1104 スーパーバイズエージェントによる協調設計に関する研究

A Study on Collaborative Design using Supervise Agents

○正 宮下 朋之 (早大) 正 山川 宏 (早大)

Tomoyuki MIYASHITA Hiroshi YAMAKAWA

In the case that mechanical system is large or complicated, design of the system is often divided into design of its components and integrated from design resulted from the divided design level. Therefore designers have to integrate their components design into final design. However, in this stage, it can be seen some conflicts and it is important to resolve these conflict to make shorten the leadtime of design process and make profit. Recently, we can widely use computers in various design stages and we can decrease the number of times of time-consuming real experiments using analytical software. It can be seen the situation that offices of designers are apart from each other and the same situation for computers and analytical software in the offices.

In this research, we proposed the collaboration design method that resolve the conflict among designs connecting the computers using networks. In our previous paper, we have proposed the design evaluation method using Data Envelopment Analysis and calculation method of compromise design. We have confirmed that it is effective to offer compromise information in the stage of components design. In this paper, we have improved our proposed that can offer the direction for compromise design and confirmed the effectiveness of the proposed method through some numerical examples.

Key Words: Design Engineering, Collaborative Design, Multidisciplinary Design Optimization
Data Envelopment Analysis

1. 緒言

多くの検討を機械構造物に加えるために、多くの設計者により設計が行われる。複雑な機械構造物や技術領域の異なる機械構造物を取り扱う場合には、設計が容易になるように部品や部位などの構成要素に分割して、機械構造を構成する個別の要素毎に設計が行われ、その結果を統合することにより最終的な製品の設計が定められていく。この場合には個別に与えられた設計間に競合がみられることが多く、競合を早期に解消することが製品開発期間を短縮するために有用である。近年ではコンピュータの利用が進み、多くの観点からシミュレーションにより実際の実験を行う頻度を少なくし、設計の早期の段階から迅速な検討が行われつつある。しかしながら、別々の設計者により行われる個別の設計は遠隔地で行われることもあり、設計者が使用するコンピュータや解析ソフトウェアなどの設計環境が遠隔地に跨ることも多いと考えられる。

そこで、本研究では、コンピュータネットワークを利用して遠隔地にまたがる設計環境を接合して、個別に行われている設計をひとつの設計に絞るための設計法を構築することを目的とする。筆者らは過去の研究により、競合が発生する場合には、合理的な評価を設

計者に与えることが重要であるとの考察のもと、データ包絡分析法により設計案を合理的に評価する方法を提案⁽¹⁾し、妥協案を算出する方法を提案⁽²⁾し検討を加えた。しかしながら、ここでは設計評価値の向上を設計者に要求し、データ包絡法により優位集合が得られ、ここでは、評価値が優れた類似の設計が得られるものの、妥協すべき設計改善の方向は十分に与えられていなかった。本研究では、設計者が妥協すべき方向として設計変数の更新の方向を算出する方法を提示し、いくつかの数値計算例を用いて有効性を示すことを目的とする。

2. 提案手法

筆者らが提案している設計案の評価法と妥協案の算出法に関して簡潔に述べ、本論文が提案する妥協方向の算出法について述べる。

2.1 データ包絡分析法による設計案の評価

複数ある設計のうち、 k 番目の設計に関する評価値 θ^k は、その設計案の評価項目のうち、最小化するものを x_j^k に、最大化するものを y_i^k に割り当て、式(1)~(4)の分数計画問題をシンプレックス法により解き算出する。評価値 θ^k は、式(1)で定義され、重み係数 u_i^k 、 v_j^k を非負のものから評価値が最も高くなるように決定さ

れる。

find u_i^k, v_j^k such that

$$\text{maximize } \gamma^k = \frac{\sum_{i=1}^n u_i^k y_i^k}{\sum_{j=1}^m v_j^k x_j^k} \quad (1)$$

$$\text{subject to } \frac{\sum_{i=1}^n u_i^k y_i^l}{\sum_{j=1}^m v_j^k x_j^l} \leq 1 \quad (l=1, \dots, p) \quad (2)$$

$$u_i^k \geq 0 \quad (i=1, \dots, n) \quad (3)$$

$$v_j^k \geq 0 \quad (j=1, \dots, m) \quad (4)$$

設計評価値は[0,1]の範囲の実数であり、1であるほど評価が高い設計案である。また、式(1)~(4)の問題は双対変換され、そこに現れるラグランジュ乗数により、k番目の設計案に優位な設計案が示される。

2.2 妥協領域の決定

競合する目標が存在する場合に、その競合を解消して、設計候補の範囲を狭めることが重要である。筆者らの研究(1),(2)では、領域限定法により、その範囲を絞る方法を提案しているが、その方法におけるパラメータの初期値や更新方法は必ずしも容易ではない。

そこで、本報告では、図1における観察に基づき、妥協領域の幅を定義し、この幅を小さくすることを設計者に要求することにした。図1は、2人の設計者が持つ設計目標は競合しており、各々が嗜好している水準値を上回る領域（斜線部）が存在するものと考えられる。これらの領域間の領域（黒部）を妥協領域と呼び、斜線部領域の隔たりは妥協の困難の度合いを示すものと考え、妥協領域の幅と呼ぶことにする。

この妥協領域の幅を少なく設計候補群を調査することにより、最終的な設計を定めることが容易になると考えられる。そのため、この妥協領域の幅を設計者が提示する複数の設計案より算出し、妥協領域の幅が小さくなることを設計者に要求することにする。

妥協領域の幅は次式により算出する。

$$d_k = \frac{1}{N(\text{Conflict})} \sum_{i \in \text{Conflict}} \frac{\text{Min} \left\{ \left| f(x^{(k)}) - f(x^{(i)}) \right| \mid x^{(k)} \in X^k, x^{(i)} \in X^i \right\}}{\text{Max} \left\{ \left| f(x^{(k)}) - f(x^{(i)}) \right| \mid x^{(k)} \in X^k, x^{(i)} \in X^i \right\}} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここにおいて、 d_k は設計者kに関するk以外の設計者1,2,...,mとの妥協領域の距離の総和を表し、最大値は1である。 X^k は設計者kが提示した設計案の集合を表す。ただし、算出の対象となるのは、競合の発生

が見られる設計者を対象としており、競合がない目的関数の成分は0として算出する。

図1 妥協領域

2.3 妥協情報の提示

設計者を妥協に導くためには提案手法は以下の情報を設計者に提示する。

(1) 設計評価値

2.1で述べたデータ包絡法により得られる評価値であり、この評価値が1になるほど効率的フロンティアに近い設計案である。評価の対象となる設計案が設計空間の全体に十分に分布している場合には、パレート解集合に一致する。

(2) 妥協案

設計者に具体的な設計案を提示する。筆者らは以前の研究により、設計変数の内分点に基づく方法⁽¹⁾と目的関数の内分点に基づく方法⁽²⁾を提案した。後者の計算では副次的な最適化問題を解く必要があるため計算に時間がかかる。そこで、ここでは、前者の方法により妥協案を提示する。すなわち、次式により妥協案を提示する。

$$x = \sum_{i=1}^m \alpha_i x^{(i)} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1 \quad (7)$$

ここで、 $x^{(i)}$ は設計者iが提示した設計案のうち、最も新しいものである。また、 α_i の値は、式(8),(9)で算出される合計m+1の値を用いて、m+1通りの妥協案を算出する。

$$\alpha_i = \frac{1}{m} \quad (8)$$

$$\alpha_i = \begin{cases} \frac{2}{m+1} & (\text{if } i = j) \\ \frac{1}{m+1} & (\text{if } i \neq j) \end{cases} \quad (9)$$

(3) 妥協方向

設計者に対して妥協すべき方向を設計変数の更新方向と与える。具体的には競合している設計者の設計案が持つ設計評価値を用いて、複数の目的関数の妥協度合いより次の感度解析を行い設計変数の更新方向を算出する。

$$\mathbf{d}_i = \left[\frac{d\mathbf{f}}{d\mathbf{x}} \bigg|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^{(i)}} \right]^{-1} \left(\mathbf{f}(\mathbf{x}^{(i)}) - \sum_{j \in \text{Conflict}} \alpha_j \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(j)}) \right) \quad \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 $\mathbf{x}^{(i)}$ は設計者 i が提示した最新の設計案であり、その妥協方向が $\mathbf{d}_i$ で与えられる。 $\mathbf{f}$ は目的関数ベクトルである。

3. 数値計算例

2.1 から 2.3 による方法を実装したシステムを構築し、数値計算により検討を加えた。各設計者は

3.1 2 部材トラスの最小重量、最小変位問題

図 2 に示す 2 部材トラスの部材断面積 A_1, A_2 を設計変数として、構造質量および荷重作用点変位を目的関数として、それらの最小化を行う設計問題を取り扱った。縦弾性定数は、10 GPa とし、密度は、 $1.0 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$ とし、側面制約を $5 \leq A_i \leq 50 \text{ mm}^2$ とした。

図 2 2 部材トラスの設計問題

側面制約条件内に発生する乱数により初期の設計案を与えた。設計者の動作として以下の 2 つの動作を想定した。

- (1) 各設計者は自らが責任を持つ設計目的が最も良くなる設計案を側面制約条件や単目的の最適化問題から算出し、システムに与える。

- (2) スーパーバイズエージェントが提示する設計評価値が最も高くなり、妥協領域の幅が小さくなる設計案を与える。
- (3) スーパーバイズエージェントが提示する妥協点および妥協方向を用い設計改善を図り、その結果をシステムに与える。

このような要請に従い、設計者はシステムが与えた初期設計案および妥協案と妥協方向を参考にしながら、設計を改善しシステム入力した結果を図 4 に示す。システムは妥協領域の幅がある一定値になった段階で設計の終了を通知し、システムに入力された設計案のうち、評価値が最も高いものを提示して終了する。

スーパーバイズエージェントが提示する妥協点は理論的に算出したパレート曲線に近づいていくことが認められる。妥協案は 2 人の設計者が提示する設計案の中間部に位置するように配置されていることがわかる。また、A 部や B 部では、スーパーバイザが提示する妥協方向に従い、設計案を提示しているがパレート解集合からは離れていく方向であることがわかる。この場合、設計者は妥協領域の幅の悪化をせずに良い設計案を個別の最適化計算を行うことにより求めている。各設計者が約 15 の設計改善を経て、既定した妥協領域の幅が 0.2 以下の既定した値を下回り設計が終了した。

図 4 設計者が提示した設計案の推移

3.2 航空機の設計問題

NASA により、マッハ 2.6 の高速巡航を実現するために、Hish Speed Civil Transport(HSCT)に関する検討がなされており、関連したデータが公開されている。ここでは、このデータを利用して飛行機の翼形状の概念設計を提案システムにより取り扱う。設計問題は次のように定式化される。設計において決定すべき変数を表 1 に示すとおりであり、その上下限値を得られたデータより定めた。設計変数のうち翼形状に関する量を図 4 に示す。制約条件は翼形状に関するものや性能や

安定性に関するものなど 67 個の制約が存在する。これらの制約条件の上下限値は必ずしも明らかにされておらず、制約条件式の値がデータとして公開されている。目的関数は航続距離と費用を考え、航続距離を最大にし、費用を低減する設計候補を求めることとする。費用は、Modified DAPCA IV Cost Model⁽⁴⁾により与えられているモデルに従う。

図 5 翼形状に関する設計案

表 1 設計変数

番号	設計変数	単位	下限値	上限値
1	翼付根弦長	ft	127.98	196.42
2	前縁分岐位置, x	ft	79.13	190.01
3	前縁分岐位置, y	ft	12.010	63.842
4	後縁分岐位置, x	ft	163.24	234.95
5	後縁分岐位置, y	ft	12.641	87.100
6	後縁翼端, x	ft	135.08	246.72
7	翼端弦長	ft	6.985	12.622
8	翼幅	ft	56.338	99.119
9	最大厚さ比位置	% chord	0.07866	0.69759
10	翼付根断面厚さ比	%	1.5070×10^{-2}	4.6485×10^{-2}
11	翼分岐断面厚さ比	%	1.5048×10^{-2}	3.8868×10^{-2}
12	翼先端断面厚さ比	%	1.5037×10^{-2}	3.2470×10^{-2}
13	胴体拘束部 1, x	ft	2.000	3.960
14	胴体拘束部 1, r	ft	0.2120	1.910
15	胴体拘束部 2, x	ft	12.17	21.99
16	胴体拘束部 2, r	ft	0.6990	6.293
17	胴体拘束部 3, x	ft	26.04	238.43
18	胴体拘束部 3, r	ft	1.068	7.911
19	胴体拘束部 4, x	ft	49.73	296.85
20	胴体拘束部 4, r	ft	2.654	8.122
21	エンジン位置 1, y	ft	6.967	47.214
22	エンジン位置 2, y	ft	26.302	58.384
23	搭載燃料	lbs	2.4151×10^5	4.0372×10^5
24	垂直尾翼面積	sq-ft	1.3742×10^2	9.9880×10^2
25	水平尾翼面積	sq-ft	1.4041×10^2	9.8157×10^2

図 6 妥協領域の両端に位置する設計案の翼形状

4. 結言

本研究では、設計者の妥協形成を図るため競争を通じて促進するために、合理的な設計評価値と妥協案および妥協方向を設計者に提示することにより妥協領域の幅を小さくする方法を提示し、数値計算例により検討を加えて得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 設計者が設計評価値および妥協案および妥協方向を参考にすることで、2 部材トラスの問題ではパレート解集合に近い解が得られていることがわかる。航空機の設計問題においても良い解が得られている。
- (2) 設計初期では、妥協方向は必ずしもパレート解に沿う方向を与えないが、設計を進めるにつれ、すなわち、妥協領域の幅が小さくなるにつれ、パレート解集合に漸近する方向を与える。

以下の点が今後の課題である。

- (1) 妥協方向は設計初期には必ずしも、パレート解の方向を与えないことが認められた。そのため、設計者によっては、パレート解集合に属する解を求めずに終了している場合があり改善を要する。
- (2) 対話的なシステムとしたために、設計終了までに設計者の時間が継続的に拘束される負荷がみとめられた。設計情報をデータベースに格納することによるチェックイン・アウトなどの機構を用いる必要性が認められた。

参考文献

- (1) 宮下朋之・山川宏, スーパーバイズシステムによる最適設計に関する研究, 機論 66-643 (C), 921-928
- (2) 宮下朋之・山川宏, 複合領域設計システムの構築と検討, 機講論 No. 99-27, 142-145
- (3) 刀根薫, データ包絡分析法, 日科技連
- (4) D.P. Raymer, "Aircraft Design: A Conceptual Approach (Third Edition)", AIAA Education Series, 1999, 586-588.