

GA を用いたメッシュ最適化

山本里奈^{†1} 竹本有紀^{†1} 石川由羽^{†1} 城和貴^{†1}

概要: 近年製造業界では、製品の性能や信頼性を事前に評価する方法として、CAE 解析の活用が積極的に進められている。CAE 解析を行うためには、3DCAD データを小さな四角形の要素に分割する必要がある。この要素をメッシュと呼ぶ。メッシュの生成には専門的知識と経験則による職人技を必要とするため自動化が難しい。現在、メッシュの生成は専門家による手作業によって行われている。本稿では、メッシュを自動生成するため、遺伝的アルゴリズムを用いて、メッシュ生成手順を最適化する手法を提案する。

キーワード: 遺伝的アルゴリズム, メッシュ生成

1. はじめに

製造業界では、製品の性能や信頼性を事前に評価する CAE (Computer Aided Engineering) の活用が積極的に進められている。CAE 解析の大半を占める作業として、メッシュ生成がある。領域に対して自動的にメッシュを生成する手法は多数研究 [1] [2] [3] [4] されているが、解析に利用するには手作業での修正が必要不可欠である。適切なメッシュに修正するためには、専門的な知識を持った技術者の経験と勘が必要とされる。このような理由から、メッシュ生成の作業は、多大なる時間と人手を必要とするため、製品にコストが掛かる大きな要因となっている。したがって、解析に利用できるメッシュを自動的に生成する技術の開発が求められている。

本稿では、機械学習を用いてメッシュ修正に必要な操作のパラメータを最適化する。また、最適な操作手順とその操作ごとに最適なパラメータを取得しメッシュを自動生成する。メッシュの作成には、実際に CAE 業界で使われているメッシュ作成の専門ソフトである Altair 社の HyperMesh [1] を用いる。また、機械学習には、評価値を与えることで最適解を探ることができる遺伝的アルゴリズム (GA) を使用する。

2. メッシュ生成ソフトウェア

メッシュ生成ソフトとして、実際に製造業界でも使用されている HyperMesh [5] がある。HyperMesh とは、FEM 解析モデリングソフトの 1 つである。製品開発における CAE ワークフローを効率化するための、高機能な有限要素モデリングプリプロセッサである。また、HyperMesh は API を利用した操作が可能であり、連携させて使用できる環境の 1 つに VisualStudio がある。VisualStudio とは、マイクロソフトが提供する統合プログラミング開発環境である。

本稿で使用する Hypermesh 内の機能について説明する。使用する機能は、Automesh 機能、Replacenode 機能、

Renumber 機能、Qualityindex 機能の 4 つである。Automesh 機能は、選択範囲に自動的にメッシュを生成する機能である。これにより、備えられたメッシュ生成手法を用いて、選択範囲にメッシュを生成することができる。Replacenode 機能は、ノードを 2 つ選択し、中心点または 2 つ目を選択したノードの位置に対してノードを移動させ結合する機能である。不要なメッシュを削除する際に使用する。Renumber 機能は、選択範囲のメッシュ ID やノード ID など Hypermesh 内で ID を持つ要素に対してユーザが指定する数値を割り当てる機能である。Qualityindex 機能は、メッシュの評価値を取得する機能である。任意の品質指数を基準に、多様な品質を表す値を計算し、テキストデータに保存することが可能である。

3. GA を用いたメッシュ最適化

3.1 遺伝子のコーディング方法

本稿で最適化を行う操作は、Remesh と Replacenode に限定する。以降、それぞれの操作を最適化する GA を remeshGA, replacenodeGA と呼び、総括して操作 GA と呼ぶ。さらに、操作 GA を利用して、メッシュ生成の操作手順を GA で最適化し、最適な操作手順とその操作ごとに最適なパラメータを出力する。以降、これを統合 GA と呼ぶ。以下、各 GA で使用する機能とコーディング方法について説明する。

remeshGA について説明する。Remesh とは、選択範囲に Automesh 機能を再適用する機能である。選択範囲によっては、実行する前より、さらに品質が悪くなることもある。範囲の選択には、メッシュ ID を指定する方法を使用する。メッシュ ID とは、初めにメッシュ生成された時点で、各メッシュに対して割り当てられている番号のことである。このメッシュ ID を GA の初期個体として乱数で生成し、Remesh の選択範囲の最適化を行う。

replacenodeGA について説明する。上記のメッシュ ID 同様に、メッシュが生成される度に節点に対してノード ID が割り当てられている。“289 314”のように空白で区切ることで 2 つのノード ID を選択する。Remesh と同様にこの

^{†1} 奈良女子大学
Nara women's University

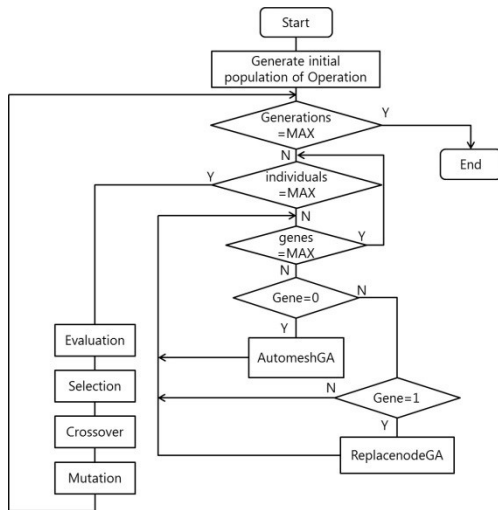


Figure 1 統合 GA のフローチャート

ノード ID を GA の初期個体として乱数で生成する。Replaceno 機能は通常、複数回操作することでメッシュの修正を行うため、10 回分の操作を 1 個体とする。しかし、Replaceno 機能でメッシュを整えるためには隣接するノードのペアを選択することが必要である。そのため、ランダムに生成したノードのペアで Replaceno 機能を実行し、Qualityindex 機能でメッシュ全体の評価値を著しく悪化させるノードのペアを排除する。この方法で生成されたノードのペアの中から初期個体としてランダムに選択し、Replaceno 機能の最適化を行う。また、遺伝子組み換えを行ってメッシュ生成を実行していく際に、1 個体のうちに重複したノードを選択すると、メッシュの形状が破壊される。この問題を回避するため、ノードの重複が起きている個体は評価値を 0 にし、メッシュ生成を行わないようにする。

統合 GA について説明する。Remesh と Replaceno の 2 つの操作と“何も実行しない”操作の 3 つに任意の番号を与え、ランダムに選択し次元配列として表現する。1 個体ずつ配列の順番に対応する操作を実行し、最後に出力されるメッシュを評価する。Remesh と Replaceno を実行するには、前述のコーディング手法から進化計算を行い最適なパラメータで実行する。つまり、統合 GA で進化計算を行う中で、個体の遺伝子に対しても GA を行うことになる。また、個体の遺伝子ごとに操作を実行する前に、Renummer 機能で ID の再割り当てを行う手順を追加することで結果に矛盾が発生する問題を防ぐ。

3.2 メッシュ評価取得方法

開発するシステムでは、Qualityindex 機能を使用してメッシュの評価値を取得する。一般的には、四角形メッシュで構成されたメッシュの場合、三角形メッシュの割合が少ないほど品質が良いとされる。本稿では、三角形のメッシュの割合に注目し、各個体に評価値を与える。Qualityindex 機能で出力されるテキストデータから三角形のメッシュの

個数を取得し、数値が低いほど評価値が高くなるように再計算し、個体の評価を行う。

3.3 GA の適用方法

まず、操作 GA の手順について述べる。一般的な GA における個体生成の手順のみ、それぞれの GA で表現方法が異なる。remeshGA では、各遺伝子は選択するメッシュ ID を示す。選択されたメッシュ ID に対して Remesh を実行する。replacenoGA では、各遺伝子は隣接ノードペアが格納された配列の番号を表す。対応する番号の隣接ノードペアを取得し、Replaceno を実行する。遺伝子数が Replaceno を実行する回数となる。用意した個体で 1 個体ずつメッシュ生成を実行し、個体の評価を行う。以降の進化計算の手順は一般的な GA と同様である。

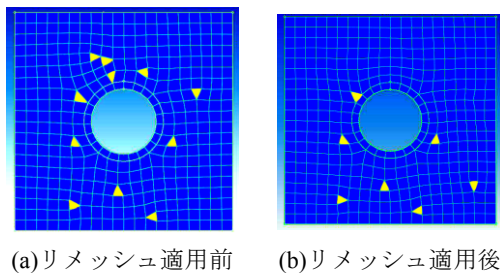
次に、統合 GA の手順について述べる。Figure 1 に統合 GA の流れを示したフローチャートを示す。統合 GA は Hypermesh の操作手順を最適化する。今回の実験では 0 と 1 と 2 で構成された個体の遺伝子長分の配列を 1 個体とする。Remesh を 0、Replaceno を 1、何もしない操作を 2 とする。個体の評価の手順に移る。配列の先頭から順番に対応する操作を GA で最適化されたパラメータで実行する必要がある。遺伝子が 0 である場合 remeshGA を実行し、最適化されたパラメータで Remesh を実行する。実行したメッシュデータを保存し、次の遺伝子を読み取る。遺伝子が 1 である場合、replacenoGA を実行し、0 の場合と同様に、Replaceno を実行する。データを保存し、次の遺伝子の読み取りに移る。遺伝子が 2 である場合、何も行わず、次の遺伝子の読み取りに移る。また、0 と 1 の遺伝子の操作を実行する前には、ID の再割り当てを行う。1 個体の遺伝子分の操作を終えたら、最後に保存されたメッシュを評価する。以降の進化計算の手順は一般的な GA と同様である。最終世代の個体の遺伝子と最適化されたパラメータを記録しておくようにすると、最適化された操作手順と対応するパラメータも取得することが可能となる。

4. 実験

4.1 実験方法

Hypermesh の機能のパラメータを最適化するため、remeshGA、replacenoGA の実験を行う。また、操作手順を最適化する統合 GA の実験を行う。各実験で入力データとして使用するメッシュデータについて説明する。正方形に円形の穴が開いた平面の CAD データに対して、Automesh 機能でメッシュを生成し、円形の穴の周囲に Quickedit 機能でメッシュを生成している。この部分のメッシュには実験で変更することのないメッシュ ID とノード ID を割り当てておく。この部分以外のメッシュを最適化する実験を行う。以下、各 GA の実験方法について説明する。

まず、remeshGA の実験方法について説明する。remeshGA では、個体の遺伝子数 N を 10 とする。この 10 個の整数の



(a)リメッシュ適用前 (b)リメッシュ適用後

Figure 2 選択範囲にリメッシュを適用した様子

Table 1 replacenodeGA の結果

個体数	世代数	評価値
100	30	74
100	100	75
100	200	76

中から 2 個ずつのペアを作り、ペアの間の数も取得する。例えば、「1」と「5」のペアが選択された場合、「1,2,3,4,5」のように選択する。個体数は 100 個体、世代数は 30 世代、個体の選択はルーレット選択方式、交叉率は 0.95、突然変異率は 0.05 とする。

次に、replacenodeGA の実験方法について説明する。replacenodeGA では、初期個体を生成する前に 3.1 節で述べた方法で隣接ノードのペアを生成する。このペアの数を 100 個とする。個体の遺伝子数 N を 10 とする。この 10 個には 1 から 100 のうち 10 個の整数が入るため、対応するノードのペアが 10 個選択される。個体数は 100 個体、世代数は 30 世代、100 世代、200 世代でそれぞれ実行する。選択方式、交叉率、突然変異率は remeshGA と同様とする。

最後に、統合 GA の実験方法について説明する。統合 GA では、個体の遺伝子数 N を 10 とする。3.3 節で述べた通り、0, 1, 2 からランダムに選択した遺伝子を 10 個選択し、1 個体に付き 10 手分の操作を表現する。統合 GA の中で実行する remeshGA の個体数を 10 個体、世代数を 10 世代とする。replacenodeGA の隣接ノードのペアを 100 個体生成し個体数を 10 個体、世代数を 10 世代とする。統合 GA の個体数を 10 個体、世代数を 10 世代とする。選択方式、交叉率、突然変異率は remeshGA と同様とする。

4.2 実験結果

remeshGA, replacenodeGA, 統合 GA の実験結果についてそれぞれ述べる。

まず、remeshGA の結果を述べる。Figure 2 に、出力された選択範囲に Remesh を適用する前と後の変化を示す。Figure 2(a)では、適用前のデータは三角形のメッシュが 11 個混じっている。Figure 2(b)では、適用後のメッシュは三角形メッシュが 7 個に減少し、自然な流れの四角形メッシュを生成することに成功している。

次に、replacenodeGA の結果を述べる。Table 1 に実行し

```

2 -
2 -
0 33-301 317-243 312-264 229-244 280-47
0 123-309 173-288 201-34 328-143 172-294
2 -
0 229-334 320-56 84-181 235-189 171-150
1 242,243 63,64 18,19 146,147 154,155 281,282 8,9 2,3 239,240 309,310
0 157-311 263-195 114-287 17-191 231-171
0 289-171 321-100 142-75 217-15 141-224
2 -
    
```

Figure 3 最適化された操作手順とパラメータ

た実験の個体数、世代数、評価値を示す。評価値は最上限を 100 とし、三角形のメッシュの数を引いたものである。適用前のデータの評価値は 89 である。世代数を増やすごとに評価値がわずかに上昇する結果となった。

最後に、統合 GA の結果を述べる。Figure 3 に実行結果の操作手順とパラメータを示す。左の上から下に順に並ぶ「2200201002」が最適化された操作手順である。操作を表す番号の右に並ぶ数値がそれぞれの操作に対して最適化されたパラメータである。0 は Remesh の選択範囲であるメッシュ ID, 1 は Replacenode を実行するノード ID のペアを示している。2 は何も実行しないことを表すため \times と表示している。結果は、Remesh を 3 回、Replacenode を 1 回、Remesh を 2 回順に行う手順が出力された。評価値は 89 となった。

5. 考察

5.1 remeshGA に結果に対する考察

選択範囲の変動が大きくなるように個体生成方法を工夫した。その結果、評価値に設定した三角形メッシュの個数の差も大きくなり、進化計算が効率よく行われたと推測する。従って、GA での進化計算が可能になり、メッシュ生成の操作の最適化に成功したと考えられる。

評価値の与え方について考察する。今回の実験では、選択評価値と目標のメッシュの品質を、共に三角形のメッシュの数が少ないほど高品質と仮定した。HyperMesh の Remesh 機能は、選択範囲によって三角形のメッシュを増やしてしまい、品質を悪化させる場合もある。今回の結果では、四角形のメッシュが並んだ部分を選択しても品質を保つことが出来たため、広範囲を選択したと推測する。しかし、今後別の形状のデータを使用した場合、同じ手法で三角形のメッシュの数を減らすことに成功しても、品質の悪い四角形のメッシュが生成される可能性がある。四角形のメッシュの品質について評価値の定め方を考案し、新たに評価値に追加することで、さらに高品質なメッシュ生成が可能になると考えられる。

5.2 replacenodeGA に結果に対する考察

評価値を大幅に下げってしまう要因について述べる。Replacenode 機能を 1 回使用すると、0~2 個の三角形のメッシュを増やすことになり、三角形のメッシュを減らすためには適切な複数の箇所に実行する必要がある。Replacenode

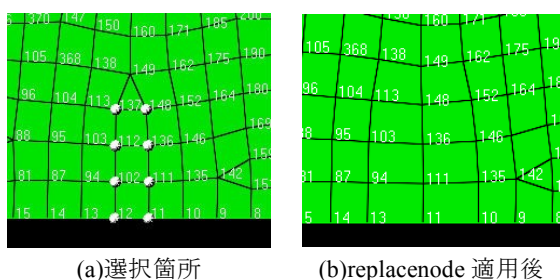


Figure 4 replacenode の一例

機能を使って三角形のメッシュの数を減らす方法の一例を Figure 4 に示す。Figure 4(a)では、三角形のメッシュからメッシュの外側に向かって連続するノードのペアを選択している。これに対して Replacenode を実行すると、Figure 4(b) のように間のメッシュを削除し、三角形のメッシュを減らすことが出来る。GA を行う過程でこの例のような選択が出来たとして、今回の評価方法では評価値は 1 増えるのみとなっている。その上、別の遺伝子が三角形のメッシュを 0~2 個増やしているため、望まれる評価値を与えることが出来ておらず、学習効率が悪い結果になっていると推測する。連続したノードのペアを選択出来た際に評価値を上げる方法や、連続したノードのペアが選択されやすいようにコーディングを工夫する必要がある。

5.3 統合 GA の結果に対する考察

実行しない操作を選択肢に加えることで、操作回数を遺伝子数分の回数に限定することなく、自由に変動させることを可能にした。今後考えられる改善点としては、操作の無駄を省くために、より少ない回数で効率よくメッシュを生成できた場合に評価値を高く与える方法を考えるなどがある。

今回の実験では統合 GA での選択肢は操作 2 つのみであったが、十分に有用な結果が得られたため、今後は選択肢を増やすことで、より多様なメッシュ生成手順が得られると考えられる。

6. まとめ

本稿では、GA を用いてメッシュ生成の最適化を行った。CAE 解析で高精度な結果を得るためには高品質なメッシュを生成する必要がある。自動的にメッシュを生成する手法は多数研究されているが、手作業での修正が必要不可欠である。メッシュ生成ソフトを操作して適切なメッシュを生成するためには、経験則による勘が必要になる。そこで、メッシュ生成の操作のパラメータの最適化を行う操作 GA の開発を行った。また、最適な操作手順とその操作ごとに最適なパラメータを出力する統合 GA の開発を行った。メッシュ生成には Hypermesh を使用し、VisualStudio により操作を自動化した。操作 GA では、Remesh 機能と Replacenode 機能のパラメータを最適化する remeshGA と replacenodeGA を開発した。開発したシステムを使用し、

操作 GA と統合 GA の実験を行った。remeshGA では、個体が集合した範囲を選択できるように工夫することで最適化に成功した。replacenodeGA では隣接するノードのペアが選択できるように工夫したが、改良が必要な結果となった。統合 GA では、実行しない操作を選択肢に加えることで、操作回数を自由に変動させることを可能にした。この結果から、個体の表現方法と評価値の与え方を工夫することでメッシュ生成の最適化が可能であることが確認できた。

今後の課題を述べる。本稿で、GA の評価値として定義したものは三角形メッシュの数のみである。今後はメッシュの形状の品質など他の基準を含む評価値を設定する方法を考案することで、より高品質なメッシュを生成することが可能になると考える。

参考文献

- [1] Ho-Le K., Finite Element Mesh Generation Methods: a Review and Classification, Computer Aided Design, Vol.20,No.1,pp.27-38,1988.
- [2] M Onodera, I Nishigaki, Y Hiro, C Kongo, A Mesh Morphing Technique Involving Addition and Deletion of Features for Tetrahedral Meshes, Journal of Environment and Engineering vol.6 ,No.3, pp.595-603
- [3] K.Shimada, Physically-based mesh generation : automated triangulation of surfaces and volumes via bubble packing, Massachusetts Institute of Technology,1993.
- [4] Parikh,P.,Pirzadeh,S.,Loehner,R., A Package for 3-D Unstructured Grid Generation, Finite-Element Flow Solution and Flow Field Visualization, NASA CR-182090, 1990.
- [5] (2018) Large Model Finite Element Preprocessing Altair HyperMesh [online].Available <https://altairhyperworks.com/product/HyperMesh>,