機械製品に対する製品設計と工程設計の 統合的最適化に関する研究*

吉村 允孝^{*1}, 井谷 浩二^{*2}, 人見 勝人^{*3}

Integrated Optimization of Product Design and Process Design for Machine Products

Masataka YOSHIMURA, Kouji ITANI, and Katsundo HITOMI

In order to attain the true integration of CAD and CAM, not only is a smooth flow of information required, but also decision making for both product design and process design must be synthesized. In this paper, an integrated design process is proposed, in which decision making concerning both product design and process design is simultaneously conducted. According to the proposed design procedures, an integrated optimization problem is formulated. This optimization is expressed as a multiobjective optimization problem including many Pareto optimum solution sets corresponding to combinations of materials used for parts. The algorithm for solving the problem is also presented. The proposed method is applied to the design of a cylindrical coordinate robot, and the effectiveness of the method is demonstrated in conducting product design and process design of machines.

Key Words: Production System, Integrated Design Process, Product Design, Process Design, CAD, CAM, Design Optimization, Multiobjective Optimization

1. 緒 言

生産システムにおける製品設計、工程設計、生産実施といった各手続きの統合化の問題は、それらの自動化に続く課題として、最も重要なものの一つであると考えられる。そしてこれまでの統合化は、各手続き間の情報の流れの円滑化を図ることにより、次のような効果を期待したものである。

- (1) 設計・生産時間の短縮
- (2) マンパワーの節減
- (3) 設計に関する費用の縮減
- (4) 情報伝達の際のエラーの減少

特に製品設計と工程設計の統合化に関係する研究としては、従来、次のようなものがなされてきた。

- (1) 工程設計での製品設計情報の直接的利用^{(1)~(4)}
- (2) 設計から生産に至るまでのすべての情報を扱うことのできる統一的なモデルの開発^{(5)~(6)}

しかしながら、製品設計と工程設計の統合化を考えるにあたっては、単に情報の流れを円滑化するだけでは解決できない意思決定上の問題がある。通常、まず第1に製品設計の最適化が行われ、その結果に基づいて、第2に工程設計の最適化が行われるという、2段階の最適化によって設計解が定められる。しかし、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、工程設計の最適化の評価基準である製造面からの要求(例えば、製造費用)とは、互いに相反する関係にあることが多い。したがって、性能面では満足のできる解であっても、製造面では、不満足な解であることが多いと考えられる。すなわち、性能面および製造面の両者を考慮した総合的立場からすると、必ずしも十分満足のできる解を得ることは難しい。

以上のような問題点を解決するためには、従来のような統合化に加えて、さらに別の観点からの統合化が必要である。すなわち、製品設計と工程設計の両設計過程で設計解を定める際に、解の評価を統合化し、総合的な観点から設計解を定めなくてはならない。

本研究においては、従来の製品設計過程と工程設計過程を一体化した統合的設計過程を構成し、そこで、性能面および製造面からの要求の総合的な評価に基づいて設計解を決定する方法論を提示し、上述の問題点

* 昭和63年3月31日 第65期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和62年9月4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、(株)オージー情報システム総研 (〒565 豊中市新千里西町)。

^{*3} 正員、京都大学工学部・北京工業学院管理工程系。

を解決することを試みた。

以下では、統合的設計過程における設計手順を述べ、さらに、円筒座標形ロボットへの適用例により、本設計法の有効性を例証する。

2. 統合的設計過程の構成

2・1 統合的設計過程の概要 統合的設計過程は、次の手続きで構成されている。

〔ステップ1〕 製品仕様から製品形態（構造・概形）を定める。

〔ステップ2〕 製品仕様および製品形態から設計最適化のための評価特性を抽出する。

〔ステップ3〕 意思決定される事項に関して、その決定の際に考慮すべき条件を抽出する。

〔ステップ4〕 他の事項とは独立に決定してもよい事項および独立に決定すべき事項に関して、意思決定を行う。

〔ステップ5〕〔ステップ4〕が適用されない事項を統合的な最適化の手続きにより決定する。

なお、本研究では、〔ステップ1〕の結果が与えられているものとして、〔ステップ2〕以降の手続きを扱うものとする。

2・2 意思決定事項 統合的設計過程を通じて決定しなければならない事項を、意思決定事項と呼ぶことにする。従来の製品設計、工程設計で定められていた事項をそれぞれ $D_i (i=1, 2, \dots, 10)$, $P_j (j=1, 2, \dots, 9)$ とし、それらを表1に意思決定事項として示す。

2・3 統合的設計過程の構成上の基本方針 緒論で述べたような問題点を解決するためには、単一の最適化段階で、すべての意思決定事項を性能面および製造面両方の要求を考慮して定めなくてはならない。ここでは、このような単一段階での意思決定事項の決定を、次のような点を考慮して行うことにする。

(1) 製品仕様に応じて各意思決定事項に要求される必要条件を満たすようにする。

(2) 他の事項と独立に決定しても統合的に評価した場合と同等であるとみなせるものは、統合的評価の前に決定する。

(3) 評価基準との関係を明確にすることが困難な意思決定事項についても、決定手段を与える。

(4) 意思決定事項の決定は、統合的な評価基準の下で行う。

以下の各節では、2・1節で述べた〔ステップ2〕から〔ステップ5〕における手続きを順に述べる。

2・4 評価特性の抽出（〔ステップ2〕） 評価特性としては、製造面から要求されるものと性能面から要

求されるものの2種類が考えられる。

まず製造面からの評価に関しては、次式で表される製造原価 C を用いる。

$$C = \sum_{j=1}^{n_0} C_j \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$C_j = C_{bj} + C_{cj} + C_{uj} + C_{ej} + C_{aj} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、部品 j に関する部品製造原価を C_j 、素材準備費用を C_{bj} 、正味加工費を C_{cj} 、工具費を C_{uj} 、工具交換費を C_{ej} 、そしてその他の付随費用を C_{aj} と表す。また n_0 は構成部品の総数である。

さらに、上記における C_{cj} , C_{uj} , C_{ej} は、部品 j のすべての加工パスにわたる総和として次式のように表される。

$$C_{cj} = \sum_i C_{cj}^i \cdot T_{cj}^i \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$C_{uj} = \sum_i C_{uj}^i \cdot T_{uj}^i / T_{uj}^i \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$C_{ej} = \sum_i C_{ej}^i \cdot T_{ej}^i \cdot T_{ej}^i / T_{ej}^i \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、部品 j 加工時の第 i 番めの加工パスに対して、 C_{cj}^i は平均加工コスト、 C_{uj}^i は工具費、 C_{ej}^i は人件費およびその他の経費を考慮した費用係数、 T_{cj}^i は正味加工時間、 T_{uj}^i は使用工具の工具寿命、そして T_{ej}^i は使用工具の交換時間を表す。

他方、性能面からの評価特性は、一般に複数個存在するが、ここでは、次のように考える。

(1) 評価特性を抽出する単位を構成部品とし、構成部品ごとに特性を抽出する。

(2) 抽出された特性を、評価の際に極限まで追求すべき目的とするか、一定の範囲内にあればよいとする制約とするかは、同じ特性の組合せに対して考える

表1 統合的設計過程における意思決定事項

Decision-making items in process design	D ₁	Mechanism
	D ₂	Parts constitution of product
	D ₃	Connected relations among parts
	D ₄	Purchased parts or manufactured parts
	D ₅	Shape of part
	D ₆	Shape accuracy
	D ₇	Surface roughness
	D ₈	Dimension
	D ₉	Tolerance
	D ₁₀	Material
Decision-making items in process design	P ₁	Preparation process of raw material
	P ₂	Machining methods
	P ₃	Machine tools
	P ₄	Tools and jigs
	P ₅	Machining sequence
	P ₆	Quality of finished surface
	P ₇	Cutting conditions
	P ₈	Raw material shape
	P ₉	Heat treatment process

場合であっても、それぞれの状況に応じて異なるものとなる。したがって、あらかじめその製品において何を重視するかという情報（重視情報と呼ぶ）が必要であり、これによって目的とすべき評価特性を定める。

以上より、性能面からの評価特性の抽出・分類の手続きを次のように定める。

(ステップ1) 各部品に対する評価特性を定める。

(ステップ2) 重視情報により、目的とすべき性能要求を定める。そして目的関数となる評価特性を $e_j (j=1, 2, \dots, u_1)$ と表す（ここで u_1 は目的関数となる評価特性の数）。

(ステップ3) (ステップ2) で抽出されたもの以外の評価特性を制約となる評価特性とし、これらを $e_{ci} (i=1, 2, \dots, u_2)$ と表す（ここで u_2 は制約となる評価特性の数）。

この手続きを具体化するにあたっては、次のような性能と定量的な評価特性との対応関係を用いる。

機械製品において評価されるべき性能を I 項目、I 項目に対応して実際に評価される特性（性能特性）を J 項目、そして J 項目の特性を定量的に表現するもの（評価特性）を K 項目とする。I, J, K の各項目としては、表 2 (a) 中に示すようなものが考えられる。

J 項目と K 項目との間には、一定の対応関係を考えることが可能であり、表 2 (c) に示すような対応関係を構成することができる。

他方、I 項目と J 項目の間の関係は、多様な製品機能に応じて定められるべきものであり、各製品ごとに異なる対応関係をもつ。例えば、工作機械や産業用ロ

ボットなどにおいては、構造中の特定の点の変位、位置決めなどが重要であるため、表 2 (a) に示す I1, I2 の評価は、ある点の J1, J2, J3 の評価によって行われ、このような対応をまとめると、表 2 (b) に示すような対応関係を得る。

上述の(ステップ1)の手続では、J 項目と K 項目の対応により、各部品に対する J 項目の要求を指定することで定量的な評価特性を得ることになる。

(ステップ2) の手続きでは、I 項目と J 項目および J 項目と K 項目の対応関係を用いる。重視情報は、I 項目のような形で与えられると考えられ、それを与えることにより、目的関数とすべき評価特性が選定されることになる。

2.5 意思決定上の必要条件の抽出 ((ステップ3))

各意思決定事項は、最適化の観点から見てもなく、本来相互に関係しあっており、他と独立に決定できないものが多い。すなわち各意思決定事項の決定順序を考えると、意思決定事項の決定における先行関係が考えられる。この先行関係において、ある意思決定事項に後続する事項の決定は、先行する事項の決定が必要条件となる。

表 1 に示す意思決定事項に対して、先行関係を構成した例を図 1 に示す。表 1 中で D_1 から D_9 は製品形態に相当するものであり、これらを除く意思決定事項に対する必要条件を実際に考えてみると、次のようになる。

(1) 精度に関係するもの (D_6, D_7, D_9)

D_6, D_7, D_9 は、要求性能を達成できるように上限値が設けられるべきである。例えば、表面粗さ R に関しては、次のようになる。

$$R_{ij} \leq R_{ij}^u \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 i, j は、それぞれ、対象となる部品およびその部品における表面粗さの指定面を表す。また、 R_{ij}^u は R_{ij} の上限値である。

(2) 寸法に関係するもの (D_8)

D_8 の決定は、次の 2 条件を満たすことが必要である。

表 2 性能 (I 項目)、性能特性 (J 項目) および評価特性 (K 項目) とそれらの対応関係

(a) I 項目、J 項目、K 項目 (b) I 項目と J 項目の対応関係

Items	
I-items	I1 Accuracy
	I2 Efficiency
	I3 Product life
	I4 Reliability
	I5 Noise
J-items	J1 Deformation
	J2 Strength
	J3 Vibration
K-items	K1 Static displacement
	K2 Static compliance
	K3 Dynamic rigidity
	K4 Weight
	K5 Stress distribution

	J1	J2	J3
I1	○		○
I2	○		○
I3		○	
I4		○	
I5			○

(c) J 項目と K 項目の対応関係

	J1	J2	J3
K1	○		
K2	○		
K3			○
K4			○
K5		○

図 1 意思決定事項の決定上の先行関係例

- (i) 十分な強度を持つこと。
- (ii) 寸法制約内におさまること。

部品 i における部位 j の寸法を b_{ij} , そして b_{ij} の i に関するベクトル表現を $\mathbf{b}_i$ として, 条件式は, 次のようになる。

$$g_{ik}^l(\mathbf{b}_i) \leq g_{ik}(\mathbf{b}_i) \leq g_{ik}^u(\mathbf{b}_i) \dots \dots \dots (7)$$

$$b_{ij}^l \leq b_{ij} \leq b_{ij}^u \dots \dots \dots (8)$$

ここで, b_{ij}^l, b_{ij}^u は寸法制約の下限値, 上限値である。また g_{ik} は強度 k の評価関数, そして g_{ik}^l, g_{ik}^u はその下限値, 上限値である。

(3) 材料に関係するもの (D_{10}) 機械的強度, 環境強度に関して, 着目すべき特性 h_{il} が適切な値をとるための条件は, 次式のように表される。

$$h_{il}^l \leq h_{il} \leq h_{il}^u \dots \dots \dots (9)$$

ただし, h_{il} は, 部品 i の材料 ma_i の材料特性 l を表し, h_{il}^l, h_{il}^u はそれぞれ h_{il} に対して設定される下限値, 上限値を表す。

(4) 工程設計に関係するもの ($P_1, P_2, \dots, P_9$)

P_1 から P_9 は, 製品設計に関係する事項および生産量などが決定されることにより定まる。例えば加工順序 CS_i は, 要求された形状を要求された精度で創成することが必要であり, 部品 i に関する部品外形 PG_i , 加工面 j の表面粗さ R_{ij} , 形状精度 G_{ij} , 寸法公差 S_{ij} , 素材外形 BP_i を用いて次式のように表される。

$$CS_i = CSM(PG_i, \mathbf{R}_i, \mathbf{G}_i, \mathbf{S}_i, BP_i) \dots \dots \dots (10)$$

ただし $\mathbf{R}_i, \mathbf{G}_i, \mathbf{S}_i$ は, i に関するベクトル表現であり, CSM は, CS_i と $PG_i, \mathbf{R}_i, \mathbf{G}_i, \mathbf{S}_i, BP_i$ を対応づける写像を表す。

2・6 意思決定事項の独立な決定 ([ステップ4])

各意思決定事項は, 一般に最適化の際の複数の目的と関係し, また2・5節で述べた先行関係なども存在するため, 多くの場合単独に決定することはできない。しかしながら目的関数の決定変数に対する単調性などの特定の条件の下では, 独立な決定が可能となる。

また, 評価特性との関係がこれまでに明らかにされておらず, その決定を経験的知識やデータに頼らなくてはならない意思決定事項も, 最適化の段階とは別に独立に決定しなくてはならない。

以上のような二つの場合をここでは, 統合的最適化を行う前に処理する。

2・6・1 決定変数と評価特性が特定の関係を満たす場合 最適化問題における目的関数要素 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_v$ 中に, 着目する決定変数 x_k が含まれているものとする。 $\phi_i (i=1, 2, \dots, v)$ がすべて x_k に関して単調増加または単調減少であれば, 単調性の性質を利用して, x_k の値を定めたり, あるいは他の変数で x_k を表現す

ることにより, 実質的に決定変数の数を減らすことができる。

2・6・2 決定変数と評価特性の関係が明確に評価できない場合 ここでは, 次のようなルールを用いて該当する意思決定事項に対応する決定変数を定める。

(1) 決定方法を与える。

If [$x = x_i$] then [$U = U_{ij}$]

(2) 設定値そのものをあたえる。

If [cond i] then [$x_i = x_{i0}$]

ただし, x はルールの対象となる決定変数, x_i は意思決定の対象として与えられた決定変数, U は決定方策, U_{ij} は x_i に対する j 番めの決定方策, x_{i0} は x_i に対する設定値, そして cond i は x_{i0} が x_i に設定される条件を表す。

2・7 設計解の決定 ([ステップ5]) [ステップ

3]までの手続きにより, 統合的最適化問題の目的関数, 制約条件が定まることになる。工程設計に関する意思決定事項は, [ステップ3]で抽出された条件に基づき, 製品設計に関する意思決定事項の決定に依存して定まるため, 統合的最適化問題を次のように定式化することができる。

目的関数: $\phi = [e_1, e_2, \dots, e_{u_1}, C] \rightarrow$ 最小化

制約条件: $e_{c_{j0}}^l \leq e_{c_{j0}} \leq e_{c_{j0}}^u (j_0=1, 2, \dots, u_2)$

$$G_{ij_1 k_1} \leq G_{ij_1 k_1}^u$$

$$[i=1, 2, \dots, n_1, j_1=1, 2, \dots, v_1(i),$$

$$k_1=1, 2, \dots, s_1]$$

$$R_{ij_2} \leq R_{ij_2}^u$$

$$[i=1, 2, \dots, n_1, j_2=1, 2, \dots, v_2(i)]$$

$$S_{ij_3} \leq S_{ij_3}^u$$

$$[i=1, 2, \dots, n_1, j_3=1, 2, \dots, v_3(i)]$$

$$b_{ij_4}^l \leq b_{ij_4} \leq b_{ij_4}^u$$

$$[i=1, 2, \dots, n_1, j_4=1, 2, \dots, v_4(i)]$$

$$g_{ik_2}^l \leq g_{ik_2} \leq g_{ik_2}^u$$

$$[i=1, 2, \dots, n_1, k_2=1, 2, \dots, s_2]$$

$$MG_{ik_3}^l \leq MC_{ik_3} \leq MC_{ik_3}^u$$

$$(i=1, 2, \dots, n_1, k_3=1, 2, \dots, s_3)$$

決定変数: $G_{ij}, R_{ij}, S_{ij}, b_{ij}, ma_i$

.....(11)

ここで, n_1 は加工製作部品数, $v_1(i), v_2(i), v_3(i), v_4(i)$ は部品 i に対する形状精度, 表面粗さ, 寸法公差, 寸法のそれぞれの指定部位数, s_1, s_2, s_3 はそれぞれ形状精度の種類数, 評価すべき強度の種類数, 着目する材料特性の数, そして ma_i は部品 i の材料を表す。

設計解は, 上の多目的最適化問題を解くことにより定まる。3章においてこの最適化問題の解法を述べる。

3. 最適解の決定方法

2・7節で定式化された統合的最適化問題の解法を考えるにあたって、次の諸点を考慮する。

(1) 多目的最適化問題であるため、解の選択はパレート解集合中から行うべきである。

(2) 解の決定の際に十分な選好基準を与えることが一般に難しく、解の決定に柔軟性を持たせることが望ましい。

(3) 材料という離散的な決定変数を含むため、その取扱いについて考える必要がある。材料に関しては、統合的最適化問題を解くことにより、部品材料の組合せを定めることが目的となるが、この材料の組合せごとに目的関数空間上で材料以外の決定変数の可能領域を考えると、図2に示すように各材料の組合せごとに離散的な領域を形成する。したがって各材料の組合せに対応して異なったパレート解集合をもつことになる。このパレート解集合の総数は、各部品に対する候補材料の組合せの数で定まるため多数になることが考えられ、それらの中から最終的な解を効率的に求める解法を構築する必要がある。

(4) 機械製品においては、各評価特性に対して一定の達成すべき水準が存在すると考えられる。したがって、目的として選択された評価特性に対して満足水準を導入し、これを満たすように解を決定する必要がある。

以上より、最適解の決定手順として、次のような基本的手続きを設定することにする。

(I) 最適解が存在する可能性の高いパレート解集合を求める。

(II) 満足水準を満たす範囲内で、各目的間の相対的重要度を考慮して、暫定解を定める。

図2 目的関数空間上に離散的に現れる可能領域とパレート解集合

(III) (II)で求められた解と比べて、さらに好ましい解がないかどうかを調べる。

以上の手続きをもとに、次のように解の決定手順を構成する。なお、以下、次の記号を用いるものとする。

u : 製造原価 C を含めた目的関数の総数

ψ_j : 目的関数 ($j=1, 2, \dots, u$)

m_i : 全加工部品に対する候補材料の i 番めの組合せ

X : 材料を除く決定変数

Z : X の制約領域

Y : 集合 $\{1, 2, \dots, u\}$

MA : 候補材料の可能な組合せ m_i の集合

(i) ステップ1 全加工部品に対して候補材料を選び、それらの組合せ m_i をすべてひろいあげて集合 MA とする。

(ii) ステップ2 各 $m_i \in MA$ に対して、各目的関数 $\psi_j(X, m_i)$ ($j=1, 2, \dots, u$) の Z 上での最小値 $\psi_j^{\min}(m_i)$ を次式により求める。

$$\psi_j^{\min}(m_i) = \min_{X \in Z} \psi_j(X, m_i) \quad \dots\dots\dots (12)$$

(iii) ステップ3 各目的関数 ψ_j ($j=1, 2, \dots, u$) に対し、満足水準 $\hat{\psi}_j$ を設定する。そして集合 MA から、次式を満たさない m_i を除く。

$$\hat{\psi}_j \geq \psi_j^{\min}(m_i), i=1, 2, \dots, u \quad \dots\dots\dots (13)$$

(iv) ステップ4 各 ψ_j ($j=1, 2, \dots, u$) を目的関数とする次の最適化問題を各 $m_i \in MA$ ごとに解き、その解を $X_{aj}(m_i)$ とする。

$$\left. \begin{aligned} \min_{X \in Z} \psi_j(X, m_i) \\ \psi_k(X, m_i) \leq \hat{\psi}_k, k \neq j, k=1, 2, \dots, u \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (14)$$

そして、次式より得られる $\psi_{aj}(m_i)$ 値を、 $m_i (\in MA)$ に対するパレート解集合の理想点での ψ_j の値とする。

$$\psi_{aj}(m_i) = \psi_j\{X_{aj}(m_i)\}, j=1, 2, \dots, u \quad \dots\dots\dots (15)$$

(v) ステップ5 $m_i \in MA$ のうち、次式を満たす m_i を MA から除く。

$$\psi_{aj}(m_i) > \hat{\psi}_j \quad \dots\dots\dots (16)$$

(vi) ステップ6 次式で定義される $\psi_j^{*\min}$ ($j=1, 2, \dots, u$) を求める。

$$\psi_j^{*\min} = \min_{m_i \in MA} \psi_{aj}(m_i) \quad \dots\dots\dots (17)$$

(vii) ステップ7 各 ψ_j ($j=1, 2, \dots, u$) に対する重み θ_j が満足水準を侵さない範囲内、すなわち次式を満たす範囲で、目的関数に対する重要度に応じて θ_j を $\sum_{j=1}^u \theta_j = 1$ となるように設定する。

$$\left. \begin{aligned} \max_{m_i \in MA} \min_{\substack{l \in Y \\ l \neq j}} \frac{1}{\sum_{k=1}^u \gamma_{jk}^l} &\leq \theta_j \leq \min_{m_i \in MA} \frac{1}{\sum_{k=1}^u \gamma_{jk}^j} \\ \text{ここで} \\ \gamma_{jk}^l &= \frac{\phi_k\{X_{dl}(m_i)\} \cdot \phi_j^{*\min}}{\phi_j\{X_{dl}(m_i)\} \cdot \phi_k^{*\min}} \\ \gamma_{jk}^j &= \frac{\phi_k\{X_{dj}(m_i)\} \cdot \phi_j^{*\min}}{\phi_j\{X_{dj}(m_i)\} \cdot \phi_k^{*\min}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

(viii) ステップ 8 各 $m_i \in MA$ に対して、 $L_c(m_i)$ を次式により求める。

$$L_c(m_i) = \left[\sum_{j=1}^u \{\theta_j \cdot \phi_{dj}(m_i) / \phi_j^{*\min}\}^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots (19)$$

(ix) ステップ 9 次式で求まる $L_c^{\min}$ を与える $m_i \in MA$ を m^* とする。

$$L_c^{\min} = \min_{m_i \in MA} L_c(m_i) \dots\dots\dots (20)$$

(x) ステップ 10 次の最大成分最小化問題を解き、その解を X^* とする。

$$\min_{X \in Z} \max_{j \in Y} \{\theta_j \cdot \phi_j(X, m^*) / \phi_j^{*\min}\} \dots\dots\dots (21)$$

(xi) ステップ 11 すべての目的関数 $\phi_j (j=1, 2, \dots, u)$ に対して、次式を満たさない m_i を MA から除く。

$$\phi_j(X^*, m^*) \geq \phi_j^{\min}(m_i), j=1, 2, \dots, u \dots\dots (22)$$

(xii) ステップ 12 次の最適化問題を $m_i (m_i \in MA, m_i \neq m^*)$ に対して解き、解を X_i とする。

$$\left. \begin{aligned} \min \phi_1(X_i, m_i) \\ \phi_k(X_i, m_i) \leq \phi_k(X^*, m^*), k=2, 3, \dots, u \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (23)$$

そして、次式を満たす m_i を MA から除く。

$$\phi_1(X_i, m_i) \geq \phi_1(X^*, m^*) \dots\dots\dots (24)$$

もし MA が空集合なら、ステップ 14 に行く。

図 3 変換された目的関数空間上におけるパレート解集合とその理想点

(xiii) ステップ 13 次の最大成分最小化問題を $m_i \in MA$ に対して解く。

$$\min_{X \in Z} \max_{j \in Y} \{\theta_j \cdot \phi_j(X, m_i) / \phi_j^{*\min}\} \dots\dots\dots (25)$$

そして、最小の $\phi_j(X, m_i)$ を与える決定変数を新たに (X^*, m^*) とする。

(xiv) ステップ 14 目的関数 $\phi_j(X^*, m^*) (j=1, 2, \dots, u)$ の値を見て、改善したいものがあるかどうかを判断する。もしあれば、改善したい目的関数に対する重みを大きくとようステップ 7 に戻る。なければ、 (X^*, m^*) を最適な決定変数として採用する。

各目的関数の値が式(15)で定まる ϕ_{dj} をもつ目的関数空間上の点を、図 3 に示すように、各パレート解集合の理想点としている。式(19)で表される L_c は、その理想点と原点との距離であり、各目的関数の重要度を示す重み θ_j および無次元化のための値 $\phi_j^{*\min}$ を考慮して表現したものである。手続き(I)では、 L_c の最小値 $L_c^{\min}$ をもつパレート解集合を最初に探索すべきパレート解集合とする。

式(21)は、最大成分最小化問題⁽⁷⁾であり、前述の手続き(II)に相当する。なお、最大成分最小化で解を決定することにより、 θ_j と $\phi_j^{*\min}$ を用いて変換された各目的関数を公平に最小化することができる。

与えられた重みに対応するパレート解集合上の解は、図 3 に示す方向ベクトル V^* 上に求まる。

4. 適用例

本章では、3章までに述べた統合的設計過程を図 4 (a)に示すような円筒座標形ロボットに適用し、その有効性を例証する。

ここでは、上下方向および半径方向の運動を行う上部の構造は購入部品で構成されているものとし、回転運動を行う下部構造の主要な部品 1, 2, 3 を設計対象

(a) 外観図 (b) 構造解析モデル

図 4 円筒座標形ロボット

とする。

4.1 評価特性の抽出 図4(a)に示した部品1から6に着目して、部品*i*に対する性能特性を次のように抽出する。

(J1, J2, J3), $i=3, 4, 5, 6$

(J2), $i=1, 2$

表2に示した対応関係を用いて、部品*i*に対応する評価特性は、次のようになる。

(K1, K2, K3, K4, K5), $i=3, 4, 5, 6$

(K5), $i=1, 2$

さらにここでは、重視情報としてI1, I2が指定されているものとする。目的となる評価特性は、K1(またはK2), K3, K4である。また簡単のため動的特性の評価は、ここでは行わないものとする。以上から、統合的最適化問題において目的となる特性は、図4に示すロボットアーム先端の点Hにおける静コンプライアンス f_s 、製品の総重量 W_T 、および製品製造原価 C の三つとなる。

4.2 必要条件の抽出 精度面からの意思決定事項には、はめ合わせ面、接合面、その他の面という三つの基準を設定する。材料に関しては、部品1, 3に対してねずみ鋳鉄材、軟鋼材を候補材料とし、部品2は、軟鋼材に固定する。この結果、解を決定する際、4個のパレート解集合を扱う必要がある。

以上の仮定の下に抽出される必要条件は、以下のようになる(紙面の都合上、それらの1部を示す)。ただし、部品1, 2, 3の各加工面、寸法には、図5(a), (b), (c)に示す名称を与える。

(1) 表面粗さ (単位: μm)

$$\left. \begin{array}{l} R_{1j} \leq 6.5 \quad (j=F13, T13) \\ R_{1j} \leq 25 \quad (j=F12, T14) \\ \vdots \\ R_{3j} \leq 100 \quad (j \neq F33, T31) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (26)$$

(2) 寸法公差 (単位: μm)

$$\left. \begin{array}{l} S_{1j} \leq 10 \\ S_{1j} \leq 13 \quad (j \neq B13) \\ \vdots \\ S_{1j} \leq 13 \quad (j \neq B31) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (27)$$

(3) 寸法制約 (単位: mm)

$$\left. \begin{array}{l} B15 \leq 270.0 \\ 45.0 \leq L12 \\ \vdots \\ B31 + 4.0 \leq B23 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (28)$$

4.3 意思決定事項の独立な決定

(1) 評価特性との関係が明確に評価できる場合
寸法を表す決定変数のうち B15, L13, B26, L24

は、それぞれ、解析上、 f_s に関係せず、 W_T および C だけに関係する。しかもこれらの各変数が増加すれば、 W_T , C は単調に増加する。この単調性により、各変数を独立に決定する。

(2) 評価特性との関係が明確に評価できない場合
精度面の決定変数は、 C 以外の評価特性との関係を定式化することが困難である。ここでは、各決定変数の上限値を採用する。

4.4 統合的最適化問題の定式化 4.3節までの結果をまとめると、適用例に対する統合的最適化問題の定式化は、次のようになる。

目的関数: $\phi = [f_s, W_T, C] \rightarrow \text{最小化}$

制約条件: 不等式(26)~(28)

4.5 最適解の決定 4.4節の定式化に基づいて最適解を求める。ただし工程設計における加工方法、加工順序の決定に関してはMELTS⁽⁸⁾のアルゴリズムを用いる。そして切削条件に関しては、表面仕上程度および材料に応じた標準切削条件を設定する。また、静コンプライアンス f_s の評価は、図4(b)に示すシミ

表3 原点からパレート最適解集合の理想点までの距離 L_c 。(SC: 軟鋼, FC: ねずみ鋳鉄)

Material			L_c
Part 1	Part 2	Part 3	
SC	SC	SC	0.6077
SC	SC	FC	0.6643
FC	SC	SC	0.6043
FC	SC	FC	0.7298

Weighting factor: 0.4 for f_s , 0.2 for W_T and 0.4 for C

図5 設計対象部品の寸法および加工面の名称

図6 パレート解集合と最適解〔()内の記号は部品1, 2, 3の順に各部品の材料を示す〕

ュレーションモデルに対する構造解析により行う。
満足水準を次のように設定するものとする。

$$f_s = 1.428 \mu\text{m/N}$$

$$W_T = 148.1 \text{ N}$$

$$C = ¥21\,000$$

そして, f_s , W_T , C に対する重みをそれぞれ 0.4, 0.2, 0.4 と与える。また軟鋼材を SC, ねずみ鋳鉄材を FC と略記し, 部品 1, 2, 3 の材料の組合せを部品番号順にそれらの記号で (SC, FC, SC) のように表現する。部品材料の組合せに対して L_c を求めた結果は表 3 に示すようになり, このうち組合せ (FC, SC, SC) に対するものが, 最初に探索すべきパレート解集合となる。

この例におけるパレート解集合の概略を, 図 6 (a), (b) に示す。最初に得られる解は点 Q で示されている。最終的に解は, 点 A として求まる。

4・6 従来の最適解との比較 従来のように 2 段階で評価を行った場合の解は, 各目的に対する重みを 4・5 節と同様にとると, 点 F において得られる。図 6 (a) では点 F と点 Q が同一点となっているが, 図 6 (b) で明らかなように, 点 F はパレート解集合上からはずれた位置にあり, 最適な設計解ではない。

このことは, たとえ性能面からは最適といえる解であっても, 製造面からの要求である製品製造原価 C を含む目的関数空間上では, 必ずしも最適な解でないことから明らかであり, 従来のような段階的な最適化では, 総合的な最適解に到達することが困難であ

る。これに対し, 本論文で提唱する統合的最適化を用いれば, 真に最適と呼べる解に到達することが可能である。

5. 結 論

(1) 製品設計と工程設計の統合化を, 単に情報の流れの円滑化という観点からだけではなく, 最適化の観点から行うことを目的として, 統合的設計過程を提唱した。

(2) 統合的設計過程における総合的最適化問題を, 多目的最適化問題として定式化した。そこでは, 多数のパレート解集合中から解を定める必要があり, そのための決定手順を提示した。

(3) 円筒座標形ロボットの設計に対し, 本研究で提唱した統合的設計過程を適用し, 本設計法の有効性を例証した。

文 献

- (1) Chang, T. C., ほか 1 名, *AIIE Trans.*, 13-3 (1981), 223.
- (2) Matushima, K., ほか 2 名, *CIRP*, 31-1 (1982), 329.
- (3) Chang, T. C., ほか 1 名, *J. Pro. Res.*, 22-5 (1984), 877.
- (4) Choi, B. K., ほか 1 名, *Com. Aided Des.*, 17-4 (1985), 162.
- (5) Spur, G., ほか 2 名, *J. Mach. T. Des. Res.*, 26-2 (1986), 171.
- (6) Kimura, F., ほか 1 名, *CIRP Ann.*, 35-1 (1986), 75.
- (7) 市川, 多目的決定の理論と方法, (昭 55), 156, 計測自動制御学会。
- (8) 竹山・ほか 3 名, 自動加工ソフトウェア, (昭 56), 日刊工業新聞社。

討 論

〔質問〕 藤 本 英 雄〔名古屋工業大学〕

(1) 図6(b)で点Fはパレート解ではないとして、以下にその理由を述べている。その理由の中で、点Fは本当に性能面から最適な解なのか。もしそうであるなら、性能面から最適な解は、製造面から最適でなくても“原問題のパレート解である”べきと思う（性能面の重み $\rightarrow \infty$ 、製造面の重み $\rightarrow 0$ の場合）がどうか。

(2) 得られた解は満足水準上にない。制約条件以外に満足水準を設定する理由は何か。この解法においていかなる特別の意味をもつのか。最適解に影響があるのか。満足水準はどのように理論的に（または系統的に）設定されるのか。

(3) 2320 ページ右欄 2 行め“真に”最適とはどういう意味か。最適解は評価関数に依存するものと考えが、

(4) 従来の単一目的最適化に対して、ご提案の方法の必要性、有用性にほぼ同感である。機械設計において性能面と製造面からのような多目的最適化の必要性およびその適用例は質問者を含むいく人かにより報告されている。そこでここで言う統合的最適化は具体的には設計における意思決定の多目的最適化と基本的にどこが異なるのか。

(5) 実用上、たとえばここでの方法を現場の設計者が用いるときなど、困難さはないのか。著者らのご意見を伺いたい。

〔回答〕 (1) 実際の設計問題には、製品性能は同一であるが製品製造原価の面から大きな差のある設計解が多数存在することがある。図6の点Qは、製品性能と製品製造原価の両面において、パレート解上に存在する。しかし、点Fは製品性能の面で点Qと同一の点であるが、同一の製品性能をもつ設計解のうち、製品製造原価が最小とならない設計解に相当する。点Fは弱パレート解上の設計解であり、図6(b)の製品製造原価を含む目的関数空間上では、パレート解集合上に存在しない。また点Fは、原点に最も近いパレート解上の点から大きくはずれているため、統合的な最適解とはいえないということである。

(2) 満足水準は、制約条件に含まれる評価関数でなく目的関数として選ばれた評価関数に対して、設定される。目的関数はできるだけ小さい値をとることが要求される（ここでは、すべての目的関数の最小化を行うため）が、少なくともある水準を満たす必要があ

るということを表すために満足水準を導入したものであり、可能性のある多くの設計解の中からこれらの水準を満たさない設計変数の組合せを効率よく除去するために用いている。この満足水準は、設計仕様または設計者の知識・経験によって定められる。

(3) ここでは、“真に”という言葉は、製品設計に関係する要因と工程設計に関係する要因の両方を統合的に評価したという意味で用いている。

(4) これまでにも機械製品の設計に関する評価要因を多目的最適化問題として評価する方法が提唱されているが、本論文では、機械製品の製品設計と工程設計の統合化(CADとCAMの統合化)を目的として、まず、性能に関する製品設計過程と製品製造原価に関する工程設計過程の両方の要因を系統的に分析し、それに基づいて製品設計と工程設計に関する事項の意思決定を統合的に行うための最適設計問題を構築した。この最適化問題は、結果として複雑な多目的問題となるが、それを効率よく解く方法を提示した。

(5) 本論文で提唱した方法では、機械製品の製品設計過程と工程設計過程の詳細な分析に基づいて意思決定問題が系統だてて構築されている。また統合的な最適化の前に決定できる決定変数は独立して決定するなど最適化問題をより単純なものにする処理が行われるため、実際の機械製品の設計に適用するうえで支障はないと考える。ただ計算時間が問題となりえるが、満足水準の導入などに基づき多数の候補となる設計解から効率よく最適解が求められるため、実用上の大きな問題ではないと考える。

〔質問〕 杉 村 延 広〔神戸大学工学部〕

(1) 設計変数の小さな変更が目的関数を不連続に変化させる場合が考えられる。例えば、製品の寸法公差や表面あらさをある値より小さくすると、工作機械や工具の変更が必要となり、製造原価は大きく上昇すると考えられる。貴論文で提案されている手法において、このような設計変数の変化に対して、目的関数不連続に変化する場合、どのように処理されているのか。

(2) 機械の一般的な設計変数や評価項目あるいは両者の関係を抽出することは困難と思われるが、表1の設計変数および表2の評価基準はどのような対象製品あるいは基準により抽出されたものか。

〔回答〕 (1) 異なった工作機械や工具の使用などにより、製造原価が目的関数空間上で不連続になる

ことがあるが、その場合には、部品材料を離散的な決定変数とするのと同様の考えに基づき離散的なパレート解を求め、同様の方法で最適解を得ることができる。しかし離散化が生じない程度のものであれば、新たなパレート解集合とする必要はないと考える。

(2) 表1と表2は、対象とする製品により多少変

わることが考えられる。ここでは産業用ロボットや工作機械などの産業用機械を中心に一般機械に対するものを想定しているが、実際に本論文の方法を用いる場合には、対象機械の機種に応じて表1および表2の多少の修正または追加が必要になることがあると考える。しかし、基本となる方法論と手順は、同一である。

54 巻 503 号, C 編 (昭 63-7) 正誤表

執筆者名	ページ	欄	行	誤	正
福田基一	1391	左	6~7		} 1行空白
	1392	左	8~9		
吉村靖夫ほか	1452	英文概要	8	midpoints	midpoint
尾上佳史ほか	1459	表1	表中	2.27	2.30
	"	"	"	2.30	2.27
丘 華ほか	1462	左	30	式(6)	式(5)
	1526	左	20~21	$\begin{cases} l_i = l_0 - i \cdot \Delta l \cos^2 \lambda_b \\ r_i = r_0 + i \cdot \Delta l \sin \lambda_b \cos \lambda_b \end{cases}$	$\begin{cases} l_i \cong l_0 - i \cdot \Delta l \cos^2 \lambda_b \\ r_i \cong r_0 + i \cdot \Delta l \sin \lambda_b \cos \lambda_b \end{cases}$
	1527	左	29~30	$f_{ai} = e_1 \{ (l - 2l_0) \sin \lambda_b - 2r_0 \cos \lambda_b \} / l \cdot \cos(\phi - \varepsilon_1)$	$f_{ai} = e_1 \{ (l - 2l_0) \sin \lambda_b - 2r_0 \cos \lambda_b \} / l \cdot \cos(\phi - \varepsilon_1)$
	"	右	1	$e_1 = e_2 = Al / \{ (l - 2l_0) \sin \lambda_b - 2r_0 \cos \lambda_b \}$	$e_1 = e_2 = Al / \{ (l - 2l_0) \sin \lambda_b - 2r_0 \cos \lambda_b \}$
	"	右	1	$e_1 = e_2 = Al / \{ (l - 2l_0) \sin \lambda_b - 2r_0 \cos \lambda_b \}$	$e_1 = e_2 = Al / \{ (l - 2l_0) \sin \lambda_b - 2r_0 \cos \lambda_b \}$
田中成忠ほか	1531	左	8	55.014 mm	55.014 mm
山羽和夫ほか	1533	右	4	駆音	騒音
	1547	英文概要	6	torque	torque