〔原著論文〕

新アクチュエータのエネルギー変換特性の比較

栗 林 勝 利

Criteria for Evaluation of New Robot Actuators as Energy Converters

Katsutoshi KURIBAYASHI*

Criteria to evaluate the performance of new robot actuators whose output torques or forces are the function of their angular displacement, from the point of view of the characteristics as energy converters, are proposed. The power of linear actuators which reciprocate, is defined as the maximum time average power from the analogous image with a reciprocating engine, and also the same power is defined for the reciprocating rotary actuator. The energy is defined as the one cycle average of static force or torque when actuators reciprocate statically. In order to evaluate the lightness and compactness of actuators, the power and energy are divided by the mass or volume of the actuators. The criteria were applied to new robot actuators to know their merits and demerits as energy converters. As the results, their situations are made clear by the significant difference over two times of the evaluation values among each other, and moreover it was understood that these criteria are very useful not only for the evaluations of new robot actuators but also for the development of new robot actuators.

Key Words : New Actuator, Power Density, Energy Density, Reciprocating Energy model, Energy Converter.

1. ま え が き

ロボットアクチュエータに要求される性能には多くの側面があるが、その中でもエネルギー変換機として十分機能するかどうかは他の機能に優先する最も基本的なものである。これまでにロボットのためのアクチュエータとして、ダイレクトドライブモータ¹⁾、ウルトラソニックモータ²⁾、ラバチュエータ³⁾、ROMAC⁴⁾、および形状記憶合金アクチュエータ⁵⁾など多くの新しいアクチュエータが開発されてきたがこれらの新しいアクチュエータがこの基本的なエネルギー変換特性をどの程度有しているかが十分把握されているとは言えない。

このような視点から新アクチュエータを評価したものとしては、わずかにロボットアクチュエータを解説した

ものがある⁶⁾が、その中ではゴム人工筋の発生力/重量比についての評価がふれられている程度であり、又形状記憶合金アクチュエータに関する論文⁷⁾でも、1例についての出力/重量比が評価されている程度である。

一方従来型のアクチュエータの場合には、既に直流サーボモータを中心として、系統的にその性能評価法が提案されており、さらに最近では電磁アクチュエータやリニアモータにもその方法が適用されている^{8~11)}。その評価法はアクチュエータ自身の慣性モーメント（リニアモータの場合には自身の質量）をモータ側のパラメータと考え、モータ側の出力性能と負荷側の要求仕様との関係が力学的に満足されるように、エネルギー、パワー及びパワレイトの指標を用いて行なうものである。さらにサーボモータの選定及び設計なども可能なようにそれらとモータ特性値との関係をも含むように考えられた評価法である。

原稿受付 1988 年 11 月 7 日

* 大阪府立大学工学部

従って新アクチュエータの性能評価にこれを拡張して適用することが考えられる。しかしながら新アクチュエータの場合には多種多様の物理的原理に基づいており、全く種類の異なるアクチュエータ間の比較評価をしなければならないので、いきなりこのような精密な議論をするのは無理であろう。特に上のように設計にまで結びつく各アクチュエータの諸特性に立ち入った評価は不可能である。また新アクチュエータを評価するには 1) 異種アクチュエータ間の比較となるので、出来るだけ評価法を単純化する必要があり、アクチュエータ自身の慣性モーメント（あるいは自身の質量）はアクチュエータ側のパラメータに含めないほうがよい、及び 2) バックラッシュの原因や関節部の剛性の低下の原因となる減速機は新アクチュエータでは使用しないのが普通である。このようなことを考慮すると、パワレイトよりもトルク（あるいは力）を評価パラメータに用いる方がよいと考えられる。さらに上の評価指標のエネルギーは自身の慣性モーメント（あるいは自身の質量）の運動エネルギーを表わしたものであるが、新アクチュエータにはそれら慣性を含めないのが必要ない。新アクチュエータの以上の諸条件を考慮すると、上記の評価法を新アクチュエータにただちに適用するのは無理であろう。

本論文では新アクチュエータが全く異なる物理的原理に基づいていること、将来はさらにその種類が増加することを予想して、いたずらに細かい議論にとらわれず、それら異種アクチュエータ間の横断的な比較評価が出来ることを第一の目標において、エネルギー変換機としての新アクチュエータの比較評価を行なう。その際新アクチュエータの内部現象にとらわれず、表面的な変量である

Fig.1 Torque-speed characteristics of an ordinary rotary actuator $u=u_{\max}$

トルク（あるいは力）* 速度及び角変位（あるいは直線変位）を基本パラメータとする注1）。また評価の際には以下の4つのロボットアクチュエータとして望ましい事項を考慮する。

- 1) 出力パワーが大きいこと
- 2) 静的出力エネルギー（＝静トルクX最大角変位、あるいは静力X最大直線変位）が大きいこと
- 3) 軽量であること
- 4) 容積が小さいこと

ただし評価の対象にはエネルギー源は含めないものとし、端末の機械エネルギー変換機としてのアクチュエータのみを扱う。次に、このようにして得られた評価法を用いて、新アクチュエータの評価をし、おたがいの位置関係を調べると共に、従来のアクチュエータとの関係についても論じる。

なお本論文で前提とした事項を下に記す。

- a) アクチュエータ自身の慣性モーメント（あるいは自身の質量）はアクチュエータのパラメータに含めない。
- b) 回転型アクチュエータの出力はトルク、角速度、角変位とし、直線型アクチュエータの出力は力、速度、変位とし、さらにそれらアクチュエータへの入力は操作量とする。
- c) 本文中で定義するエネルギー及びパワーは、従来のモータの定格値に対応する量として定義し、そのアクチュエータから引出せる最大値をとる。
- d) ロボットの関節でリンクを最大振幅で揺動させるためのアクチュエータ側の最大振幅をリニアアクチュエータでは X_0 とし、回転型アクチュエータでは θ_0 とする。
- e) 減速機はアクチュエータの一部と見なし、その出力軸でのトルク、角速度、角変位を上記の事項 c) のパラメータとする。さらに減速機の質量及び体積はアクチュエータに含める。

2. アクチュエータの力学特性

アクチュエータの評価法に入る前にその基本となる力学特性の表現をしておこう。

2.1 回転型アクチュエータ

回転型アクチュエータの出力軸トルクは、角速度 ω 及び操作量 u ばかりでなく角変位 θ の関数としても表わされ次のようになる注2)。

注1) 従来の評価法中のエネルギー、パワー及びパワレイトは速度、トルク（あるいは力）及び自身の慣性モーメント（あるいは自身の質量）により表わされるので、新アクチュエータの評価では、自身の慣性モーメント（あるいは自身の質量）を省き、角変位（あるいは直線変位）を加えたことになる。

$$\tau = F_R(\theta, \omega, u) \quad (1)$$

最大の静止トルク τ_{st} はこの式に $\omega=0$, $u=u_{\max}$ と置くことにより得られる。

$$\tau_{st} = F_R(\theta, 0, u_{\max}) \quad (2)$$

なお、Fig. 1 に示したような、従来の回転型電動機などで用いられている（速度－トルク）特性は、一定回転数での定常特性であり（1）式において $\omega=\omega_0'$ ＝一定、 $u=u_0'$ ＝一定、 $\tau=\tau_0'$ ＝一定とおいたものに相当する。

$$\tau_0' = F_R(\times, \omega_0', u_0') \quad (3)$$

ただし×印は θ に関係しないことを示している。また、その際の静止最大トルクは（3）において $\tau_0'=\tau_{st}$, $\omega_0'=0$, $u_0'=u_{\max}$ とおくことにより求め、

$$\tau_{st}' = F_R(\times, 0, u_{\max}) \quad (4)$$

となる。さらに Fig. 1 に示したように (τ_0', ω_0') が最大になる点の座標値が（定格回転数 ω_d' 、定格トルク τ_d' ）として仕様表現パラメータとして用いられてきたが、それらの間の関係は（3）式に $\tau_0=\tau_d'$, $\omega_0'=\omega_d'$, $u_0'=u_{\max}$ を代入して得られる。

$$\tau_d' = F_R(\times, \omega_d', u_{\max}) \quad (5)$$

2.2 直線型アクチュエータ

油圧シリンダのように従来の直線型アクチュエータでは発生力は変位に無関係に一定であるので、それらの仕様表現は最大発生力のみでよかった。ところが新直線型アクチュエータでは、骨格筋のように変位と共に発生力は変化する場合があります。従来、骨格筋の特性表現には等張力特性や等尺性特性なる語が用いられて来たが、それらは全体の力学特性のある断面を表わしたに過ぎず、特性表現法としては狭過ぎる。以下には、前節の回転型アクチュエータに対応して直線型アクチュエータの一般的な特性表現を行う。

直線型アクチュエータの特性は、力 f を出力とし、これが直線速度 v と操作量 u 、さらに直線変位 x の関数として表わされる注3)。

Table 1 Eqs. of chapter 2

$\tau = F_R(\theta, \omega, u) \quad (1)$	$f = F_L(x, v, u) \quad (6)$
$\tau_{st} = F_R(\theta, 0, u_{\max}) \quad (2)$	$f_{st} = F_L(x, 0, u_{\max}) \quad (7)$
$\tau_0' = F_R(\cdot, \omega_0', u_0') \quad (3)$	$f_0' = F_L(\cdot, v_0', u_0') \quad (8)$
$\tau_{st}' = F_R(\cdot, 0, u_{\max}) \quad (4)$	$f_{st}' = F_L(\cdot, 0, u_{\max}) \quad (9)$
$\tau_d' = F_R(\cdot, \omega_d', u_{\max}) \quad (5)$	$f_d' = F_L(\cdot, v_d', u_{\max}) \quad (10)$

注2) 回転型アクチュエータの出力軸までには自分自身の質量があるが、これはロボット設計時に負荷の質量に含めて処理するものとし、ここでは簡単にするために自分自身の質量は含めないものとする。

注3) 直線型アクチュエータの場合も回転型アクチュエータと同じ考え方により、アクチュエータ内の可動質量はロボット設計時に負荷質量に含めるようにし、ここでは簡単のために除外する。

Fig. 2 Static forces of linear actuator ($v=0$)

$$f = F_L(x, v, u) \quad (6)$$

この特性表示を基にして、まず回転型アクチュエータの（2）式に対応する関係を求める。そのために、（6）式に $f=f_{st}$, $v=0$, $u=u_{\max}$ を代入すると、

$$f_{st} = F_L(x, 0, u_{\max}) \quad (7)$$

となる（Fig. 2 参照）。

従来の直線型アクチュエータのように、発生力が変位に関係しない場合には、（3）式と同様の関係が、 $f=f_0'$ ＝一定、 $v=v_0'$ ＝一定、 $u=u_0'$ ＝一定を（6）に代入することにより得られる。

$$f_0' = F_L(\times, v_0', u_0') \quad (8)$$

さらに、（4）、（5）式に対応して、それぞれ静的力及び定格力がそれぞれ次のように得られる。

$$f_{st}' = F_L(\times, 0, u_{\max}) \quad (9)$$

$$f_d' = F_L(\times, v_d', u_{\max}) \quad (10)$$

ただし v_d' は定格直線速度である。

お互いの関係を把握し易くするために、本章の式をまとめて Table 1 に示した。

3. アクチュエータの出力パワーと出力エネルギー

新アクチュエータの出力機械エネルギーとして出力パワーと出力エネルギーを取り上げ以下のような定義をする。ただし従来のアクチュエータに用いられて来た定義と矛盾しないように整合をとって行なう。

3.1 パワー

従来の回転型の電動機などでは、Fig. 1 に示した速度トルク特性を用いて、図示の様に $(\tau_0' \times \omega_0')$ が最大となる値として定義されることが多い。この場合は定常特性を用いて定常のパワーが定義されていると言える。又直線型アクチュエータの場合も、あまり例を聞かないが、（8）式のように定常特性が定義出来る従来型の直線ア

Fig. 3 Reciprocating engine model by linear actuators

クチュエータのパワーは、この特性を参照すると $(f_0' \times v_0')$ の最大値として定義出来る。このように一定トルク、一定速度が定義出来る場合はよいが、新直線エータはの発生力は変位の関数であ型アクチュア、又直線速度も一定ではない。従ってパワーも一定ではなく、時間と共に変化する。この事情は(1)式の一般型の回転アクチュエータの場合も同じである。それ故新アクチュエータのパワーの定義は簡単ではないが本論文では次のように考えてパワーを定義した。すなわち往復動エンジンにおいて往復運動をするピストンのパワーがクランク軸とフライホイールを通じて回転の定常パワーに変換されることにヒントを得て、新直線アクチュエータの。パワーの定義を行なう。まず Fig. 3 に示したようなピストンの代わりに直線型アクチュエータを用いたエンジンモデルを考えると、直線型アクチュエータの力と直線速度はクランク軸により回転量に変換され、さらにそれらはフライホイールによって平滑されてエンジンの一定回転トルクと一定回転速度すなわち一定のパワーになる。Fig. 3(a) はシリンダー型の直線アクチュエータのエンジンモデルを示し、Fig. 3(b) は骨格筋型の直線アクチュエータのエンジンモデルを示している。

このエンジンモデルにおいては、フライホイールの平滑化は数学的にパワーの時間平均を取っていると見なすことが出来るので、新直線型アクチュエータのパワーを次の式により定義する。

$$P = \max \frac{1}{T} \int_0^T f v dt = f_a v_a \quad (11)$$

ただし T は往復運動の1周期であり、 f_a と v_a は最大パワーを与えるパラメータである。又 $v = dx/dt$ の関

係を用いると(11)式は

$$P = \max \frac{1}{T} \int_{1 \text{ サイクル}} f dx \quad (12)$$

とも表わされる。ただし上式中パワーは前提条件 c) に述べたように定格値の意味を持たせるため最大値をとっている。

一般型の回転アクチュエータの場合には、わざわざエンジンモデルを考えないが、直線型の場合と同様に、次のようなパワーの時間平均の最大値により定義する。

$$P = \max \frac{1}{T} \int_0^T \tau \omega dt = \tau_a \omega_a \quad (13)$$

τ_a と ω_a は最大パワーを与えるパラメータである。又 $\omega = d\theta/dt$ の関係を代入すると(13)式は次のようにも表わせる。

$$P = \max \frac{1}{T} \int_{1 \text{ サイクル}} \tau d\theta \quad (14)$$

上のような一般的なパワーの定義を行なうと、従来型のアクチュエータの場合のパワーとの整合がうまくとれて、従来用いられて来たパワーの定義をそのまま適用でき、次式により記述できる。

$$P \cong \tau_a' \omega_a' \quad (15)$$

$$P \cong f_a' v_a' \quad (16)$$

ただし、従来の定義はアクチュエータが一方向のみの回転あるいは直線運動の場合に対しての定常パワーであり、同じ定常パワーでも新アクチュエータに対して行なった揺動パワーあるいは往復動パワーなどの時間平均をとった定義と若干立場が異なる。そこで上の(15)、(16)式は近似表示している。

3.2 エネルギー

ロボットアクチュエータには上述のようにアームを迅

速に動かすためのパワーが必要であると共に、アームを重力とバランスするとか、対象物にアームを押しつけるとかの静的な特性も要求される。後者を評価するために以下のエネルギー量を定義する。

まず直線型アクチュエータの場合には、静的特性のためには静的力の大きいことと直線ストロークの大きいことが望まれる。新アクチュエータの場合には静的力 f_{st} は変位 x の関数であるので、このことを考慮してエネルギー E を次により定義する。

$$E = \max \int_{1 \text{ サイクル}} f_{st} dx \quad (17)$$

同様に回転型の場合には次式を得る。

$$E = \max \int_{1 \text{ サイクル}} \tau_{st} d\theta \quad (18)$$

この定義では、もしアクチュエータ内に減速機があってもその減速比に関係なく一定の E が対応することになる。

2章では f_{st} と τ_{st} を x と θ の各点で最大値を取って定義したことを考慮して、(17) と (18) をそれぞれ次のような別の表現にしておこう。まず (17) に対しては

$$E = 4 x_0 \bar{f}_{st} \quad (19)$$

ただし

$$\bar{f}_{st} = \frac{1}{4 x_0} \int_{1 \text{ サイクル}} f_{st} dx \quad (20)$$

又 (18) に対しては

$$E = 4 \theta_0 \bar{\tau}_{st} \quad (21)$$

ただし

$$\bar{\tau}_{st} = \frac{1}{4 \theta_0} \int_{1 \text{ サイクル}} \tau_{st} d\theta \quad (22)$$

なお x_0 と θ_0 は直線運動と回転運動の振幅である。以上 (19), (21) 式をそれぞれ直線型及び回転型アクチュエータのエネルギーとして用いる。

従来型のアクチュエータの場合は、2章に述べたように

$$\bar{f}_{st} = f_{st}' = \text{一定} \quad (23)$$

及び

$$\bar{\tau}_{st} = \tau_{st}' = \text{一定} \quad (24)$$

であるから (19) と (21) は簡単に次のように表現できる。

$$E = 4 x_0 f_{st}' \quad (25)$$

$$E = 4 \theta_0 \tau_{st}' \quad (26)$$

本章で得た式は Table 2 にまとめて示した。

4. ロボットアクチュエータの評価規範

ロボットは普通の機械と異なり、アクチュ

エータはロボットの動作リンクに搭載されるので、アクチュエータは軽いことが望ましい。さらにロボットは動作空間をより自由に動き回るために、リンクはスリムであることが望ましい。加えてロボットを速く動かすためにアクチュエータのパワーは大きいことが望ましく、又3章に述べたように静的な仕事のためには静的力が大きいことが望ましい。それ故、ロボットアクチュエータとしては1章に述べた4つの事項が充たされることが望ましい。このうち事項 3), 4) は文献 11) で考えられているが、本論文では特に上記のようにロボットに要求される意味で強調して導入する。さらにはエネルギー源が小さいことが望ましいこと及び熱問題を避けるためにエネルギー効率の高いことが望ましい。

以下ではロボットアクチュエータについて、1章の4つの要求を評価し得る評価規範を提案する。ただしエネルギー効率については従来から明確な定義があるので省略する。

1) 質量パワー密度 (Power density per unit mass = PDM)

$$PDM = \frac{P}{M} \quad (27)$$

この規範の大きいアクチュエータは軽くて速い動作をするロボットに有効である。2, 3章で定義した用語を用いることの規範は次の式のように表わされる。

$$PDM = \frac{\tau_d \omega_d}{M} \quad (\text{回転型アクチュエータ}) \quad (28)$$

$$PDM = \frac{f_d v_d}{M} \quad (\text{直線型アクチュエータ}) \quad (29)$$

ここで M はアクチュエータの質量を表わすが、これには減速機の質量等も含むものとする。

2) 体積パワー密度 (Power density per unit volume = PDV)

$$PDV = \frac{P}{V} \quad (30)$$

Table 2 Eqs. of chapter 3

$P = \max \frac{1}{T} \int_0^T \tau \omega dt = \tau_d \omega_d \quad (15)$	$P = \max \frac{1}{T} \int_0^T f v dt = f_d v_d \quad (11)$
$P = \max \frac{1}{T} \int_{1 \text{ cycle}} \tau d\theta \quad (14)$	$P = \max \frac{1}{T} \int_{1 \text{ cycle}} f dx \quad (12)$
$P \approx \tau_d' \omega_d' \quad (15)$	$P \approx f_d' v_d' \quad (16)$
$E = \max \int_{1 \text{ cycle}} \tau_{st} d\theta \quad (18)$	$E = \max \int_{1 \text{ cycle}} f_{st} dx \quad (17)$
$E = 4 \theta_0 \bar{\tau}_{st} \quad (21)$	$E = 4 x_0 \bar{f}_{st} \quad (19)$
$\bar{\tau}_{st} = \frac{1}{4 \theta_0} \int_{1 \text{ cycle}} \tau_{st} d\theta \quad (22)$	$\bar{f}_{st} = \frac{1}{4 x_0} \int_{1 \text{ cycle}} f_{st} dx \quad (20)$
$\bar{\tau}_{st} = \tau_{st}' = \text{const.} \quad (24)$	$\bar{f}_{st} = f_{st}' = \text{const.} \quad (23)$
$E = 4 \theta_0 \tau_{st}' \quad (26)$	$E = 4 x_0 f_{st}' \quad (25)$

PDV の高いアクチュエータはスリムで速い速度の動作が要求されるロボットにむいている。2, 3 章の記号を用いるとこの規範は次のように表わされる。

$$PDV = \frac{\tau_d \omega_d}{V} \quad (\text{回転型アクチュエータ}) \quad (31)$$

$$PDV = \frac{f_d v_d}{V} \quad (\text{直線型アクチュエータ}) \quad (32)$$

ここで V はアクチュエータを包含する直方体のうち最小の体積と定義する。

又質量 M 対体積 V の比として見掛けの密度 ρ を定義する。

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (33)$$

そうすると、次の PDM と PDV との関係を得る。

$$PDV = \rho PDM \quad (34)$$

3) 質量エネルギー密度 (Energy density per unit mass = EDM)

$$EDM = \frac{E}{M} \quad (35)$$

大きい EDM のアクチュエータは軽量で大きな静的力を発揮するロボットに向いている。この量は 2, 3 章のパラメータにより

$$EDM = \frac{4 \theta_0 \bar{\tau}_{st}}{M} \quad (\text{回転型アクチュエータ}) \quad (36)$$

$$EDM = \frac{4 x_0 \bar{f}_{st}}{M} \quad (\text{直線型アクチュエータ}) \quad (37)$$

のように表わされる。

4) 体積エネルギー密度 (Energy density per unit volume = EDV)

$$EDV = \frac{E}{V} \quad (38)$$

EDV が大きいアクチュエータは静的に大きな仕事をするスリムなロボットに向いている。例えばロボットハンドの様に狭い空間にアクチュエータをセットして、しかも大きな把握力を発生させる必要があるような場合には、この規範は有益である。

2, 3 章の記号を用いると、この規範は

$$EDV = \frac{4 \theta_0 \bar{\tau}_{st}}{V} \quad (\text{回転型アクチュエータ}) \quad (39)$$

$$EDV = \frac{4 x_0 \bar{f}_{st}}{V} \quad (\text{直線型アクチュエータ}) \quad (40)$$

となる。なお、見掛けの密度 ρ を用いると

$$EDV = \rho EDM \quad (41)$$

を得る。

その他 PDM と EDM との間、および PDV と EDV との間には以下のような関係がある。回転型アクチュエータに対しては

$$\begin{aligned} \frac{PDM}{EDM} &= \frac{PDV}{EDV} = \frac{\tau_d \omega_d}{\bar{\tau}_{st} 4 \theta_0} = \frac{\tau_d}{\bar{\tau}_{st}} \frac{1}{\frac{4 \theta_0}{\omega_d}} \\ &= \alpha_R \frac{1}{T_R} = \alpha_R N_R \end{aligned} \quad (42)$$

ただし $\alpha_R = \tau_d / \bar{\tau}_{st}$ であり、 T_R は角変位 $4 \theta_0$ を角速度 ω_d で通過する 1 往復の周期である。従って $1/T_R$ は往復運動の周波数 N_R となる。

同様の関係が直線型アクチュエータについても次式のように成立する。

$$\begin{aligned} \frac{PDM}{EDM} &= \frac{PDV}{EDV} = \frac{f_d}{\bar{f}_{st}} \frac{1}{4 x_0} = \frac{f_d}{\bar{f}_{st}} \frac{1}{\frac{4 x_0}{v_d}} \\ &= \alpha_l \frac{1}{T_l} = \alpha_l N_l \end{aligned} \quad (43)$$

ただし $\alpha_l = f_d / \bar{f}_{st}$ であり、 T_l は直線速度 v_d で行程 $4 x_0$ を運動する 1 往復の周期である。それ故、 $1/T_l$ は往復運動の周波数 N_l である。

(42) 及び (43) から、 $PDM/EDM = EDV$ は、トルク比 α_R あるいは力比 α_l と往復運動の周波数 N_R あるいは N_l により表わされることがわかる。次に上の (42), (43) に関連して以下の量を定義しよう。

$$\beta_v = \sqrt{PDV^2 + EDM^2} \quad (44)$$

$$\beta_M = \sqrt{PDM^2 + EDM^2} \quad (45)$$

この式から β_v 及び β_M はアクチュエータの単位体積当たりと、単位質量当たりのパワーとエネルギーの総和を表わす。これらの量はまた PDV と EDV あるいは PDM と EDM を成分とするようなベクトルの長さと考えることができる。そうすると $\alpha_R N_R$ と $\alpha_l N_l$ とはこれらのベクトルの角度の正接とみなしうる。

また直線型アクチュエータの場合には体積 V をアクチュエータの長さ L と断面積 A の積に分解することにより PDV と EDV を次の様に表現し直すことが出来る。

$$PDV = \frac{f_d v_d}{V} = \frac{f_d}{A} \frac{v_d}{L} \quad (46)$$

$$EDV = \frac{\bar{f}_{st} 4 x_0}{V} = \frac{\bar{f}_{st}}{A} \frac{4 x_0}{L} \quad (47)$$

この式を用いることにより直線型アクチュエータは、断面積当たりの力 f_d/A と $\bar{f}_{st}/A$ 、及び v_d/L と $4 x_0/L$ とにより詳細に比較評価することが出来る。特に $4 x_0/L$ はストロークを正規化したものであるから直線型アクチュエータを評価するのに重宝である。

本章で定義した式はお互いの関係を理解し易いように Table 3 に示した。

5. 種々のロボットアクチュエータの評価

新ロボットアクチュエータのエネルギー変換特性の比較評価を 4 章の評価軌範を用いて行う。ただし θ_0 は π と

おき、 X_0 はその直線型アクチュエータ固有の値を用いた。まず最初に新しいロボットアクチュエータの簡単な説明を行いその後でそれらのロボットアクチュエータについて比較評価を行なう。その際、従来からのアクチュエータも同評価規範を用いて計算し、新アクチュエータが従来のアクチュエータの中でどのような位置関係になるかを明らかにする。ただしここで用いたデータはカタログ、技術資料及び論文などから得たものであるため、厳密には評価条件を100% 満たしていない。したがって余り細かい数値の比較は意味が無いと思われるが、それでも評価値の間で2倍以上の違いは有意差があると考えてよいであろう。以下ではこの程度の評価精度を考えて考察を加える。

5.1 新しいアクチュエータの説明

5.1.1 回転型アクチュエータ

(a) ダイメクトドライブモータ(DD モータ)¹⁾: 日本のメーカーによって開発された9台のDD モータを評価した。

(b) ウルトラスニックモータ²⁾: このモータの特徴は軽量コンパクト及び低速で高トルクを有することと言われている。日本のメーカーによる4つの製品を上記の規範により評価した。

5.1.2 直線型アクチュエータ

(a) ラバチュエータ¹³⁾: このアクチュエータの原理はマッキベンの人工筋や早稲田の人工筋¹⁴⁾と同じである。4つの製品についてその性能を評価した。このアクチュエータの特徴は重量当たり高パワーを出し得ることであると言われている。

(b) ROMAC (=Robotic Muscle Actuator)⁴⁾: これもラバチュエータと同じ原理にもとづいており、プッシュプル型で用いられる。このアクチュエータの特徴はラバチュエータとほぼ同じであるが、違う点はラバチュエータよりストロークが大きいこととヒステリシスが小さいことである。

(c) 形状記憶合金(Shape Memory Alloy=SMA)アクチュエータ¹⁵⁾: このアクチュエータの欠点の1つは上に述べたストロークがロボット用アクチュエータとしては小さいと言うことである。それを解決するため記憶形状を直線の変わりにコイル形、あるいは正弦波形が制作される。ここでは形状記憶合金の元の形状を直線形、正弦波形及びコイル形に記憶させたものについてそれらの性能を評価した。

(d) 積層型圧電アクチュエータ^{16~18)}: パイモルフ型と普通の積層型の2種のアクチュエータについて評価

Table 3 Eqs. of criteria

$PDM = \frac{P}{M}$ (27)	$PDM = \frac{\tau_d \omega_d}{M}$ (28)	$PDM = \frac{f_d v_d}{M}$ (29)
$PDV = \frac{P}{V}$ (30)	$PDV = \frac{\tau_d \omega_d}{V}$ (31)	$PDV = \frac{f_d v_d}{V}$ (32)
$EDM = \frac{E}{M}$ (35)	$EDM = \frac{4\theta_0 \tau_{st}}{M}$ (36)	$PDV = \frac{f_d}{A} \times \frac{v_d}{L}$ (46)
$EDV = \frac{E}{V}$ (38)	$EDV = \frac{4\theta_0 \tau_{st}}{V}$ (39)	$EDM = \frac{4x_0 \tau_{st}}{M}$ (37)
		$EDV = \frac{4x_0 \tau_{st}}{V}$ (40)
		$EDV = \frac{\tau_{st}}{A} \times \frac{4x_0}{L}$ (47)
$\frac{PDM}{EDM} \frac{PDV}{EDV} = \alpha_R N_R$ (42)		$\frac{PDM}{EDM} \frac{PDV}{EDV} = \alpha_L N_L$ (43)
$\beta_V = \sqrt{PDV^2 + EDV^2}$ (44)		$\beta_M = \sqrt{PDM^2 + EDM^2}$ (45)
$\rho = \frac{M}{V}$ (33)	$PDV = \rho PDM$ (34)	$EDV = \rho EDM$ (41)

した。

5.2 新アクチュエータの評価

5.1 に述べた新アクチュエータを4章に提案した評価規範により評価を行なった。その結果を Fig. 4 から Fig. 8 に示した。評価したアクチュエータの数は従来型のアクチュエータを含めて直線型が56, 回転型が45であった。

5.2.1 直線型アクチュエータの評価

Fig. 4 と Fig. 5 はそれぞれ(47)式及び(46)式により評価した直線型アクチュエータの評価結果である。以下、直線型の新アクチュエータの性能をこれらの図をもとにして比較しよう。

(a) ラバチュエータ

Fig. 4 から分かる様にラバチュエータのEDVはおよそ10であり、また空気圧シリンダーも約10である。従って、両者は同類のアクチュエータであるといえる。しかし細かく見ると、ラバチュエータの発生力は空気圧シリンダーに比べて4倍大きい、逆にストロークは小さく、約1/4程である。従ってラバチュエータは、ストロークを犠牲にして、その代償として大きな静的力を得ているといえる。

Fig. 5 からは、ラバチュエータのPDVは空気圧シリンダーの中でもっと小さいものと同等である。従って、動的特性は、空気圧シリンダーに比べて若干劣ると言える。ただし発生力は、静的特性の場合と同様に、空気圧シリンダーに比べて4倍大きい、これは動的特性の犠牲の下に得ていると言える。

以上の結果は、ラバチュエータについて言われている特徴と一致している¹⁹⁾。

(b) ROMAC

Fig. 4 によるとROMACのEDVはラバチュエータの最小のものと同等である。このことはROMACが

Fig. 4 Evaluations of linear actuators by EDV

ラバチュエータと同類のアクチュエータであることを示すが、ROMAC の EDV がラバチュエータより小さい原因は、ROMAC の構造上無効空間が有り、その結果有効断面積が小さく発生力が減じられることによる。ところが一方ストロークはラバチュエータの 2 倍ほど有り、構造的にストロークの大きい特長を有している。Fig. 5 によると、ROMAC はラバチュエータと同じ PDV を有しており、同等の動的特性を示しているが、両者の違いは、ラバチュエータが大きな力を発生するのに対して、ROMAC はより大きな速度が出る点である。

(c) 形状記憶合金アクチュエータ

直線形状を記憶させた形状記憶合金アクチュエータは Fig. 4 に見られるように、最も大きい EDV 値を示しており、現在最大の力を出し得るとされている油圧シリンダーに比べても、約 3 倍の大きな値である。一方このアクチュエータのストロークが小さいという欠点を補うために作られた sin 状や coil 状に記憶させた形状記憶合金アクチュエータの結果を Fig. 4 に見ると、確かにストロークはロボットアクチュエータとして十分な量が得られている。しかし残念ながら、それらの EDV 値は非常に小さくなってしまっており、元の直線型の場合の

1/50 位になってしまっている。その原因は、直線型アクチュエータ内には合金が充満していたのに比べて sin 形や coil 形の場合には合金が密でない無効空間が多いためである。この欠点は将来、アクチュエータの設計法により解決されるべきである。直線形と比べると確かに sin 形及び coil 形の EDV 値 10-35 は小さいが、他のアクチュエータ、例えば空気圧シリンダーやラバチュエータと比べると大きいし、又油圧シリンダーの次に位置しており、ロボットアクチュエータとして十分な静的特性を有することがわかる。なおついでながら sin 形と coil 形とは同じ EDV 値であるが、sin 形は coil 形に比べて、力は大きいに変位が小さい。その反対に coil 形は sin 形に比べて力は小さいに変位は大きく取れることがわかる。さらに細かくは、sin 形の場合はその振幅と波長により、coil 形の場合にはコイル径とピッチにより発生力とストロークを変えることができるので、同じ EDV 値内で種々の形状記憶合金アクチュエータを設計することが出来る。

次に Fig. 5 にもついで形状記憶合金の動的特性について述べよう。Fig. 5 には 1 つの例のみが示されている。これはヒートエンジン²⁰⁾に用いられたコイル形の形状記憶合金のデータ

から得たものである。形状記憶合金アクチュエータの同図中の位置は高速アクチュエータとして知られるソレノイドの位置及び、直交座標型のロボットに使用されているリニアステッピングモータの位置とほぼ同じである。さらに形状記憶合金アクチュエータの PDV はラバチュエータや ROMAC よりも若干大きく空気圧シリンダーに近い値をとっている。それ故形状記憶合金アクチュエータは本質的にロボットアクチュエータとして静的特性と同様優れた動的特性を有しているといえる。

(d) 積層型圧電アクチュエータ

本論文で取上げたバイモルフと普通の積層型圧電アクチュエータの EDV を計算すると約 0.03 と約 1 となり、他のリニアアクチュエータに比べて非常に小さい。この主な理由は本来この種のアクチュエータのストロークが非常に小さいことによる。さらに後者場合には横座標の値が約 0.0007 と、極めて小さいので Fig. 4 には表示していない。この値が小さいにもかかわらず後者の EDV が前者より大きいのは、後者の発生力 $\bar{f}_{st}/A = 1764$ が並はずれて大きいことによる。この値は他のリニアアクチュエータと比べても群を抜いて大きく、この点がこのアクチュエータの重要な特長になっている。

Fig. 5 Evaluations of linear actuators by PDV

一方普通の積層型アクチュエータの PDV は Fig. 5 から分かるように非常に大きくリニアアクチュエータ全ての中で最大である。この理由は発生力が大いことと往復運動速度が極めて速いからである。バイモルフ型の場合は、同図によると形状記憶合金やソレノイドアクチュエータに近い。それ故、両者とも良好な動的特性を持っており、もしストロークを大きくすることが出来れば、この種のアクチュエータはロボットアクチュエータとして将来性が期待できるであろう。

5.2.2 回転型アクチュエータの評価

Fig. 6 は回転型アクチュエータの PDV を (31) 式により計算したものであり、横軸を ω_d 、縦軸を τ_d/V にとっている。これらの座標は Fig. 5 と単位をそろえており、両者の比較がし易いようにしている。一般的に PDV が大きいほどアクチュエータとしては優れている。又同じ PDV の下で低角速度で高トルクのアクチュエータがしばしば要求されることがあり、その例としてハーモニッドライブ付のモータが有り、今までひろくロボットに使用されてきた。ただしその場合、ハーモニックライブなどの減速機はアクチュエータ全体の体積を増加させることになるので Fig. 6 に示されているように減速機を付けていない AC や DC モータに比べて PDV 値が悪くなることは覚悟せねばならない。以下では、Fig. 6 にもとづいて新回転型ロボットアクチュエータのエネルギー変換特性の比較を行なう。

(a) ダイレクトドライブ (=DD) モータ

Fig. 6 に示すように DD モータはハーモニックドラ

イブ (HD) 付の DC モータと同様に出力トルクが大きい上に、出力速度はさらにそれよりも大きい。その結果 DD モータの PDV 値は HD 付の DC モータよりかなり優れたものとなっている。一番大きいもので HD 付のモータの 7 倍の値を有している。それ故 DD モータは特に動的に優れ、かつ静的にも良好なモータであると言える。

(b) ウルトラスニックモータ

ウルトラスニックモータの PDV は HD 付の DC モータと比べて等しいか大きい。しかし、詳細に見ると出力トルクは後者より若干小さく、むしろ出力角速度が大きいために PDV が後者より大きくなっている。それ故ウルトラスニックモータの特徴は高トルクより、ロボットアクチュエータとして適度な範囲で高い方の角速度を有する高速アクチュエータの部類に属すると言える。

5.2.3 直線型及び回転型アクチュエータの評価

評価規範 PDV, EDV, PDM 及び EDM を用いて直線型と回転型のアクチュエータのエネルギー変換特性の評価を同じ土俵で行なう。Fig. 7, Fig. 8 にそれらのアクチュエータの評価値のペア (EDV, PDV) 及び (EDM, PDM) を図示した。

Fig. 7 において EDV と PDV が大きいほど、つまり (44) 式で定義した β_v が大きいほど、ロボットアクチュエータの特性がよい。また $\alpha N=1$ は PDV と EDV の評価値のウエイトが等しい場合を意味する。さらに $\alpha=1$, $N=1$ ならば、角速度がロボットアクチュエータとして遅くもなく、速くすぎでもなく適度なものであることを意味する。

以下、Fig. 7 に基づきロボットアクチュエータの比較を行なう。

Fig. 7 に示しているように、新アクチュエータである普通の積層型圧電アクチュエータは油圧シリンダよりも高い PDV 値すなわち高い β_v 値を持っている。その理由は EDV 値は非常に小さいが、このアクチュエータが非常に高速で、しかも大きな力を発生し得るからである。従って、このアクチュエータの EDV 値を大きくするためにストロークを大きく設計することが出来れば、積層型圧電効果を用いた良好なロボットアクチュエータが実現できるものと思われる。DD モータは $\alpha N=1/2-1$ の範囲をとっており、PDV と EDV のバランスがよい。従って DD モータは静的特性及び動的特性が共に良好である。次に良好な β_v を持つアクチュエータ

は SMA アクチュエータである。このアクチュエータの αN は Fig. 7 より分かるように、適当な範囲に入っている。パイモルフ型積層型圧電アクチュエータは SMA アクチュエータに続くが、 αN が余りにも大き過ぎ、ロ

Fig. 6 Evaluations of rotary actuators by PDV

Fig. 7 Evaluations of robot actuators by PDV and EDV

ボットアクチュエータとしては適当ではない。次の順位は SMA アクチュエータと同じ αN を持つラバチュエータである。最後は ROMAC 及び若干 αN の大きいウルトラソニックモータということになる。ROMAC がラバチュエータの後にあるのは構造上無効空間が大いためである。結局ロボットアクチュエータとして適当な範囲の αN を持っているアクチュエータのうち、体積当たりのエネルギー変換特性の観点から見て良好なロボットアクチュエータの順序は上の考察を整理すると次の様になる。

油圧シリンダ、空気圧シリンダ、AC、DC、ステッピングモータ及び HD 付 DC モータ > **DD モータ** > **SMA アクチュエータ** > **ラバチュエータ** > リニアステッピングモータ > **ウルトラソニックモータ** = **ROMAC**

次に Fig. 8 は同様に種々のアクチュエータについて PDM と EDM の関係を示したものであり、この図から前述と同様の結果がえられる。ただしラバチュエータ、形状記憶合金アクチュエータ及び ROMAC は、見掛けの質量密度 ρ が非常に小さいので前回とはかなり違った

位置を占めている。この図によるとラバチュエータと形状記憶合金アクチュエータは上記順序の内油圧シリンダと空気圧シリンダの間に位置することになり、ROMAC はこれらに続きかつ空気圧シリンダの前と言うことになる。これをあらためて整理すると、新アクチュエータの質量当たりのエネルギー変換特性の良好な順序は

油圧シリンダ

< **SMA アクチュエータ** = **ラバチュエータ** > **ROMAC** > 空気圧シリンダ、AC、DC、ステッピングモータ及び HD 付 DC モータ > **DD モータ** > リニアステッピングモータ > **ウルトラソニックモータ**

となる。ROMAC がラバチュエータの後にあるのは ROMAC の重量が重いためである。

6. 結 言

新ロボットアクチュエータが互いに全く異なる物理的原理にもとづいていることから、細かい議論にとらわれずに、それら異種アクチュエータ間の比較、評価ができることを第 1 の目標において、ロボットアクチュエータとしての基本機能であるエネルギー変換特性に注目した新アクチュエータの評価法を提案した。この規範は往復運動の 1 サイ

Fig. 9 Evaluations of robot actuators by PDM and EDM

クル間の時間平均パワーと静的エネルギーに注目し、しかもアクチュエータの質量と体積をも考慮にいたれたものである。この評価規範を用いて回転型と直線型の新しいアクチュエータのパワー密度及びエネルギー密度を2倍以上を有意差として評価した。その結果、新アクチュエータが従来のアクチュエータの中でエネルギー変換機としてどのような位置にあるかが明らかになった。しかもこの評価規範は新しいロボットアクチュエータを評価するのに有用であるばかりでなく、新しいロボットアクチュエータの開発においても有用である。

参考文献

- 1) 浅田, “ダイレクトドライブロボット”, 日本ロボット学会誌, 2-4, pp.32-37, 1984.
- 2) 松下電器産業(株), “超音波モータ”, 技術資料.
- 3) 宇野他, “ゴム製アクチュエータを用いたロボットアームの開発” 第2回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.163-164, 1984.
- 4) Immege, G. B., “ROMAC. Actuators for Micro Robot”, The Proceedings of Micro Robots and Teleoperators Workshop by IEEE Robots and Automation Council, 1987.
- 5) 例えば Kuribayashi, K., “A New Actuator of a Joint Mechanism Using TiNi Alloy Wire”, The International Journal of Robotics Research, 4-4, pp.47-58, 1984.
- 6) 谷江, “アクチュエータの現状と展望”, 日本ロボット学会誌, 2-4, pp.4-9, 1984.
- 7) 広瀬他, “形状記憶合金の開発(σ機構の導入による出力特性の改善)” 日本ロボット学会誌, 4-6, pp.28-38, 1986.
- 8) 長坂長彦, “バワレイトによる 直流サーボモータの選定法”, 電気学会雑誌, 89-8, 971, pp.1529-1536, 1969.
- 9) 長坂長彦, “バワレイトによる 直流サーボモータの設計法”, 電気学会雑誌, 91, 7, pp.1310-1318, 1971.
- 10) 長坂長彦, “電磁アクチュエータの分類とその性能評価”, 電気学会雑誌, 107-D, 1, pp.42-49, 1987.
- 11) 長坂長彦, “リニアモータの特性・性能の表示法と評価指標の提案”, 電気学会研究会資料 MAG-86-118, pp.1-10, 1986.
- 12) 山田, “リニアモータと応用技術”, 実教出版, 1978.
- 13) ブリジストン(株), “サーボラバチュエータキット”(カタログ).
- 14) 松下, “ゴム人工筋製作法ノート”, 計測と制御, 7-12, pp.110-116, 1968.
- 15) Kuribayashi, K., “A New Compact Robot Hand Using Shape Memory Alloy Actuator”, The Proceedings of Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, Osaka, Japan, JAACE, p.393-400, 1986 (July).
- 16) 田丸, “カルマンフィルタによるバイモルフ形圧電アクチュエータの駆動制御”, 計測自動制御学会論文集, 23-8, pp.93-95, 1987.
- 17) 深沢他, “切り欠き一体構造マイクロロボットモジュールの1制御法”, 第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.651-652, 1987.
- 18) 東北金属工業(株), “積層型圧電アクチュエータ”(カタログ No. VR-008).
- 19) ブリジストン(株), “ラバチュエータとロボットへの応用”(技術資料 (No.1 ガイダンス編)).
- 20) 本間他, “固体熱エンジン用 TiNi 系合金の熱処理に関する研究”, 東北大学選鉱製錬研究所集報, 40-2, pp.163-172, 1984.