

# 変形処理の局所化による解析用メッシュ寸法駆動変形の高速度化

北海道大学 ○前濱 宏樹, 伊達 宏昭, 金井 理

## 要旨

本研究では、変形処理を適用する領域を局所化し、解析用メッシュ寸法駆動変形を高速度化する手法を提案する。形状の自己干渉や表面領域の縮退が生じない寸法駆動変形に必要な局所変形領域を抽出し、その領域のみに変形処理を適用して解析用メッシュの寸法駆動変形の処理時間を短縮する。

## 1 はじめに

本研究では、CAE 効率化のための解析用メッシュ寸法駆動変形技術の確立を目的とする。筆者らはこれまで、メッシュ表面の領域分類に基づくメッシュ頂点の移動によるメッシュ形状の寸法駆動変形手法[1]と、段階的 ODT スムージングによるメッシュ品質（メッシュ密度、形状近似精度、要素形状品質）改善手法[2]を提案してきた。これにより、メッシュ品質を制御しつつ、解析用メッシュにおいて幅広い種類の寸法変更が可能となった。しかし、既提案手法は、寸法変更が変形対象形状に対して局所的な処理で行える場合でも、形状変形においてはメッシュ内部の全頂点を移動し、品質改善もメッシュ全体に対して行っていた。そのため、頂点数が大きい解析用メッシュでは、処理に多大な時間を要していた。本報では、形状変形操作により頂点が移動する可能性のある領域（変形領域）を局所的に抽出し、その領域のみに形状変形処理と品質改善処理を適用することで、既提案手法に比べて少ない処理時間で高品質変形解析用メッシュを生成可能とする手法を提案する。

## 2 提案する解析用メッシュ寸法駆動変形手法

### 2.1 概要

本研究で対象とする解析用メッシュは、表面が平面、二次曲面（円筒面、円錐面、球面）、トーラス面からなる四面体メッシュとする。また、解析用メッシュ表面は各曲面領域（表面領域）に分割されており、領域境界線や表面領域間の隣接関係及び各曲線・曲面の定義パラメータといった曲線・曲面情報は既知であるものとする[2]。

提案手法で変更可能な寸法種類は①ボスの高さ・穴の深さ、②円筒ボス・丸穴の径、③面取りの長さ、④面取りの角度、⑤球面の径、⑥フィレットの径、⑦平面上形状特徴（ボス、穴、リップなど）の位置とする。ただし、寸法③④⑥は、寸法を規定している面が他のフィレット面や面取り面と接続していない場合に限る。

本報で提案するメッシュ形状変形手法の概要を図 1 に示す。まず、ユーザ指定情報から、表面領域を 4 種類に分類する (A1)。次に、寸法種類と領域分類結果に基づき、変形領域を求める (A2)。そして、曲面情報と空間埋め込み法を用いて頂点を移動し[1]、変形メッシュを得る (A3)。

### 2.2 表面領域分類 (A1)

寸法種類や寸法を規定している領域等のユーザ指定情報に基づき、表面領域を次の 4 つに分類する。

- ・制御領域：寸法を規定している表面領域
- ・追従領域：制御領域に付随した形状特徴（フィレット面、面取り面）に対応する表面領域
- ・変形表面領域：制御・追従領域の変化に伴い変形する表面領域
- ・固定領域：変形の影響を受けない表面領域

この領域分類の処理は変更する寸法種類によって処理が異なる。以下に各寸法の領域分類処理の概要を記述する。

#### ・寸法①～⑥を変更する場合 (図 2(a))

まず、ユーザは制御領域を入力する。また、寸法が制御領域と他の表面領域との相対的な位置や姿勢である場合は、寸法を規定するもう一方の表面領域を基準面として指定する。その後、制御領域の隣接表面領域のうち、接線連

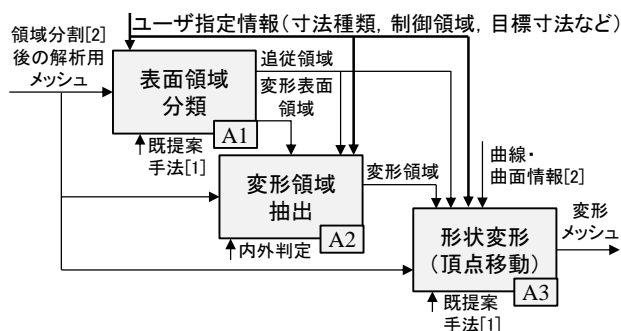


図 1 提案手法概要

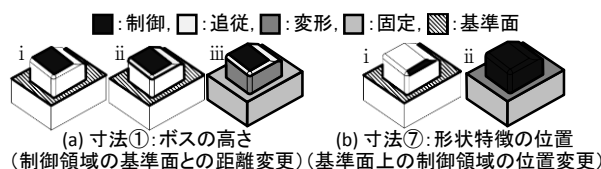


図 2 領域分類概要 (A1)

続で制御領域と接続する表面領域と、制御領域との面積比が閾値以下の表面領域を追従領域に分類する。そして、制御・追従領域集合の隣接表面領域集合を変形表面領域に分類し、それ以外の表面領域を固定領域に分類する。

#### ・寸法⑦を変更する場合 (図 2(b))

まず、ユーザは位置を変更する形状特徴上の 1 つの表面領域（制御領域）とその形状特徴が存在する平面の表面領域（基準面）を入力する。その後、入力した制御領域をシードとした領域成長法により形状特徴の全表面領域を求め、制御領域に分類する。また、基準面を変形表面領域に、残りを固定領域に分類する。

### 2.3 変形領域抽出 (A2)

本研究では、変更後の寸法値は形状の自己干渉や表面領域の縮退が起こらない範囲内で決定するものとし、変形領域を寸法値の変更により移動する可能性のある頂点を含む四面体の集合と定義する。つまり、本研究における変形領域は、寸法値を最小から最大へ変更したときの制御・追従領域集合の包絡体に含まれる頂点を持つ四面体の集合となる。ただし、寸法⑦（形状特徴の位置）の変更においては、変形領域は、形状特徴が平面上の移動可能な全範囲を移動した場合の包絡体に含まれる頂点を含む四面体集合となる。

以下、処理方法が異なる寸法①～⑤、寸法⑥および寸法⑦の 3 つに分けて、変形領域の抽出法を述べる。

#### ・寸法①～⑤の変更における変形領域抽出

穴の深さ（寸法①）の変更における手法概要を図 3 に示す。まず、形状変形時の頂点の移動方向に沿って制御・追従領域を掃引した空間に含まれる固定領域上の頂点集合  $V_m$  を求める。次に、 $V_m$  内の頂点のうち、制御領域の表側と裏側のそれぞれにおいて、制御領域の曲面との距離が最小の点を寸法変更範囲規定点  $v_+$ 、 $v_-$  として求める (図 3(b))。その後、制御・追従領域の曲面を  $v_+$  や  $v_-$  まで掃引した空間

に含まれる頂点の集合 $V_d$ を求める(図3(c)).最後に, $V_d$ 内の頂点を含む四面体の集合を変形領域とする(図3(d)).

なお,寸法④(面取りの角度)の変更では,より良い包絡体の近似のために,制御領域を基準面の法線方向に沿って掃引する.また,テーパのついた丸ボスの高さ変更などのように制御・追従領域集合と変形表面領域との境界形状が変化する場合は, $V_m$ や $V_d$ の抽出において,制御・追従領域の変形を考慮した掃引空間を用いる.

・寸法⑥(フィレットの径)の変更における変形領域抽出

まず,図4(a)のように制御領域に接線連続で接続する変形表面領域 $D_1, D_2$ を求める.次に, $D_1$ か $D_2$ のいずれかが縮退する半径値のフィレット面 $C_t$ を求める(図4(b)).その後, $C_t$ と各変形領域の曲面に囲まれた空間に含まれる固定領域の頂点集合 $V_m$ を求める.そして図4(c)のように, $V_m$ に含まれる頂点のうち,その点に接するフィレット面の径が現在の寸法値に最も近い頂点を寸法範囲規定点 $v_+, v_-$ として求める(フィレット面を $C_+, C_-$ とする).その後, $C_+$ と $C_-$ 及び変形領域で囲まれる空間に含まれる頂点の集合 $V_d$ を求める(図4(d)).最後に, $V_d$ に含まれる頂点を含む四面体の集合を変形領域とする(図4(e)).

・寸法⑦(形状特徴の位置)の変更における変形領域抽出

まず,位置を変更する形状特徴 $F_m$ の高さ(深さ) $h$ よりも,基準面からの距離が小さな固定領域上の頂点をすべて基準面に投影する(投影点集合を $P_f$ とする,図5(i)).次に,基準面に投影した $F_m$ のバウンディングボックス $F_b$ ( $F_m$ の基準面上での位置を定義する座標軸に辺が平行な正方形)を求め, $F_b$ の辺長の半分をセルサイズとするグリッドを基準面上に生成する(図5(ii)).そして $P_f$ の点を含むセルを障害物セルとし(図5(iii)), $F_b$ の重心位置との間に障害物セルが存在しない可視セルを求める(図5(iv)).可視セル抽出後,隣接セルがすべて可視セルであるグリッド点集合 $G_v$ を求める.この $G_v$ に含まれるグリッド点のみからなるセルを移動可能セルとし,移動可能セルからなる領域を移動可能領域とする(図5(v)).最後に,移動可能領域を基準面の法線に沿って $h$ だけ掃引した空間(図5(vi))に含まれる頂点を含む四面体の集合を変形領域集合とする.

3 実行結果

本手法を図6(a)に示すコネクティングロッドの解析用メッシュ(頂点数:81,678,Octree法で生成)に適用した.図は,クランクシャフト取り付け部の円柱の高さに該当する2平面間距離の変更における結果である.寸法を25[mm]から40[mm]へ変更し,品質改善処理を適用した結果が図6(b)である.また図中右のヒストグラムは,メッシュのストレッチ(正四面体で1.0,体積0の四面体で0となる要素形状品質指標)を示しており,平均値はどちらも0.65であった.既提案手法[1-2]と比べて,形状変形の処理時間は,頂点のパラメータ化が13.9[s]から0.2[s]に,頂点移動が0.2[s]から0.01[s]に短縮され,さらに品質改善の処理時間は2,525[s]から634[s]へ減少した.以上より,提案手法によって,入力と同等の品質を持つ寸法駆動形状変形メッシュをより少ない処理時間で生成可能であることが確認できた.

また,図7にフィレットの径の変更における変形領域の抽出結果を示す.提案手法により頂点移動が行われる四面体数が220,855から16,206に減少した.

4 おわりに

寸法変更時に移動可能性のある頂点を含む四面体集合を変形領域として抽出し,変形領域にのみ形状変形操作とメッシュ品質改善操作を適用することで,解析用メッシュの寸法駆動変形の処理時間を短縮する手法を提案した.

【参考文献】

- [1] 前濱他, 曲面情報と空間埋め込みを用いた解析用四面体メッシュの寸法駆動変形, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.803-804, (2014).
- [2] 前濱他, 段階的 ODT スムージングを用いた寸法駆動変形四面体メッシュの品質改善, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.845-846, (2013).

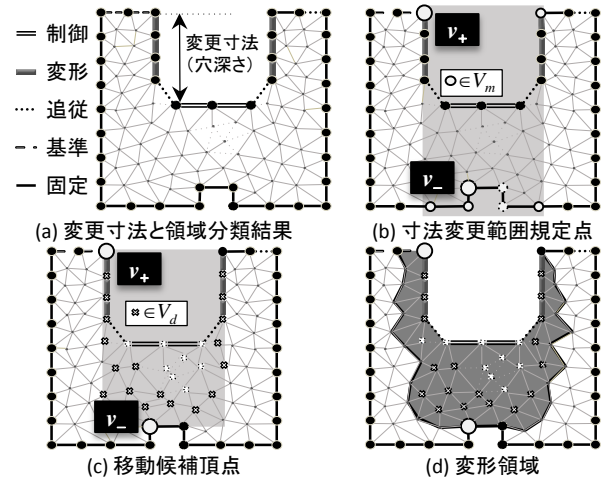


図3 寸法①変更時の変形領域抽出

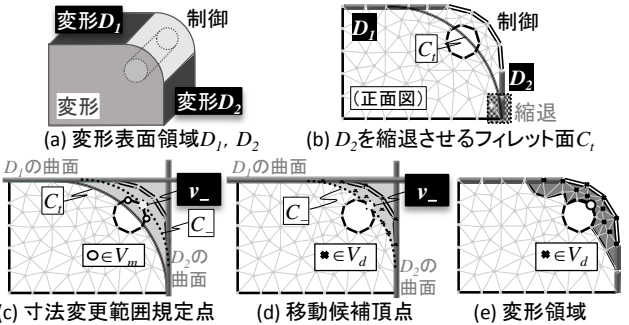


図4 寸法⑥変更時の変形領域抽出

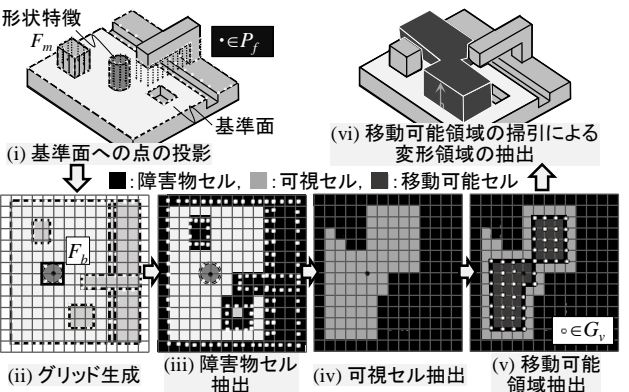


図5 寸法⑦変更時の変形領域抽出

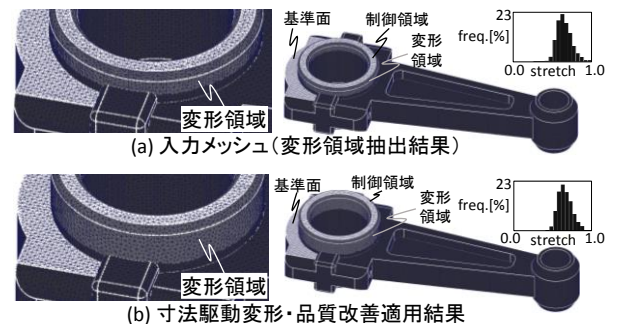


図6 コネクティングロッドの寸法駆動変形結果

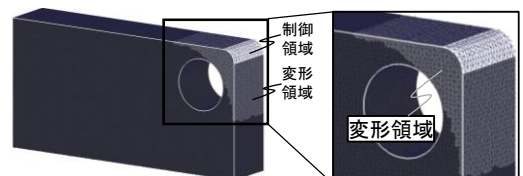


図7 フィレットの径の変更における変形領域抽出