評価特性の相互関係に基づく意思決定順序最適化手法*

吉村 允孝^{*1}, 藤見 善久^{*2}, 泉井 一浩^{*3}Optimizing the Decision Making Process
Based on the Interrelationships among CriteriaMasataka YOSHIMURA^{*4}, Yoshihisa FUJIMI and Kazuhiro IZUI^{**} Department of Precision Engineering, Kyoto University,
Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto, 606-8501 Japan

As the scope of elements considered by product designers has widened, the number of design criteria and variables has mushroomed. Companies now face a two-fold difficulty: design projects that can only be dealt with as large-scale optimization problems, and the need to shorten the development cycle time to the absolute minimum. This paper proposes a concurrent criteria-ordering method for large-scale design problems that not only gives the optimum order of criteria for evaluation, but also shows how criteria groups can be optimized in parallel. This method consists of two main techniques, based on criteria interrelationships: the selection of criteria blocks (i.e., collaborative blocks, parallel blocks) and the ordering of criteria. To demonstrate the effectiveness of the method, it is applied to the design of a bicycle.

Key Words: Concurrent Engineering, Large-Scale Design Optimization Problem, Design Structure System, Functional Dependence Table, Production System, Production Engineering, Production Planning, Design

1. 緒 言

コンカレントエンジニアリング(Concurrent Engineering)は、製品開発サイクルの下流において発生する設計変更などによる製品開発遅延を未然に防ぐこと、および無駄な遊び時間を減らしてリードタイムの短縮を図ることをその主たる目的の一つとする。

近年に至り、企業優位の時代は終わりを告げて消費者が優位に立ち、企業に、よりよいものをより安く求めるようになり、企業は自社の利益だけを追求するのではなく、人や社会に役立つ製品の開発を迫られている。そのため、企業は性能やコストに加えて、生産システムも含めた製品設計を行い、製造コストの削減を図るようになった。さらに、環境問題に対する関心も高まり、環境規制も厳しくなってきたため、製品の設計段階から廃棄やリサイクル等の環境特性にも注意を払う必要が生じてきている。

以上より、設計者は、製品を設計する際に製品の性

能から生産、販売、使用、リサイクル、そして廃棄までを含めた製品のライフサイクルを考慮しなければならず、製品開発において考慮すべき評価特性と決定すべき設計変数の数は急激に増加している。その結果、設計問題は非常に多くの、相互に関係を持つ評価特性と設計変数から成る大規模な意思決定問題になりつつある。

また、消費者要求の多様化および流行り廃りによる、少品種大量生産から多品種少量生産への移行が原因となっており、企業は開発期間の大幅な短縮を迫られており、膨大な情報のコンカレントな処理が重要となってきた。

こうした背景から、大規模化した設計問題に対して、“大域的最適解を論理的に与えてくれる”そして“コンカレント性に富み、開発期間を大幅に短縮してくれる”といった二つの性質を持つ、意思決定手法の開発が切に求められている。しかしながら、大規模最適化問題を解くには、相互に複雑な関係を持つ非常に多くの決定変数を同時に扱う必要があり、その大域的最適解を得ることは非常に困難であるとされている。

今までに提案されてきた大規模問題の最適化手法は、大別して二つに分類することができる。考慮するすべての評価特性を総括して一つの多目的最適化問題

* 原稿受付 2001年5月16日。

^{*1} 正員, フェロー, 京都大学大学院工学研究科(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)。^{*2} 京都大学大学院工学研究科。^{*3} 正員, 京都大学大学院工学研究科。

E-mail: yoshimura@prec.kyoto-u.ac.jp

として扱い、その全体最適化を目指すものと、まず評価特性を評価する順序の最適化を行い、その後得られ最適な評価順序に従って各評価特性を順次評価していくことで、最適解を得ようとするものである。

前者の手法としては、問題をより小さなサブ問題に分割して並列に最適化を行い、各結果を基に全体の調和解を求めて、大域的最適解とする手法が代表的である。例えば、Michelenla と Papalambros らは、ハイパーグラフに基づいて大規模問題を複数のサブ問題に分割し、Hierarchical Overlapping Coordination (HOC)を用いて、各サブ問題の最適化結果を調和させ、全体の最適解とする手法を提案した⁽¹⁾⁽²⁾。また Wujek と Renaud らは、システム分析により問題を分割し、そのグローバル感度を算出して分割された各サブ問題の最適解を CP-SA (Coordination Procedure of System Approximation) で調和させ、大域的最適解を求めようとした⁽³⁾⁽⁴⁾。ほかには、Yoshimura らのように評価特性と設計変数を分離・分割して階層構造化を行い、最下層のものから順に最適化することにより、大域的最適解を得ようとする手法も提案されている⁽⁵⁾。

後者の手法では、複数の評価特性をその相互関係に基づいて最も効率よく順序付ける過程がメインとなる。Steward は大規模設計問題に対する最適化計画を支援するために、製品の工学的設計において実行する必要がある、相互に依存する非常に多くのタスクを再配列して、その最適な実行順序を与えてくれる、Design Structure System (DSS) を提案した⁽⁶⁾。Kusiak と Wang もまたマトリックスを用いて、複数のタスクを、循環の数が最小となるように配列するアルゴリズムを示した⁽⁷⁾。また、Rogers, McCulley と Bloebaum は DSS を基に、タスク間の先行関係に連結強度という重みを与えて、それに応じた回数だけ反復計算を行うものとし、GA を用いて計算時間が最小となるようにタスクを配列している⁽⁸⁾。

タスクとは、一つ以上の評価特性を評価することで設計変数の値を決定するという設計作業を指す。ここで、一つの製品を設計するために必要とされるものは、複数の部門で決定される複数の設計変数値であり、実際の設計時に、部門ごとに割り振られた設計変数の値を決める指標となるのが評価特性である。このことを考慮すると、設計変数ではなく、評価特性の配列を最適化するほうが、設計の流れを本質的に扱えると考えられる。

本研究では、最終的な目的を大規模設計問題に対する大域的最適解を最小時間で求めることとし、製品設

計時に考慮すべき複数の評価特性について、評価特性間の相互関係に着目してブロック化および再配列を行うことにより、そのコンカレントな評価順序を与える手法を提案する。本手法を用いたのち、得られた評価順序に従って各評価特性を順次評価していくことで、最終目的の達成が期待される。

2. 本手法の概要

2.1 問題の定式化 本研究の目的は、製品を設計するにあたり、評価すべき評価特性と決定すべき評価変数、および各評価特性における評価変数の入出力関係が与えられたときに、その入出力関係に基づき、評価時間が最小となるような評価特性の評価順序を求めることである。本研究で扱う問題を定式化すると以下のようになる。

目的関数: $t = t(y) \rightarrow$ 最小化 …………… (1)

制約条件: 各評価特性の入出力関係 $\Psi_i(x_{i_i}, x_{o_i})$ に違反しない

ここで、

t : 開発期間

y_j : j 番めに配列された評価特性

Ψ_i : 評価特性 i

x_{i_i} : Ψ_i の先行入力

x_{o_i} : Ψ_i の出力変数

なお、評価特性に影響を与える設計変数には、その評価特性を評価するときに決定変数となるものと、定数として扱うものがあることを考慮して、前者を出力変数 x_o 、後者を先行入力 x_i として差別化を図る。

2.2 Functional Dependence Table DSS で用いるマトリックスは、タスク間の先行関係にのみ着目している。しかし、設計の際に指標となるのは一つ以上の設計変数より成る評価特性であるが、最終的に必要なのは各設計変数の値であるため、評価特性と設計変数との関係についても考慮に入れるべきである。そこで本研究では、DSS とは異なり、Functional Dependence Table (FDT) を用いて評価特性の相互関係を表現する⁽⁹⁾。FDT を用いることで、設計変数に基づく評価特性間の相互関係を読取ることが可能となり、循環の対処を論理的に行うことができる。

2.3 本手法の大まかな流れ 本手法の大まかな流れを図 1 に示す。まず準備段階として、設計時に決定する設計変数と評価する評価特性を列挙し、その相互関係に基づき各評価特性のタスク化を行う。次に、各評価特性と設計変数との関係を FDT で表現し、初期 FDT とする。その後、相互に密接な関係を持つ評価特性群をまとめてブロックを形成し、FDT の単純

化、最適化計算の効率化、および評価時間の短縮を図るとともに、出力変数のフィードバックによる評価特性の再評価時間ロスが最小となるように評価特性を配列して、複数の評価特性の最適な評価順序を与える。

二つの評価特性が、ある設計変数については入出力関係にあり、かつ別の設計変数については逆に入出力関係にあるとき、それらの評価特性は循環を成す。同一の出力変数を持つ二つの評価特性もまた、互いに異なる目的関数と制約条件から構成される最適化問題を解くことにより、同じ設計変数の値を決定・変更するため、その入出力関係は循環を成す。循環による反復評価が評価時間を増加させる第一要因であるため、その数を減らすことが設計時間、ひいては開発期間の短縮につながる。本手法では、循環が相互に先行関係を持つ評価特性によって構成されることを踏まえて、評価特性間の相互関係(協調・競合)に基づいて循環の数の減少を目指す。ここで、二つの評価特性が協調関係にあるとは、片方の評価特性を改善したときに、もう片方の評価特性も同時に改善されるという関係にあることを示し、逆に片方の評価特性を改善すると、もう片方の評価特性が改悪されるという関係を競合関係と定義する。

加えて、二つ以上の評価特性に対する同時並列評価を考慮に入れることで、さらなる評価時間の短縮を図る。

Fig. 1 Flowchart of the proposed method

Fig. 2 Task i

3. 意思決定順序最適化手法

先に述べた本手法の流れに沿って、各部分の詳細について説明するとともに、手順をステップにまとめる。

3.1 評価特性の列挙とタスク化(ステップ1)

まず、設計の際に考慮すべき評価特性および設計変数を列挙し、各評価特性と設計変数との関係をまとめて、図2のようなタスクとする。このタスクは、構成要素として、最適化の中核を成す目的関数と制約条件に加えて、設計変数の入出力情報を持つ。

各タスクを担当する設計チームは、タスクの実行にあたり、図3のように先に決定されている設計変数値を先行入力 x_i として、制約条件 $g_i \leq 0$ に従いつつ、目的関数 f_i を最小にする出力変数値 x_o を求める。ここで、実際の評価手法は、各タスクの最適化問題に応じて適切に選ぶものとする。

3.2 初期 FDT の作成(ステップ2) 次に、評価特性と設計変数との入出力関係を基に、初期 FDT を作成する。

ここで、従来の FDT は、 j 番目の評価特性 ψ_j と i 番目の設計変数 x_i が関係を持てば '1' を、関係を持たなければ '0' を、それぞれ表の i 行 j 列めに記すという単純なものであったが、本手法では、評価特性と設計変数との入出力関係を明確にするため、次のように先行入力と出力変数の区別化を図る。関係を持つ j 番目の評価特性 ψ_j と i 番目の設計変数 x_i について、設計変数 x_i が ψ_j に対して、先行入力となっている場合には '1'、出力変数となっている場合には '0' を表の i 行 j 列めに記す。

3.3 共同処理ブロックの生成と FDT のブロック化(ステップ3-4) 同一の設計変数に対して決定権を持つ評価特性が複数存在する場合、当然それらは相互に密接な関係を持ち、それ故共同に評価されるべきである。このように、複数の評価特性の出力変数となっている設計変数を、共同変数と呼ぶ。本手法では、

Fig. 3 Execution of the task

同一の共同変数を有する複数の評価特性をまとめて共同処理ブロック (Collaborative Block, 以下 CB) とし、その総合的な評価により、設計解の大域的な最適化を図る。

以上の考えに基づき、初期 FDT を作成した後、最初に CB を生成する。ここで、以下に詳述する手法 (3・4 節) を用いて評価特性を配列するためには、FDT の各行に出力はただ一つでなければならないことを踏まえて、CB を生成する際に、各 CB に含まれる評価特性について、入出力を結合させることで一時的に、新しい評価特性 ϕ を作る。この操作を FDT のブロック化と呼ぶ。なお、CB に含まれる設計変数が、それを構成するある評価特性についての先行入力となっておりと同時に、別の評価特性についての出力変数になっているときには、'0(1)' と表し、CB そのものからみた場合には出力と同様に扱う。例えば、表 1 に示す FDT で、評価特性群 ($\Psi_2, \Psi_3, \Psi_4, \Psi_5, \Psi_6$) は、共同変数 (x_4, x_6) を有する CB を構成する。この CB に対して、評価特性を結合させて FDT をブロック化すると、表 2 を得る。

3・4 ブロック化された FDT の配列 (ステップ 5-6)

CB を選別し、FDT をブロック化した結果、FDT の各行に出力は一つだけである。ブロック化された FDT 上の評価特性は、同一の設計変数に対する決定権を持たず、互いに評価特性間の先行順序を示す入出力関係のみで結ばれている。よって、先行関係に基づ

き、ブロック化された FDT 上の評価特性を最も効率的に配列することが重要である。そこで本手法では、配列の効率性を表す指標として再評価コストを以下に定義し、その値が最小となるように評価特性を配列することで、最も効率的な配列を求める。その後、FDT が上三角行列となるように設計変数も配列し、同じ評価特性と関係を持つ設計変数をまとめて、設計者が各評価特性の入出力情報を容易に見て取れるようにする。

与えられた FDT 上において、他の評価特性に対してフィードバック関係にある出力変数をすべて選び出し、Fb 出力とする。各 Fb 出力のフィードバックにより、再び評価する必要がある評価特性の数をすべて足し合わせた総和を、その配列に対する再評価コストと定義する。ここで、考慮範囲は FDT 上で Fb 出力の左側にある評価特性群のみとする。また、いくつかの評価特性が循環を成す場合には、循環を構成する評価特性の数に循環強度を乗じたものを再評価コストとする。なお、循環強度には、各フィードバックによる反復計算の回数に応じた値 (本研究では、仮に 3 とした) を与える。i 番めの Fb 出力をフィードバックすることによって再び評価しなければならない評価特性のうち、循環に含まれないものの数を a_i 、循環を構成するものの数を b_i とすると、再評価コスト R は次式で表される。なお、 l_i は循環強度、 n は Fb 出力の総数をそれぞれ示す。

$$R = \sum_{i=1}^n \{a_i + (l_i \times b_i)\} \cdots \cdots (2)$$

例として、表 3 のような FDT の配列に対する再評価コストを求めてみる。まず、Fb 出力となっているのは、 Ψ_3 の出力変数 x_1 だけであり、この x_1 は Ψ_1 にフィードバックされている。次に、 Ψ_1 の出力変数のうち、 x_2 は Ψ_3 の、 x_3 は Ψ_2 の各々先行入力となっている。なお、 Ψ_1 と Ψ_3 の入出力関係は循環を成す。以上より、表 3 の配列に対する再評価コストは 7 と求められる。

3・5 共同処理ブロックの配列 (ステップ 7-10)

ここでは、3・3 節で生成した各 CB に含まれる評価特性を配列する。CB の主たる出力である共同変数は、本来その決定に携わるすべての評価特性を、同時かつ共同に最適化することで真の大域的最適解を得られる。しかし、同一の共同変数を有する評価特性の数が増加するに従い、それらを同時かつ共同に最適化することは困難になる。加えて、二つ以上の評価特性との間に、相違なる共同変数を有する評価特性が存在する場合、同時かつ共同に考慮すべき評価特性の数は膨大

Table 1 Example of a collaborative block

	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4	Ψ_5	Ψ_6	Ψ_7
x_1	0	1		1	1		
x_2	0	1		1		1	
x_3			1	1	1	1	0
x_4		0	0	0	0		
x_5				0		1	1
x_6					0	0	1

Table 2 Example of block making

	Ψ_1	Φ_1	Ψ_7
x_1	0	1	
x_2	0	1	
x_3		1	0
x_4		0	
x_5		0(1)	1
x_6		0	1

Table 3 Example of reevaluation cost

	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4
x_1	1		0	1
x_2	0		1	
x_3	0	1		
x_4		0		1
x_5				0

となり、すべての評価特性を同時かつ共同に最適化することは現実的に無理である。

以上より、本手法ではCBに含まれる評価特性についても、その最適な決定順序を求め、それに従って順に評価していくものとする。具体的には、評価特性間の協調関係に着目して評価特性を配列することで、循環の数、つまりフィードバックの回数を減らす。2・3節の定義より、二つの評価特性が協調関係にあるとき、そのパレート解は小領域に収束し、逆に競合関係にあるとき、そのパレート解は広範囲にまたがる。これより、協調関係ならフィードバックによる計算の反復回数は少なく済み、競合関係なら何回も行う必要があると考えられる。本手法ではこれを利用して、協調関係にある評価特性をブロック化することで、協調ブロック内に含まれる評価特性間の循環の数を大幅に減少させる。また、開発チームが、どの評価特性を重要視して設計を行うかということも考慮に入れる。以下、CB内の配列アルゴリズムの詳細について述べる。

CB内の配列に先立ち、単純CBと連鎖 Ψ を次のように定義する。同一の共同変数(複数可)を持ち、かつ他の評価特性との間に別の共同変数を有さない評価特性の集まりを単純CB、二つ以上の評価特性との間に相異なる共同変数を有する評価特性を連鎖 Ψ とする。

まず、各CB内の評価特性を、一つ以上の単純CBとそれらを結びつける連鎖 Ψ とに分割する。次に、各単純CB内の配列を行う。単純CBを構成する評価特性に優先順位を与え、最も優先順位の高い評価特性と協調関係にあるものをまとめてブロック(協調ブロック)とする。残った評価特性の中で最も優先順位の高い評価特性について、同様に協調ブロックを生成する。すべての評価特性がブロック化されるまでこの操作を繰返し、単純CB内の配列を得る。なお、協調ブロック内の配列も優先順位に従うものとする。続いて、得られた各単純CBの配列結果を制約条件として、全単純CBに含まれる評価特性を、その再評価コストが最小となるように並べる。最後に、すべての連鎖 Ψ についてその再評価コストが最小となるように配列して、先に得られた配列の後ろに並べ加える。

3・6 並列処理ブロックの生成(ステップ11)

最後に、前ステップまでで最適に配列されたFDTに対し、設計期間の短縮を目的とした、評価特性のブロック化を行う。このように、同時並列に評価することが可能な評価特性を集めたブロックを、並列処理ブロック(Parallel Block, 以下PB)と呼ぶ。

PBを生成する際、先に述べたように互いに同時並列に評価することが可能な評価特性を選ぶ必要があ

る。言い換えると、“入出力関係にある”、もしくは“同一の共同変数を有する”といった、同一設計変数値をやり取りする二つの評価特性を、同一のPBに含めてはいけない。同一設計変数の値をやり取りする二つの評価特性は、一方を評価して出力変数の値を決定した後でしか、他方を評価できないため、明らかに同時並列に評価できないからである。以上のことを、PBの生成時に制約条件として考慮に入れる。

また、PBは設計チームの数など、計算資源による制限を受ける。そこで、利用可能な計算資源を基に、各PBに入れることのできる評価特性の最大数をブロックサイズとしてあらかじめ設定し、制約条件に含める。

3・7 本手法の詳細な手順 以上の詳細な流れに沿って、本手法を、以下に示す11のステップにまとめる。

ステップ1 設計時に考慮すべき評価特性と決定すべき設計変数を列挙し、入出力関係に基づいて評価特性をタスク化する。

ステップ2 すべての評価特性について、その先行入力に‘1’、その出力変数に‘0’をそれぞれ与える。

ステップ3 初期FDTより共同変数を探し、関係する評価特性をまとめてCBを生成する。この際、CB間における同一評価特性の重複がなくなるように、重複する評価特性を持つCBをまとめる。

ステップ4 各CB内の全評価特性の入出力を結合させて、FDTをブロック化する。

ステップ5 ブロック化されたFDTについて、再評価コストが最小となるように評価特性を配列する。

ステップ6 FDTの左から順に、各評価特性について、Fb出力を除く入出力が、表の上から順に‘1’、‘0’となるように設計変数を配列する。

ステップ7 各CBを、単純CBと連鎖 Ψ とに分割する。

ステップ8 各単純CB内の評価特性に優先順位を与え、以下の手順に沿って、全単純CB内の評価特性を配列する。

手順：最優先の評価特性を探し、それと協調関係にある評価特性を選び出して、優先順位に従い配列するという作業を繰返し、各単純CB内の評価特性の配列を得る。それらの配列結果を制約条件として、全単純CB内の評価特性をその再評価コストが最小となるように配列する。

ステップ9 ステップ8の結果を制約条件として、再評価コストが最小となるように連鎖 Ψ を並べ加

Table 4 Design variables

Design variables
x_1 : Material
x_2 : Frame design
x_3 : Length of material used in frame
x_4 : Cross-sectional shape of frame
x_5 : Cross-sectional area of frame
x_6 : Manufacturing method of frame
x_7 : Joining method of frame
x_8 : Handle design
x_9 : Length of material used in handlebar
x_{10} : Manufacturing method of handlebar
x_{11} : Size of tire
x_{12} : Type of tire
x_{13} : Type of brake
x_{14} : Power train
x_{15} : Scale of production
x_{16} : Manufacturing equipment
x_{17} : Manpower
x_{18} : Product development cycle time

Table 5 Criteria and their input/output variables

Criteria	Input variables	Output variables
Ψ_1 : Weight	x_3, x_9, x_{11}, x_{14}	x_1, x_5
Ψ_2 : Size	x_2, x_8	x_3, x_9, x_{11}
Ψ_3 : Toughness	x_1, x_2	x_4, x_7
Ψ_4 : Acceleration	x_{11}	x_{12}, x_{14}
Ψ_5 : Design	x_4, x_5, x_{13}	x_2, x_8
Ψ_6 : Comfortable	x_2	x_8
Ψ_7 : Safety	None	x_2, x_{13}
Ψ_8 : Recycle ability	None	x_1
Ψ_9 : Manufacturing method of frame	x_1, x_4	x_6
Ψ_{10} : Joining method of frame	x_1, x_4, x_5	x_7
Ψ_{11} : Manufacturing method of handlebar	x_1, x_8	x_{10}
Ψ_{12} : Material cost	$x_3, x_9, x_{11}, x_{13}, x_{15}$	x_1, x_5, x_{12}, x_{14}
Ψ_{13} : Manufacturing cost of frame	x_2, x_3, x_7, x_{15}	x_4, x_6
Ψ_{14} : Manufacturing cost of handlebar	x_8, x_9, x_{15}	x_{10}
Ψ_{15} : Scale of production	None	x_{15}
Ψ_{16} : Product development cycle time	$x_6, x_7, x_{10}, x_{15}, x_{17}$	x_{16}, x_{18}
Ψ_{17} : Operating cost	x_{16}, x_{18}	x_{17}

Table 6 Initial FDT

	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4	Ψ_5	Ψ_6	Ψ_7	Ψ_8	Ψ_9	Ψ_{10}	Ψ_{11}	Ψ_{12}	Ψ_{13}	Ψ_{14}	Ψ_{15}	Ψ_{16}	Ψ_{17}
x_1	0		1					0	1	1	1	0					
x_2		1	1		0	1	0						1				
x_3	1	0										1	1				
x_4			0		1				1	1		0					
x_5	0				1					1		0					
x_6								0					0			1	
x_7			0						0				1			1	
x_8		1			0	0					1			1			
x_9	1	0										1		1			
x_{10}											0			0		1	
x_{11}	1	0		1								1					
x_{12}				0								0					
x_{13}					1		0					1					
x_{14}	1			0								0					
x_{15}												1	1	1	0	1	
x_{16}																0	1
x_{17}																1	0
x_{18}																0	1

Table 7 FDT after blocks are made

	Ψ_2	Ψ_{15}	Ψ_{16}	Ψ_{17}	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4
x_1					0	1		1
x_2	1					1	0(1)	
x_3	0				1	1		
x_4						0(1)	1	
x_5					0	1	1	
x_6						0		
x_7						0(1)		
x_8	1						0	1
x_9	0				1			1
x_{10}			1					0
x_{11}	0				1			
x_{12}					0			
x_{13}					1		0(1)	
x_{14}					0(1)			
x_{15}		0	1		1	1		1
x_{16}			0	1				
x_{17}			1	0				
x_{18}			0	1

Fig. 4 City bicycle

える。

ステップ10 ステップ9までで得られた配列結果より、評価特性の配列を完成させる。

ステップ11 利用可能な計算資源を基にブロックサイズを設定し、以下の最適化計算により、PBを生成する。

目的関数：

$[f_1, f_2] \rightarrow \text{最小化}$

f_1 ：総ブロック数

f_2 ：PB内の評価特性数の平均

制約条件(各PBについて)：

g_1 ：評価特性数 $\leq$ ブロックサイズ

g_2 ：同一の設計変数について入出力関係にある評価特性を含まない

g_3 ：同一の共同変数を持つ評価特性を含まない

4. 適用例

4.1 自転車の設計計画 本手法を自転車の設計計画に適用して、その有効性を示す。具体的には、図4に示すような自転車の新製品開発を考えている自転車メーカーの視点に立ち、開発計画の支援を行う。自転車は大きく分けてフレーム部、ハンドル、タイヤ、サドル、動力伝達部、ブレーキの6部品で構成されている。問題設定として、この自転車メーカーは、素材棒を加工してフレーム部とハンドルを自社で製造するとともに、他の部品を他社より購入し、集められた各部品を組み立てて、市場に売り出すメーカーであるとする。以下、先に述べた手順に従い、自転車の設計計画を立てていく。

ステップ1 自転車の設計において、決定すべき設計変数を表4に示し、これらの設計変数と評価特性との入出力関係を表5のように与える。

ステップ2 各評価特性と設計変数の入出力関係に注意して作成した初期FDTを、表6に示す。

ステップ3 初期FDTより、共同変数(x_1, x_5, x_{12}, x_{14})を持つCB₁($\psi_1, \psi_4, \psi_8, \psi_{12}$)、共同変数(x_4, x_6, x_7)を持つCB₂($\psi_3, \psi_9, \psi_{10}, \psi_{13}$)、共同変数(x_2, x_8)を持つCB₃(ψ_5, ψ_6, ψ_7)、共同変数(x_{10})を持つCB₄(ψ_{11}, ψ_{14})が得られる。

ステップ4 各CB内の評価特性を結合してFDTをブロック化すると、表7のようになる。

ステップ5-6 表7について、再評価コストが最小となるように評価特性を配列し、その後、設計変数も配列した結果を、表8に示す。このとき、再評

Table 8 Ordered FDT based on the reevaluation cost

	ψ_{15}	ϕ_3	ψ_2	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_4	ψ_{17}	ψ_{16}
x_{15}	0			1	1	1		1
x_4		1			0(1)			
x_5		1		0	1			
x_2		0(1)	1		1			
x_{13}		0(1)		1		1		
x_8		0	1		1			
x_3			0	1		1		
x_9			0	1				
x_{11}			0	1				
x_{14}				0(1)				
x_{12}				0				
x_1				0	1	1		
x_7					0(1)			
x_6					0			
x_{10}						0		1
x_{16}							1	0
x_{18}							1	0
x_{17}							0	1

Table 9 Final FDT

	ψ_{15}	ψ_7	ψ_6	ψ_5	ψ_2	ψ_4	ψ_8	ψ_1	ψ_{12}	ψ_{10}	ψ_9	ψ_3	ψ_{13}	ψ_{11}	ψ_{14}	ψ_{17}	ψ_{16}
x_{15}	0								1				1		1		1
x_4				1						1	1	0	0				
x_5				1				0	0	1							
x_2		0	1	0	1							1	1				
x_{13}		0		1					1								
x_8			0	0	1									1	1		
x_3					0			1	1				1				
x_9					0			1	1						1		
x_{11}					0	1		1	1	1							
x_{14}						0		1	0								
x_{12}						0			0								
x_1							0	0	0	1	1	1		1			
x_7										0			0				1
x_6											0	0	1				1
x_{10}														0	0		1
x_{16}																1	0
x_{18}																1	0
x_{17}																0	1

Fig. 5 The design schedule

価コストは36であった。なお、今回は問題が比較的小規模であるため、最適化計算には全数探索を用いた。

ステップ7-9 例として、CB₁内の評価特性の配列を行う。CB₁内の共同変数は x_1, x_5, x_{12}, x_{14} で、それらを出力とする評価特性群は、順に、 $(\psi_1, \psi_6, \psi_{12})$, (ψ_1, ψ_{12}) , (ψ_4, ψ_{12}) , (ψ_4, ψ_{12}) である。これより、CB₁は、共同変数 (x_1, x_5) を有する単純CB (ψ_1, ψ_6) 、および共同変数 (x_{12}, x_{14}) を有する単純CB (ψ_4) 、そして連鎖 $\psi(\psi_{12})$ に分割できる。各単純CBを構成する評価特性に対して、優先順位を次のように与える。1→ ψ_4 :加速性、2→ ψ_6 :再利用性、3→ ψ_1 :重量。以上より、CB₁の配列は $(\psi_4, \psi_6, \psi_1, \psi_{12})$ となる。同様にして他のCBについても、各々配列 $(\psi_{10}, \psi_9, \psi_3, \psi_{13})$, (ψ_7, ψ_6, ψ_5) , (ψ_{11}, ψ_{14}) を得る。

ステップ10-11 各配列結果を基に、評価特性および設計変数の配列を完成させ、PBを生成した最終結果が、表9の最終FDTである。制約条件 g_2 に従って、評価特性群 (ψ_7, ψ_6) , (ψ_5, ψ_2) , (ψ_2, ψ_4) , (ψ_{12}, ψ_{10}) , (ψ_{17}, ψ_{16}) は互いに“入出力関係にある”ため、また評価特性群 (ψ_6, ψ_5) , (ψ_1, ψ_{12}) , (ψ_9, ψ_3) , (ψ_3, ψ_{13}) は“同一の共同変数を持つ”ため、同一のPBに含めることはできず、別々のPBとして配置する。ここで、ブロックサイズは仮に3とした。

4.2 結果 最終FDTより、以下の結果が得られた。

(1) FDT上の評価特性の配列がその評価順序を示す。

(2) 同一行の‘0’→‘1’は設計変数値の流れ、つ

まり評価特性間における設計変数の入出力関係を示す。

(3) 配列結果に従いつつ、同時並列に評価できる評価特性群は、PB₁ (ψ_{15}, ψ_7) , PB₂ (ψ_4, ψ_8) , PB₃ (ψ_{10}, ψ_9) , PB₄ (ψ_{13}, ψ_{11}) , PB₅ (ψ_{14}, ψ_{17}) である。

(4) 複数の評価特性にまたがって決定される設計変数は $x_1, x_2, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_{10}, x_{12}, x_{14}$ で、その決定に関与する評価特性群は、それぞれ $(\psi_1, \psi_8, \psi_{12})$, (ψ_5, ψ_7) , (ψ_3, ψ_{13}) , (ψ_1, ψ_{12}) , (ψ_9, ψ_{13}) , (ψ_3, ψ_{10}) , (ψ_5, ψ_6) , (ψ_{11}, ψ_{14}) , (ψ_4, ψ_{12}) , (ψ_4, ψ_{12}) である。

(5) 循環を構成するのは、循環 $(\phi_3, \phi_2, \phi_1, \phi_2)$ と循環 (ψ_{16}, ψ_{17}) に含まれる評価特性である。

4.3 考察 得られた結果を有効に活用することで、コンカレントな製品開発が可能となる。例えば、結果(2)と(4)からは、ある評価特性を再評価するなどの評価特性が影響を受けるかが、結果(4)と(5)からは、密な情報交換を必要とする評価特性群が容易にわかる。また、結果(1)と(3)より、図5のような設計計画が得られる。ここで、設計計画を作成する際に、各評価特性の評価に要する時間はすべて一定であるとした。図5中の点線ブロックは共同処理ブロックを示しており、この中に含まれる評価特性群は各々密接な関係にある。また、矢印は評価特性間における設計変数値のフィードバックを表している。

5. 結 言

与えられた複数の評価特性について、設計変数に基づく相互関係に着目したブロック化、および配列を行うことで、そのコンカレントな評価順序を求める手法を提案した。本研究をまとめると、以下のとおりとなる。

(1) FDTを作成する際、評価特性と設計変数との入出力関係に応じて表現方法を分け、視覚的な明確化を図った。

(2) 同一の設計変数に対する決定権を持つ複数の評価特性をまとめて共同処理ブロックと成し、評価特性間の協調関係および優先順序を考慮した配列手法を提案して、循環の数を減少させた。

(3) ブロック化されたFDT上の評価特性を、フィードバックによる反復評価の数が最小となるように配列することで、その評価に要する時間を短縮した。

(4) さらに、最適に配列されたFDTに対して、同時並列に評価できる評価特性をまとめて並列処理ブロックとなす手順を示して開発期間を短縮した。

(5) 以上の方法論を自転車の設計計画に適用して、その有効性について考察した。

文 献

- (1) Michelena, N. F. and Papalambros, P. Y., A Hypergraph Framework for Optimal Model-Based Decomposition of Design Problems, *Comput. Optimiz. Appl.*, 8-2 (1997), 173-196.
- (2) Michelena, N. F., Papalambros, P. Y., Park, H. A. and Kulkarni, D., Hierarchical Overlapping Coordination for Large-Scale Optimization by Decomposition, *AIAA J.*, 37-7 (1999), 890-896.
- (3) Wujek, B. A. and Renaud, J. E., New Adaptive Move-Limit Management Strategy for Approximate Optimization, Part 1, *AIAA J.*, 36-10 (1998), 1911-1921.
- (4) Wujek, B. A. and Renaud, J. E., New Adaptive Move-Limit Management Strategy for Approximate Optimization, Part 2, *AIAA J.*, 36-10 (1998), 1922-1934.
- (5) Yoshimura, M. and Nomura, R., Optimization of Machine System Designs Based on Decomposition and Hierarchical Ordering of Criteria and Design Variables, *Proc. ASME Design Eng. Tech. Conf. Comput. Information Eng. Conf.*, DAC-14520, (2000), 1-14.
- (6) Steward, D. V., The Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems, *IEEE Trans. Eng. Manage.*, Vol. EM-28, No. 3 (1981), 71-74.
- (7) Kusiak, A. and Wang, J., Efficient Organizing of Design Activities, *Int. J. Product. Research*, 31-4 (1993), 753-769.
- (8) Rogers, J. L., McCulley, C. M. and Bloebaum, C. L., Optimizing the Process Flow for Complex Design Projects, *Design Optimization: Int. J. Product Process Improv.*, 1-3 (1999), 281-292.
- (9) Kusiak, A. and Wang, J., Decomposition of the Design Process, *Trans. ASME, J. Mech. Des.*, 115-4 (1993), 687-695.