遺伝的アルゴリズムを用いた筐体の補強構造設計支援システム*

山口 貴 吏^{*1}, 江 澤 良 孝^{*1}

A Design Support CAE System for Stiffener Structure Using a Genetic Algorithm

Takashi YAMAGUCHI^{*2} and Yoshitaka EZAWA

^{*2} Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd. 502 Kandatsu, Tsuchiura-shi, Ibaraki, 300-0013 Japan

A design support CAE system was developed to reduce weight and design time of box structures. This system assists users in optimizing box structures by using a genetic algorithm (GA). GA is known to be excellent in searching for globally optimal solution, but it requires a large number of generations. This paper proposes an effective method that makes possible to produce new structures by exchanging the parts in a box structure for differently shaped parts in a part database, and by moving parts of the structure to other positions. We used this system to optimize the stiffeners in a box structure and evaluated its convergence.

Key Words: Genetic Algorithms, CAE, Optimum Design

1. 緒 言

遺伝的アルゴリズム(以下GAと略す)^{1), 2)}は, 目的関数(適応度関数)の値を直接利用する最適化手法であり, 勾配法などの従来手法と比べて汎用性の高い手法である。また, 多峰性の強い問題に対して, 大域的な最適解を求めるのに有効な手法であることが知られており, 構造位相(トポロジー)最適化など複雑な問題に広く利用されている。

筆者らは, 電子機器, 電源装置等の外枠である筐体の構造適正化としてGAを用いた最適化機能を開発している。これまで, 板部材の板厚, 梁部材の断面寸法, 及び締結部材(リベットなど)の配置方法などに適用してきたが³⁾, 実際の筐体構造の設計では, 更に複雑な構造変化を伴う問題を扱う必要がある。

従来, GAを用いて大きな構造変化を伴う問題を扱う場合, あらかじめ考えられる全ての構造パターンの構成要素を用意しておき, その中のどの構成要素を利用するかをGAで判定していた⁴⁾。しかし, この表現方法では, 初期段階で全ての構造パターンを入力する必要があったり, 入力した構造の構成要素を個別に考

慮して探索するので, 探索効率が悪いなどの問題があった。

そこで, 本研究では, 構造物の構成要素を組合せて構成される部品を用い, この部品を別の異種構造の部品と交換したり, 部品単位で移動することにより形状が異なる構造を生成できるように機能を拡張した。また, 適応度の高い構造が持つ部品は, 有効な部品であると考え, この有効部品を用いて新たな個体を生成する機能を追加した。これにより, 有効な部品を用いて効率良く解を探索することができる。本稿では, 開発した最適化機能の概要, 及び補強構造の配置設計への適用について報告する。

2. GAを用いた最適化機能の概要

GAを最適化問題に適用するには, 最適化問題の設計変数をGAで扱う遺伝子配列の表現に変換するコーディング方法, 最適化問題の目的関数や制約条件に対応する最適性を評価するための適応度関数, 及び最適解を探索するためのGAオペレータ(選択, 交叉, 突然変異など)を決定する必要がある^{1), 2)}。

2.1 最適化問題の設定 最適化問題は, 最適化の対象構造に対し, 設計変数と評価項目を設定して与えられる。本システムの設計変数には, 板部材(シェル要

* 原稿受付 2000年10月6日。

^{*1} 正員, (株)日立製作所機械研究所(〒300-0013 土浦市神立町502)。

E-mail: yamagu@merl.hitachi.co.jp

Fig. 1 Coding method

素)の板厚と材質、梁部材(ビーム要素)の断面寸法と材質、締結部材(溶接、リベット、ボルト、ネジ)の配置寸法と材質、及び今回新たに追加した部品の「交換番号」と「移動ベクトル」が設定できる。ここで、「交換番号」は、部品データベースに格納されている部品の登録番号であり、この番号に対応する部品と現状の部品と交換することにより、形状の異なる構造が生成される。「移動ベクトル」は、部品移動データベースに格納されているベクトル情報であり、このベクトル情報をもとに部品を移動することにより、同一形状で部品の配置位置が異なる構造が生成される。これらの設計変数の変更によって生成される部品は、部品データベースに登録され、交換するときに再利用される。これにより、ユーザは、基本的な部品を用いて初期構造を設定するだけでよく、その後のGAの処理が基本的な部品を組合せて複雑な部品からなる構造を生成する。また、本システムの評価項目には、有限要素解析によって得られる変位、応力、及び固有振動数の他、重量、コストなどが用意されており、ユーザがこれらの評価項目を選択して、目的関数や制約条件を設定する。

2.2 コーディング方法 前節の最適化問題が与えられたら、この問題をGAで扱う遺伝子配列の表現へ変換(コーディング)する必要がある。本システムでは、図1に示すように、遺伝子配列として1次元配列を用い、配列の各要素に最適化問題の設計変数を設定する。ただし、各要素には、設計変数の値を設定せず、各設計変数が持つデータベースの中から設計変数の値を示す番号を設定する。設計変数の値を示す番号は、従来の設計変数と今回新たに追加した部品に関する設計変数により、2種類の設定方法がある。従来の設計変数は、規格データベースの中から制約範囲内のデータを取り出し、昇順に並べ替えたリストを生成し、そのリストの番号を設定する。部品に関する設計変数は、部品データベース内の各部品に付けた部品番号を設定する。部品に関する配列は、1次元配列に設定する部品の配列と部品データベース内にある可変長の部品要素の配列から構成されている。

Table 1 Fitness functions

部品の配列は、部品単位でまとめて処理できるので、有効な部品を取り扱うのに便利である。また、部品要素の配列は、必要な部品要素のみを用いて処理できるので、不要な部品要素の利用を回避でき、効率的な探索が実施できる。

2.3 適応度関数 本システムの評価項目には、FEM解析によって得られる変位、応力、及び固有値の他に、重量、転倒性(重心位置と転倒角度)、及びコストが指定できる。これらの評価項目の値は、表1に示す関数を用いて、GAの最適性の判定に利用する適応度に変換される。ここで、 E_{cmin} 、及び E_{cmax} はユーザが設定する評価項目の許容範囲の最小値及び最大値であり、 E_{min} 、及び E_{max} は過去の評価結果から得られる評価値の最小値及び最大値である。表1の変換関数は、許容範囲内 $[E_{cmin}, E_{cmax}]$ で傾きの異なる関数を用意されており、ユーザが最適化の問題に応じて選択する。実際の設計問題では、複数の評価項目を考慮する必要があるため、式(1)に示すように、各評価項目の適応度(f_{ij})を線形変換し、加算することによって得られる個体の適応度(F_i)を利用する。

$$F_i = \sum_{j=1}^m (a_{ij} \times f_{ij} - b_{ij}) \quad \dots \dots \dots (1)$$

($i = 1, 2, \dots, n$)

ここで、 n 及び m は、個体数、評価値の個数である。 a_{ij} 及び b_{ij} は、線形変換の係数であり、ユーザが最適化の問題に応じて設定する。

2.4 GAオペレータ 図2に本機能の最適化処理のフローを示す。まず、初期集団となる個体をランダムに生成し、各個体の適応度を計算する。次に、個体の適応度に基づき、部品操作、交叉と突然変異からなるGA操作を実施し、新しい集団を生成する。更に、新しく生成された部品データを部品データベースに登録する。上記の処理を新しい集団が終了条件を満たすまで繰り返す。

新しい集団の生成では、部品操作とGA操作を実施する。部品操作は、図3に示すように、適応度の高い2つの個体から共通の部品要素を取り出し、残りの部品要素を移動又は削除することによって新しい個体を生成する。

この操作は、適応度の高い2つの個体間で共通に持っている部品要素を有効な部品要素であると考え再利用することにより、2つの個体間の近傍探索を行う構造を生成する処理である。これにより、GAの不得意な近傍探索の処理を改善し、探索効率の向上を図る。また、GA操作は、部品単位と部品要素単位の2種類の操作からなる。部品単位のGA操作は、遺伝子配列に対する一般的な交叉と突然変異の操作であり、2つの個体間で有効な部品を交換したり、部品を移動して新たな個体を生成する。これにより、有効な部品要素の組合せを維持しながら、新しい構造を生成することができる。部品要素単位のGA操作は、図4に示すように、部品を構成する部品要素に対する交叉と突然変異の操作であり、2つの個体の部品間で有効な部品要素を交換したり、部品要素を移動・削除して、部品単位の操作では得られない新たな部品を生成する。

3. 適用例

図5に本適用例で用いた対象構造の概略図を示す。対象構造は、床、天井、4本の柱、2本の棚柱、柱1-棚柱1-柱2を結合する補強1、柱3-棚柱2-柱4を結合する補強2、及び棚柱1-棚柱2を結合する補強3から構成されている。この対象構造に対し、設計変数は、3種類の補強に対する「交換部品の番号」と「高さ方向の移動量」を対象とする。補強の「交換部品の番号」は、各補強の部品データベースの中から取出す部品の登録番号であり。補強の「高さ方向の移動量」は、柱の高さを10等分した位置に補強を移動させる移動量である。評価項目は、対象構造の3次までの固有振動数と重量を対象とする。ここでは、対象構造の床を固定したときの3次までの固有振動数を制約条件とし、重量を最小化する補強構造を求める。最適性の判定基準は、図6に示すように、3種類の補強を4本ずつ用いて等間隔に配置した構造（基準構造）の固有振動数と重量を用いる。すなわち、3次までの固有振動数が基準構造の固有振動数よりも高く、重量が基準構造の重量以下となる構造を最適解と判断する。固有振動数の適応度計算には、変換関数が表1のTYPE2、許容範囲が基準構造の固有振動数以上という条件を用い、重量の適応度計算には、変換関数が表1のTYPE1、許容範囲が[0, 最大重量]という条件を用いた。固有振動数と重量を考慮した適応度計算には、固有振動数の線形変換に $a=1$ 、 $b=0$ 及び重量の線形変換に $a=30$ 、 $b=0$ を用いた。

この問題に対し、以下に示す2種類の従来の最適化手法と3種類の本最適化手法を適用した。

Method 1: 考えられる全ての補強の配置位置 (33箇所)

Fig. 2 Optimum operation flow

Fig. 3 Part operation

Fig. 4 GA operation

Fig. 5 Design object

Fig. 6 Reference structure

所) に対し, 乱数によって補強を配置するかどうか判定してランダムに補強を配置する (ランダム探索)。

Method 2: 考えられる全ての補強の配置位置 (33箇所) を 1 次元配列に対応づけ, 補強の「ある (1)」, 又は「なし (0)」を配列要素に設定する従来のコーディング手法を用い, 単純 GA (ルーレット選択, 1 点交叉と突然変異) を実施する。

Method 3: 本開発のコーディング方法, 及び部品要素単位の GA 操作による単純 GA を実施する。

Method 4: 本開発のコーディング方法, 及び部品単位と部品要素単位の GA 操作を実施する。

Method 5: 本開発のコーディング方法, 及び部品操作 (3 個体) と GA 操作を実施する。

Method 1 と **2** は, 本最適化機能と比較するための従来の最適化手法である。Method 3 ~ 5 は, 本最適化機能で GA オペレータの利用方法を変更したものである。

Method 3 ~ 5 の初期構造は, 3 種類の補強を 1 本ずつ取付けた構造を用いており, 部品の交換と移動によって他の補強配置を生成する。

まず, Method 1 ~ 5 に対する収束状況を比較する。図 7 に各世代に対するエリート解の適応度を示す。ただし, GA オペレータのパラメータには, 10 集団, 1 個のエリート保存, ルーレット選択, 1 点交叉, 突然変異 (突然変異率 10%) を設定した。また, ランダム探索は, 生成された解を最初から 10 個ずつまとめて集団を作り, その中の最良解をエリート解として適応度を求めた。Method 1 は, ランダムな探索であり, 他の手法よりも適応度が低く, 収束性が悪いことが分かる。Method 2 は, 従来のコーディング方法に単純 GA を行う方法である。コーディング方法が他の手法と異なるため, 初期の適応度が高い状態から始まっている。最終的には, Method 3 ~ 5 と同等の適応度まで収束している。Method 3 ~ 5 は, 本コーディング方法に単純 GA, 部品単位の GA 操作, 及び部品操作を行う方法である。同一のコーディング方法なので, 初期状態は一致しているが, 収束傾向は, Method 4 (部品単位の GA 操作) と Method 5 (部品操作) が Method 3 (部品要素単位の単純 GA 操作) よりも効率が良い。最終的には, 全て同等の適応度まで収束している。

図 8 に Method 2 ~ 5 に対する 60 世代目のエリート解の構造を示す。Method 2 の構造は, 左右対称であり, Method 4 の構造は, 3 種類の補強が 1 本ずつ高さ方向にずれた配置が現れている。これらの 4 種類の構造は, 補強の配置が異なるだけで, 全て同じ重量 (補強本数) であり, 全て最適性の判定基準を満たすものである。よって, 最適解は, 12 本の補強を持つ構造で

Fig. 7 Fitness versus the number of generations

Fig. 8 Optimum structures obtained with various methods

Fig. 9 Weight history of the feasible solutions obtained with various methods

あると考えられる。GA の適応度関数は, 3 種類の固有振動数が高いほど, 適応度が高く, この適応度による判定では, Method 4 の構造が最良解となる。

次に, Method 1 ~ 5 に対する探索効率を比較する。図 9 に各世代に対する固有振動数の制約条件を満たす構造の重量 (×), 及び基準構造の重量 (一点鎖線) を示す。縦軸の重量は, 基準構造の重量に対する相対値である。Method 1 は, 制約条件を満たす許容解は得られたが, 最適性の判定基準を満たす解は得られなかった。この手法は, ランダムに補強を配置するので, 種々の重量を持つ構造が生成されており, 効率良く解を探索していると

は言えない。Method 2 は、25 世代目で最適性の判定基準を満たす解が得られた。しかし、基準構造の重量よりも重い構造が多く生成されており、効率良く解を探索しているとは言えない。Method 3～5 は、41 世代目、16 世代目、及び 9 世代目で最適性の判定基準を満たす解が得られた。最適解は、Method 5、4、3 の順に発見されており、部品単位での操作（部品操作、部品単位の GA 操作）が有効であることが分かる。探索領域は、世代が進むに従い、基準構造と同等の重量を持つ構造に集中しており、最小重量を考慮して、効率良く補強構造を生成していることがわかる。探索領域が限定されるのは、コーディング方法が必要な補強しか配列要素に保持していないこと、及び GA オペレータ（部品操作、部品単位の GA 操作）が部品単位で処理され、任意に補強（本数）を変化できないことが上げられる。

Method 2 で突然変異を低く設定することにより、探索領域が Method 3～5 と同様に限定されることが考えられる。図 10 に Method 2 の突然変異率を 0、5、及び 10 % に設定したときの各世代に対する固有振動数の制約条件を満たす構造の重量（×）、及び基準構造の重量（一点鎖線）を示す。縦軸の重量は、基準構造の重量に対する相対値である。突然変異が 0 % のときは、5 世代目で集団内の個体が全て 1 種類の構造に収束し、探索領域が 1 種類に限定された（最適性の判定基準を満たす構造ではない）。突然変異が 5 % のときは、探索領域が突然変異 10 % のときよりも多少狭くなっているが、基準構造と同等の重量を持つ構造に集中していない。最適性の判定基準を満たす構造は、突然変異が 10 % のときと同様に 25 世代目で生成されている。以上より、本コーディング方法、及び GA オペレータ（部品操作、部品単位の GA 操作）がランダム探索や単純 GA による方法よりも、効率良く最適解を探索できることが分かる。

上述で、本コーディング方法、及び GA オペレータ（部品操作、部品単位の GA 操作）が探索領域を必要な範囲に限定し、効率良く解を探索していることを示したが、GA による探索の特徴である多様性の維持に影響が生じると考えられる。表 2 に Method 1～5 に対し、40～50 世代に生成された構造の固有振動数と重量に関する分散を示す。また、図 11 に Method 1～5 に対する各世代で生成された構造の固有振動数と重量の最大値（+）と最小値（-）を示す（一点鎖線は基準構造の固有振動数と重量）。縦軸の固有振動数と重量は、基準構造の固有振動数と重量に対する相対値である。Method 1 は、ランダム探索であり、固有振動数と重量の分散が最も高くなっている。図 11（a）からも固有振動数と重量の値が広範囲で一様に分布しているの

Fig. 10 Weight history of the feasible solutions using method 2 with various mutation rates

Table 2 Variance of natural frequency and weight obtained with various methods

Method	Mutation rate [%]	Variance			
		Natural frequency			Weight
		1st	2nd	3rd	
1	-	0.671	0.605	0.423	5.534
2	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	0.082	0.086	0.085	3.101
	10	0.163	0.113	0.106	4.735
3	10	0.197	0.117	0.092	0.501
4	10	0.093	0.042	0.044	0.266
5	10	0.242	0.123	0.102	0.547

が分かる。Method 2 では、突然変異を 0、5、及び 10 % と増加させると、固有振動数と重量の分散も増加している。図 11（b）は、突然変異が 10 % のときの固有振動数と重量の値の分布である。Method 3～5 では、重量の分散は低い、固有振動数の分散は Method 2 と同程度である。図 11（c）～（e）は、Method 3～5 に対する固有振動数と重量の値の分布であり、重量の分布が他の手法に比べて限定されているが、固有振動数の分布は全ての世代において Method 2 と同程度であることが分かる。これは、探索領域が、基準構造と同等の重量（補強本数）を持つ構造に限定されるが、同等の重量（補強本数）で補強の配置位置の異なる構造を生成していることを示しており、Method 3～5 が多様性の維持に悪影響を与えていないことが分かる。

4. 結 論

筐体設計システムにおける構造適正化支援として、GGA を用いた構造最適化機能を開発した。本システムは、以下の特徴を持つ。

（1）設計変数には、部品の交換と移動が指定でき、初期構造として基本的な部品を用意しておくだけで、その後の GA の処理が基本的な部品を組合せて複雑な部品からなる構造を生成できる。

（2）適応度の高い構造が持つ部品は、有効な部品であると考え、この有効部品を用いて新たな個体を生成

することにより、効率良く解を探索することができる。

本機能を筐体構造の補強の配置設計に適用し、従来手法（従来のコーディング，単純GA）と比較した結果，本機能は，最小重量を考慮した構造に限定して，効率良く解を探索しており，従来手法の2/3以下の世代数で最適性の判定基準を満たす解を求めることができた。

文 献

- (1) 北野宏明 編，遺伝的アルゴリズム，産業図書，1993
- (2) 坂和正敏・田中雅博，遺伝的アルゴリズム，朝倉書店，1995
- (3) 山口貴吏 他2名，遺伝的アルゴリズムを用いた筐体設計支援システム，日本機械学会論文集(A編)，Vol.65，pp128-133，1999
- (4) 朝山正輝 他2名，GAを利用した応力制御下におけるトラス構造の寸法最適化に関する数値実験，日本機械学会論文集(A編)，Vol.62，pp118-125，1996

(a) Method 1

(b) Method 2 (mutation rate 10%)

(c) Method 3

(d) Method 4

(e) Method 5

Fig. 11 Weight history and natural frequency history