

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2006-72531

(P2006-72531A)

(43) 公開日 平成18年3月16日(2006.3.16)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
<b>G06F 17/50 (2006.01)</b>	G06F 17/50 612J	5B046
<b>G06T 17/20 (2006.01)</b>	G06T 17/20	5B080

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全 11 頁)

(21) 出願番号 特願2004-252933 (P2004-252933)  
 (22) 出願日 平成16年8月31日 (2004.8.31)

特許法第30条第1項適用申請有り 平成16年3月9日 社団法人情報処理学会発行の「情報処理学会 第6回全国大会 (平成16年) 講演論文集」に発表

(71) 出願人 504173471  
 国立大学法人 北海道大学  
 北海道札幌市北区北8条西5丁目8番地  
 000005108  
 株式会社日立製作所  
 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号  
 (74) 代理人 100098017  
 弁理士 吉岡 宏嗣  
 (74) 代理人 100066979  
 弁理士 鶴沼 辰之  
 (72) 発明者 金井 理  
 北海道札幌市北区北14条西九丁目  
 北海道大学 大学院  
 情報科学研究科内

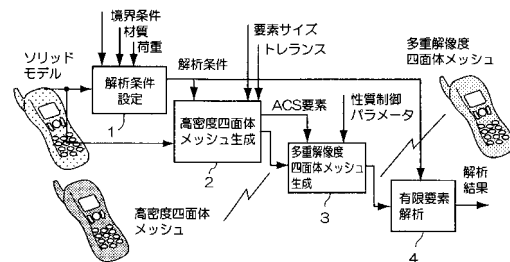
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 有限要素解析用の四面体メッシュの生成方法およびその方法を用いた有限要素解析システム

(57) 【要約】

【課題】 高密度四面体メッシュから解析に適した性質を持つ解析用四面体メッシュを自動生成する手法を確立する。

【解決手段】 製品のソリッドモデルのデータを取り込んで解析条件を設定する解析条件設定部1と、ソリッドモデルおよび解析条件を取り込み、少なくとも設定要素サイズに基づいて解析条件が設定された要素に識別符号を付して高密度の四面体メッシュを生成する四面体メッシュ生成部2と、四面体メッシュ生成部により生成されたかつ前記識別符号が付された四面体メッシュと、設定される性質制御パラメータとを取り込み、低密度の解析用四面体メッシュを生成する多重解像度四面体メッシュ生成部3と、多重解像度四面体メッシュ生成部により生成された解像度制御が可能な多重解像度の四面体メッシュを取り込み、解析条件を用いて有限要素解析を実施する有限要素解析部4とを、コンピュータを用いて構成する。



【選択図】 図1

## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

物品のソリッドモデルを解析条件が設定された要素に識別符号を付して前記物品の四面体メッシュを生成する第 1 ステップと、前記解析条件設定要素を保存して第 1 ステップで生成された四面体メッシュのメッシュ数を減らす簡略化処理を施して有限要素解析用の四面体メッシュを生成する第 2 ステップとを、コンピュータを用いて実行する有限要素解析用の四面体メッシュの生成方法。

## 【請求項 2】

第 2 ステップで生成された有限要素解析用の四面体メッシュと設定された前記解析条件に基づいて有限要素解析を実行する第 3 ステップを有してなる請求項 1 に記載の有限要素解析用四面体メッシュの生成方法。

10

## 【請求項 3】

第 2 ステップは、四面体メッシュを構成する稜線の両端の頂点を 1 つに統合するための新頂点を算出し、算出された前記新頂点に基づいて前記簡略化処理を実行すること特徴とする請求項 1 または 2 に記載の有限要素解析用四面体メッシュの生成方法。

## 【請求項 4】

前記新頂点を算出する処理は、解析条件が設定されたメッシュ要素を保存しながら処理を実行することを特徴とする請求項 3 に記載の四面体メッシュ生成方法。

## 【請求項 5】

前記新頂点を算出する処理は、前記稜線が前記解析条件が設定された稜線、または前記稜線の端点が前記解析条件が設定された頂点又は端点のとき前記簡略化処理をしないことを特徴とする請求項 4 に記載の四面体メッシュ生成方法。

20

## 【請求項 6】

第 2 ステップの簡略化処理は、予め設定されるメッシュの性質を制御するパラメータを満たすことを条件に前記メッシュ数を減らす処理であり、

第 3 ステップにより実行された解析結果に基づいて、前記パラメータを補正する第 4 ステップを有することを特徴とする請求項 3 乃至 5 のいずれかに記載の有限要素解析用四面体メッシュの生成方法。

## 【請求項 7】

メッシュの性質を制御する前記パラメータは、要素形状品質の下限値  $s_T$ 、サイズの上限值  $s_Z$ 、形状近似誤差の上限値  $t_L$ 、頂点評価の上限値  $v_L$  の少なくとも 1 つであることを特徴とする請求項 5 に記載の有限要素解析用四面体メッシュの生成方法。

30

## 【請求項 8】

製品のソリッドモデルのデータを取り込んで解析条件を設定する解析条件設定部と、前記ソリッドモデルおよび前記解析条件を取り込み、少なくとも設定要素サイズに基づいて解析条件が設定された要素に識別符号を付して四面体メッシュを生成する四面体メッシュ生成部と、該四面体メッシュ生成部により生成されかつ前記識別符号が付された四面体メッシュと、設定された性質制御パラメータとを取り込み、低密度の解析用四面体メッシュを生成する多重解像度四面体メッシュ生成部と、該多重解像度四面体メッシュ生成部により生成された解像度制御が可能な多重解像度の四面体メッシュを取り込み、前記解析条件を用いて有限要素解析を実施する有限要素解析部とを、コンピュータを用いて構成してなる有限要素解析システム。

40

## 【請求項 9】

前記有限要素解析部の解析結果に基づいて、前記メッシュの性質制御パラメータを変更するパラメータ変更部を有することを特徴とする請求項 8 に記載の有限要素解析システム。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

50

本発明は、有限要素解析用の四面体メッシュの生成法およびその方法を用いた有限要素解析システムに係り、具体的には、コンピュータを用いて高密度四面体メッシュから解析に適した性質を持つ解析用多重解像度メッシュを自動生成する技術に関する。

【背景技術】

【0002】

製品などの物品の強度や熱変形等の物理的な性質を有限要素法(FEM)により解析する際、その物品を例えばコンピュータグラフィックス(CG)化したソリッドモデルを、細かい面分要素(メッシュ)の集合として表現したメッシュモデルが用いられる。

【0003】

従来、ソリッドモデルからメッシュを自動生成する方法として、高密度の四面体メッシュを生成できるFEMメッシャが代表的である。 10

【0004】

また、従来メッシュモデルの生成法としては、例えば、非特許文献1~2に開示されたものが知られている。

【0005】

【非特許文献1】Oliver G. Staadt and Markus H. Gross: Progressive Tetrahedralizations, proc. of IEEE Visualization 98, 397-402, 1998.

【非特許文献2】M. Garland and Paul. S. Heckbert: Surface Simplification Using Quadric Error Metrics, proc. of SIGGRAPH 97, pp. 209-216, 1997

【発明の開示】 20

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

ところで、製品開発のできるだけ早い段階において、有限要素解析(FEA: Finite Element Analysis)を実施して製品形状を確定することが要望されている。このような要望を満たすためには、高品質のメッシュ生成がコンピュータ援用工学(CAE)や有限要素解析(FEA)の効率化に要求され、より頑強で、かつ性質制御性の高い解析用メッシュを自動生成することが望まれている。

【0007】

しかし、有限要素解析用メッシュの自動生成においては、複雑なソリッド形状に対する頑強で安定した低解像度メッシュの自動生成、および柔軟なメッシュの性質制御に関して、未だ改良すべき余地がある。ここで、高品質なメッシュとは、メッシュの歪が小さく、かつメッシュサイズの均一度が高いものをいう。また、頑強な解析用メッシュ生成法とは、メッシュ生成処理が安定なことをいい、所望の品質を有するメッシュを短時間で得る処理が望まれる。さらに、性質制御性が高いとは、解析に適した品質を有するメッシュを自由に操作できることをいう。 30

【0008】

本発明は、高密度四面体メッシュから解析に適した性質を持つ解析用四面体メッシュを自動生成する手法を確立することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】 40

上記課題を解決するため、本発明は、FEMメッシャで安定に生成可能な高密度四面体メッシュから、簡略化手法と多重解像度表現(MRR: Multi-resolution Representation)を利用して、解析に適した性質を持つ解析用メッシュを自動生成することを基本とする。ここで、多重解像度表現とは、メッシュ簡略化の際に失われた情報を保持しておき、それらの情報と最も粗いメッシュとを保持しておく表現法である。特に、有限要素解析用メッシュに要求される性質(品質)をパラメータ等により制御可能で、かつ、メッシュを簡略化しても解析条件設定に関係する要素が簡略化後のメッシュに保存されることを特徴とする。

【0010】

具体的には、本発明の有限要素解析用の四面体メッシュの生成方法は、物品のソリッド 50

モデルを解析条件が設定された要素に識別符号を付して前記物品の四面体メッシュを生成する第1ステップと、前記解析条件設定要素を保存して第1ステップで生成された四面体メッシュのメッシュ数を減らす簡略化処理を施して有限要素解析用の四面体メッシュを生成する第2ステップとを、コンピュータを用いて実行することを特徴とする。

【0011】

この場合において、第2ステップで生成された有限要素解析用の四面体メッシュと設定された前記解析条件に基づいて有限要素解析を実行する第3ステップを有して構成することができる。また、第2ステップは、四面体メッシュを構成する稜線の両端の頂点を1つに統合するための新頂点を算出し、算出された前記新頂点に基づいて前記簡略化処理を実行することができる。また、新頂点を算出する処理は、解析条件が設定されたメッシュ要素を保存しながら処理を実行する。例えば、稜線が解析条件が設定された稜線、または稜線の端点が解析条件が設定された頂点又は端点のとき、簡略化処理をしないことにより、解析条件が設定されたメッシュ要素を保存しながら簡略化処理をする。

10

【0012】

また、第2ステップの簡略化処理は、予め設定されるメッシュの性質を制御するパラメータを満たすことを条件に前記メッシュ数を減らす処理であり、第3ステップにより実行された解析結果に基づいて、前記パラメータを補正する第4ステップを有する構成とすることができる。これによれば、解析に適した四面体メッシュを生成することができる。ここで、メッシュの性質を制御するパラメータは、要素形状品質の下限値  $s_T$ 、サイズの上限值  $s_Z$ 、形状近似誤差の上限值  $T_L$ 、頂点評価の上限值  $v_L$  の少なくとも1つを設定することができる。

20

【0013】

また、本発明の有限要素解析システムは、製品のソリッドモデルのデータを取り込んで解析条件を設定する解析条件設定部と、前記ソリッドモデルおよび前記解析条件を取り込み、少なくとも設定要素サイズに基づいて解析条件が設定された要素に識別符号を付して四面体メッシュを生成する四面体メッシュ生成部と、該四面体メッシュ生成部により生成されかつ前記識別符号が付された四面体メッシュと、設定された性質制御パラメータとを取り込み、低密度の解析用四面体メッシュを生成する多重解像度四面体メッシュ生成部と、該多重解像度四面体メッシュ生成部により生成された解像度制御が可能な多重解像度の四面体メッシュを取り込み、前記解析条件を用いて有限要素解析を実施する有限要素解析部とを備えて、コンピュータにより構成することができる。

30

【0014】

この場合、有限要素解析部の解析結果に基づいて、メッシュの性質制御パラメータを変更するパラメータ変更部を有する構成とすることができる。

【発明の効果】

【0015】

本発明によれば、高密度四面体メッシュから解析に適した性質を持つ解析用四面体メッシュを自動生成することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0016】

以下、本発明を実施形態に基づいて説明する。図1に、本発明の一実施の形態の有限要素解析用の四面体メッシュの生成方法を適用した有限要素解析システム(CAEシステム)の構成図を示す。図示のように、本実施形態のシステムは、解析条件設定部1と、高密度四面体メッシュ生成部2と、多重解像度四面体メッシュ生成部3と、有限要素解析部4とを含んで構成されている。これらの各部は、コンピュータおよびコンピュータプログラムにより実現することができる。

40

【0017】

解析条件設定部1は、コンピュータ援用設計(CAD)によって形成された製品のソリッドモデルのデータを取り込み、入力される材質、荷重、拘束条件および境界条件などの解析条件をソリッドモデルに設定する。

50

## 【0018】

高密度四面体メッシュ生成部2は、例えば公知のFEMメッシュを用いて構成され、ソリッドモデルのデータおよび解析条件を取り込むとともに、入力設定される要素サイズおよびトレランス(形状近似の誤差の上限)に基づいて、高密度の四面体メッシュを生成する。このとき、解析条件設定に利用された要素(以下、解析条件設定要素という。)に識別符号のラベルを付した四面体メッシュを生成する。

## 【0019】

多重解像度四面体メッシュ生成部3は、本発明の特徴部であり、高密度四面体メッシュ生成部2により生成された高密度の四面体メッシュのデータと、解析条件設定要素および入力設定されるメッシュの性質制御パラメータとを取り込み、解析用メッシュを自動生成する。本実施形態では、メッシュの数を減らしてメッシュを簡略化する処理と、多重解像度表現(MRR)を利用して解析に適した性質を有する解析用メッシュを生成する。この多重解像度四面体メッシュ生成部3によれば、後述するように、複雑な形状でも確実な、さらに解析条件生成に必要な解析条件設定要素を保存しながら、メッシュの性質を柔軟に制御できる。

10

## 【0020】

有限要素解析部4は、多重解像度四面体メッシュ生成部3により生成された解像度制御が可能な多重解像度の四面体メッシュを取り込むとともに、解析条件設定部1で設定された解析条件を用いて有限要素解析を実施し、製品の設計形状の評価を行う。

## 【0021】

20

以下に、本発明の特徴部である多重解像度四面体メッシュ生成部3を詳細に説明する。

## [1]メッシュの性質制御

まず、有限要素解析においては、解析時間短縮および精度向上の観点からメッシュの性質が適切であることが要求される。本実施形態では、メッシュの性質のうち、要素形状品質、サイズ、形状近似誤差、頂点(節点)価数を考慮している。つまり、ユーザが指定するメッシュの性質制御パラメータとして、要素形状品質の下限値  $s_T$ 、サイズの上限值  $s_Z$ 、形状近似誤差の上限値  $T_L$ 、頂点評価の上限値  $v_L$  を入力設定することにより、メッシュ性質を制御可能にしている。

## 【0022】

さらに、図示していないが、有限要素解析の結果に基づいて、必要に応じて、メッシュの性質制御パラメータを変更し、多重解像度四面体メッシュ生成部3にフィードバックして繰返しメッシュ簡略化処理を行うことにより、解析に適した性質を有する解析用メッシュを生成するようにすることが好ましい。

30

## [2]解析条件設定要素の保存

解析条件設定部1でソリッドモデルの形状表面に解析条件が設定されたソリッド要素(図2(a))に対応するメッシュ要素は、解析用メッシュ上になければならない。本実施形態では、高密度四面体メッシュ生成部2で、解析条件設定要素にラベル付して四面体メッシュを生成する。すなわち、メッシュに解析条件設定(ACS)要素を定め、多重解像度四面体メッシュ生成部3におけるメッシュ簡略化の過程で、ACS要素を保存することにより、解析条件設定に必要な要素を簡略化された低解像度メッシュ上に残すようにする。例えば、解析条件ソリッド頂点に対してはACS頂点、稜線および面分に対してはACS稜線を図2(b)のように定める。

40

## [3]四面体メッシュ簡略化

FEMメッシュなどにより高密度四面体メッシュ生成部2において生成された四面体メッシュは高密度であるから、メッシュ操作の自由度が高いことが知られている。この自由度の高さを利用して、四面体メッシュ簡略化処理により品質を考慮しながら高密度の四面体メッシュを簡略化して、解析に適した四面体メッシュを生成することが本発明の特徴である。

## 【0023】

四面体メッシュ簡略化処理は、図3に示すように、各四面体メッシュを構成する稜線の

50

両端の頂点  $i$  ,  $j$  を 1 つの新頂点  $k$  に統合することにより簡略化する処理であり、いわゆる EC ( Edge Collapse ) 処理として知られている手法である ( 非特許文献 1 参照 ) 。このメッシュ簡略化処理は、図 4 に示すように、ステップ S 1 ~ S 3 の処理を繰り返す処理である。

【 0 0 2 4 】

( S 1 : 新頂点算出 )

ステップ S 1 においては、高密度四面体メッシュ生成部 2 から高解像度メッシュのデータおよび ACS 要素のデータを取り込み、全ての稜線に対して EC 適用後の頂点位置を算出する。この処理は、ステップ S 3 の EC 適用により変更された稜線に対しても行われる。すなわち、稜線を構成する 2 頂点 (  $i$  ,  $j$  ) を、新たな 1 つの頂点  $k$  に統合する。この EC 法は、例えば、Oliver G. Staadt and Markus H. Gross: Progressive Tetrahedralizations, proc. Of IEEE Visualization 98, 379-402, 1998 に開示されている。

10

【 0 0 2 5 】

( S 2 : EC 適用稜線決定 )

ステップ S 2 においては、ステップ S 1 で算出された新頂点位置と、高密度四面体メッシュ生成部 2 で生成された高解像度メッシュおよび ACS 要素と、性質制御パラメータ  $s_T$ 、 $s_Z$ 、 $t_L$ 、 $v_L$  をそれぞれ取り込み、EC 適用により変更された稜線を含む全ての稜線に対して EC 適用可能性を評価する。そして、EC 適用可能と判定された稜線を有効稜線とする。さらに、有効稜線に対して EC 適用による品質保存度の評価値を定める。なお、有効稜線がなければ、処理を終了する。

20

【 0 0 2 6 】

( S 3 : EC 適用 )

ステップ S 3 においては、ステップ S 2 において求められた評価値が最大の稜線 (  $i$  ,  $j$  ) と、高密度四面体メッシュ生成部 2 で生成された高解像度メッシュ、およびステップ S 1 で定めた新頂点位置  $p_k$  を用い、EC を適用してメッシュの簡略化処理を実行して、ステップ S 1 に戻る。このようにして、ステップ S 1 ~ S 3 を繰り返すことにより、高解像度メッシュを簡略化処理して、解析に適した低解像度のメッシュを生成して有限要素解析部 4 に出力する。

[ 4 ] メッシュ評価法

ここで、ステップ S 2 における EC 適用による品質保存度のメッシュ評価法を詳細に説明する。本実施形態では、形状近似誤差、要素サイズおよび要素形状に基づいてメッシュを評価する。

30

[ 4 . 1 ] 形状近似誤差

2 つの頂点  $i$  ,  $j$  を 1 つの新頂点  $k$  に統合する EC (  $i$  ,  $j$  )  $k$  処理により生ずる誤差  $d_{i,j}(k)$  を、形状近似誤差に対しては頂点  $k$  と形状表面面分間の自乗距離により評価する ( 非特許文献 2 参照 ) 。また、ACS 稜線に対しては、それを構成する稜線と頂点  $k$  間の自乗距離により評価する。

【 0 0 2 7 】

誤差  $d_{i,j}(k)$  は、次式 ( 1 ) で定義するものである。

【 0 0 2 8 】

40

【数 1】

$$d_{ij}(k) = \mathbf{p}_k^T (\mathbf{A}_i + \mathbf{A}_j) \mathbf{p}_k + 2(\mathbf{B}_i + \mathbf{B}_j) \mathbf{p}_k + C_i + C_j \quad (1)$$

ここで、

$$\mathbf{A}_i = \sum_{f \in \hat{f}^*(i)} \mathbf{n}_f \mathbf{n}_f^T + \sum_{e \in \hat{e}^*(i)} \begin{pmatrix} 1 - d_{ex}^2 & -d_{ex}d_{ey} & -d_{ex}d_{ez} \\ -d_{ex}d_{ey} & 1 - d_{ey}^2 & -d_{ey}d_{ez} \\ -d_{ex}d_{ez} & -d_{ey}d_{ez} & 1 - d_{ez}^2 \end{pmatrix} \quad 10$$

$$\mathbf{B}_i = - \sum_{f \in \hat{f}^*(i)} (\mathbf{n}_f^T \mathbf{p}_i) \mathbf{n}_f^T + \sum_{e \in \hat{e}^*(i)} (-\mathbf{p}_i + (\mathbf{d}_e^T \mathbf{p}_i)^2 \mathbf{d}_e)^T$$

$$C_i = \sum_{f \in \hat{f}^*(i)} (\mathbf{n}_f^T \mathbf{p}_i)^2 + \sum_{e \in \hat{e}^*(i)} (\mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_i + (\mathbf{d}_e^T \mathbf{p}_i)^2)$$

$\mathbf{p}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$  は頂点  $i$  の座標値、

20

$\mathbf{n}_f$  は面分  $f$  の単位法線、

$\mathbf{d}_e = (d_{ex}, d_{ey}, d_{ez})^T$  は ACS 稜線を構成する稜線  $e$  の単位方向ベクトル、

$\hat{f}^*(i)$  は頂点  $i$  に接続する形状表面の面分集合、

$\hat{e}^*(i)$  は頂点  $i$  に接続する ACS 稜線を構成する稜線集合

30

[ 4 . 2 ] 要素サイズ

要素のサイズは、 $l_e$  を稜線  $e$  の長さとして式 (2) で表される四面体要素  $h$  の最長辺長さ  $Sz(h)$  として定義する。

【 0 0 2 9 】

【数 2】

$$Sz(h) = \max_{e \in h} l_e \quad (2)$$

40

[ 4 . 3 ] 要素形状

要素形状の品質は、有限要素解析の分野で多く利用されている式 (3) のストレッチ  $t(h)$  で評価する。

【 0 0 3 0 】

【数 3】

$$St(h) = 6\sqrt{6}V_h / (\max_{e \in h} l_e \times S_h) \quad (3)$$

ここで、 $V_h$ 、 $S_h$  は、四面体要素  $h$  の体積と表面積である。 $St(h)$  の値は、正四面体で 1、要素形状が歪むにつれて 0 に近づき、0.05 以上のメッシュが解析において推奨されている。

10

[ 5 ] EC 適用後の新頂点算出

図 5 に、頂点および稜線に付する ACS 要素を識別するラベルの一例を示す。同図の上欄は形状表面稜線を、下欄は内部稜線を示している。また、左欄 (a) は Half-EC 適用稜線を、右欄 (b) は非有効稜線を示している。図中に示すように、上欄の形状表面稜線には、各稜線 (i, j) にラベル (a, b, c) が付されている。a, b = 1 は、i, j が ACS 稜線上にあることを表し、a, b = 2 は i, j は ACS 頂点又は ACS 稜線端点を表す。また、a, b = 3 は i, j は普通の頂点を表す。c = 1 は稜線 (i, j) が ACS 稜線上にあり、c = 2 は稜線 (i, j) が普通の稜線であることを表す。一方、下欄の内部稜線には、ラベル (a, b) が付され、a, b = 1 は i, j が形状表面上にあることを表し、a, b = 2 は i, j が形状内部にあることを表している。なお、図 5 中の \*

20

【 0 0 3 1 】

稜線  $e = (i, j)$  に対する EC 適用後の新頂点  $k$  の位置  $p_k$  は、形状および ACS 要素保存のために、図 5 (a) に示す特定の稜線に対して  $p_k = p_i$  を適用する。つまり、頂点对を 1 つに統合する際に、頂点对の一方の頂点を新たな頂点位置として利用する Half-EC (Edge Collapse) 法を適用する。また、非有効稜線の場合は、EC を適用しないと判断する。その他は、EC 適用後の部分メッシュで品質を高く保つことが可能な頂点  $i$  と頂点  $j$  の 1 近傍の、つまり隣接する頂点集合の重心とする。ここで、1 近傍の頂点集合において、形状表面上の稜線に対しては、表面上の頂点のみの集合とする。さらに、形状表面上の稜線は、稜線 (i, j) に接する面分、並びに、ACS 稜線との自乗距離を最小化する頂点位置  $p_k = -(A_i + A_j)^{-1} (B_i + B_j)$  を第二候補とし、以下に述べる評価結果に応じて順次利用する。

30

[ 6 ] EC 適用稜線の決定

[ 6.1 ] 有効稜線の抽出

本実施形態では、メッシュ品質を保証するため、次の条件を満たす稜線を EC 適用可能な有効稜線として抽出する。

【 0 0 3 2 】

条件 A : 形状・ACS 稜線近似誤差の上限値保証 :  $d_{ij}(k) \leq \tau_L$ 条件 B : 要素形状品質保証 :  $h_h^*(k); S_t(h) \geq \tau_T$ 条件 C : 要素サイズ上限値保証 :  $h_h^*(k); S_z(h) \leq \tau_Z$ 

40

条件 D : 価数上限値保証 :

$$n^*(i) + n^*(j) - f^*(i) - f^*(j) \leq 2 \tau_V$$

ここで、 $h^*(i)$  は頂点  $i$  に接続する四面体要素集合、 $f^*(i)$  は頂点  $i$  に接続する面分集合、 $n^*(i)$  は頂点  $i$  に接続する頂点集合である。また、条件 A ~ D は形状表面上の稜線に対し評価し、条件 B ~ D は形状内部の稜線に対し評価する。さらに、ACS 要素保存と非多様体生成回避のため、図 5 の (b) に示すタイプの稜線を非有効稜線と判定する。この非有効稜線については、EC 適用の対象としない。

[ 6.2 ] 稜線評価値計算

EC 処理を適用しても高い要素形状品質を保存でき、並びに要素サイズの均一化を図ることが重要である。そこで、EC 処理が適用可能な有効稜線と判定された稜線のうち、簡

50



略化による統合後の近傍メッシュにおけるストレッチが大きく、その近傍の要素辺の長さが短いものから優先的にEC処理を適用すると決定する。このための稜線 $(i, j)$ に対する評価値 $\varepsilon_{ij}$ を次式(4)で定める。そして、評価値 $\varepsilon_{ij}$ の大きい稜線からECを適用すると決定する。

【0033】

【数4】

$$\varepsilon_{ij} = \frac{|h^*(i) \cup h^*(j)|}{|h^*(k)|} \min_{h \in h^*(k)} St(h) \times \sum_{h \in h^*(k)} St(h) / \sum_{h \in h^*(i) \cup h^*(j)} \min_{e \in h} l_e \quad (4)$$

10

【実施例】

【0034】

上述した実施形態を具体的な物品に適用した実施例のメッシュの変化を図6に示す。図6(a)に示す高密度四面体メッシュ(要素数157, 083)に対して本実施形態を適用した結果、同図(b)、(c)に要素数の異なる低解像度メッシュ1, 2が得られた。各メッシュの評価結果を図7に示す。図7に示すように、本実施形態によれば、性質制御パラメータを満足するメッシュを生成でき、それらの性質制御パラメータの変更により、メッシュの性質制御が容易に行えることが確認された。

【0035】

図8に、上述した実施形態を具体的な物品に適用した他の実施例のメッシュの変化を示す。同図(a)に示す解析条件設定に必要な要素を含む高密度メッシュに対し、本実施形態を適用した結果、同図(b)に示すように、解析条件設定に必要な頂点、稜線および面分形状が低解像度メッシュ上で保存されていることが確認できる。

20

【0036】

これらの実施例により、本発明の手法により、解析条件設定に必要な要素を保存でき、高いメッシュ性質制御特性を持つ解析用四面体メッシュを生成できることが確認された。

【図面の簡単な説明】

【0037】

【図1】本発明の一実施の形態の有限要素解析用の四面体メッシュの生成方法を適用したCAEシステムの構成図である。

30

【図2】解析条件が設定されたソリッド要素に対応するメッシュ上のACS要素を保存して四面体メッシュを生成することを説明する概念図である。

【図3】四面体メッシュを簡略化するEC処理の一例を説明する概念図である。

【図4】四面体メッシュ簡略化処理の処理手順を示すブロック図である。

【図5】四面体メッシュ簡略化処理における稜線の種類に対するEC適用の考え方を示す図である

【図6】高密度四面体メッシュに対して本実施形態を適用して得られる要素数の異なる低解像度メッシュの実施例を示す図である。

【図7】図6の各メッシュの評価結果を示す図である。

【図8】本実施形態を適用して得られる低解像度メッシュ上に、解析条件設定に必要な頂点、稜線および面分形状が保存されていることを示す図である。

40

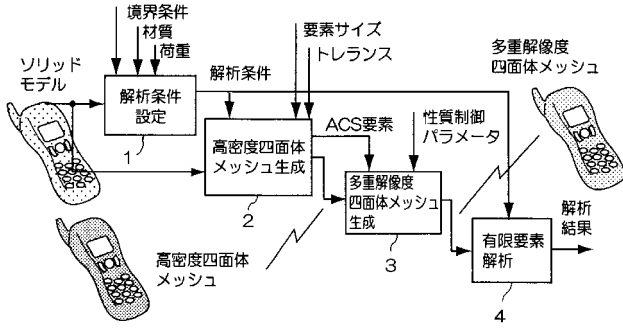
【符号の説明】

【0038】

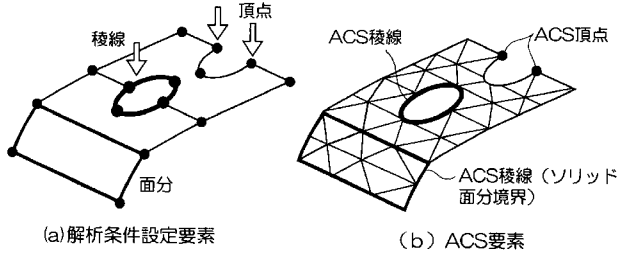
- 1 解析条件設定部
- 2 高密度四面体メッシュ生成部
- 3 多重解像度四面体メッシュ生成部
- 4 有限要素解析部
- S1 新頂点算出
- S2 EC適用稜線決定
- S3 EC適用

50

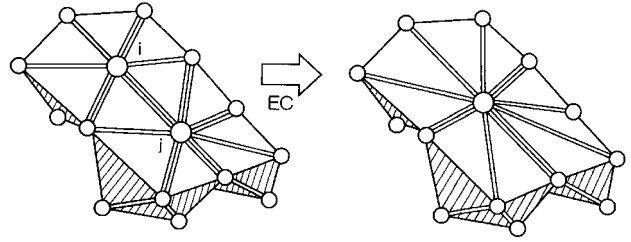
【 図 1 】



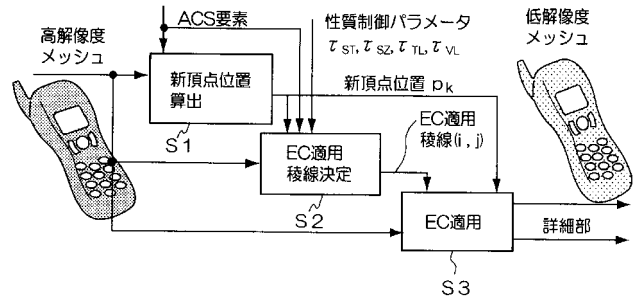
【 図 2 】



【 図 3 】



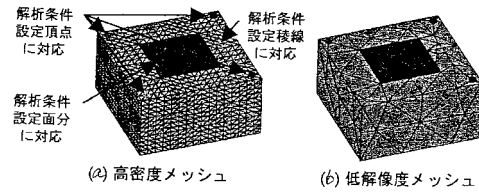
【 図 4 】



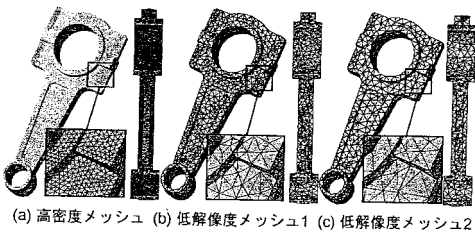
【 図 5 】

	(a) Half EC適用稜線	(b) 非有効稜線	(a,b,c) a,b=1: i,jはACS稜線上 a,b=2: i,jはACS頂点又はACS稜線端点 a,b=3: i,jは普通の頂点 c=1: (i,j)はACS稜線上 c=2: (i,j)は普通の稜線
形状表面稜線	$(2,3,*)$ $(2,1,1)$	$(2,2,*)$ $(2,1,2)$ $(1,1,2)$	
内部稜線	$(1,2)$	$(1,1)$	(a,b) a,b=1: i,jは形状表面上 a,b=2: i,jは形状内部

【 図 8 】



【 図 6 】



【 図 7 】

メッシュの性質評価結果

メッシュ	要素数	要素サイズ		ストレッチ		頂点価数
		最大値*	平均値	最小値*	平均値	
図6(b)	183,003	9.94(10)	5.34	0.20(0.2)	0.61	25(25)
図6(c)	6,003	9.99(10)	7.77	0.21(0.2)	0.61	21(25)

\*括弧内は指定した性質制御パラメータ値

---

フロントページの続き

- (72)発明者 伊達 宏昭  
北海道札幌市北区北14条西九丁目  
科内 北海道大学 大学院情報科学研究
- (72)発明者 岸浪 建史  
北海道札幌市北区北14条西九丁目  
科内 北海道大学 大学院情報科学研究
- (72)発明者 西垣 一朗  
茨城県土浦市神立町502番地 株式会社日立製作所機械研究所内
- Fターム(参考) 5B046 JA07  
5B080 AA14 AA20 DA06