ロボットマニピュレータの総合設計システムに関する研究

井上 健 司*¹ 椎 名 建 一*² 高 野 政 晴*³ 佐々木 健*³

Study on Total Computer-aided Design System for Robot Manipulators

Kenji Inoue*¹, Ken'ichi Shiina*², Masaharu Takano*³ and Ken Sasaki*³

A total computer-aided design system for robot manipulators "TOCARD" has been developed. This system determines all design parameters of a robot mechanism—not only the fundamental mechanism (degree of freedom, joint types, arm lengths and offsets) but also the inner mechanism (motor allocations, transmission mechanisms, motors, reduction gears, arm cross-sectional dimensions and machine elements). Analyzing the relationship between these parameters and design evaluation functions made it clear that the fundamental mechanism is tightly connected with kinematic functions and the inner mechanism with static/dynamic functions. Accordingly, the design procedure of "TOCARD" consists of three local optimization stages to make the robot design efficient. 1) The fundamental mechanism is designed based on kinematic evaluation such as workspace, effective degree of freedom, joint displacement, velocity and acceleration, and workpiece velocity and acceleration. 2) The motor allocations and transmission mechanisms are determined, and the arm cross sectional dimensions and machine elements are calculated roughly, based on simple evaluation of dynamics—total motor power, total weight, deflection and weight capacity. 3) The arm cross-sectional dimensions and machine elements are modified based on precise evaluation of dynamics including natural frequency. "TOCARD" also has a robot simulator and the data base of machine elements.

Key Words: Robot, Manipulator, Robot Design, CAD, Robot Simulator

1. は じ め に

産業界におけるロボットの需要が増大し、その適用範囲が人間社会の様々な分野に広がるにつれて、ロボットに対する機能の多様化や高速高精度化といった性能向上の要求もますます厳しくなっている。その結果、ロボットの設計に際して以下の点が問題となってきた。

- 1) ロボットに要求される動作や性能が多様多様となるため、そうした条件をすべて考慮してロボットを設計する必要がある。特に、今までロボット化されていない作業に対しては、過去に設計例のないタイプのロボットが求められる可能性も有る。
- 2) ロボットは開ループリンク機構なので長い片持ちはり状態となり、しかも関節駆動系には減速機や伝達機構が用

いられるので、剛性が低い構造となっている。剛性が低いとたわみや振動のために精度が低下する。しかしながら、剛性を上げると重くなるため、高速動作ができなくなるとともに、動力の多くをアームの駆動に費やしてしまい、可搬重量/自重比が低下する。したがって、高速高精度化のためには、設計の際にロボット各部分に対する剛性と質量の配分を考え、剛性を必要量から落とさずにできるだけ軽量化を図ることが重要となる。

試作と実験を繰り返す従来の設計方法では、このような問題点に対応するのは難しい。そこで、ロボット用の CAD システムの開発が期待されている。ロボット CAD システムでは、目的作業によって決まる要求仕様を満足するロボットを設計できるとともに、設計に要する時間、費用を節約することが可能となる。

現在までに、コンピュータを用いたロボットの設計システムに関する研究がいくつか行われているが[1]～[12]、それらの多くは設計パラメータの一部を最適化するものであり、自由度、関節構成、アーム長といった基本機構の設計から内部機構の設計、すなわち各関節を駆動するモータの配置とモータ～関節間の伝達機構の決定、アーム太さの設計、さらには使用するモータ、減速機、軸受などの機械要素の選定までを一貫して行

原稿受付 1995 年 7 月 5 日

*¹大阪大学工学部

*²川崎情報システム(株)

*³東京大学工学部

*¹Faculty of Engineering, Osaka University

*²Kawasaki Steel, Systems R & A Co.

*³Faculty of Engineering, University of Tokyo

うシステムはまだない。

そこで本研究では、このようなロボットのメカニズムのあらゆる設計パラメータの設計を行う総合CADシステム“TOCARD (Total Computer Aided Robot Design)”を開発した。“TOCARD”により、目的とする単一あるいは複数の作業を実現できるロボットの設計が可能となる。

ロボットの総合的設計を行う場合、前述のように設計パラメータは多く、設計のための評価量も作動領域、ワークの速度、全モータパワー、全重量、可搬重量、精度など多岐にわたっているため、これらを一度に設計することは難しい。そこで、設計パラメータと評価量の関係を調べた結果、基本機構は運動学的評価に、内部機構は力学的評価に関係が深いことが明らかになった。よって、ロボットの設計を運動学的評価に基づく基本機構の設計と力学的評価に基づく内部機構の設計とに分けることにより、設計システムを簡単にすることができる。“TOCARD”では、内部機構の設計をさらに2段階に分け、各段階で局所的な最適化を図ることにより、ロボットを効率よく設計する方法を提案する。すなわち、

- 1) 作動領域、関節速度、ワーク速度といった運動学的評価のもとに基本機構を設計する。
- 2) 全モータパワー、全重量、たわみの大まかな評価に基づいて、モータ配置と伝達機構の種類を決定し、同時にアーム太さの見積りと機械要素の仮選定を行う。
- 3) 全重量、たわみ、固有振動数の厳密な評価を行って、見積り・仮選定の結果を修正する。

設計は、設計者による設計変更と評価を繰り返す対話的設計を基本とするが、a)ロボット設計熟練者の知識を利用したファジィ推論による性能の大まかな評価に基づく作業に適したロボットタイプの選定、b)構造要素毎のたわみまたは強度評価に基づくアーム太さおよび機械要素の自動見積り・仮選定、c)全重量、たわみ、固有振動数に対する感度解析を利用したアーム太さと機械要素の修正および勾配射影法によるアーム太さの自動最適化、といった独自の手法を用いて設計を支援するシステムを開発した。

2. “TOCARD”の構成と設計手順

2.1 設計パラメータ

はじめに、“TOCARD”が設計対象としているロボットのメカニズムの適用範囲とその設計パラメータを示す。

“TOCARD”では、Fig. 1 のようにいくつかのリンクが回転または直動関節によって直列に結合された開ループリンク機構のロボットを対象とする。開ループリンク機構のロボットにおいて、

- 1) 自由度
- 2) 各関節の種類（回転あるいは直動）とその並び
- 3) アーム長・オフセット（より一般的には隣合う関節間の相對位置姿勢関係）

は、運動学的な設計パラメータである。本研究では、これらをまとめてロボット基本機構と呼ぶことにする。

リンクや関節を実現している構造要素（以後、基本構造要素と呼ぶ）としては Fig. 2 に示す、

Fig. 1 Serial link manipulator

Fig. 2 Fundamental structure elements

- (a) 円筒型アーム要素
- (b) 直方体型アーム要素
- (c) 旋回型回転関節要素
- (d) 回転型回転関節要素
- (e) 直動関節要素

の5種類を考えた。

一方、各関節を駆動するアクチュエータ・減速機としては、電動モータとハーモニックドライブを想定した。前者は取扱いの容易さや制御性、保守性といった面から、後者は軽量、コンパクトで高減速比を有することから、現在多くの産業用ロボットに使われている。Fig. 3 の第1、第5関節のように、モータ・減速機を関節軸上に置く配置をモータの直接配置、第2~4関節のように伝達機構を介して別の場所に置く方式を間接配置と呼ぶことにする。

そこで、関節駆動系を構成している要素として

- (a) モータ・減速機要素
- (b) 軸要素
- (c) チェーン・スプロケット要素
- (d) かき歯車要素
- (e) ボールネジ・ナット要素

の5種類を考え、これらを駆動系要素と呼ぶことにする。

Fig. 3 An example of inner mechanisms

以上述べてきた

- 4) モータ配置
- 5) 伝達機構の種類
- 6) モータ
- 7) 減速機と減速比
- 8) アーム太さ (より一般的には基本構造要素の寸法と材質)
- 9) 機械要素 (軸受, チェーン, かさ歯車など)

は, すべて力学に関係した設計パラメータとなっている. そこで本研究では, これらをまとめてロボット内部機構と呼ぶことにする. ただし, 6), 7), 9) はカタログから選定する.

2.2 設計条件

“TOCARD”では, 目的とする単一あるいは複数の作業を実現できるロボットを設計する. そこで, 目的作業によって決まる設計条件として, 以下を入力することとする.

- 1) エンドエフェクタを含めたワークの大きさと質量
- 2) 作業に含まれる単一あるいは複数の手先軌道
- 3) 作業を行う領域
- 4) 手先の許容たわみと許容固有振動数

後述するように, 本研究では精度に影響を与える要因のうち, 剛性のみを考えることにした. したがって, 4) は精度に対する制約条件を間接的に表したものである.

専用機械と比べたロボットの大きな特徴は, 自由度が高いので複雑で多様な動作ができ, その軌道プログラムとエンドエフェクタを取り替えることで様々な作業を実現できるという汎用性にある. ワークや軌道が異なれば, 必要なモータパワーや手先に生じるたわみといったロボットの性能も変わってくるため, 複数の目的作業を実現できるロボットを設計するには, 作業に扱われるすべてのワークと軌道を設計条件として与える必要がある. その一方で, 条件となるワークと軌道が無数にあると, 計算時間が問題となる. これに対して“TOCARD”では, ①作業に典型的なワークと軌道をいくつか選び, それらを条件としてロボットを設計する, ②設計したロボットが他のワークや軌道にも適用できるかをサブシステムのロボット・シミュレータを用いてチェックする, ③適用できないワークや軌道があった場合には, それらを条件に追加して設計をやり直すこととする.

2.3 設計における評価量

ロボットのメカニズムの設計における評価量としては, 以下が考えられる.

- 1) 有効自由度

ロボットの設計や選定の際には, 目的作業に対する基本機構の適性を評価することが重要となる[13][14]. ロボットの作業の基本はワークを目標軌道に沿って動かすことなので, 目標軌

Fig. 4 Three types of robots used in the assembly task

道を容易に実現できるかが, 作業に対する基本機構の適性評価となり得る. そのような指標として, 本研究では有効自由度という概念を新たに提案する. 例えば, Fig. 4 のように平面上の複数の穴に部品を垂直に挿入する作業の場合, 図に示す3つのロボットはどれもこの作業を実現できる. ところが, (a)と(b)のロボットは手先の直動関節の1自由度で容易に挿入できるのに対し, (c)のロボットでは第2関節から第4関節の3つの回転関節を同時に動かさなければ垂直に挿入することができない. 平面上の目標軌道を動かす場合でも, (c)のロボットでは目標位置間で3次元的な誤差が生じやすいのに対して, (a), (b)のロボットはベースに近い2自由度のみを動かすので, 平面内での運動は保証されている. 以上のことから, ロボットが目標軌道上を運動する際に, 同時に動かす自由度数が少ないほど容易にその軌道を実現できるという評価が成り立つ. そこで, この同時に動かす自由度数を表す指標を有効自由度といい, これが小さいほど目標軌道に適していると評価できる. 有効自由度の定義は次章に示す.

2) 作動領域

作動領域は基本機構に深く関係した評価量で, 設計条件の作業を行う領域を覆っていないといけない.

3) 関節可動範囲

直動関節の可動範囲は直動軸の長さによって決まる. 回転関節の場合は, Fig. 2(d)の関節なら一回転できるが, (c)の関節では構造上関節変位が制限される. 関節可動範囲が広いほどロボットの作動領域は広がるが, 必要以上に長い直動軸は重量を増加させるし, (c)の回転関節にオフセットを付けると回転軸が片持ちとなって構造上好ましくない場合もある. そこで, 設計条件の軌道を運動させたときに, 関節変位がその可動範囲内にあれば十分であるとする.

4) 関節の最大速度・加速度

5) ワークの最大速度・加速度

6) モータの最大駆動トルク

ワークの最大速度・加速度は関節最大速度・加速度とアーム長に, 関節最大速度・加速度はモータの駆動能力とアーム重量に深く関係しており, これらは軌道にも影響される. 作業に要求されるワークの最大速度・加速度は, 作業に含まれる手先軌道を設計条件とすることで間接的に与えられる. このとき, 与えられた軌道を運動する際の関節最大速度・加速度とアーム長を小さくするように基本機構を決めた上で, アーム太さを変えてアーム重量を調整することにより, 駆動に必要なモータの最

Table 1 Relationship between design parameters and evaluation functions

evaluation function design parameter		kinematics					dynamics					both		
		1) effective D.O.F.	2) workspace	3) joint disp. limit	4) max. joint vel./acc.	5) max. workpiece vel./acc.	6) max. motor torque	7) total motor power	8) total weight	9) weight capacity	10) deflection	11) natural frequency	12) positioning accuracy	13) cost
fundamental mechanism	1) D. O. F.	⊙	⊙	△	△	△	△	○	○	△	○	○	○	⊙
	2) joint type	⊙	⊙	○	△	△	△	○	○	△	○	○	○	⊙
	3) arm length	⊙	⊙	△	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	○
	3) offset	⊙	⊙	⊙	△	△	△	△	△	○	△	△	△	△
inner mechanism	4) motor allocation	△	△	△	△	△	⊙	⊙	⊙	⊙	△	△	△	△
	5) trans. mech.	△	△	⊙	△	△	△	△	⊙	△	⊙	⊙	⊙	⊙
	6) motor	△	△	△	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	△	△	△	⊙
	7) reduction gear	△	△	△	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
	8) arm cross. dim.	△	△	△	△	△	⊙	△	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	○
	9) machine element	△	△	△	△	△	⊙	△	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	○

◎ : strong ○ : medium △ : weak

大トルクを減らすことが可能となる。モータ駆動トルクには、モータ配置も大きく影響する。例えば、Fig. 3 のように、関節 J_3 を駆動するモータを他の関節 J_2 を通り抜けてベース側に置く場合、通り抜けられた J_2 のモータは、 J_3 のモータ駆動トルクの反力と J_3 のモータ重量を支える必要がないので少ないトルクですみ、モータを小型化できる。また、間接配置ではモータを運動のじゃまにならない場所におけるという利点もある。その反面、伝達機構を入れると剛性が下がったり、通り抜けの数を多くすると機構が複雑になり、かえって重量の増加を招くこともある。

7) 全モータパワー

8) 全重量

これらを小さくすることは、コストの低減にもつながる当然の要求である。軽量化は、高速動作を可能にするだけでなく、ロボットの輸送や設置の容易さといった面でも重要となる。

9) 可搬重量

モータの駆動能力の一部はアームの駆動に費やされ、残りがワークの移動に使われる。よって、可搬重量は、モータの駆動能力とアーム長およびアーム重量によって決まる。ロボットには、設計条件として与えたワーク重量を支えられるだけの可搬重量が要求される。

10) たわみ

11) 固有振動数

たわみと固有振動数はロボット各部の剛性と重量に関係した評価量であり、高速高精度化のためには、これらを設計条件の許容範囲内に収めつつできるだけ軽量化を図る必要がある。

12) 精度

精度に影響を与える要因としては、加工・組立誤差やセンサの分解能、機械要素の精度、摩擦、制御系に起因する誤差、およびメカニズムの剛性が挙げられるが、ここではメカニズムの剛性のみを考える。したがって、精度はたわみと固有振動数によって間接的に評価される。

13) コスト

コストを正確に見積もることは非常に難しいが、一般には、重量が小さく、必要なモータパワーが少ないほどコストは安くなる。そこで、全重量および全モータパワーを小さくすることで、間接的にコストを評価する。

以上に加えて、個々のアームや機械要素、減速機は、それらに作用する内力に対して必要十分な強度、剛性を持っていないといけない。各モータも、駆動に必要なパワー・トルク以上の能力を持つものを選定しなければならない。

2.4 設計パラメータと評価量の関係の深さ

以上述べてきた設計パラメータと設計のための評価量の関係の深さをまとめると、Table 1 のようになる。この表から、ロボット基本機構は運動学的評価に、内部機構は力学的評価に関係が深いことがわかる。もちろん、両者は完全に分離されているわけではない。しかしながら、基本機構を設計する際に、アーム長あるいはその総和であるロボット全長をできるだけ小さくし、自由度を少なくすれば、すべての力学的評価は望ましいほうに改善される。よって、基本機構を設計する際の力学的評価を、ロボット全長と自由度の評価という形で間接的に行うことができる。

以上のことから、ロボットの設計を運動学的評価に基づく基本機構の設計と力学的評価に基づく内部機構の設計とに分けることにより、設計システムを簡単にすることが可能となる。

2.5 “TOCARD”の特徴

そこで本研究では、以下の特徴を持つロボット総合 CAD システム “TOCARD” を開発した。

- 1) ロボットのメカニズムの設計を目的とする。特に、基本機構だけでなく内部機構に至るまでの総合的設計を行う。
- 2) 目的とする単一あるいは複数の作業を実現できるロボットを設計する。
- 3) 基本機構は運動学的評価に基づいて設計し、内部機構は力学的評価のもとに設計する。
- 4) 設計は基本機構設計、内部機構設計、詳細設計の3段階に分けて行い、各段階で局所的な最適化を図る。途中で

Fig. 5 Total robot design procedure in "TOCARD"

設計に不具合が生じた場合は、前段階に戻って設計をやり直す。

- 5) 設計者による設計変更と評価を繰り返す対話的設計を基本とし、これを支援する独自の設計手法を有する。
- 6) 設計に必要な解析のためのロボット・シミュレータを備えている。このシミュレータは、独立して使うこともできる。
- 7) 機械要素はカタログから選定するため、機械要素データベースおよびデータベース作成ツールも備えている。

2.6 "TOCARD" の設計手順

目的作業によって決まる設計条件の入力から全設計パラメータの決定に至るまでのロボットの総合的設計手順を Fig. 5 に示す。2.5 節の 4) で述べたように、設計手順は大きく分けて以下の 3 段階から成る。

1) 基本機構設計

有効自由度、作動領域、関節速度、ワーク速度といった運動学的評価のもとに基本機構を設計する。

2) 内部機構設計

全モータパワー、全重量、たわみの大まかな評価に基づいて、モータ配置と伝達機構の種類を決定し、同時にアーム太さの見積りと機械要素の仮選定を行う。

3) 詳細設計

全重量、たわみ、固有振動数の厳密な評価を行って、見積り・仮選定の結果を修正する。

各設計段階の詳細は、それぞれ第 4, 5, 6 章で述べる。

3. ロボット・シミュレータ

"TOCARD" は、ロボットのメカニズムの設計に必要な以下の解析システムを備えている[15]。このうち、1)~5) は運動学的な解析で、基本機構のみが決まれば計算できる。これに対して 6)~8) は力学的な解析で、各要素の形状や大きさ、質量、剛性までも考えたロボットの剛体または弾性体モデルが必要となる。各解析の詳細は文献にゆずり、以下にその概要をまとめる。

1) 順運動学解析 (位置解析)

関節変位ベクトル q を与えてワークの位置姿勢 R を求める順運動学には、Denavit-Hartenberg の方法を修正した座標変換マトリックスを用いる[16]。

2) 逆運動学解析

筆者らは、 R を与えて q を求める逆運動学の効率よい解法を開発した[16]。この方法は、手先の 3 関節が回転関節のあらゆる 6 自由度ロボットに適用でき、最大 8 組の解が同時に得られる。

3) 作動領域解析

筆者らが開発した方法[17]は、ロボットの設計において重要なベースに近い 3 自由度による作動領域の境界を、あらゆる関節構成のロボットについて求めることができる。

4) 速度加速度解析

Luh の逆動力学のアルゴリズム[18]は、 $q, \dot{q}, \ddot{q}$ からワークの速度 v 、加速度 a を求める部分を含んでいるので、これを用いた。

5) 有効自由度解析

目標軌道に沿って始点から測ったワークの移動距離 (または時間) を u 、軌道上の点 $R(u)$ における各関節変位を $q_k(u)$ ($k=1, \dots, n$; n は自由度)、 $q_k(u)$ の軌道に沿った変化率の大きさを $\theta_k(u) \equiv |dq_k(u)/du|$ 、これを大きい順に並べ変えたものを $\theta_{\sigma k}(u)$ としたとき、 u における有効自由度 $n_e(u)$ を次式で定義する。

$$n_e(u) \equiv 2 \sum_{k=1}^n (\theta_{\sigma k} \cdot k) / \sum_{k=1}^n \theta_{\sigma k} - 1 \quad (1)$$

軌道における n_e の代表値としては、 u に関する平均 $\overline{n_e}$ を考える。 $\theta_{\sigma k}$ が大きい順に並んでいるために、有効自由度は同時に動かす関節数が多いほど大きく、また同数の関節を動かす場合でも、各 $\theta_{\sigma k}$ が等しいほど大きくなる。このように、有効自由度は、 $\theta_{\sigma k}$ の比に基づいて、ロボットが目標軌道上を運動する際に同時に動かす自由度数を評価するものである。

6) 逆動力学解析

本研究では、Luh のアルゴリズムを Fig. 3 のような伝達機構を持つロボットにも適用できるように拡張し、これを用いて、 $q, \dot{q}, \ddot{q}$ および外力 F からモータ駆動トルク τ_m を求める。この方法は、駆動トルクだけでなく各要素に働く内力も計算するので、要素の強度、たわみ解析にも利用できる。

7) たわみ解析

8) 固有振動解析

一般に、関節部の軸受、減速機、伝達機構の剛性はアームの剛性に比べて小さいので、これらを無視することはできない。そこで本研究では、伝達機構を持つロボットにも適用でき、アームだけでなく軸受、減速機、伝達機構の剛性も考慮した有限要素法によるロボットの弾性体モデルを考え、 $\mathbf{q}$, $\dot{\mathbf{q}}$, $\ddot{\mathbf{q}}$, $\mathbf{F}$ を与えたときの手先のたわみ δ 、および $\mathbf{q}$ を与えたときの固有振動数 f を求める[19]。

9) 機械要素データベース

“TOCARD”は、機械要素および材料のデータベースとその作成ツールも備えている。ここで管理するデータは、大きく2種類に分けられる。ひとつは上記の解析に必要な材料の密度、縦弾性係数、横弾性係数、機械要素の寸法、重量、剛性である。もうひとつは内部機構の設計に用いるデータで、材料の許容応力、機械要素の許容トルクや許容荷重、許容回転速度、およびモータの定格出力である。

10) 軌道生成

さらに、設計条件となる軌道を生成するシステムも持っている。軌道は、以下の4種類の組合せで与えられる。

- (a) 始点、終点と移動時間が与えられたとき、各関節がそれぞれ台形速度曲線で運動する PTP 軌道
- (b) 複数の点とその通過時刻が与えられたとき、それらを通る CP 軌道
- (c) 始点、終点と移動時間が与えられたとき、手先が直線運動する補間軌道
- (d) 始点、通過点、終点と移動時間が与えられたとき、それらを通る手先の円弧補間軌道

4. 基本機構設計

以下、2.5節で述べた3つの設計段階について順に説明する。

最初に、運動学的評価のもとに基本機構を設計する。Fig. 5に示すように、基本機構設計は大きく2つの段階からなる。

Step 1: 現在の産業用ロボットのほとんどは、

- ・直角座標ロボット
- ・円筒座標ロボット
- ・極座標ロボット
- ・垂直多関節ロボット
- ・水平多関節ロボット

に分類できる。そこでまず、これらの中から目的作業に適したロボットタイプを選定する。選定を行うためにはロボットの性能を評価しなければならないが、ロボットタイプだけでは性能を厳密に計算することができない。しかしながら、ロボットの設計熟練者は、各ロボットタイプがどのような性能の特徴を持っているかを経験的に知っている。そこで本研究では、それらの経験的知識と作業に要求される性能とをファジィ理論を用いて大まかに比較することにより、作業に適したロボットタイプを選定する方法を新たに考えた[20]。以下にその概要を述べる。ここで、例の下線部が、ファジィ集合で表現される部分である。

- 1) 選定の際に評価する性能として、設計熟練者が考慮している作動領域、器用さ、速度、精度、可搬重量の5つを

考え、これらとロボットの作業に対する適合度をファジィ集合で表すことにする。

例：作動領域が広い。作業に適している。

- 2) 設計熟練者が持つ各ロボットタイプの性能に関する経験的知識を、ファジィ事実の形で表す。こうした知識はすべて、予めシステムの中に用意しておく。

例：垂直多関節ロボットの作動領域は非常に広い。

- 3) 設計者は、目的作業に要求される各性能をファジィ規則の集合に表現し、入力する。

例：作動領域が広ければ、塗装作業に適している。

作動領域が狭ければ、塗装作業に全く適さない。

- 4) 2)と3)から、多重ファジィ推論 (Mamdani の方法) により各ロボットタイプの作業への適合度を求める。

例：垂直多関節ロボットは、塗装作業に非常に適している。

- 5) すべてのロボットタイプの適合度を求め、最も適したロボットタイプを選定する。

Step 2: 運動学的評価を行いながら対話的に設計変更を繰り返し、自由度およびアーム長・オフセットを決定する。2.3節、2.4節で述べた各評価量の評価基準を以下にまとめておく。

- 1) 設計条件の目標軌道における有効自由度を小さくする。
- 2) 作動領域が、設計条件の作業を行う領域を覆っている。
- 3) ロボットが目標軌道上を運動するとき、各関節変位がその可動範囲内にある。
- 4) 目標軌道における各関節の最大速度・加速度を小さくする。
- 5) 作業に要求されるワークの最大速度・加速度は、目標軌道として間接的に与えられる。
- 6) ロボット全長を小さくする。
- 7) ロボットを目標軌道に沿って動かしたとき、全く動かない関節があれば、削除して自由度を減らす。

Step 1 のロボットタイプの選定では大まかに性能を評価しただけなので、Step 2 の結果に不具合があれば Step 1 に戻り、次に適したロボットタイプに変更する。以上を繰り返して、基本機構を決定する。

5. 内部機構設計

ここでは、大まかな力学的評価のもとにモータ配置と伝達機構の種類を決定し、同時にアーム太さの見積りと機械要素の仮選定を行う。内部機構設計は、大きく3つの段階からなる。

Step 1: 設計者が、Fig. 6 のようにモータ配置と伝達機構の種類を入力する。

Step 2: システムが、要素毎のたわみまたは強度評価に基づいてアーム太さの見積りと機械要素の仮選定を行う。要素 e_i の設計パラメータは、手先側の要素 e_{i+1} から受ける力とモーメント $\mathbf{F}_{i+1}$ を用いて決定できる (Fig. 7)。その結果、 e_i の質量 m_i 、重心位置 $\mathbf{r}_{oi}$ 、慣性テンソル $\mathbf{I}_i$ が決まるので、設計条件の目標軌道に対して e_i の逆動力学解析を行うことにより、 e_i がベース側の要素 e_{i-1} に及ぼす力とモーメント $\mathbf{F}_i$ が計算できる。そこで、手先に近い要素から、上述の要素の設計と逆動力学解析を交互に繰り返すことにより、見積り・仮選定を行う。以下に、各要素の見積り・仮選定の方法をまとめる。

Fig. 6 An example of designed transmission mechanisms

Fig. 7 Automatic estimation of each structure element in the inner mechanism design

- 1) アーム太さは、作用する最大力に対するアームのたわみが許容範囲内にあり、かつアームが最も軽くなるように決定する。
- 2) モータは、ロボットを動かすのに必要十分なパワー、トルクを持つ最も軽いものを選定する。
- 3) 減速機や機械要素は、作用する最大力または最大トルク以上の許容荷重、許容トルクを持つ最も軽いものを選定する。
- 4) 減速機の減速比は、機械インピーダンスマッチングにより決定する。

Step 3: 以上でロボットの全設計パラメータが仮決定されたので、力学的解析が可能となる。設計者は、以下のように2.3節で述べた力学的評価を行う。

- 1) 目標軌道におけるモータの最大駆動トルクを小さくする。
 - 2) 全モータパワーを小さくする。
 - 3) 全重量を小さくする。
 - 4) 作業に要求される可搬重量は、設計条件のワーク重量として間接的に与えられる。
 - 5) 目標軌道における最大たわみを設計条件の許容たわみに近づける。
 - 6) 固有振動数は、ここでは評価しない。
- 5), 6)の設計条件は、次の詳細設計で厳密に検討される。

設計者は、モータ配置と伝達機構の種類をいろいろ変えて上記の3段階を繰り返す、モータ配置と伝達機構の種類を決定す

る。このとき、Step 2において、システムが自動でアーム太さの見積りと機械要素の仮選定を行ってくれるので、設計者の手間と時間は軽減される。

6. 詳細設計

第1章で述べたように、ロボットの高高速高精度化のためには、たわみと固有振動数を許容範囲内に収めつつできるだけ軽量化を図ることが重要である。ところが、内部機構設計における見積り・仮選定は要素毎の局所最適化であり、ロボット全体のたわみや固有振動数を考えた質量と剛性の配分が十分ではない。そこで詳細設計[19]では、設計条件の許容たわみと許容固有振動数の制約条件のもとに、全重量を最小にするようアーム太さと機械要素を修正し、ロボット全体に関する最適化を図る。

ロボット全重量を m 、設計条件の目標軌道における最大たわみを δ 、最小固有振動数を f 、許容たわみを δ_0 、許容固有振動数を f_0 とすると、詳細設計における設計目標は、

$$\text{目的関数: } m \rightarrow \min. \quad (2)$$

$$\text{制約条件: } \delta \leq \delta_0, f \geq f_0 \quad (3)$$

となる。本研究では、これを次式の拡大目的関数 Q を最小にする問題に置き換えて考える。

$$Q \equiv m + \frac{w_d}{\delta_0^2} \{\max(0, \delta - \delta_0)\}^2 + \frac{w_f}{f_0^2} \{\max(0, f_0 - f)\}^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

ここで、 $w_d, w_f (>0)$ は制約条件に対するペナルティで、 δ_0, f_0, w_d, w_f が2.2節の設計条件として入力される。

Step 1: “TOCARD” では、以下の2つの方法により、設計者が式(4)の設計を対話的に行うのを支援する。

- 1) 感度解析を利用したアーム太さ・機械要素の対話的設計
対話的設計では、どの設計パラメータを修正すれば目的関数を改善できるかわかれば、設計者にとって有用である。本研究では、そのような情報として感度を用いる。設計パラメータ p の感度 S_p は、次式で定義される。

$$S_p \equiv \partial Q / \partial p \quad (5)$$

明らかに、感度の大きいパラメータほど Q を小さくするのに効果がある。そこで、システムがすべてのアーム太さ・機械要素の感度を計算し、設計者が最も感度のよいパラメータを選んで修正する。

- 2) アーム太さの自動最適化

アーム太さは連続変数なので、最適化しやすい。そこで、アーム太さの取得範囲を制約条件として与え、勾配射影法により、 Q を最小にするアーム太さをシステムが計算する。

Step 2: 設計変更後、設計者は式(2)(3)に従って全重量、たわみ、固有振動数を評価する。

以上の設計変更と評価を繰り返してアーム太さと機械要素が決定されると、“TOCARD” によるロボットの設計は終了する。

7. 設計例

本章では、“TOCARD” を用いて設計したロボットの例を示す。まず、設計条件を Table 2, Fig. 8, Fig. 9 にまとめる。

次に、設計されたロボットを Fig. 10 に、その主な設計パラメータを Table 3, Table 4, Table 5 に示す。また、ロボット

Table 2 Typical workpiece, allowable deflection and allowable natural frequency given as design conditions

length of workpiece		100.0	[mm]
weight of workpiece		2.0	[kg]
allowable deflection	δ_0	0.5	[mm]
allowable natural frequency	f_0	25.0	[Hz]
penalty for deflection	w_d	10000.0	[kg]
penalty for frequency	w_f	10000.0	[kg]

Table 3 Arm parameters of designed robot

arm	length [mm]	diameter [mm]	thickness [mm]
B_0	320.0	130.0	9.0
B_1	320.0	120.0	10.0
B_2	400.0	120.0	2.0
B_3	280.0	84.0	2.0
B_4	120.0	84.0	2.0
B_5	120.0	84.0	2.0
B_6	40.0	44.5	2.0
total	1600.0		

cylinder type (See Fig. 2), duralumin

Table 4 Joint parameters of designed robot

joint	type (See Fig. 2)	distance between bearings [mm]	bearing (internal diameter) [mm]
J_1	(d)	80.0	6812 (60.0)
J_2	(c)	140.0	6809 (45.0)
J_3	(c)	106.0	6807 (35.0)
J_4	(d)	60.0	6808 (40.0)
J_5	(c)	100.0	6804 (20.0)
J_6	(d)	40.0	6805 (25.0)

Table 5 Joint driving system parameters of designed robot

joint	motor (rated power [W])	harmonic drive (reduction ratio)
J_1	L 402-011 (23.0)	FRS-20-160 (160)
J_2	L 720-012 (200.0)	CSS-32-160 (160)
J_3	L 511-012 (110.0)	CSS-32-160 (160)
J_4	L 402-011 (23.0)	CSS-20- 80 (80)
J_5	R 301-011 (11.0)	FRS-20-160 (160)
J_6	R 301-011 (11.0)	CSS-20- 50 (50)

(The motor and harmonic drive are attached to their joint axis directly.)

Table 6 Performance of designed robot

mean effective D. O. F. on given trajectory	4.14
total motor power	378.0 [W]
total weight	24.0 [kg]
maximum deflection on given trajectory	0.468 [mm]
minimum natural frequency on given trajectory	25.0 [Hz]

Fig. 8 Typical trajectory given as design condition and animation of designed robot moving along it

Fig. 9 Required working space given as design condition and workspace of designed robot

Fig. 10 Designed robot using "TOCARD"

Fig. 11 Maximum deflection (0.468[mm]) on given trajectory of designed robot

Fig. 12 Minimum natural frequency (25.0[Hz]) on given trajectory of designed robot

Fig. 13 Change in total weight, deflection and natural frequency with iteration of optimal design steps in detailed structure design stage

の性能をFig. 8, Fig. 9, Fig. 11, Fig. 12, Table 6にまとめる。

Fig. 13は、詳細設計において設計変更を繰り返したときのロボットの全重量、たわみ、固有振動数の変化を示している。図のように、少ない設計変更回数で、たわみ、固有振動数を設計条件の許容範囲内に収めつつ、約1.1[kg]の軽量化を図ることができた。

8. お わ り に

本研究では、ロボットの総合CADシステム“TOCARD”を開発した。“TOCARD”の特徴を以下にまとめる。

- 1) ロボットのメカニズムの設計を目的とする。特に、基本機構から内部機構に至るまでのあらゆる設計パラメータの設計を一貫して行う。
- 2) 目的とする単一あるいは複数の作業を実現できるロボットを設計する。
- 3) 設計パラメータと設計のための評価量の関係を調べた結果、基本機構は運動学的評価に、内部機構は力学的評価に関係が深いことが明らかになった。そこで、ロボットの設計を運動学的評価に基づく基本機構の設計と力学的評価に基づく内部機構の設計とに分けることにより、設計システムを簡単にしている。
- 4) ロボットを効率よく設計するために、設計システムは、内部機構の設計をさらに2段階に分けた基本機構設計、内部機構設計、詳細設計の3段階から成り、各段階で局所的な最適化を図る。
- 5) 設計者による設計変更と評価を繰り返す対話的設計を基本とし、これを支援する独自の設計手法を有する。

- 6) 設計に必要な解析のためのロボット・シミュレータ、および機械要素をカタログから選定するための機械要素データベースとその作成ツールも備えている。

また、“TOCARD”を用いてロボットの設計を行い、システムの有用性を検証した。

“TOCARD”を用いることにより、目的作業に適した機能と性能を持つロボットを設計できるとともに、設計に要する時間、費用を節約することが可能となる。

参 考 文 献

- [1] V. Potkonjak, M. Vukobratovic and D. Hristic: “Interactive Procedure for Computer-Aided Design of Industrial Robots Mechanisms,” Proc. 13th I. S. I. R., pp. 16-85-94, 1983.
- [2] V. Potkonjak and M. Vukobratovic: “Computer-Aided Design of Manipulation Robots via Multi-Parameter Optimization,” Mechanism and Machine Theory, vol. 18, no. 6, pp. 431-438, 1983.
- [3] D. C. H. Yang and T. W. Lee: “Heuristic Combinatorial Optimization in the Design of Manipulator Workspace,” IEEE Trans., SMC-14, 4, pp. 571-780, 1984.
- [4] R. G. Fenton and J. Lipitkas: “Optimum Design of Manipulators,” Computer-Aided Engineering and Robotics, pp. 68-73, 1984.
- [5] C. D. Lin and F. Freudenstein: “Optimization of the Workspace of a Three-link Turning-Pair Connected Robot Arm,” Int. J. Robotics Research, vol. 5, no. 2, pp. 104-111, 1986.
- [6] R. Vijaykumar, K. J. Waldron and M. J. Tsai: “Geometric Optimization of Serial Chain Manipulator Structures for Working Volume and Dexterity,” Int. J. Robotics Research, vol. 5, no. 2, pp. 91-103, 1986.
- [7] A. G. Erdman, T. Thompson and D. R. Riley: “Type Selection of Robot and Gripper Kinematic Topology Using Expert System,” Int. J. Robotics Research, vol. 5, no. 2, pp. 183-189, 1986.
- [8] P. Chedmail: “Robot Structures And Actuators Optimization,”

- Proc. 16th I. S. I. R., pp. 185-195, 1986.
- [9] B. Paden: "Optimal Kinematic Design of 6R Manipulators," Int. J. Robotics Research, vol. 7, no. 2, pp. 43-61, 1988.
 - [10] C. M. Gosselin and M. Guillot: "The Synthesis of Manipulators with Prescribed Workspace," ASME, J. Mechanical Design, vol. 113, pp. 451-455, 1991.
 - [11] C. J. J. Paredis and P. K. Khosla: "Kinematic Design of Serial Link Manipulators from Task Specifications," Int. J. Robotics Research, vol. 12, no. 3, pp. 274-287, 1993.
 - [12] J. Kim and P. K. Khosla: "A Formulation for Task Based Design of Robot Manipulators," Proc. IROS '93, pp. 2310-2317, 1993.
 - [13] 琴坂, 松元, 高田, 浅間, 平岡: "保全ロボット用設計支援システム—第1報 作業性を考慮した機構の評価", 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, pp. 565-566, 1990.
 - [14] 琴坂, 松元, 高田, 浅間, 平岡: "保全ロボット用設計支援システム—第2報 作業の方向性を考慮した総合的機構評価", 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, pp. 119-120, 1991.
 - [15] 井上健司: "ロボットの運動学・動力学シミュレータ", 日本機械学会, no. 900-76, pp. 71-78, 1990.
 - [16] M. Takano: "A New Effective Solution for Inverse Kinematics Problem (Synthesis) of a Robot with Any Type of Configuration," J. Fac. Eng. Univ. Tokyo (B), vol. 38, no. 2, pp. 107-135, 1985.
 - [17] 井上, 高野, 佐々木: "ロボットのCADシステムの開発研究—第5報 逆運動学を利用した作業領域の計算法", 1989年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, pp. 279-280, 1990.
 - [18] J. Y. S. Luh, M. W. Walker and R. P. C. Paul: "On-line Computational Scheme for Mechanical Manipulators," J. Dynamic Systems, Measurement, Control, vol. 102, pp. 69-76, 1980.
 - [19] 井上, 高野, 佐々木: "感度を利用した動力学に基づくロボット構造の最適設計システム", 日本ロボット学会誌, vol. 9, no. 1, pp. 18-28, 1991.
 - [20] K. Inoue, M. Takano and K. Sasaki: "Type Selection of Robot Manipulators Using Fuzzy Reasoning in Robot Design System," Proc. IROS '93, pp. 926-933, 1993.

井上健司 (Kenji Inoue)

1963年10月10日生。1988年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年、東京大学工学部助手。1993年大阪大学工学部助手。1995年より同学部講師となり現在に至る。ロボット設計システム、超冗長マニピュレータ、移動型マニピュレータの研究に従事。博士(工学)。精密工学会会員。(日本ロボット学会正会員)

高野政晴 (Masaharu Takano)

1936年11月25日生。1963年3月東京大学大学院工学系研究科修了。以降東京大学助手、講師、助教授を経て現在に至る。専門はロボットの機構、運動制御、振動一般問題、および運動の高速化技術。精密工学会、日本機械学会、日本騒音制御工学会、等の会員。(日本ロボット学会正会員)

椎名建一 (Ken'ichi Shiina)

1965年4月8日生。1988年電気通信大学電気通信学部材料科学科卒業。同年、川崎製鉄(株)入社。1991年から2年間東京大学工学部に留学。1994年より川崎情報システム(株)に出向、現在に至る。ネットワーク事業に従事。工学士。

佐々木健 (Ken Sasaki)

1957年1月15日生。1982年東京大学大学院精密機械工学専攻修士課程修了。同年、日本電気(株)入社。1985年東京大学工学部助手。現在、同学部助教授。触覚センサ、多指ハンドのマニピュレーション、超音波センサの研究に従事。精密工学会会員。(日本ロボット学会正会員)