制動	容易	容易
制御方法	やや複雑	簡単
磁束	永久磁石	永久磁石
誘起電圧	電機子誘起電圧	電機子誘起電圧
整流作用	インバータ	ブラシ，整流子
保守性	メンテナンスフリ	ブラシ保守必要

DC サーボモータの欠点・利点

整流子とブラシを持つことにより，ブラシの摩耗にブラシ，整流子の手入れなどが，必要になる．この機械式整流機構は，原理的にはシンプルですぐれたものである．しかし，保守上の難しさ，あるいは，整流性能の限界から DC サーボモータとして，最大トルク，ストールトルクあるいは，高速回転速度などの回転速度に制約を受ける．

AC サーボモータの欠点・利点

交流電動機を利用している．交流電動機は，ブラシや整流子を持たないので直流電動機が，いろいろ制約を受けていた点を改善できる．AC サーボモータは，励磁巻線を持たず，外部から励磁巻線を流す必要がないので，モータ内部での発熱は，固定子巻線に流れる電機子電流によるものだけである．固定子は，外気に直に触れているので冷却が効率よく行われる．従って，永久磁石形同期電動機による AC サーボモータは，小形軽量化が容易である．

2.5 AC サーボモータの原理

AC サーボモータでは，従来の DC サーボモータのブラシと整流子で行っている整流をトランジスタスイッチに置き換えられた電子式転流で行っているため，回転子磁極の位置を

検出する検出器が必要であり，検出器（ブラシレスレゾルバ）が反負荷側の軸端に直結されている．

AC サーボモータのトルク発生原理は，DC サーボモータと同様に考えることができる．磁界中に置かれた導体に電流が流れると，「フレミングの左手の法則」により，導体に直角の方向に力が働く．AC サーボモータは，導体である巻線が固定子に固定されている．導体に働く力は，反作用で磁石に働く．磁石に働いた力により，磁石を取り付けた回転子が回転する．この時，磁石の動きに合わせて固定子巻線に相対的に一定の関係を保った電流を流すことができれば，回転子は，連続的に一様な力を発生する．

固定子には，120 度位相がずれた U,V,W 相の 3 相巻線が巻かれ，これら各巻線に，回転子位置に応じた PWM 制御した正弦波電流を流す．3 相巻線 U,V,W に流れる電流は，次式で表される．

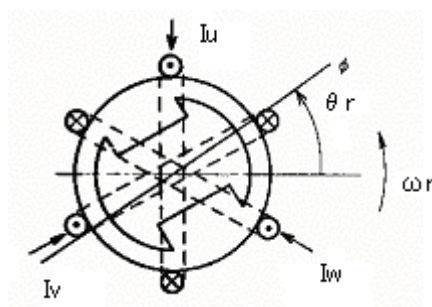


図 2.4 トルク発生原理

$$I_u = I_m \sin \theta_r$$

$$I_v = I_m \sin\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$I_w = I_m \sin\left(\theta_r - \frac{4}{3}\pi\right)$$

I_v , I_u , I_w は各相電流値 (A)

I_m は最大電流値 (A)

θ_r は回転子位置

界磁磁束の分布を正弦波状にすると，各電子コイル U,V,W および W 相に流れる電流により発生するトルク T_m は，次式で表される．

$$T_m = K_s \left[I_u \phi \sin \theta_r + I_v \phi \sin\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) + I_w \phi \sin\left(\theta_r - \frac{4}{3}\pi\right) \right]$$

$$= \frac{2}{3} K_s \phi I_m$$

K_s : 比例定数

ϕ : 有効界磁磁束密度

式から分かるように AC サーボモータの発生するトルクは、モータの回転位置に無関係であり、電流と界磁磁束密度の積により求められ常に一定である。界磁磁束密度は、永久磁石の使用により一定であるので、AC サーボモータの発生するトルクは、各巻線に流れる電流に比例する。トルクと電流の関係は、DC サーボモータと同様であると考えることができる。

メカトロニクス機器に利用されるサーボモータの制御の形でのトルク制御/電流制御の制御方法を説明する。サーボモータにサーボドライバから電圧/周波数の比が一定の正弦波電圧が供給されると、サーボモータはトルクを生じて、周波数に同期した回転速度で回転する。サーボモータに流れる電機子電流 I_m とサーボモータの発生するモータトルク T_m の間には、

$$T_m = K_t \cdot I_m$$

K_t : 比例定数

の関係がある。

モータトルクを制御するために、例えば、ネジ締めなどのように締め付け力、すなわち、トルク制御あるいは制限を行う必要があるとき、サーボモータの電流を制御すればよいことを意味している。

サーボモータの発生するモータトルク T_m は、負荷トルク T_e に打ち勝ち、モータと負荷の全慣性モーメントを加速するトルクとして使われる。

トルク制御/電圧制御では、モータに対するトルク指令のアナログ電圧入力で、電圧を入力することで、その電圧に比例したトルクを発生する。

電流換算係数は、4.42[A/V]であり、式変形すると、

$$T_m = 4.42 \cdot K_t \cdot V \quad \text{となる。}$$

サーボモータの温度 - トルク特性は、- 0.03[%/]で温度の影響は、ほとんどない。

< PWM 制御 >

PWM とは、Pulse Width Modulation control の略で、スイッチング式電源の直流出力電圧を安定化させるための制御方式である。スイッチングトランジスタの ON 時間と OFF 時間の割合を変えて、出力電圧を制御する。出力電圧が低下すると、ON 時間を長くし、上昇

すると短くすることによって、常に一定の電圧を保つことができる。

< 直流サーボモータの回転運動方程式 >

直流サーボモータの回転運動は、次のような運動方程式に従う。モータの電磁石を励磁する電流 i_f を一定として、電機子の両端に加える入力電圧を e とする。するとモータの電機子に発生する逆起電力 e_b は、電機子電流を i とすると、

$$L \frac{di}{dt} + Ri + e_b = e \cdots \cdots (2.4)$$

となる。ここで L と R は、電機子のインダクタンスと電気抵抗である。モータの発生トルク T は、電機子電流 i に比例するとして、次のように表される。

$$T = K_1 i \cdots \cdots (2.5)$$

電機子の慣性モーメントを J 、抵抗係数を f 、ねじりのばね定数を κ 、回転角を θ とすると、次の運動方程式が得られる。

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + J \frac{d\theta}{dt} + \kappa\theta = T \cdots \cdots (2.6)$$

また電機子の逆起電力 e_b は、電機子の角速度に比例するので、

$$e_b = K_2 \frac{d\theta}{dt} \cdots \cdots (2.7)$$

(2.4)式から(2.7)式までの式から i 、 e_b 、 T を消去して、 θ についての微分方程式を求めると次のようになる。

J : 慣性モーメント

f : 抵抗係数

L : 電機子のインダクタンス

R : 電機子の電気抵抗

κ : ねじりのばね定数

θ : 回転角

$$LJ \frac{d^3\theta}{dt^3} + (Lf + RJ) \frac{d^2\theta}{dt^2} + (Rf + K_1 K_2) \frac{d\theta}{dt} + R\kappa\theta = K_1 e \cdots \cdots (2.8)$$

(2.8)式で直流サーボモータの入力を電機子の両端に加える電圧 e とし,出力をモータの回転角 θ とすると, (2.8)式が直流サーボモータの入力と出力の変換を規定する方程式である.

第3章 基礎実験 1

3.1 目的

トルクベース系の制御では，摩擦がない場合，0[V]時に動かすことができるが，実際は動かなかつた．この実験では，動き始めの電圧を測定し，摩擦の影響がどの程度あるかを把握する．

3.2 基礎実験 1 の実験方法

電圧を 0.01[V]ずつ増加させ，マイナス 5[mm]まで巻き上げ，巻き上げた時の電圧の値を取り出す．

取り出した電圧で巻き上げ，巻き下げの制御をする．

力を加えると，巻き上げの電圧をマイナスにして巻き下げる．

力が 0[Kg]になると，初期位置まで巻き上げる．

3.3 無負荷時の巻き上げ，巻き下げ時の制御に必要な電圧と速度に関する実験

3.3.1 実験方法

3.2 で提案した実験方法を用い，実験を行う．巻き上げ，巻き下げ時の電圧と速度を測定する．そしてこの実験を 5 回繰り返し行う．

3.3.2 結果

表 3.1 左右巻き上げ・巻き下げ電圧及び摩擦トルク

回数	電圧(右)[V]	電圧(左)[V]	右摩擦トルク [kgf・cm]	左摩擦トルク [kgf・cm]
1	0.41	0.51	12.43	15.46
2	0.57	0.43	17.28	13.03
3	0.56	0.47	16.98	14.25
4	0.6	0.4	18.19	12.13
5	0.56	0.47	16.98	14.25

表 3.2 左右巻き上げ・巻き下げ速度

回	右巻き上げ [mm/s]	右巻き下げ [mm/s]	左巻き上げ [mm/s]	左巻き下げ [mm/s]
1	0	10.2126	-14.8209	19.993
2	-17.6026	23.1933	-6.5165	12.643
3	-19.0879	25.9152	-13.7094	20.6447
4	-21.6226	27.956	0	14.8392
5	-17.3781	23.849	-11.6478	16.4163

3.3.3 考察

左右の電圧が異なり，毎回の測定でも電圧に変動がある．表 3.1 から巻き上げ，巻き下げの電圧が毎回異なるのは，摩擦の影響である．図 3.1～3.4 から速度は，電圧に比例していることが分かる．

3.4 巻き下げ時の摩擦に対する負荷の影響に関する実験

3.4.1 実験方法

動き始めの電圧を無負荷，1[kg]，4[kg]の負荷を与えた時と場合分けをし，異なる負荷を加えた時，それぞれについて実験する．その後，摩擦計算を行う．

3.4.2 結果

表 3.3 右巻き下げ電圧及び摩擦トルク

荷 重 [kg]	電 圧 [V]	ト ル ク [kgf・cm]	摩擦トルク [kgf・cm]
0	0.34	10.31	10.31
1	0.32	9.7	13.7
4	0.2	6.06	22.06

表 3.4 左巻き下げ電圧及び摩擦トルク

荷 重 [kg]	電 圧 [V]	ト ル ク [kgf・cm]	摩擦トルク [kgf・cm]
0	0.32	9.7	9.7
1	0.27	8.18	12.18
4	0.24	7.28	23.28

3.4.3 考察

負荷を加えることにより、モータ側に加える電圧が減少しているが、摩擦トルクそのものは、増加している。左側の摩擦トルクの方が小さいことが分かり、右側より速度が速くなることが分かる。

第4章 基礎実験2

4.1 目的

この章では、3章での動き始めの電圧、摩擦を考慮した結果をふまえて、電圧ごとの速度を測定し、再現性をみる。その後、ロープの動きを人間の動きに追従させるため、巻き上げ速度と巻き下げ速度を同じにするように電圧を決める。

4.2 基礎実験2の実験方法

電圧を入力する。

その電圧で、巻き下げ、巻き上げ動作を行う。

力を加えると、巻き上げの電圧をマイナスにして巻き下げる。

力が0[Kg]になると、初期位置まで巻き上げる。

4.3 巻き上げ、巻き下げ時の電圧変化に対する速度変化

4.3.1 実験方法

4.2で行った実験方法をもとに、実験を行う。0.45[V]から0.6[V]まで、0.01[V]ごとの左右巻き上げ、巻き下げ速度を求める。

4.3.2 結果

表 4.1 0.01[V]ごとの左右巻き上げ・巻き下げ速度実験

電圧[V]	右巻き上げ [mm/s]	右巻き下げ [mm/s]	左巻き上げ [mm/s]	左巻き下げ [mm/s]
0.45	-8.7769	11.2372	-10.406	12.8859
0.46	-9.4371	12.0333	-11.0601	14.0585
0.47	-10.275	13.859	-11.6543	14.8127
0.48	-11.2083	14.3419	-12.7409	15.648
0.49	-12.078	15.106	-13.9844	16.7746
0.50	-13.1155	15.9039	-14.8221	17.5886
0.51	-14.0312	16.9489	-15.766	18.3904
0.52	-15.556	18.4115	-17.7883	19.7039
0.53	-15.9517	19.1486	-17.5395	20.2086
0.54	-16.6188	19.9615	-18.5395	21.6011
0.55	-15.9037	19.6854	-17.739	22.3246
0.56	-18.3211	21.2272	-20.8534	23.0022
0.57	-19.26	22.3326	-22.3383	24.2977
0.58	-20.5973	23.2174	-22.5312	25.6436
0.59	-21.8101	23.9845	-24.0579	26.5692
0.6	-22.6014	25.2773	-25.2456	27.4803

4.3.3 考察

図 4.5 と図 4.6 から電圧と速度は、比例関係があることがわかる。

0.45[V]時のトルクは、13.64[kgf・cm]であり、0.6[V]時のトルクは、18.19[kgf・cm]である。

4.4 巻き上げ、巻き下げ速度の再現性に関する実験

4.4.1 目的

トルクベース系の制御では、同じ電圧でも速度が変化する場合があると考え、再現性をみるため実験をする。

4.4.2 実験方法

4.2 で行った実験方法をもとに、実験を行う。任意の電圧 0.52[V]で、巻き上げ、巻き下げ時の平均速度を求める。条件として、巻き下げ時は、1[kg]のおもりを付け、巻

き上げ時は無負荷で実験する．そして同様な実験を 10 回繰り返し行う．

4.4.3 結果

表 4.2 0.52[V]時の左右巻き上げ・巻き下げ速度実験

回数	右巻き上げ [mm/s]	右巻き下げ [mm/s]	左巻き上げ [mm/s]	左巻き下げ [mm/s]
1	-15.556	18.4115	-17.6159	19.7039
2	-15.621	19.0199	-17.1037	19.7989
3	-15.6595	18.6475	-17.5056	19.9037
4	-15.8118	18.6543	-16.7973	19.5452
5	-15.4595	18.9155	-16.4536	20.5126
6	-15.6562	18.9364	-17.3342	20.3958
7	-16.0085	19.3706	-17.3154	20.4983
8	-15.727	19.2211	-17.1872	20.6389
9	-16.1527	19.303	-17.3365	20.5234
10	-16.2909	19.6077	-17.1823	20.7877
平均	-15.7943	19.0087	-17.1832	20.2308

4.4.4 考察

上の表から，ほぼ，同じ値が得られた．

4.5 巻き上げと巻き下げの割合に関する実験

4.5.1 目的

同じ電圧でも巻き上げ速度と巻き下げ速度は，違う．電圧によって，巻き上げ速度と巻き下げ速度はどのように変わるのか，巻き上げ速度と巻き下げ速度の割合を求める．

4.5.2 実験方法

電圧ごとの巻き上げと巻き下げの摩擦の大きさをみるために，表 4.1 より巻き下げ速度を巻き上げ速度で割り，割合を求める．

4.5.3 結果

表 4.3 巻き上げと巻き下げの割合

電圧[V]	右の割合	左の割合
0.45	1.2803	1.2383
0.46	1.2751	1.2711
0.47	1.3488	1.271
0.48	1.2796	1.2282
0.49	1.2507	1.1995
0.5	1.2126	1.1866
0.51	1.2079	1.1665
0.52	1.1836	1.1077
0.53	1.2004	1.1522
0.54	1.2011	1.1651
0.55	1.2378	1.2585
0.56	1.1586	1.103
0.57	1.1595	1.0877
0.58	1.1272	1.1381
0.59	1.0997	1.1044
0.6	1.1184	1.0885

4.5.4 考察

巻き上げと巻き下げの割合から，速度が速くなるほど，巻き上げと巻き下げの速度の差が小さくなることがわかる．

4.6 巻き上げ，巻き下げ速度調整実験 1 (1[kg]の場合)

4.6.1 目的

ロープの動きを人間の動きに追従させるために，巻き上げ速度と巻き下げ速度を同じにし，再現性をみる．

4.6.2 実験方法

3.2 で行った実験方法をもとに，実験を行う．右巻き上げ電圧を 0.56[V]，左巻き上げ電圧を 0.54[V]，右巻き下げ電圧を 0.52[V]，左巻き下げ電圧を 0.51[V]にして，実験を行

う．この実験を 10 回繰り返し実験する．条件として，巻き下げは 1[kg]のおもりを付け，巻き上げは無負荷である．

4.6.3 結果

表 4.4 左右巻き上げ・巻き下げ速度調整実験

回数	右巻き上げ [mm/s]	右巻き下げ [mm/s]	左巻き上げ [mm/s]	左巻き下げ [mm/s]
1	-16.8842	17.0347	-17.5895	18.5963
2	-17.2333	17.7332	-17.6342	18.7395
3	-17.6052	17.3865	-18.1666	19.0341
4	-17.6645	17.2469	-18.0605	19.1759
5	-17.3614	17.5637	-17.5877	19.1834
6	-18.0052	17.4759	-18.3328	19.5525
7	-18.2031	18.1056	-18.0997	19.4291
8	-17.9012	17.7329	-18.5127	18.4736
9	-18.6428	17.8293	-18.0627	19.4074
10	-18.2511	18.0017	-18.0279	19.0631

4.6.4 考察

表 4.1 から 18.3[mm/sec]になるように電圧を決めたが，結果は，17[mm/s]と 19[mm/s]の間で，変動している．表 4.4 から，それほど目標速度からずれがないが，同じ電圧でも速度が変化することが分かる．

4.7 巻き上げ，巻き下げ速度調整実験 2 (4[kg]の場合)

4.7.1 目的

外力により速度変化が起こるため荷重を変え実験をし，再現性をみる．

4.7.2 実験方法

4.2 で行った実験方法をもとに，実験を行う．この実験では，おもりを 4[kg]に変え，巻き上げ，巻き下げ速度調整実験 1 と同様な実験を行う．

4.7.3 結果

表 4.5 左右巻き下げ速度調整実験

回数	右巻き下げ [mm/s]	左巻き下げ [mm/s]
1	19.6112	24.434
2	24.7124	20.073
3	20.1917	25.113
4	20.6447	25.6166
5	20.7249	24.7236
6	23.6187	29.0897
7	23.9989	29.3697
8	25.4469	27.9592
9	25.2206	27.6856
10	25.1746	28.3794

4.7.4 考察

おもり 1[kg]の時と比べ速度が右側では，7[mm/sec]，左側で，11[mm/sec]速度が上がった．それほど速度変化が無かったため，外力による速度変化の影響は，許容範囲である．

第 5 章 歩行時の人間の引っ張り時の力検討

人間が歩行時にどのくらいの力で肩を動かし歩行しているのかバネばかりで測定する．実際に被験者の肩にバネばかりをつけ実験してみると，歩行時に両肩とも 2.5[kg]の力がかかった．余裕をもたせて，最大値を 4[kg]とし，最小値を 1[kg]とした．1[kg]から 4[kg]の間の範囲で，巻き下げ動作を行うことにする．

6章 吊り上げ装置の理論計算

6.1 吊り上げ装置の力計算

6.1.1 目的

モータ側の運動方程式と巻き取り部分の運動方程式の関係式からロープの先端における力を導出する。0.52 [V] 時の力を調べる。

6.1.2 結果

$$\text{トルク} = 4.85/8 \times V \times 1/G$$

$$= 4.85/8 \times V \times 50 \text{ [kgf} \cdot \text{cm]}$$

トルク計算式に 0.52[V] を代入して

$$\text{トルク} = 15.76 \text{ [kgf} \cdot \text{cm]} \text{ となる。}$$

1 回転した時の関係を求めるため、

$$\theta = 2$$

巻き上げ部分の半径は、4.05[cm] である。 $x = 2 \times 4.05$

$T \cdot \theta$: モータ側の運動方程式

$K \cdot x$: ロープ巻き上げ・巻き下げ部分の運動方程式

$$T \cdot \theta = K \cdot x \cdots \cdots (6.1)$$

T : トルク [kgf · cm]

θ : ラジアン [rad]

K : 荷重 [kgf]

x : 距離 [cm]

(6.1) 式に代入して計算すると、

$$15.76 \times 2 = K \times 2 \times 4.05$$

$$K = 3.89 \text{ [kgf]} \text{ になる。}$$

6.1.3 考察

計算結果からモータ側の力は、減速機、巻き取り部分を介して 4 分の 1 になっていることが分かる。

6.2 吊り上げ装置の摩擦及び速度に対する考察

6.2.1 目的

モータ側の回転トルク（低電圧）と逆方向に力を加えた場合には、動かなかった。
この原因を理論的に導き出す。また速度が一定になる時の原因を理論的に導き出す。

6.2.2 考察

F : モータのトルク

G : 減衰比

W : ロープの張力

f_a : 摩擦力

f_0 : 一定摩擦力

μ : 摩擦係数

$$N = \frac{1}{G} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (6.2)$$

$$f_a = \mu W + f_0 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (6.3)$$

$$W = f + F N = \mu W + f_0 + F N \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (6.4)$$

$$(1 - \mu)W = F N + f_0$$

(6.4)式を式変形すると、(6.5)式の形になる。

$$W = \frac{FN + f_0}{1 - \mu} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (6.5)$$

(6.5)式より、摩擦力が非常に大きいことが分かる。

モータの回転と同方向にロープを引っ張る場合を考えると、(6.6)式になる。

$$F N + W = f_a = \mu W + f_0 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (6.6)$$

$$W(1 - \mu) = f_0 - FN$$

(6.6)式を式変形すると，(6.7)式の形になる．

$$W = \frac{f_0 - FN}{1 - \mu} \dots \dots \dots (6.7)$$

$f_0 - FN$ が 0 に近いとロープの張力がほとんど 0 で動く．

$FN > f_0$ ならロープの張力なしで動く．

$FN > f_0$ の場合の速度について考える．

機械的にかんがえると，(6.8)式になる．

$$M\ddot{x} + c\dot{x} = FN - f_0 \dots \dots \dots (6.8)$$

$c\dot{x}$: モータの減衰項

直流サーボモータの回転運動方程式を次に示す．

J : 慣性モーメント

f : 抵抗係数

L : 電機子のインダクタンス

R : 電機子の電気抵抗

κ : ねじりのばね定数

θ : 回転角

$$LJ \frac{d^3\theta}{dt^3} + (Lf + RJ) \frac{d^2\theta}{dt^2} + (Rf + K_1K_2) \frac{d\theta}{dt} + R\kappa\theta = K_1e \dots \dots \dots (6.9)$$

$L=0$ なら，

$$RJ \frac{d^2\theta}{dt^2} + (Rf + K_1K_2) \frac{d\theta}{dt} + R\kappa\theta = K_1e \dots \dots \dots (6.10)$$

両辺を R で割ると，

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + \left(f + \frac{K_1 K_2}{R}\right) \frac{d\theta}{dt} = \frac{K_1 e}{R} - k\theta \dots \dots \dots (6.11)$$

(6.8)式と(6.11)式は同等である .

速度が落ち着けば(6.8)式で $\dot{x} = 0$ であり , 式変形すると(6.12)式になる .

$$c\dot{x} = FN - f_0$$

$$\dot{x} = \frac{FN - f_0}{c} \dots \dots \dots (6.12)$$

F が大きくなれば速度も大きくなる .

第7章 トルクベース系による人に優しい制御系の設計

まず，以下のような動きを考えた．

人の動きにロープの動きが追従するように力を加えるとロープが巻き下がり，力を加えないと，始めに設定した場所まで巻き上がるような動きにしたい．そして，転倒を防止するために，転倒して，大きな力が加わると人間の体を受け止めるように停止させたい．

上の動きを実現させるためにいままで実験してきたことを考慮しながら，以下のような制御アルゴリズムを採用した．

(1)基礎実験1及び基礎実験2から電圧を決めた．巻き下がりに1[kg]の負荷がかかり，巻き上がりは，無負荷の状態と条件を決め，巻き上がりと巻き下がり同様の速度を同じにして，人の動きに追従するような電圧設定をした．トルクベース系の制御では，外力により速度が変化するため，巻き下がり時に4[kg]の負荷が加わった場合も考慮したが，速度変化が小さかったため，制御方法を決定した．

(2)ロードセルで力を検出し，電圧をマイナスにして，巻き下げるように制御を行った．5章で行った歩行時における人間の引っ張り力検討により，1～4[kg]の範囲で巻き下げることにし，制御方法を決定した．

(3)安全性を考慮して初期位置では，電圧を0[V]にした．これは，人間が歩く場合，歩幅が短ければ，ロープを上げ下げする必要もないためや，人間が動いていない時に停止させる機能を持たすため，制御方法を決定した．

(4)モータ側のトルクと逆方向の力を加え，摩擦により転倒を防止した．この制御は，サーボモータやプログラム上では行っておらず，減速機を含めたモータ部分の影響だと思われるが，はっきりしたことは分かっていない．



図 7.1 吊り上げ図

以上の制御を使い動作させた所，低電圧（トルク）で，人の動きにロープの動きが追従する制御を行うことができた．転倒防止動作は，モータ側のトルクと逆方向の力を加え，大きな負荷を加えることで停止し，人間の転倒を防止する制御が行えた．

第8章 結言

本研究では、トルクベース系の制御により歩行支援機における吊り上げ装置の制御を行うこととし、人に優しい吊り上げ装置の制御系の設計を提案することを目的とした。以下に実験中に起こった様々な現象について分析したことや今後の課題について記す。

- (1)基礎実験により、巻き上げ時の摩擦トルクは、約 $12[\text{kgf} \cdot \text{cm}]$ で、巻き下げ時の摩擦トルクは、約 $10[\text{kgf} \cdot \text{cm}]$ であり、巻き上げ時の方が、摩擦が大きいことが分かった。しかし、4.5の巻き上げと巻き下げの割合に関する実験により、電圧が高くなると、巻き上げと巻き下げの摩擦の差が小さくなることが分かった。
- (2)速度制御に比べ速度が外力に大きく左右するが今回の実験では、プログラム上で外力を制限し、人間にとって、速度の変化が気にならないような制御が行えた。
- (3)転倒時、モータ側の力と逆方向の力を与えてやると、摩擦により、転倒を防止できた。
- (4) 低電圧（トルク）で制御することができ、大きな負荷を加えると、停止する制御が行えた。人の肩にかかる力が $2[\text{kg}]$ の力なら、転倒した場合、 $4[\text{kg}]$ になるまで体が落下し、柔らかく受け止められた。

この実験及び制御系の設計を通して、比較的簡単な制御で摩擦部分をキャンセルし、ほぼ安定な速度により制御することができた。今後は、厳密に摩擦を考慮する制御をし、より安定し、安全な制御を目指していければ良いと考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり御指導して下さった、井上喜雄教授、甲斐義弘助手に深く感謝いたします。また本研究を行うに伴い、お手伝いいただいた田能寿考氏、知能機械力学研究室の皆様にもこの場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- (1)久壽米木真也, 歩行支援機における吊り上げ装置の制御実験 (仮想コンプライアンス制御を適用した場合), (2001) .
- (2)甲斐義弘, 井上喜雄, 他 5 名, 歩行支援機における患者の動作状態の認識, 機械学会ジョイントシンポジウム: ヒューマン・ダイナミクス講演論文集, No.00-38,(2000) ,p178-182 .
- (3)甲斐義弘, 井上喜雄, 他 5 名 インテリジェント歩行支援機による患者の転倒防止, 第 23 回日本エム・イー学会 中国四国支部大会論文集, (2000) , p55 .
- (4)原文雄, 機械力学, (1996), 朝倉書店 .
- (5)久保島毅, メカトロ技術入門シリーズ AC サーボモータの制御方法と応用例, (1997) , 近代図書 .

付録

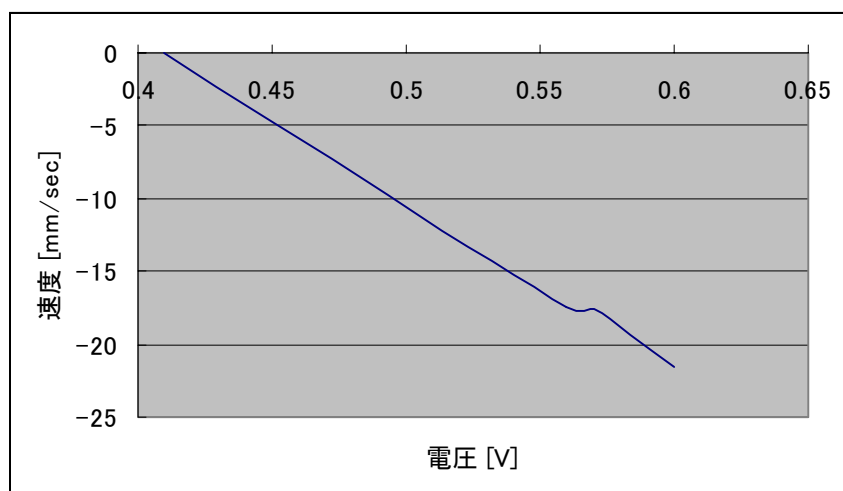


図 3.1 電圧ごとの右巻き上げ速度

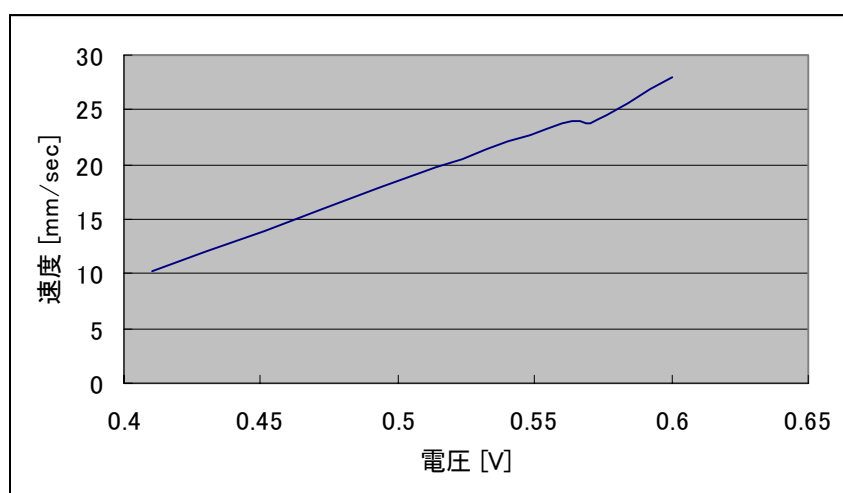


図 3.2 電圧ごとの右巻き下げ速度

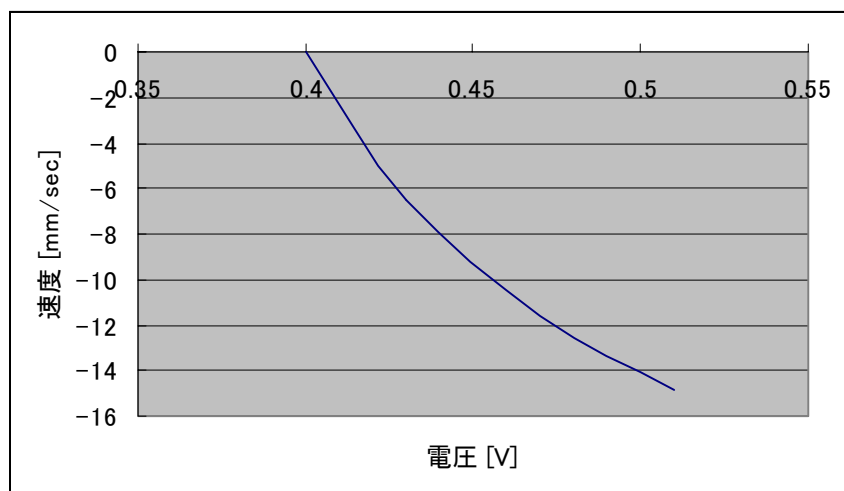


図 3.3 電圧ごとの左巻き上げ速度

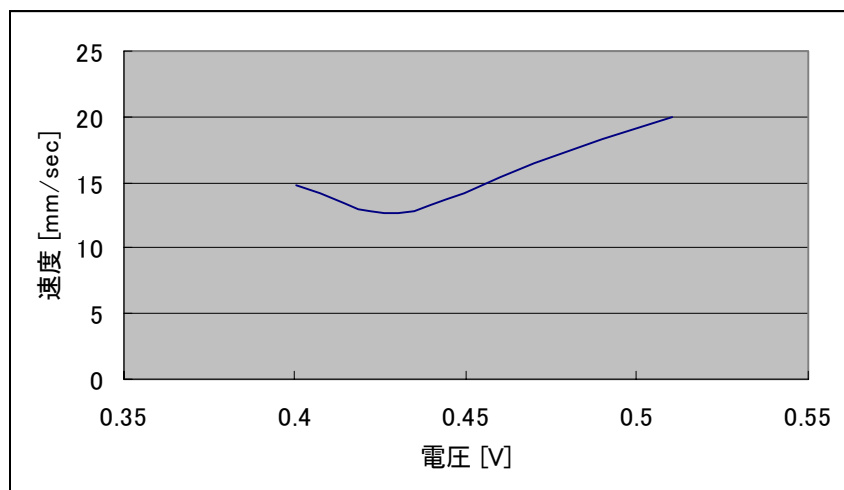


図 3.4 電圧ごとの左巻き下げ速度

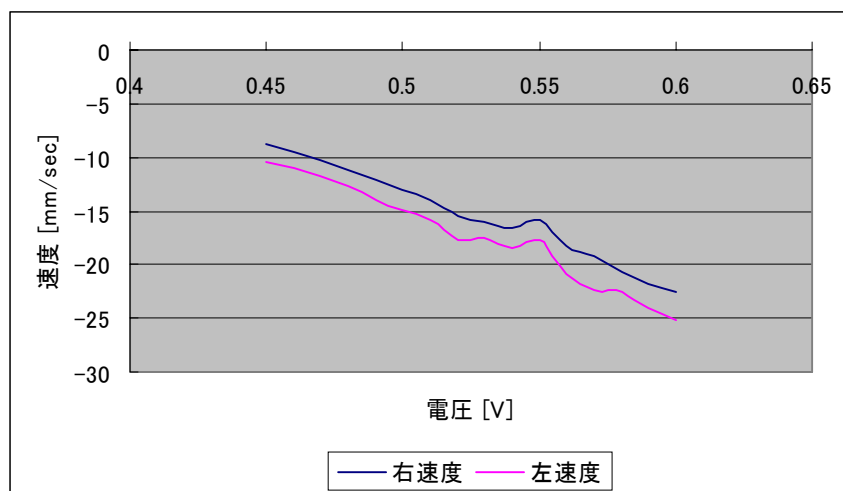


図 4.1 電圧ごとの巻き上げ速度

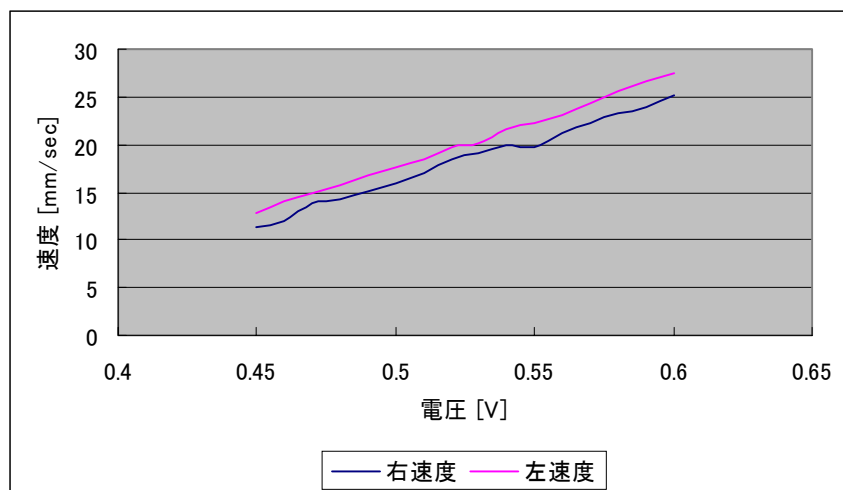


図 4.2 電圧ごとの巻き下げ速度

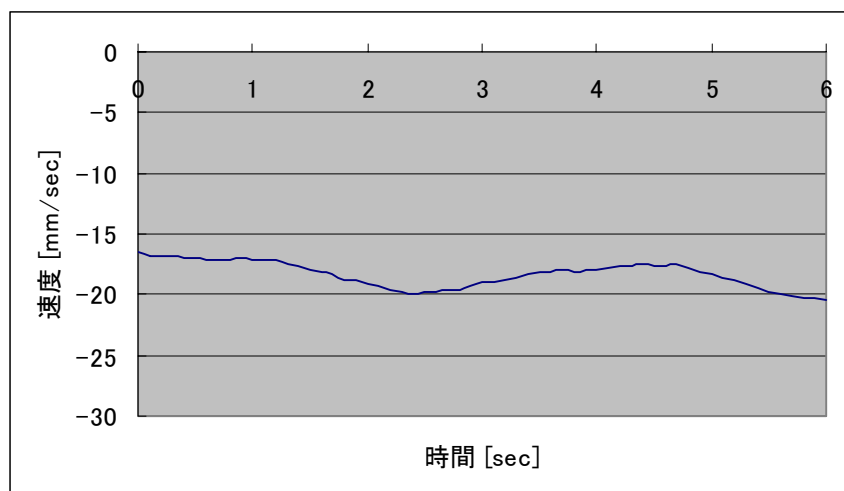


図 4.3 0.52[V]時の右巻き上げ速度

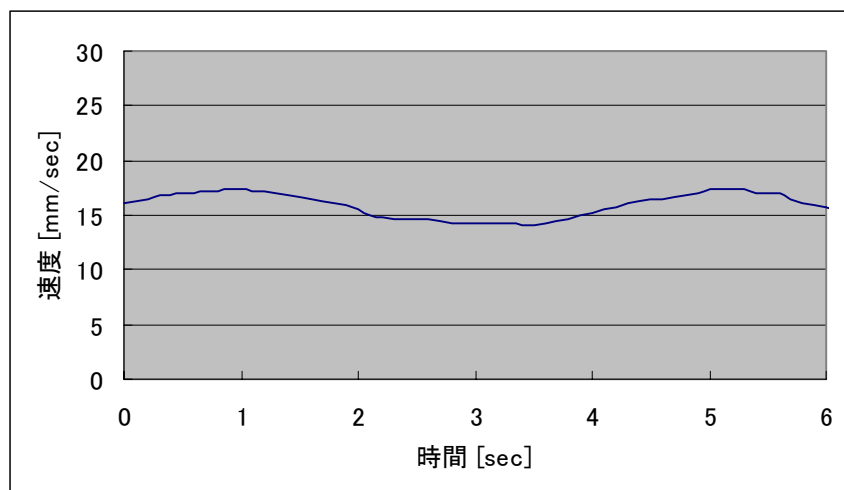


図 4.4 0.52[V]時の右巻き下げ速度

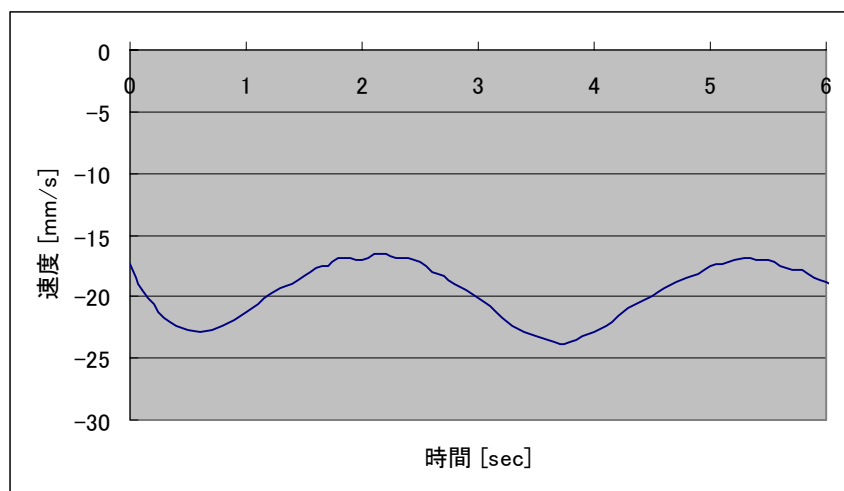


図 4.5 0.52[V]時の左巻き上げ速度

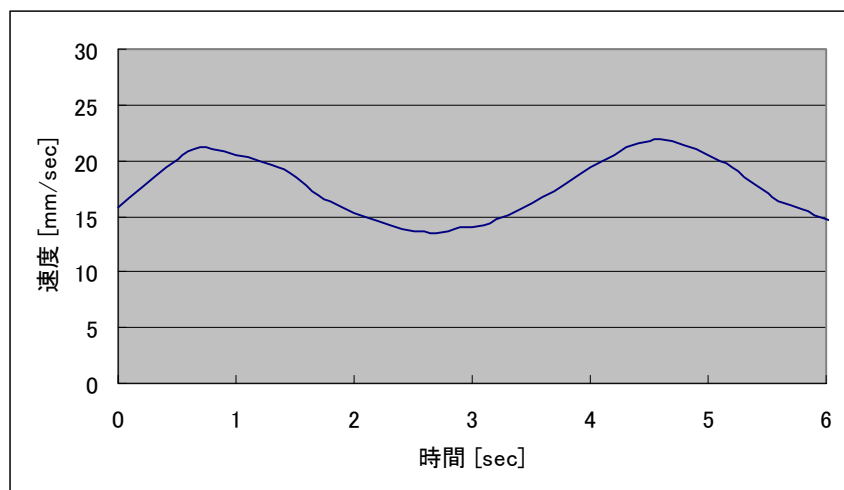


図 4.6 0.52[V]時の左巻き下げ速度

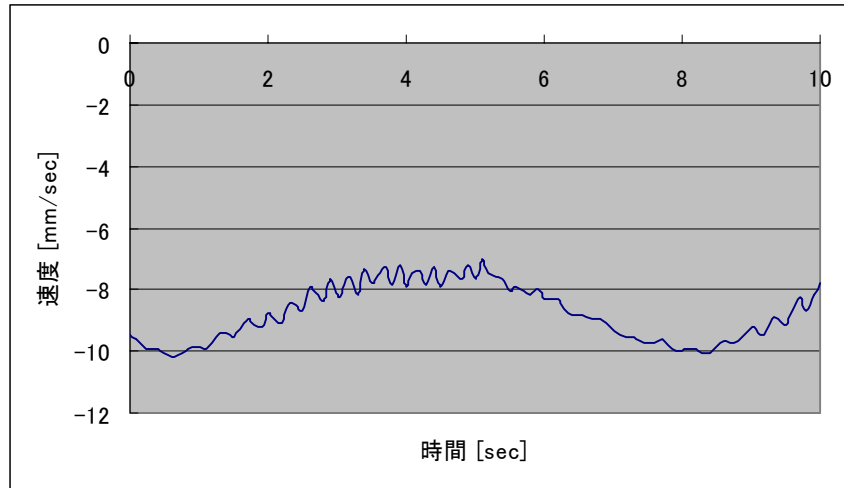


図 4.7 0.45[V]時の右巻き上げ速度

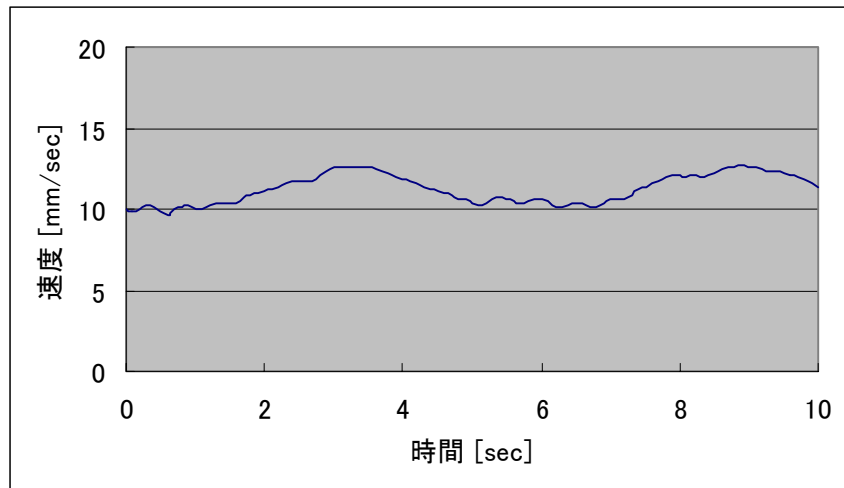


図 4.8 0.45[V]時の右巻き下げ速度

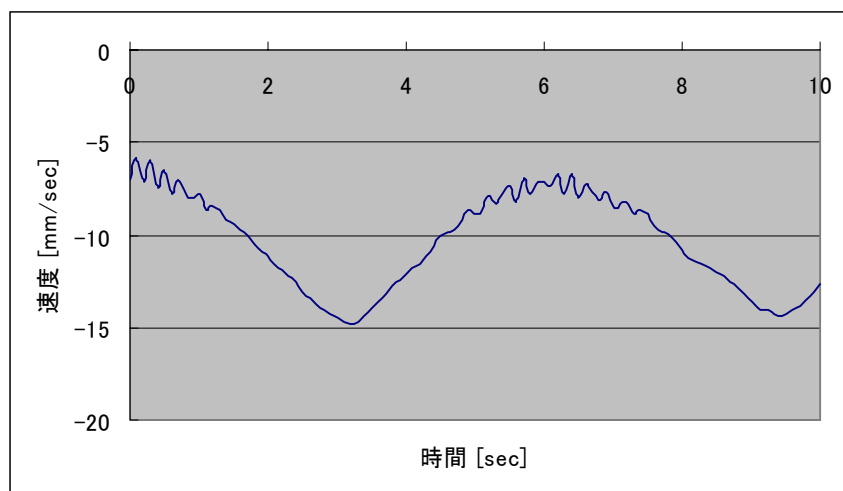


図 4.9 0.45[V]時の左巻き上げ速度

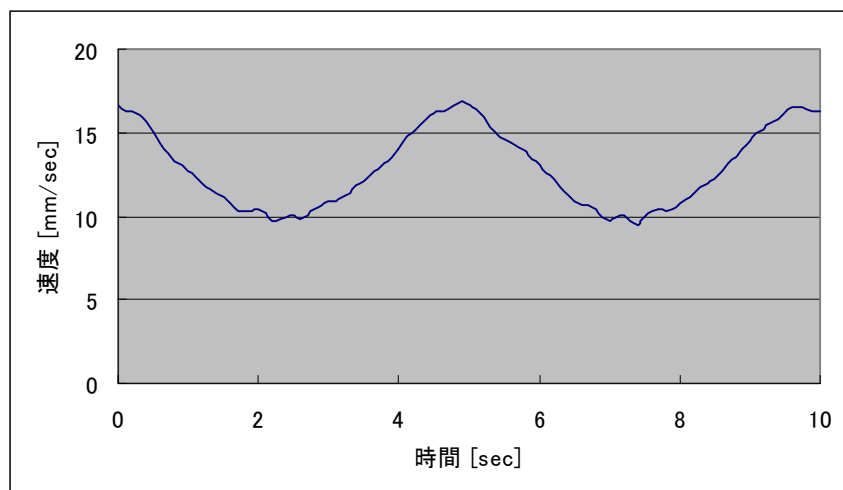


図 4.10 0.45[V]時の左巻き下げ速度

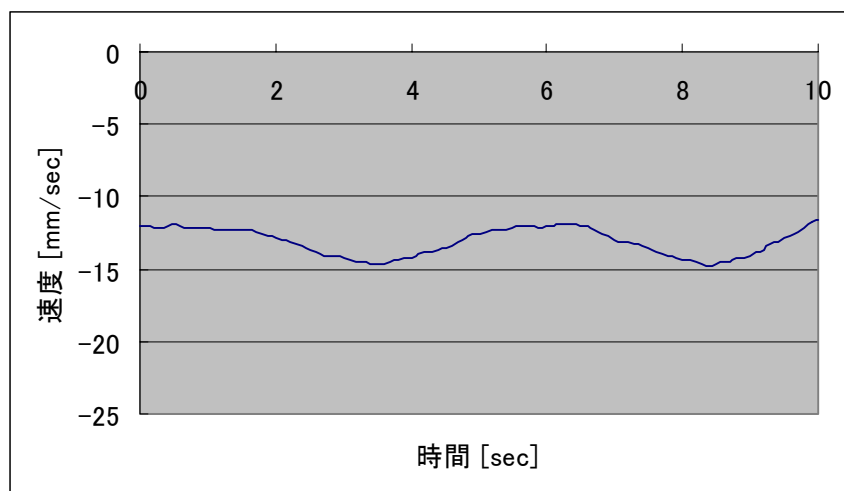


図 4.11 0.5[V]時の右巻き上げ速度

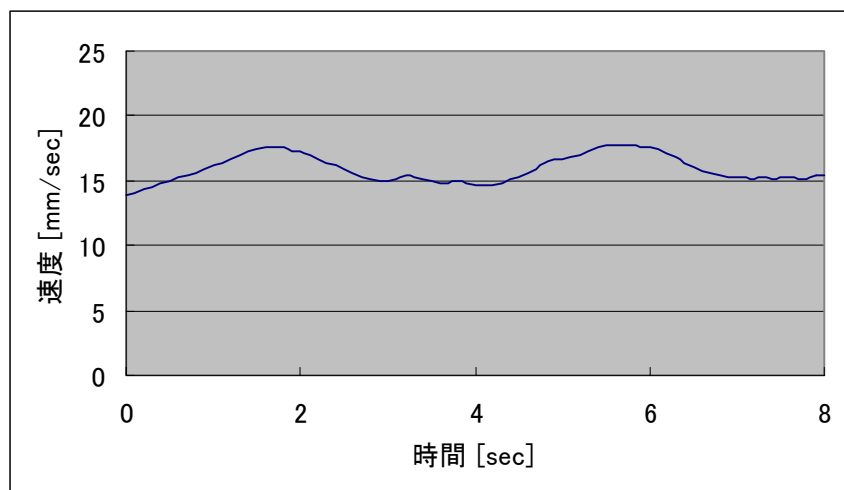


図 4.12 0.5[V]時の右巻き下げ速度

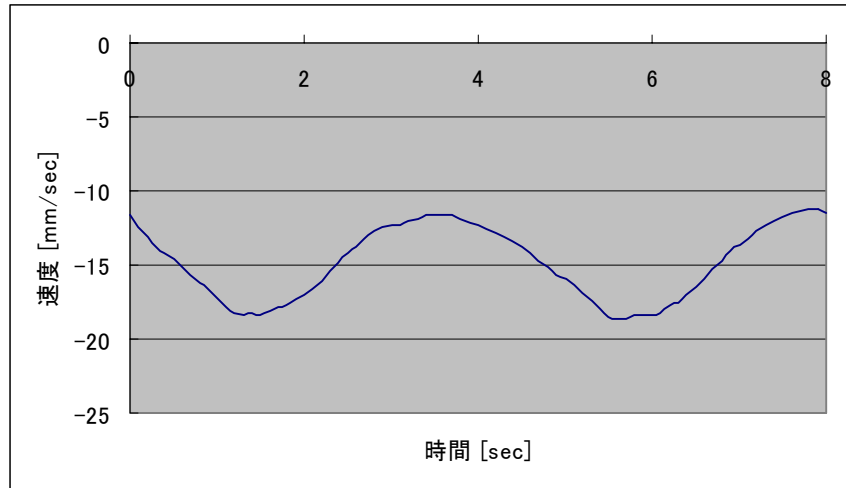


図 4.13 0.5[V]時の左巻き上げ速度

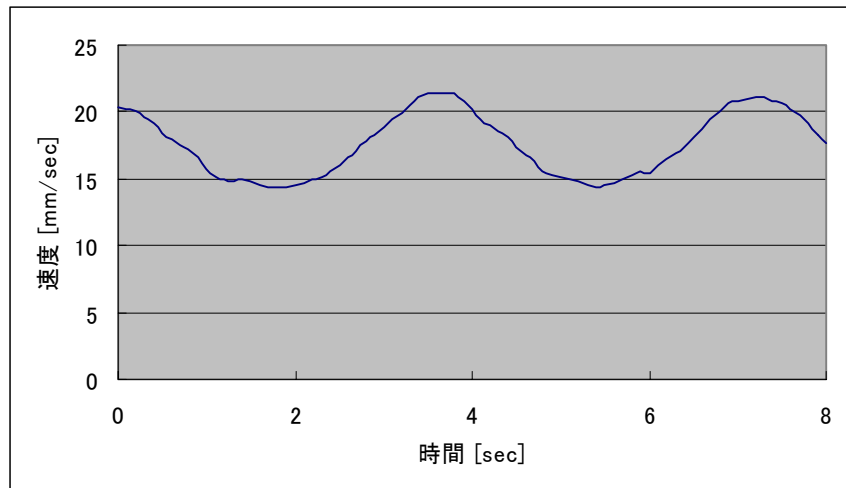


図 4.14 0.5[V]時の左巻き下がり速度

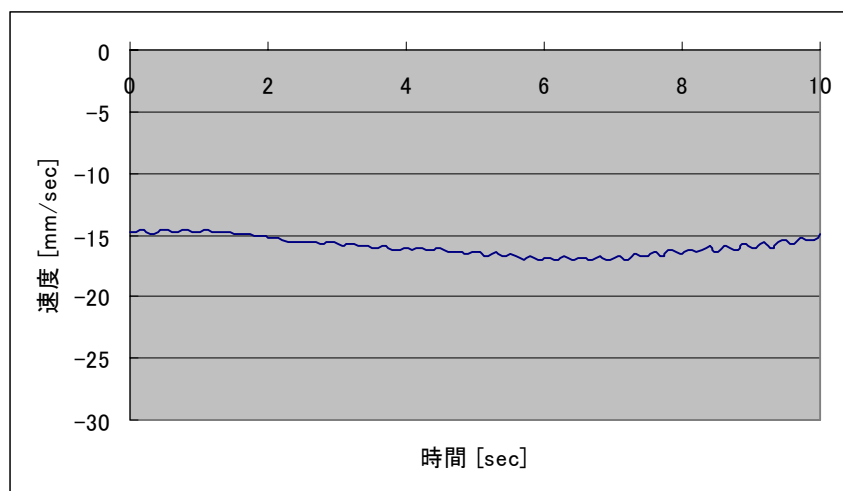


図 4.15 0.55[V]時の右巻き上げ速度

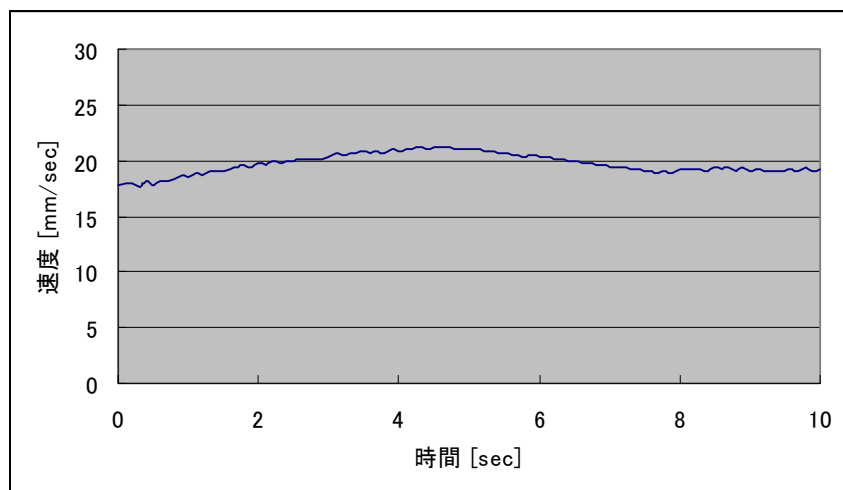


図 4.16 0.55[V]時の右巻き下げ速度

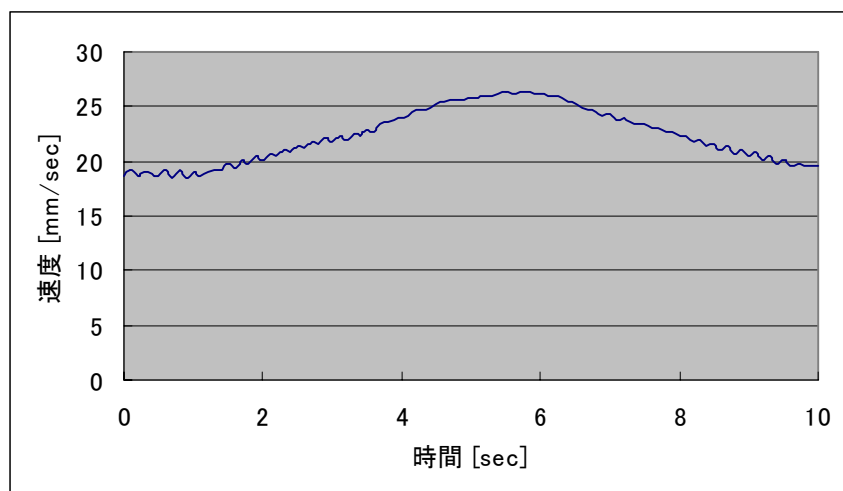


図 4.17 0.55[V]時の左巻き上げ速度

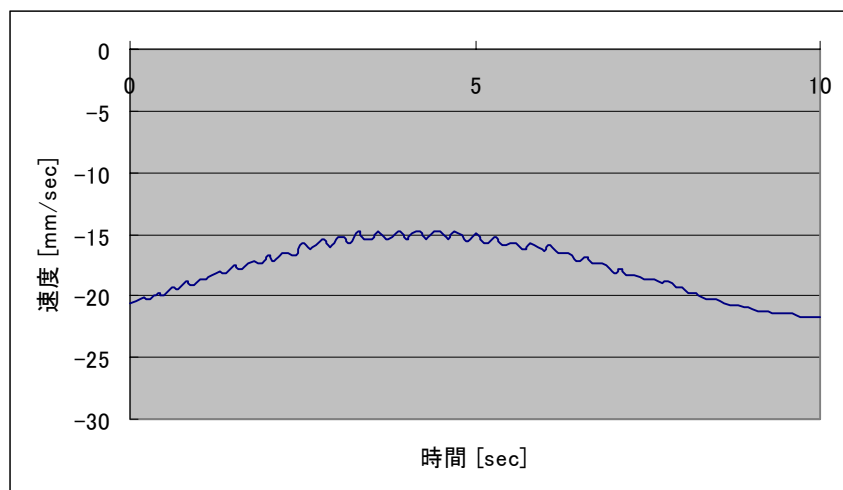


図 4.18 0.55[V]時の左巻き下げ速度

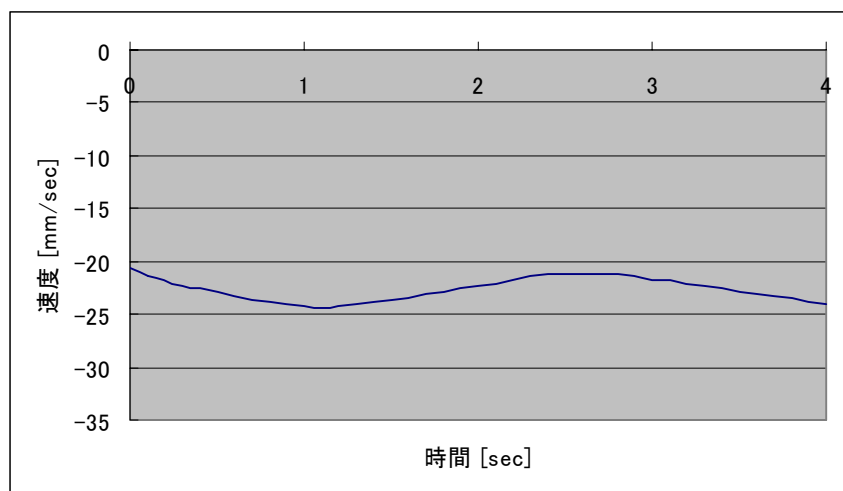


図 4.19 0.6[V]時の右巻き上げ速度

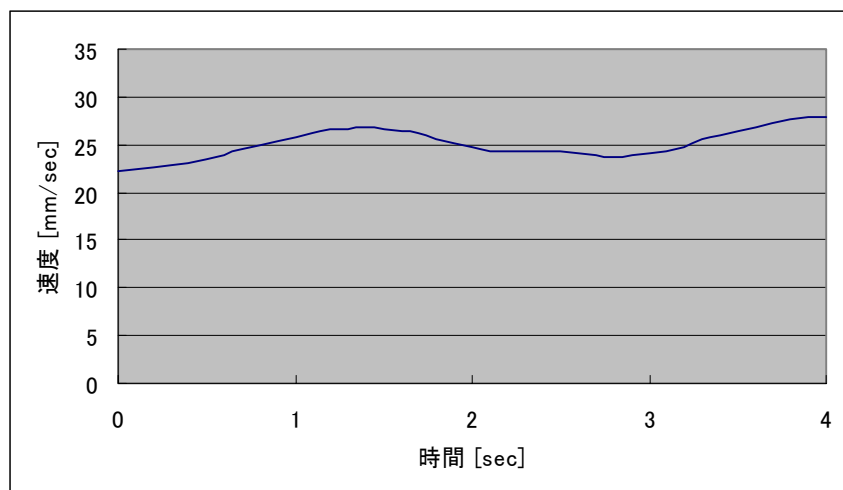


図 4.20 0.6[V]時の右巻き下げ速度

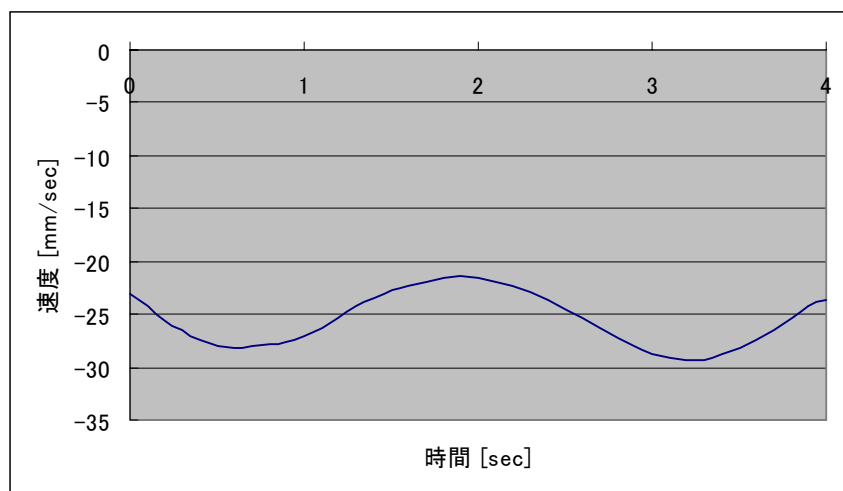


図 4.21 0.6[V]時の左巻き上げ速度

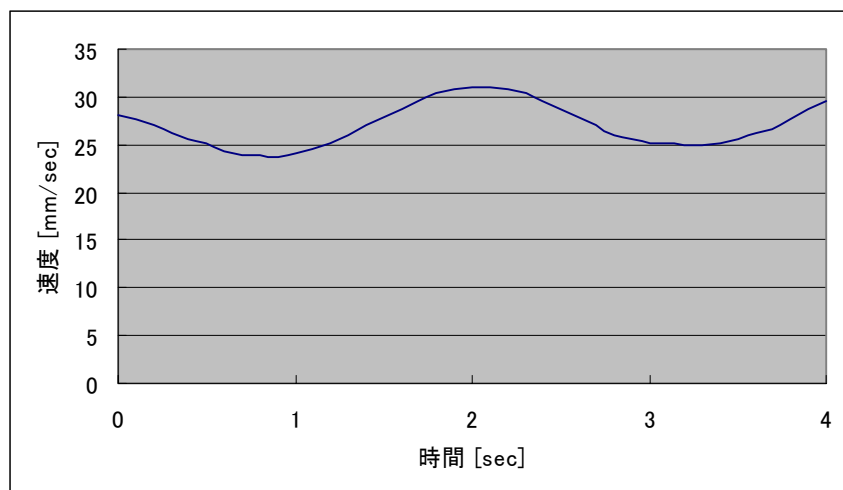


図 4.22 0.6[V]時の左巻き下げ速度

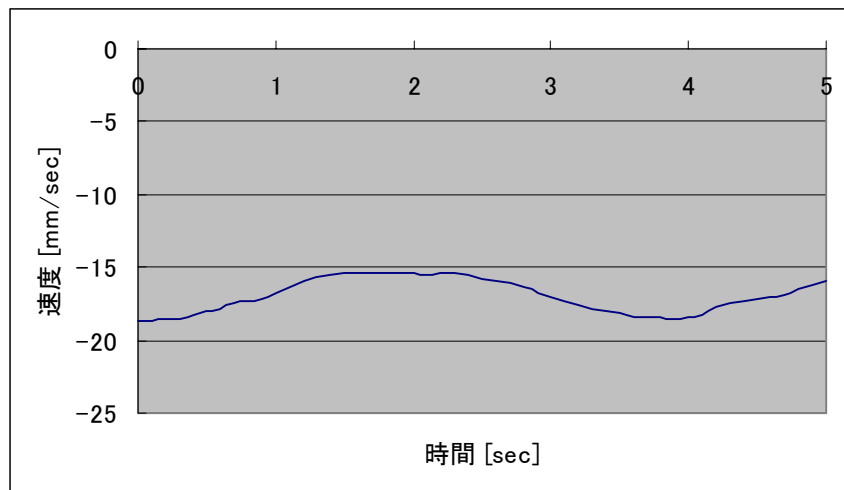


図 4.23 0.58[V]時の右巻き上げ速度

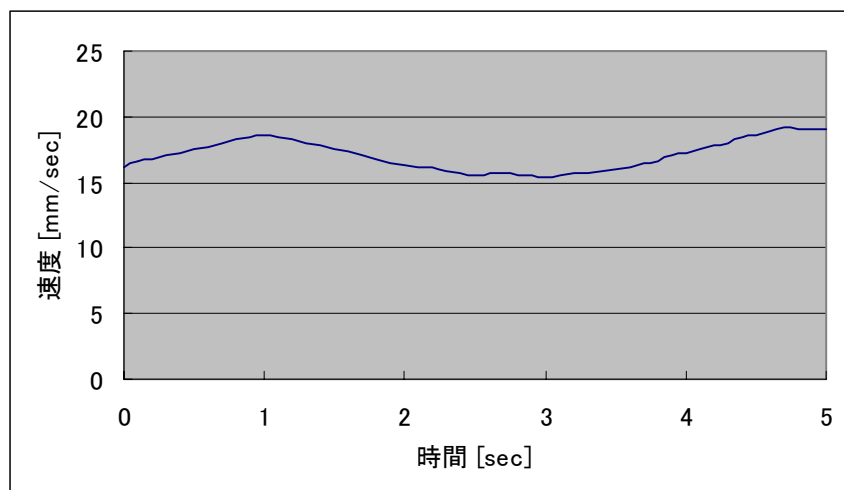


図 4.24 0.52[V]時の右巻き下げ速度

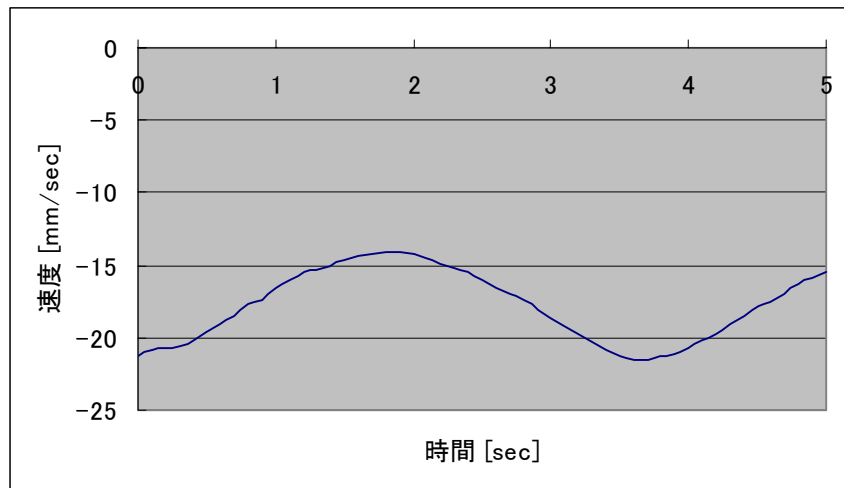


図 4.25 0.55[V]時の左巻き上げ速度

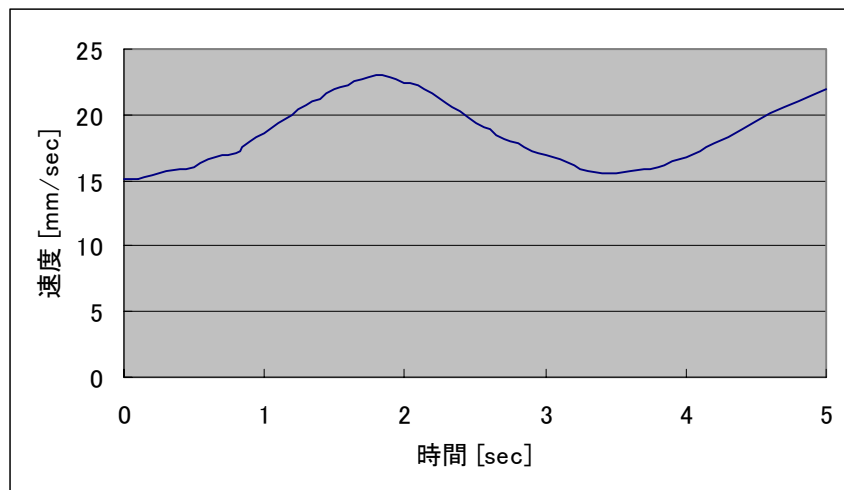


図 4.26 0.51[V]時の左巻き下げ速度

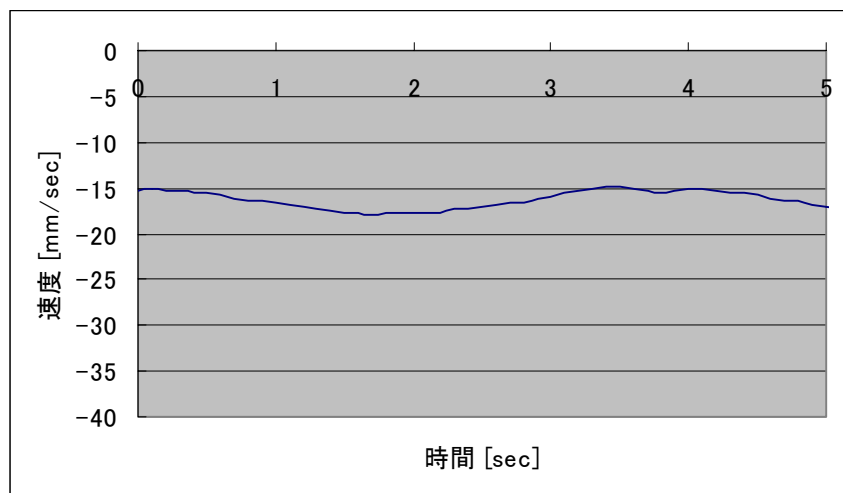


図 4.27 0.58[V]時の右巻き上げ速度

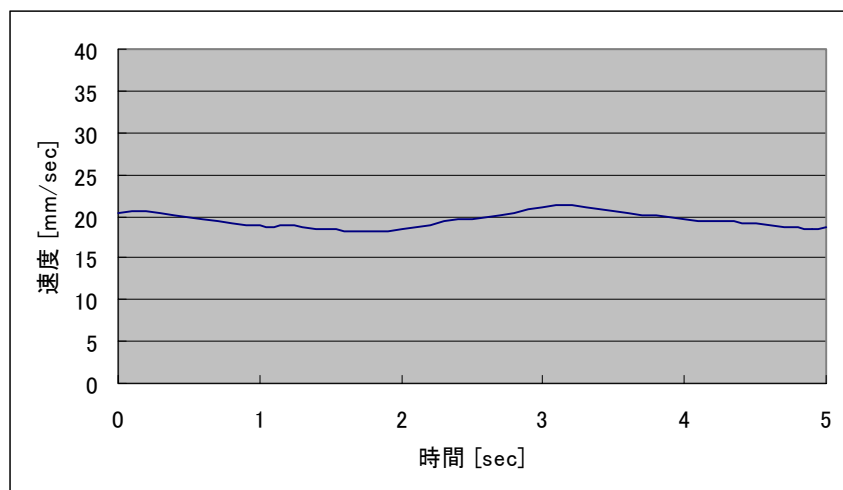


図 4.28 0.52[V]時の右巻き下げ速度

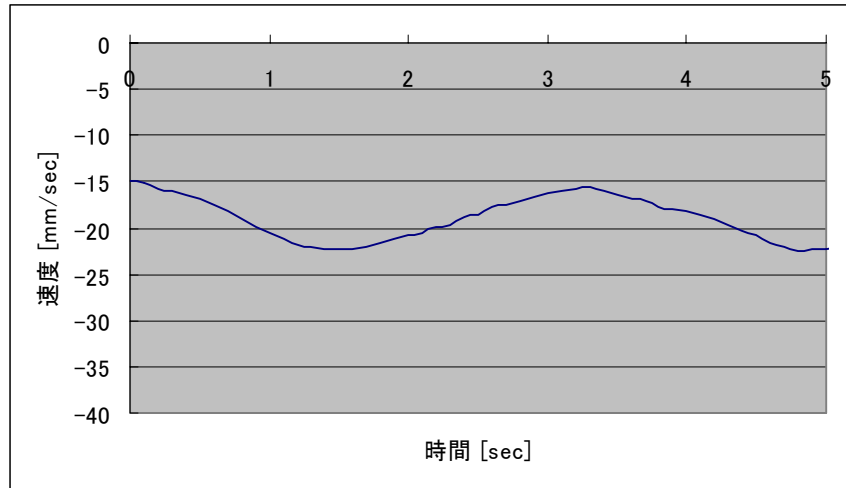


図 4.29 0.55[V]時の左巻き上げ速度

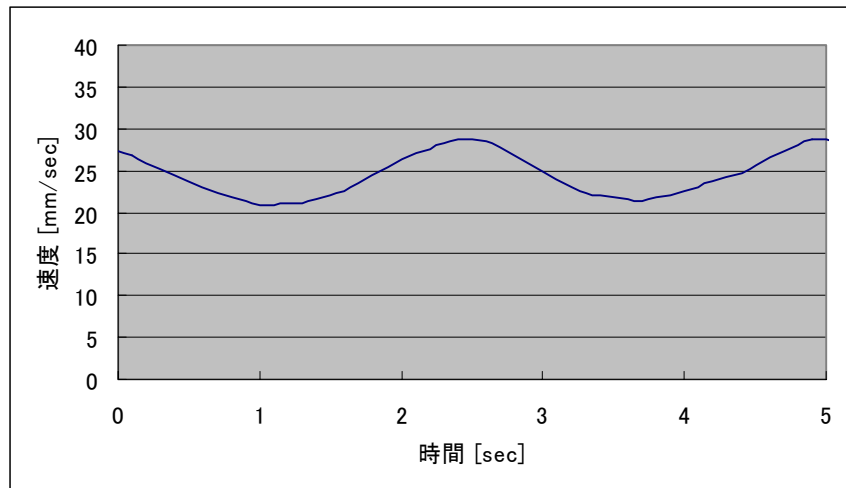


図 4.30 0.51[V]時の左巻き下げ速度

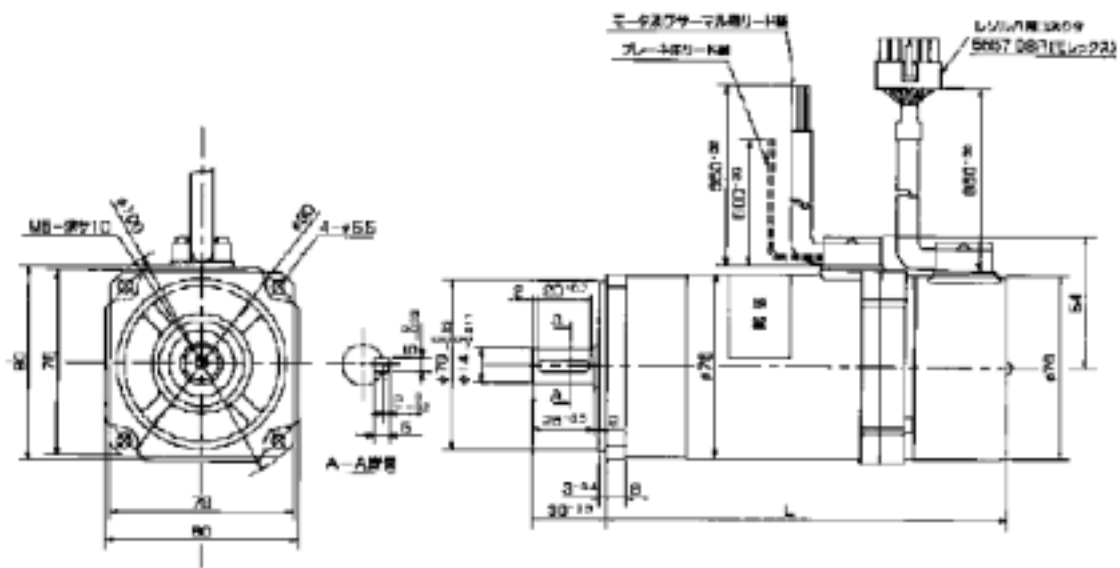


図 2.3 AC サーボモータ

表 2.1 AC サーボモータ仕様

項目	仕様	
サーボモータ型式	ANR 020B	
使用バッテリー電圧	24V	
モータ部	定格出力	200W
	定格トルク	9.7kg \cdot cm
	瞬間最大トルク	20kg \cdot cm
	定格回転数	2000rpm
	最大回転数	2000rpm
	定格電流	14.5A
	定格電圧	16V
	瞬間最大電流	29A
	トルク定数	0.79kg \cdot cm/A
	ロータイナーシャ	1.18g \cdot cm \cdot s ²
	パワーレート	7.8kW/s
	概略重量	2.7kg
	ブレーキ	定格電流, 電圧
静止摩擦トルク		4kg \cdot cm
ブレーキイナーシャ		0.015g \cdot cm \cdot s ²
概略重量		0.35kg

表 2.2 AC サーボドライバ仕様

項目		仕様
型式		ABE Duo-460
電源入力	主電源	DC20V~56V(DC24V, 48Vバッテリー対応)
	制御電源	DC20V~56V
定格相電流		22.1Arms
瞬時最大電流		44.2Arms
制御方式		パワーMOSFETによる正弦波PWM制御
対応モータ、センサ		同期型三相モータ(標準0極, 正弦波着磁), ブラシレスレゾルバ1X
アナログ入出力	速度指令入力	DC0~±10V, 入力インピーダンス10Kオーム以上, 速度設定対応モータ定格回転数/10V±2%
	トルク指令入力(スレーブ入力)	DC0~±10V, 入力インピーダンス10Kオーム以上
	経路誤差指令入力(ステアリング入力)	DC0~±10V, 入力インピーダンス10Kオーム以上
	トルク指令出力(マスタ出力)	スレーブ軸に対するトルク指令が出力されます
制御信号入力	マスタスレーブ切替入力	入力コモン間を閉とすることでスレーブモード(トルクサーボ)となります
	正逆転切替入力	入力コモン間を閉とすることで回転方向, トルクの発生方向を反転できます
	サーボオン入力	入力コモン間を閉とすることでサーボオン状態となります
	リセット入力	入力コモン間を閉とすることでアラームリセット状態となります
	ブレーキ解除入力	入力コモン間を閉とすることでドライバの状態に関係無くブレーキ解除となります
	経路誤差オン入力	入力コモン間を閉とすることで経路誤差指令入力が有効となります
制御信号出力	エンコーダ信号出力	A, B, Z信号をオープンコレクタで出力します 出荷設定1024パルス/回転, Z信号はA信号に同期して1回転に1パルス出力
	レディ出力	モータ駆動状態にあるとき出力トランジスタがオンとなります(オープンコレクタ出力)
	エラー出力	保護機能が作動する事で出力トランジスタがオフとなります(オープンコレクタ出力)
	エラーコード出力	保護機能に対応するコードを3ビットで出力します(オープンコレクタ出力)
電源出力	+5V	外部論理回路用電源(+5V, 200mA max)
	±15V	外部アナログ回路用電源(+15V, 100mA max)
モニタLED		power, ready, error, error code(3ビット)
モニタ点検端子		電流制限モータ, 過速度判定値モニタ, 過負荷判定値モニタ
ユーザ調整機能	A, B軸別調整	速度調整, ゼロ調整, 速度ループゲイン調整
	A, B軸共通調整	電流調整, 経路補正ゲイン調整, 過速度判定値調整, 過負荷判定値調整
ユーザ設定機能		エンコーダ信号パルス密度設定, レゾルバ/モータ極数比, ケーブル長補正, 経路補正極性
保護機能		ステップアウト/過速度, 過負荷(電子サーマル), 過電流, 過熱(出力段), 過電圧
絶縁抵抗, 耐圧		50Mオーム以上, 1000VAC 1分間(電源-シャーシ間にて)
使用環境		0~45℃ 85%Rh以下 熱対流のある雰囲気で使用します
付属品		端子台カバー, 0N用コネクタ0MR-34M, MR-34L(本多通信工業製), 0N4, 5用コネクタ5557-04R×2, 5556-PBT2LX8), 取扱説明書
重量		3.8Kg