ロボット機構系の設計*

高 野 政 晴**

1. 序 論

産業用ロボットの生産は年間4万台を越えているのであるから¹⁾、各メーカーが、独自の方法でロボットの設計をしているには違いない。しかし果して誰れもが納得できるような合理的な設計をしているだろうか。というのは図1に見られるように、現在の産業用ロボットは可搬重量に対して本体重量が重すぎるという素朴な疑問が捨て切れないからである。人間の腕は強度が小さく柔い有機物で作られているにも拘らず自重の10%位のワークを扱うことができるのに、金属で作られているロボットが何故人間より能力が劣るのだろうか。人間には感覚と頭脳があるとか、又ロボットは軽ければよいというものではないとか、いろいろ理由があるだろうが、それにしてもロボットがあらゆる条件を考慮して設計されているとは思えない。

さてロボットに限らず一般に設計問題とは、設計パラ

メータがあり、その関数として拘束条件と評価関数が与えられ、拘束条件の範囲内で評価関数を最大に（または最小に）するパラメータの値を求めるということである。ロボットの場合その関数関係が極めて複雑であるかあるいは表現できないか、評価そのものもはっきりしないか、とにかく設計者の直観に頼らざるを得ないことが多い。直観は経験から生れる。ロボットが世に現れて以来寸法のバランスがあまり変化していないのもやむを得ないかも知れない。しかし将来生産工場だけでなくオフィス、家庭、病院、その他人間が生活の場としているいろいろな環境にロボットが入ってくることを考えると、ロボットは人間に恐怖心を与えない程度にスマートでなければならない。そのためにはロボットの設計の方法とその問題点を明らかにしておく必要がある。ここでは、ロボットの設計パラメータ、設計の評価関数と拘束条件などを明らかにし、いくつかの最適設計の研究例と筆者が考えている設計システムについて述べる。

2. 設計パラメータと評価関数

設計パラメータはロボットの基本機構と内部機構に分けることができ、それぞれ次の項目が考えられる。

基本機構

- 1) 自由度
- 2) 関節の種類（回転か直動か）
- 3) アーム長とオフセット（より一般的には隣り合う関節の位置関係）

内部機構

- 1) アーム太さなどの形状
- 2) モータの取付け位置（モータの直接配置か間接配置か）
- 3) 伝達機構（関節部の機構、チェーン、ワイヤ、同心軸、歯車など）
- 4) 減速機と減速比
- 5) モータの種類（電気、油圧、空圧）
- 6) 重力バランスの有無
- 7) ブレーキその他の付属部品
- 8) 軸、軸受などの機械要素

図1 産業用ロボットの自重と可搬重量の関係
(代表的な数社のメーカーのカタログによる)

原稿受付 1986 年 4 月 18 日

* Design of Robot Mechanical System

** 東京大学工学部

図 2 運動学的解析

基本機構は主としてロボットの運動学的の性質に関連しているのに対し、内部機構は主としてロボットの力学的の性質に関連している。一方ロボットの評価の対象として次のものが考えられる。

- 1) 作業のし易さ (a)
- 2) モータパワーの総和 (b)
- 3) アーム重量 (b)
- 4) ロボットの全重量 (b)
- 5) コスト (a, b)
- 6) 作業空間の広さ (a)
- 7) 可搬重量 (b)
- 8) 関節変位の上下限 (a)
- 9) エンドエフェクタの速度加速度の最大値 (a)
- 10) 静たわみ (b)
- 11) 固有振動数 (b)
- 12) 精度 (くり返し精度, 絶対精度) (a, b)

後につけた (a), (b) はそれぞれ運動学, 力学に関係することを示す。これらの評価対象は設計の際の拘束条

件にも評価関数にもなり得る。一般的には 6)~12) の項目はロボットの仕様として与えられるべきもの、すなわち設計の拘束条件であり、1)~5) は同じ性能を持つロボットがあった場合にそのよしあしを決める因子、すなわち評価関数となるべきものである。1) の作業のし易さとはあいまいな表現であるが、まだ確定的な尺度はない。提案されているものの一つに吉川が提案した「可操作度 (manipulability)」²⁾ あるいはアームの慣性も考慮した「動的可操作度」³⁾ がある。可操作度は関節駆動速度とアーム先端の移動速度の比に相当するもので、可操作度が大きいということは運動学的に先端速度を上げられることを意味する。作業空間全体で可操作度が大きくかつばらつきができるだけ小さいということが作業し易さの一つの尺度になり得る。これとやや異なる観点であるが Fenton ら⁴⁾ は数多くのワークのパスについて関節変位の総和が最も少くなるようなアーム長の最適設計を試みている。動かし易さの意味では可操作度は有力な尺度であるが、力作業の場合は力の伝達度の大きい方がよく、

表 1 設計パラメータと評価関数 (左欄)、拘束条件 (右欄) との関係の深さ
拘束条件はロボットの仕様に対応するが、評価関数と相互に代り得る。

設計 パラメータ	拘束または 評価関数	操作度	全 パワー	アーム 重量	全重量	コスト	作業 空間	可 搬 重量	最 大 速 度 加 速 度	関節変 位限界	撓 み	固 有 振 動 数	精 度
基 本 機 構	自 由 度	◎	○	○	○	◎	◎	△	△	△	○	○	○
	関 節 種 類	◎	○	○	○	◎	◎	△	△	○	○	○	○
	ア ー ム 長	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎	◎	△	◎	◎	◎
	オ フ セ ット	◎	△	△	△	△	◎	○	△	◎	△	△	△
内 部 機 構	モ ー タ 配 置	△	◎	◎	◎	△	△	◎	△	△	△	△	△
	伝 動 機 構	△	△	◎	◎	◎	△	△	△	◎	◎	◎	◎
	減 速 機	△	◎	◎	◎	◎	△	◎	◎	△	◎	◎	◎
	モ ー タ	△	◎	◎	◎	◎	△	◎	◎	△	△	△	△

◎深い関係 ○中程度 △薄い関係

図 3 力学的解析

その伝達度は可操作度の逆数になる。すなわち可操作度は小さい方がよく、目的によって評価が全く逆になる。

表 1 は設計パラメータと評価関数あるいは拘束条件との関連の深さを示している。この表から明らかなことは基本機構は運動学的評価（拘束）関数に、内部機構は力学的評価（拘束）関数に深い関係があるという事実である。このことは基本機構設計と内部機構設計をそれぞれ独立に行っても大きな間違いはないことを示唆している。

3. ロボットシミュレーション

設計パラメータを与えて前記の拘束条件と評価関数は運動学のおよび力学的演算をすることによって求めることができる。設計のために計算すべき事項は次の通りである。（記号については図 2, 3 参照）

運動学的計算（図 2）

- 1) 順運動学: $R=f(q)$
- 2) ヤコビアン行列: $J=\partial R/\partial q$
- 3) 速度・加速度解析: $\dot{R}=J\dot{q}$, $\ddot{R}=J\ddot{q}+D(q, \dot{q})$
- 4) 逆運動学: $q=f^{-1}(R)$, および
 $\dot{q}=J^{-1}\dot{R}$, $\ddot{q}=J^{-1}\{\ddot{R}-D(q, \dot{q})\}$
- 5) 関節変位速度加速度からモータの変位速度加速への変換 $\theta=N(q)$, $\dot{\theta}=\partial N/\partial q \cdot \dot{q}$,
 $\ddot{\theta}=\partial N/\partial q \cdot \ddot{q}+N_1(q, \dot{q})$

力学的計算（図 3）

- 1) 静力学: 自重・外力によるアーム・関節に加わる力とモーメント $P=P(q, P_{ex}, g)$
- 2) 動力学: 運動によって生ずる動的力・モーメント

によるアーム・関節に加わる力・モーメント

$$P=P(q, \dot{q}, \ddot{q}, P_{ex}, g)$$

- 3) モータ負荷: 関節駆動トルクとモータトルクの変換, モータパワー

$$T_m=(\partial N/\partial q)^{-1} \cdot T, \quad H_m=T \cdot \dot{q}$$

- 4) 撓み解析: $\delta=\delta(P)$

- 5) 振動解析: $M(q)\ddot{\delta}+K(q)\delta=0$,
 $|K(q)-M(q)\omega_i^2|=0, i=1, 2, \dots$

自由度が高い場合にはこれらの計算はどれも手ではできないものではない。まして全ての計算を行なうとなれば計算機に頼らざるを得ない。このように設計には上記の解析を行ない評価データを与えるロボットシミュレータが必要となる。ロボットシミュレータは世界各国で数多く開発されているが、設計の目的の汎用シミュレータはまだ少い。そのうちでも Liégeois⁵⁾, Warnecke⁶⁾, Vukobratovic⁷⁾ のシステムが目立つ。

4. 最適設計の試み

部分的にある設計パラメータを変えて一つの評価関数を最大（最小）にする研究がいくつか発表されている。Yang ら⁸⁾は作業空間を最適化する目的で正規化体積指数 NVI なるものを導入した。これは作業空間体積の全アーム長を半径とする球体積に対する比で、各アームの長さや関節変位の限界、マニピュレータの剛性などを拘束条件として NVI を最大にするアーム長比を heuristic に見出す手法を提案している。この試みによると人間の上腕と前腕の比は作業空間が広いという意味で最適であるとのことである。そのほか PUMA 600, Pana-Robo

についても最適アーム比を求めている。Vukobratovic ら⁹⁾はロボットの撓み、強度、モータパワーとトルクを拘束条件とし、ワークを搬送する作業でロボットの動力学的考慮をしながら作業時間を最小にするためのアームの太さとモータ減速比を求めている。ただしそれぞれ独立に最適化されており、結果として最適であるとは限らない。この著者らはほかにも消費パワーの最適化¹⁰⁾や、会話形式でモータ、減速比、アーム太さを決定するシステム¹¹⁾を開発している。

これらの設計例ではロボットの基本構造が決定され、駆動モータも取付け位置が決まっているものとしてアーム長、太さ、モータパワーなどの最適値を見出す問題を扱っている。基本機構と内部機構がどうあるべきかは、機構の選択が離散的（回転関節か直動関節か、歯車伝動かチェーン伝動かなど）で評価関数や拘束条件との関係を記述できないので、まだ部分的にも試みられた例はない。これから部分的な最適化の試みが研究されると思うが、その部分的最適設計が全体の設計の中でどのような意味を持っているかその位置づけと利用可能性を考慮しつつ設計パラメータと評価関数の関係を作り上げていく必要がある。

5. 設計システムの構想

ロボットの設計システムには、既にあらゆる機構が決まっていて単に寸法やモータの能力を変更するだけの設計と、機構の選択も含む総括的な設計とがある。前者は比較的簡単であり、たとえば SCARA 型組立用ロボットの仕様変更による諸元の変更の計算機援用設計（CAD と CAM を含めて）システムはロボットメーカーがそのつもりがあれば今すぐにでも開発できるであろう。この諸元変更の設計システムは総括的設計システムのところどころにちりばめられるのでここでは後者の総括的設計システムについて述べ、実現のため今後の問題点を併せて論ずる。

図 4 はロボットに要求する作業を入力して、目的に適う最適なロボットの機構・寸法・選択した部品を決定する手順を示している¹²⁾。

はじめにロボットの作業入力データ（ワーク重量、動作形態、時間、精度など）からロボットの仕様（第 2 章 7）および 9)～12) の拘束条件）を決める。この場合ロボットの融通性をメリットとする以上、入力した作業を特定な条件下で果すだけでは不十分であり、作業の性質を考慮して作業空間内のどこでも動作が可能であることが必要とされる。入力作業から作業空間や、ロボットのカatalog上には記載されていない撓みや固有振動数をどのように設定するかは今後の問題である。次のパート

の基本機構設計では運動学的考慮のもとに運動学的評価関数を最適にする機構（自由度、関節種類）の選択とアーム基本寸法の決定を行なう。前述のように運動学的評価は基本機構に、力学的評価は内部機構に深い関係があるので、各設計の段階でそれぞれの評価関数を最適にすることで全体が最適になるだろうという考えが背景にある。またこれによって部分的な最適設計の手法もこのシステムにそのまま応用できるというメリットもある。この基本機構設計でアーム長とオフセットは量的に評価関数に組込むことができるが、関節種類とその順番は現在

図 4 ロボットの一般的な設計手順

図 5 アーム・関節の諸元の backward recursive な概略計算

F_{ji+1} , M_{ji+1} : $n \sim (i+1)$ までのアーム関節の動的力モーメントの和の最大値・ F_{ji+1} , M_{ji+1} から許容撓み以下となる i アームの寸法・重量・慣性モーメントの概略値が計算され, i アームの動的力を更に加えて関節の寸法等の概略値が計算される。

のところ評価を与える適当な表現方法がない。ただしとり得る場合の数は有限であるから全てを試してみようという方法もある。ロボットの設計者は経験的にどの作業にはどのタイプのロボットがよいということを知っている。この経験を設計システムのデータとして蓄えておくのも一つの方法である。

ロボットの基本機構と関節変位の限界から作業空間を求める一般的方法が数多く研究されている¹³⁾。一般的なロボットの作業空間の輪郭とその体積を求める計算は時間がかかるが、ロボットのタイプが与えられれば人が見てどうすれば早く計算できるかは一目瞭然である。この求め方を人に頼ることも一つの方法であろう。作業し易さの尺度として可操作度の評価を作業空間全域でも大変に時間がかかる。自由度、関節種類、アーム長のパラメータを変えて最適化を図ることは不可能に近い。もっと簡易的な評価方法が望まれる。

次は力学的考慮のもとに力学的評価関数を最適にする内部機構の選択と詳細寸法を決定するパートである。この評価関数はいくつかあるが、一般的に言えばそれらの線形和として全体の評価関数を作り、各々の重みは作業の性質から決めるべきである。この設計においても内部機構（モータをどこにおくか、どの伝達機構を使うか）の選択の決め手はない。定性的には次のことが言える。モータを駆動すべき関節部からベースに近い方へ持っていけば、アーム・関節の負担が小さくなり軽量化が可能になるとともにモータパワーも小さくてすむが、その代り、伝達機構が必要になり、ロボットの剛性が小さくなる。また自由度が大きいとベース近くのモータまで多くの関節を通り抜ければならず、機構が複雑になり、歯車などを使用するとかえって重量が増す。

さて、力学的考慮のもとに内部機構をきめて具体的な寸法を決定する手順を、概略設計と詳細設計に分けると

図 6 かさ歯車のトルクと重量の関係

図 7 DC サーボモータのパワーと重量の関係

便利である。概略設計では図 5 のように運動から計算されるアーム関節に加わる力・トルクの最大値に対し、撓みを各アーム関節毎に許容値以下になるように太さ・大きさを計算する。この諸元からアーム関節の概略重量が決まる。また伝達機構に加わる力・トルクもわかるのでその機構の大きさと重量が決まる。伝達機構の許容値と重量の関係は製品データから例えば図 6 のように与えられる。関節の駆動力（トルク）と速度の積の最大値からモータのパワーが決まりモータの重量も図 7 の製品データの関係から決まる。

先端のアーム関節からベースへと順にこの計算をし評価関数のアーム重量、ベースも含む全重量、全モータパワーが求まる。この概略設計の段階で評価関数（の線形和）の最適化を試みる。

詳細設計では、力学的計算からアーム関節の具体的な寸法を決め、機構部品やモータ、減速機と減速比を選択する。減速比は機械インピーダンスマッチング¹⁴⁾、位置

決め精度、分解能から決める。改めて撓み解析、振動解析、精度解析を行ない、要求仕様を満足しているかどうか調べる。この計算において問題なのは伝達機構と機械要素の剛性が明らかでないことである。たとえば歯車のかみ合い剛性¹⁵⁾、軸受の剛性¹⁶⁾などのデータが一部あるが、あらゆる種類のものについて信頼できる剛性のデータはまだない。

力学的な評価関数はロボットの重量、モータパワー、あるいはその線形和であり、概略設計で最適化を試みておけば詳細設計でも大幅に変更することはない筈である。図8は我々の研究室で開発中の汎用ロボット設計シス

図8 5自由度RPPPR多関節ロボットのモータ間接配置の設計例(TO-CARDによる)

図9 モータ直接配置(a)と間接配置(b)の重量・パワーの概略見積り
図中の数字は各部の重量(kg)を示す。

テム“TO-CARD”を利用し、会話形式により5自由度のRPPPR多関節ロボットの内部機構設計を行なったその出力を示す。図9はロボット全重量を評価関数とし、モータを直接配置した場合と間接配置した場合の出力例、図10はある軌道について動力学計算し、詳細設計をくり返したときの結果の収束性を示す。ただしここでは固有振動数の計算は行なっていない。

これらの設計においてオペレータの経験が多く関与している。結果の妥当性もオペレータの判断による。このようにロボットの設計のために単に計算の手間を省いてくれる以上の能力を計算機に要求するのはまだ当分無理のようである。

6. 結 論

ロボットマニピュレータを設計するその設計パラメータと拘束条件、評価関数を明らかにし、それらの間の関係深さについて述べた。しかし設計パラメータの全てについて量的な関係を求めることは難しく、将来CADシステムを開発するにしても専門家の知識を大幅に利用するものにならざるを得ないであろう。現在研究対象がロボットの基本機構に関するものが多いが、同じ性能を持

図10 詳細設計を任意の初期設計からくり返したときの設計解の収束の様子

つロボットの良否は内部機構設計で決まることを銘記しておくべきである。最適設計の試みもかなりされているが現在はまだ研究のための研究の域を脱していない。動力学演算や撓み計算はやむを得ないとしても作業し易さや固有振動数の尺度をもっと簡単なものに置換えられれば CAD システムが実用化されるであろう。我々のシステム TO-CARD ではオペレータが評価する方向で開発を進めている。

CAD システムはもちろんここで述べた方法が唯一無二ではない。別の考え方の総括的ロボット設計システムが特にメーカーサイドから提案されることを望みたい。

参 考 文 献

- 1) JIRA : 産業用ロボット企業実態調査報告, ロボット, 48, pp. 20-23, 1985
- 2) Tsuneo Yoshikawa : Manipulability of robotic mechanisms, Proc. 2nd ISRR, pp. 439-446, 1984
- 3) 吉川恒夫 : ロボットの機構の動的可操作性, 日本ロボット学会第2回學術講演会予稿集, pp. 199-200, 1984
- 4) R. G. Fenton and J. Lipitkas : Optimum design of manipulators, Comp.-Aided Eng. and Robotics, pp. 68-73, 1984
- 5) A. Liégeois 他 : A system for computer-aided design of robots and manipulators, Proc. 10th ISIR, pp. 441-452, 1980
- 6) H.-J. Warnecke and M.-C. Wanner : Entwicklung und Anwendung rechnergestützte Konstruktionshilfen zur Auslegung von Roboterstrukturen, Robotersysteme, 1, pp. 75-82, 1985
- 7) M. Vukobratovic 他 : General software for manipulation robots, special issue from Mihailo Pupin Institute, 1982
- 8) D. C. H. Yang & T. W. Lee : Heuristic combinational optimization in the design of manipulator workspace, IEEE SMC-14, 4, pp. 571-80, 1984
- 9) V. Potkonjak & M. Vukobratovic : Computer-aided design of manipulation robots via multi-parameter optimization, Mechanism and Machine Theory, 18, 6, pp. 431-438, 1983
- 10) M. Vukobratovic 他 : Computer-aided choice of electro hydraulic actuators for manipulation robots, Proc. 14th ISIR, pp. 711-721, 1984
- 11) V. Potkonjak 他 : Interactive procedure for computer-aided design of industrial robots mechanisms, Proc. 13th ISIR, pp. 16-85-94, 1983
- 12) M. Takano 他 : Concept of total computer-aided design system of robot manipulators, Proc. 3rd ISRR, pp. 142-149, 1985
- 13) たとえば M. Cwiakala & T. W. Lee : Generation and evaluation of a manipulator workspace based on optimum path search, Paper ASME[84-DET-185], pp. 1122-1-11, 1984
- 14) 高野政晴 : ロボットの運動の高速化技術, 計測と制御, 21, 12, pp. 1122-1128, 1983
- 15) 梅沢清彦 : 歯車の振動とその制御, 日本機械学会誌, 88, 805, pp. 1377-1382, 1985
- 16) 上野喬史 : ロボット用軸受, 設計製図 20, 120, pp. 204-209, 1985

高野政晴 (Masaharu TAKANO)

昭和11年11月生れ。35年東京大学工学部精密工学科卒業。工学博士。38年同学科助手を経て55年より同教授、現在に到る。この間、機械振動、騒音、機構の動力学、ロボットの運動と制御の研究に従事。61年精密工学会沼田記念賞受賞。精密工学会、日本機械学会などの会員。