

空気圧-電気ハイブリッドアクチュエータの研究

久, 隼人 / HISA, Hayato

(発行年 / Year)

2007-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2007-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2006 年度 法政大学工学研究科機械工学専攻
修士論文

空気圧 電気ハイブリッドアクチュエータの研究

Study of Pneumatic and Electric Hybrid Actuator

学生番号 05R1136

氏名 久 隼人

指導教員名 田中 豊

提出日 2006 年 2 月 17 日

目次

第 1 章 緒論	6
1. 研究背景	6
2. ハイブリッドアクチュエータ	8
3. 研究目的	9
第 2 章 アクチュエータの特徴と動作原理	10
1. 空気圧アクチュエータ	10
(1)アクチュエータの特性	10
(2)モデル化	11
2. 電動アクチュエータ	15
(1)アクチュエータの特性	15
(2)モデル化	16
3. ハイブリッドアクチュエータ	17
(1)アクチュエータの特性	17
(2)モデル化	18
第 3 章 実験用試作機	19
1. 直線駆動形実験機	19
(1)実験装置の構成	19
(2)実験装置の仕様	20
2. 回転駆動形実験装置	24
(1)実験装置の構成	24
(2)実験装置の仕様	25
3. 実験装置制御手法	28
4. 実験装置のシミュレーション	29
(1)DC モータ	29
(2)圧力制御弁	30
(3)直線駆動形シリンダ	31
(4)ダブルベーンタイプロータリーアクチュエータ	33
(5)ハイブリッドアクチュエータ	34
第 4 章 性能評価実験	37
1. 直線駆動形アクチュエータの性能評価実験	37

(1)矩形波入力に対する応答	37
. 実験方法	37
. 実験結果	38
. 考察	41
(2)正弦波入力に対する応答	45
. 実験方法	45
. 実験結果	46
. 考察	47
2. 回転駆動形アクチュエータの性能評価実験	48
(1)ステップ入力に対する応答	48
. 実験方法	48
. 実験結果	49
. 考察	51
(2)正弦波入力に対する応答	52
実験方法	52
実験結果	53
考察	54
(3)実験機の破損に関する考察	56
(4)耐衝撃性実験	57
実験方法	57
実験結果	58
考察	59
第5章 結論	60
1. 直線駆動形アクチュエータ	60
2. 回転駆動形アクチュエータ	61
3. ハイブリッドアクチュエータの改善点	62
4. 今後の展望	63
謝辞	64
参考文献	65
付録	66

図題一覧

Table1-1 各種駆動要素の便宜的分類	7
Table2-1 空気圧アクチュエータの種類と特徴	10
Fig2-1 空気圧シリンダの動作原理	11
Fig2-2 絞り抵抗容量系のモデル	11
Fig2-3 作圧駆動系におけるバルブのモデル	12
Fig2-4 空気圧アクチュエータのモデル	13
Fig2-5 バブルベーンタイプロータリーアクチュエータの動作モデル	13
Fig2-6DC モータのモデルのブロック線図	16
Fig2-7 ハイブリッドアクチュエータの動作モデル	18
Fig3-1 直線駆動実験装置のシステム構成	19
Table3-1 直線駆動形試験機の構成要素の仕様	21
Table3-2 試験機の仕様についての計算結果	22
Fig3-3 実験用試作機の設計図	22
Fig3-4 直線駆動形評価用試作機	23
Fig3-5 回転駆動形実験装置のシステム構成	24
Table3-3 回転駆動形評価用試作機の構成要素の仕様	26
Table3-4 試験機の仕様についての計算結果	26
Fig3-6 回転駆動形試作機外形図面	27
Fig3-7 回転直線駆動形評価用試作機	27
Fig3-8 試作機の実験用制御器	28
Fig3-9DC モータのシミュレーション	29
Fig3-10DC モータシミュレーション結果	29
Fig3-11 電磁弁シミュレーション	30
Fig3-12 電磁弁シミュレーション結果	30
Fig3-13 シリンダシミュレーション	31
Fig3-14 直線駆動形シリンダのシミュレーション結果	32
Fig3-15 ダブルベーンロータリーアクチュエータシミュレーション	33
Fig3-16 ダブルベーンロータリーアクチュエータシミュレーション結果	33
Fig3-17 直線駆動ハイブリッドアクチュエータシミュレーション	34
Fig3-18 直線駆動ハイブリッドアクチュエータシミュレーション結果	35
Fig3-19 回転駆動ハイブリッドアクチュエータシミュレーション	36
Fig3-20 回転駆動ハイブリッドアクチュエータシミュレーション結果	36
Fig4-1 直線駆動形アクチュエータの実験方法	37
Fig4-2 直線駆動形アクチュエータの負荷 0kg 時の挙動	38

Fig4-3 直線駆動形アクチュエータの負荷 2kg 時の挙動	38
Fig4-4 直線駆動形アクチュエータの負荷 5kg 時の挙動	39
Fig4-5 直線駆動形アクチュエータの負荷 5kg 時のばらつき比較	40
Table4-1 直線駆動形アクチュエータの負荷 5kg 時の標準偏差と誤差平均	40
Fig4-6 直線駆動形アクチュエータの負荷の重さによる挙動の比較	42
Fig4-7 直線駆動形アクチュエータの自由落下時との挙動の比較	42
Fig4-8 直線駆動形アクチュエータの負荷 0kg 時の挙動	43
Fig4-9 直線駆動形アクチュエータの負荷 2kg 時の挙動	43
Fig4-10 直線駆動形アクチュエータの負荷 5kg 時の挙動	44
Fig4-11 直線駆動形アクチュエータの負荷 5kg 時のボード線図	46
Fig4-12 直線駆動形アクチュエータのボード線図比較	47
Fig4-13 回転駆動形アクチュエータ実験時の設置方法	48
Fig4-14 回転駆動形アクチュエータのステップ入力に対する挙動	49
Fig4-15 回転駆動形アクチュエータの繰り返し実験の結果のばらつき	50
Table4-2 回転駆動形アクチュエータの繰り返し実験の結果平均誤差と標準偏	50
Fig4-16 回転駆動形アクチュエータのステップ入力に対する挙動比較	51
Fig4-17 回転駆動形アクチュエータのボード線図	53
Fig4-18 回転駆動形アクチュエータの目標位置による挙動の変化	54
Fig4-19 回転駆動形アクチュエータのボード線図比較	55
Fig4-20 回転駆動形アクチュエータ実験時の設置方法	57
Fig4-21 回転駆動形アクチュエータの外乱時の挙動	58
Fig4-22 回転駆動形アクチュエータの外乱時の挙動の比較	59
Fig5-1 ハイブリッドアクチュエータのコンセプトモデル	63

第1章 緒論

1. 研究背景

近年，先進国における生活の変化や地球全体での生活水準の向上などの影響で，新たな産業が生まれつつある．特に目立つものは，地球全体の温暖化などに着目した環境ビジネス，先進国における高齢化に伴う福祉介護ビジネス，生産現場における人件費比重の高さに着目した自動化ビジネスなどである．これらの産業が発達する中で，これまで一般的に使われてきた機械とは違う新たな要求が生まれてきている．それらに対応するためには，機械のサイズの小型化や，機械そのものの形を変える必要がある．その中で，特に注目されている分野が複数の部品を持たないマイクロ，ナノスケールの機械や，今までのアクチュエータに変わる新原理のアクチュエータである．しかしながら，これらの分野は一部では実用化されているがごく一部であり，広く普及するためには今後更なる研究が必要であると思われる．

そこで，現在では主に環境面からのアプローチで電動機と内燃機器を組み合わせたハイブリッド駆動の自動車などが登場している．これは，力が必要なときに内燃機器の馬力を使い，比較的力が求められない段階で電動機を用いるというように，それぞれの特徴を利用して組み合わせ，動作している．しかしながら，この方法のハイブリッドカーは双方の特徴を同時に引き出しているわけではなく，あくまで使い分けている状況である．近年では双方の利点を同時に生かすことにより，より優れた特徴を持つアクチュエータの研究も行われている．

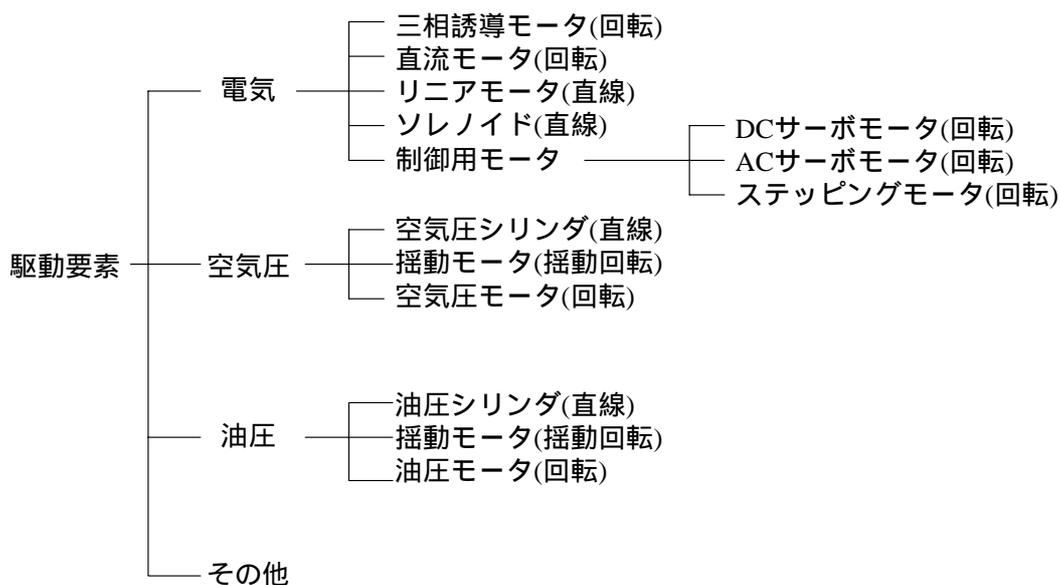
現在，広く使われているアクチュエータは電気駆動と流体圧駆動のものである[1][2]．Table1-1 にこれらのアクチュエータの便宜的に分類したものの[3]を示す．

電気駆動のものは，高い制御性と初期の設備投資が少なくすみ容易に導入できるという利点がある．しかしながら，性能は向上しつつあるもののサイズに対して出力が小さい，衝撃に弱い，状態保持にエネルギーが必要などの欠点がある．一方，流体圧アクチュエータには油圧，水圧などの液体圧駆動のものと，空気圧などの気体圧駆動のものがある．油圧アクチュエータは，そのサイズに対し非常に大きな出力を持っており，建設鉱山機械やプレス機などに広く用いられている．高い出力のほかにも高い位置制御性，対環境性，長い寿命などの利点がある．しかしながら，作動油の寿命やシステム全体の大きさなどの欠点がある．空気圧アクチュエータには，高い出力重量費，作動気体の周囲への影響，on-off での作動により確実に高速で動作するなどの利点がある．一方で，液圧とは違い作動気体の圧縮性により精密な位置制御ができないなどの欠点がある．また，流体圧駆動のアクチュエータ全体の特徴として，作動流体の圧力を上げるために用いられるポンプの効率が低いという欠点がある．しかしながら，一般家庭用で使用や，小形機器での利用が期待される低圧域のものについてはドライアイス[4]や，機能性流体を用いたポンプなども開発されつつある．

また、駆動方式では主に回転、揺動形と直線駆動形に分けることができる。回転、揺動形のものは主に大形のものは油圧、電動モータ。中、小形のものは主に電動モータ。一部に空気圧アクチュエータなどが用いられている。特に空気圧のものは、一度機構を設計すればその端部間を確実にすばやく動作できる利点があるが、途中位置での使用には適していない。また電気モータは、高い出力を求めるとサイズが大きくなり組み込む対象が制限されるという欠点がある。

直線駆動形のものは、どの大きさのものでも主に流体駆動アクチュエータが用いられている。しかしながら、近年では、直線形駆動の電動モータも登場してきており、一部で置き換わりつつある。しかしこれらのものは、強い磁石を用いるので周囲に対する影響や高い発熱、また駆動に高いエネルギーを要するなどの欠点もあり完全に取って代わるものとはなっていない。

Table1-1 各種駆動要素の便宜的分類



2. ハイブリッドアクチュエータ

ハイブリッド(hybrid)とは、産業で使われる用語で、組み合わせさせた、混合のなどの意味である。語源は「雌豚と猪の雑種」であるとされ、本来、良い意味でも悪い意味でも使われる言葉で、ごちゃ混ぜという意味もある。主に生物学の分野で複数の生物の特徴を併せ持つ雑種を示す言葉として使われてきた。

近年産業界では2種類以上のエネルギー発生技術・製品を組み合わせることで、相補的・効率的なエネルギー運用を目指す技術の総称として用いられている。

現在最も一般的なものとしてはハイブリッドカーがあげられる。ハイブリッドカーは、もともと電気自動車の航続距離の短さや、蒸気自動車の取扱いの難しさ、一定回転数でないと有効な出力が取り出せない内燃機関の欠点などを克服する為に作られたが、内燃機関の急速な進歩などにより、近年まで発達してこなかった。しかしながら、電気制御技術の発達や、環境問題などの観点から再び注目を浴び実際に商品として発達している。

本研究においては二種類のエネルギーソースを完全に使い分ける方法ではなく、直列につなぐことにより、積極的に二つのアクチュエータの利点を引き出そうと試みている。

類似研究としては、武村[5][6]らは回転形空気圧アクチュエータと電動アクチュエータを組み合わせた複合システムを、伊藤ら[7]は空気圧シリンダの送り機構に電動モータとボールねじを組み込んだ複合アクチュエータをそれぞれ提案・試作している。また、中野・田中ら[8]は空気圧・超音波複合形アクチュエータを試作している。今後も空気圧と電動アクチュエータ両者の長所を生かした一体形ハイブリッドアクチュエータへの期待は増すものと考えられる。

3. 研究目的

本研究では、今後さらに要求されるだろうアクチュエータの要求にこたえるひとつの手段として、空気圧アクチュエータと電動アクチュエータの特性に注目し、これら二つのアクチュエータを組み合わせることにより、新しいアクチュエータを提案、開発することである。二つのアクチュエータを組み合わせることにより、電動アクチュエータの持つ高い制御性と、空気圧アクチュエータの持つ高い出力を併せ持つ新しいアクチュエータが開発することを目指している。

特に、二つのアクチュエータを直列に接続することにより、双方の特性を積極的に取り組むことができ、より広い分野に利用できるアクチュエータを開発できる。また、直列につなぐことにより他に機構を用いずにアクチュエータ単体としてパッケージングが可能になるのではないかとと思われる。

今後ハイブリッドアクチュエータと表記されているものは本研究のために試作した実験用の試作機のことを示すものとする。

第2章 アクチュエータの特徴と動作原理

1. 空気圧アクチュエータ

(1)アクチュエータの特性

Table2-1 に空気圧アクチュエータの種類を示す．空気圧技術は，確立した医術として産業界の広い分野で利用されている．特に，自動化のための駆動源としては，その使いやすさ，価格の比較的な安さ，また設計を誤らなければ動作に確実性があることから広く利用されている．

一方で，空気圧機器には導入にあたり空気圧縮機，冷却器，空気清浄機，減圧弁，電磁弁などの周辺機器を導入しなければならず，それらの機器の効率やメンテナンス等にコストがかかる．また，単目的で設計した場合，急なライン変更などがあった場合，その駆動源である圧縮空気のもつ圧縮性により中間位置停止などには別途機構が必要である．

特に，この部分においては位置制御性を向上するために様々な制御手法を用いての研究が頻繁に行われている[9][10][11][12]．とはいえ，位置制御性を求める場面であっても，より制御性の優れた油圧アクチュエータや，電動アクチュエータへと代替できるものではなく，特に空気圧アクチュエータの持つスピードや，出力，周囲への影響などを考えると今後も空気圧アクチュエータにおけるサーボ技術の発達は期待されるところである．

Table2-1 空気圧アクチュエータの種類と特徴

	運動形態	シリンダの種類	特徴
空気圧アクチュエータの種類と特徴	直線	単動シリンダ	に比べて空気消費量は約半分，配管が1本でよい．戻り側の負荷が大きい場合には不向き
		複動シリンダ	他の直線駆動機構に比べて機構が簡単，軽量で取り扱い容易，出力大
	回転	ベーン形モータ	高速回転，トルク一定，防爆を考慮する場合に適する．過負荷がかかった場合も安全．
		ピストン形モータ	よりも外形大になる．高速が得られるが よりもやや遅い．
	揺動	ベーン形ロータリアクチュエータ	よりもコンパクトで構造簡単．よりも効率は悪い．軽量，トルク一定．
		ラック・ピニオン形ロータリアクチュエータ	に比べて外形が大きくなる．軸方向に長い．効率は丸 よりよい．

(2)モデル化

空気圧アクチュエータのサーボ系を設計する上で重要なものは、空気圧機器の各要素の動作原理と数式モデルである。今回の研究では作動圧駆動方式を用いてサーボ系を構築するので、このタイプの空気圧系の数学モデルを組み立てることが重要である。Fig2-1 に直線駆動形の空気圧シリンダの動作モデルを示す。このモデルでは左右の空気室内の持つエネルギーを対称にするために両ロッドシリンダを用いた場合を示した。

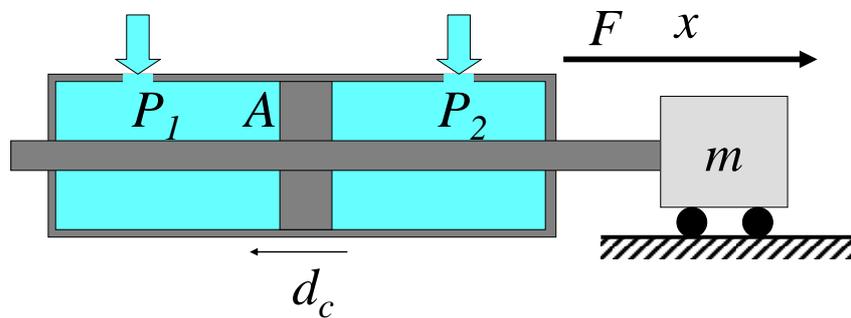


Fig2-1 空気圧シリンダの動作原理

この中で、 A は断面積、 P_1 、 P_2 はそれぞれの空気室内の圧力、 d_c はシリンダ内の摩擦、 m は負荷質量、 F はシリンダの持つ力、 x は変位となっている。これを数式で示すと次のようになる[13]。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c_c \frac{dx}{dt} = (p_1 - p_2) A - \text{sgn} \left(\frac{dx}{dt} \right) d_c - mg \quad (1)$$

このシリンダを制御するときのパラメータとしては P_1 、 P_2 である。この変数はシリンダの各ポートの先に取り付けられた圧力制御弁によって制御される。バルブは Fig2-2 に示したような絞り抵抗容量系のモデルで示すことができる[14]。

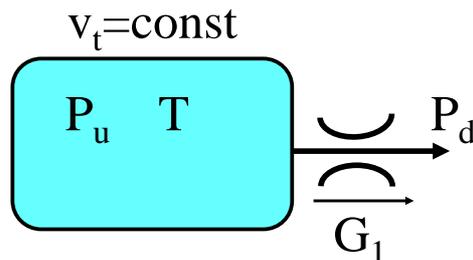


Fig2-2 絞り抵抗容量系のモデル

このとき P_u, P_d はそれぞれ一次圧と二次圧, t は回路全体の容量, T は空気温度, G_1 はバルブを通る流量である. これを数式で表すと次のようになる.

$$\frac{dp_t}{dt} = \frac{\kappa RT}{V_t} G_1 \quad (2)$$

しかしながら, 実際の空気圧系ではこのバルブを二つつなぎ, シリンダを動作させている. Fig2-3 に実際のシステムを考慮したバルブによる二次圧の変化のモデルを示す.

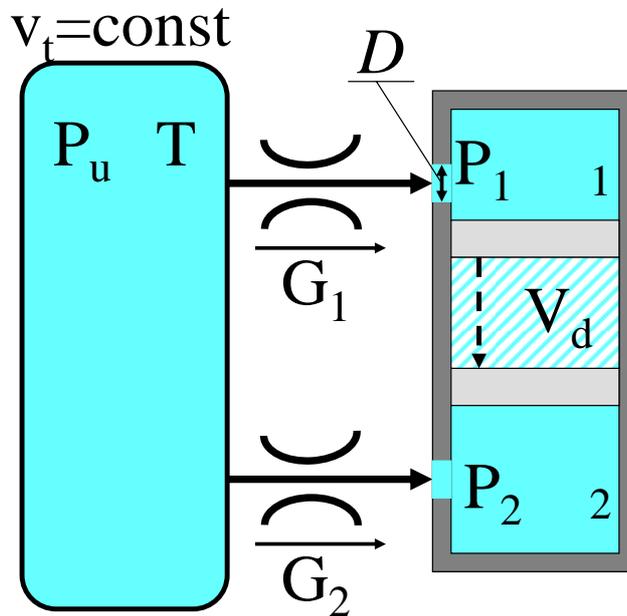


Fig2-3 作圧駆動系におけるバルブのモデル

このとき問題となるのはシリンダへの空気の流入抵抗と, シリンダのロッド移動による空気室の容積の変化, それによって発生する空気室内の空気の圧縮である. これを数式で表すと次のようになる.

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_1}{dt} &= \frac{\kappa RT}{V_t} G_1 - \frac{\kappa RT}{V_t} (\rho_1 D + \rho_1 V_d - \rho_2 V_d) \dot{\theta} \\ \frac{dp_2}{dt} &= \frac{\kappa RT}{V_t} G_2 - \frac{\kappa RT}{V_t} (\rho_2 D + \rho_2 V_d - \rho_1 V_d) \dot{\theta} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

このとき実際に制御する部分は流量である G である . この部分はオリフィスであると考えられるので , 次のように示すことができる .

$$\begin{aligned}
 G_1 &= S_1 p_u \sqrt{\frac{\kappa}{RT_u}} \sqrt{\frac{2}{\kappa-1} \left\{ \left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{2/\kappa} - \left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{\kappa+1/\kappa} \right\}} \\
 G_2 &= S_2 p_u \sqrt{\frac{\kappa}{RT_u}} \sqrt{\frac{2}{\kappa-1} \left\{ \left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{2/\kappa} - \left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{\kappa+1/\kappa} \right\}}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

このときバルブ内の有効断面積 S を入力する電圧に対して変化させることにより流量を制御する . これらの式を Fig2-4 のブロック線図ようにつなぐことにより空気圧系をモデル化することができる .

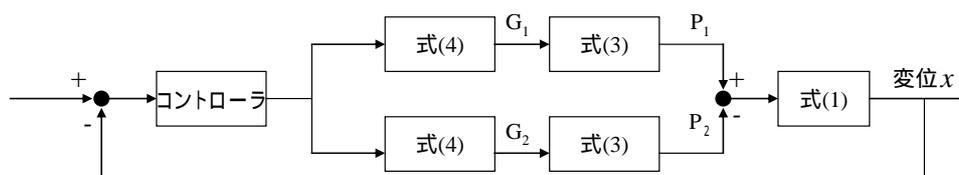


Fig2-4 空気圧アクチュエータのモデル

ここまで直線駆動形アクチュエータをモデル化してきたが , 回転形アクチュエータでも同様にモデル化することができる . Fig2-5 にダブルベーン形の空気圧アクチュエータの動作モデルを示す .

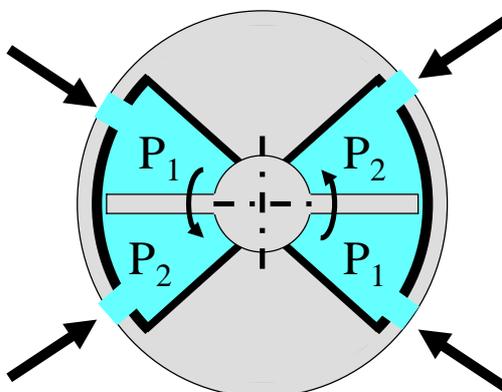


Fig2-5 ダブルベーンタイプロータリーアクチュエータの動作モデル

これを数式であらわすと次のようになる .

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + C \frac{d\theta}{dt} + T_C \cdot \text{sgn}(\dot{\theta}) + T_L = (p_1 - p_2)D \quad (5)$$

これを先ほどのブロック線図のアクチュエータ部分に当てはめれば回転形アクチュエータをモデル化することができる .

2. 電動アクチュエータ

(1)アクチュエータの特性

電動アクチュエータには AC モータ, DC モータ, ステッピングモータ, リニアモータなどの種類がある。特に, AC, DC モータは導入が容易であり, かつ制御性が良好であるため非常に多くの分野で利用されている。特に頻繁にラインが変更になる近年の工場ラインで導入されるロボットなどには, プログラムによって容易に停止位置を変更できるために非常に多くが用いられている。

しかしながら, 大きな力が必要な場面においてはその分大きなコイルや強力な磁石が必要になるので, そのサイズや重量, 周囲への影響が大きくなる傾向にある。また, 構造的に強い衝撃に対して弱いために衝撃を吸収する機構を用意する必要がある。

今回の研究では小形のものが多く, 一般的に多く出回っていることから DC モータを使用した。また DC サーボモータには専用のアンプが用意されていることが多く, それを利用することで容易にサーボ系を構築することができる。

(2)モデル化

DC モータによるサーボ系を設計する上で、あらかじめその挙動を予測するにはモデル化が有効である。

DC モータは電気系による部分と、モータの持つ機構の機械的な部分に分けて考えることができる。まず電気部分は次のように示すことができる。

$$e_a = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_b \quad (6)$$

このとき R_a は電気抵抗， L_a は電気インダクタンス， i_a は電流， e_a は入力電圧， e_b は逆起電力電圧である。このとき逆起電力は次のように求めることができる。

$$e_b = K_b \dot{\theta} \quad (7)$$

このとき K_b は逆起電力定数である。

また機械的な部分は次のように示すことができる。

$$T = K_T \cdot i_a \quad (8)$$

$$J_m \ddot{\theta} + b_m \dot{\theta} = T_l \quad (9)$$

このとき T_l はトルク損失， b は摩擦粘性係数， J はロータの慣性負荷， θ は軸の変位である。

これらの式を Fig2-6 のようにまとめることができる。

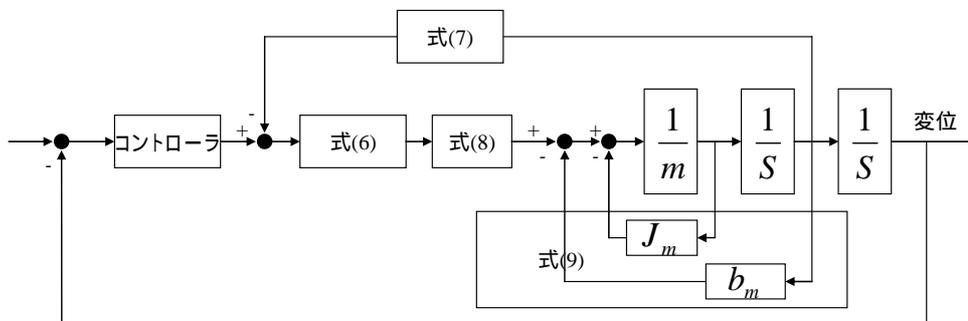


Fig2-6DC モータのモデルのブロック線図

これを用いるとモータの動作を予測することができる．

3．ハイブリッドアクチュエータ

(1)アクチュエータの特性

本研究で提案するハイブリッドアクチュエータは空気圧アクチュエータと，DCモータを機構により組み合わせることによって，空気圧アクチュエータと電動アクチュエータの双方の利点を併せ持ったアクチュエータを実現することを期待している．

このアクチュエータの特色は二つのパワーソースを完全に分けて利用するのではなく，二つのエネルギーを併用することにより新しい特徴を獲得することにある．また，状況によってそれぞれのアクチュエータの出力の割合を変更することにより，効率的に動作させることができるのではないかと考えているが，この部分については今後の実現を目指し研究を進める必要がある．

(2)モデル化

Fig2-7 に本研究におけるハイブリッドアクチュエータの動作モデルをブロック線図に表したものを示す。

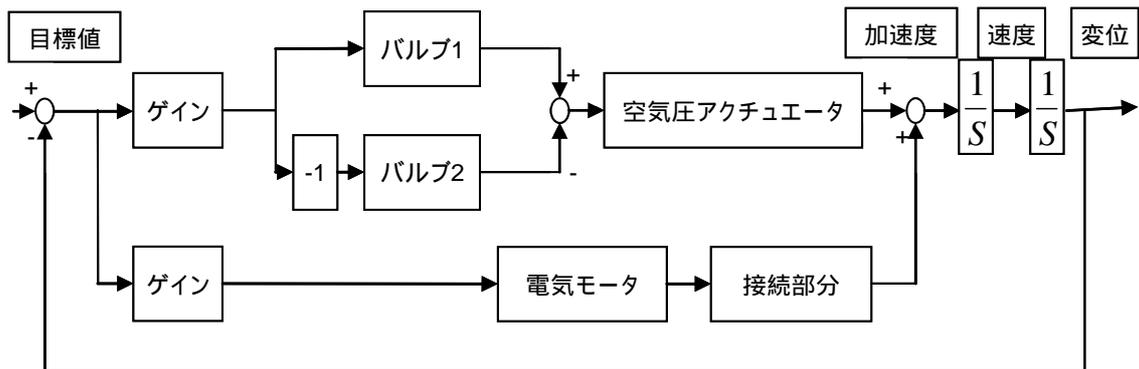


Fig2-7 ハイブリッドアクチュエータの動作モデル

前項までに述べた空気圧アクチュエータと電動アクチュエータのモデルを用いて、このアクチュエータを示すことができる。しかし、実際には電気モータにつける減速機、空気圧アクチュエータとの接続に用いたタイミングベルト、直線駆動形のものでは回転を直線に変換するためのワイヤ機構の持つ慣性などを考慮すればこのハイブリッドアクチュエータの挙動を予測することができる。

第3章 実験用試作機

1. 直線駆動形実験機

(1) 実験装置の構成

Fig3-1 に実験装置のシステム構成図を示す。

DC サーボモータには、Maxon 社の A-max22 を採用した。減速器にはプラネタリギアヘッド GP22B を使用した。空気圧シリンダには、SMC 社の CDM2WL20F-150A-H7BWL を採用した。DC サーボモータの出力が小さいため、両者の出力のマッチングを目指すためには空気圧シリンダの径は小さめであるほうが望ましい。しかし一般に、内径 20mm 未満の空気圧シリンダには空気粘性の影響が出やすく、挙動の比較が困難になるため、このシリンダを選択した。またモータの直線への変換はワイヤ機構を用いて行った。

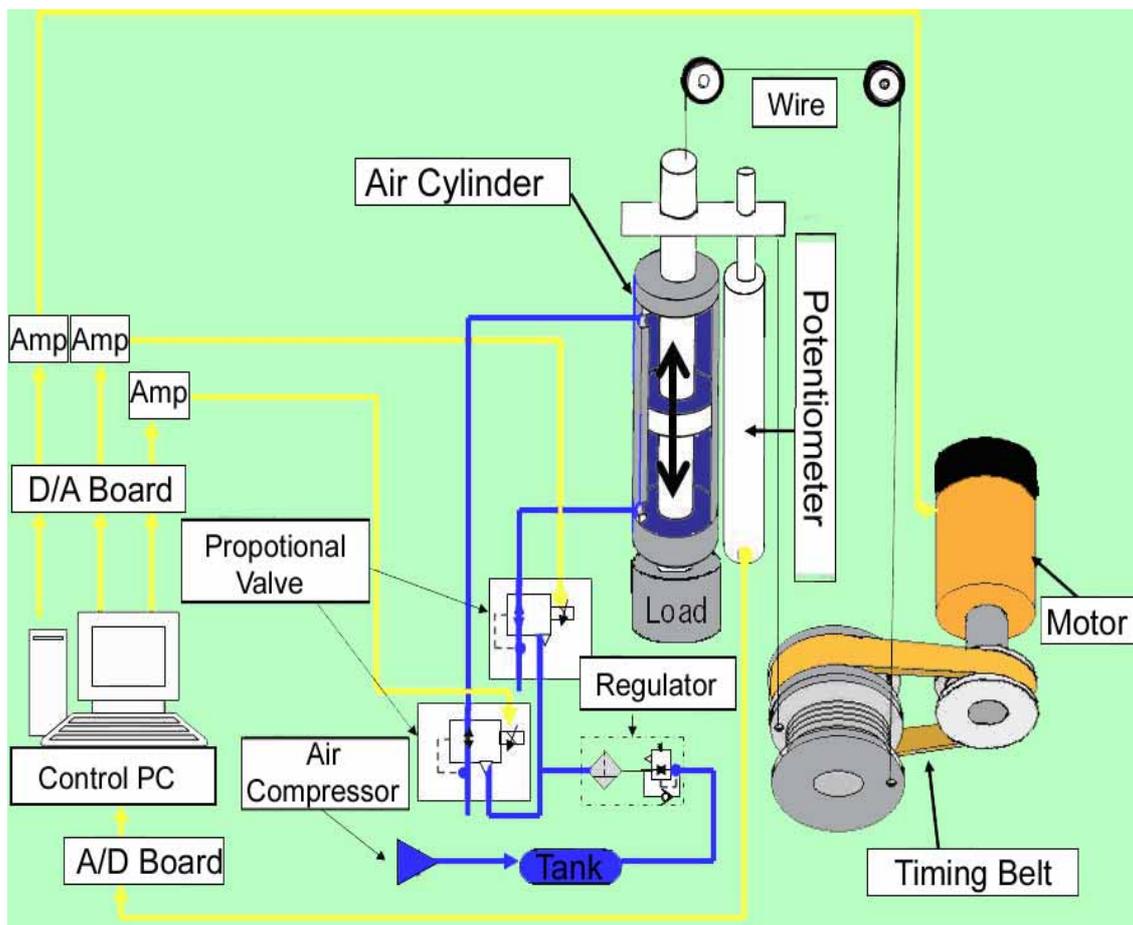


Fig3-1 直線駆動実験装置のシステム構成

(2)実験装置の仕様

Table3-1 表に実際使用したアクチュエータと、アンプ、バルブ、センサ、A/D ボード、D/A ボードの仕様を示す。また、バルブへの供給圧力は 0.7MPa である。実験装置の仕様の検討にあたって、まず空気圧駆動と電気駆動の推力比を考えた。アクチュエータの軽量化を目指すにあたっては、空気圧駆動の出力比をできるだけ大きくすることが望ましい。しかし、電気駆動の出力比が小さ過ぎれば、十分な制御ができない。今回製作する試作機では、空気圧駆動と電気駆動の推力比を 2:1 とした。空気圧力とプーリ径の比を、この推力比を満たすように調整した。速度のマッチングは空気経路の絞りの調整をもって行う。Table3-2 に試験機の仕様についての計算結果を示す。

Fig3-3 に本実験装置の設計図面を、Fig3-4 に実際製作した実験用試作機の外観を示す。電気モータの回転はタイミングベルトを介して回転軸へと伝わる。そして、同軸上に取り付けたボビンでワイヤを巻き取ることで回転運動は直線運動へと変換され、空気圧シリンダのロッドの一端に伝達される。ワイヤの力の作用点はシリンダロッドの中心からずれているが、動作上の問題にはならないことが確認された。シリンダ、ポテンシオメータ等は二重の鉄板に取り付けている。また、150mm ほど間隔をあけてもう一枚鉄板を配置し、回転軸を 2 点で支えている。

Table3-1 直線駆動形試験機の構成要素の仕様

A-max22 ・Maxon (汎用 DC モータ)	定格出力	6.0 W
	公称電圧	12.0 V
	質量	54 g
	無負荷回転数	10200 rpm
	回転数 / トルク勾配	477 rpm/mNm
	最大連続トルク	7.43 mNm
	公称電圧時最大出力	5640 mW
プラネタリギアヘッド GP22B	減速比	19:1
	質量	48 g
	連続最大トルク	0.15 Nm
CDM2WL20F-150A-H7BW L SMC (両ロッド式空気圧シリンダ)	ストローク	150 mm
	シリンダ内径	20 mm
	ロッド径	8 mm
	最高使用圧力	1.0 MPa
	最低使用圧力	0.08 MPa
4-Q-DC サーボアンプ LSC 30/2	電源電圧	12-30 VDC
	最大出力電圧	25VDC
	指令電圧	-10...+10 VDC
電空比例弁：圧力形 VEP3141・SMC	最高使用圧力	1.0 MPa
直線変位ポテンシオメータ RECTI P12-150	ストローク	150 mm
	フリクショントルク	2 N 以下
A/D ボード D/A ボード	入出力電圧	-10...+10 VDC
	分解能	2 ¹²
	ポート数	各 4

Table3-2 試験機の仕様についての計算結果

モータトルク（減速後）	0.141 Nm
ギヤヘッドの最大効率	0.81
プーリ径の比（駆動側：受動側）	1:4
ワイヤを巻き取るプーリの径	20 mm
電気駆動による推力	45.7 N
モータ回転数（減速後）	350 rpm
ワイヤを巻き取る速度	92 mm/s
シリンダ面積	0.000264 m ²
最大使用圧力	0.3 MPa
空気圧駆動による推力	79.2 N
推力比（空気圧：電動）	1.75:1

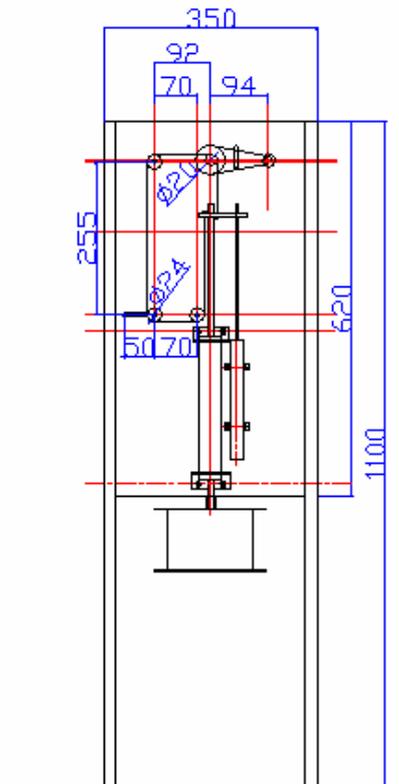


Fig3-3 実験用試作機的设计図



Fig3-4 直線駆動形評価用試作機

2. 回転駆動形実験装置

(1) 実験装置の構成

Fig3-5 に今回制作した実験装置のシステム構成を示す。

DC サーボモータには、Maxon 社の A-max22 を採用した。減速器にはプラネタリギアヘッド GP22B を使用した。空気圧シリンダには、SMC 社の MC 製 CRB2F10Y-90D(仕様トルク 0.25[N・m] 供給圧力 0.5[MPa]時)を選定した。ダブルベーン形ロータリーアクチュエータはベーンに圧縮空気を供給することによりロータが扇状に旋回運動をする。構造上ダブルベーンはストロークが 90° 以下に制限されてしまう。しかし、ダブルベーンはシングルベーンに比べ受圧面積が2倍になるのでトルクは2倍になるため、今回の実験装置ではダブルベーンタイプを用いた。

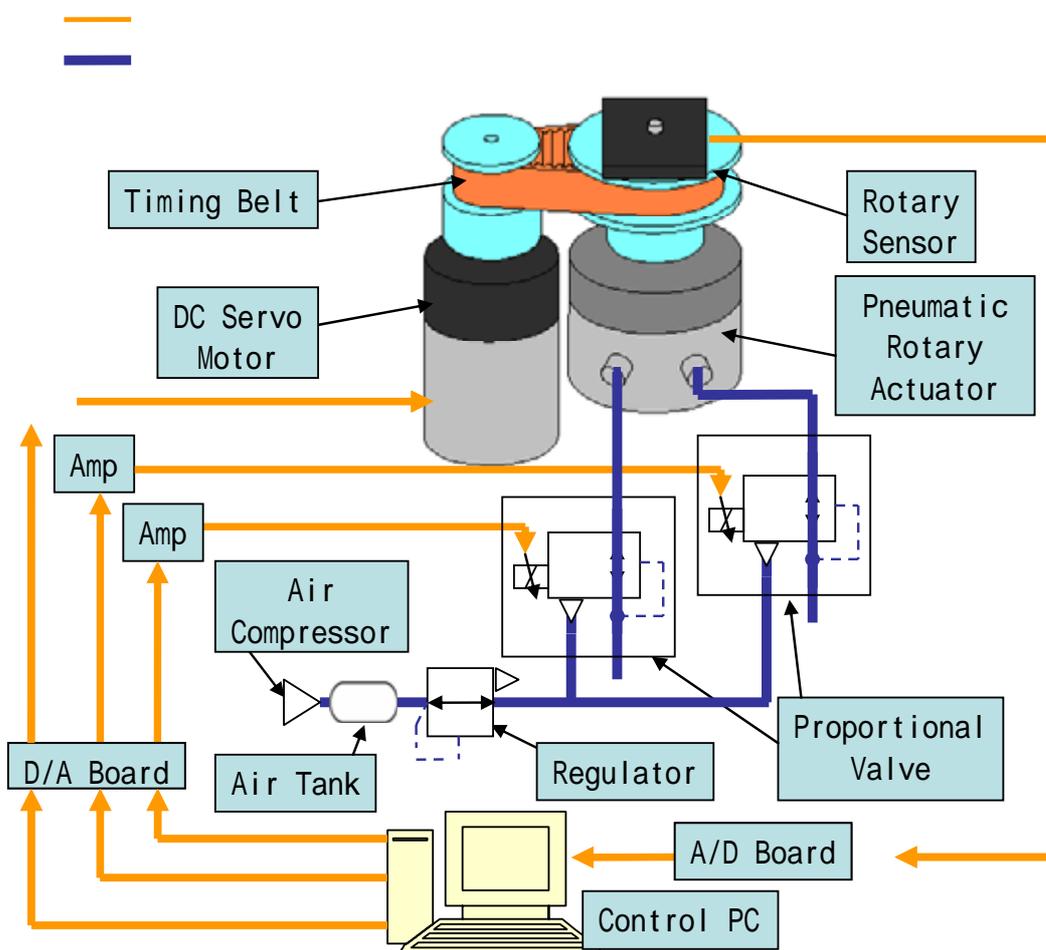


Fig3-5 回転駆動形実験装置のシステム構成

(2)実験装置の仕様

Table3-3 に実際に実験装置で用いたアクチュエータ等の仕様を示す。
空気圧，電気それぞれの軸にタイミングプーリを取り付け，タイミングベルトで接続して動力を伝達してハイブリッドとする。ベルトの緩みを防ぐためにテンションアジャスタを取り付けてある。

空気圧アクチュエータは両軸となっており，片側の先端にロータリーセンサを取り付けて角度を計測する。プーリの反対側の軸がハイブリッドアクチュエータの出力軸となっている。この出力軸に負荷を取り付け様々な実験を行う。Table3-4 に実験装置の計算から求めた仕様を示す。

Fig3-6 に実験装置の設計図面を，Fig3-7 に実験装置の写真を示す。

Table3-3 回転駆動形評価用試作機の構成要素の仕様

A-max22 ・ Maxon (汎用 DC モータ)	定格出力	6.0 W
	公称電圧	12.0 V
	質量	54 g
	無負荷回転数	10200 rpm
	回転数 / トルク勾配	477 rpm/mNm
	最大連続トルク	7.43 mNm
	公称電圧時最大出力	5640 mW
プラネタリギアヘッド GP22B	減速比	19:1
	質量	48 g
	連続最大トルク	0.15 Nm
CRB2F10Y-90D (ダブルベーンタイプロータリーアクチュエータ)	ストローク	90 °
	トルク (供給圧力 0.5[MPa])	0.25 Nm
	最高使用圧力	0.7 MPa
	最低使用圧力	0.2 MPa
4-Q-DC サーボンプ LSC 30/2	電源電圧	12-30 VDC
	最大出力電圧	25VDC
	指令電圧	-10...+10 VDC
電空比例弁：圧力形 VEP3141・SMC	最高使用圧力	1.0 MPa
ロータリーセンサ RDC80	ストローク	エンドレス
	フリクシントルク	10mNm 以下
A/D ボード	入出力電圧	-10...+10 VDC
D/A ボード	分解能	2 ¹²
	ポート数	各 4

Table3-4 試験機の仕様についての計算結果

	トルク[N・m]	パワー密度[W/kg]
空気圧アクチュエータ	0.25	311.7
電気モータ	0.14	59.4
ハイブリッドアクチュエータ	0.39	

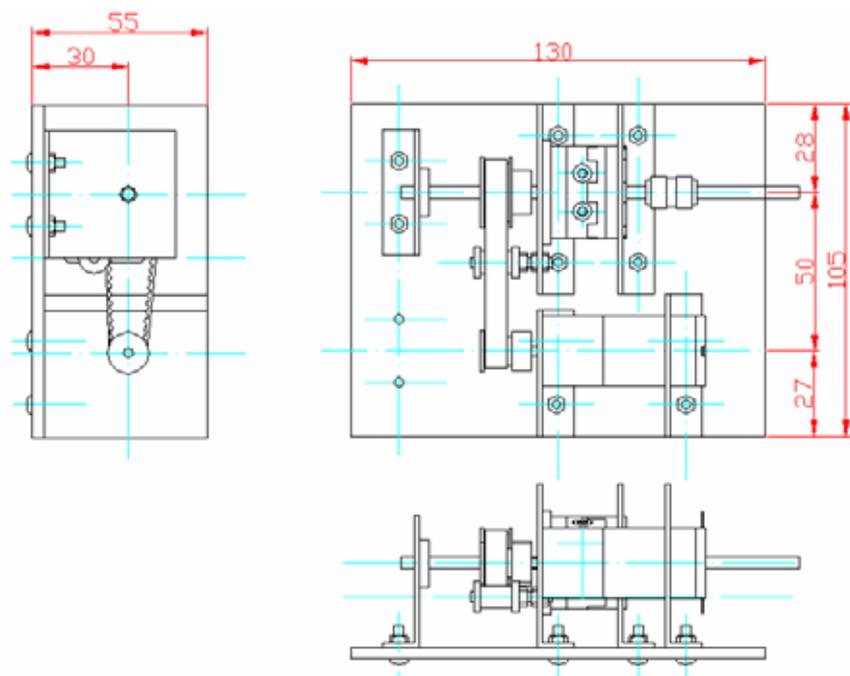


Fig3-6 回転駆動形試作機外形図面



Fig3-7 回転直線駆動形評価用試作機

3. 実験装置制御手法

Fig3-8はこの実験装置の制御方法をブロック線図で示したものである．位置のフィードバック制御系に対して，空気圧と電動アクチュエータのそれぞれにPID制御器を設置した．制御器のゲインについては次項の述べる実験装置のシミュレーションを用い，試行錯誤的に求めたものを使用した．

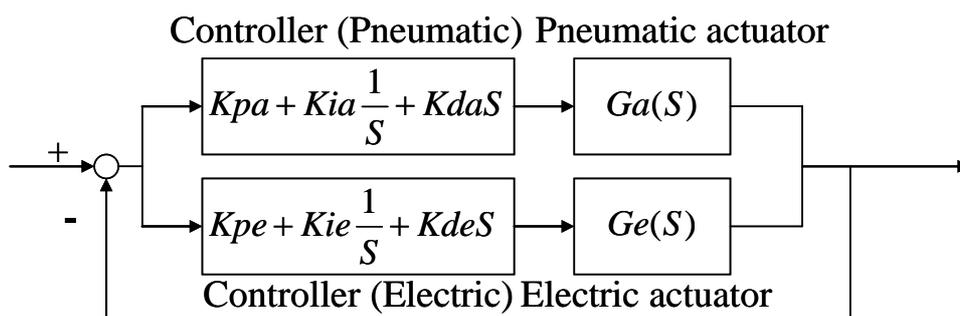


Fig3-8 試作機の実験用制御器

4. 実験装置のシミュレーション

(1)DC モータ

直線駆動形,回転駆動形双方において同様のものを使用している DC モータをモデル化しシミュレーションを行う.実際に使用している A-max22 のカタログをもとに,式(6)~式(9)に各値を当てはめる.これを MATLAB/simlink を用いてシミュレーションを行った[14][15]. Fig3-9 は DC モータの simlink 上のモデルである.

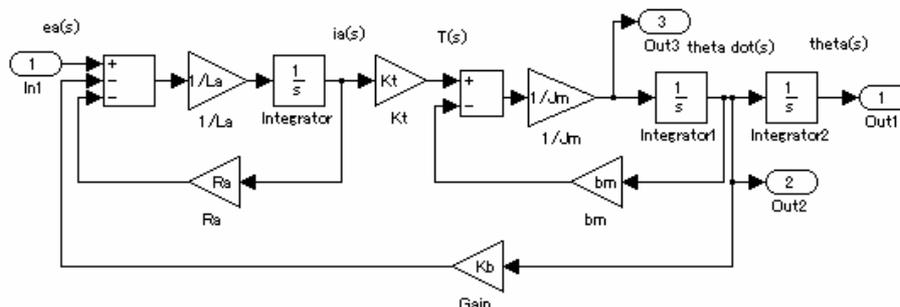


Fig3-9DC モータのシミュレーション

このときの各値は $R_a=3.2$, $L_a=8.6 \times 10^{-3}$, $J_m=10 \times 10^{-6}$, $b_m=3 \times 10^{-6}$, $K_b=60 \times 10^{-3}$, $K_t=17 \times 10^{-3}$ となっており,これは実際のモータと同じである. Fig3-10 に実際にシミュレーションを行った結果を示す.

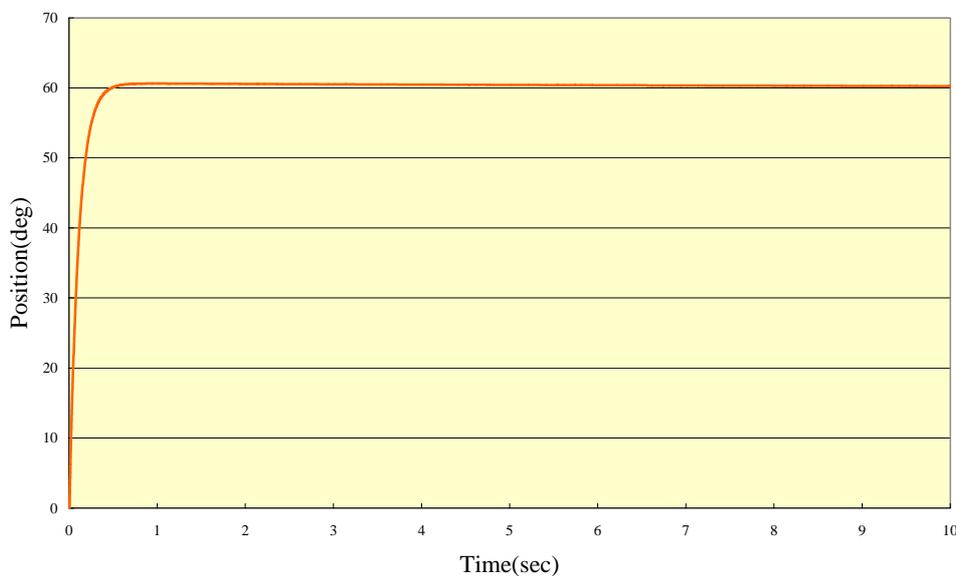


Fig3-10DC モータシミュレーション結果

(2) 圧力制御弁

実際に使用する圧力制御弁のシミュレーションを行う。Fig3-11 に式(2)～式(4)をsimlink であらわしたものを示す。

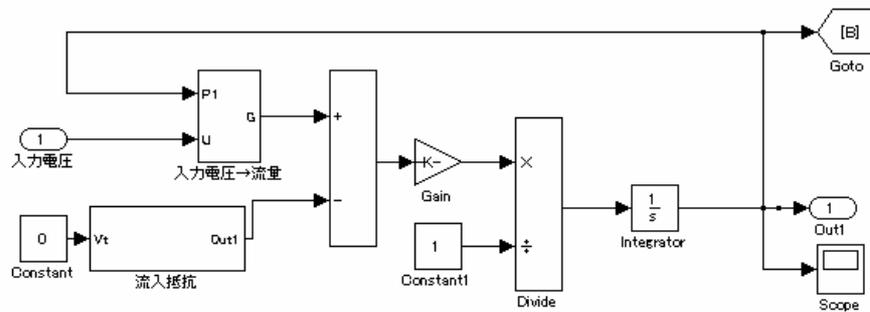


Fig3-11 電磁弁シミュレーション

Fig3-12 にこのシミュレーションを実際に行った結果を示す。

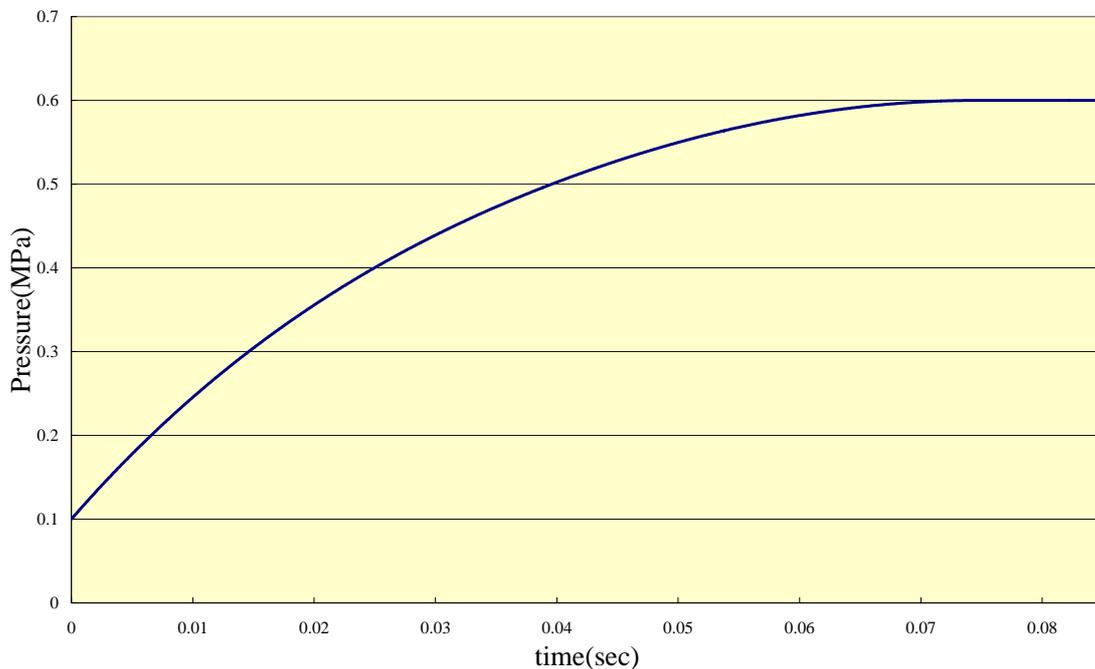


Fig3-12 電磁弁シミュレーション結果

ただしこの結果は 0.1MPa で満たされた雰囲気においてアクチュエータによる押しつけや、流入抵抗等を考慮していない。

(3)直線駆動形シリンダ

実際に使用する直線駆動形シリンダのモデル化とシミュレーションを行う。各要素は表より導入する。また、アクチュエータの摩擦は予測が難しいので、本項では、カタログ上の最低使用圧力相当のものを用いている。これにもとづき式(1)を simlink であらわすと Fig3-13 のようになる。

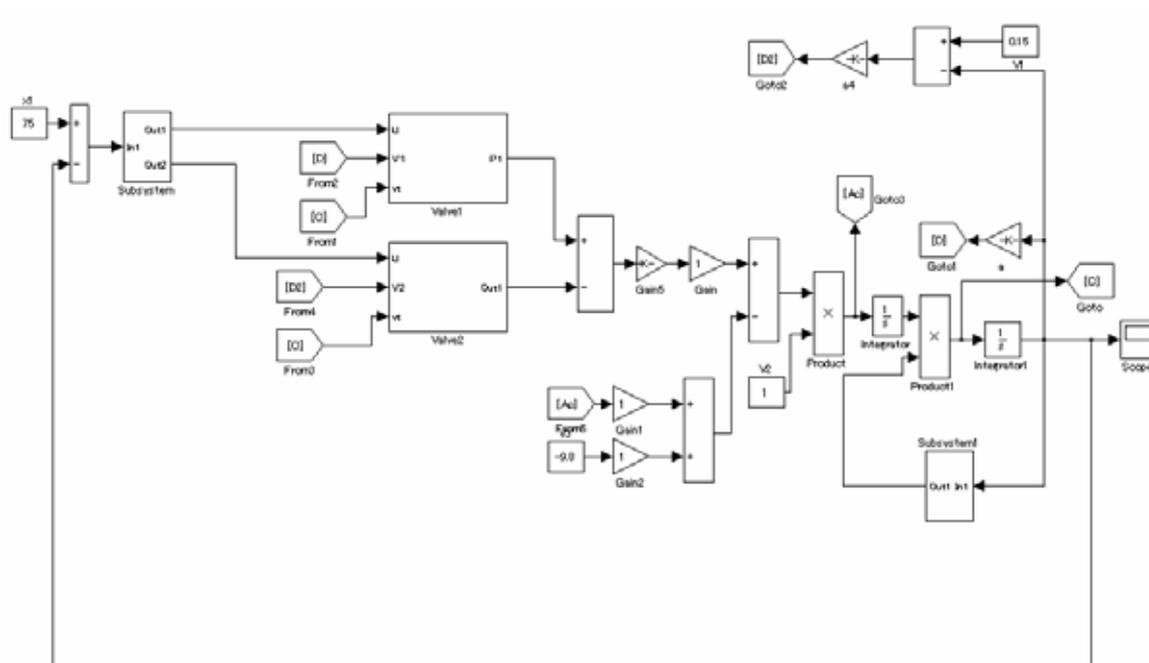


Fig3-13 シリンダシミュレーション

このときバルブは前項で示したものを二つ用いている。Fig13 1 にシミュレーションを行った結果を示す。

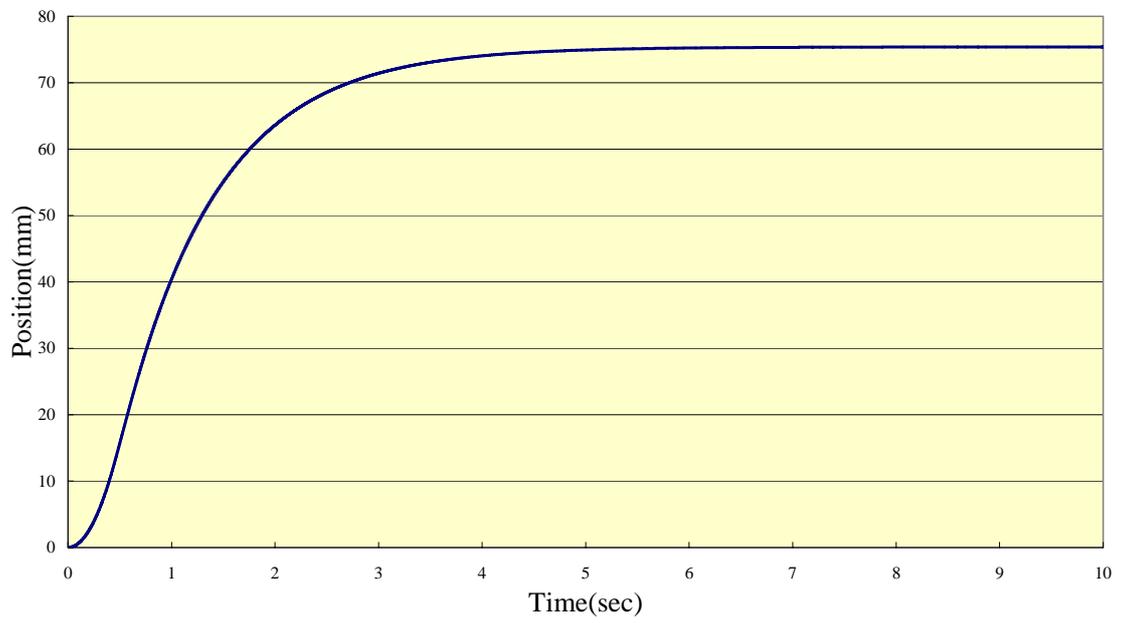


Fig3-14 直線駆動形シリンダのシミュレーション結果

(4)ダブルベーンタイプロータリーアクチュエータ

直線駆動形と同様に表()の値を用い,式(5)を simlink 上にあらわす. Fig3-15 に simlink 上のモデルを示す.

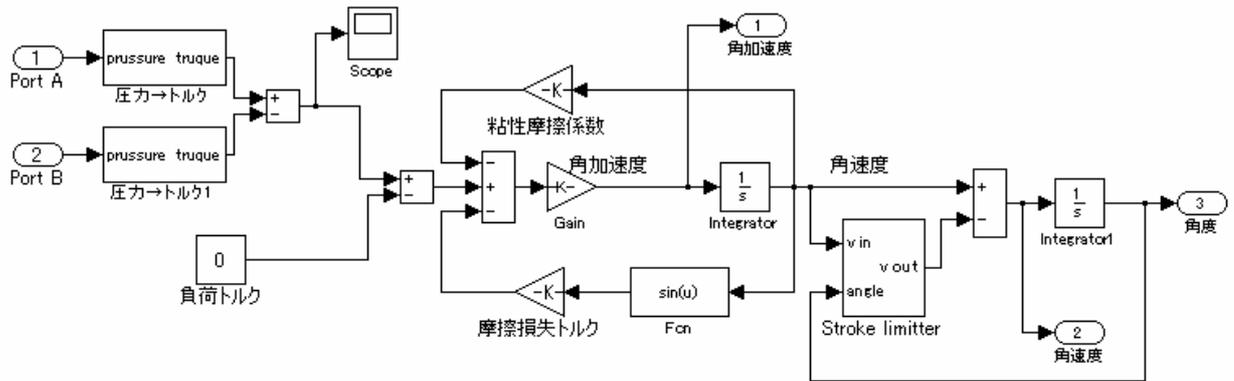


Fig3-15 ダブルベーンロータリーアクチュエータシミュレーション

このときポート A,B の先には電磁弁の項で求めたバルブがそれぞれひとつずつ接続されている. Fig3-16 にこのシミュレーションを実際に行った結果を示す.

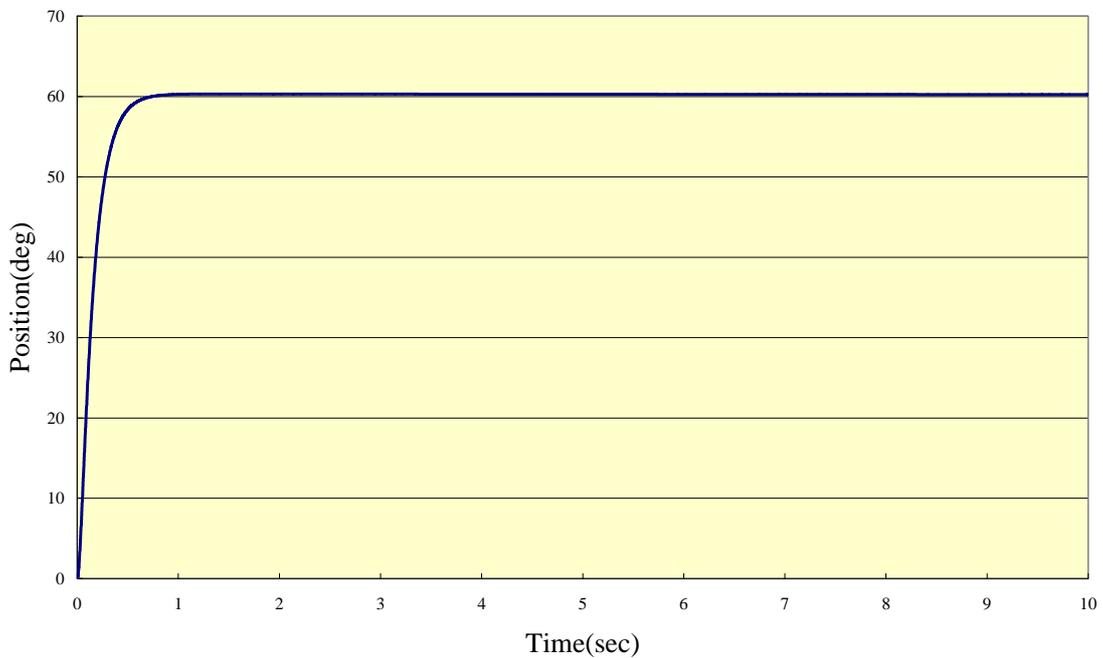


Fig3-16 ダブルベーンロータリーアクチュエータシミュレーション結果

(5)ハイブリッドアクチュエータ

Fig3-17 に直線駆動形ハイブリッドアクチュエータの simlink 上でのモデルを示す . このモデルではトルクの形で出力される DC モータの出力を直径 2cm のボビンを用いてステンレスワイヤで巻き上げる機構を用いて変換している . ワイヤ機構での損失はカタログ上 0.02%以下であることから , 今回は考慮していない .

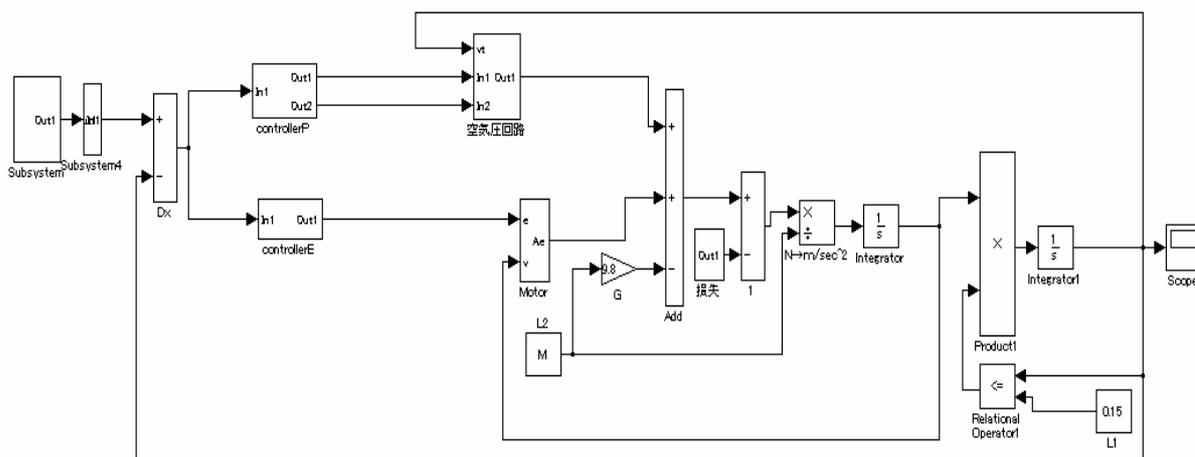


Fig3-17 直線駆動ハイブリッドアクチュエータシミュレーション

空気圧アクチュエータ部分 , 電気モータ部分は前項までに用いたものと同じものを使用している . それに電動モータに取り付けたギアヘッド , タイミングベルトによる減速と , トルク損失を付け加えたものである . なおタイミングベルトによる伝導効率 はカタログを参考に 98%としてシミュレーションを行った .

Fig3-18 にこれを実際にシミュレーションした結果を示す．実際の実験装置の動作はこのようになるのではないかと予測できる．

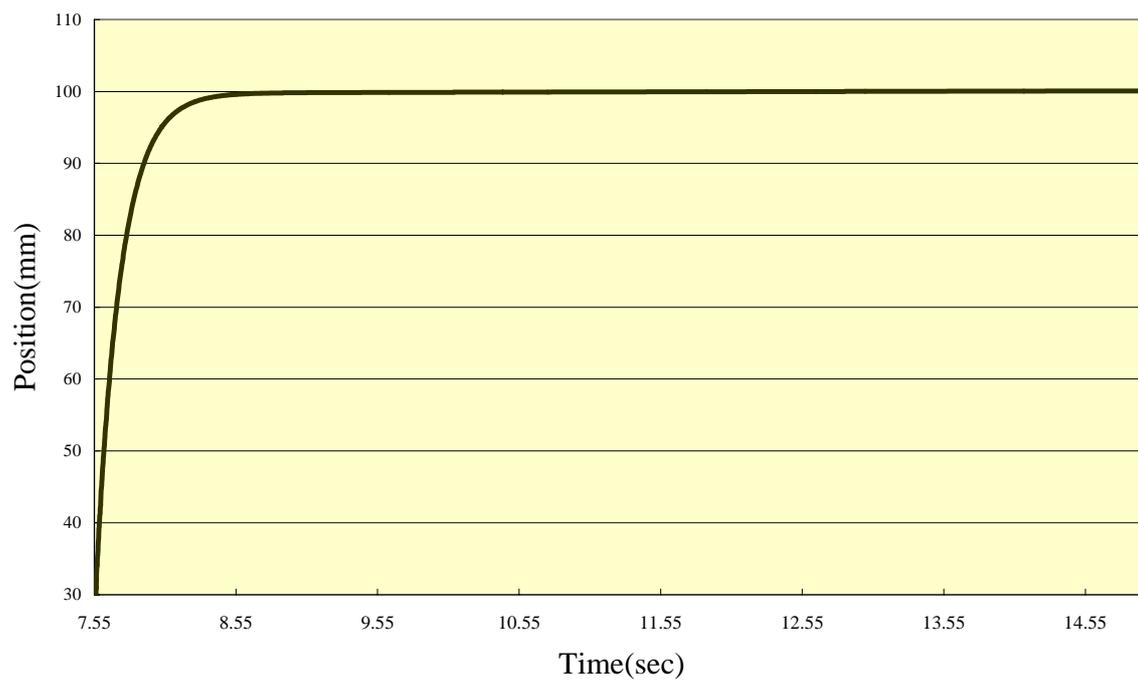


Fig3-18 直線駆動ハイブリッドアクチュエータシミュレーション結果

また，回転形のものも同様に予測することができる．Fig3-19 に simlink 上に再現した回転形ハイブリッドアクチュエータのモデルを示す．

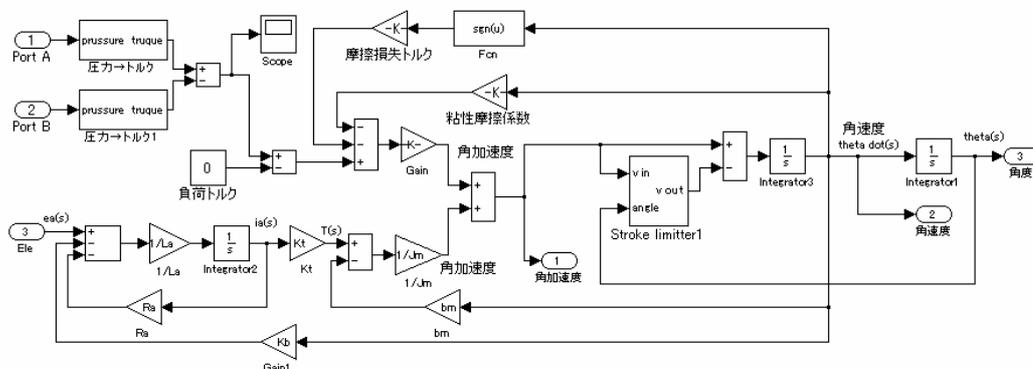


Fig3-19 回転駆動ハイブリッドアクチュエータシミュレーション

こちらでも，空気圧，電気それぞれの部分は前項までのものと同様のものを用いている．それに電動モータに取り付けたギアヘッド，タイミングベルトによる減速と，トルク損失を付け加えたものである．なおタイミングベルトによる伝導効率カタログを参考に 98%としてシミュレーションを行った．Fig3-20 は，シミュレーションの結果である．実際の試験機もこのように動作すると予測することができる．

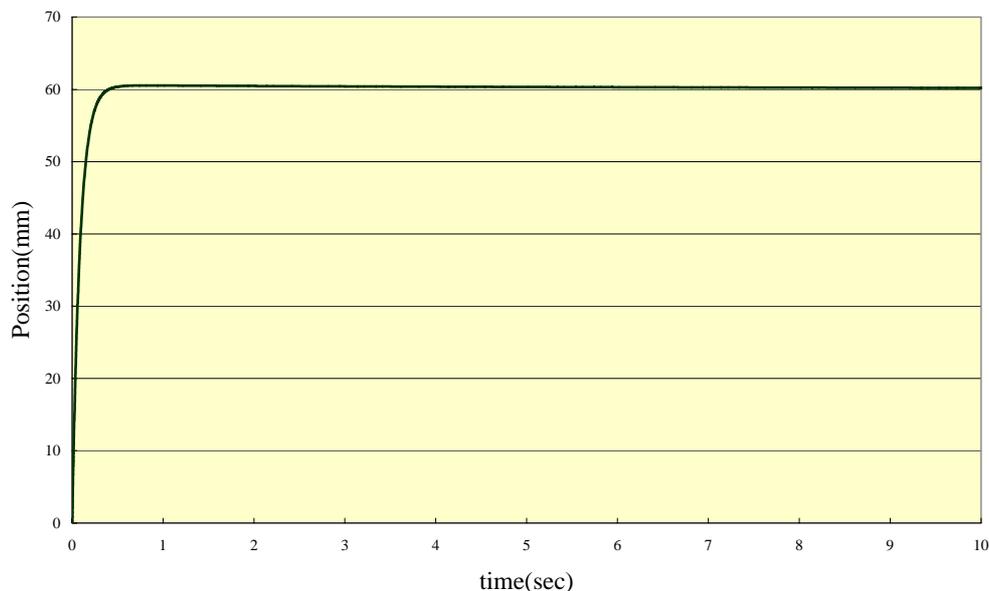


Fig3-20 回転駆動ハイブリッドアクチュエータシミュレーション結果

第4章 性能評価実験

1. 直線駆動形アクチュエータの性能評価実験

1) 矩形波入力に対する応答

実験方法

Fig4-1 のように設置した実験用試作機の鉛直下方向に一定の重量の負荷を取り付ける。シリンダ上端及び下端における特に摩擦が大きいと思われる部分を避けるためにシリンダの最下端を基準位置としそこから 30mm の位置まで引き上げいったん停止させる。その後、目標位置を 30mm から 100mm まで引き上げ、再び 30mm に変化させ、そのときのハイブリッドアクチュエータの挙動を観察した。

このとき取り付ける負荷は、0kg、2kg、5kg の 3 種類である。ただし、0kg の負荷のものでも、装置により発生する様々な負荷がかかるため、実際にはおよそ 0.3kg の負荷がかかっている状態にある。この実験をそれぞれの負荷について行い、このアクチュエータの速度や動作を評価した。

また 5kg での実験に際して再現性や位置決め精度を評価するために引き上げ実験を 30 回繰り返し行い、評価した。

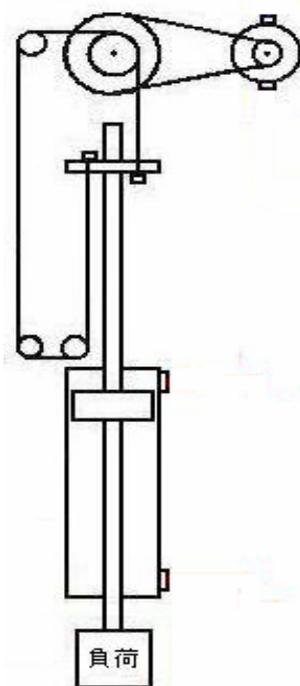


Fig4-1 直線駆動形アクチュエータの実験方法

実験結果

Fig4-2 , Fig4-3 , Fig4-4 に負荷 0kg , 2kg , 5kg での実験の結果の一例を示す .
また , Fig4-5 及び Table4-1 は 5kg の負荷で行った繰り返し実験の結果である . こちらの実験結果には性能が評価しやすいように空気圧アクチュエータ単体で行った同様の実験の結果を併せて載せてある . 本実験では引き上げ時のものしか記録していないが , 鉛直下方への繰り返し動作実験は 5kg 時の実験結果を見ればわかるとおり非常に大きいオーバーシュートを出すことから今回は評価しなかった .

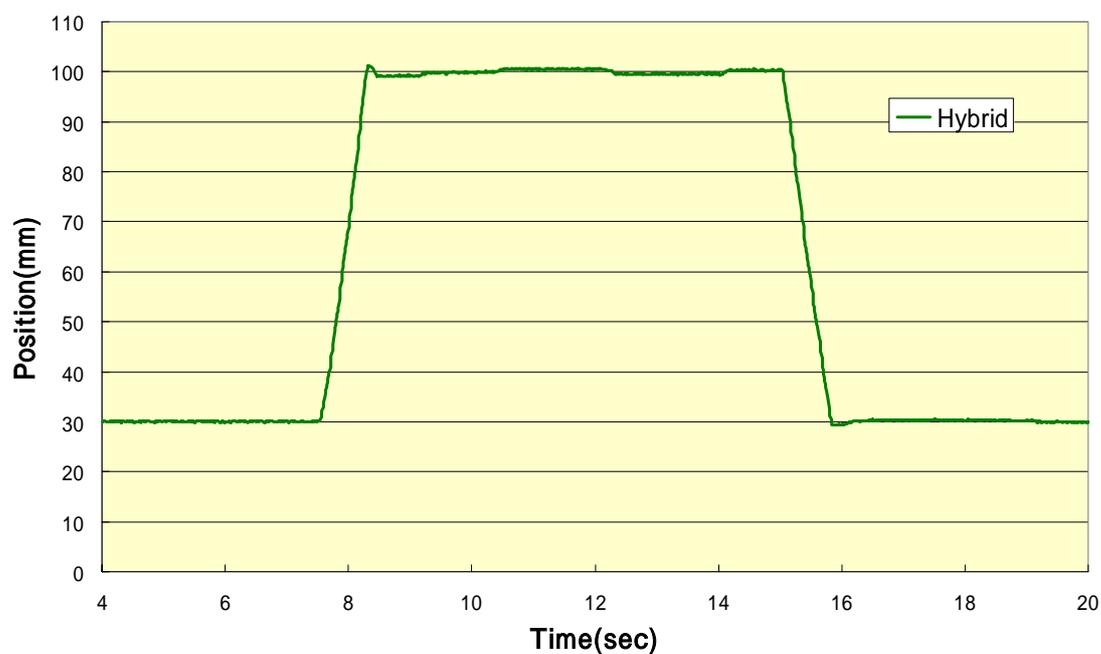


Fig4-2 直線駆動形アクチュエータの負荷 0kg 時の挙動

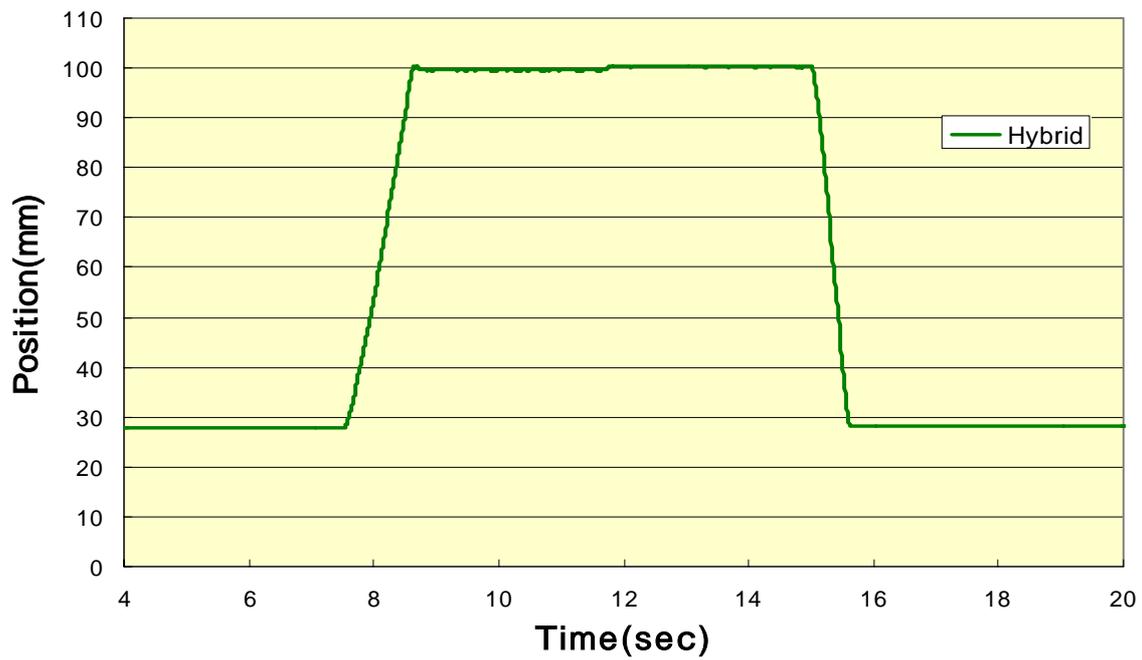


Fig4-3 直線駆動形アクチュエータの負荷 2kg 時の挙動



Fig4-4 直線駆動形アクチュエータの負荷 5kg 時の挙動

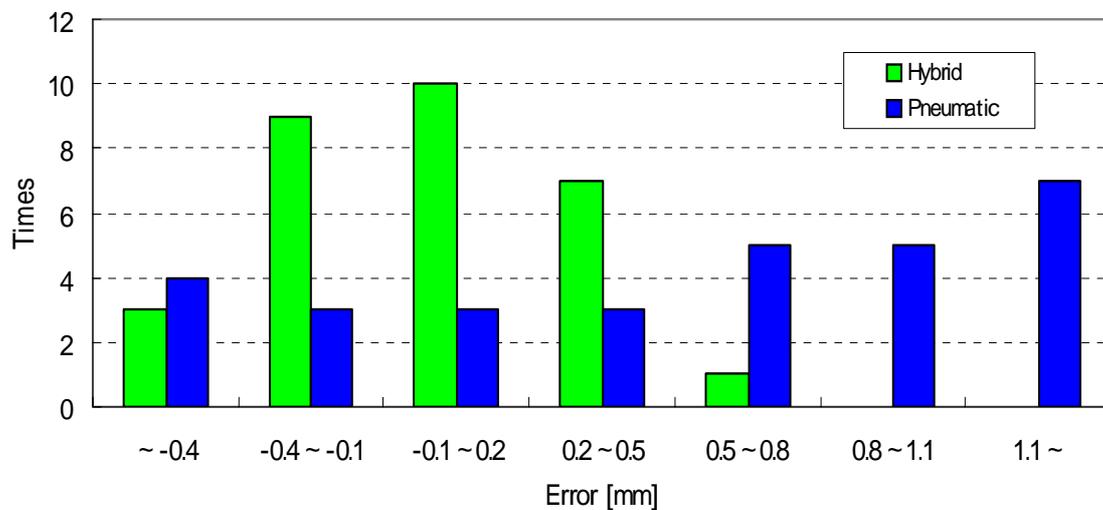


Fig4-5 直線駆動形アクチュエータの負荷 5kg 時のばらつき比較

Table4-1 直線駆動形アクチュエータの負荷 5kg 時の標準偏差と誤差平均

	ハイブリッド	空気圧
平均[mm]	99.93	100.43
標準偏差[mm]	0.274	0.81
誤差平均[mm]	0.223	0.753

・考察

Fig4-6 は考察をしやすいように Fig4-2 ~ Fig4-4 をまとめたものである。この図を見てわかるとおり、引き上げ時には速度に差があるものの目標位置まで達していることがわかる。しかしながら、引き下げるところを見ると、2kg、5kg 時には速度がほぼ同じになっているのがわかる。この 2kg、5kg の負荷時には、この装置を電気モータ単体で動作させたときには負荷を移動させることができなかったことを考えると、この部分ではほとんど落下していると考えられる。Fig4-7 はこの部分の変位を 5kg の負荷を取り付け自由落下させたときのものと比較したものである。これを見ると、自由落下時に比べて速度が出ていることがわかる。自由落下の状態では一定のシリンダ内の摩擦や巻き取り機構部の慣性などが働いているが、実験ではアクチュエータが動作しているためこれらのものが打ち消されているためと思われる。

しかし 5kg の負荷がかかっている状態であっても、大きなオーバーシュートを出さずに目標位置まで動作させることができている。これは電気モータがブレーキの役割を果たしているためだと思われる。

また Fig4-8 ~ Fig4-10 は比較のために空気圧アクチュエータと電動アクチュエータ単体で同様の実験装置を行った結果を示したものである。ただし、電動アクチュエータ単体に関しては負荷質量が 2kg、5kg のときは動作しなかったため 0kg のときのものを載せてある。これらの結果を見ると、ハイブリッドアクチュエータはどの図でもほぼ同じ挙動を示している。また全体的に見て空気圧アクチュエータのみのものよりも立ち上がりが改善されており、電気アクチュエータのみのものよりも早く動作している。これは電気アクチュエータのみの実験データを取るとき装置をそのまま用い空気圧シリンダのポートを開放したのみだったためシリンダがダンパの働きをしたためだと考えられる。

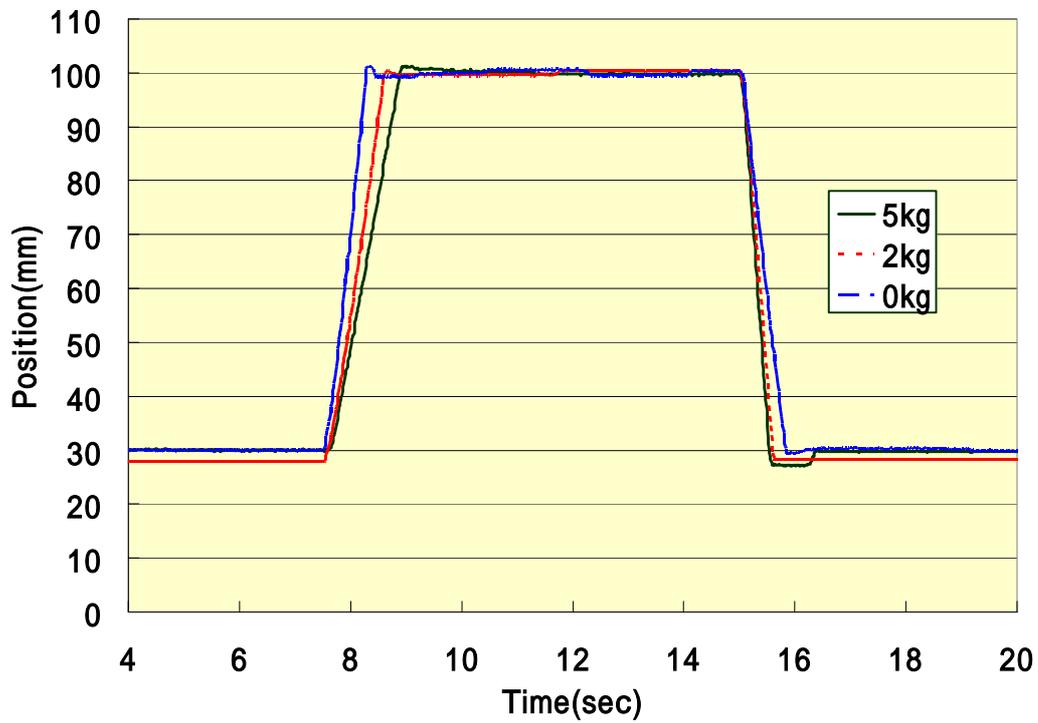


Fig4-6 直線駆動形アクチュエータの負荷の重さによる挙動の比較

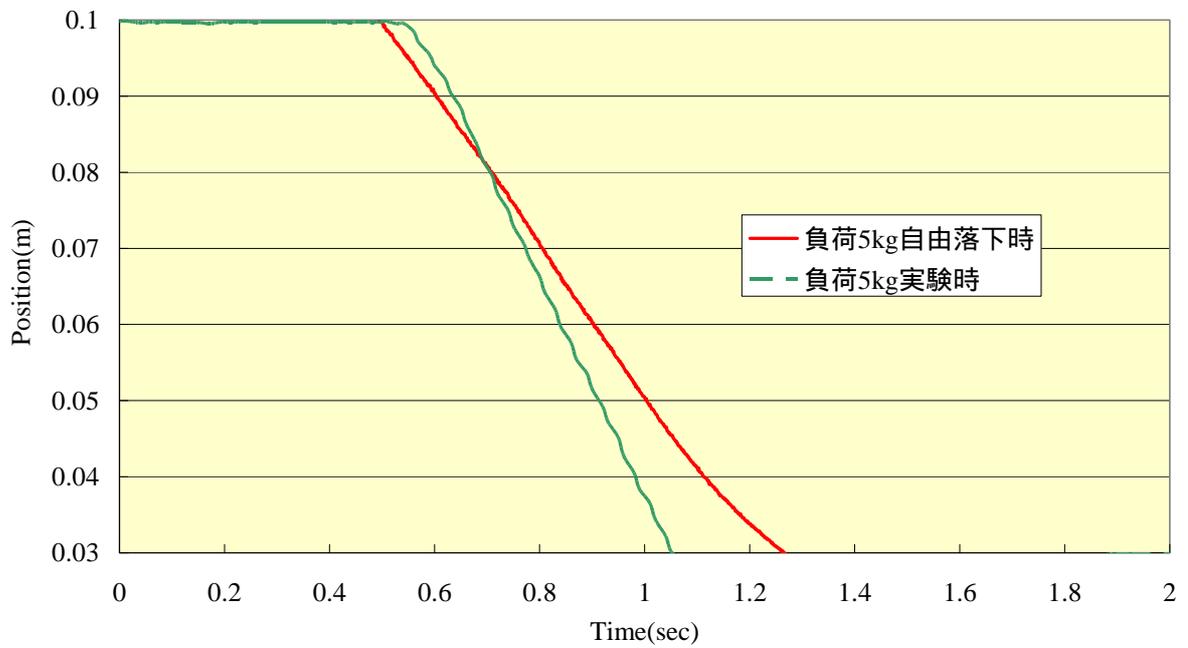


Fig4-7 直線駆動形アクチュエータの自由落下時との挙動の比較

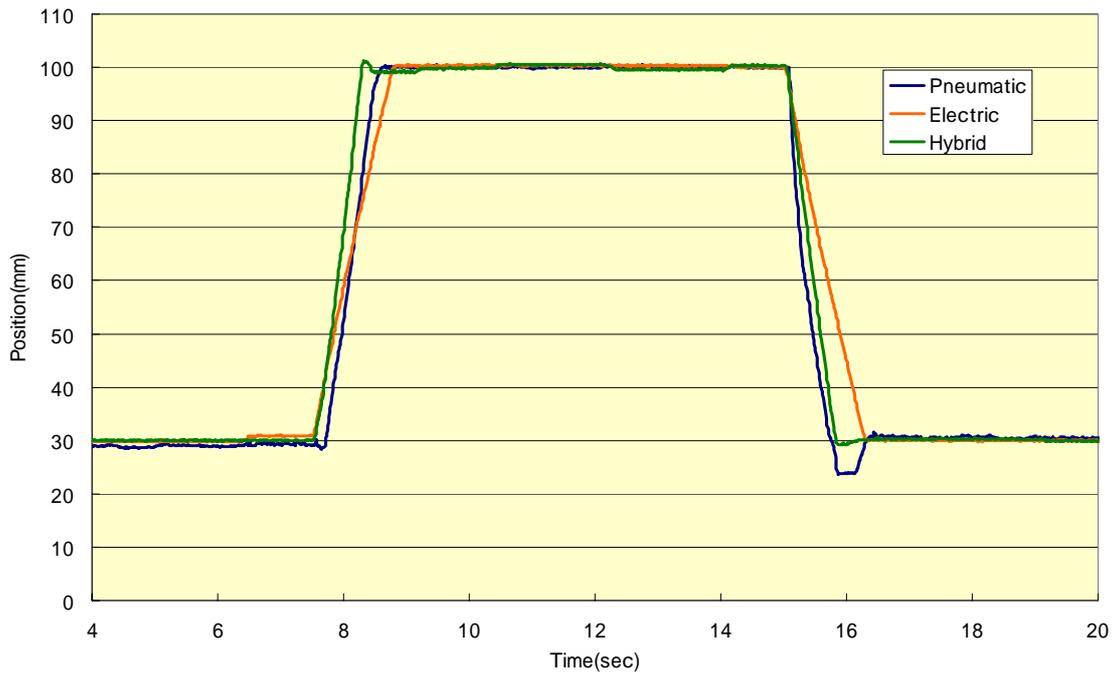


Fig4-8 直線駆動形アクチュエータの負荷 0kg 時の挙動

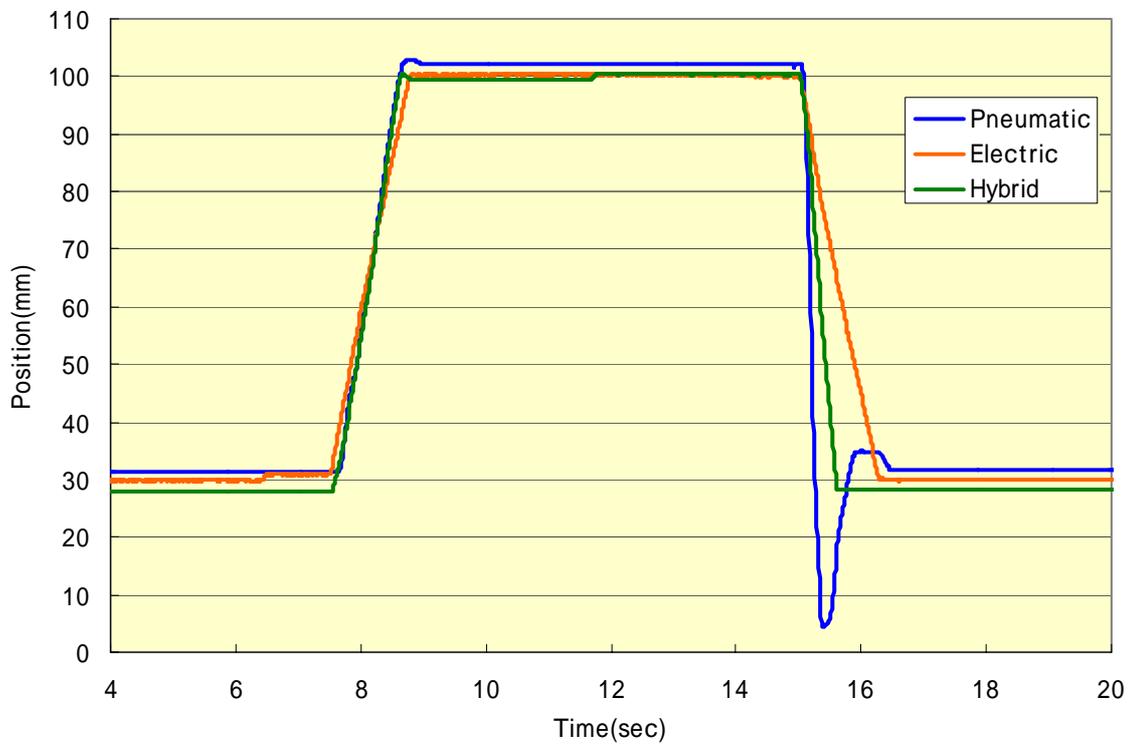


Fig4-9 直線駆動形アクチュエータの負荷 2kg 時の挙動

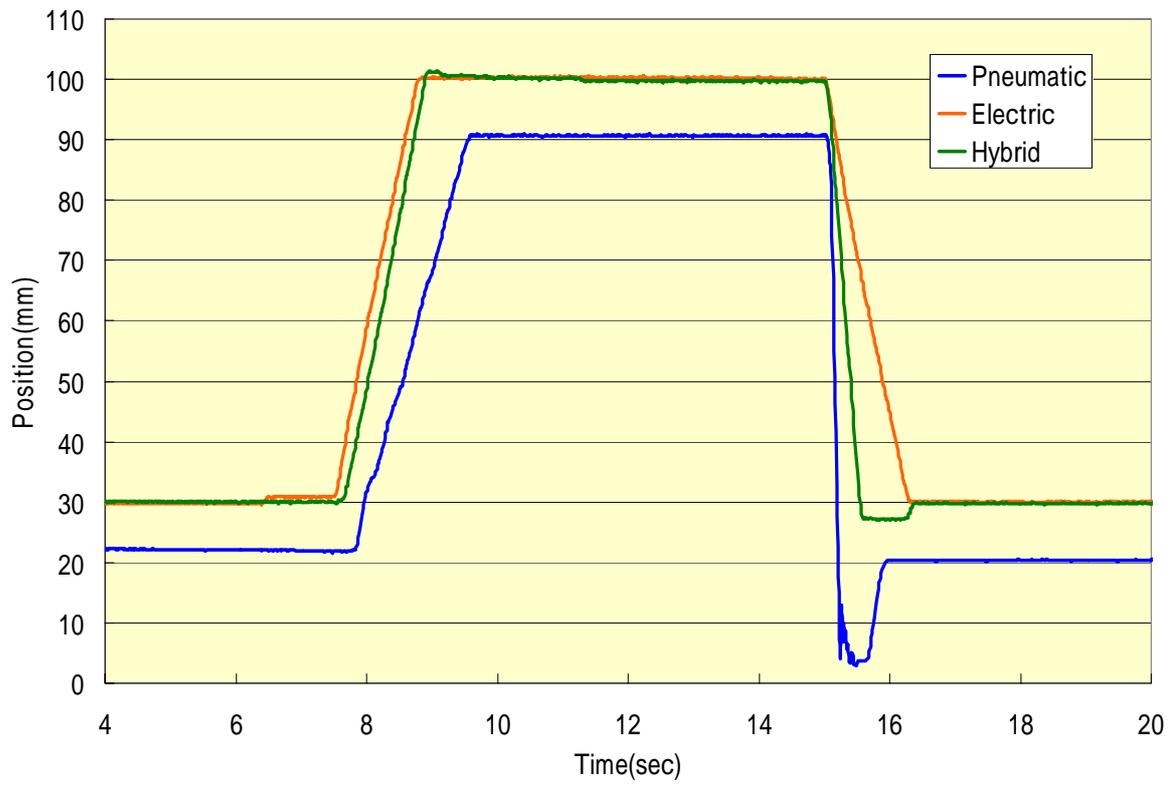


Fig4-10 直線駆動形アクチュエータの負荷 5kg 時の挙動

2) 正弦波入力に対する応答

実験方法

矩形波に対する実験と同様に鉛直下方方向に 5kg の負荷を取り付け一度シリンダの中間位置である 75mm まで持ち上げ、その後上下に振幅 5mm の正弦波入力
で追従実験を行いその挙動を調べた。中間位置まで引き上げるのは、摩擦が特に
大きいと思われるシリンダ上端及び下端を避けるためである。また、入力する正
弦波の周波数は 0.1Hz ~ 5Hz まで変化させた。

実験結果

Fig4-11 は正弦波入力実験により得られたデータをもとに作成した本実験装置のボード線図である。

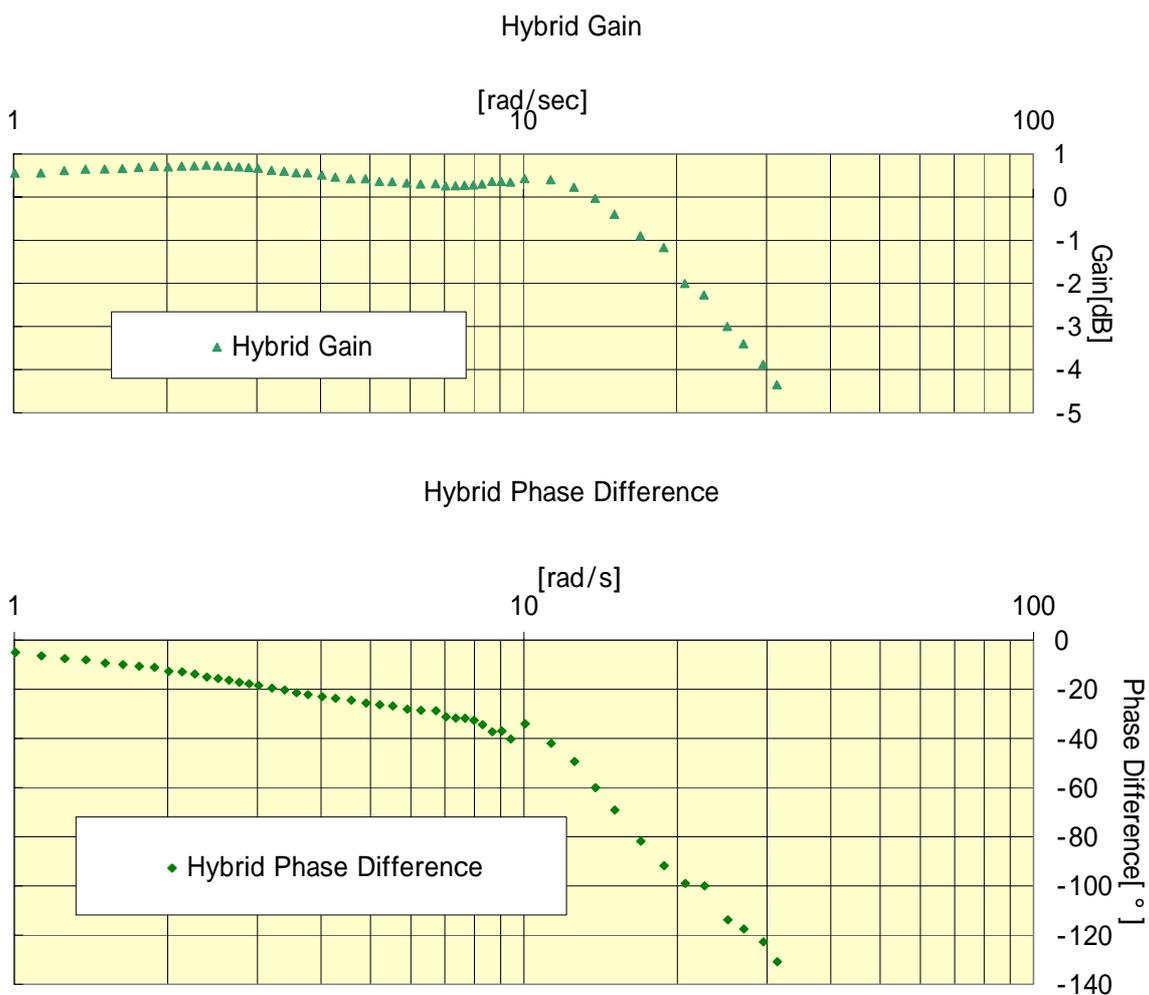


Fig4-11 直線駆動形アクチュエータの負荷 5kg 時のボード線図

考察

このボード線図を見ると、約 2Hz 付近まではとても安定していることがわかる。また 3Hz 付近で位相遅れが 90° になることから、この付近までは実際に使用することができると思われる。

2Hz は速度で言うと 2.4m/sec となり、ストローク 150mm であるこの装置においては十分な速度であると考えられる。

これは、空気圧アクチュエータのもつ出力と電気モータの持つ制御性が現れているものと考えられる。

また、Fig4-12 に同様の実験を電動アクチュエータ単体で行った結果を合わせて示す。これを見ると 2Hz 付近までは電動アクチュエータ単体とほぼ同じ特性であることがわかる。

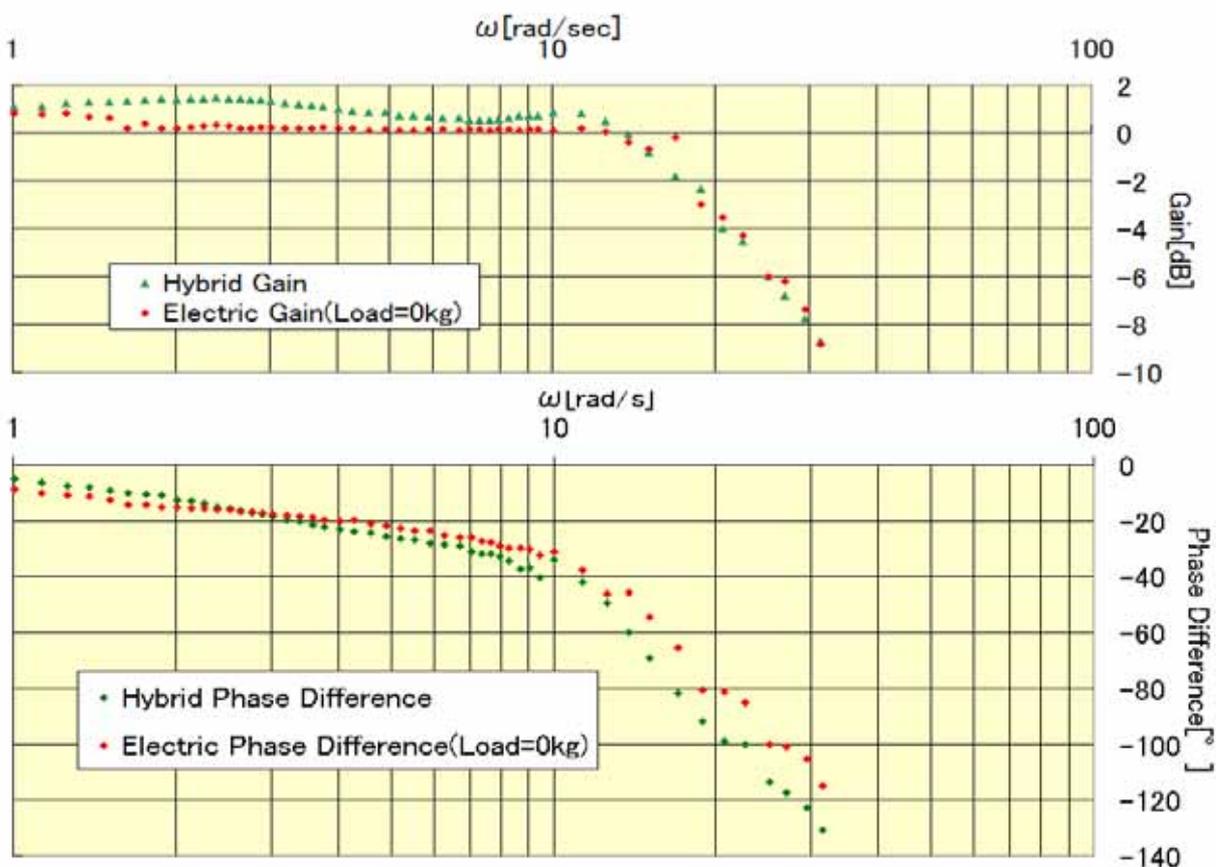


Fig4-12 直線駆動形アクチュエータのボード線図比較

2. 回転駆動形アクチュエータの性能評価実験

1) ステップ入力に対する応答

実験方法

本実験は実験用試作機に対して目標位置をステップ入力したときの挙動を調査し位置制御性や再現性を評価するためのものである。

まず、実験装置を Fig4-13 のように設置し重力方向に対し負荷が偏らないようにする。これは、直線駆動形のもの重力方向に不均等な状態での仕様を考慮し特性を調べたのに対し、本実験では重力方向に負荷が均等な状態での使用を考慮したためである。

本実験では入力する目標値を 0° から 60° に変化させて実験を行っている。これは実験装置のストロークが 90° しかないため、より大きな変位をとるために決定した。ただしアクチュエータの両端の領域では摩擦が大きいため動作の開始時におくれが見られた。

また、同様の実験を 30 回繰り返し行うことによって、この装置の再現性や位置決め精度を評価した。

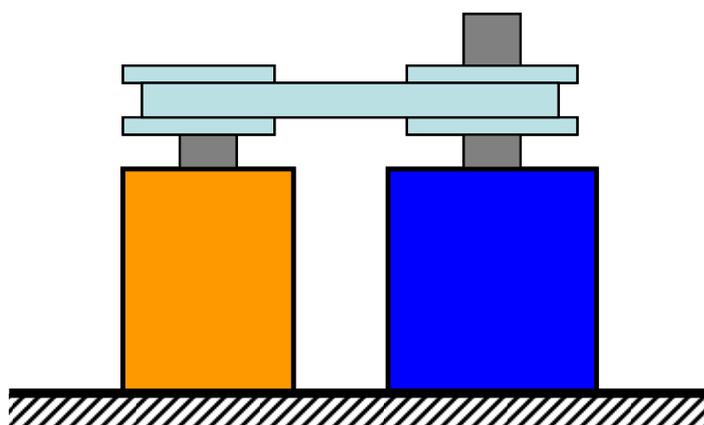


Fig4-13 実験時の設置方法

実験結果

Fig4-14 は実際に実験を行った結果の一例である .また Fig4-15 及び Table4-2 は 30 回繰り返して行った結果をまとめたものである .これらのものには ,性能を評価しやすいように空気圧アクチュエータ単体で同様の実験を行ったものの結果を併せて載せている .

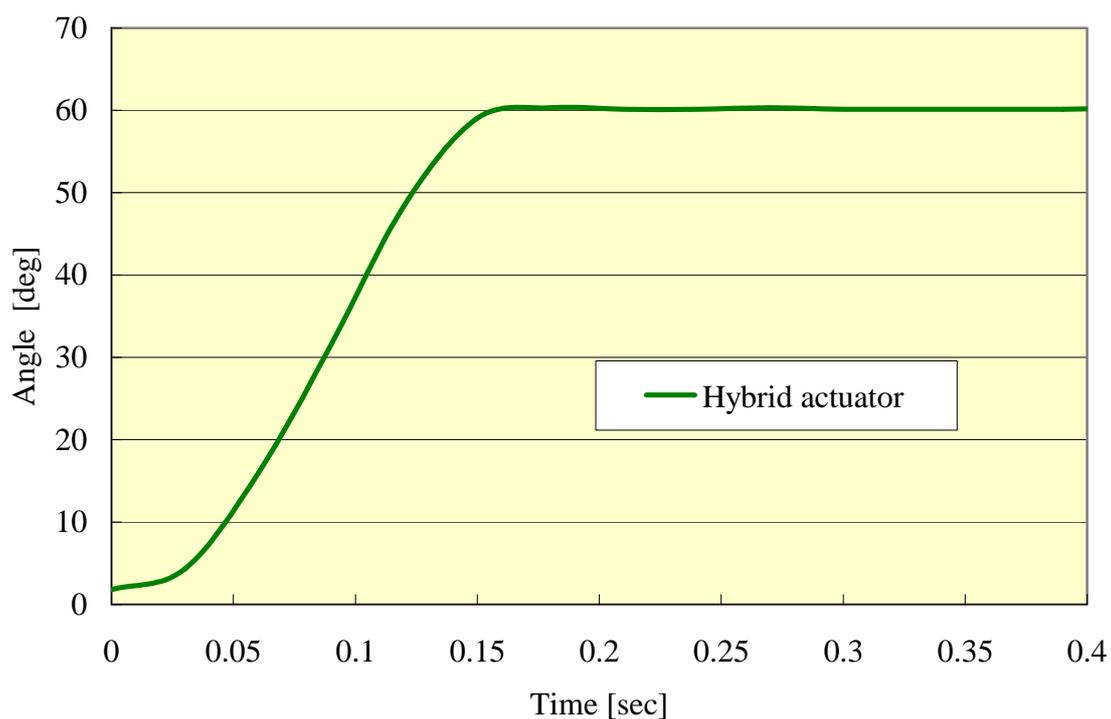


Fig4-14 回転駆動形アクチュエータのステップ入力に対する挙動

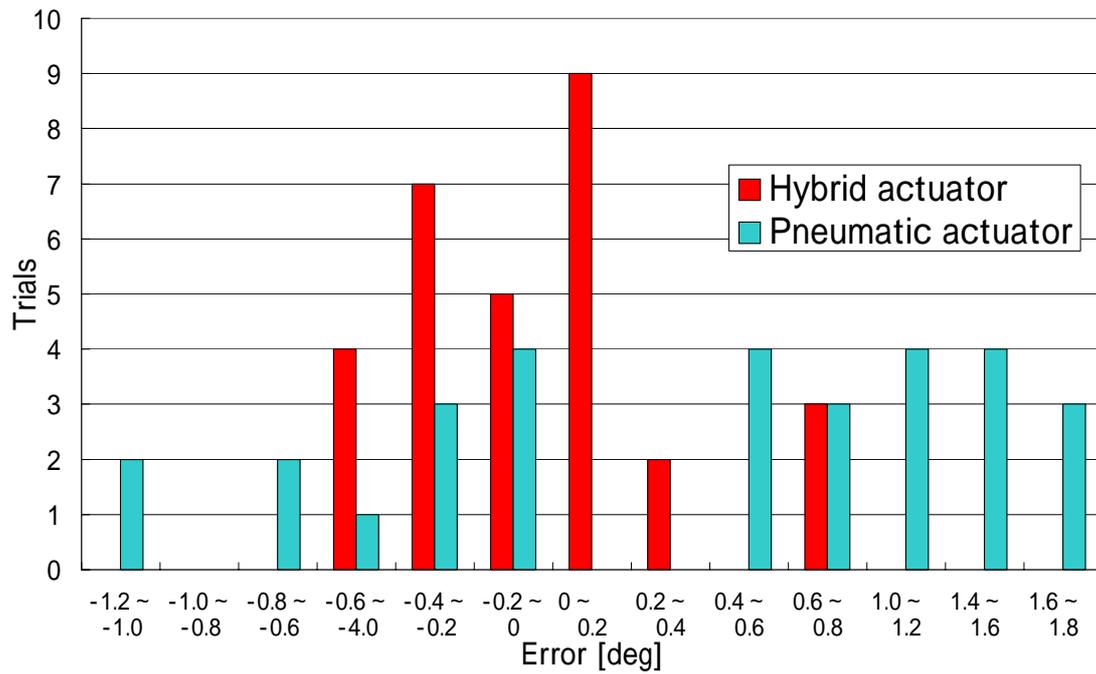


Fig4-15 回転駆動形アクチュエータの繰り返し実験の結果のばらつき

Table4-2 回転駆動形アクチュエータの繰り返し実験の結果平均誤差と標準偏差

	空気圧	ハイブリッド
誤差の平均値[deg]	0.66	0.07
標準偏差	1.43	0.50

考察

動作を見てみると，出だしの部分に遅れが見られることがわかる．これはアクチュエータのもつ摩擦が大きく影響していると思われる．しかし複数回の平均速度も500[deg/sec]となっており非常に早く動作していることがわかる．これは電気モータ単体で動かしたときとほぼ同じである．また，再現性を見てみると誤差も非常に小さく，目標値に対して1.3%以内に収まっており良好な性能を持っていると考えることができる．

Fig4-16 に同様の実験を空気圧アクチュエータ単体，電動アクチュエータ単体で行った実験の結果と比較したものを示す．

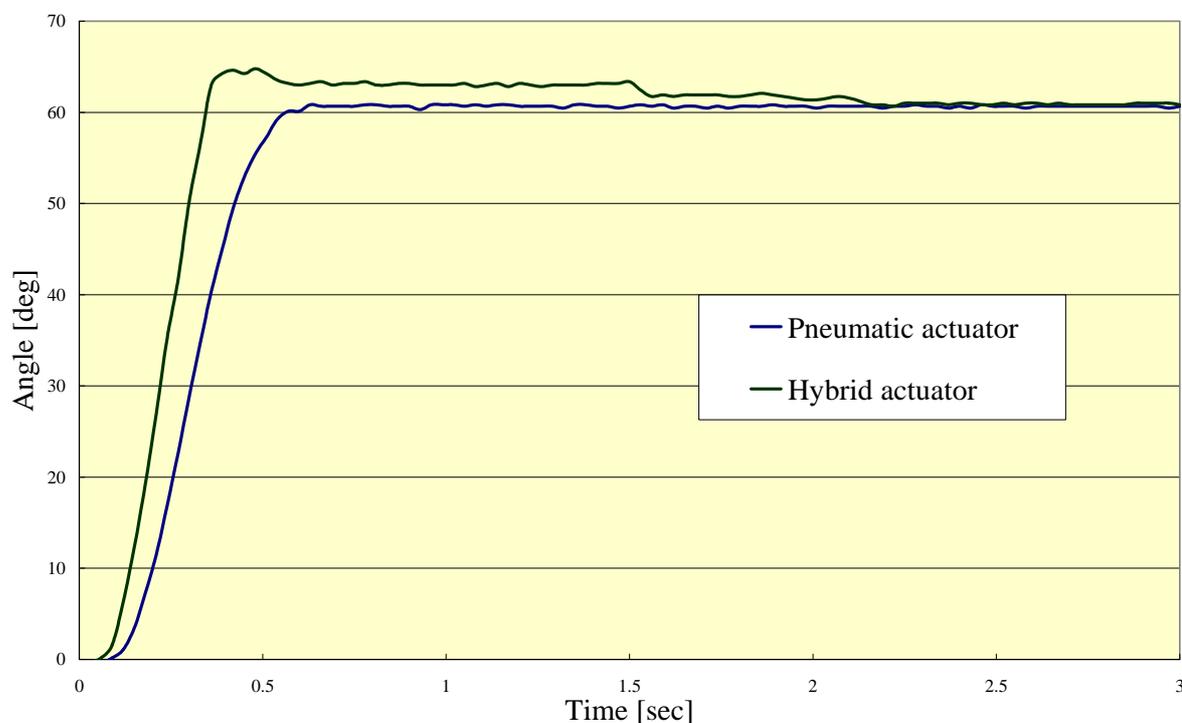


Fig4-16 回転駆動形アクチュエータのステップ入力に対する挙動比較

2) 正弦波入力に対する応答

実験方法

試作したアクチュエータの周波数応答を調べるために一定の振幅を持った正弦波を入力として与え実験を行い評価した。

実験装置はステップ入力応答実験と同様に設置し実験を行った。

本実験では摩擦の大きい両端部を避け、一度中間位置である 45° で停止させその後振幅 20° で動作させ追従実験を行った。これより小さい角度であるとアクチュエータの持つ摩擦の影響で有用なデータを取得することができないためこの角度を設定した。

実験結果

Fig4-17 に実験を行った結果をもとに作成したボード線図を示す。なを，本実験を繰り返すことにより実験装置が破損することがあったため，その部分の考察を別項に記している。

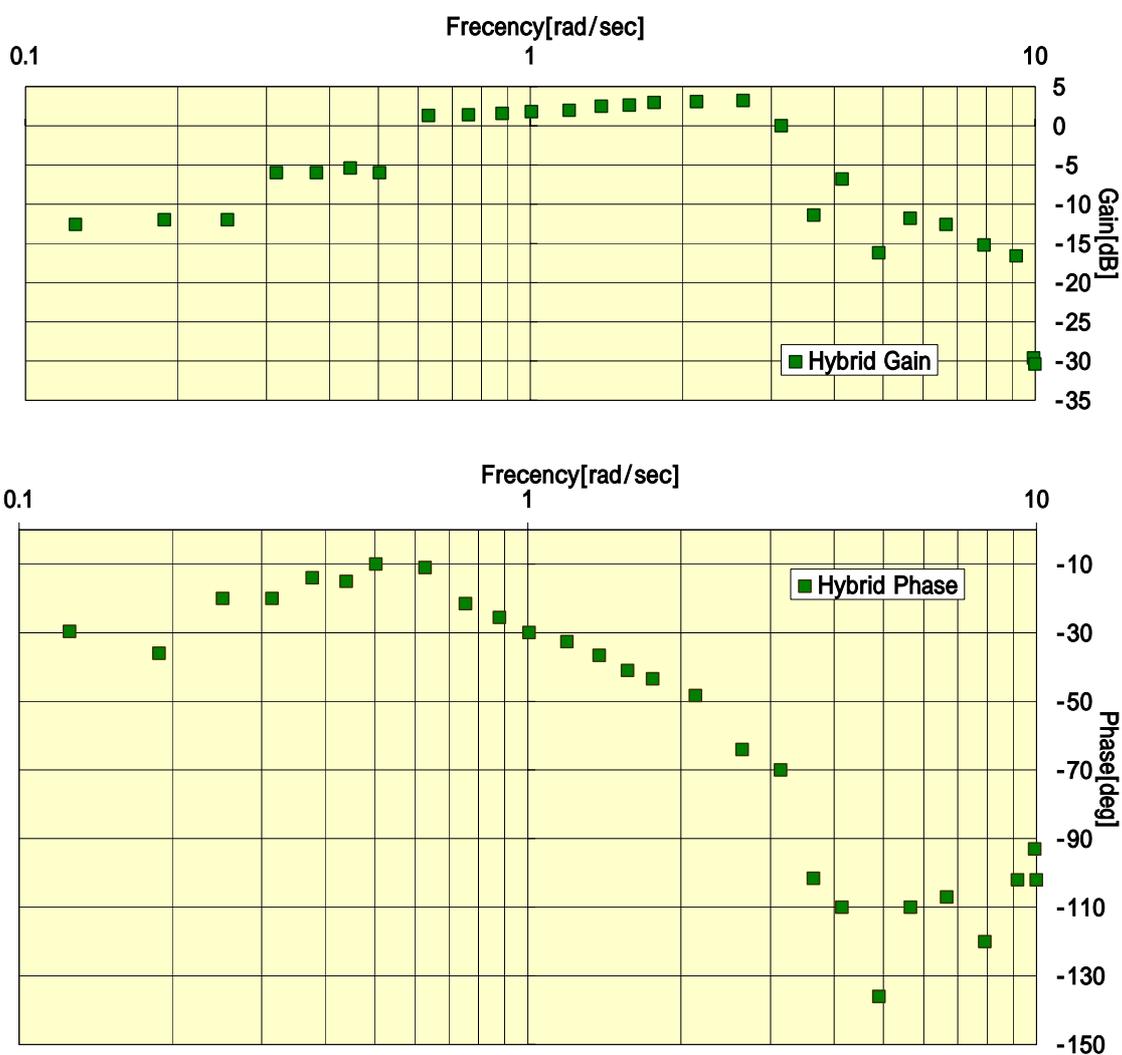


Fig4-17 回転駆動形アクチュエータのボード線図

考察

このボード線図を見ると低速域においても安定性が落ちていることがわかる。これは、目標角度によってアクチュエータが摩擦などの影響により動が遅れるためだと考えられる。Fig4-18 に目標角度の違いによる挙動の変化を示す。これを見ると、目標位置が小さい範囲では目標達成までには長い時間がかかったり、到達できていないことがわかる。本実験では摩擦の影響を考慮しているのですがこの図ほどの遅れやずれは発生していないと思われるが、やはり影響を受けていると思われる。一方、高速域においては 0.3Hz 付近より急速に安定性が悪くなっており、これは空気圧アクチュエータが足をひっばっている結果になっていると考えられる。

Fig4-19 に同様の実験を電動アクチュエータ単体で行った実験の結果と比較したものを示す。これを見ると特性は電動アクチュエータとほぼ同じであることがわかる。電動アクチュエータの持つ特性が強く出ているためだと思われる。

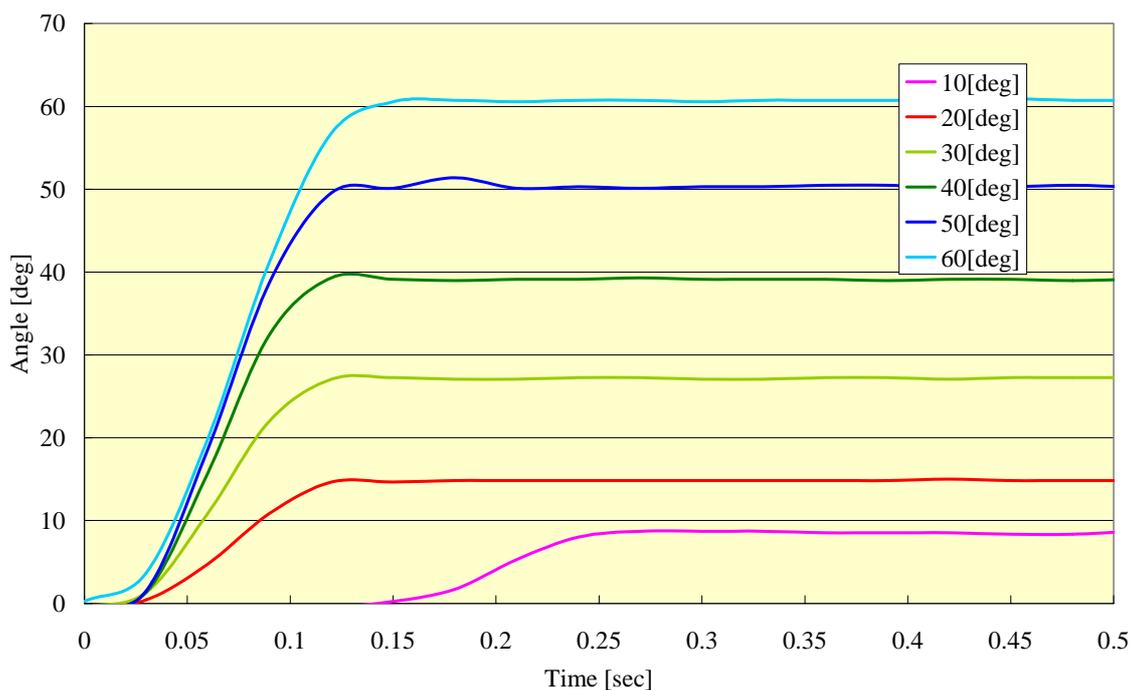


Fig4-18 回転駆動形アクチュエータの目標位置による挙動の変化

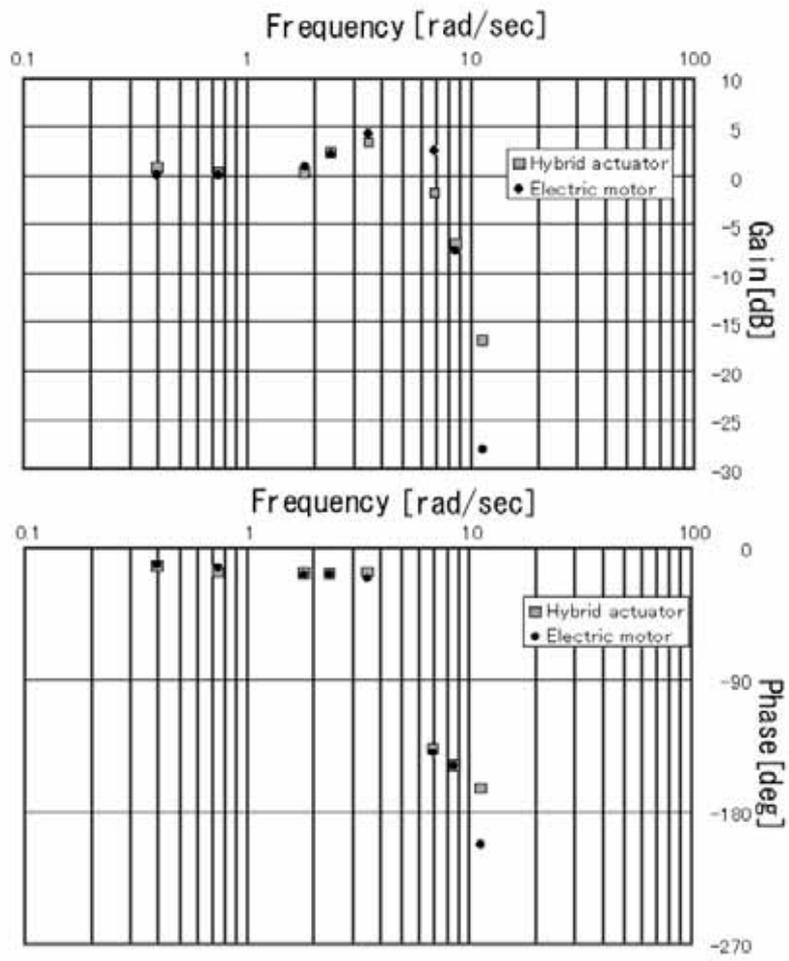


Fig4-19 回転駆動形アクチュエータのボード線図比較

3) 実験機の破損に関する考察

周波数応答実験に際し実験機の一部が破損するという事故が発生した。破損部分は空気圧アクチュエータと電動アクチュエータをつなぐタイミングベルト部分である。設計段階ではこの部分は十分な強度を持って設計されている。主な原因として考えられるのは、空気圧アクチュエータと電動アクチュエータの速度の不一致である。実験機は電動アクチュエータの速度に合わせて空気圧アクチュエータの流量を調整している。実際、直線駆動形のアクチュエータは追従性が向上した。しかしながら回転駆動形では目標値による空気圧アクチュエータの速度の変化、特にアクチュエータが動き出すまでの時間が長く、動作を開始すると電気アクチュエータよりも速度と出力が出るため、電気アクチュエータの動作と一致していないためであると考えられる。

この部分がハイブリッドアクチュエータを設計する上で考慮すべき点であるといえることができる。特に今回の実験機では回転駆動形アクチュエータとして用いたダブルベーン形空気圧モータは出力を優先して選んだため小形で摩擦が大きくなりすぎたと考えることができる。このため、より大形のアクチュエータを用い検討する必要がある。また、空気圧アクチュエータの速度を制限して実験を行う方法も考えられる。これは出力軸に一定の負荷が取り付けられた状態で実験を行う方法である。しかしながら、この方法では電動アクチュエータにも負荷がかかるため、その部分の検討が必要である。

4) 耐衝撃性実験

実験方法

ハイブリッドアクチュエータが一定の位置を保持しているときに与えられる外乱に対しどのような挙動をとるかを評価するために本実験を行った。Fig4-20 のように実験装置を設置する。出力軸上に固定されたアームの先端に 0.203mNm 相当の外乱をあたえた。なお負荷は一度与えられると実験終了時まで保持し続ける。

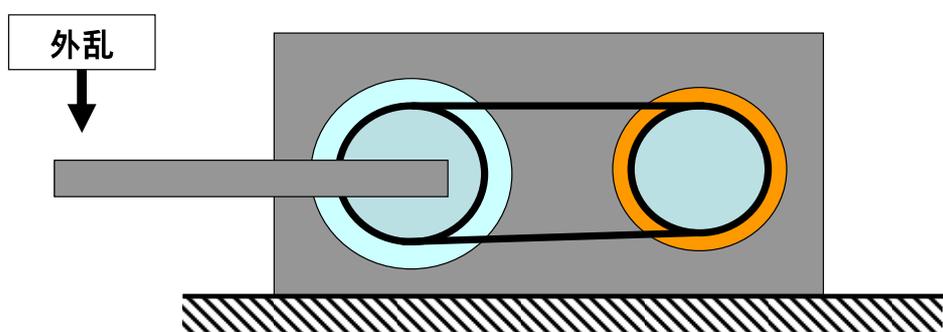


Fig4-20 実験時の設置方法

実験結果

Fig4-21 に実験結果を示す。

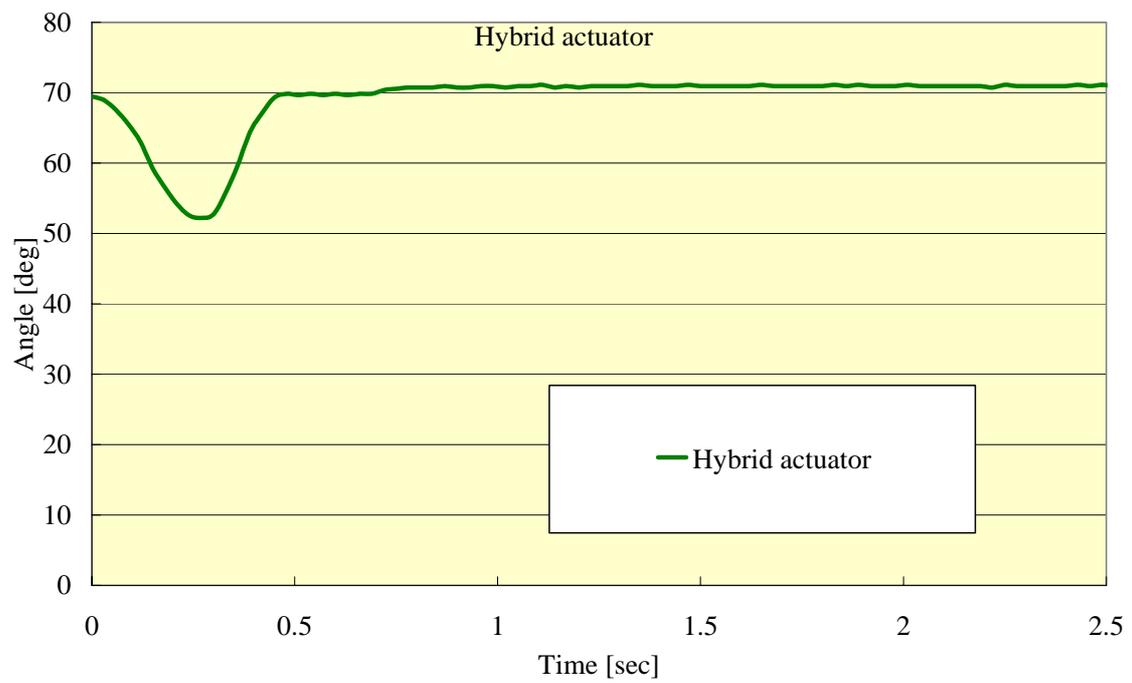


Fig4-21 回転駆動形アクチュエータの外乱時の挙動

考察

外乱が与えられた時点では 18° 程度の沈みこみが見られるが、すばやく回復していることがわかる。Fig4-22 に同様の実験を空気圧アクチュエータ単体で行った実験の結果と比較したものを示す。こちらの図を見るとわかるとおり、空気圧アクチュエータ単体では沈みこみが大きく、したがって回復までに時間を要することとなる。この結果より、電気モータがブレーキとしてよく機能しており、空気圧アクチュエータ単体に比べロバスト性がよくなっていることがわかる。

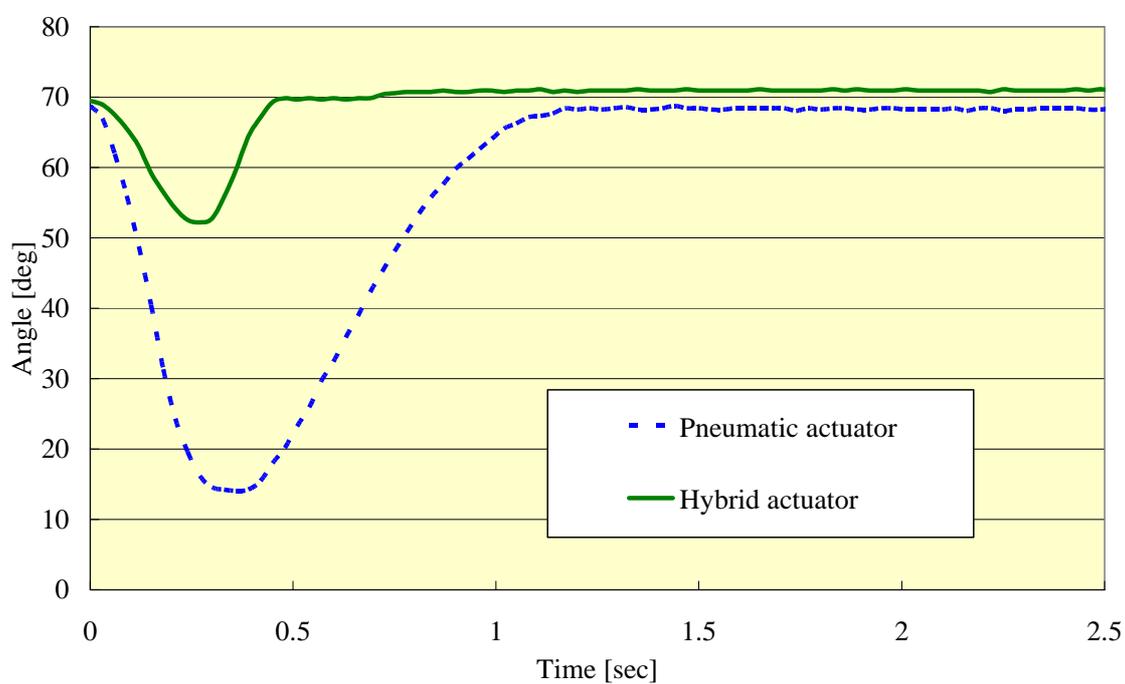


Fig4-22 回転駆動形アクチュエータの外乱時の挙動の比較

第5章 結論

1. 直線駆動形アクチュエータ

今回の研究では実験用試作機を製作し、評価を行った。その結果、次のようなことがわかった。

- 1) 空気圧アクチュエータと同等の出力を持つ。
- 2) 負荷を引き上げる領域においては各アクチュエータ単体よりも速度が出る。
- 3) 負荷を引き上げる領域においては空気圧アクチュエータ単体よりも優れた再現性を持つ。
- 4) 周波数特性においては一定の範囲までであれば 5kg の負荷がかかった状態であっても電動アクチュエータ単体と同等の性能を持つ

これらのことから今回試作した直線駆動ハイブリッドアクチュエータは、空気圧アクチュエータ、電動アクチュエータの利点を兼ね備えているとすることができる。

しかしながら、周波数応答における高速域の特性では急に性能が落ちている。これは、空気圧アクチュエータのもつ摩擦や、空気の圧縮性が影響しているためと思われる。また、負荷を与えた状態での鉛直下方への制御時に見られるオーバーシュートは、やはり空気の圧縮性によるものであると思われる。また、このときの移動状況を見ると、この領域においては、あまり制御されていないのではないか、と思われる。ただし、この領域においても空気圧アクチュエータ単体と比べると、オーバーシュートは少ない。

この状況を改善するためには、今回の実験ではアクチュエータが様々な角度で使用されることを前提とし、引き上げ時と引き降ろし時には同様のコントローラを用いているが、これを異なるコントローラを用いるなどして重力保障をする必要があると思われる。

2. 回転駆動形アクチュエータ

回転形ハイブリッドアクチュエータの有効性を評価するために実験用試作機の製作と評価実験を行った。その結果次のようなことが判明した。

- 1) ステップ状の目標値入力に対しては、電動アクチュエータと同様の特性を示す。
- 2) アクチュエータ始動時に見られる遅れが改善されている。
- 3) 空気圧アクチュエータ単体と比べ、優れた再現性を示した。
- 4) 周波数特性においては、電動アクチュエータと同等の性能を示した。
- 5) 今回の構成では特に低速域での性能は低かった。
- 6) ロバスト性については空気圧アクチュエータ単体のものと比べて向上している。

これらのことより、本研究で提案した回転形ハイブリッドアクチュエータは電動アクチュエータの持つ制御性と空気圧アクチュエータの持つロバスト性を持つことがわかった。また、外乱実験時に用いた負荷を与えた状況で電動アクチュエータ単体で動作させたときには持ち上げることができなかった。このことから空気圧アクチュエータの持つ出力を併せ持っていることがわかる。

しかしながら、実験中に破損していることから実験で使用した空気圧アクチュエータと電動モータが適正であったかは不明である。考えられる原因としては空気圧アクチュエータが小形であるため、摩擦が大きく出力がかかった状態で停止している、空気圧アクチュエータの切り替えと空気室内の圧力上昇が電動アクチュエータの切り替えとタイミングがずれている。などである。周波数応答の実験結果を見てみると、ハイブリッドアクチュエータと電動アクチュエータはほぼ同様の特性を持っていることがわかるので、このことからアクチュエータの持つ摩擦が大きな要因のひとつではないかと考えられる。

3. ハイブリッドアクチュエータの改善点

どちらのアクチュエータも、空気圧アクチュエータ、電動アクチュエータの特性を併せ持っていることがわかった。全体的な改善点としては、次のようなことがあげられる。

- 1)現在使用している大形のコンプレッサーを用いるのではなく、一定の容量を持ったエアタンクなどを用い空気消費量を計測できるようにする。
- 2)空気圧アクチュエータの排気方法を考慮しそのエネルギーを回収する方法を考える。
- 3)小形へ向けたシステム全体の見直し

また、個別の問題としては直線駆動形におけるコントローラ。これは、重力方向に対する非対称性を改善するための手段として、コントローラの切り替えや空気圧、電動それぞれのゲインを変更することにより対処できるのではないかと考えられる。また、直線駆動形は 5kg の負荷に耐えられるように製作したため、特に試作機の外形が大きい。またメンテナンス等や全体的な出力損失を考えると構成を考え直す必要がある。

回転駆動形については、各アクチュエータの妥当性の再検討が必要である。出力比を直線駆動形とあわせてあるが、アクチュエータの持つ摩擦は回転形アクチュエータのほうが大きい。空気圧アクチュエータは小形のものより大形のもののほうが出力に対する摩擦損失が少ないので、現在使用しているものよりも大形のアクチュエータの導入を行うなどして再度実験を行う必要がある。

4. 今後の展望

今後の展望としては、両アクチュエータともにパッケージされた形での試作機を製作し、実際に様々なものへ組み込んだ形での実験を行う必要がある。また、アンプやセンサー、バルブなどの周辺機器を考慮しより導入しやすい形でのアクチュエータとしての提案をしてゆく必要がある。Fig5-1 図に今後予測される本研究で提案したアクチュエータのコンセプトモデルを示す。このコンセプトは、今回実験した試作機と同等の性能を持つものを想定している。

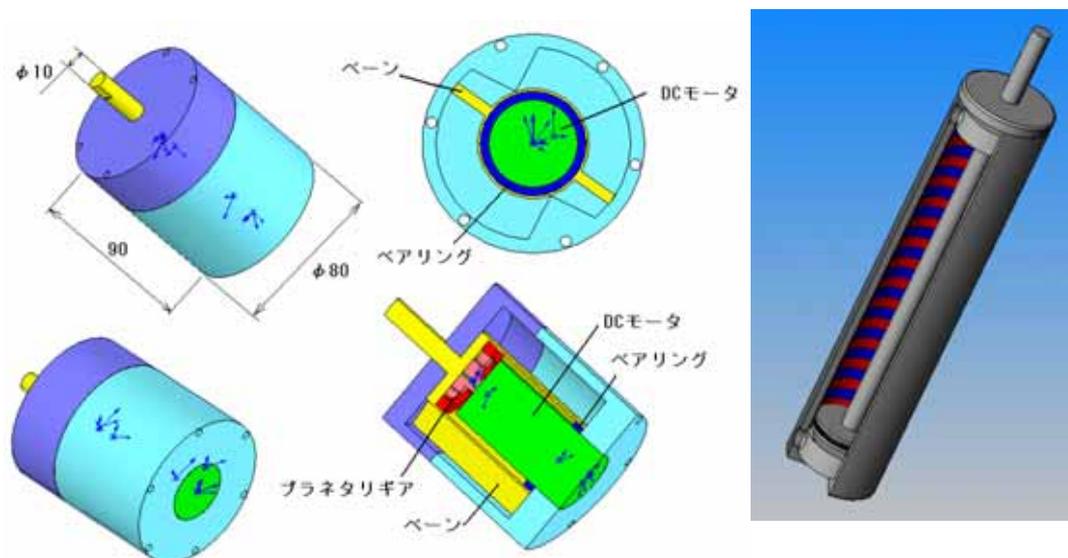


Fig5-1 ハイブリッドアクチュエータのコンセプトモデル

謝辞

研究を行うにあたり御指導いただきました,法政大学工学部機械工学科田中豊教授に心から感謝いたします。実験装置を作成するにあたり機器を提供して下さった SMC(株)に心から感謝いたします。ワイヤの選定,設計に関する度重なる質問にも親切に答えて下さった日本ミニチュアロープの佐久間様,ワイヤの加工の注文の際に仲介して下さった株式会社寺畑商会の寺畑様,装置製作にあたり多大なご助力をいただいた法政大学工学部中央工作室の皆様感謝いたします。また,実験時の騒音を許していただき,至らない点に関してもさまざまなアドバイスを下さった田中研究室の皆様心から感謝しています。

参考文献

- 1)鷹野英司 加藤光文, アクチュエータの技術, 1999, 理工学社
- 2)塩田泰仁, 図解はじめての空気圧, 2004, 技術評論社
- 3)伊藤美光, 1992, 機械の駆動システム設計, 日刊工業新聞社
- 4)眞田一志、ドライアイス空圧源のパワーアシストへの適応と応用, 2006, JSME2006 年度年次大会後援論文集 Vol.2, pp.331-332
- 5) 武村, Pandian, 早川, 川村, ハイブリッド形空気圧・電気駆動モータの設計と制御, 日本機械学会論文集 (C 編), 68 巻, 665 号, pp 117-124, 2002.
- 6) Fumiaki Takemura, Shunmugham R.Pandian, Yasunobu Nagase, Hajime Mizutani, Yasuhiro Hayakawa, Sadao Kawamura, Control of a Hybrid Pneumatic/Electric Motor, (2000), IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems
- 7)伊藤, 空気の圧縮性に対する空気圧駆動機器のアプローチ, 日本油空圧学会ウィンターセミナー「空気圧の新たな可能性を求めて」資料, pp29-39, 1994
- 8)中野, 田中, 空気圧・圧電超音波ハイブリッド方式による精密直線位置決め, 油圧と空気圧, 24 巻 7 号, p.762-768, 1993-11.
- 9)岡博文, 橋本強二, 今枝正夫, 1999, “2 自由度制御法を用いた空気圧モータ駆動系の制御”フルードパワー講演会, pp.73-75
- 10)高岩昌弘, 2000.7, “空気圧駆動システムの先端制御と応用 - 空気圧マニピュレータを用いたヒューマンインターフェースの開発 - ”, 油空圧技術, pp.13-17
- 11) 早川恭弘、鴨山剛之、永瀬康旦、S.R.Pandian、川村貞夫、スライディングモード制御を用いた空気圧アクチュエータの実用的設計、(1999)、55、平成 10 年春季油空圧講演会
- 12) J.Wang, D.J.D.Wang, P.R.Moore, J.Pu, Modeling study, analysis and robust servocontrol of pneumatic cylinder actuator systems, (2001), 35, IEE Proc.-Control Theory Appl.
- 13) T.Noritsugu, M.Takaiwa, Robust Positioning Control of Pneumatic Servo System with Pressure Control Loop, (1995), 2613, IEEE International Conference on Robotics and Automation
- 14)川上幸男, 2000.7, “空気圧回路の MATLAB/SIMULINK によるシミュレーション”, 油空圧技術, pp.4-7
- 15)小林一行, 2004, “MATLAB ハンドブック”, 秀和システム, 227-242

付録

本研究で行った本文中では割愛した実験条件についてしるす。

空気圧アクチュエータのパワースourceである圧縮空気は温度や湿度によって実験結果に大きな影響をもたらす。そこで、実験室中の雰囲気は可能な限り摂氏 23[]、空気圧回路内にエアクリナーを用い空気管内は可能な限り乾燥させた上で実験を行った。空気圧アクチュエータは、動作させずに置いておくと内部の潤滑が悪くなり性能が落ちる。これはしばらく慣らし運転を行うことによって回復するので実験を行う前にフルストロークで 15 往復の慣らし運転を行ってから実験を行った。

直線駆動形実験装置を動作させるとき電気モータとの速度のマッチングを行うほうが望ましい。はじめにセテイングを行っても実験を行ううちに潤滑がよくなり速度が速くなる可能性がある。このため実験日には慣らし運転時終了後に調整を行った。

梅雨や夏など湿度が高いときはエアクリナーやエアコンプレッサーの効率が悪くなる。このため長時間の実験中に供給圧力が不足する可能性があるので、連続実験をさけ供給圧力を一定に保つことが望ましい。

実験開始時にはワイヤ、ベルトが規定の状態になっていることを確認し、センサ、アンブ等の電気配線を確認してから行う。これを怠ると実験装置の破損につながる。

本実験で用いた負荷は、直線駆動形のは缶に釣具用の錘を入れ全体で 2[kg],5[kg] になるように調整したものをを用いた。このとき缶内に均等に錘を配置し固定しないと、実験時に影響を及ぼすことがある。回転駆動形のは規定の重さのある錘にアーム、固定用のボルトなどの重さを加味してモーメントに置き換えたものである。このとき軸とのがたつきが無いよう固定しないと実験時に影響を及ぼす。