動作性能・動作コストを考慮した 産業用ロボットの作業別最適設計*

吉村 允孝^{*1}, 金丸 豊樹^{*2}

Design Optimization of Industrial Robots Based on Job Categorization Considering Operational Performance and Operation Cost

Masataka YOSHIMURA and Toyoki KANEMARU

This paper proposes procedures for obtaining the optimum designs of industrial robots which are most suitable for specifically assigned jobs based on working environment information. Operational accuracy, operational efficiency and operation cost which are the fundamental evaluative characteristics of industrial robots are first analyzed. The relationships among these three evaluative characteristics are clarified using a multiobjective optimization strategy. Then, the operations of industrial robots are categorized according to the required operational accuracy and efficiency levels. Next, the procedures are provided for obtaining the optimum designs of the robots which are most suitable for the particular jobs.

Key Words: Optimum Design, Industrial Robots, Production System, Design Engineering, Vibration Control, Multiobjective Optimization, Operational Performance, Concurrent Engineering

1. 緒 言

産業用ロボットは、一般には、種々の広範囲の作業に用いられると考えられている。しかし、実際の製造現場では、各ロボットはある特定の作業に用いられる。そのような状況では、産業用ロボットの設計には、ある限られた範囲での柔軟性が要求されるのであり、できるだけ広い範囲の作業に適用が可能であることが要求されているわけではない。

このような状況のもとでは、産業用ロボットに対して要求される性能は、目的とする作業に応じて異なる。よって、産業用ロボットの最適設計を得るためには、目的の作業に対応した個別の最適設計法を構築すべきである。

そのような実際の状況に適用しうる機械製品の最適な設計を得るためには、製品の性能、機能に関する種々の評価特性の統合的な解析が必要である。通常の機械製品の設計においては、まず構造設計が構造特性の評価により行われ、その後で、制御システムの設計

が機能的要求を実現するように行われる。その結果として、設計仕様で要求される製品性能の達成が図られる。

最適設計として、より高い製品性能を得るためには、構造設計と制御設計の同時的または協調的な意思決定が有効である。これまでに、構造設計と制御設計の同時的最適化に関する種々の研究が行われている^{(1)~(4)}が、これらの多くは、最適制御理論に基づく方法を弾性構造物の制振制御に適用したものである。この方法では、構造設計に関係する要因と制御設計に関係する要因の相互の競合関係などを直接的に評価しているとはいえないことがあり、得られた最適解の物理的な意味があいまいなことがある。

本研究では、産業用ロボットの製品性能として、静的精度、動作精度、作業能率を構造の振動特性と駆動系でのフィードバック制御による動的特性を考慮して評価する。そして、制御の困難さを評価するために、制御駆動系での動作エネルギーを動作コストとして評価する。これらの評価特性の同時的な最適化を行うには、最適化に先立ち、まずそれらの特性間の関係を十分に吟味することが必要であるという考えにたち、評価特性間の関係を多目的最適化手法を用いて明らかにする。そして、それらの関係の評価に基づき、最適設計問

* 平成5年6月17日 第3回設計工学・システム部門講演会において講演、原稿受付 平成5年8月3日。

^{*1} 正員、京都大学工学部 (〒606 京都市左京区吉田本町)。

^{*2} 京都大学大学院。

題としての定式化を行う。次に、産業用ロボットの作業を、要求される動作精度と作業能率のレベルに応じて分類する。そしてこの分類に従い、目的の作業に最適なロボットを設計する手順を構築する。

2. 産業用ロボットに要求される性能とその評価基準

2.1 産業用ロボットに要求される性能 産業用ロボットを設計するにあたって考慮しなければならない性能として、(1)静たわみ量(静的精度)、(2)動作精度、(3)作業能率、(4)可搬重量、などがあげられる。このうち、静たわみ量や可搬重量など、静的なモデルを用いて解析を行えるものについては従来から設計の際に考慮されてきた。しかし、構成要素の弾性振動やそれが作業能率に及ぼす影響は、動的なモデルを用いてはじめて解析することができる。

また、制御のしにくいロボットアームは、所定動作を行うときに駆動関節で発生するトルクの総和が大きいと考えるため、関節アクチュエータの電力消費量はアームの制御のしにくさを評価する基準として近似的に用いることができる。本研究では、所定動作を行う際の動作精度・作業能率・可搬重量とアクチュエータの電力消費量との間の関係を調べることによって、構造設計が制御系に与える影響を明らかにする。

本研究で扱う対象を図1に示す。これらは、単純はりアームとする一つのアームと一つの関節駆動系をもつ1アーム1関節ロボットと、二つのアームと二つの関節駆動系をもつ2アーム2関節ロボットであり、アーム先端には集中荷重 M_h が付いている。アームの

断面は、簡単のために、図1中に示すように正方形とする。本研究における設計の方法論は、基本的にはアームの数に依存しないので、ロボットアームの数を n とし、アームと駆動関節に対してベース側から番号付けを行う。そして、アーム i ($i=1, 2, \dots, n$) の長さ L_i は一定とし、アーム i の断面の一辺の長さ d_i を設計変数とする。

アームの総質量 M_a 、アーム i の断面二次モーメント I_i は次のように表される。

$$M_a = \sum_{i=1}^n \rho d_i^2 L_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$I_i = \frac{1}{12} d_i^4 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ρ は材料密度、 L_i はアーム i の長さを表す。

2.2 動作コストの定義とその評価基準 ロボットの高性能化が進むにつれて、その駆動制御法も開ループ制御からフィードバック制御、フィードフォワード制御へと発達してきた。現在でも、最適制御理論やバンバン制御、 H^∞ 制御などさまざまな方法が研究されているが、本研究では、ロボットの駆動制御に広く用いられている PD 形のサーボループによる位置・速度フィードバックを用いた PTP 制御を考える。

この制御法ではフィードバックゲインのとり方によってアームの動作特性も大きく変化するが、本研究では構造設計の最適化を中心に考え、制御系の安定性を損なわず、アクチュエータの性能限界を超えない範囲で適当なフィードバックゲイン値をあらかじめ決定しておき、最適化は行わない。またアクチュエータに関する諸定数が制御系に与える影響は無視して、制御入力 E_{ni} についての制御則を次のように単純化する。

$$E_{ni} = -k_{pi}(\theta_i(t) - \theta_{di}) - k_{vi}\dot{\theta}_i(t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 k_{pi} 、 k_{vi} はそれぞれ位置、速度フィードバックゲイン、 $\theta_i(t)$ 、 $\dot{\theta}_i(t)$ はそれぞれ関節角度、角速度、

図1 対象とするロボットのモデル

そして θ_{di} は目標角度を表す。

本研究では、式(3)と2・3節で考える制御入力 E_{ni} と角加速度 $\ddot{\theta}_i$ との関係をもとに、アームの駆動制御入力に対する関節角の応答をシミュレーションする。

また、駆動関節 i のアクチュエータ(サーボモータ)に流れる電流 $I_{Mi}(t)$ と発生するトルク $\tau_i(t)$ および印加電圧 $E_{Mi}(t)$ の関係は、インダクタンスを無視すると、次のように表される。

$$\tau_i(t) = K_{Ti} I_{Mi}(t) \quad \cdots \cdots (4)$$

$$E_{Mi}(t) = R_{Mi} I_{Mi}(t) + K_{ei} \dot{\theta}_i(t) \quad \cdots \cdots (5)$$

ここで、 K_{Ti} 、 K_{ei} 、 R_{Mi} はそれぞれアクチュエータのトルク定数、逆起電力定数、電機子抵抗である。これらの式から、関節アクチュエータ i の消費電力 P_i は次のように導かれる。

$$P_i = \int E_{Mi}(t) I_{Mi}(t) dt \\ = \int \left\{ \frac{R_{Mi}}{K_{Ti}^2} \tau_i(t)^2 + \frac{K_{ei}}{K_{Ti}} \tau_i(t) \dot{\theta}_i(t) \right\} dt \quad \cdots \cdots (6)$$

ただし、第2項は第1項に比べて小さいので、 P_i は τ_i^2 の時間積分値に比例すると考えられる。そこで本研究では、制御入力 $\tau_i(t)$ の2乗値を時間積分したものが関節アクチュエータ i の電力消費量に比例するものとして、これを制御エネルギーを含んだ関節の動作コストと考え、次式で与えられる P をアームの制御のしにくさの評価基準とする。

$$P = \sum_{i=1}^n \int_0^{t_c} E_{ni}(t)^2 dt \quad \cdots \cdots (7)$$

2・3 動作精度および作業能率の定義とその評価基準 産業用ロボットの精度といってもさまざまなものがあるが、これらは、(1)アームの静たわみなどの静的な要因による位置決め精度と、(2)アームや関節の振動などの動的な要因による動作精度に大きく分けられる。このうち動的なものについては、目的とする作業によって関節運動中の振動が問題になる場合、関節運動終了後の残留振動のみが問題になる場合などさまざまである。このうち運動中の振動が多少大きくても問題にはならないような場合には、高速位置決めと残留振動を小さくするような関節駆動が望まれる。本研究では関節動作終了後の残留振動を小さくすること

による動作精度の向上を考え、次のような方法によって動作精度を評価する。

まず、アームおよびアーム先端集中質量(先端荷重)に加わる力としては、これらの物体にかかる重力、2・2節で求めた関節アクチュエータからの制御入力による関節を中心とするアームの回転慣性力を考える。このアームに発生する慣性力は、図2に示すように、駆動関節 i から $2/3L_i$ の位置にアームに垂直に加わる集中荷重 F_{ai} で置き換える。また集中質量(先端荷重)に加わる慣性力を F_b とする。1自由度アームの場合、 F_{ai} 、 F_b は次のように表される。

$$F_{ai} = \frac{1}{2} M_a L_i \ddot{\theta}_i \quad \cdots \cdots (8)$$

$$F_b = M_b L_i \ddot{\theta}_i \quad \cdots \cdots (9)$$

本研究で扱っているアームのような細長い片持ちはり状の構造物で先端の振動変位を問題とする場合、一次固有モードのモーダルフレキシビリティ(等価剛性の逆数)の大きさが二次以上のモーダルフレキシビリティよりもはるかに大きい。このことより、慣性力によるアームの弾性振動を一次固有モードでの振動の重ね合わせとしてモデル化し、アーム先端の振動変位を求める。

そこで、アームを、先端に集中質量がついている片持ちはりとしてモデル化し、集中荷重 F_{ai} をかけたときのアーム先端の Y 軸方向の振動変位を構造解析より求め、それより固有振動数 ω_{ai} 、モーダルフレキシビリティ f_{ai} を得る。これらより、1自由度系振動モデルの等価質量 m_{ai} 、等価粘性減衰係数 c_{ai} 、等価ばね剛性 k_{ai} を次のように求めることができる。

$$m_{ai} = \frac{1}{\omega_{ai}^2 f_{ai}} \quad \cdots \cdots (10)$$

$$c_{ai} = \frac{2\zeta_a}{\omega_{ai} f_{ai}} \quad \cdots \cdots (11)$$

$$k_{ai} = \frac{1}{f_{ai}} \quad \cdots \cdots (12)$$

このときの運動方程式は、アーム先端の Y 軸方向の変位を y_{ai} として、次のように表される。

$$m_{ai} \ddot{y}_{ai} + c_{ai} \dot{y}_{ai} + k_{ai} y_{ai} = F_{ai} \quad \cdots \cdots (13)$$

同様に、 F_b が加わった場合の振動変位 y_b に関するはりの運動方程式を定めた後、これらについて線形加速度法を用いて振動応答をシミュレーションする。そして、これらの振動変位を重ね合わせた

$$y = \sum_{i=1}^n y_{ai} + y_b \quad \cdots \cdots (14)$$

を、回転慣性力によるアーム先端の弾性振動による Y 軸方向の変位とする。そして、これをもとに動作精度 y_d を、後で述べるようにして評価する。

図2 ロボットアームの弾性振動解析モデル
(1アーム1関節ロボットの場合)

アーム先端の集中質量 M_h による静たわみ量 y_s は、1 アーム 1 関節ロボットの場合、静コンプライアンス(静剛性の逆数)を f_s として、

$$y_s = f_s M_h g \sin \theta \quad \dots\dots\dots (15)$$

となるが、静的変位は、あらかじめ補正を加えるなど動作精度に影響を与えないようにすることができるため、これは設計の際に制約条件として与えて構造の最適化に反映させるものとし、アームの動作シミュレーションの中では考慮しない。

関節に加えるトルク τ とアームの運動角加速度 $\ddot{\theta}$ の関係はニュートン・オイラー法によって次のように求められる⁽⁵⁾。例えば 1 アーム 1 関節ロボットの場合には、次のようになる。

$$\tau = \left\{ \frac{1}{3}(M_a + 3M_h)L^2 + \frac{1}{4}(M_a + M_h)L^2 \right\} \ddot{\theta} = \frac{1}{12}(7M_a + 15M_h)L^2 \ddot{\theta} \quad \dots\dots\dots (16)$$

このトルク τ は、式(3)の制御入力 E_{ni} と同一のものである。したがってこれらの式から時刻 t における関節角 $\theta_i(t)$ をシミュレーションによって求めることができる。

また、図3のように全体座標系でのアーム先端の座標を (X_h, Y_h) 、目標位置の座標を (X_d, Y_d) とすると、アーム先端の Y 軸方向の変位 u は、動作終了時刻付近では関節角の目標値との誤差 $(\theta_i - \theta_{di})$ が微小であることから、関節角 θ_i とはりの弾性振動による Y 軸方向の変位 y を用いて、

$$u = \sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^n L_i (\sin \theta_i - \sin \theta_{di}) \right\}^2 + \left\{ y + \sum_{i=1}^n L_i (\cos \theta_i - \cos \theta_{di}) \right\}^2} \quad \dots\dots\dots (17)$$

と近似する。

本研究では、ロボットアームの断面形状を設計変数として、アーム駆動入力に対するアーム先端の変位 u の軌跡を求める。そして、目的作業によって次のように動作時間 t_c と動作精度 y_d を定義し、これらを作業能率および動作精度の評価基準とする。

(1) 動作精度制約、動作時間最小化の場合

図4に示すように、ロボットアーム先端の変位 u が動作精度制約値 y_d 以内に収束した時刻を、動作終了時刻(動作時間) t_c とする。

(2) 動作時間制約、動作精度最小化の場合

図5に示すように、動作時間制約で与えられた運動終了予定時刻 t_c 以降での目標位置からの最大変位量 u を、動作精度 y_d とする。

図3 アーム先端の変位量の定義
(1 アーム 1 関節ロボットの場合)

3. 評価特性の関係

本研究の具体的な適用例では、先に述べたように、アームの正方形断面の一辺の長さ $d_i (i=1, 2, \dots, n)$ が設計変数である。設計変数 d_i とともに変化する値としては、アーム重量、断面二次モーメント、モータ軸換算での慣性モーメントがあげられるが、式(1)、(2)からわかるように、断面積が増加するにつれてアーム重量 M_a 、断面二次モーメント I_i はともに大きくなり、アームの剛性を増すことにつながる。

式(3)からわかるように、位置・速度フィードバック駆動系では、運動開始時にモータに加わるトルクは

図4 動作精度制約が与えられているときの動作時間の定義

図5 動作時間制約が与えられているときの動作精度の定義

負荷の大小にかかわらず一定である。また、式(16)の右辺は、アーム長さや等価質量より得られる慣性モーメントに相当する量を含んでおり、アームの慣性モーメントが大きくなると、制御命令に対する応答性が悪化することがわかる。

ここではまず、設計変数を代表するものとしてロボットアームの断面積を取り上げ、ロボットの性能を支配する種々の評価特性との関係を吟味する。次に、それらの評価特性間の関係を明らかにする。これは、第4章での最適化問題の構築の基礎となるものである。

3・1 アーム断面積の変化と動作精度・動作時間の関係
アーム断面積の増加とともにモータ軸を中心としたアームの慣性モーメントが大きくなり、制御系の振動が大きくなるために制御系の整定時間は長くなる。このとき、アームの剛性は高まるが、制御系のトルク変動が激しくなることによってアームに加わる慣性力の変化も大きくなり、弾性振動の整定時間は必ずしも短くなるとはいえない。したがって、断面積の増加が動作精度の向上につながるとは限らない。しかし、図4、5を見てもわかるように、行き過ぎ量が動作精度制約値を超えなければ、慣性モーメントが大きいほうが目標位置への到達時間が早く、動作時間も短くなる。つまり、行き過ぎ量が振動振幅制約値と等しくなるときに動作時間は最小となることがわかる。

3・2 アーム断面積の変化と動作エネルギーの関係
アクチュエータが発生するアーム駆動エネルギーは、できるだけ小さいことが望ましい。このエネルギーが少なく済むような構造系は制振制御もしやすく、その制御性能を十分に発揮できると考えられる。また、それによって製品コストや運転コストを低減さ

せることも期待できる。しかし本研究で考えるようなフィードバック系においては、純粋な仕事エネルギーのほかに、制御入力によって発生する振動を抑制するためのエネルギーが必要となり、動作エネルギーは必ずしも物体の質量に比例しない。慣性モーメントが小さくかつ剛性の高い構造設計が、制御のしやすさといった点からも望ましい。

3・3 動作時間・動作精度と動作エネルギーの関係

作業能率あるいは動作精度が動作コストとどのような関係をもっているかの計算結果を、図6～8に示す。

1アーム1関節ロボットの場合、設計変数の数は一つであり、図6、7における関係曲線は、設計変数であるアーム断面幅の大きさと対応している。すなわち、

図7 1アーム1関節ロボットでの動作精度と動作コストの関係 (動作時間を制約とする場合)

図6 1アーム1関節ロボットでの動作時間と動作コストの関係 (動作精度を制約とする場合)

図8 2アーム2関節ロボットでの動作時間と動作コストの関係 (動作精度を制約とする場合)

アーム断面幅を大きくすると動作時間(あるいは動作精度)と動作コストの関係を示す点は図6, 7中の実線を矢印の方向に移動する。図6を見てわかるように、動作精度を制約とした場合、関係曲線は所々で急激に変化している。アーム断面幅の大きさが比較的小さく、行き過ぎ量が動作精度制約値より小さいときには、ロボットアーム先端の変位量が最初に動作精度制約範囲内に入った時刻を動作終了時刻とみなせる。断面幅の値が大きくなって慣性モーメントが大きくなると、行き過ぎ量が動作精度制約値を超えるために、振動振幅が動作精度制約値以内に収束する点(図4, A点)を動作終了時刻としなければならないためである。

図6の関係曲線の点Aから点Bまでは、動作時間の短縮と動作コストの低減の要求には競合関係があることを示している。同様に図7の関係曲線の点Aから点Bまでは動作精度の向上と動作コストの低減の要求には競合関係があることを示している。すなわち、図6, 図7の点Aから点Bまでの特性間の関係は、それぞれ、動作時間の最小化と動作コストの最小化および動作精度の最良化と動作コストの最小化のパレート最適解集合に相当する。

図6と図7において、関係曲線の不連続点B点より右では、アーム断面幅を大きくしても動作時間・動作コストともに大きくなってしまう。つまり、この範囲は、動作時間と動作コスト、または動作精度と動作コストの総合的な面から、最適解として採用されることがない領域に相当する。

2アーム2関節ロボットの場合についても、1アーム1関節ロボットの場合と同様のことがいえる。この場合の設計変数は、二つのアームのそれぞれの断面幅であり、それらを $d_i (i=1, 2)$ と表す。図8には、動作コストを制約としたうえで動作時間を最小化する設計解を求めることによって得られた最適解の、動作時間と動作コストの関係を示している。点Aから点Bまでは、動作時間と動作コストの競合関係を示しており、動作時間の最小化と動作コストの最小化の2目的最適化問題のパレート最適解に相当する。

以上のように、製品の性能を支配する主要な特性が競合関係をもつような設計の意思決定では、それらの特性を同時に同一のレベルで評価する多目的最適設計問題として定式化する方法が有効である。

4. 産業用ロボットの作業別最適設計

4.1 目的作業別の最適設計問題の設定 産業用ロボットはある特定の作業を効率よく行うために利用される場合が多く、この場合にははん用性を高めるよ

りも、その作業を行う際に重要視される性能を高めることが、そのロボットの高性能化であるといえる。

高速な運動が要求されるロボットでは、角加速度が大きな値になるために角加速度の変化に対する運動時間の変化が小さく、作業能率の最大化を行っても動作時間の面ではほとんど効果があらわれない。また、最適設計を行う際に最重視する性能についてあらかじめ希求水準(あるいは目標値)が設定されていることも多く、これを達成した上でそのほかの性能を最大限に向上させることによって、製品がもたらす利益を大きくすることができる。

本研究では、産業用ロボットを、精密作業用など動作精度の高性能化が求められるものと、搬送用・こん包作業用など動作速度の高速化(高い作業能率)が求められるものの2種類にまず大きく分類する。

そこで、目的作業別の性能要求基準を定め、最も重要な性能は制約条件として必ず希求水準を達成するものとし、そのほかの性能をあらわす特性のうち、その改良が利益をもたらすものは目的関数に含めて、多目的関数として最適化することによって産業用ロボットの作業別最適設計を行う。

本研究では、設計変数としてアーム断面形状寸法を取り上げているが、目的関数・制約条件は目的とする作業によって次のように設定する。

(1) 精度を重視する作業

動作精度、静的精度は、ある設定された値が必ず達成されなければならないとして、最適化問題の制約とする。動作時間は、それが短縮されることによって作業時間の短縮などで利益を生み出すものであり、目的関数に含める。また、動作コストも、減少することにより、駆動系・制御系の簡素化、動力費の低減などにより利益を生み出すものである。目的関数の中に含める。

動作精度 y_d 、静的精度 y_s を制約とし、動作時間 t_c の最小化と動作コスト P の最小化の多目的最適化問題として、以下のように定式化される。

$$\left. \begin{array}{l} \text{目的関数: } \phi_1(t_c, P) \rightarrow \text{最小化} \\ \text{制約条件: } y_d \leq y_d^u \\ y_s \leq y_s^u \\ M_h = M_{h1} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

(2) 作業能率を重視する作業

動作時間は、生産システマ的な見地から、ある設定された値は必ず達成されなければならないとして、最適化問題の制約とする。動作精度は、その精度の向上により、制御機構の簡素化などで利益を生み出すものであり、目的関数に含める。また、動作コストは(1)の

精度を重視する場合と同様に、その減少が利益を生み出すものであり、目的関数に含める。

動作時間 t_c を制約とし、動作精度 y_d の最小化と動作コスト P の最小化の多目的最適化問題として、以下のように定式化する。

$$\left. \begin{array}{l} \text{目的関数: } \phi_2(y_d, P) \rightarrow \text{最小化} \\ \text{制約条件: } t_c \leq t_c^u \\ y_s \leq y_s^u \\ M_h = M_{h2} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

以下、上記の分類をさらに具体的な作業のタイプに従って分類し、最適化問題を定式化する。ここで、制約条件における具体的な数値は、第5章の適用例を求める際に用いるものを示している。

タイプ① 動作精度よりも高速な運動に対する要求が大きい作業(例、こん包作業、塗装作業)

$$\left. \begin{array}{l} \text{目的関数: } \phi_1(y_d, P) \rightarrow \text{最小化} \\ \text{制約条件: } t_c \leq 0.7(\text{s}) \\ y_s \leq 0.5(\text{mm}) \\ M_h = 5.0(\text{kg}) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

タイプ② 重量物の高速な運搬に対する要求が大きい作業(例、重量物の搬送)

$$\left. \begin{array}{l} \text{目的関数: } \phi_1(y_d, P) \rightarrow \text{最小化} \\ \text{制約条件: } t_c \leq 0.8(\text{s}) \\ y_s \leq 0.5(\text{mm}) \\ M_h = 30.0(\text{kg}) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

タイプ③ 運動速度よりも動作精度に対する要求が大きい作業(例、溶接作業)

$$\left. \begin{array}{l} \text{目的関数: } \phi_2(t_c, P) \rightarrow \text{最小化} \\ \text{制約条件: } y_d \leq 0.5(\text{mm}) \\ y_s \leq 0.07(\text{mm}) \\ M_h = 5.0(\text{kg}) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

タイプ④ 極めて正確な動的、静的精度が要求される作業(例、精密部品の組立て作業)

$$\left. \begin{array}{l} \text{目的関数: } \phi_2(t_c, P) \rightarrow \text{最小化} \\ \text{制約条件: } y_d \leq 0.1(\text{mm}) \\ y_s \leq 0.03(\text{mm}) \\ M_h = 5.0(\text{kg}) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (23)$$

4.2 多目的最適化問題の解法 4.1 節で設定した最適設計問題は、目的関数が“動作時間の最小化と動作コストの最小化”または“動作精度の最良化と動作コストの最小化”で構成される2目的最適化の問題である。このような多目的最適化問題の解法として種々の方法があるが、ここでは、最大成分最小化問題⁽⁶⁾として解く。

最大成分最小化問題は、各目的関数を $g_j(d)$ ($j=1, 2$), ω_j を $g_j(d)$ に対する重み係数とすると、最適解 $d^* (= \{d_1^*, d_2^*, \dots, d_n^*\}^T)$ は次のように表される。ここで、各 $g_j(d)$ は、代表的な設計変数において得られる目的関数の値で正規化したものである。 D は、設計

表1 適用例で用いたパラメータ

Parameters	One-arm, one-joint robot	Two-arms, two-joints robot
Arm material	Aluminum	
Mass density	$2.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	
Young's modulus	$7.1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$	
Poisson's ratio	0.33	
Length of arm 1	500mm	500mm
Length of arm 2	—	400mm
Starting positional angle of arm 1	15°	15°
Ending positional angle of arm 1	60°	60°
Starting positional angle of arm 2	—	15°
Ending positional angle of arm 2	—	60°
Position feedback gain of joint 1 (Nm/rad)	100 (Type1, 3, 4) 500 (Type2)	400 (Type1, 3, 4) 900 (Type2)
Velocity feedback gain of joint 1 (Nm·s/rad)	25 (Type1, 3, 4) 120 (Type2)	100 (Type1, 3, 4) 300 (Type2)
Position feedback gain of joint 2 (Nm/rad)	—	200 (Type1, 3, 4) 600 (Type2)
Velocity feedback gain of joint 2 (Nm·s/rad)	—	50 (Type1, 3, 4) 200 (Type2)

表2 作業別に得られた最適解
(1アーム1関節ロボットの場合)

Type of job	d (mm)	y_d (mm)	t_c (s)	P (W·s)
Type①	64	7.433	—	214.5
Type②	108	0.502	—	5731.9
Type③	70	—	0.911	228.3
Type④	64	—	1.123	214.7

表3 作業別に得られた最適解
(2アーム2関節ロボットの場合)

Type of job	d_1 (mm)	d_2 (mm)	y_d (mm)	t_c (s)	P (W·s)
Type①	84	54	4.1	—	5400
Type②	150	63	14.9	—	46600
Type③	90	45	—	0.93	4950
Type④	85	44	—	1.09	4800

変数のとりうる範囲とする。

$$d^* = \min_{d \in D} \max \{ \omega_1 g_1(d), \omega_2 g_2(d) \} \dots \dots \dots (24)$$

ただし, $\omega_1 \geq 0, \omega_2 \geq 0, \omega_1 + \omega_2 = 1$

式(24)における重み係数の大きさは、対象とする設計状況に応じてまず設計者が初期値を与え、得られた最適解が不満足な場合には、満足する設計解に収束するまでその値を変更するものとする。

5. 適用例

第4章で述べた方法を1アーム1関節ロボット、2アーム2関節ロボットにそれぞれ適用した例を、以下に示す。各パラメータは表1に示すとおりである。

式(24)の最大成分最小化問題において、 $g_1(d)$ は t_c (タイプ③)あるいは y_d (タイプ①②④)に相当し、 $g_2(d)$ は P に相当するが、それぞれ $d_1=50$ mm, $d_2=50$ mmのときの値を用いて正規化した。

5.1 1アーム1関節ロボット 4.2節で具体例として分類した作業別に最適設計解を求めた結果を、表2に示す。ここでは、重み係数 ω_j は、以下の数値を用いた。

$$\omega_1=0.6, \omega_2=0.4$$

どのケースも最重視される性能の希求水準を満たした上で、そのほかの性能を最大限に向上させることによって製品の総合的な性能を向上させている。タイプ①～④を比較してわかるように、目的関数・制約条件を適切に設定することによって、目的作業に最も適合した設計を得ることができる。

5.2 2アーム2関節ロボット 2アーム2関節ロボットに対して同様の方法で最適化を行った結果を、表3に示す。ここでは、動作性能に対する重要度が大きいと判断し、動作性能をより重要視した、以下の重み係数 ω_j を用いた。

$$\omega_1=0.8, \omega_2=0.2$$

1アーム1関節ロボットの場合と同様に、目的作業に応じた最適設計解がそれぞれ得られていることがわかる。

6. 結 言

本研究では、産業用ロボットの動作精度、作業能率などの動作性能と動作コストの評価に基づいて、目的とする作業に最も適した産業用ロボットの設計を得るための方法論を提案した。これより、以下の結論を得た。

(1) 構造特性と制御特性を設計の意思決定過程における同時的な観点から評価するために、作業能率と静的および動的精度を、ロボットアームの振動特性とフィードバック制御の動的特性を考慮して解析する方法を提示した。そして動作制御の困難さを、関節アクチュエータでの動作エネルギーを用いて評価した。

(2) 作業能率の最大化と動作コストの最小化の関係および動作精度の最良化と動作コストの最小化の関係を求め、それぞれ両者の間に競合関係が存在する設計領域があることを明らかにした。

(3) 産業用ロボットによる作業を、要求される動作精度と作業能率の観点から分類した。そして、与えられた作業に最も適したロボットとしての最適設計を得る手順を、多目的最適化手法に基づいて構築し、適用例を示した。

文 献

- (1) 背戸・ほか3名, 機論, 55-516, C(1989), 2029.
- (2) 岩壺・ほか3名, 機論, 57-534, C(1991), 407.
- (3) 多田, 機論, 58-545, A(1992), 146.
- (4) 山川, 最適化デザイン, (1993), 245-289. 培風館.
- (5) 川崎, ロボット工学の基礎, (1991), 90-95, 森北出版.
- (6) 市川(編), 多目的決定の理論と方法, (1980), 153-159, 計測自動制御学会.