アクチュエータの現状と展望*

谷 江 和 雄**

1. ま え が き

ロボットの定義は種々想定されるにしても、ロボット開発の究極目標が、人間がそなえている汎用性、柔軟性、融通性などの特徴を含む機械の実現にあることは異論のない所である。人間を含めた生物体の特質は、その多くを中枢における知的活動に依存している。近年のマイクロエレクトロニクスの進展は、ソフトウェアを仲介として、この知的活動を機械化することに一定の貢献をしてきた。

しかし、ロボットに要求される汎用的特性は、特に運動機能に注目する時、このような知的要素だけで満されるものではない。人間の手足が示す作業能力の汎用性が、筋というアクチュエータによって駆動される関節を多数そなえたフレキシブルな構造体と、それを巧みに制御し得る中枢に蓄えられたソフトウェアとの調和のもとに達成されるという事実を見るまでもなく、ロボット本体が有する構造のフレキシブルな運動特性と相俟って、その汎用的機能は具体化されるといえる。こうしたフレキシブルな構造体は、柔軟なメカニズムとそれを駆動するアクチュエータを必要とするが、アクチュエータの選択は、それが動作性能を規定する要素であるがゆえに、ロボットの構造を設計する上で、最も慎重に考慮されなければならない問題の一つである。

本稿では、ロボット用アクチュエータの現状と展望について述べる。個々のアクチュエータについては、本特集の各稿で取り上げられているので、本稿では、ロボット用アクチュエータに望まれる特質や、それを具体化する技術、および今後のアクチュエータ開発が目ざす方向などを総括的に述べることにする。

2. ロボット用アクチュエータの設計条件

いかなる機械システムも、それが単なる道具ではなく、能動的に作業を実行する装置である限り、何らかのアク

チュエータを必要とする。そのアクチュエータの選択は、一般に①最大負荷、②速応性、③寸法、重量、④耐久性・寿命、⑤保守性、⑥安全性、⑦経済性といった項目に留意しつつなされることになろう。ロボット用アクチュエータも、基本的には同様の選択基準により選定されるといえるが、ロボットに期待される構造上の特殊性ゆえに、上記項目を満たす上で、一層厳しい条件を克服することが要求されたり、あるいは新たな仕様を付加することも必要になる。

ロボット用アクチュエータとして特に満すべき重要な条件を列挙すれば、次のように整理されよう。④小形、軽量で高出力が得られること、⑤コンプライアンス制御への対応が可能なこと、⑥作業環境条件に適した性質を有すること。

ロボットの汎用性は、多分にその構造体が有する自由度に依存する。自由度を増加すると、各自由度を操作するために必要なアクチュエータの数も増加し、必然的にロボットの構造体の大きさ、あるいはその全重量に占めるアクチュエータ自身の大きさや総重量の割合が大きくなる。したがって、コンパクトなロボットを設計したり、負荷の搬送効率の高いシステムを得るために、小形かつ出力／重量比の高いアクチュエータが不可欠になる。

ロボットの運動機能における柔軟性の一つは、それが環境からの拘束に適応した運動ができるという特性により発揮される。例えば、ロボットアームによりクランクを回す作業や組立作業などでは、この種の柔軟性が必要であることはよく知られている。拘束に適する柔軟な運動、いわゆるコンプライアントモーションは、環境に作用させる力を直接制御したり、あるいはリモート・センタコンプライアンス(RCC)に例を見るように、受動的なバネ要素を採用することにより実現できる¹⁾。前者より得られる運動をアクティブコンプライアント・モーション、後者のそれをパッシブコンプライアント・モーションと呼ぶが²⁾、いずれの方式を採用するにしても、アクチュエータ自身コンプライアンス制御が実現しやすい特性をそなえている必要がある。

原稿受付 1984年7月24日

* Research Review of Robot Actuators

** 機械技術研究所

上記③は、ロボットが種々の環境条件下で使用されるため、その条件に合ったアクチュエータを選択すべきことを意味している。ロボット開発の目的の一つは、人間にとって危険な作業を、人間に代わって能率的に行う手段を提供することにある。したがってその作業領域は、単に生産現場のみならず、原子炉内などの放射線環境下、宇宙空間、海底、あるいは災害現場など多様であり、それぞれにおいて、適切に機能するアクチュエータが用意されねばならない。例えば海底では、高圧下でも機能するアクチュエータが、また火災現場や暴発性雰囲気中での異常点検ロボットなどを想定する場合は防暴型のアクチュエータが不可欠であり、このように各種ニーズに対応したアクチュエータの開発が望まれる。

ロボット用アクチュエータの開発研究は、通常の機械システムのアクチュエータが具備すべき仕様に加え、④、⑤、⑥をも考慮しつつ進められることになる。

3. 現 状

古くから機械システムにおいて使用されているアクチュエータには電気式、油圧式、空圧式の3種がある。ロボット用アクチュエータの開発は、基本原理はこれら3方式の原理を踏襲し、それに生産技術的工夫を加えることによって、ロボットの仕様を満たすものを得ようとする試みと、新たな原理にもとづくアクチュエータを開発しようとする試みとに分けられる。後者は、生体の筋を模倣したメカノケミカルアクチュエータや、形状記憶合金を利用する方式などがその例である。以下方式別に開発現状を述べる。

3.1 電気式アクチュエータ

電気式アクチュエータはエネルギー源が手軽に確保できることや、電子技術の進展により制御系の構成が容易であること、さらには位置制御、力制御いずれの対応も比較的容易にできるなど、ロボット用に適した性質を有する理由から、現在最も普及しているアクチュエータである。10年程前までは、電動モータは大出力域で出力/重量比が高く、また速応性も後述する油圧や空圧方式に劣るものが多かった。したがって、それが適用されるロボットも軽負荷用ロボットが主体であった。しかし特にDCモータでは、最近の電子計算機の周辺機器の進展の波及効果とも相俟って、回転部分の慣性が低く、速応性に優れ、かつ出力-重量比の改善されたものが出現するようになり、それにとまってより高負荷用のロボットのアクチュエータをも電動化する傾向にある。ロボットで使用される電気式アクチュエータは、主にDCモータ、ステップモータの2種であるが、電気モータ間の選定でも速応性の改善が進むにつれ、ステップモータよ

りもDCモータが使用される場合が多い。

電気モータは一般に、その出力を直接ロボットの関節の駆動に使用するには、十分なトルクが得られないため、通常は減速機構と組合せて用いる。また基本的にはその出力は回転量であることから、スライド型関節へ適用する場合には減速機構とともに、回転→直線運動変換装置も必要になる。電気式アクチュエータの種類は限られているが、結局これら付加的機構によりこの種のアクチュエータの多様性が生じているともいえる。高出力、小形、軽量のアクチュエータを得るという観点からは、この付加機構もコンパクトかつ軽量に構成されなければならない。減速機構としては、実用上はハーモニックドライブがよく用いられる³⁾。これは割合コンパクトな形状で、モータ出力と同軸上に高減速出力を与える減速機構である。特殊な変換機構としては、LADDアクチュエータと呼ばれる減速機構と運動変換機構とを兼ね備えたものが開発されている⁴⁾。また負荷に応じて、可変出力トルクを得るためにクラッチで出力を制御したり、複数の減速比を有する歯車列をクラッチで選択して、出力を制御することも試みられているが、実用例は少ない⁵⁾。

変換機構、減速機構の使用は、それに摩擦やガタ、ヒステリシスが含まれる可能性があるため、効率面あるいはモータ出力を正確に関節出力として利用するという立場からは望ましい姿ではない。この問題に対処するために、ダイレクトドライブ型モータの開発とロボットへの導入が試みられている^{6),7)}。直接モータ出力を利用できるようにするためには、低速域で必要な運動形態と、力あるいはトルクを発生し得るモータを開発する必要がある。希土類磁性体などを用いた強力な磁界を発生し得る磁石の出現は、この種のモータの設計を可能にし、リニアモータ、ダイレクトドライブ・トルクモータなどが実用化されるに至り、それらを導入したロボットアームの開発が最近活発に進められている。

ダイレクトドライブ型モータは、一般にモータ出力トルク（あるいは力）が電流に比例するという性質を利用して、力を直接指令値とするシステムを構成し得るという特徴がある。また、減速機を含まないため、運動に双方向性があり、この性質はパッシブコンプライアント・モーションを実現する際に有効になるなど、いくつかの興味深い性質を備えている。

電気式アクチュエータの欠点は、過負荷時における発熱や、モータのブラシ部分において発生するスパークのために、爆発性雰囲気中での適用に制限を受けることである。この点については、メンテナンスの問題とも関連して、ブラシレスモータ、特にACサーボモータの検討が進められつつある⁸⁾。

3.2 油圧式アクチュエータ

油圧式の駆動システムは、一般に油圧パワーユニット、バルブ、それにアクチュエータから構成される。油圧パワーユニットは、エネルギー蓄積源とその蓄積されたエネルギーを油圧に変換するポンプを含む。アクチュエータとしては、油圧シリンダ、揺動モータなどが用いられる。油圧システムの特徴は、作動油の圧力、流量を制御することにより、アクチュエータ出力、速度を変化できるので、電気式のように減速機構などを必要としないことや、油圧の高圧化により出力/重量化の高いアクチュエータが得られることである。その結果、大出力システムでも割合コンパクトにまとめることができる。また系の剛性も高いことから、高精度な位置制御も行うことができる。これらの長所から、油圧式は比較的大形のプレイバック形ロボットなど、閉ループ位置制御系を内蔵した産業用ロボットにより多く採用されている。

油圧式の一つの欠点は、系の剛性が高いゆえに、位置の高精度な制御が可能な反面、力の制御が比較的困難なことである。通常は油圧での力制御を安定に行うには、油圧回路中に意識的に油がリークする部分を設けて、圧力ゲインを下げるなどの工夫をする必要があるが、これらはシステムのエネルギー効率の低下を生ずることになり、実用上支障をきたすことがある。また、油圧ユニット側で圧力を可変にする方式も考えられているが、この方式は複数のアクチュエータの出力を独立に操作する場合、システムが大がかりになる。

油圧方式の別の欠点としては、商用電源を利用する電気式に比べて、エネルギー源としてのパワーユニット分だけ余分の設置スペースを要すること、作動油中に混入するゴミによりシステムの機能に支障が生ずるので、その管理を十分行わなければならない、保守に手間を要することなどが指摘されている。

アクチュエータの駆動には油圧を用いても、制御信号には処理の容易なことから電気信号が用いられる。そこで、油圧式では電気-油圧変換素子が不可欠である。このような素子としては、電磁弁、サーボ弁、比例制御弁などがあるが、特に高精度位置制御を要するロボットでは、サーボ弁を用いることが多い。

サーボ弁を用いる場合は、アクチュエータとバルブを別々に配置することになるが、コンパクトな構成を実現するために、バルブをアクチュエータに内蔵したものが開発されている。ロータリサーボアクチュエータ(RSA)⁹⁾やディジタルシリンダ¹⁰⁾などがそれである。この種のアクチュエータでは、小型の電気モータでバルブを操作することにより、油圧でパワー増幅された出力が得られる。ハウジングの材質を軽量化した、小形、軽量

図1 出力(発生張力)/重量比の比較

なタイプが試作され、動力義手への適用例などが報告されている^{11),12)}。

3.3 空圧(ガス圧)アクチュエータ

空圧システムの構成は、基本的には油圧システムのそれに似ている。エネルギー源(コンプレッサ等)からの出力をバルブで制御し、シリンダや揺動型のアクチュエータを駆動する。空圧方式の長所は、作動媒体が空気あるいはガスであるため、取扱いが油圧などの場合よりも簡単であること、作動媒体に圧縮性があるため、剛性の高い系の構成が困難な反面、アクチュエータの作動力を制御することが容易なこと、および基本的に防暴性を有することである。

またアクチュエータ材質の選定を行う場合、割合作動媒体の拘束を受けずに、それを行えることも長所の1つとして指摘される。したがって、例えばプラスチック、ゴムなど比重の低い非金属材料を用いても、アクチュエータを構成し得るため、軽量のアクチュエータを比較的設計しやすい。通常の産業用ロボット用アクチュエータでは、材質に非金属が用いられる例はまれであるが、特に軽量化を指向する動力義肢などでは、マッキベン人工筋¹³⁾、ゴム人工筋¹⁴⁾あるいはパウチ筋¹⁵⁾といった合成ゴムをベースにしたアクチュエータが試作されている。

図1は出力/重量比(ガス圧、液圧の作動圧は1[kg/cm²])を電動、油圧式と比較したものであるが¹⁴⁾、図からも明らかなごとく、この種のアクチュエータは他に比べ、よりすぐれた出力/重量比を示す。ところが空圧システムは、安全性の観点から作動圧を高くとることができず、またゴム材を用いるタイプでは、材質の強度からも作動圧は制限されるため、これらは一般に低出力域においてのみ特徴を発揮するにとどまる。

空圧システムの欠点は、位置制御が困難なことも指摘

される。そのため一般に、ストッパなどを用いる位置決めを行うことが多く、固定シーケンス型など簡易ロボットに適用例が多いことは周知の通りである。しかし最近では、外部電気信号により作動圧が制御される空気圧サーボ弁も市販されつつあり、またわずかではあるが、PTP 型空圧プレイバックロボットが発売されるなど、空圧方式を簡易型からより高度なロボットへ導入していく傾向も見受けられる¹⁶⁾。

3.4 その他の方式

電気、油圧、空圧を除く他の方式のアクチュエータで、ロボットへの適用を意図して開発が進められているものとしては、①合金の形状記憶効果を利用する方式、②電歪効果を利用する方式、③メカノケミカル反応を利用する方式、などがある。

①は最近注目を集めている方式であり、メカノサーマルアクチュエータと呼ばれるものである。過熱・冷却によって生ずる金属の変形を利用するため、動特性に種々の解決を要する問題があるが、比較的人間の筋の挙動に近い運動特性をもつ軽量なアクチュエータが得られる可能性があり、今後のロボットのアクチュエータとして興味深い方式である¹⁷⁾。

②は物質の電歪効果をアクチュエーションに利用するもので、出力、変位量が微小であるため、一般的用途のロボット用アクチュエータとしては使用することはむずかしいが、特にマイクロマニピュレータ用アクチュエータへの応用が検討されている¹⁸⁾。

③は生体の筋におけるように、化学的反応を機械的運動に変換する現象を利用する方式である。イオンの移動、

相転移あるいは order-disorder 転移、光異性化反応等によって作動するアクチュエータシステムが検討されているが¹⁹⁾、制御性、動特性に関し、実用化に至るまでには検討すべき問題が多い。

以上、述べた各種アクチュエータの特徴を表1に示す。

4. 今後の研究開発課題と展望

以下に、ロボット用アクチュエータに今後期待される研究課題と展望について、コンパクト化、出力特性、柔軟性などの観点から述べる。

4.1 コンパクト化

アクチュエータのコンパクト化は、現在でもロボット用アクチュエータの重要課題であるが、今後ともこの問題は当然のことながら検討が進められるべき問題である。特にマイクロエレクトロニクスの進展は、一層複雑なメカニズムを柔軟に制御する手段を提供することが予測され、それにとまってロボットの多自由度化へのニーズは一層高まることが考えられる。このニーズに答えるためには、個々のアクチュエータのコンパクト化は、従来にも増して重要な解決を要する問題となろう。メカノサーマル、メカノケミカルといった新しい原理によるアクチュエータの開発や、コンパクトな多自由度機構の構成のために、単1自由度のみならず、2自由度、3自由度関節など多軸アクチュエータへのアプローチも重要となろう。

4.2 出力特性

生体の筋の特徴の一つとして、瞬発力にすぐれていることが指摘される。すなわち、大きな力を持続して発生

表 1 各種動力システムの比較(光岡(機械技研)の作成したものの一部加筆修正)

	電 気 式	油 圧 式	空 気 圧 式	メカノサーマル式	メカノケミカル式
操 作 力	小から中程度の操作力が得られる。通常回転力として得る。	非常に大きな力が得られる。回転力としても直線運動力としても得られる。	大きな力は得られない。通常、直動運動力として得る。	微小要素を並列に配することにより改善可	同 左
速 応 性	<中> 低慣性サーボ電動機の開発によりよくなり、中小出力のものでは油圧に近くなった。	<大> トルク・慣性比が大きく、高速応答が容易に得られる。	<小> 一般に高速応答困難。ただし、配管系の損失が小さいので、単純な動きのとき油圧より速い応答も得られる。	微小な要素を並列に配することにより速応性の改善可	同 左
大きさ・重量	プリントモータなどによりかなり改善された。広い範囲のサイズが得られる。	重量、大きさ/出力比が非常に高い。しかし油圧パワーユニットがかなりのスペースを占める。	油圧に比べ劣る。しかし、アクチュエータの材質を工夫すれば、高い出力/重量比が得られる。小形・低出力のものに利用価値がある。	電気、油圧、空気圧式に比べ、小形、軽量化の可能性あり	同 左
制 御 性	位置制御、力制御が可能	剛性が高いため、高精度な位置制御が可能。反面、力制御が比較的むずかしい。	高精度な位置制御が比較的むずかしい。	パルス状過熱により位置、力制御可能	基本的には力制御が可能
安 全 性	過負荷に弱い。防壊を必要あり。その他の安全性は高い。	かなりの発熱あり。過負荷に強い。火災の危険あり。	過負荷に最も強い。発熱はない。人体への危険も少ない。	発熱あり	基本的には安全
使いやすさ	周辺機器がそろっており、検査も容易。	作動油の管理、管路のフラッシング、フィルタ管理に注意を要する。	供給空気の水分除去、潤滑性の付加に注意を要するが、油圧より容易。	研究段階	研究段階
寿 命	サイリスタのソリッドステータ駆動により改善された。	油に潤滑性があるので機器の寿命が長い。	空気に潤滑性がないので、油圧、電気 に比べ劣る。	〃	〃
コ ス ト	普 通	価格、ランニングコストとも高い。	低コスト	〃	〃

することは困難な反面、アクチュエータのスケールの割には、一時的にでも大きな出力を出すことができる。生体の筋はこのような性質と、そのスチフネスを調整する機能を併用することにより、効率的な筋動作を実行していると考えられる。筋のこの種の特徴は、通常の産業用アクチュエータが単一の駆動器を用いて力を制御しているのに対し、生体の筋（骨格筋）は数十～数千の運動単位が並列的に駆動され、それらの総合として出力が制御されることにより生ずる²⁰⁾。動特性にすぐれ、かつ出力レンジの広いアクチュエータを得る上では、こうした生体のアクチュエータの構造に注目した、アクチュエータの設計も興味深い。

また生体の筋には、負荷に応じたトルクと（角）速度で対象を駆動する能力がある。これは工学的に見れば、一種のインピーダンス整合を自律的に行う機能といえる²¹⁾。電動機駆動系では、一般にアクチュエータと負荷との間に適当な減速比のギアを、負荷に応じて装着することによりインピーダンス整合をとることができる。単一のアクチュエータで広い範囲の負荷に対応するために、負荷に応じた最適な動力伝達ができるアクチュエータの開発も今後必要となろう。この問題の検討は、結果的にアクチュエータのコンパクト化にも役立つと考えられる。

4.3 柔軟性

R. Tomović らは、生体のアクチュエータすなわち関節を駆動する骨格筋が有する特徴は、それが4つの状態を取り得ることであると述べている²²⁾。この4状態とは、lock, increasing, decreasing, free を意味している。lock は一定位置で関節位置を保持する状態、increasing, decreasing は能動的に正方向、負方向に回転あるいは、並進運動をする状態、free は完全にフレキシブルで、外部からの拘束のなすがままに動かされる状態である。

Tomović らは、従来の産業用アクチュエータと生体アクチュエータの相違は、前者が free 状態を持たないのに対し、後者はそれが実現できることにありとし、この4状態を示すアクチュエータを特にサイバネティックアクチュエータと呼んだ。生体の筋は収縮と弛緩の2状態しかとれないが、1関節を1対以上の拮抗する筋で駆動しているために、各関節の駆動モードは前述の4つの状態をもつことができる。特に free 状態は、外部拘束に適応する運動、すなわちコンプライアント・モーションを実現する上で重要な役割をはたしている。

一方、また生体の関節の lock 状態は、その内容をさらに詳細に調べると、種々のコンプライアンスを持ち得ることがわかる。例えば我々が関節をある状態に保持する時、外力に対し rigid にその状態を保持することもできるし、またフレキシブルに保持することもできる。要

するに、生体の筋は、関節の位置、速度などの運動に関する物理量を操作し得ると同時に、自己のコンプライアンスをもそれらとは独立に調整し得る機能を持っている。そのコンプライアンスを調整することによって、駆動状態を関節の位置を保持したままで、lock, free の2状態間において自由に移行させることもできるわけである²³⁾。

これまでのアクチュエータはいわば単能であり、ニーズに応じて、例えば力制御のしやすさに注目したり、あるいは位置精度を高めるために、負荷無反応性に注目したりして設計がなされてきたが、今後のアクチュエータには、上述のサイバネティックアクチュエータの概念で指摘されるように、ある場合には剛性が高く、またある場合にはコンプライアントにというごとく、多モードの動作を切換えて使用できるようなものが望まれよう。

5. エネルギー源の課題と展望

ロボットを完全自立型とする時に、アクチュエータとともに考慮すべき問題は、いかにエネルギーを確保するかということである。商用電源からのエネルギーの供給を常に受けられる場合は別として、それとは独立に行動することが求められるロボット系では、できるだけエネルギー蓄積密度が高く、かつエネルギーの再充填が可能なエネルギー源を用意することが求められよう。

電気式で使用される一般的なエネルギー源は、周知のようにバッテリーである。再充電可能という点では2次電池を用いる必要があり、その種類としては鉛、銀・亜鉛、ニッケル・カドミウム、銀・カドミウム電池などがある。エネルギー密度はそれぞれ約 30, 100, 30, 50 Wh/kg であり、銀・亜鉛が最も大であるが、価格、寿命に難点があるため、通常は鉛あるいはニッケル・カドミウムが用いられることが多い。

油圧式のエネルギー源としては、自走形ロボットではバッテリーで電動機を駆動し、それによってポンプを回転させて油圧を発生させるという方式を採用することが多い。この種のシステムでは、ポンプの小型化は割合進んでおり、重量 (kg) 当り 0.3 W 程度の出力をもつものは試作されている。しかし通常それを駆動するモータが大きくなる傾向がある。この点は、現状ではエンジンなどの内然機関を、バッテリー・モータ系の代わりに用いることにより改善されると考えられるが、内然機関は屋内での使用などに適さない。その場合は、アキュムレータをエネルギー蓄積源としてポンプ系と併用することにより、システムの小形・軽量化をはかることが試みられている^{24), 25)}。

ガス圧方式のエネルギー源として用いられるものは、コンプレッサかポンプである。独立した携帯用動力源とす

る場合はポンペに限られる。一般に蓄圧する流体としては、炭酸ガス、チッ素が用いられる。現在のところ実用し得る程度のエネルギーを蓄積するには、ポンペの重量が大きくなりすぎるため、比較的エネルギー消費規模の小さい義肢への適用をのぞき²⁶⁾、エネルギー源としてのポンペの実用例は少ない。空圧エネルギー源の小型・軽量化は、ポンペの小形・軽量化に依存しており、ポンペの材質の設計が重要なポイントになろう。

いずれのエネルギー源を用いるにしても、自立形ロボットのエネルギー源のコンパクト化は、基本的には無駄のない駆動システムとの調和の上に成り立つものと考えられる。一層エネルギー蓄積密度の高いバッテリー等（例えば燃料電池、固体燃料エネルギー源、スーパーフライホイールなど）のエネルギー源の開発を指向するとともに、エネルギー回生機能を含む駆動方式の検討²⁷⁾や、種々の省エネルギー効果を有するロボットの構造体の設計など、それを支援する技術の確立も、エネルギー源のコンパクト化には不可欠である。

6. む す び

以上、ロボットのアクチュエータの開発現状について概説した。現状のアクチュエータは、種々研究が行なわれているけれども、基本的に実用されているものは、従来から使われている電気、空圧、油圧の3方式につきる。

しかしロボットの多機能化と、またロボットの一つの理想である、生体（特に人間）へのその機能の接近をはかるためには、新たなコンセプトにもとづくアクチュエータの出現が望まれる。

参 考 文 献

- 1) J. L. Nevins, et al., "Research on Advanced Assembly Automation", Computer, pp. 24-38, December, 1977
- 2) M. T. Mason, "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators", IEEE Trans. System, Man & Cybernetics, SMC-11-6, pp. 418-432, 1981
- 3) 沢田, "ハイモニックドライブの組込みに見るロボットの駆動制御機構について", Robot, 28, pp. 67-74, 1980
- 4) S. C. Jacobsen, et al., "The LADD Actuator as a Prosthetic Muscle", Advances in External Control of Human Extremities, pp. 191-198, 1975
- 5) D. S. Childress, "An Approach to Powered Grasp", Advances in External Control of Human Extremities, pp. 159-167, 1973
- 6) H. Asada, et al., "Design of Direct Drive Mechanical Arms", CMU-RI-TR-81-1, Carnegie-Mellon-University, 1981
- 7) 高瀬, "直接駆動及び低比率減速駆動方式を併用したトルク制御マニピュレータ ETA-II-モデルベースドマニピュレーションシステムの試作その3", 第22回 SICE 学術講演会予稿集, pp. 121-122, 1983
- 8) 谷江, 岩金, "ロボット用アクチュエータの動向", ドラ

- イブエレクトロニクス技術の進歩, pp. S. 8-21-S. 8-24, 電気学会全国大会シンポジウム [S. 8], 1984
- 9) 斎田ほか, "揺動型サーボアクチュエータの省力自動化への応用", 油圧化設計, 11-9, 1973
- 10) 釦持, "ロボットとデジタルアクチュエータ", Robot, 25, pp. 47-53, 1979
- 11) 加藤ほか, "電油式多自由度前腕義手—ワセダハンド 9H 3", バイオメカニズム 4 (東大出版会), pp. 139-146, 1978
- 12) Y. Maeda, et al., "A Hydraulically Powered Prosthetic Arm with Seven Degrees of Freedom (Prototype-I)", Bulletin of Mechanical Engineering Laboratory, 27, 1977
- 13) H. F. Schulte, Jr., "The Characteristics of the McKibben Artificial Muscle", The Application of External Power in Prosthetics and Orthotics, pp. 94-115, 1960
- 14) 松下, "ゴム人工筋製作法ノート", 計測と制御, 7-12, pp. 946-952, 1968
- 15) D. Bousso, "新しいサリドマイド児用義手", 続人間の手足の制御 (加藤監訳), pp. 247-267, 学献社, 1973
- 16) The Affordable Robot, International Robomation/Intelligence Report.
- 17) 本間ほか, "形状記憶効果を利用したデジタルアクチュエータ", 日本機械学会論文集 (C編), 49-448, 1983 (あるいは本特集号解説参照)
- 18) Y. Umetani, "Principle of a Piezo-electric Micro Manipulator with Tactile Sensibility", Proc. 8th ISIR, pp. 404-413, 1978
- 19) 長田, "メカノケミカル反応による伸縮機能高分子", 表面, 20-8, pp. 421-433, 1982
- 20) 藤井ほか, "骨格筋の構造とそのモデル", 計測と制御, 18-1, pp. 10-15, 1979
- 21) 高野, "ロボットの運動の高速化技術", 計測と制御, 21-12, pp. 1122-1128, 1982
- 22) R. Tomović, et al., "A Finite State Approach to the Synthesis of Bioengineering Control Systems", IE EE Trans. Human Factors in Electronics, HFE-7-2, pp. 65-69, 1966
- 23) N. Hogan, "Mechanical Impedance Control in Assistive Devices and Manipulators", pp. 361-371, Robot Motion (ed. by M. Brady et al.), The MIT Press, 1983
- 24) D. R. Broom, et al., "A Prototype Hydraulically Powered Arm Prosthesis", Proc. of 5th ETAN, 1973
- 25) 中野ほか, "自立作業ロボットの省エネルギー方策", バイオメカニズム 6, pp. 223-233, 東大出版会, 1982
- 26) 米田ほか, "ガス式アクチュエータ", 精密機械, 1974
- 27) R. D. McLeish et al., "Hydraulic Power from the Heel", Human Locomotion Engineering, pp. 126-132 IME, 1974

谷江和雄 (Kazuo TANIE)

昭和 21 年 11 月 6 日生れ。46 年 3 月早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年 4 月通産省工業技術院機械技術研究所入所。現在システム部バイオメカニクス課主任研究官。55 年 2 月工学博士。56 年 8 月から 1 年間 UCLA Biotechnology Laboratory 客員研究員。動力義手、電気刺激による情報伝達、ロボットのセンサなどの研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会、バイオメカニズム学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)