機械製品に対する統合的 CAD/CAM における多層的意思決定*

吉村 允孝^{*1}, 竹内 淳^{*2}

Multiphase Decision-Making of Integrated CAD and CAM for Machine Products

Masataka YOSHIMURA and Atsushi TAKEUCHI

This paper proposes a method for integrating CAD and CAM, in which both maximization of the product performance and minimization of the product manufacturing cost are sought. In order to obtain effectively and efficiently the optimum decision variables for the integrated product design and process design, a method for describing machine-parts shapes is first developed with the main consideration being given to the description of the contact surfaces. Then, a multiphase decision-making method using those data is constructed in which the decision-making process is divided into three phases, and the shapes, materials, and manufacturing methods of machine parts are determined in steps according to multiphase processes. Finally, the proposed methods are applied to designs of an industrial robot for demonstrating the effectiveness of the methods.

Key Words: Production System, Computer-Aided Design (CAD), Computer-Aided Manufacturing (CAM), Integrated CAD/CAM, Design Optimization, Multiphase Decision Making, Parts-Description Methods, Product Performance, Product Manufacturing Cost, Contact Surface

1. 緒 論

近年のコンピュータとその関連技術の発達によって、機械製品を設計する場合、製品設計においては CAD、構造解析においては種々のはん用の構造解析プログラム、工程設計においては CAM といったコンピュータ支援による自動化がそれぞれの分野でなされてきた⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、これらすべてを統合化した自動化のシステムとなるとまだまだ研究段階であり、統合化にはさまざまな問題がある。その問題点としては次のようなものがある。

(1) 製品設計の最適化における評価基準である性能面からの要求と、工程設計の最適化における評価基準である製造費用をはじめとする製造面からの要求とは一般的にトレード・オフの関係にあり、各段階において最適な設計が行われたとしてもそれが統合的には必ずしも最適解であるとは限らない。

(2) 性能と製造費用は同一のデータを用いて評価することができず、性能と製造費用を評価するためには、それぞれに適したデータを作成する必要がある。

したがって、性能と製造費用を同時に評価することが困難である。

(3) 実際の製品を設計するとき、その設計変数の数は非常に多く、寸法や性能に関する制約も多いためすべての設計変数を同時に決定しようとする計算に多大な時間を要す。しかも解が局所的な最適解に収束してしまう可能性が高い。

CAD と CAM の統合化に関するこれまでの研究としては、単に情報の流れを円滑化することをめざしたもの⁽³⁾⁽⁴⁾が多い。また、製品設計と工程設計を総合的な観点から統合化したもの⁽⁵⁾もあるが、上で述べたような問題点を十分に解決するには至っていない。

そこで、本研究では上記の問題を解決するために、まず、機械製品を構成する機械部品の接触面を重視した形状記述法を構築する。そして、その形状記述法をもとに作成された形状記述データから、性能の解析を行うための解析用データおよび製造費用を評価するための機械部品の加工面に関するデータへ自動的に変換するアルゴリズムを構築する。また、性能と製造費用を考慮した統合的な多層的意思決定法を提唱する。この方法では、設計対象部品を設計する過程と決定すべき設計変数を数層に分割し、各層における最適化により、設計変数を段階的に決定していく。

* 平成2年11月6日 関西支部第249回講演会において講演、原稿受付 平成3年1月17日。

^{*1} 正員、京都大学工学部 (〒606 京都市左京区吉田本町)。

^{*2} 学生員、京都大学大学院。

以下では、まず接触面を重視した形状記述法について述べ、次に CAD と CAM の統合化のための多層的意思決定の手順について述べる。さらに、多関節ロボットへの適用例により、本設計法の有効性を示す。

2. CAD と CAM の統合的意思決定の流れ

機械製品の製品設計と工程設計を統合的に最適化する場合、その設計変数は非常に多く、寸法や性能に関する制約も多いため、すべての設計変数を同時に決定しようとする計算に多大な時間を要し、しかも解が局所的な最適解に収束してしまう可能性が高い。

そこで、本研究では、上記の問題を解決するために、多層的意思決定法を提唱する。この方法では、設計をいくつかの層に分割し、各層ごとに評価基準および決定すべき設計変数を設定し、最適化を行っていく。このようにすれば、各層における設計変数および制約条件の数は、すべての設計解を同時に求めようとするときよりも当然少なくなる。したがって、各層における最適化が容易になる。また、層を重ねるごとに設計可能解の範囲を小さくしていけば、ついには大局的な最適解に到達することが可能となる。本研究では、製品設計と工程設計の統合的設計過程を次の三つの層に分割する。

第1層：材料および素材調達工程の候補解の抽出

第2層：主要な寸法、材料および加工条件の決定

第3層：詳細な形状、寸法および加工条件の決定

また、各層における意思決定を効率的に行うためには、性能と製造費用を同時に評価する必要がある。そのため、本研究では、接触面を重視した形状記述法を提唱する。この形状記述法をもとに機械製品に対する形状記述データを作成し、そのデータを用いて性能と製造費用を同時に評価して、各層における最適化を効率的に行っていく。

3. 機械製品に対する形状記述法

3.1 接触面を重視した形状記述法 本研究では、性能と製造費用に大きな影響を持つ機械部品の接触面を重視して、以下のように機械製品の形状を記述していく。

図1に例を示すように、まず製品をそれを構成する部品に分割し、次に各部品を円柱や角柱といった簡単な形状に分割する。このとき、円柱や角柱の中心軸が他の部品を構成する円柱や角柱の中心軸と交わる場合には、その点でさらに細かく分割する。こうして得られた部品を構成する最小単位のことを以下では、“形状要素”と呼ぶとする。そして、製品におけるある1

点の座標を基準座標にとって、この形状要素の両端面の中心の座標値を定め、断面の寸法および他の部品との接触状態をデータとして与えて形状を記述する。図1では、形状要素として長方形断面、円形断面、半円形断面をもつ要素に分割しているが、本研究では、主にこのような形状要素を考慮している。この方法による利点として、次のことがあげられる。

(1) 各形状要素の両端面の中心を直線で結ぶことによって、製品は、はりモデルとして表現され、部品間の接触は、はりの交わりとして表現される。この交点において接触する形状要素の形状より接触面の形状が記述できる。接触面は他の面と比べて高い精度が要求され、このため、他の面よりも加工費用が大きくなる。したがって、接触面を他の面と区別することによって、加工費用などの評価が行いやすくなる。

(2) 接触面の状態により性能が左右されるので、接触面を他の面と区別することによって性能の評価が行いやすくなる。すなわち接触面の状態に応じた結合部要素を介して部品と部品を合成することによって、機械製品全体の解析を行うための構造解析用のデータを容易に作成することができる。

3.2 形状記述データの内容 3.1節で述べた形状記述法に基づいて機械製品の形状を記述していく際に必要なデータを、以下に示す。

(a) 製品全体のデータ

(1) 部品数、(2) 部品間のつながり

(b) 各部品のデータ

(1) 部品番号、(2) 材料名

(3) その部品を構成する形状要素の数

(c) 各形状要素のデータ

(1) 形状要素番号、(2) 断面形状

(3) 両端面の中心の座標値、(4) 断面の寸法

(5) 他の部品との接触状態

各形状要素のデータのうち、(5)にあげた他の部品

図1 機械部品の形状要素への分割(斜線部分は、穴の形状要素を表す)

との接触状態とは、ある形状要素が他の部品と接触している場合、どのように接触しているのかを示すデータである。その際、接触状態をいくつかのパターンに分けておき、それらのうちのどのパターンにあてはまるかによって接触状態を識別させる。接触状態のパターンとして、次の三つの状態を設定する。

- (1) 他の部品との接触がない状態
- (2) 他の部品との間に相対的な運動がない接触状態
- (3) 他の部品との間に相対的な運動がある接触状態

4. 製品性能と製造費用の算出法

4.1 製品性能の評価法

4.1.1 形状記述データを構造解析用データに変換するアルゴリズム 製品設計段階においては、製品が要求された性能を満足しているかどうかの判断や性能の最適化を行うために、形状に関するデータを構造解析用のデータに変換する必要がある。以下に、2.3節で示した機械製品に対する形状記述データを用いて構造解析用のデータを自動的に作成していくアルゴリズムを示す。ただし、本研究では、構造解析モデルが構造要素に対応するはり要素と柔結合部に対応するばね要素で表現される製品を対象とする。この場合、はり要素間に結合部要素としてのばね要素を挿入する必要があるかどうかは部品間の接触状態によって決まる。

[ステップ1] 部品を構成する形状要素の形状記述データを入力する。その際、3.2節で示した形状記述データに、さらに各形状要素を構造解析のモデル化に含めるかどうかを、データとして付け加える。そして、構造解析のモデルに含める必要がある形状要素についてはステップ2へ進む。他の形状要素については以下のステップは不要であるので形状記述データから除外する。

[ステップ2] 各形状要素をはり要素とみなして、はり要素に関するデータを算出する。また、各形状要素の両端面の通し番号を入力する。ただし、端面の中心の座標値が同じであれば同じ番号を付ける。以下ではこの番号を節点番号と呼ぶ。

[ステップ3] 異なる部品間で同じ節点番号を持つ形状要素があるかどうかを節点番号の小さいものから順に調べる。ただし、1度調べたものについては2度は調べないものとする。節点番号が一致するものがあれば、次のステップへ進む。なければ次の節点番号について調べる。すべての節点番号について調べたら、処理を終了する。

[ステップ4] 同じ節点番号を持つ形状要素間の接触状態を調べる。形状要素間で相対的な運動がある接触状態であればステップ5へ進む。そうでなければステップ3へもどる。

[ステップ5] 形状要素間にばね要素を入れて、節点番号を付け替える。節点番号の付け替えは、まず同じ節点番号を持つ端面のうち部品番号が大きいほうの部品に属する端面の節点番号を、ステップ3で既に調べた節点番号のうちの最も大きな節点番号に1を加えた番号にする。そして、この端面よりも後の端面の節点番号を、この端面を起点とした通し番号に付け替える。そして、ステップ3へもどる。

上記の手順によって、構造解析に必要なデータを作成する。このアルゴリズムにおいては、部品間の接触は端面の通し番号の一致によって認識する。そして、3.2節で述べた接触状態のパターンのうち、どの接触状態であるかを入力することによって、適当なばね要素を選択させて、構造解析のためのデータを自動的に作成していく。

4.1.2 製品性能の解析と評価 4.1.1項で述べたアルゴリズムによって作成された構造解析用のデータをもとに、構造解析法の一つである動剛性合成法⁽⁶⁾を用いて性能の解析を行う。この構造解析法では、機械製品の静剛性および振動特性を評価することができる。なお、構造解析用のデータの作成から動剛性合成法を用いた性能の解析までは、形状記述データが入力されればすべて自動的に行われる。

4.2 製造費用の評価法

4.2.1 形状記述データを製造費用算出に必要なデータに変換するアルゴリズム 本研究において製造費用算出のために必要とされるデータとは、部品の加工面に関するデータであり、そのデータは加工の種類によって次のように異なる。

- (1) 旋削加工：素材の切削径、切削長さ
- (2) フライス加工：切削長さ
- (3) 穴あけ加工：穴径、加工穴の長さ

これらのデータを接触面と他の面とを区別して作成する。接触面は他の面と比べて高い精度が要求され、このため、他の面よりも加工費用が大きくなる。したがって、接触面を他の面と区別することによって、加工費用の評価が行いやすくなる。

本研究で対象となる部品は、上記三つの加工によって素材から完成品へと変換されるものとする。形状記述データから加工面のデータへの変換は、以下の手順で自動的に行われる。

[ステップ1] 部品を構成する形状要素の形状記

述データを入力する。

〔ステップ2〕 各形状要素の断面形状を調べ、断面形状が円ならば旋削加工、半円または長方形ならばフライス加工、円形の穴ならば穴あけ加工を選ぶ。

〔ステップ3〕 各形状要素のすべての面について、ステップ2で選ばれた加工法に従って加工面に関するデータを算出する。その際、接触面と他の加工面とを区別してデータを算出する。

〔ステップ4〕 形状要素間の接触状態によって、加工の必要がない面や加工を同時に行うことが可能となる複数の面を認識する。

〔ステップ5〕 一つの部品について、同時に加工される面の数と各加工面に関するデータを算出する。

上記の手順を部品ごとに行う。こうして得られたデータをもとに製造費用の算出を行う。

4.2.2 製造費用の算出 機械製品の機械加工に要する製造費用は、次のような費用からなる。

- (1) 材料費, (2) 素材調達費, (3) 準備費用
- (4) 切削費用, (5) 工具交換費用, (6) 工具費
- (7) 間接費

これらのうち材料費と鋳造費、溶接費などの素材調達費を除いたものが切削加工に関する費用であり、以下ではこの費用のことを切削加工費と呼ぶ。この切削加工費 C_c を、加工時の送り量 s_i 、切削速度 v_i ($i=1, 2, \dots, n_p$; ここで n_p : 加工工程数) をパラメータとして表すと、次式ようになる。

$$C_c = k_l t_p + \sum_{i=1}^{n_p} \lambda_{oi} [(k_l + k_{ei}) / s_i v_i + \{(k_l t_{ci} + k_{ui}) / C_{oi}\} s_i^{1/m_i-1} v_i^{1/n_i-1}] \quad \dots\dots\dots (1)$$

k_l : 労務費, 経常費など, t_p : 準備時間, t_{ci} : 第 i 工程における切刃交換時間, k_{ui}, k_{ei} : 第 i 工程における工具費, 切削経費, $\lambda_{oi} = \lambda_i s_i$, λ_i : 第 i 工程における切削定数, m_i, n_i, C_{oi} : 第 i 工程における定数
ただし、切削定数とは加工の種類、加工面の寸法によって決まる定数であり、形状記述データより 4.2.1 項のアルゴリズムを用いて求めることができる。

上式からわかるように切削加工費は第 i 工程における送り量 s_i 、切削速度 v_i の設定の仕方によって変化する。しかし、送り量と切削速度を設定する際には、次のような制約があることを考慮する必要がある。

(1) 加工される面の仕上面粗さは、使用する工具が既に決められている場合には、送り量によって変化する。送り量が大きくなるほど仕上面粗さも大きくなるので、仕上面粗さを一定値以下におさえるためには、送り量もある値以下に設定しなければならない。

(2) 切削加工によって生じる切削抵抗は、工作機

械の電動機動力を超えることはできない。切削抵抗は、送り量や切削速度によって変化する。切削抵抗が使用する工作機械の電動機動力を超えないように、送り量や切削速度を設定しなければならない。

すなわち、形状記述データより 4.2.1 項のアルゴリズムを用いて切削定数を求め、これらの制約条件のもとで各工程における切削加工費が最小となるように最適送り量、最適切削速度を順次決定する。その際、接触面については仕上面粗さの制約を他の面よりも厳しくすることによって切削加工費に及ぼす影響を評価することができる。こうして算出された各工程における切削加工費の和を評価関数とすることによって、部品全体の切削加工費の最小化を図ることができる⁽¹⁾。

5. 多層的意思決定法

5.1 意思決定の基本概念 本研究では、2章で述べたように、製品設計と工程設計の統合的設計過程における意思決定を三つの層に分割して行っていく。すなわち、第1層では、数多い候補解の中から効率的に適当な候補解を選択し、第2層では、製品全体としての評価を行い、第3層では、部品レベルの詳細な設計を行っていく。その際、主に対象となる部品は、製品性能と製造費用に対して大きな影響を持ち、設計にあたってその性能に対するおおまかな要求などが与えられている部品である。このような部品を本研究では、“主要部品”と呼ぶことにする。主要部品を指定することによって、設計の意思決定事項や評価基準が明らかになるので、主要部品の指定は、第1層における意思決定の前に行う。

設計者は、主要部品を指定した後、次の手順で各層における意思決定を行う。まず各層において考慮すべき製品性能と、その性能に大きな影響を持つ寸法箇所を設計者が指定する。次に、設計すべき機械製品の形状より、3章で述べたようにして形状記述データを作成する。さらに、設計者は寸法に関する制約と製品性能の満足水準を設定する。そのデータをもとに4章で述べたようにして製品性能と製造費用が自動的に評価され、製品性能と製造費用の両者を考慮した設計解が決定される。

5.2 材料、素材調達工程の候補解の抽出 (第1層)

この層においては、既に主要部品が指定され、その概形は決定しているものとして、その形状を実現するための材料および素材調達工程の候補解を抽出する。以下にその手順を示す。

〔ステップ1〕 第1層で考慮する性能を指定する。

[ステップ2] 第1層で考慮する性能より、第1層で考慮すべき主要部品の寸法箇所を指定し、その寸法 b_{i_1} ($i_1=1, 2, \dots, l_1$; ここで l_1 : 第1層で考慮する寸法の数) の取り得る範囲を指定する。

[ステップ3] 主要部品の形状に従って、可能な材料および素材調達工程の候補解を抽出する。

[ステップ4] 主要部品の形状に従って、3章で述べた形状記述法をもとに形状記述データを作成する。

[ステップ5] ステップ3で抽出されたそれぞれの候補解に対して、材料費 C_m 、素材調達工程にかかる費用 C_s を算出し、第1層における製造費用 C_1 を

$$C_1 = C_m + C_s \dots\dots\dots (2)$$

とする。

[ステップ6] ステップ4で作成した形状記述データより第1層で考慮する性能を表す値 P_{j_1} ($j_1=1, 2, \dots, m_1$; ここで m_1 : 第1層で考慮する性能の数) を算出する。ただし、 P_{j_1} は小さな値をとるほど性能がよいものとする。

[ステップ7] 第1層における製造費用および性能の満足水準をそれぞれ $C_1^U, P_{j_1}^U$ とし、候補解のうち、

$$C_1 > C_1^U \text{ または } P_{j_1} > P_{j_1}^U$$

となるような候補解を除外する。

5・3 主要な寸法、材料および加工条件の決定 (第2層) この層で行うことは、第1層で残った複数の候補解に対して、主要な寸法を決定し、そのうちで製造費用が最小となる解を一つ選択することである。以下にその手順を示す。

[ステップ1] 第2層で考慮する性能を指定する。

[ステップ2] 第2層で考慮する性能より、第2層で考慮すべき寸法箇所を指定し、その寸法 b_{i_2} ($i_2=1, 2, \dots, l_2$; ここで l_2 : 第2層で考慮する寸法の数) の取り得る範囲を指定する。

[ステップ3] 3章で述べた形状記述法をもとに形状記述データを作成する。

[ステップ4] [ステップ3]で作成した形状記述データより4・2・1項のアルゴリズムおよび4・2・2項で述べた切削加工費の算出法を用いて、第2層における切削加工費 C_{c_2} および加工時の送り量 s_{k_2} と切削速度 v_{k_2} ($k_2=1, 2, \dots, n_2$; ここで n_2 : 第2層で加工する部分の数) を算出する。

[ステップ5] 形状記述データより第2層で考慮する性能の値 P_{j_2} ($j_2=1, 2, \dots, m_2$; ここで m_2 : 第2層で考慮する性能の数) を算出する。ただし、 P_{j_2} は小

な値をとるほど性能がよいものとする。

[ステップ6] 各候補解に対して、第2層までで評価される製造費用 $C_2 = C_1 + C_{c_2}$ を目的関数とし、それを最小化する以下の最適化問題を解く。

$$\left. \begin{array}{l} \text{目的関数: } C_2 \rightarrow \text{最小化} \\ \text{制約条件: } b_{i_2}^L \leq b_{i_2} \leq b_{i_2}^U \\ P_{j_2} \leq P_{j_2}^U \\ \text{ただし, } b_{i_2}^L: b_{i_2} \text{ の下限値} \\ b_{i_2}^U: b_{i_2} \text{ の上限値} \\ P_{j_2}^U: P_{j_2} \text{ の満足水準} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

これより、すべての候補解のうちで製造費用が最小になるものを、第2層における解とする。

こうして、第2層においては主要部品の材料、主要な寸法および各加工面を加工するときの送り量と切削速度などが決定される。

5・4 詳細な形状、寸法および加工条件の決定 (第3層) この層で行うことは、主要部品において第2層まででは扱わなかった箇所の詳細な形状とその寸法、および加工条件を決定することである。以下にその手順を示す。

[ステップ1] 第3層で考慮する性能を指定する。

[ステップ2] 第3層で考慮する性能より、第3層で考慮すべき寸法箇所を指定し、その寸法 b_{i_3} ($i_3=1, 2, \dots, l_3$; ここで l_3 : 第3層で考慮する寸法の数) の取り得る範囲を指定する。

[ステップ3] 3章で述べた形状記述法をもとに、形状記述データを作成する。

[ステップ4] [ステップ3]で作成した形状記述データより、4・2・1項のアルゴリズムおよび4・2・2項で述べた切削加工費の算出法を用いて、第3層における切削加工費 C_{c_3} および加工時の送り量 s_{k_3} と切削速度 v_{k_3} ($k_3=1, 2, \dots, n_3$; ここで n_3 : 第3層で加工する部分の数) を算出する。

[ステップ5] 形状記述データより第3層で考慮する性能を表す値 P_{j_3} ($j_3=1, 2, \dots, m_3$; ここで m_3 : 第3層で考慮する性能の数) を算出する。ただし、 P_{j_3} は小さな値をとるほど性能がよいものとする。

[ステップ6] 第2層で得られた解に対して、第3層までで評価される製造費用 $C_3 = C_2 + C_{c_3}$ を目的関数とし、それを最小化する以下の最適化問題を解く。

$$\begin{aligned}
 & \text{目的関数: } C_3 \rightarrow \text{最小化} \\
 & \text{制約条件: } b_{is}^l \leq b_{is} \leq b_{is}^u \\
 & \quad P_{js} \leq P_{js}^u \\
 & \quad \text{ただし, } b_{is}^l: b_{is} \text{ の下限値} \\
 & \quad \quad b_{is}^u: b_{is} \text{ の上限値} \\
 & \quad P_{js}^u: P_{js} \text{ の満足水準}
 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

こうして、第3層においては詳細な形状、寸法および各加工面を加工するときの送り量、切削速度などが決定される。

6. 適用例

本章では、5章までの方法論を図2に示すような多関節ロボットの設計に適用する。設計対象部品（主要部品）はロボットの腕となる部品1と部品2である。他の部品については既に設計がなされていて、その性能は十分に満足できるものとする。

6・1 第1層（材料、素材調達工程の候補解の抽出）

[ステップ1] ロボットの設計においては、自重

の軽減、位置決め精度の向上、高速化、コストダウンなどの点からロボットアームの軽量化が重要視されている。したがって、第1層では性能として部品の重量 W_T を評価対象とする。

[ステップ2] 第1層において考える部品1、部品2の形状を図3に示す。第1層において考慮する寸法は、部品の重量に影響を与える部品1の断面の幅 L_{11} , L_{12} , 肉厚 L_{13} , L_{14} および部品2の断面の幅 L_{21} , L_{22} , 肉厚 L_{23} , L_{24} である。長手方向の寸法は必要以上に大きくしても作動性が悪くなり、製造費用も高くなるので寸法制約の下限値をとるものとする。寸法に関する制約条件を以下に示す。

$$L_{11} \leq 10.0$$

$$L_{12} \leq 12.0$$

⋮

$$L_{22} - 2L_{24} \geq 4.0 \quad (\text{単位はすべて cm})$$

[ステップ3] 部品1の材料と素材調達工程の候補解を表1に示す。部品2についても同じ候補解が抽

表1 部品1の材料と素材調達工程の候補解

	Material	Preparation or manufacturing methods of parts
Case 1	Mild steel	Cutting plate materials and welding
Case 2	Aluminum	Casting
Case 3	Titanium steel	Cutting plate materials and welding

表2 第1層、第2層における部品1の形状記述データ

Part1: Material M₁, Number of segments 4

A	B	C	D	E
1	1	(125, 89.5, 0)(155, 37.5, 0)	$L_{11}, L_{12}, L_{11} - 2L_{13}, L_{12} - 2L_{14}$	2
2	2	$(155, 37.5, \frac{1}{2}L_{11})(155, 37.5, \frac{1}{2}L_{11} - L_{13})$	$L_{12}, 0$	2
3	2	$(155, 37.5, \frac{1}{2}L_{11} - L_{13})(155, 37.5, L_{13} - \frac{1}{2}L_{11})$	$L_{12}, L_{12} - 2L_{14}$	2
4	2	$(155, 37.5, L_{13} - \frac{1}{2}L_{11})(155, 37.5, -\frac{1}{2}L_{11})$	$L_{12}, 0$	2

A: Segment number

B: Cross-sectional shapes

(1: rectangle, 2: semicircle, 3: circle)

C: Coordinates of the center on each of both sides surfaces

D: Dimensions of cross-sections

E: Contact conditions with other parts

(1: no contact
2: contact with no relative motion
3: contact with relative motion)

図2 多関節ロボットの外観図

(a) 部品1

(b) 部品2

図3 第1層、第2層において考える部品形状

出される。

[ステップ4] 3章で述べた形状記述法をもとに部品1, 部品2の形状記述データを作成する。その一例として部品1の形状記述データを表2に示す。

[ステップ5] [ステップ3]で挙げたそれぞれのケースについて、第1層における製造費用 C_1 を算出した結果は、次のとおりである。

部品1	ケース1:	3 090 [¥]
	ケース2:	5 286 [¥]
	ケース3:	32 078 [¥]
部品2	ケース1:	4 391 [¥]
	ケース2:	7 512 [¥]
	ケース3:	61 175 [¥]

[ステップ6] [ステップ3]で挙げたそれぞれのケースについて性能の評価対象である重量 W_T を計算した結果は、次のとおりである。

部品1	ケース1:	121.12 [N]
	ケース2:	43.17 [N]
	ケース3:	48.15 [N]
部品2	ケース1:	172.13 [N]
	ケース2:	61.35 [N]
	ケース3:	75.05 [N]

ただし、製造費用、重量は、第1層で考慮する寸法がその下限値をとったときのものである。

[ステップ7] 第1層における製造費用および重量の満足水準を、次のように定める。

$$C_1^U = 20\,000 \text{ [¥]}, W_T^U = 250.0 \text{ [N]}$$

満足水準を満たす候補解の組合せは、部品1がケース1, 部品2がケース2の場合, 部品1がケース2, 部品2がケース1の場合, そして, 部品1, 部品2ともにケース2の場合の3通りである。

6・2 第2層(主要な寸法, 材料および加工条件の決定)

[ステップ1] 第2層では、性能として第1層に引続き重量 W_T を評価する。さらに、ロボットアームの先端部の位置決め精度を重視する。それは近似的に、ロボットアーム先端部の静コンプライアンス f_s で評価できるものとする。よって、第2層で評価する性能は、重量 W_T と静コンプライアンス f_s である。

[ステップ2] 第2層において考える部品1, 部品2の形状および寸法箇所は第1層と同じであり、その寸法の制約条件も同じである。

[ステップ3] 第3章で述べた形状記述法をもとに、部品1, 部品2の形状記述データを作成する。

[ステップ4] 4・2節で述べた方法を用いて、形状記述データより、第2層における切削加工費を算出

する際の制約条件として、次のものを考慮する。

$$\text{仕上面粗さの制約 } R \leq 1.0 \times 10^{-5} \text{ [m]}$$

$$\text{工作機械の動力の制約 } H \leq 5.0 \text{ [PS]}$$

ここで、 R :仕上面粗さ、 H :切削抵抗

ただし、すべての加工は同種の NC 工作機械を用いて行われるものとする。

[ステップ5] 第2層において評価する性能は、重量 W_T と静コンプライアンス f_s である。これらの値は、形状記述データより4・1節のアルゴリズムを用いて求められる。4・1節のアルゴリズムによって、図2の多関節ロボットは、図4に示す解析モデルに変換される。

[ステップ6] 第2層における最適化問題は次のようになる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{目的関数: 第2層までで評価される製造費用} \\ C_2 = C_1 + C_2 \rightarrow \text{最小化} \\ \text{制約条件: 寸法については, 第1層と同様.} \\ \text{性能については,} \\ W_T \leq 250.0 \text{ [N]} \\ f_s \leq 4.5 \times 10^{-6} \text{ [m/N]} \end{array} \right\}$$

.....(5)

この最適化問題では、静コンプライアンス f_s が、決定変数である寸法の関数として数式化できないために、ただちに厳密解を求めることが困難である。静コンプライアンス f_s は、形状記述データを4・1節で述べた手順によって算出される。そこで、この最適化問題を解くために直接探索法を用いる。しかし、直接探索法では初期値の与え方によって収束に時間がかかったり、局所的な最適解に収束してしまう可能性がある。そこで、効率よく最適解を求めるために、図4に示した多関節ロボットの構造解析モデルを図5のように簡略化し、静コンプライアンスを寸法の関数として近似的に数式化して上記の最適化問題を解く。そして、その解を初期値として直接探索法を用いて最適解を求める。

図4 多関節ロボットの構造解析モデル

図5 図4を簡略化したモデル

この最適化を行って得られた結果を以下に示す。

(a) 部品 1: ケース 1, 部品 2: ケース 2 の場合
寸法, 重量および静コンプライアンスのすべての制約を同時に満たすような解は得られなかった。

(b) 部品 1: ケース 2, 部品 2: ケース 1 の場合

$$C_2 = 12\,698 \text{ [¥]}, W_T = 223.5 \text{ [N]}$$

寸法 (単位はすべて cm) は,

$$L_{11} = 5.7, L_{12} = 7.6, L_{13} = 0.5, L_{14} = 0.5$$

$$L_{21} = 14.2, L_{22} = 6.7, L_{23} = 1.8, L_{24} = 0.5$$

(c) 部品 1: ケース 2, 部品 2: ケース 2 の場合

$$C_2 = 33\,110 \text{ [¥]}, W_T = 125.8 \text{ [N]}$$

寸法 (単位はすべて cm) は,

$$L_{11} = 5.4, L_{12} = 7.5, L_{13} = 0.6, L_{14} = 0.5$$

$$L_{21} = 14.0, L_{22} = 7.8, L_{23} = 2.5, L_{24} = 0.5$$

したがって, (b) の場合に製造費用が最小となるので, この層では (b) で得られた結果を選択する。さらに, (b) の場合に対して求められた加工条件を以下に示す。ただし, 加工する面は, 部品 1, 部品 2 ともに外側の平面部のみとし, 内面や曲面の加工は行わないものとする。また, 加工はすべてフライス工具を用いて行われ, 加工段階としては, 荒加工と仕上加工の 2 段階を設定した。

部品 1, 部品 2 ともすべての加工面に対して,

荒加工では,

$$\text{送り量 } 0.35 \text{ [mm/tooth]}$$

$$\text{切削速度 } 172 \text{ [m/min]}$$

仕上加工では,

$$\text{送り量 } 0.20 \text{ [mm/tooth]}$$

$$\text{切削速度 } 216 \text{ [m/min]}$$

ただし, 送り量についてはフライス工具 1 刃当たりの送り量を表す。

6・3 第 3 層 (詳細な形状, 寸法および加工条件の決定) 第 3 層における意思決定も, 第 2 層と同様の手順で行われる。第 3 層において考慮すべき性能は,

部品 1 と部品 2 の駆動軸における垂直応力 σ およびせん断応力 τ である。したがって, この層において考慮する寸法は, 部品 1 の駆動軸をはめ込む穴の直径 D_{11} , 部品 2 の駆動軸をはめ込む穴の直径 D_{21} , D_{22} である。第 3 層において考える部品 1, 部品 2 の形状を図 6 に示す。

第 3 層では, 次の最適化問題を解けばよい。

目的関数: 第 3 層までで評価される製造費用

$$C_3 = C_2 + C_{c3} \rightarrow \text{最小化}$$

制約条件:

寸法については,

$$D_{11} \leq 5.0$$

$$D_{21} \leq 5.0$$

$$D_{22} \leq 5.0 \text{ (単位はすべて cm)}$$

性能については,

$$\sigma_{\max} \leq 5.0 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\tau_{\max} \leq 2.0 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

..... (6)

この最適化問題を解くことにより, 以下の結果が得られた。

$$C_3 = 13\,113 \text{ [¥]}$$

$$D_{11} = 2.5, D_{21} = 2.5, D_{22} = 3.5$$

(単位はすべて cm)

加工については, すべての穴はドリルによって下穴をあけた後, 中ぐりを行うものとする。このとき, 製造費用を最小にする加工条件は, すべての穴について次のように決定された。

ドリルによる下穴あけでは,

$$\text{送り量 } 0.20 \text{ [mm/rev]}$$

$$\text{切削速度 } 125 \text{ [m/min]}$$

中ぐりでは,

$$\text{送り量 } 0.15 \text{ [mm/rev]}$$

$$\text{切削速度 } 352 \text{ [m/min]}$$

ただし, 送り量については工具 1 回転当たりの送り量を表す。

6・4 統合的設計を行わなかった場合の最適解との比較

製品設計と工程設計を統合化しない場合, すなわち性能を目的関数として最小化して得られた設計解をもとに, 次に製造費用を目的関数として最小化した場合の製造費用は, 本研究における最適解と部品の材料が同じ場合 (部品 1: アルミ, 部品 2: 鋼) には, 13 558 円となる。一方, 本研究において統合化を行って得られた解は, 13 113 円である。すなわち, 本研究で提唱した統合的最適化を用いた場合のほうが要求された性能を満たし, かつ製造費用の少ない設計解が得られたことになる。

(a) 部品 1

(b) 部品 2

図 6 第 3 層において考える部品形状

7. 結 論

(1) 製品設計と工程設計を統合化するに当たって、性能の向上と製造費用の低減という互いに相反する要求を同時に評価して最適化を行う観点から、統合的設計過程を構成し、その設計の方法論を示した。

(2) 設計対象部品を設計する過程と決定すべき設計変数を数層に分割し、各層における最適化により、設計変数を段階的に決定していく多層的意思決定法を構築した。

(3) 接触面を重視した形状記述法を構築し、その形状記述データを用いて、性能の解析と製造費用の算出を同時に自動的に行えるようにした。

(4) 多関節ロボットの設計に本研究で提唱した統合的多層的意思決定法および形状記述法を適用し、そ

の有効性を示した。

本研究の遂行に当たり、京都大学教授 人見勝人博士の全面的なご支援を賜ったことを記し、感謝の意を表す。

文 献

- (1) 人見, 生産システム工学 (第2版), (1990), 246, 共立出版.
- (2) 人見 (監修)・中島・ほか2名 (編), コンピュータによる設計・生産・管理-CAD・CAM・CAP, (1984), 8, 共立出版.
- (3) Hsu-Pin(Ben) W., ほか1名, *J. PRO. Res.*, **26**-1(1988), 119.
- (4) Spur, G., ほか2名, *J. Mach. T. Des. Res.*, **26**-2(1986), 171.
- (5) 吉村・ほか2名, 機論, **54**-505, C(1988), 2313.
- (6) 吉村・ほか1名, 精密機械, **45**-12(1979), 1418.