

Research Reports of the Research Institute
of Industrial Safety, RIIS-RR-92, 1993
UDC 331.82:614.82

探索動作用アクチュエータの構造要件とその実現

池田博康*, 杉本 旭*

Structural Requisites of Actuator for Groping Motion and Its Realization

by Hiroyasu IKEDA* and Noboru SUGIMOTO*

Abstract; Normally, the kinetic control of robot actuators can be achieved by providing positional feedback control. In this positional feedback control of actuators, a positional deviation manages a large amount of energy output. Therefore, if a robot comes in contact with humans during groping motion, the positional deviation will be caused and, as a result, force corresponding to this positional deviation is imparted to targets including humans. As the robot touches targets during groping motion, the level of force imparted targets can not be assured of safety by only a touch sensor and a collision avoidance control.

In relation to the above, this paper deals with structural requisites of a actuator for groping motion. The principal requisite is found that the positional control system of the actuator should have the function as a means to judge whether the energy output of the actuator is appropriate for targets or not. As the contact of targets with the robot can be detected by an increase of the reactive force, or positional deviation, the positional control system can be performed only under the condition that the actuator does not give force larger than the allowable level to targets.

Furthermore, the actuator should have a soft spring characteristics not to give an excessive force to targets when the robot touches targets, because the targets the robot gropes are unknown to the robot. And after recognition of contact with targets, the variable spring characteristics that can function as a stiff spring is needed to be realized by the control system. As this spring characteristics is virtual, a false actuator output may be generated if the control system fails.

Then, the actuator is necessary to have a known viscous load as a means to confirm the normality of this spring characteristics before it contacts with targets. For this reason, if the positional control is provided at a constant speed, i.e., by means of lump input during groping motion within a free space with no constraint, a certain positional deviation can be caused, and as a result, the appropriate actuator output can be confirmed. And if the positional deviation can not be confirmed, the viscous load can vanish the energy inevitably by itself without permitting the energy accumulated in the spring due to the spring characteristics, to be emitted to targets.

In this paper, the ER (Electro-Rheological) actuator for groping motion was developed, in which the actuator has variable spring characteristics exerted by adjusting air pressure and the ER fluid damper as a physical viscous element. By employing this actuator composition and an inhibit in control for pneumatic output by the ER fluid damper, structural requisites of the

*機械研究部 Mechanical Safety Research Division

actuator for groping motion were satisfied, and the functional kinetic control became possible.

Keywords; Robot, Actuator, Groping Motion, Feedback Control, Viscosity, Electro-Rheological Effect

1. 緒 言

人間とロボットの作業空間において、人間が被る事故の多くはロボットの出力するエネルギーに起因して発生する。ロボットの作業の実行はエネルギー出力過程によるものであるから、その意味ではロボットの動作自体が人間にとって危険な行為であると見なせる。したがって、ロボットの可動範囲（作業空間）において、ロボットのみが存在して人間が隔離されていれば事故など生じない。

しかしながら、現実にはトラブル箇所を検出してトラブル処理作業やメンテナンスを行うため、ロボットが未知の空間内を移動する場合があります。このとき、ロボットは人間が存在するかも知れない未知の空間内を探索しなければならない。そのため、従来では視覚センサによる回避制御^{1,2)}が試みられているが、広大な空間全てを視覚センサがカバーすることは不可能である。また、人間とロボットとの接触を前提とした場合では、回避制御方式は適用できないため、接触センサにより人間との接触をロボットが認識して、アクチュエータのエネルギー出力を抑えたり¹⁾、力覚センサにより人間に加わる力を監視していた^{3,4)}。しかし、ロボットが想定される人間との接触点全てに接触センサを配置しなければならず、また、フェールセーフな接触、力覚センサが不可欠となるため、人間の安全を確保しつつ共存できるロボットの実現は容易ではない。

そこで本報では、トラブル処理やメンテナンスのため、未知の空間内の対象物を探索して、認識、作業するロボットのアクチュエータの構造要件について論ずる。まず、探索動作のアクチュエータが、仮に対象物が人間であっても接触して危害を与えないように、そのエネルギー出力が対象物に対して適正であるかの判断を、センサに依存するのではなく、アクチュエータの制御系の中だけで行う方式を提案する。すなわち、アクチュエータは基本的に位置制御系を構成しているため、対象物へ接触して位置偏差が増大することによって対象物への作用力を判断できる。また、アクチュエータは、接触時に過大な力を与え

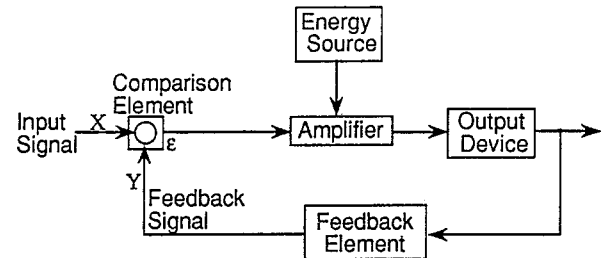


Fig. 1. Energy Flow on Feedback Control System
フィードバック制御系におけるエネルギーの流れ

ないように接触前には柔らかく、接触認識後は仕事をするために固くなる可変バネ特性を制御系の中で実現する。このバネ特性は仮想的なものであるため、制御系の異常により危険なアクチュエータ出力を生じないかを、対象物への接触前に認識しておく必要がある。その確認手段として、仮想的でない既知の粘性負荷を持たねばならないことを述べる。

そして、このような手段を持つ探索動作アクチュエータを空気圧と電気粘性流体を利用して実現し、その特性を調べた。さらに、仕事のためのエネルギー出力を担う空気圧だけでなく、粘性負荷側でこの出力を抑制的に制御することにより、探索動作の条件を満たしつつ、より優れた制御性能が得られた。

2. 探索用アクチュエータの構造要件

2.1 フィードバック系における偏差のエネルギー条件

フィードバックとは、一つの作用の情報に基づいて、結果が一致するまで修正のための作用を繰り返すことであり、このフィードバック制御系は簡単に Fig. 1 のように表される。通常、比較要素出力の信号（偏差）は情報として扱われ、この信号に応じてエネルギー源からエネルギーが引き出され、出力装置で仕事出力に変換される。そして、比較要素は入力信号とフィードバック信号が一致していれば、制御終了として増幅器入力をゼロとし、もし異なっていればゼロとなるまで出力装置を働かせる。

いま、Fig. 1 における比較要素の出力信号（偏差）

ε は、入力信号を X 、フィードバック信号を Y とくと、

$$\varepsilon = X - Y \quad (1)$$

であり、 $\varepsilon \neq 0$ である場合、出力装置には ε に応じたエネルギーが供給、蓄積される。Fig. 1の制御系はロボットのアクチュエータ位置制御にも適用される。ここで、入力信号は位置指令値、出力装置がロボットのアクチュエータであるから、 ε の大きさに応じてアクチュエータは力出力を発生して、位置指令値まで移動する。なお、現実の制御系では、重力やアクチュエータ駆動部の静摩擦等の外乱により、 ε は微少残したままアクチュエータは移動を停止するが、これは後述するように通常有意な信号としては扱われない。

情報としての偏差であっても、これは増幅されるから、偏差 ε は信号としてはエネルギー ε を持つと改めて定義する。ここに、 ε は情報としての有意性の証明のため、最小値すなわち他環境からの外乱（例えば上述の静摩擦やノイズ等）を無視できるレベル以上のエネルギー ε_L を必要とし、一方、環境に許容以上の変化をもたらす過大なエネルギー出力は許容されないため、最大値 ε_H が存在する。これらの条件は次式で示され、アクチュエータのエネルギー（仕事）出力が限定されることを表している。

$$0 < \varepsilon_L < \varepsilon < \varepsilon_H \quad (2)$$

しかしながら、Fig. 1の制御系では偏差 ε のゼロ状態が、制御の結果、正常にアクチュエータのエネルギー出力ゼロになったものか、アクチュエータのエネルギー出力がゼロでないにも拘らず、比較要素の故障により偏差 $\varepsilon = 0$ となったものかは特定されない。

2.2 破壊を予測する偏差の生成

ロボットが人間を含む未知の対象物を探索する位置制御系が構成されているとする。ここで、(2)式を満たす偏差 ε が、「対象物に対して安全である」という情報を与える特性を持つとき、これを安全情報 $Sc(\varepsilon)$ とすると、安全情報ありを論理値1、なしを論理値0として $Sc(\varepsilon)$ は次式の条件で表される。

$$\begin{aligned} Sc(\varepsilon) &= 1, & \varepsilon_L < \varepsilon < \varepsilon_H \\ &= 0, & \varepsilon_L \geq \varepsilon \text{ または } \varepsilon \geq \varepsilon_H \end{aligned} \quad (3)$$

Table 1 Unate Logical Relation ($Sc \geq E$)
ユニテな論理的関係 ($Sc \geq E$)

Sc	E
1	1
1	0
0	0

ただし、後述するように偏差 $\varepsilon(t)$ が時間の関数となるため、 $Sc(\varepsilon)$ も時間の関数となるが、ここでは単に ε の関数として扱う。

さらにアクチュエータの仕事出力を E として、仕事出力ありを論理値1、なしを論理値0と表すと、両者は次の論理的関係になければならない。

$$Sc(\varepsilon) \geq E \quad (4)$$

この関係をユニテ⁵⁾な関係と呼び、Table 1の論理的関係で示される。(4)式は、安全情報 Sc がない ($Sc = 0$)にも拘らず仕事出力 ($E = 1$)してはならないことを要請し、少なくとも仕事出力がある ($E = 1$)ときは、安全情報あり ($Sc = 1$)を意味する。すなわち、フィードバック系においては、(2)式を満足する偏差が適切な仕事出力によって生成されることを示す。

いま、対象物にアクチュエータが力出力を作用すると、その指令となる偏差 ε の生成は、必ずしもアクチュエータの力出力の作用ではなく、あくまでも反作用によって確認される。そして、(3)、(4)式は、まず仕事出力 E を生じて、偏差 ε が(2)式を満たして生ずることをセンサを用いて実際に確認すべきことを示している。これはフィードバックの機能とは別に行われる。このように、アクチュエータ制御系では、制御系が対象物に対して許容される出力を行っていることを、生じた偏差により確認する構造が必要である。

アクチュエータの力出力に対する反力がセンサにより検出されている場合、(2)式における ε_H は、対象物が過大な力を受けて永久歪みとなることを示す。これが明確に事象として現れるのが破壊である。作用力 F が増大して ε が増大することをセンサにより検出する構成とすると、Fig. 2に示すように $Sc(\varepsilon)$ は生成される。ここに、(2)式を満足する情報は、最小限の作用力以上でかつ破壊の手前にあること、すなわ

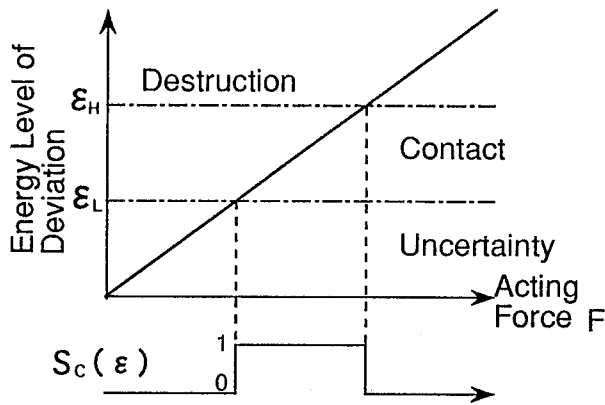


Fig. 2. Generation of Safety Information $S_c(\epsilon)$
安全情報 $S_c(\epsilon)$ の生成

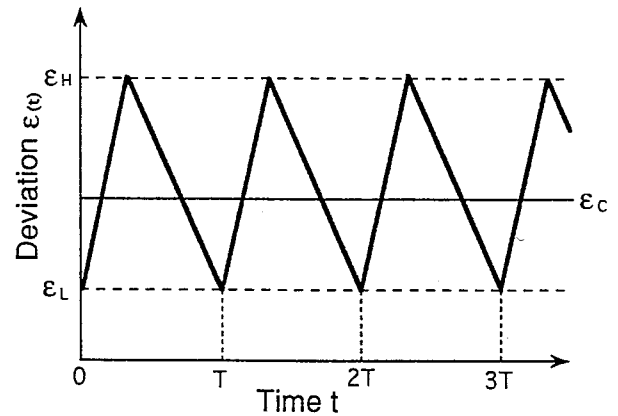


Fig. 3. Generation of Constant Deviation on Groping Motion
手探り動作における一定偏差の生成

ち歪みが許容範囲内の接触状態を意味する。破壊を経験できない条件で回避できるためには、未来の破壊との関係で予測を与える弾性特性が検出可能でなければならない。

例えば、反力検知をバネ弾性を有する接触センサで行うものとする、接触センサは、反力を検出して作用力がある力を越えない制御のためのフィードバック信号とするようにする。そして、対象物を検出する条件として、改めて、(2)式を満たす判断を論理出力 $J \in \{1, 0\}$ とし、 $J = 1$ のとき条件を満たす判断を示し、 $J = 0$ のとき条件を満たさないものとして力出力動作を停止するようにする。

ロボットが対象物を決して破壊しないためには、先に破壊しない条件が確認されねばならず、この条件の下でのみロボットの動作は可能である。この確認は、例えばロボットが対象物に力出力後にセンサで検知すると、センサの故障が起こると実行できないため、対象物への接触前に実行されねばならない。そのため、ロボット自体で既知の負荷を持って、接触前の動作中に作用力が確認されることが必要である。

2.3 自由運動時における位置偏差確認

ロボットの探索動作は、何も拘束のない空間を最も破壊しやすい対象物の存在を想定して実行されねばならない。すなわち、何らかの対象物に接触して停止するとき、最初に設定した最大出力を超える力を生じさせないために、常に自身の力出力を動作中に確認しながら運動する動作ということが出来る。

通常、ロボットが空中でワークを位置決めする場合では、位置決め終了時に位置偏差がゼロ (2)式

の ϵ_L 未満) となる。このとき制御目標の達成が示されるが、位置偏差がゼロであることは必ずしも正しい制御が実行されているばかりでなく、偏差を検出する要素が故障して出力できない事態も想定される。しかも、これら2つは、空中の位置決めであるかぎり偏差を生じないので区別できない。

したがって、ロボットが偏差により生じたエネルギーを消費して停止する特性を得るものとする。ただし、探索動作では対象物の存在を反力により認識するために、作用力を及ぼしながら、つまり位置偏差を残したまま制御を終了(静止)しなければならない。そのため、ロボットは完全停止せずに、実際に何らかの負荷でエネルギー消費して減速の確認を、偏差 ϵ が(2)式における ϵ_L となることにより行う。また、ロボットが動作し続けるためには、偏差 ϵ が再び増大しなければならないため、結局、探索動作中は、 ϵ は ϵ_L から ϵ_H の間を繰り返しながら生成されることになる。

ここで、 $\epsilon(t)$ の立ち上がり ($\epsilon_L \rightarrow \epsilon_H$) はアクチュエータのゲイン(バネ定数)に応じた力出力に相当する。このとき、ロボットが示すバネ特性を、制御で実現しているという意味で「仮想バネ」と呼ぶ。一方、 $\epsilon(t)$ の立ち下がり ($\epsilon_H \rightarrow \epsilon_L$) はロボットに付加した負荷による減速特性に相当する。これらの特性を明確に分けるため、Fig. 3に示すように、アクチュエータはエネルギーを出力し、負荷はそのエネルギーを漸次減少させるものとする。

いま、位置指令を断続的に与え、このようなサイクルが周期 T で実行されているならば、偏差の実効

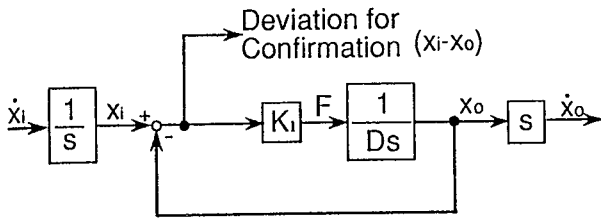


Fig. 4. Groping Motion Control System
手探り運動制御系

値は次式で示す ε_c となる。

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_L + \varepsilon_H}{2} \quad (5)$$

実際のロボットの探索動作は連続して行われるため、Fig. 3における周期 T を限りなく短くすると、偏差は一定値 ε_c となる。したがって、ロボットが動作しながら一定偏差を生じるには、 $d\varepsilon_c/dt = 0$ より、位置指令 x_i とロボット位置出力 x_o との間に $\dot{x}_i = \dot{x}_o$ なる関係が成立しなければならない。このことは、ロボットは一定の粘性を負荷として持ち、定速度制御されることを意味し、ここで生じる偏差を確認する原理が存在することを示唆する。

Fig. 4に示す制御系は、バネ定数（アクチュエータゲイン） K_1 で表される仮想バネと粘性係数 D で示される粘性負荷に、定速度（ランプ状）入力を与えて出力を速度として得るものとして表現されている。ただし、定速度であるため質量による影響は無視する。

ここで、入力速度を一定の \dot{x}_i とし、出力速度を \dot{x}_o とすると次式を得る。

$$\frac{\dot{x}_o}{\dot{x}_i} = \frac{K_1}{Ds + K_1} \quad (6)$$

ただし、 s はラプラス演算子である。ここで、 \dot{x}_i が一定なので、偏差は次式で表される定常偏差として与えられ、これを確認することにより粘性負荷にかかる力 F が監視されることになる。

$$x_i - x_o = \frac{D}{Ds + K_1} \dot{x}_i \quad (7)$$

設定した負荷に対する偏差が示されていることで、仮想バネ（バネ定数 K_1 ）の正常性が判断でき、偏差は対象物確認の情報として確定性を持つ。このように、アクチュエータの力出力 F に条件を持たせるな

らば、仮想バネの正常性の確認のために、ロボットは常に位置偏差を持って動かなければならない。これが、ロボットが探索動作を継続するための条件となる。

一方、仮想バネは現実のバネのように弾性エネルギーとしてエネルギー出力するが、あくまでも制御上の仮想的なものであるため、制御異常によりこのエネルギーが過大に出力されると対象物接触時に破壊する恐れがある。したがって、この仮想バネのエネルギー的正常性を常に維持するためには、エネルギー消散させる粘性負荷が仮想粘性であってはならない。例えば、位置微分の負のフィードバックを持つ系では、制御上見かけの粘性特性を作り出せるが、この微分要素が喪失する等の故障があるため、仮想粘性による停止特性の確認は確率に委ねざるを得ない。それ故、確実にエネルギー消散して停止する物性粘性手段が求められる。これは、熱消散手段を制御で行うことなしに構造として持つものである。このことは、粘性要素を物性で持つことを意味する。

このように、アクチュエータの位置制御系の正常性は、仮想バネと物性粘性を持つ系で生成される定常偏差が適正な大きさであることをもって確認される。

2.4 接触時における粘性特性

探索動作は、未知の対象物を破壊しないようにアクチュエータが柔らかい状態で接触して、反力によって拘束を受けることで停止するが、この停止は(7)式の偏差が大きくなったことによって判断できる。動作停止時に、対象物にかかる力は、動作中に粘性負荷にかかる力に等しいから、Fig. 4における F が粘性にかかっていたのに対して、停止時には未知の対象物にかかるものとして粘性が設計されねばならない。また、偏差の監視による制御系の正常性が確認できない状態が生じた場合、粘性特性の実現には、少なくとも対象物に機械的ストレスを与えずに、生じたエネルギーを消散する物理的粘性手段を必要とする。

このような粘性手段としてダッシュポットを選定し、これを負荷として持つアクチュエータが対象物に作用を与えるものとする。Fig. 5は、ダンパ係数 D を有するダッシュポットとバネ定数 K_2 を有する対象物からなる系に、バネ定数（アクチュエータゲイン） K_1 を持つアクチュエータが作用を与えるモデルを表す。ただし、対象物が永久歪みを残す弾性限界を F_H とする。アクチュエータが力を作用する場合、反

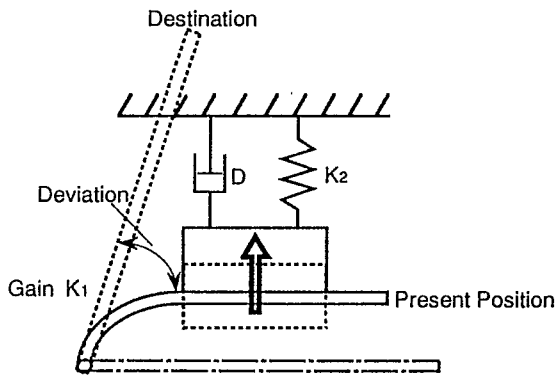


Fig. 5. Normality Confirmation of Virtual Spring Characteristic
仮想バネ特性の正常確認

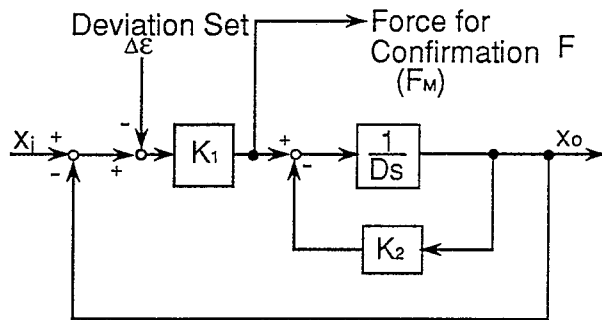


Fig. 6. Position Control System in Contact with Object
接触時の位置制御系

力の測定値 F が F_H を越えていない判断を必要とし、 $F \geq F_H$ となる恐れがあるときはアクチュエータ出力を停止するための制御を必要とする。一般にこの制御は、明らかに $F_M < F_H$ である力 F_M を定め、測定値 F が所用の誤差範囲内にあるか (すなわち $F = F_M$) を判断する。

Fig. 6 は、Fig. 5 のモデルを制御ブロック図で表したものであり、Fig. 4 の制御系が対象物に接触した後の制御系である。ここに、 $\Delta\epsilon$ は対象物に力を作作用するため与えた偏差であり、 $F < F_H$ の条件を満足している限り、仮想バネ定数 K_1 を徐々に大きくすることにより、作用力を徐々に大きくすることができる。さらに、この場合、力 F を一定にすると、ゲイン K_1 を増加することによって、対象物を破壊せずに位置決め誤差を小さくすることが可能となる。

接触時におけるダッシュポットの役割は、何らかの異常が生じて $F < F_H$ が確認できない事態では、

バネに蓄積された位置エネルギーを熱消散することである。このとき、熱消散の時定数 t_K は次式で表される。

$$t_K = \frac{D}{K_1 + K_2} \quad (8)$$

故障して制御停止、あるいは K_1 が消失しても、少なくとも粘性が物理的特性を保持しているならば、対象物に大きな力が生ずる側の誤りを生ずることなく、熱消散は実行される。また、Fig. 4 における探索動作時の $F (= D\dot{x}_o)$ も $F < F_H$ を条件とするため、ダンパ係数 D とロボット移動速度 \dot{x}_o は F_H の制約を受ける。

フィードバック制御系に不安定系を作り出して偏差を生成させ、それを監視する方法は、ブリッジ回路を有するセンサ出力をウィンドウ検定する方法と同様である。この方法によれば、ブリッジ回路の不均衡出力電圧が予め設定されたウィンドウ内にあるとき、センサ外界の状況抽出と回路自体の診断とを同時に行うことになる。フェールセーフなウィンドウ・コンパレータ⁶⁾を用いれば、この検定出力は故障による誤りを含まないことが明らかにされている⁶⁾。

いま、偏差確認構造のフェールセーフ性を論ずるため、仮想バネの機能を $h(\epsilon) \in \{1, 0\}$ 、物性粘性の機能を $g(\epsilon) \in \{1, 0\}$ と表し、各々(2)式を満足するときを論理値 1、しないときを論理値 0 とする。また、粘性は仮想バネにより蓄積されるエネルギーがなければエネルギー消散の機能を実行できないため、改めて $g(h(\epsilon))$ と定義し、この動作状態を g^* と表し、正常時を論理値 1、正常でないときを論理値 0 とする。このとき、フィードバック制御系の動作状態 $R^* \in \{1, 0\}$ (正常時 1, 正常でないとき 0) は、次式で表される。

$$R^* = g(h(\epsilon)) \cdot g^* \vee \overline{g^*} \cdot g' \quad (9)$$

ここで、 \vee は論理和を、 $\overline{\quad}$ は論理否定を、 g' は故障時 ($\overline{g^*} = 1$) の出力特性を表す。なお、 h は正常であるなしに拘らず、 g の機能に依存する。したがって、 $g' = 1$ は h の有無に拘らず、エネルギー消散終了と通報されることになる。誤りのない R^* を得るためには、(9) 式における $g' = 0$ が要請される。すなわち、アクチュエータがエネルギーを蓄積せずに、確実に熱消散して排出するための構造として、物性粘性し

か適用できないことになる。

3. 仮想バネと物性粘性の実現

3.1 空気圧アクチュエータによる仮想バネ特性の実現

仮想バネ特性は、電気モータでは駆動電流を、流体アクチュエータでは流体圧力をゲインにより調整すれば実現することができる。ただし、停電等の異常発生を考慮すれば、電気モータなど本来高剛性のアクチュエータを制御により仮想的に柔らかくするより、本質的に柔らかさを持つ空気圧を仮想的に硬くするほうが安全であり、かつ簡単に仮想バネ特性を実現できる。

このような観点に立ち、既に著者らは空気圧アクチュエータの可変コンプライアンス制御⁷⁾を実現してきた。この空気圧力制御は一次遅れ系に近似され、空気絞り弁の連動制御により高精度で安定した空気圧制御が可能である。この空気圧力制御系を空気圧シリンダの位置制御系に適用すると、位置制御系のコンプライアンス C は、シリンダピストン位置を x 、ピストン推力を f とすると、静的には次式で表される。

$$C = \frac{x}{f} = \frac{1}{HK_1K_2K_3 + 1} \quad (10)$$

ここに、 K_1 は圧力制御系のゲイン、 K_2 はピストン断面積、 K_3 は位置のフィードバックゲイン、そして H は系のコンプライアンスを決めるためのコンプライアンスゲインである。実際の制御システムでは、(10)式における H を代表として可変とすることで、系のコンプライアンスを変えている。また、この H を含めたコンプライアンス C の逆数は、系全体を仮想バネと見なしたときの弾性係数に相当する。この仮想バネが実現できていれば、シリンダの力出力は、偏差の大きさに規定されることになる。

そこで、偏差とゲインによってシリンダ推力が一意に定められているかを検証するため、空気圧シリンダ（ピストン径 50 mm、ストローク 50 mm、供給圧力 0.49 MPa）を対象物に接触させた状態から、位置指令値をランプ状に変化させ、空気圧シリンダのロッドの先に付けたロードセルによって力出力を調べた。実験の結果を Fig. 7 に示す。これより、空

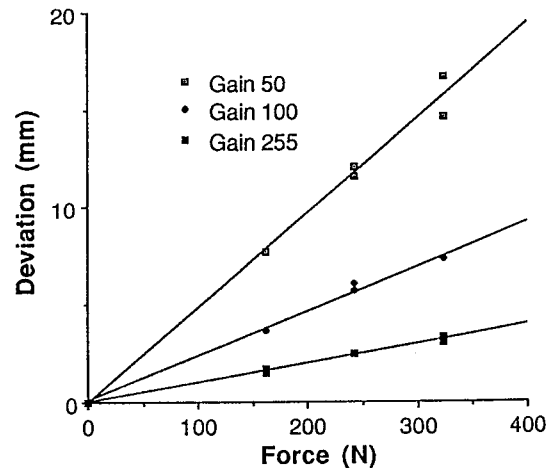


Fig. 7. Relation between Force and Deviation in Pneumatic Cylinder
空気圧シリンダにおける推力と偏差の関係

気圧シリンダの出力は静的な状態では、位置偏差に比例していることがわかる。コンプライアンスゲイン H を 255 から 50 まで変化させると、コンプライアンスは $0.99 \times 10^{-5} \sim 4.87 \times 10^{-5} \text{ m/N}$ の範囲で変化することが確認された。このことは、任意の弾性係数を設定できる仮想のバネが制御系の中で実現されていることを示しており、対象物と接触したとき、作用力と位置偏差の大きさに規定することが可能であるといえる。また、位置偏差の存在は、作用力と等しい反力を対象物が出力していることを意味し、対象物が破壊されていないことの確認になる。

3.2 流体による粘性手段

探索動作では、仮想バネに蓄積された許容されるエネルギーを消散できる保証がないにもかかわらず、さらにエネルギーを加えることは許されないため、アクチュエータには、確実にエネルギーを排出する構造が備わっていなければならない。しかし、エネルギーには正負の概念がないため、運動エネルギーの消散は、系に蓄積されない別のエネルギーに変換されることでしか達成できない。そのため運動エネルギーの消散は、特別な機構を使用しない限り、蓄積も逆変換もなし得ない熱エネルギーへの変換で行われる。このようなエネルギー変換の非対称性を備えているものは、運動制御系の要素の中では粘性しかない。なぜならば、慣性や弾性エネルギーは運動エネルギーを蓄積できるが、粘性は常にアクチュエー

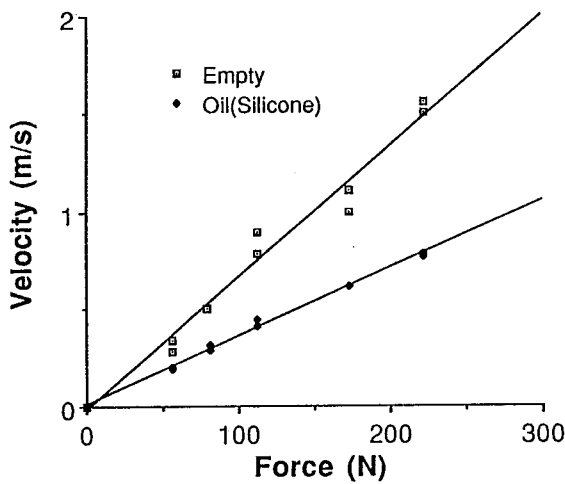


Fig. 8. Viscous Effect of Viscous Fluid
流体による粘性効果

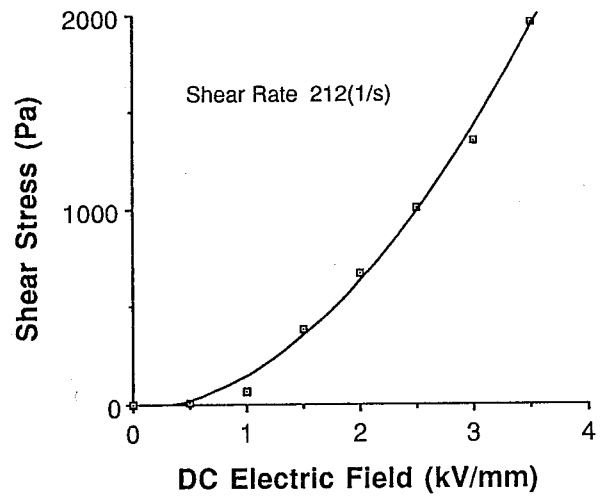


Fig. 9. DC Electric Field versus Shear Stress of ER Fluid
ER 流体の直流電界に対する剪断応力

タの動きに対して、運動エネルギーを不可逆な熱エネルギーに変換することでエネルギーの熱消散を実行し、運動エネルギーの蓄積も行わない。

一般に粘性要素は、系の安定化のために利用される。探索動作においては、粘性の効果により得られる移動速度の安定化（定速度化）は、重要な機能となる。それは、前述の運動エネルギー消散条件を満足するためには、慣性エネルギーにエネルギー蓄積してはならないためであり、これを無視できるような運動形態をとらざるを得ない。また、現実にはロボットが対象物と最初に接触するときは、対象物に対して過大なエネルギーを与えないためにも、高コンプライアンスで一定の低速度で動かなくてはならず、それを実現するだけの低速度制御能力を必要とする。以上の理由からも、物理的な粘性特性が要求されるのである。

そこで、3.1 節に述べた空気圧シリンダ用に、物性粘性手段としてシリンダと同形状の流体ダンパを用意した。このダンパは、シリコン油を封入したシリンダ内部のピストンに油の流路が設けてあるため、ダッシュポットとして機能する。Fig. 8はこのダンパの流体粘性を表しており、これによるとシリコン油の粘性係数は 147 Ns/m であり、完全な粘性摩擦力が生成されていることが分かる。また、仮に油が漏洩しても、空気のダッシュポットとして機能しており、粘性効果は維持される。

ダンパによる粘性効果が一定ならば、Fig. 3 に示すように、探索動作では 1 回のサイクルでアクチュ

エータに与えられるエネルギーは厳格に規定されているため、アクチュエータの様々な機能はエネルギーを排出することで達成されなければならない。例えば、仮想バネに蓄積される位置エネルギーが、熱として効率良く排出されていれば、このエネルギーを仮想バネに蓄積しつつ、しかも排出する代わりにこれを仕事出力として利用することによって、有効な仕事出力を確保可能である。なぜならば、仮想バネ特性を常に確認しつつ、もし確認できない事態に対しても蓄積されたエネルギーを熱としていつでも排出できることが保証されるからである。

このエネルギーの排出側でアクチュエータの運動を制御する方式を抑制制御と呼ぶ。抑制制御は、エネルギー発生側でその発生の割合を調整するのではなく、エネルギーの排出側を別途に高精度に調整することで、系の運動を制御するものである。したがって、エネルギー出力するアクチュエータの制御性能が劣っていても、抑制側の機能がそれを補完することができる。さらに抑制側の粘性要素を物性で持つために、最悪の時にもエネルギーの排出は保証されている。

この制御方式を実現するためには、ダッシュポットのような固定された粘性負荷ではなく、可変の粘性負荷を用いて、必要なときに機能的な抑制（制動）力を出力する抑制力発生機構が必要になる。そこで、粘性を電界によって制御できる流体に着目し、この流体を使った可変粘性ダンパを開発した。そして、こ

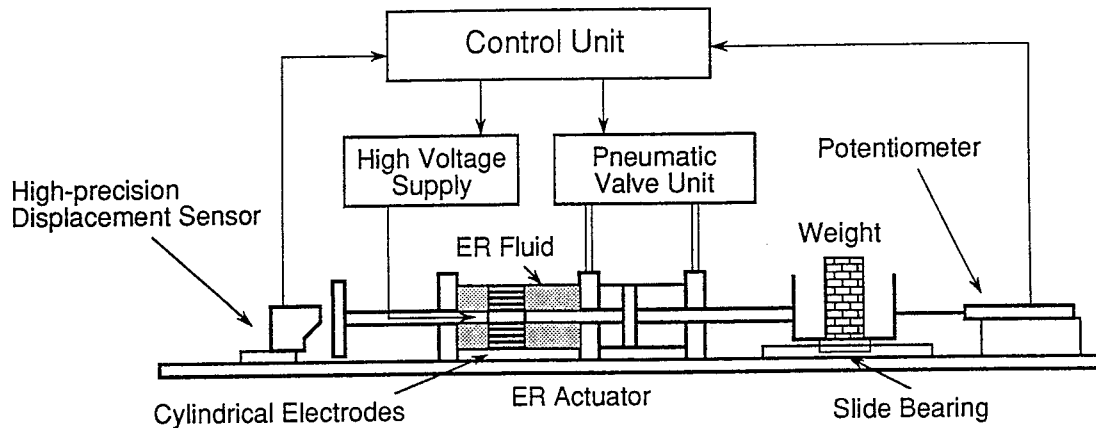


Fig. 10. Experimental System Construction of ER Actuator
ER アクチュエータ実験システム

のダンパを空気圧アクチュエータに付加した ER アクチュエータ⁸⁾で直線運動の探索動作を抑制制御で試みた。

3.3 探索動作 ER アクチュエータ

3.3.1 ER 流体⁹⁾の特性

ER (電気粘性) 流体は、W. Winslow によって 1947 年に発表された、絶縁性の良い油と固体粒子を混合した懸濁液に電界をかけると、その液体の粘度 (正確には剪断応力) が著しく増加する現象 (これを Winslow 効果と呼ぶ) を起こす流体である。ER 流体の粘性増加は、2つの平行に置かれた電極板の間に電界を印加されると、懸濁液中の粒子が2つの電極板間で電界の方向に鎖状に並ぶために、流体の流れを防げる効果である。ER 流体は、それ自身が油としての粘性特性を有するとともに、電界応答性が極めてよく、粘性変化に可逆性があること等の特長を持つ。

本研究では、分散媒にシリコンオイル (基底粘度 10 cSt)、分散質として微結晶セルロースを用いた ER 流体を使用した。この ER 流体は、無電界時にはニュートン流体に、また電界をかけた場合は同じ傾きのビンガム流体の流動特性に近似できる。ER 流体の直流電界に対する剪断応力のグラフを Fig. 9 に示す。これによれば ER 流体の剪断応力は、ほぼ電界の 2 乗に比例している。これらのことより、ER 流体の特性は次式で表すことができる。

$$\tau = -\eta \frac{dv}{dt} + \tau_e (E^2) \quad (11)$$

ただし、 τ は剪断応力、 η は無電界時のニュートン流体としての粘性係数、 dv/dt は剪断速度、 τ_e は電界の影響で発生する誘起剪断応力、 E は外部電界である。

3.3.2 ER アクチュエータの構成

抑制制御を実現するアクチュエータとして、空気圧アクチュエータに ER ダンパを付加して一体化したものを ER アクチュエータと呼ぶ。試作した ER アクチュエータの構造を Fig. 10 に示す。ER ダンパ部は多層円筒電極とし、流路長を得るために各々の円筒電極外側に絶縁体のスパイラル状仕切りを設けた。ER アクチュエータの基本仕様は、ピストンヘッド径 $\phi 50$ mm、ストローク 50 mm、供給空気圧 0.59 MPa、ER ダンパ最大印加電圧 DC5 kV である。

空気圧アクチュエータ部は、複動型両ロッドシリンダであり、シリンダ内室の空気圧は前述した空気圧バルブで、各々独立して調整される。ただし、この調整は位置制御系の中では拮抗的に行われる。ピストン移動時、移動方向とは逆向き (空気圧排出側) の空気圧は、ピストン移動に対して逆圧となるため、結果的には抑制的に働くが、力と力のバランスによる停止は、いずれかの方向にエネルギーを蓄える結果となり、力の均衡が破られたときに過大なエネルギーを出力する危険性を伴う。抑制制御による探索動作では、運動エネルギーの消散を伴った確実な停止をする必要があるため、これを実現するための抑制力として、粘性力によるエネルギーの熱消散を利用するしかない。そのため、ER ダンパの物性粘性特性を必要とする。

ER ダンパ部は Fig. 11 に示す電極を持ち、正負

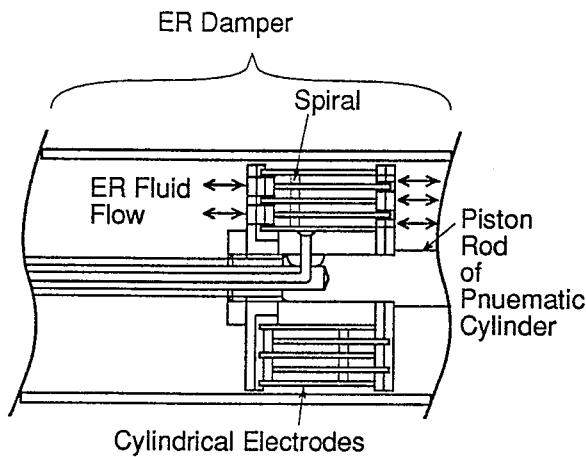


Fig. 11. Structure of ER Damper
ER アクチュエータのダンパ部の構成

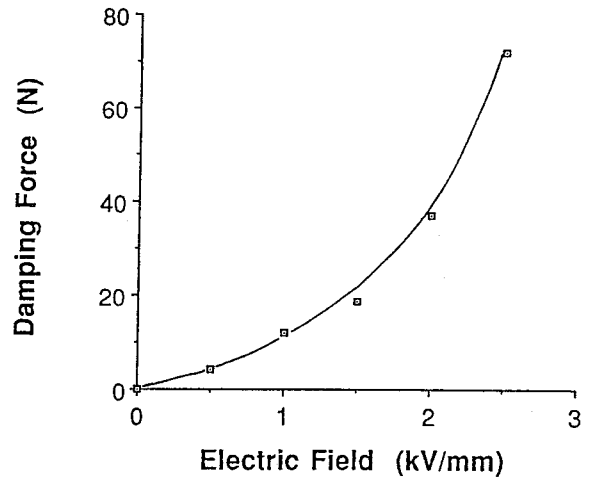


Fig. 13. Damping Force Characteristic of ER Actuator
ER アクチュエータの制動力特性

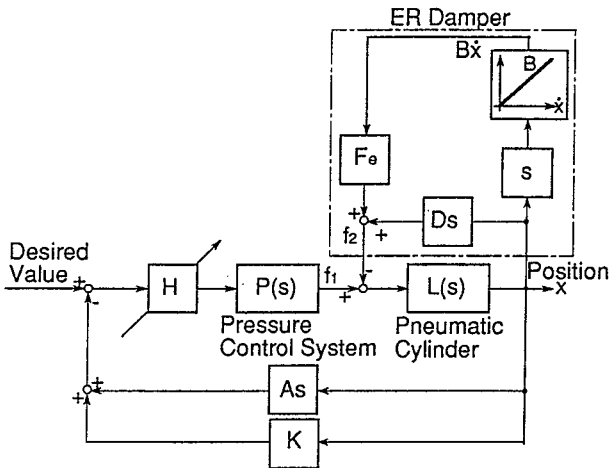


Fig. 12. Control System of ER Actuator
ER アクチュエータ制御系

の電極が各々2 mmの間隔で、交互に5層並んでいる同心円筒であり、電界を印加することで電極間内のER流体の剪断応力、すなわち粘性制動力を変化させる。ERダンパは、ピストンの動きを直接熱エネルギーにして消散するために、エネルギーの消散過程が不可逆である。また、電気信号でダイレクトに粘性制動力を発生するためにエネルギーの変換過程が少なく済むことから、ER流体の特性とあわせて応答性がよく、さらに、粘性制動力のダイナミックレンジを広くとれる。

ERアクチュエータの位置制御系をFig. 12に示す。ここで、ERダンパの印加電界制御系は一点鎖線のブロックで表される。DはER流体が無電界時に

持つ粘性係数(η に相当)、Bは位置の微分ゲイン、また、 F_e はER流体の印加電界に対する粘性制動力増加の係数であり、(11)式の $\tau_e(E^2)$ を線形化したものである。

また、探索動作では、対象物と接触したとき偏差が増加することで認識し、このとき、位置の微分に比例すると偏差の増加を抑える形で粘性が増加する。ERダンパによる粘性制動は、物性であるために非対称なエネルギー特性を持つものであるが、移動方向に対して偏差のもつ意味の異なる探索動作では、ピストンを減速させる側にしか力を発生しない非対称な特性が必要になる。そこで、非対称な制御構成として、Bはピストンが加速されるときだけERダンパに電界を印加するよう、位置の微分の正成分だけに比例するものとした。

3.3.3 ERアクチュエータの特性実験

ERダンパによる制動力 F_R は、基本的にはER流体の特性(11)式に基づき、流体自体の純粋な粘性摩擦力と印加電界により発生する粘性制動力との和である。ERアクチュエータにおける無電界時の粘性係数、摺動摩擦力等を予め実測し、定速度で駆動させたところ、Fig. 13に示す結果が得られたため、制動力 F_R は次式で近似された。ただし $x(m)$ はピストン変位、 $E(kV/mm)$ は印加電界である。

$$F_R = 199 \frac{dx}{dt} + 2.9E^2 \quad (12)$$

この制動力 F_R を、Fig. 12のブロック線図に基づ

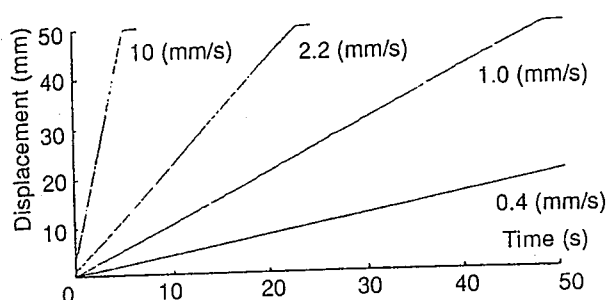


Fig. 14. Motion Characteristic at Low Speed of ER Actuator
ER アクチュエータの低速度動作特性

き調整することにより、ER アクチュエータの定速度制御を行った。なお、速度指令は、入力位置指令をランプ入力信号として生成する。ここに、 H はERアクチュエータ位置制御系のステイフネスを調整するゲイン、 K は位置フィードバック用ポテンショメータのゲインである。なお、 A_s は粘性効果の比較のために設けた電氣的な微分補償である。

ERダンパへの印加電界を生成する信号を調べるため、まずピストン変位を微分したところ、この信号はディザ信号を重畳したような様相を呈した。これは、空気圧シリンダが本質的に持つスティックスリップを生ずる個所で、印加電界を急速に立ち上げているためであり、この信号により定速度制御を行ったところ、結果的に加速度に比例しているような不安定な挙動を示した。

このため、Fig. 12に示すように、ERダンパへ印加する電界は、アクチュエータ速度が加速するときのみ印加されるよう、位置の微分信号 $B\dot{x}$ の正成分にのみ比例するよう半波整流されている。これにより、減速側に制動力を発生しないため、アクチュエータの動きを停止させずに、非線形な摩擦の影響を受けなくなった。従来の空気圧シリンダは、この摩擦や空気の圧縮性のため、一般に50 mm/s以下の一定低速度制御は困難とされている¹⁰⁾。それに対して、ERアクチュエータはFig. 14に低速度制御能力を示すように、速度0.4 mm/sで滑らかな微速動作を安定して実現している。また、同じ制御系で高精度位置決め（繰り返し誤差40 μm 以下）も可能となり、抑制制御方式の導入により高機能化が実現された。

4. 結 言

本報は、トラブル処理やメンテナンス作業のため

利用されるロボットが、人間と接触して挟圧等の災害に至らないための一防止手段について述べたものである。それは、探索動作を行うロボットのアクチュエータが、たとえ人間と接触しても危険なエネルギーを人間を含む対象物に放出しないことを、アクチュエータ自らが確認する構造を持つものとして示される。それを要約すると次のようになる。

- (1) ロボットのアクチュエータ出力は、位置制御系における位置偏差と制御ゲインに基づく仮想バネ特性として現れ、それにより対象物への作用力が定まるため、適正な位置偏差があれば作用力が対象物に対して許容されると判断できる。
- (2) ロボットが探索動作中、対象物に接触する前にアクチュエータ出力を確認するために、常に位置偏差を生じて動作するようアクチュエータは粘性負荷を持ち、これは制御系異常時あるいは対象物に接触時、仮想バネにより蓄積されるエネルギーを確実に消散させるため物性粘性要素となる。
- (3) 上記の要件を満足しつつ、さらに機能的な仕事出力を行うために、粘性負荷を調整できる要素によりアクチュエータ出力を排出側で独立して制御する抑制制御方式を提案した。
- (4) 仮想バネ特性を実現する手段として、可変コンプライアンス制御を行う空気圧アクチュエータを実現し、物性粘性手段として流体粘性ダンパを開発した。
- (5) ER（電気粘性）流体を用いた可変粘性ダンパと、上述の空気圧アクチュエータを一体化したERアクチュエータを開発し、抑制制御の効果を確認した。

（平成5年6月1日受理）

参 考 文 献

- 1) J. Meagher, S. Derby, J. Graham, Robot safety/collision avoidance, Professional Safety, (1983), pp. 14-16.
- 2) 比留川, 北村, 安全第一アルゴリズムとポテンシャル関数に基づくマニピュレータの障害物回避法, 日本ロボット学会誌 Vol. 5, No. 3, (1987), pp. 3-11.
- 3) Brooks, R.A., Planning Collision-Free Motions for Pick-and-Place Operations, Int. Journal of Robotics Research, Vol. 2, No.

- 4, (1983), pp. 19-40.
- 4) 武野, 柿倉, 移動ロボットの移動障害物に対する衝突回避問題について, 日本ロボット学会誌 Vol. 4, No. 5, (1986), pp. 33-37.
 - 5) R. Mcnaughton, Unate Truth Functions, Tech. Rept. No. 4 of Contract DA-04-200-ORD-436, (1957).
 - 6) 蓬原, 交通制御に例をとるセンサの高信頼化処理, センサ技術 Vol. 3, No. 13, (1983), pp. 65-71.
 - 7) H. Ikeda, N.Sugimoto, Pneumatic manipulating system provided with active compliance function, Ergonomics for Hybrid Automated System I, Elsevier Science Publishers B.V., (1988), pp. 545-552.
 - 8) 池田, 杉本, 他, 抑制力発生機構の空気圧アクチュエータへの適用, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集 Vol. 2, (1992), pp. 817-820.
 - 9) W.M. Winslow, 米国特許第 2417850 号明細書 (1947).
 - 10) 宮入, アクチュエータ実用事典, フジ・テクノシステム, (1989).