多関節形ロボットの高性能化のための動作計画と 構造設計の統合的最適化*

吉村 允孝^{*1}, 増井 浩司^{*2}

Integrated Optimization of Motion Planning and Structural Design for Increasing Product Performance of Articulated Robots

Masataka YOSHIMURA and Hiroshi MASUI

This paper proposes methodologies for the integrated optimization of motion planning and structural design for increasing product performance of articulated robots. First, the following three types of optimization procedures are constructed: (1) cross-sectional dimensions of arms are determined so that the summation of the moment of inertia of each arm around the driving axis is minimized under the constraint of the static compliance at the end-effector point of a robot, (2) arm lengths and the positional relationship between the path of the end-effector point and the representative point of a robot are determined so that the operational time is minimized within the constraints of the upper limits of the driving torques and the upper limits of the ratios of the torque changes, and (3) motion planning concerning the velocity at the end-effector point is determined so that the operational time is minimized within the constraints of the upper limits of the driving torques and the upper limits of the ratios of the torque changes. Then, the integrated optimization procedures of motion planning and structural design of articulated robots are constructed by integrating the three foregoing kinds of optimization problems. Finally, the proposed procedures are demonstrated on an articulated robot.

Key Words: Robot, Computer-Aided Design (CAD), Optimum Design, Production System (713), Motion Planning, Structural Design, Driving Torque

1. 緒 言

ロボットのアーム構造は、ユーザの使用上の好みや使い勝手などからの要求が多くて、標準化しにくく、ユーザの使用目的や具体的な作業対象が決まらないうと決定しにくい部分である⁽¹⁾。したがって、一般的にロボットメーカ側は、ある程度の作業対象や条件を限定してはいるものの、具体的な使用条件や動作を特定することなく、よりはん用性をもたせるようにアーム構造を決定しているものと考えられる。そして、一般的なユーザは、そのようなはん用機の中から、各自の使用目的や対象とする作業により適したものを選択して利用している。しかし、そのようにして利用されているロボットは、必ずしもその対象とする作業を行うのに最適なロボットであるとは言えず、ユーザの要求を十分に満たしているとは言えない。事実、はん用のロボットでは独自の仕様や目的には適合せず、ロボットの自社開発を余儀なくされることも起こり得る。ロボットの最大の特徴がはん用性であるということからすれば矛盾するように聞こえるかもしれないが、個々の

ユーザ自身の仕様・目的に最も適したロボットの実現という観点からロボットの設計を考えて行くということも、今後ロボットの設計において重要な方針の一つとなるものと考えられる。

本研究では、産業用ロボットの中でも、梱包用ロボットや部品搬送・供給ロボットのような高精度よりもむしろ高速駆動を重視するようなロボットを対象として、そのアームの寸法設計と動作計画の両面から高性能化にアプローチする方法の構築を目的とする。具体的には、ロボットのアーム構造設計としてアームの断面寸法の最適設計とアームの長さ寸法の最適設計を扱い、ロボットの動作計画として動作軌道のロボット本体に対する相対的位置関係の最適化とアーム先端(手先効果器)の最適速度計画を扱う。そして、それらの最適化を統合することにより、高性能化設計を図る。

2. 産業用ロボットの性能評価

2-1 産業用ロボットの性能と高性能化 産業用ロボットの性能に影響を及ぼす項目には、位置精度、動作速度、可搬重量、動作領域、自由度(はん用性)など、さまざまなものがあげられる。これらの項目は相互に干渉し合っており、このことがロボットの高性能化を図る上で大きな障壁となっている。また、それら

* 原稿受付 平成4年7月20日。

^{*1} 正員, 京都大学工学部 (〒606 京都市左京区吉田本町)。

^{*2} 准員, 松下電器産業(株) (〒571 門真市松葉町)。

の項目のそれぞれに対する要求の強さの度合いは、対象とする作業や使用条件、使用目的などにより異なる。よって、ロボットの高性能化を考える場合、それらを考慮して、高性能化の方向を明確にする必要がある。

さらに、ロボット自身にはそのロボットに適した動作⁽²⁾⁽³⁾が存在し、逆に、ある動作をさせるためには、それに適したロボットの構造⁽⁴⁾⁽⁵⁾というものが存在すると言える。そこで、対象とする作業をどのような動作で実行させるかということをさらに考慮し、その動作の最適計画をロボットの構造の最適設計の中に組み込むことにより、ロボットの高性能化をより促進できるものとする。ここで、特定の動作に注目した高性能化を目指すとは言っても、全くはん用性が失われるわけではないと考える。なぜなら、対象としているものがロボットであり、その構造ゆえに、ある程度のはん用性は保証されるものであるからである。また、実際の現場において、ロボットの動作の変更といってもそれほど大きな変更が生じない場合も少なくない。したがって、特定の具体的な動作に注目した高性能化を図るという考え方は、本来のロボットの狙いとする方向、すなわちはん用的であることから離れているかのように思えるが、これが現実的に、実用的かつ妥当であると考えられる。

2.2 ロボットの構造解析 従来、産業用ロボットに限らず機械構造物の開発にあたっては、幾度となく試作機の製作とその解析実験とを繰り返すことにより設計案を改善して行く方法がとられていた。しかし、コンピュータが高度に発展し続ける今日、各種の解析シミュレーションが可能となっており、そのような費用と時間のかかる作業を極力削減し、コンピュータ上でのシミュレーションに置き換える方向へと進歩している。これは、CAE(Computer Aided Engineering)と呼ばれている。CAEにおいて構造解析を行う際の手法として、有限要素法がよく用いられる。本研究においても、有限要素法を用いた動剛性合成法⁽⁶⁾により構造解析を行い、その結果を構造最適化の中で利用する。

有限要素解析を行うにあたり、対象とする構造物をいくつかのはり要素やシェル(平板)要素またはソリッド要素、さらに必要ならば集中質量要素、粘弾性要素などを用いてモデル化する必要がある。一般的に、要素分割数を増やすと解析精度が向上する。しかし、それだけ計算時間がかかることになる。また、シェル要素やソリッド要素から成るモデルに対する解析時間は、それらをはり要素に近似したモデルに対する解析

時間よりも長くなるということが知られている。本研究においては、後に述べる各種決定変数の最適化を図る際に、解析を繰返し行う必要がある。そこで、計算時間を節減するために、はり要素により解析モデルを作成することにする。また、各はり要素は一様断面とする。

2.3 ロボットの駆動トルク解析 ロボットの動作の高速化を制限するものとして、駆動モータの許容トルクとともに振動の問題がある。ロボットの振動の起振源は、唯一能動的に「運動」を発生するアクチュエータであり、そのアクチュエータのトルクの急激な変動により振動が励起されるものとする。そこで、本研究では、そのような振動の励起を回避するために、駆動軸にかかるトルクの変動を評価して、それがある限界値を超えないように動作計画を行うことにする。このような場合、評価するトルク値は、ロボットの解析モデルを剛体と見なし算出したものでも十分妥当であると考えられる。解析モデルを弾性体と見なしトルク解析を行うのは計算が複雑でかつ多大な時間を要する。したがって、駆動トルク解析を行うに当たっては、ロボットの解析モデルを剛体と見なすことにする。なお、解析にはニュートン・オイラー法を用いて、微小時間ごとに逐次行うものとする。

3. ロボットの高性能化設計

3.1 高性能化設計の方針 本研究では作業能率向上が特に要求されるロボットを対象とする。そして、ある特定の作業動作を設定し、駆動軸でのトルクの変動がなめらかで、かつ、その動作を行うのに要する時間(動作時間)が最小となることを高性能化の方向として、構造設計と動作計画とを統合的に考慮することにより、ロボットの高性能化設計を実現することを目的とする。この高性能化設計においては、(a)解析モデルにおけるロボットアームの各はり要素の断面寸法、(b)ロボットアームの長さ寸法、(c)ロボット上の代表点と動作軌道(動作中に手先効果器があるアーム先端(以後これをハンド点と呼ぶ)が描く軌跡)との相対的位置関係を表すパラメータ、(d)ハンド点での速度変化を表すパラメータ、を決定変数として取りあげる。そして、解析モデルに対して、次のような最適化を図ることとする。

- (1) ロボットアームの断面寸法の最適化
- (2) ロボットアームの長さ寸法およびロボット上のハンド点と動作軌道との相対的位置関係の最適化
- (3) ハンド点での速度の最適計画

なお、本研究におけるそれぞれの最適化問題は、修正可能方向法を用いた最適化プログラム(COT)⁽⁷⁾に

より解くことにする。

3・2 高性能化設計における最適化問題

3・2・1 ロボットアーム断面寸法最適化問題 ロボットの動作を高速化するための一つの方法として、ロボットの重量あるいは慣性を小さくすることが考えられる。そこで、断面寸法を操作することにより、ロボットの慣性の最小化を図ることにする。ただし、精度の悪化に歯止めを設けるために、剛性制約を考慮する。以下に、アーム断面寸法最適化問題をまとめる。

* 決定変数：解析モデルのアーム部における各はり要素の断面寸法

* 制約条件：各はり要素の断面寸法の許容限界
ハンド点での剛性制約

$$f_s \leq f_s^u \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 f_s 、 f_s^u はそれぞれハンド点の静コンプライアンスとその上限値。

* 評価基準：各アームの駆動軸回りの慣性モーメントの総和の最小化

3・2・2 ロボットアームの長さ寸法およびロボット上の代表点と動作軌道との相対的位置関係の最適化問題 ハンド点の運動を各関節での挙動に変換する際に、アームの長さおよびロボット上の代表点と動作軌道との相対的な位置関係は大きく関与するものであり、これらのパラメータの値の変更は、駆動軸にかかるトルクの変動に大きく影響するものと思われる。よって、これらのパラメータを同時に決定する。

通常、アームの長さは短ければ短いほど、必要となるトルク値は小さくて済む。そこで、各アームの長さの上限値と下限値、および、各アーム長さの総和の下限値を制約としてつけ加える。ここではアームの断面寸法は固定したままアームの長さ寸法を変更し最適化を行う。アームの長さ寸法変更にあたっては、そのアームを構成する各はり要素の長さを変更することになる。つまり、アームの長さ寸法を a 倍する場合には、そのアームを構成する全てのはり要素の長さをそれぞれ a 倍することになる。

また、ロボット上の代表点と動作軌道との相対的位置関係は、ロボットの位置を代表するある点を原点として基準座標系を設定したときに、その原点と動作軌道の位置を代表する点の位置ベクトルおよび動作軌道の向きを表す方向ベクトルとで表現できる。図1に動作軌道の相対的位置ベクトルと方向ベクトルの概念図を示す。動作軌道の位置と向きは、作業領域や作業対象などの制約により、ある範囲内に限定される。

この最適化問題の目標は、駆動軸にかかるトルクの限界とトルク変化率の限界を越えずに、動作時間を最

小化するようなアームの長さ寸法および動作軌道のロボット上の代表点に対する相対的な位置関係を決定することである。以下に、この最適化問題をまとめる。

* 決定変数：各アームの長さ寸法

ロボット上の代表点に対する動作軌道の相対的位置ベクトル $r = (r_x, r_y, r_z)$

ロボット上の代表点に対する動作軌道の相対的方向ベクトル $u = (u_x, u_y, u_z)$

* 制約条件：アームの長さ寸法に関する制約

動作軌道の位置・方向の制約

駆動軸にかかるトルクの限界

駆動軸にかかるトルクの変化率の限界

* 評価基準：動作時間 T の最小化

3・2・3 ハンド点における速度の最適計画問題

ここでは、駆動軸にかかるトルクの限界とトルク変化率の限界のなかで、動作時間を最小化するようなハンド点の速度計画を行う。ハンド点の移動は、基本的に(停止)→(加速)→(定速)→(減速)→(停止)という流れで行われている。そこで、そのような速度 v の変化をある関数を用いて表現し、その関数の形を決めるパラメータを変更することにより最適な速度変化を表す関数の形を決定することを考える。本研究では、動作時間を T と表し、時刻 $t (0 \leq t \leq T)$ に対して、次のように表される関数を用いて、ハンド点の速度変化 $v(t)$ を表現することにする。

$$v(t) = c \left[1 - 2 \cdot \exp \left\{ - \frac{\left(\frac{t}{T} \right)^q \cdot T}{p} \right\} + \exp \left\{ - 2 \frac{\left(\frac{t}{T} \right)^q \cdot T}{p} \right\} + 1 - 2 \cdot \exp \left\{ - \frac{T - \left(\frac{t}{T} \right)^q \cdot T}{p} \right\} + \exp \left\{ - 2 \frac{T - \left(\frac{t}{T} \right)^q \cdot T}{p} \right\} \right]$$

図1 動作軌道の相対的位置関係を表すベクトル

$$-\left\{1-2\cdot\exp\left(-\frac{T}{p}\right)+\exp\left(-2\frac{T}{p}\right)\right\}\cdots(2)$$

ここで、 p と q はこの関数 $v(t)$ の形を決定するパラメータであり、 c は動作軌道の全長を s とした時に次式を満たすように調整するための定数である。

$$\int_0^T v(t)dt=s\cdots\cdots\cdots(3)$$

例えば、 $T=1.0(s)$ 、 $s=1000.0(mm)$ とした場合に、 p 、 q の値によって関数 $v(t)$ の形がどのようになるかを図2に示す。この関数は常に、 $t=0$ と $t=T$ においてその一回微分が零となる。また、 p の値を大きくするほど加・減速域が長くなり定速域が短くなる性質がある。さらに q の値を1より小さくするほど急加速かつ緩減速になり、1より大きくするほど緩加速、急減速になる性質がある。したがって、 p と q の値を操作することで柔軟に関数の形を操ることができる。そこで、ハンド点での速度の最適計画問題はこの p と q の値を決定変数とした最適化問題となり、以下のようにまとめられる。

*決定変数：ハンド点での速度関数の形を決定するパラメータ； p 、 q

*制約条件：駆動軸にかかるトルクの限界

駆動軸にかかるトルクの変化率の限界

*評価基準：動作時間 T の最小化

3.3 統合的高性能化設計の手順 高性能化設計の流れとしては、まずロボットアームの形状寸法および動作軌道に関して初期設定を行った後、断面寸法の最適化(第1次断面寸法最適化)を行う。次に、ハンド点の速度の最適計画と、アームの長さ寸法およびロボット上の代表点と動作軌道との相対的位置関係の最適化とを統合的に行う。ここで、アームの長さ寸法の変更が生じ得る。その結果、剛性制約を侵すことになったり、またアーム断面寸法の最適解に影響を及ぼすことになったりする。よって、再度、アーム断面寸法の最適化(第2次断面寸法最適化)を行うことにより、剛性制約の保証とアーム断面寸法の最適解の修正を行う。そして、さらに、ハンド点での速度の最終的な最適計画を行う。こうして、解析モデルに対して最終的な最適アーム形状寸法と最適動作が決定される。その後、解析モデルの形状のスージングにより実際のロボットアーム形状を得る。以下に、高性能化設計の手順をまとめる。

[ステップ1] アーム形状寸法の初期値を設定する。

[ステップ2] はり要素を用いた解析モデルを作成する。

[ステップ3] 動作軌道の形の設定とロボット上の代

表点との相対的位置の初期設定を行う。

[ステップ4] ハンド点での速度の初期設定を行う。

[ステップ5] アーム断面寸法の第1次最適化を行う。

[ステップ6] ハンド点での速度の最適計画を行う。

[ステップ7] アーム長さ寸法と動作軌道の位置の統合的最適化を行う。

[ステップ8] ハンド点での速度の最適計画を行う。

[ステップ9] 動作時間最小化ルーチンの最適解として収束しているかどうかを判定し、収束解でなければ[ステップ7]へ戻り、収束解であれば[ステップ10]へ進む。

[ステップ10] アーム断面寸法の第2次最適化を行う。

[ステップ11] ハンド点での速度の最終的な最適計画を行う。

4. 適用例

4.1 適用例における初期設定

4.1.1 初期形状寸法とその解析モデル 本章では、図3に示すような垂直多関節(2軸リンク駆動形)ロボットを対象として、本研究で構築した高性能化設計の適用例を示す。このロボットは実在するロボットであり、その形状寸法を出発点として、最適な寸法と最適な動作の導出を試みる。

この対象とするロボットに対して、モータと減速機を除いた、アーム、リンク、そしてレバーから成る構造をはりとしてモデル化する。各部材の長さ寸法の初期値は、アーム1とリンクがどちらも750(mm)、レバーが330(mm)、アーム2が1080(mm)であり、そ

図2 ハンド点での速度関数 $v(t)$ の形の例

のうち関節 A からアームの先端までが 750(mm)、関節 A から関節 B までが 330(mm)である。また、各部材の材料は、アーム 1 とアーム 2 がアルミニウム、リンクが軟鋼、レバーが鋳鉄である。有限要素法による解析に備えて、アーム 1 とリンクをそれぞれ 5 個の要素に、アーム 2 を 8 個の要素に、レバーを 3 個の要素

に分割し、各要素を非テーパーはりとする解析モデルを作成する。図 4 にその解析モデルの外観と断面形状を示す。ただし、図 4 中のアルファベットは断面寸法を示す。

表 1 断面寸法の初期値と上・下限値

Part	Element No. (Length) (mm)		Lower limit (mm)	Initial value (mm)	Upper limit (mm)
Arm 2	Element 1 (150.0)	H	50.0	87.0	200.0
		B	50.0	100.0	200.0
		e ₁	6.0	8.0	20.0
	Element 2 (150.0)	e ₂	6.0	8.0	20.0
		H	50.0	99.0	200.0
		B	50.0	115.0	200.0
		e ₁	6.0	8.0	20.0
		e ₂	6.0	8.0	20.0
Link	Element 3 (150.0)	H	50.0	111.0	200.0
		B	50.0	130.0	200.0
		e ₁	6.0	8.0	20.0
	Element 4 (150.0)	e ₂	6.0	8.0	20.0
		H	50.0	123.0	200.0
		B	50.0	140.0	200.0
		e ₁	6.0	8.0	20.0
		e ₂	6.0	8.0	20.0
Lever	Element 5 (150.0)	H	50.0	135.0	200.0
		B	80.0	140.0	200.0
		e ₁	6.0	8.0	20.0
	Element 6 (110.0)	e ₂	6.0	8.0	20.0
		H	50.0	135.0	200.0
		B	80.0	140.0	200.0
		e ₁	6.0	8.0	20.0
		e ₂	6.0	8.0	20.0
Arm 1	Element 7 (110.0)	H	50.0	120.0	200.0
		B	60.0	140.0	200.0
		e ₁	6.0	8.0	20.0
	Element 8 (110.0)	e ₂	6.0	8.0	20.0
		H	50.0	105.0	200.0
		B	50.0	140.0	200.0
		e ₁	6.0	8.0	20.0
		e ₂	6.0	8.0	20.0
Arm 1	Element 9~13 (150.0)	D	20.0	27.0	50.0
		e	2.0	2.8	5.0
	Element 14 (110.0)	H	30.0	75.0	100.0
		B	10.0	20.0	30.0
		e ₁	0.0	15.0	50.0
	Element 15 (110.0)	e ₂	0.0	20.0	50.0
		H	30.0	102.0	150.0
		B	10.0	20.0	30.0
Arm 1	Element 16 (110.0)	e ₁	0.0	15.0	50.0
		e ₂	0.0	20.0	50.0
	Element 17 (150.0)	H	50.0	135.0	200.0
		B	20.0	80.0	90.0
		e ₁	0.0	0.0	50.0
	Element 18 (150.0)	e ₂	0.0	0.0	20.0
		H	50.0	92.0	200.0
		B	50.0	75.0	150.0
Arm 1	Element 19 (150.0)	e ₁	6.0	8.0	20.0
		e ₂	6.0	12.0	20.0
	Element 20 (150.0)	H	50.0	112.0	200.0
		B	50.0	82.0	150.0
		e ₁	6.0	8.0	20.0
	Element 21 (150.0)	e ₂	6.0	15.0	20.0
		H	50.0	132.0	200.0
		B	50.0	89.0	150.0
Arm 1	Element 22 (150.0)	e ₁	6.0	8.0	20.0
		e ₂	6.0	18.0	20.0
	Element 23 (150.0)	H	50.0	152.0	200.0
		B	50.0	96.0	150.0
		e ₁	6.0	8.0	20.0
	Element 24 (150.0)	e ₂	6.0	21.0	30.0
		H	50.0	172.0	200.0
		B	50.0	105.0	150.0
Arm 1	Element 25 (150.0)	e ₁	6.0	15.0	20.0
		e ₂	6.0	23.0	40.0
	Element 26 (150.0)	H	50.0	172.0	200.0
		B	50.0	105.0	150.0
		e ₁	6.0	15.0	20.0
	Element 27 (150.0)	e ₂	6.0	23.0	40.0
		H	50.0	172.0	200.0
		B	50.0	105.0	150.0

図 3 適用ロボットの概観

(a) 解析モデルの外観

(b) 断面形状と寸法記号

図 4 解析モデルの外観とはり要素の断面形状

示す寸法記号である。それぞれの要素に関する寸法の初期値、および、各断面寸法の下限值と上限値を表1に示す。この断面寸法の下限值と上限値は、製造上の制約、組立・機構上の制約、さらに、美観上の制約などにより設定されたものである。

4・1・2 動作の初期設定 動作軌道の形およびロボットに対する初期の相対的位置関係を図5に示す。動作軌道は、起点Aを出発して点Bまで鉛直上向きに200 mm進み、そこから半径250 mmの円弧に沿って半円を描き点Cに達し、さらに鉛直下向きに200 mm進んで終点Dに至る。動作軌道の全長はおおよそ1185.4 mmとなる。ハンド点で10 kgの物体を把持しながら、ハンド点をこの軌道に沿って移動させるものとする。動作軌道の位置を代表する点は、半円弧BCの中心O'とし、ロボットの位置を代表する点は、アーム1の下端Oとする。ロボットの位置を代表する点Oを原点としたとき、動作軌道の位置の初期設定は、原点Oからロボットの前方に650 mm、上方に650 mmの位置とする。

以後、動作軌道の位置は点Oを原点としたときの点O'の位置ベクトルとして(r_1 , r_2)のように記述する。例えば、動作軌道の位置が原点Oから前方に750 mm(r_1)、上方に650 mm(r_2)の位置であるときには、動作軌道の位置は(750, 650)と記述する。なお、本適用例では、動作軌道の向きは不変とする。

ハンド点の速度変化に関する初期設定、すなわち式(2)と式(3)において設定すべきパラメータの初期値は、 $p=0.07$, $q=1.0$, $T=1.0$ (s), そして、 $s=1184.5$ (mm)とする。

4・2 制約条件の設定 第3章で述べた、高性能化のための種々の最適化問題の中の制約条件を、適用例に対しては以下のように設定する。

●断面寸法の許容限界

$$\cdot (\text{下限値}) \leq (\text{断面寸法}) \leq (\text{上限値}) \cdots \cdots (4)$$

●剛性制約

$$\cdot (\text{ハンド点の静コンプライアンス})$$

$$\leq 3.75 \times 10^{-6} (\text{m/N}) (=0.035 (\text{mm/kgf})) \cdots (5)$$

ただし、制約条件の中の剛性制約に関しては、図6に示すように、アーム1を20°, アーム2を100°回転した姿勢において、アーム先端の鉛直下向きの静コンプライアンスを評価する。なぜなら、この姿勢は初期設定動作において、アーム先端が動作軌道の終点に達したときの姿勢であり、動作中で最も剛性が弱くなる姿勢であると考えられるからである。また、実物のロボットでは、駆動軸は減速機を介してモータにつながっており、モータを駆動しない限り駆動軸は回転しない。しかし、解析モデルにおいては減速機やモータを含めていないため、静コンプライアンスを評価する際には、駆動軸の回転を止めるために、駆動軸1と駆動軸2をばね要素を介して接地する。このばね要素の弾性係数は、実物に対する実験値を参考にして決定した。

●軌道の位置の許容範囲

$$550 (\text{mm}) \leq r_1 \leq 850 (\text{mm}) \cdots \cdots (6)$$

$$600 (\text{mm}) \leq r_2 \leq 800 (\text{mm}) \cdots \cdots (7)$$

●アームの長さ寸法に関する制約

$$600 (\text{mm}) \leq L_1 \leq 800 (\text{mm}) \cdots \cdots (8)$$

$$L_1 + L_2 \geq 1300 (\text{mm}) \cdots \cdots (9)$$

$$280 (\text{mm}) \leq L_{12} \leq 380 (\text{mm}) \cdots \cdots (10)$$

●駆動軸にかかるトルクの限界とトルク変化率の限界

$$|\text{駆動軸1にかかるトルク}| \leq 300 (\text{N} \cdot \text{m})$$

$$(\quad = 30.6 (\text{kgf} \cdot \text{m})) \cdots \cdots (11)$$

$$|\text{駆動軸2にかかるトルク}| \leq 300 (\text{N} \cdot \text{m})$$

$$(\quad = 30.6 (\text{kgf} \cdot \text{m})) \cdots \cdots (12)$$

$$|\text{駆動軸1におけるトルク変化率}| \leq 8000 (\text{N} \cdot \text{m/s})$$

$$(\quad = 816.3 (\text{kgf} \cdot \text{m/s})) \cdots \cdots (13)$$

図5 動作軌道の初期設定

図6 剛性の評価時のロボットの姿勢

|駆動軸2におけるトルク変位率| $\leq 8\,000$ (N・m/s)
 (=816.3(kgf・m/s)) (14)

4.3 高性能化設計解 4.1節で設定した各種最適化問題を, 3.3節に示した高性能化設計の流れにしたがって順次行った。以下に, 高性能化設計において設計解がどのように最適化されていくかを示す。

《ステップ6完了後における最適解》

第1次断面寸法最適化の結果最適化された解析モデルの外観を図7に, さらに, それに対する動作計画の

図7 第1次断面寸法最適化後の解析モデルの概観

(a) ハンド点での速度変化

(b) 動作軌道の中心点位置とアームの動作軌跡

図8 ステップ6完了後の最適動作計画

最適解を図8に示す。このとき, 動作時間 T は, 0.807(s)となった。

《ステップ11完了後の最適解》

第2次断面寸法最適化の結果最適化された解析モデルの外観を図9に, さらに, それに対する動作計画の最適解を図10に示す。

図9 第2次断面寸法最適化後の解析モデルの概観

(a) ハンド点での速度変化

(b) 動作軌道の中心点位置とアームの動作軌跡

図10 最終的な最適動作計画

第2次断面寸法最適化の結果、各部材の慣性モーメント値はさらに減少した。また、アーム先端速度の最終的な最適計画の結果、 $p=0.0629$, $q=0.9959$ が最適解として得られ、動作時間 T は、0.648(s)まで最小化された。

5. 考察と展望

4章の適用例において、高性能化設計の結果、ロボットの全体的なサイズは初期値に比べて小さくなった。これは、この動作を行わせるためのロボットのサイズとしては、初期に設定していた値が大きすぎたことがわかる。ロボットの大小はアームの慣性モーメントの大小に大きく影響し、ロボットの大きさを小さくすることができれば、それだけ動作の高速化を図ることが容易となる。具体的には、ロボットのアームの長さを短くすることができれば、それだけアームの慣性モーメントが小さくなり、かつ、剛性が高まる。そこで、剛性制約に対して余裕ができ、その分、断面寸法を小さくすることができる。すると、アームの重量がさらに小さくなり、慣性モーメントも小さくなる。そして、それだけ駆動軸への負荷が小さくなり、高速化を促進することが可能となる。つまり、アームの長さは動作時間に大きく影響を及ぼすものであると言える。しかし、対象とする動作を特定することなしにアームの長さ寸法の最適値を決定することは困難であり、これまでは設計者の勘と経験によるところが多分にあったと思われる。

ロボットの設計においては、ロボットの本来の特質であるはん用性を向上または維持するという方向性が存在するため、特定の動作を意識し、それに適したロボットを設計するという方向性が抑制されてきたとも考えられる。しかし、一般的に利用されている産業用ロボットの中には、動作の変更と言ってもそれほど大きな変更が生じない場合も少なくない。したがって、そのような場合において、本研究で提唱する高性能化設計の考え方をを用いることは有意義であると考えられる。

本研究では、ロボットが対象とする動作を特定し、その動作の最適計画とロボットのアーム構造の最適設計とを統合的に扱うことにより高性能化を図ることを提唱した。今後、本研究を生かし、さらなる展望として、次のようなことが考えられる。

(1) 作業領域を考慮して、動作経路の最適化、すなわち軌道計画を本研究の中に組み込む。

(2) 複数の対象動作を設定し、それぞれの動作にかかる動作時間を最小化するという多目的最適化問題に発展させる。

6. 結 言

本研究では、産業用ロボットの高性能化を目的として、ロボットが行う動作を設定した上で、その動作の最適計画とその動作を行うのに最適なロボットアームの寸法設計を行うための方法論を構築した。以下に、本研究の結言を述べる。

(1) ハンド点の静コンプライアンスを制約として、ロボットの各アームの駆動軸まわりの慣性モーメントの総和を最小化するように、アーム断面寸法を決定する最適化問題を構築した。

(2) 駆動軸にかかるトルクの限界とトルク変化率の限界を制約として、動作時間を最小化するように、動作軌道のロボット上の代表点に対する相対的な位置関係とアームの長さ寸法、およびハンド点の速度計画を行う最適化問題を構築した。

(3) 上述の(1)と(2)で述べた最適化問題を統合化することにより、ロボットアームの構造設計と動作計画とを考慮した高性能化設計の方法論を構築した。

(4) 構築した高性能化設計の方法論を適用した数値例を示すことにより、その方法論の有効性を示した。

本研究を進めるにあたり、実機モデルを提供いただいた(株)京都製作所に厚くお礼を申し上げる。

文 献

- (1) 秋山・大輪, 機械技術者のためのロボットの設計と製作, (1989), 134, オーム社.
- (2) 山本・ほか2名, 機論, 56-527, C(1990)1881.
- (3) Benhabib, B., ほか3名, *Mech. Mach. Theory*, 26-3(1991), 323.
- (4) Saravanos, D. A., ほか2名, *ASME DE*, 10-2 *ADVANCES IN DESIGN AUTOMATION*-1987, 2 (1987), 37.
- (5) 里見・ほか2名, 機論, 56-527, C(1990), 1974.
- (6) Yoshimura, M., *Proc. 16th International Machine Tool Design and Research Conference*, (1975), 209.
- (7) Vanderplaats, G. N. and Hansen, S. R., *DOT Users Manual*, Vanderplaats Miura & Associates, Inc., (1989), E-11.