

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2006 年 6 月 8 日 (08.06.2006)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2006/059417 A1

(51) 国際特許分類:

G06F 17/50 (2006.01)

(21) 国際出願番号:

PCT/JP2005/016447

(22) 国際出願日:

2005 年 9 月 7 日 (07.09.2005)

(25) 国際出願の言語:

日本語

(26) 国際公開の言語:

日本語

(30) 優先権データ:

特願2004-351788 2004 年 12 月 3 日 (03.12.2004) JP

(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 国立大学法人大阪大学 (OSAKA UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒5650871 大阪府吹田市山田丘 1 番 1 号 Osaka (JP).

(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KM, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(72) 発明者; および

(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 村川 英一 (MURAKAWA, Hidekazu). 芹澤 久 (SERIZAWA, Hisashi).

添付公開書類:

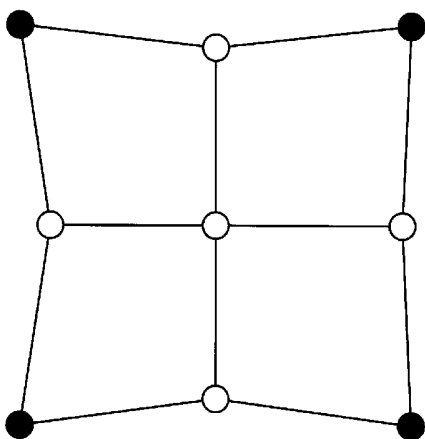
— 国際調査報告書

(74) 代理人: 河野 登夫 (KOHNO, Takao); 〒5400035 大阪府大阪市中央区釣鐘町二丁目 4 番 3 号 河野特許事務所 Osaka (JP).

2 文字コード及び他の略語については、定期発行される各 PCT ガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

(54) Title: FINITE ELEMENT ANALYSIS METHOD, FINITE ELEMENT ANALYSIS DEVICE, AND COMPUTER PROGRAM

(54) 発明の名称: 有限要素解析方法、有限要素解析装置、及びコンピュータプログラム



(57) Abstract: A finite element analysis method, finite element analysis device, and computer program through which the computation load is reduced and the computation time is shortened to a minimum value without increasing the computation time exponentially even if the shape of a structure is complex. Each finite element is divided into regions. The displacement value and the stress value are computed for each region, and a maximum value of the differences in stress value between the regions. When the computed maximum value is larger than a predetermined value, each of the regions is divided into regions. For each region, iterative computation is carried out to compute a maximum value of the differences in stress value between the regions. If the number of divisions does not reach a predetermined limit value, each region is further divided into regions, and a maximum value of the differences in stress value between the regions is computed iteratively for each region. If the number of divisions reaches the predetermined limit value, information representing that the maximum value of the differences in stress value is larger than a predetermined value is sent to the outside.

(57) 要約: 構造物の形状が複雑になった場合であっても、演算時間が指数的に増大することがなく、演算処理負荷を軽減しつつ演算時間の最短化を図ることができる有限要素解析方法、有限要素解析装置、及びコンピュータプログラムを提供する。各有限要素を複数領域に分割し、分割した領域ごとに変位値及び応力値を算出し、各領域間の応力値の差の最大値を算出し、算出した最大値が所定値より大きい場合、複数領域をさらに複数の領域に分割し、分割した領域ごとに反復演算して各領域間の応力値の差の最大値を算出し、分割した回数が所定の限界値に到達していない場合、再度さらなる複数の領域に分割し、分割した領域ごとに反復して各領域間の応力値の差の最大値を算出し、限界値に到達した場合、応力値の差の最大値が所定値より大きい旨を示す情報を外部に送出する。

WO 2006/059417 A1

明 細 書

有限要素解析方法、有限要素解析装置、及びコンピュータプログラム 技術分野

- [0001] 本発明は、有限要素法を用いて構造物の解析を行う場合に、算出した応力の勾配に応じて有限要素の分割メッシュの粗細を特定することで、全体を細かいメッシュで解析演算する場合よりも演算処理負荷を軽減し、演算時間を短縮する有限要素解析方法、有限要素解析装置、及びコンピュータプログラムに関する。

背景技術

- [0002] コンピュータ技術の進展により、複雑な構造物に対する非線形問題、過渡問題等の解析を行うことが実用上可能となってきた。すなわち、解析対象となる構造物の形状が複雑となった場合、構造物に対して非線形解析を行う必要が生じる。斯かる構造物に対する非線形解析には、有限要素法 (Finite Element Method :以下、FEM)を用いて解を求めることが多い。
- [0003] 構造物の形状が複雑になった場合、応力場の自由度も大きくなる。したがって、解くべき連立方程式は高次元となり、形状が複雑になればなるほど、演算処理装置の演算処理負荷が大きくなり、解を求めるまでの時間は指数的に増大する傾向にある。従来は、構造物を分割するメッシュの粗さ・細かさと、解を求める演算時間とのバーターにより、最適なメッシュ分割及び妥当な演算時間を求めているが、斯かる分割メッシュの粗さを特定するには相当の熟練を要する。
- [0004] そして、分割した有限要素ごとに、応力場を支配する偏微分方程式を連立方程式に変換し、変換した連立方程式を解くことにより、構造物の応力分布を求めることができる。

特許文献1:なし

発明の開示

発明が解決しようとする課題

- [0005] しかし、上述した構造物に対して非線形解析を行う方法では、コンピュータの演算処理速度が高速化した現状においても、非線形解析の演算に多大な処理時間を必

要とする。また、構造物を分割するメッシュの粗さ／細かさと、解を求める演算時間との最適化を図ることは、結果として適切であったか否かを判断することはできるものの、演算処理の開始前に判断することは熟練者にとっても困難であるという問題点があった。

[0006] 今後、さらに複雑な形状を有する構造物に対する構造解析を行う機会が増大することが予想される。一般に、構造物全体に対応して分割した有限要素に基づいて全ての有限要素につき非線形解析した場合、解くべき連立方程式の次数 N (N は自然数)が大きくなり、演算時間が N^3 に比例する。したがって、構造物の形状の複雑化に伴う連立方程式の次数の増大により、演算時間が膨大となるおそれも残されている。

[0007] 本発明は斯かる事情に鑑みてなされたものであり、構造物の形状が複雑になった場合であっても、演算時間が指数的に増大することがなく、演算処理負荷を軽減しつつ演算時間の最短化を図ることができる有限要素解析方法、有限要素解析装置、及びコンピュータプログラムを提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0008] 上記目的を達成するために第1発明に係る有限要素解析方法は、コンピュータで、構造物が占める領域を分割した複数の有限要素ごとに、所定の外力が付与された場合の応力解析を行う有限要素解析方法において、各有限要素を複数領域に分割し、分割した回数を示すカウンタを初期値に設定し、分割した領域ごとに変位値と応力値とを算出し、各領域間の応力値の差の最大値を算出し、算出した最大値が所定値より大きいと判断し、最大値が所定値より大きいと判断した場合、複数領域をさらに複数の領域に分割し、カウンタを計数し、分割した領域ごとに反復演算して各領域間の応力値の差の最大値を算出し、カウンタが所定の限界値に到達したか否かを判断し、カウンタが前記限界値に到達していない場合、再度さらなる複数の領域に分割し、カウンタを計数し、分割した領域ごとに反復して各領域間の応力値の差の最大値を算出し、カウンタが前記限界値に到達したと判断した場合、応力値の差の最大値が所定値より大きい旨を示す情報を外部に送出することを特徴とする。

[0009] また、第2発明に係る有限要素解析方法は、第1発明において、前記カウンタの前記限界値を受け付けることを特徴とする。

- [0010] また、第3発明に係る有限要素解析方法は、第1又は第2発明において、分割した複数領域の境界にて、変位及び応力が連続的に変化するよう変位値と応力値とを補正し、補正した応力値に基づいて各領域間の応力値の差の最大値を算出することを特徴とする。
- [0011] また、第4発明に係る有限要素解析装置は、構造物が占める領域を分割した複数の有限要素ごとに、所定の外力が付与された場合の応力解析を行う有限要素解析装置において、各有限要素を複数領域に分割する手段と、分割した回数を示すカウンタと、該カウンタを初期値に設定する手段と、分割した領域ごとに変位値と応力値とを算出する手段と、各領域間の応力値の差の最大値を算出する手段と、算出した最大値が所定値より大きいと判断する手段と、最大値が所定値より大きいと判断した場合、複数領域をさらに複数の領域に分割する手段と、分割した領域ごとに反復演算して各領域間の応力値の差の最大値を算出する手段と、カウンタが所定の限界値に到達したか否かを判断する手段と、カウンタが前記限界値に到達していないと判断した場合、再度さらなる複数の領域に分割する手段と、分割した領域ごとに反復して各領域間の応力値の差の最大値を算出する手段と、カウンタが前記限界値に到達したと判断した場合、応力値の差の最大値が所定値より大きい旨を示す情報を外部に送出する手段とを備えることを特徴とする。
- [0012] また、第5発明に係る有限要素解析装置は、第4発明において、前記カウンタの前記限界値を受け付ける手段を備えることを特徴とする。
- [0013] また、第6発明に係る有限要素解析装置は、第4又は第5発明において、分割した複数領域の境界にて、変位及び応力が連続的に変化するよう変位値と応力値とを補正する手段と、補正した応力値に基づいて各領域間の応力値の差の最大値を算出する手段とを備えることを特徴とする。
- [0014] また、第7発明に係るコンピュータプログラムは、構造物が占める領域を分割した複数の有限要素ごとに、所定の外力が付与された場合の応力解析を行うコンピュータで実行可能なコンピュータプログラムにおいて、前記コンピュータを、各有限要素を複数領域に分割する手段、分割した回数を示すカウンタを初期値に設定する手段、分割した領域ごとに変位値と応力値とを算出する手段、各領域間の応力値の差の最

大値を算出する手段、算出した最大値が所定値より大きいか否かを判断する手段、最大値が所定値より大きいと判断した場合、複数領域をさらに複数の領域に分割する手段、カウンタを計数する手段、分割した領域ごとに反復演算して各領域間の応力値の差の最大値を算出する手段、カウンタが所定の限界値に到達したか否かを判断する手段、カウンタが前記限界値に到達していないと判断した場合、再度さらなる複数の領域に分割する手段、カウンタを計数する手段、分割した領域ごとに反復して各領域間の応力値の差の最大値を算出する手段、及びカウンタが前記限界値に到達したと判断した場合、応力値の差の最大値が所定値より大きい旨を示す情報を外部に送出する手段として機能させることを特徴とする。

[0015] また、第8発明に係るコンピュータプログラムは、第7発明において、前記コンピュータを、前記カウンタの前記限界値を受け付ける手段として機能させることを特徴とする。

[0016] また、第9発明に係るコンピュータプログラムは、第7又は第8発明において、前記コンピュータを、分割した複数領域の境界にて、変位及び応力が連続的に変化するよう変位値と応力値とを補正する手段、及び補正した応力値に基づいて各領域間の応力値の差の最大値を算出する手段として機能させることを特徴とする。

[0017] 第1発明、第4発明、及び第7発明では、構造物が占める領域をメッシュ分割した各有限要素につき、複数領域に分割し、分割した領域間の応力値の差の最大値、すなわち応力勾配を算出し、算出した応力勾配が所定値より大きい場合、さらに細かい複数の領域に分割し、分割した領域ごとに再度応力勾配を算出するという処理を、階層的に繰り返し実行する。階層化の数が所定の限界値に達するまでに応力勾配が所定値以下に収束した場合、階層ごとに小次元の連立方程式を解くことから演算処理時間は全階層に含まれる細分化された領域の総数に比例するのみであり、演算処理時間が指数的に増大することが無い。

[0018] これにより、構造物の形状が複雑になり、偏微分方程式を変換した連立方程式の次数が大きくなった場合であっても、演算処理時間は、有限要素をより細かいメッシュに階層的に分割した領域の総数に比例的に増加するに止まり、演算精度を低下することなく、より短時間で応力分布を求めることが可能となる。

[0019] また、階層化の数が所定の限界値に達するまでに応力勾配が所定値以下に低減しない場合、その旨を外部へ出力することで、例えばメッシュに不整合がある、亀裂が生じている等の判断を使用者が容易に行うことが可能となる。

[0020] 第2発明、第5発明、及び第8発明では、階層化数、すなわち有限要素を応力勾配が所定値以下に低減するまで分割する分割数の限界値であるカウンタの限界値を受け付けることにより、構造物の形状の複雑度に応じて、無駄な演算処理を行うことが無く、より短時間で応力分布を求めることが可能となる。

[0021] 第3発明、第6発明、及び第9発明では、有限要素を階層的に分割した複数領域間の境界にて、変位及び応力が連続的に変化するよう変位値と応力値とを補正し、補正した応力値に基づいて応力勾配を算出する。これにより、変位が特定可能な分割領域の頂点での応力値の連続性を担保するだけでなく、分割領域間の境界においても、複雑な演算処理を行うことなく変位及び応力値の連続性を担保することが可能となる。

発明の効果

[0022] 第1発明、第4発明、及び第7発明によれば、構造物の形状が複雑になり、偏微分方程式を変換した連立方程式の次数が大きくなった場合であっても、演算処理時間は、有限要素をより細かいメッシュに階層的に分割した領域の総数に比例的に増加するに止まり、演算精度を低下することなく、より短時間で応力分布を求めることが可能となる。

[0023] また、階層化の数が所定の限界値に達するまでに応力勾配が所定値以下に低減しない場合、その旨を外部へ出力することで、例えばメッシュに不整合がある、あるいは、亀裂が生じている等の判断を使用者が容易に行うことが可能となる。

[0024] 第2発明、第5発明、及び第8発明によれば、階層化数、すなわち有限要素を応力勾配が所定値以下に低減するまで分割する分割数の限界値であるカウンタの限界値を受け付けることにより、構造物の形状の複雑度に応じて、無駄な演算処理を行うことが無く、より短時間で応力分布を求めることが可能となる。

[0025] 第3発明、第6発明、及び第9発明によれば、変位が特定可能な分割領域の頂点での応力値の連続性を担保するだけでなく、分割領域間の境界においても、複雑な

演算処理を行うことなく変位及び応力の連続性を担保することが可能となる。

図面の簡単な説明

[0026] [図1]本発明の実施の形態1に係る有限要素解析装置の構成を示すブロック図である。

[図2]本実施の形態1で用いる有限要素の一例である正方領域を示す図である。

[図3]第1階層の正方領域で構成してあるセルを第2階層、第3階層、・・・、第n階層（nは自然数）へと、CPUの条件判断に応じて分割する手順を示す模式図である。

[図4]本発明の実施の形態1に係る有限要素解析装置のCPUでの処理手順を示すフローチャートである。

[図5]本実施の形態2で用いる有限要素の一例である正方領域を示す図である。

[図6]正方領域で構成してある2つのセルA、B間の境界における変位の補正方法を示す模式図である。

[図7]第m階層（mは $0 < m \leq n$ である自然数）での、分割された4領域A、B、C、Dが互いに接する節点A1、B1、C1、D1での節点力の状態を示す模式図である。

[図8]第（m-1）階層での節点に生じる節点力の算出方法を示す模式図である。

[図9]本発明の実施の形態2に係る有限要素解析装置のCPUでの処理手順を示すフローチャートである。

符号の説明

- [0027] 1 有限要素解析装置
 2 記憶媒体
 11 CPU
 12 記憶手段
 13 ROM
 14 RAM
 15 通信手段
 16 入力手段
 17 出力手段
 18 補助記憶手段

発明を実施するための最良の形態

[0028] (実施の形態1)

以下、本発明をその実施の形態1を示す図面に基づいて具体的に説明する。図1は、本発明の実施の形態1に係る有限要素解析装置の構成を示すブロック図である。図1において、有限要素解析装置1は、少なくとも、CPU(中央演算装置)11、記憶手段12、ROM13、RAM14、通信回線に接続する通信手段15、マウス及びキーボード等の入力手段16、ディスプレイ等の出力手段17及び補助記憶手段18で構成される。

[0029] CPU11は、内部バス19を介して有限要素解析装置1の上述したようなハードウェア各部と接続されており、上述したハードウェア各部を制御するとともに、ROM13に格納された制御プログラム又は補助記憶手段18であるCD-ROM、DVD等の(可搬型)記録媒体2を用いて記憶手段12へ導入された制御プログラムに従って、種々のソフトウェア的機能を実行する。なお、記憶手段12は、ハードディスク等の固定型記憶媒体であり、上述した制御プログラムの他、処理に必要なデータを事前に記憶しておく。

[0030] RAM14は、SRAM、フラッシュメモリ等で構成されソフトウェアの実行時に発生する一時的なデータを記憶する。通信手段15は、内部バス19に接続されており、外部からのデータの取得、外部装置の動作制御データ等を送受信する。

[0031] 入力手段16は、有限要素解析装置1を操作するために必要な文字キー、テンキー、各種のファンクションキー等を備えたキーボード、マウス等の入力媒体である。出力手段17は、液晶表示装置、CRTディスプレイ等の表示装置であり、有限要素解析装置1の動作状態を表示したり、ユーザへ操作入力を促す画面を表示したり、解析結果をグラフィカルに表示するための画像データの表示等を行う。なお、出力手段17をタッチパネル方式とすることにより、入力手段16の各種のファンクションキーの内の一部又は全部を出力手段17が代用することも可能である。

[0032] 以下、上述した構成の有限要素解析装置1における応力分布の算出処理の動作について2次元問題を例に説明する。図2は、本実施の形態1で用いる有限要素の一例である正方領域を示す図である。図2の例では、正方領域を9節点4要素からな

るセルとして定義している。もちろん、正方領域の定義はこれに限定されるものではなく、例えば9節点1要素からなるセル、3次元の場合は立体のセルであっても良い。

[0033] 通常、9節点のうち、頂点を形成している4節点の変位は既知であり、既知である4節点以外の5節点については変位が未知であることを前提条件として偏微分方程式を解くことにより、所定の外力が付与された場合の正方領域ごとの変位値と応力値とを算出する。図2は、節点の変位が既知である節点を黒丸印で、節点の変位が未知である節点を白丸印で、それぞれ示している。

[0034] 構造解析の対象となる構造物は、図2のような正方領域で構成してあるセルにより分割されており、有限要素解析装置1のCPU11は、例えば節点で分割された4領域ごとの応力値S1、S2、S3、S4を算出する。具体的には、所定の外力を付与した偏微分方程式を連立方程式に変換し、有限要素を用いた数値解析により4領域ごとの応力値の近似解を算出する。

[0035] そして、有限要素解析装置1のCPU11は、算出した4つの応力値の互いの差を算出し、差の最大値が所定の閾値よりも小さいか否かを判断することにより、正方領域をさらに細かい階層にまで分割する必要があるか否かを判断する。CPU11が、差の最大値が所定の閾値よりも大きいと判断した場合には、正方領域で構成してあるセルを、より小さな正方領域で構成してあるセルへと分割する。図3は、第1階層の正方領域で構成してあるセルを第2階層、第3階層、・・・、第n階層(nは自然数)へと、CPU11の条件判断に応じて分割する手順を示す模式図である。

[0036] 第1階層の正方領域で構成してあるセルが、4つの領域における応力値の差の最大値が所定の閾値よりも大きいと判断された場合、該正方領域を4分割して、第2階層の正方領域で構成してあるセルを生成する。図3では、4分割して生成した第2階層の正方領域で構成してあるセルの1つを例示している。

[0037] 第1階層の正方領域で構成してあるセルでは、節点Aは頂点であることから変位が既知である(黒丸印)。一方、節点B、C、及びDは変位が未知である(白丸印)。しかし、第2階層の正方領域で構成してあるセルに分割した場合、節点A、B、C、Dは新たな正方領域の頂点となっていることから変位が既知となる(黒丸印)。一方、節点E、F、Gは変位が未知となる(白丸印)。

[0038] 以下、第 $(n-1)$ 階層の正方領域を4分割して、第 n 階層の正方領域で構成してあるセルを生成するごとに、変位が既知である節点を変更しつつ、応力値を算出して、セル内の応力勾配が所定値以下となった時点で細分プロセスが完了するとともに、解析対象構造物の最終的な変位と応力が求まる。したがって、従来の構造解析プログラムでは、構造物の形状が複雑である部分のメッシュ分割を細かくし、形状が単純である部分のメッシュ分割を粗くするという経験則に沿ったメッシュ分割を行っていたため、メッシュ分割を行う技術者の熟練の程度により解析誤差が生じていた。それに対して本実施の形態1に係る有限要素解析装置1では、技術者の熟練の程度に依存すること無く、あくまでも解析した応力値から算出した差の最大値、すなわち有限要素内の応力勾配の大小に応じてメッシュ分割の程度を特定することができ、解析の精度を落とすことなく、無駄な演算処理を回避することができる。

[0039] 図4は、本発明の実施の形態1に係る有限要素解析装置1のCPU11での処理手順を示すフローチャートである。有限要素解析装置1のCPU11は、解析対象となる構造物の全ての有限要素の三次元座標情報及び外力の付与条件に関する情報を取得する(ステップS401)。CPU11は、カウンタを初期化し(ステップS402)、全ての有限要素を複数の領域に分割する(ステップS403)。

[0040] CPU11は、構造物全体の変位と応力とを算出し(ステップS404)、最も深い階層領域内の応力勾配を算出する(ステップS405)。CPU11は、算出した応力勾配が所定値、例えば算出誤差の限界値よりも大きいかな否かを判断する(ステップS406)。CPU11が、算出した応力勾配が所定値より大きいと判断した場合(ステップS406: YES)、CPU11は、分割された領域をさらに複数の領域に分割、例えば正方領域である場合、さらに4分割した領域へと分割し(ステップS407)、カウンタを単位数だけ計数して(ステップS408)、計数したカウンタの値が、所定の限界値に到達しているかな否かを判断する(ステップS409)。

[0041] CPU11が、計数したカウンタの値が、所定の限界値に到達していると判断した場合(ステップS409: YES)、CPU11は、出力手段17に対して、応力値の差の最大値が所定値より大きい旨を示す情報、例えばメッセージ情報、グラフィック表示の色彩表示情報等を送出する(ステップS410)。

- [0042] CPU11が、計数したカウンタの値が、所定の限界値に到達していないと判断した場合(ステップS409:NO)、CPU11は、ステップS405へ戻り、上述した処理を反復実行する。
- [0043] CPU11が、算出した応力勾配が所定値以下であると判断した場合(ステップS406:NO)、CPU11は、分割した領域の全ての領域につき、現在の最も深い階層において応力勾配が所定値以下であるか否かを判断し(ステップS411)、CPU11が、現在の最も深い階層において、分割した領域のいずれかの領域において応力勾配が所定値より大きいと判断した場合(ステップS411:NO)、CPU11はステップS404へ戻し、上述した処理を繰り返す。CPU11が、分割した領域の全ての領域につき、現在の最も深い階層において応力勾配が所定値以下であると判断した場合(ステップS411:YES)、CPU11は処理を終了する。
- [0044] 以上のように本実施の形態1によれば、構造物が占める領域をメッシュ分割した各有限要素につき、複数領域に分割し、分割した領域間の応力値の差の最大値、すなわち応力勾配を算出し、算出した応力勾配が所定値より大きい場合、さらに細かい複数の領域に分割し、分割した領域ごとに再度応力勾配を算出するという処理を、階層的に繰り返し実行する。階層化の数が所定の限界値に達するまでに応力勾配が所定値以下に低減した場合、全体として高次元の連立方程式を解く必要が有る場合であっても、階層ごとに小次元の連立方程式を解くことにより応力分布を近似的に求めることができ、演算処理時間は全階層に含まれる細分化された領域の総数に比例するのみであることから、演算処理時間は従来の演算方法のように指数的に増大することが無い。
- [0045] したがって、構造物の形状が複雑になり、偏微分方程式を変換した連立方程式の次数が大きくなった場合であっても、演算処理時間は、有限要素をより細かいメッシュに階層的に分割した領域の総数に比例的に増加するに止まり、演算精度を低下することなく、より短時間で応力分布を求めることが可能となる。
- [0046] また、階層化の数が所定の限界値に達するまでに応力勾配が所定値以下に低減しない場合、その旨を表示装置により使用者へ容易に伝達することができ、例えばメッシュに不整合がある、あるいは、亀裂が生じている等の判断が使用者が行うことが

可能となる。

[0047] なお、階層化の数の限界値は、事前に設定して記憶手段12、RAM14に記憶しておいても良いし、入力手段16を介して利用者による入力を受け付けても良い。また、通信手段15を介して外部装置からの入力を受け付けても良い。

[0048] このように階層化の数の限界値を固定しないことにより、解析対象となる構造物の形状の複雑度に応じて、演算処理負荷が過大とならない限界値を利用者が設定した場合、本来演算する必要がない分割領域に対する演算処理を行うことが無く、より短時間で応力分布を求めることが可能となる。

[0049] (実施の形態2)

以下、本発明をその実施の形態2を示す図面に基づいて具体的に説明する。本実施の形態2に係る有限要素解析装置の構成は、実施の形態1と同様であることから、同一の符号を付することにより詳細な説明を省略する。本実施の形態2は、有限要素を分割した領域の境界において、変位及び応力値の連続性を維持することができるよう、それぞれの階層で算出した変位値と応力値とを補正する点に特徴を有している。

[0050] 図5は、本実施の形態2で用いる有限要素の一例である正方領域を示す図である。図5の例では、正方領域を9節点4要素からなるセルとして定義している。もちろん、正方領域の定義はこれに限定されるものではなく、例えば9節点1要素からなるセル、3次元の場合は立体のセルであっても良い。

[0051] 通常、9節点のうち、頂点を形成している4節点の変位は既知であり、既知である4節点以外の5節点については変位が未知であることを前提条件として偏微分方程式を解くことにより、所定の外力が付与された場合の正方領域ごとの変位値と応力値とを算出する。図5は、節点の変位が既知である節点を黒丸印で、節点の変位が未知である節点を白丸印で、それぞれ示している。

[0052] 図6は、上述した図5のような正方領域で構成してある2つのセルA、B間の境界における変位の補正方法を示す模式図である。図6では、直交する平面座標系(x, y)上で、2つのセルA、Bの節点P、Qの変位は一致しており、節点P、Q間の節点RA、RBの変位(u_A, v_A)、(u_B, v_B)の連続性を維持すべく、セルA、Bの節点RA、RB

における剛性 (K_{uA} , K_{vA})、(K_{uB} , K_{vB})を用いて剛性比に基づく比例配分を行う。すなわち、補正後の節点RA、RBの共通変位 (u_{AB} , v_{AB})は数1により求めることができる。

[0053] (数1)

$$u_{AB} = (u_A \cdot K_{uA} + u_B \cdot K_{uB}) / (K_{uA} + K_{uB})$$

$$v_{AB} = (v_A \cdot K_{vA} + v_B \cdot K_{vB}) / (K_{vA} + K_{vB})$$

[0054] もちろん、剛性比による比例配分による補正に限定されるものではなく、例えば曲げ荷重による変形である場合には曲げ剛性の比による比例配分により補正することが好ましいことは言うまでもない。

[0055] 数1により求めた共通変位 (u_{AB} , v_{AB})に対する節点力(応力)は、必ずしも平衡条件を充足している保証は無い。そこで、分割した階層の最も深い階層、すなわちカウンタ値が最大である階層で、節点力のベクトル和が0(ゼロ)又は絶対値が所定値以下である場合に平衡条件を充足していると判断する。図7は、第m階層 (m は $0 < m \leq n$ である自然数)での、分割された4領域A、B、C、Dが互いに接する節点A1、B1、C1、D1での節点力の状態を示す模式図である。

[0056] 図7では、4つの節点A1、B1、C1、D1での節点力ベクトルをそれぞれFA、FB、FC、FDとし、節点力ベクトルFA、FB、FC、FDのベクトル和が二次元座標系(x, y)で(0, 0)になるか否かで平衡条件を充足しているか否かを判断する。もちろん、ベクトル和の絶対値が所定値以下であるか否かで判断してもよい。

[0057] 例えば第m階層が最も深い階層である場合、第m階層での応力及び節点力のベクトル和を算出し、最も深い階層の全てのセルについて、上述した平衡条件を充足しているか否かを判断する。最も深い階層の全てのセルについて、上述した平衡条件を充足していないと判断された場合、平衡条件を充足するように節点の配分位置を補正すべく、以下の処理へと移行する。

[0058] 最も深い階層である第m階層で平衡条件を充足していないと判断された場合、第m階層の節点での節点力はベクトル値として算出されていることから、算出した節点力に基づいて第m階層に分割した元の階層、すなわち第m階層の上位階層である第(m-1)階層での節点に生じる節点力を算出する。図8は、第(m-1)階層での節

点に生じる節点力の算出方法を示す模式図である。

[0059] 第 m 階層の正方領域での節点A、B、C、Dでの節点力を、それぞれ(f_{ua} 、 f_{va})、(f_{ub} 、 f_{vb})、(f_{uc} 、 f_{vc})、(f_{ud} 、 f_{vd})とした場合、第 $(m-1)$ 階層での節点Aにおけるu方向、v方向の節点力(f_{uA} 、 f_{vA})は、等価節点力として数2により求めることができる。

[0060] (数2)

$$f_{uA} = f_{ua} + (f_{ub} + f_{uc}) / 2 + f_{ud} / 4$$

$$f_{vA} = f_{va} + (f_{vb} + f_{vc}) / 2 + f_{vd} / 4$$

[0061] もちろん、(f_{uA} 、 f_{vA})の算出方法はこれに限定されるものではなく、例えば剛性分布に基づいて適切な配分を事前に定めておき、該配分に応じて算出するものであっても良い。

[0062] このようにして、第1階層の正方領域まで、すなわち構造物が占める領域をメッシュ分割した有限要素まで遡って、節点ごとの節点力を再算出し、再算出した節点力に基づいてベクトル和を算出する。そして、算出したベクトル和に基づいて、階層ごとのセルの変位(変位修正量)を順次算出して、最も深い階層の全てにつき平衡条件を充足するまで繰り返し演算を行うことで、最終的な変位と応力が求まる。

[0063] 図9は、本発明の実施の形態2に係る有限要素解析装置1のCPU11での処理手順を示すフローチャートである。有限要素解析装置1のCPU11は、第1階層から順次、例えば正方領域からなるセルの境界の変位を順次算出して(ステップS901)、変位の連続性を考慮して、数1に従って変位の補正演算を実行する(ステップS902)。

[0064] CPU11は、セルの境界の補正処理が、分割した階層の最も深い階層(第 m 階層)まで完了したか否かを判断し(ステップS903)、CPU11が、セルの境界の補正処理が、最も深い階層(第 m 階層)まで完了していないと判断した場合(ステップS903:NO)、ステップS901へ戻り、上述した処理を繰り返す。CPU11が、セルの境界の補正処理が、最も深い階層(第 m 階層)まで完了したと判断した場合(ステップS903:YES)、CPU11は、最も深い階層のセルの応力及び節点に生じている節点力(応力)のベクトル和を算出する(ステップS904)。

[0065] CPU11は、最も深い階層の全てにおいて、算出したベクトル和が所定の平衡条件

を具備しているか否か、例えば算出したベクトル和の絶対値が所定の閾値より小さいか否かを判断し(ステップS905)、CPU11が、最も深い階層のいずれかにおいて、算出したベクトル和が所定の平衡条件を具備していないと判断した場合(ステップS905:NO)、CPU11は、平衡条件を具備していない階層(第 m 階層)の上位階層(第 $m-1$ 階層、第 $m-2$ 階層、...)の節点に生じている節点力(応力)のベクトル和を、数2に従って順次再算出する(ステップS906)。

[0066] CPU11は、上述した節点力(応力)のベクトル和の算出処理が第1階層まで到達したか否かを判断し(ステップS907)、CPU11が、第1階層まで到達していないと判断した場合(ステップS907:NO)、CPU11は、ステップS906へ戻し、第1階層に到達するまで上位階層の節点に生じている節点力(応力)のベクトル和を再算出する。

[0067] CPU11が、第1階層まで到達していたと判断した場合(ステップS907:YES)、CPU11は、ステップS901へ戻し、各階層のセルの境界の変位を順次算出して、平衡条件を具備するか否かを再度判断する。

[0068] 最も深い階層の全ての(ステップS901)第1階層に到達するまで上位階層の節点に生じている節点力(応力)のベクトル和を再算出する。CPU11が、最も深い階層の全てにおいて、算出したベクトル和が所定の平衡条件を具備していると判断した場合(ステップS905:YES)、CPU11は、変位及び節点力(応力)の連続性が、セルの境界において担保することができたものと判断し、処理を終了する。

[0069] 以上のように本実施の形態2によれば、構造物が占める領域をメッシュ分割した各有限要素を複数領域に分割した場合であっても、変位が特定可能な分割領域の頂点での応力値の連続性を担保するだけでなく、分割領域間の境界においても、複雑な演算処理を行うことなく変位及び応力の連続性を担保することが可能となる。したがって、算出した応力の精度を低下させることなく高速に演算処理を終えることができる高速演算装置を具現化することが可能となる。

請求の範囲

- [1] コンピュータで、構造物が占める領域を分割した複数の有限要素ごとに、所定の外力が付与された場合の応力解析を行う有限要素解析方法において、
- 各有限要素を複数領域に分割し、分割した回数を示すカウンタを初期値に設定し、分割した領域ごとに変位値と応力値とを算出し、各領域間の応力値の差の最大値を算出し、算出した最大値が所定値より大きいかな否かを判断し、
- 最大値が所定値より大きいと判断した場合、複数領域をさらに複数の領域に分割し、カウンタを計数し、分割した領域ごとに反復演算して各領域間の応力値の差の最大値を算出し、
- カウンタが所定の限界値に到達したかな否かを判断し、
- カウンタが前記限界値に到達していない場合、再度さらなる複数の領域に分割し、カウンタを計数し、分割した領域ごとに反復して各領域間の応力値の差の最大値を算出し、
- カウンタが前記限界値に到達したと判断した場合、応力値の差の最大値が所定値より大きい旨を示す情報を外部に送出することを特徴とする有限要素解析方法。
- [2] 前記カウンタの前記限界値を受け付けることを特徴とする請求項1記載の有限要素解析方法。
- [3] 分割した複数領域の境界にて、変位及び応力が連続的に変化するように変位値と応力値とを補正し、補正した応力値に基づいて各領域間の応力値の差の最大値を算出することを特徴とする請求項1又は2記載の有限要素解析方法。
- [4] 構造物が占める領域を分割した複数の有限要素ごとに、所定の外力が付与された場合の応力解析を行う有限要素解析装置において、
- 各有限要素を複数領域に分割する手段と、
- 分割した回数を示すカウンタと、
- 該カウンタを初期値に設定する手段と、
- 分割した領域ごとに変位値と応力値とを算出する手段と、
- 各領域間の応力値の差の最大値を算出する手段と、
- 算出した最大値が所定値より大きいかな否かを判断する手段と、

最大値が所定値より大きいと判断した場合、複数領域をさらに複数の領域に分割する手段と、

分割した領域ごとに反復演算して各領域間の応力値の差の最大値を算出する手段と、

カウンタが所定の限界値に到達したか否かを判断する手段と、

カウンタが前記限界値に到達していないと判断した場合、再度さらなる複数の領域に分割する手段と、

分割した領域ごとに反復して各領域間の応力値の差の最大値を算出する手段と、

カウンタが前記限界値に到達したと判断した場合、応力値の差の最大値が所定値より大きい旨を示す情報を外部に送出する手段と

を備えることを特徴とする有限要素解析装置。

- [5] 前記カウンタの前記限界値を受け付ける手段を備えることを特徴とする請求項4記載の有限要素解析装置。

- [6] 分割した複数領域の境界にて、変位及び応力が連続的に変化するよう変位値と応力値とを補正する手段と、

補正した応力値に基づいて各領域間の応力値の差の最大値を算出する手段とを備えることを特徴とする請求項4又は5記載の有限要素解析装置。

- [7] 構造物が占める領域を分割した複数の有限要素ごとに、所定の外力が付与された場合の応力解析を行うコンピュータで実行可能なコンピュータプログラムにおいて、前記コンピュータを、

各有限要素を複数領域に分割する手段、

分割した回数を示すカウンタを初期値に設定する手段、

分割した領域ごとに変位値と応力値とを算出する手段、

各領域間の応力値の差の最大値を算出する手段、

算出した最大値が所定値より大きいと否かを判断する手段、

最大値が所定値より大きいと判断した場合、複数領域をさらに複数の領域に分割する手段、

カウンタを計数する手段、

分割した領域ごとに反復演算して各領域間の応力値の差の最大値を算出する手段、

カウンタが所定の限界値に到達したか否かを判断する手段、

カウンタが前記限界値に到達していないと判断した場合、再度さらなる複数の領域に分割する手段、

カウンタを計数する手段、

分割した領域ごとに反復して各領域間の応力値の差の最大値を算出する手段、及び

カウンタが前記限界値に到達したと判断した場合、応力値の差の最大値が所定値より大きい旨を示す情報を外部に送出する手段

として機能させることを特徴とするコンピュータプログラム。

[8] 前記コンピュータを、

前記カウンタの前記限界値を受け付ける手段として機能させることを特徴とする請求項7記載のコンピュータプログラム。

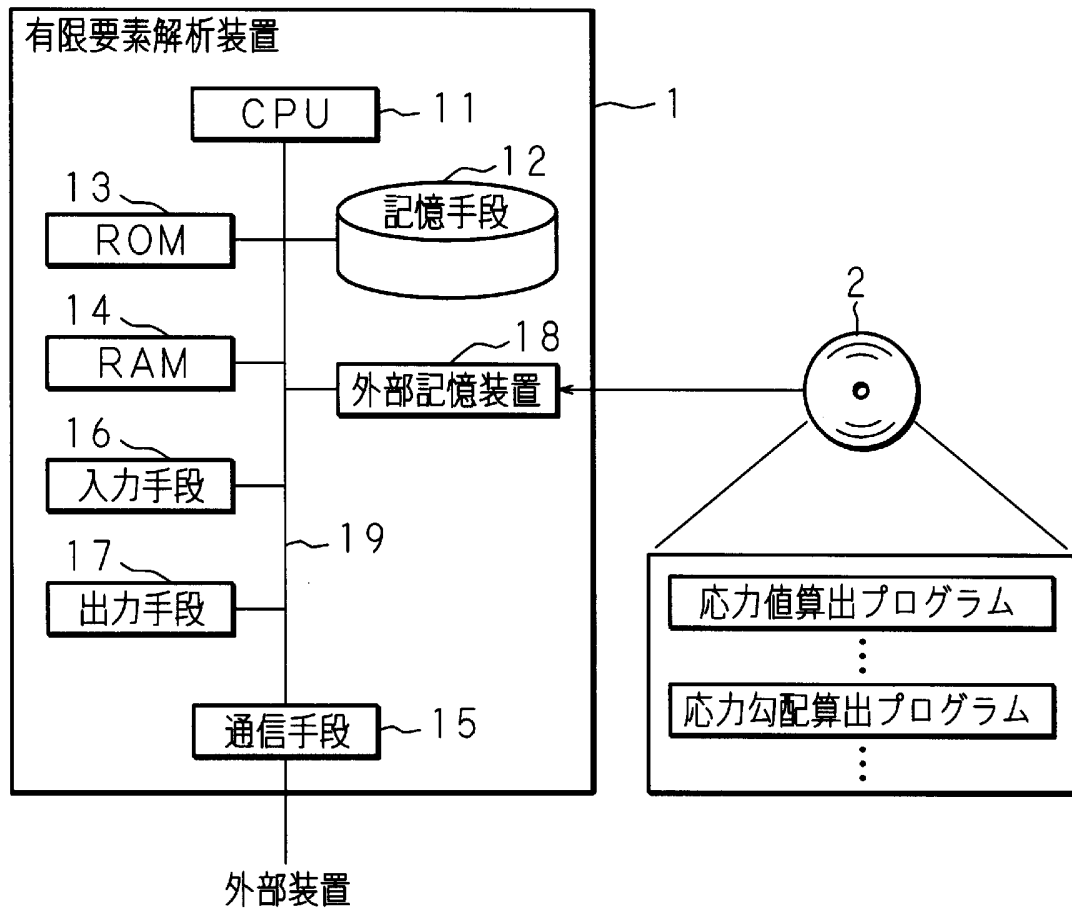
[9] 前記コンピュータを、

分割した複数領域の境界にて、変位及び応力が連続的に変化するよう変位値と応力値とを補正する手段、及び

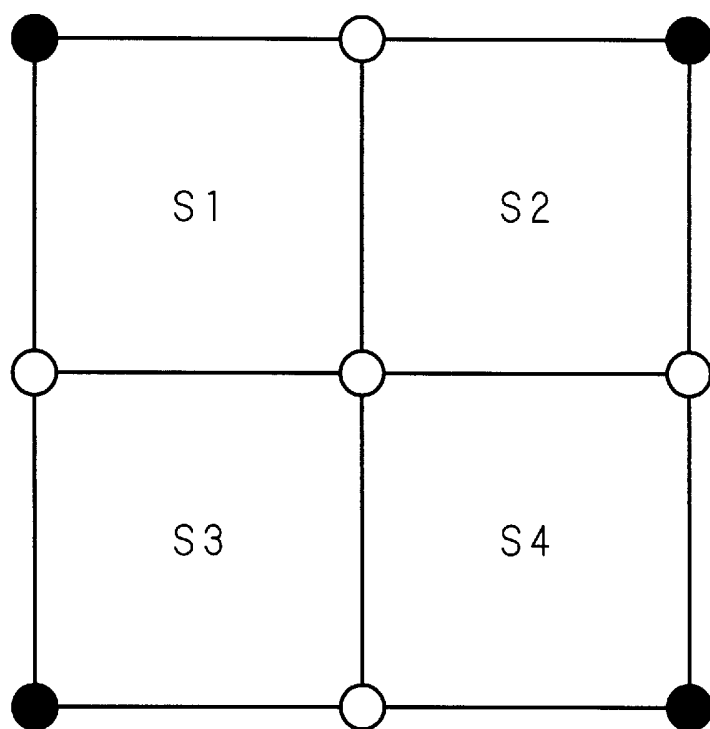
補正した応力値に基づいて各領域間の応力値の差の最大値を算出する手段

として機能させることを特徴とする請求項7又は8記載のコンピュータプログラム。

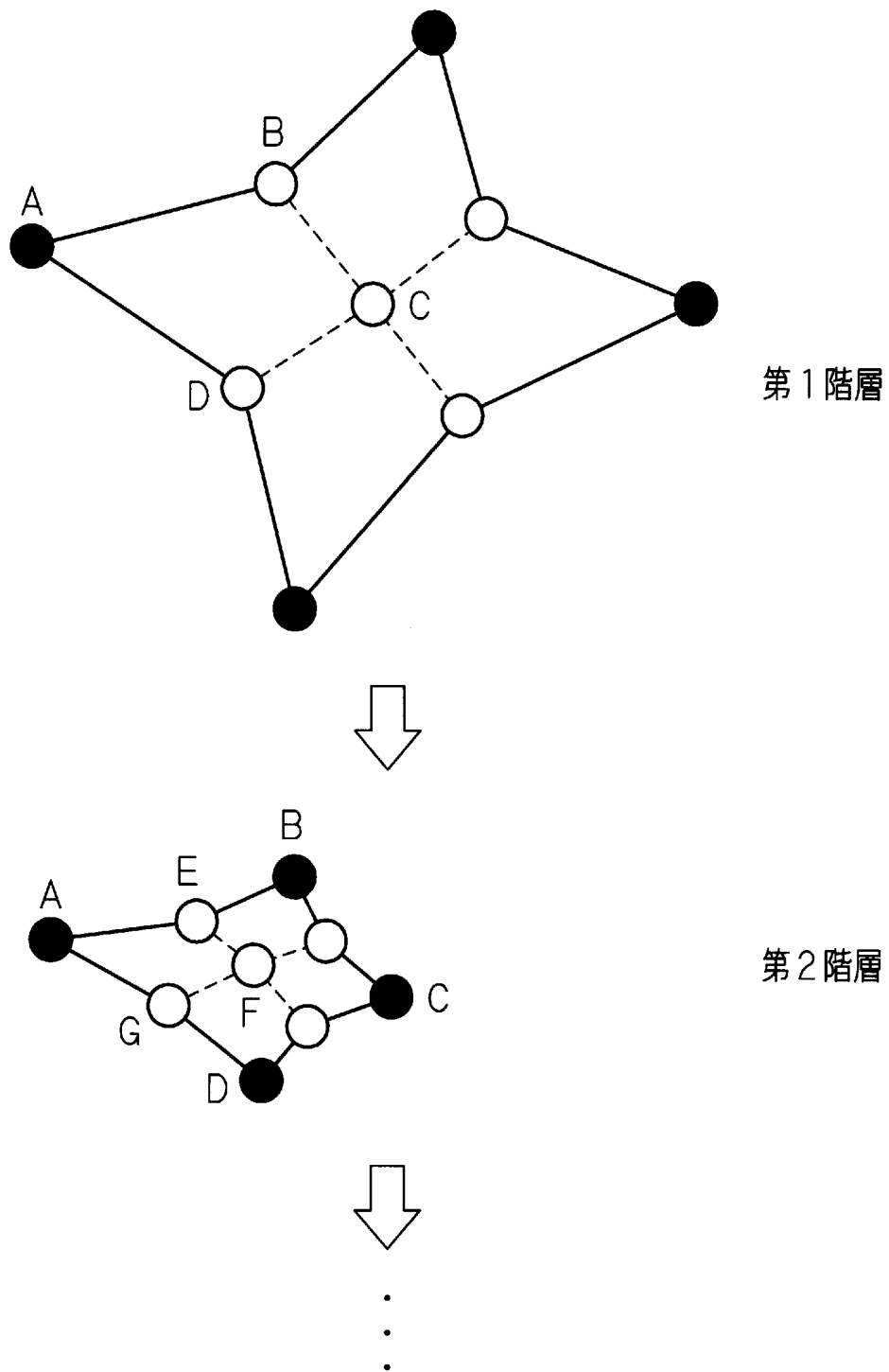
[図1]



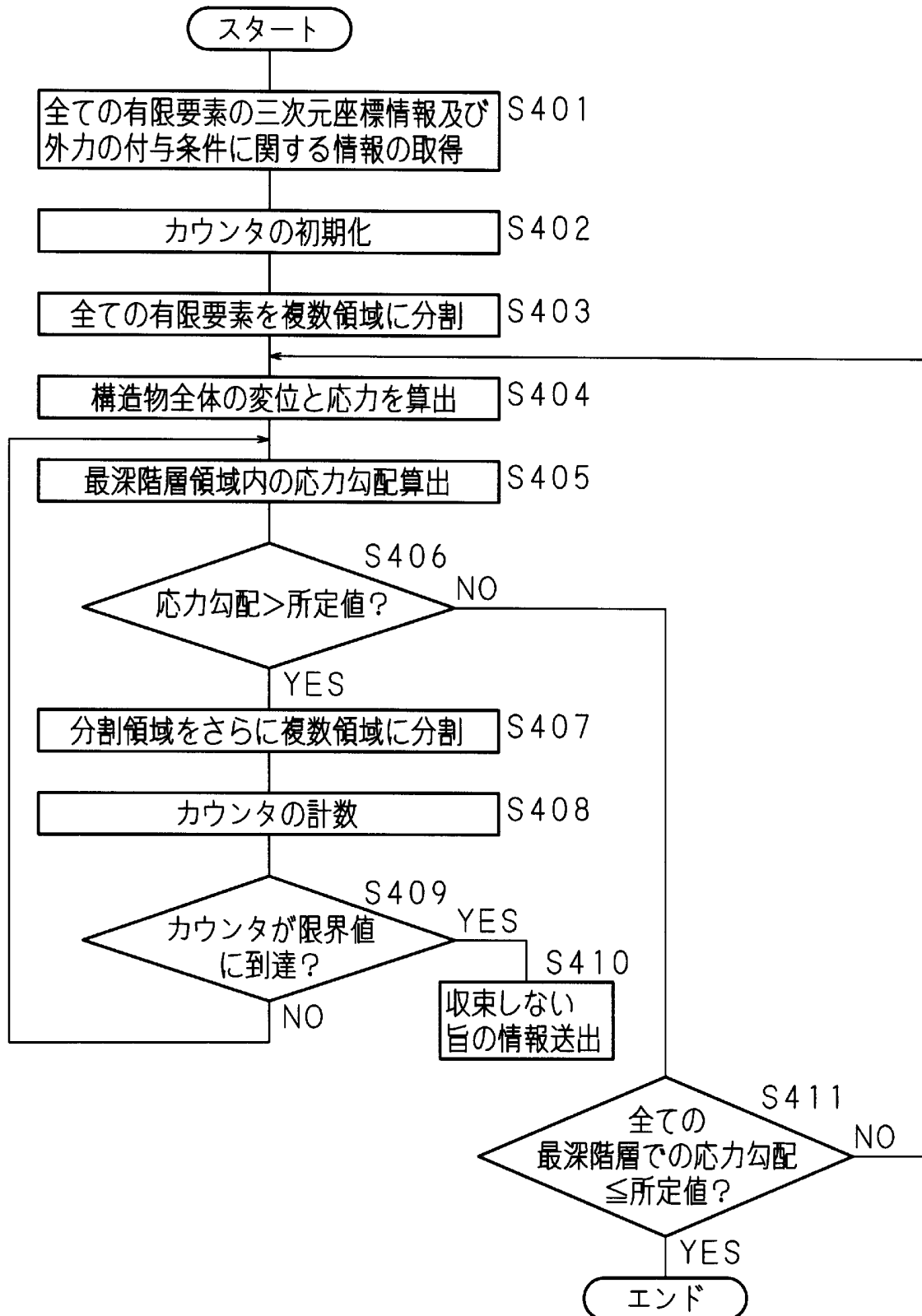
[図2]



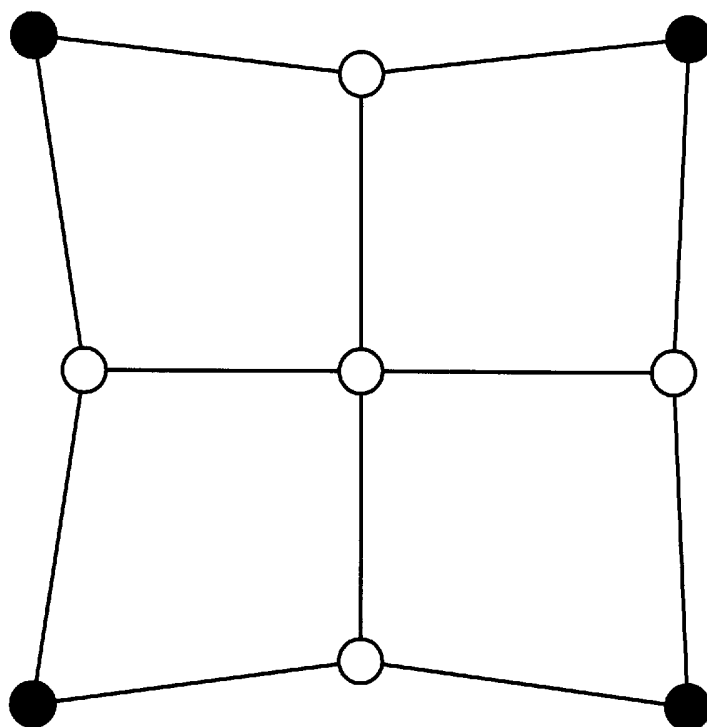
[図3]



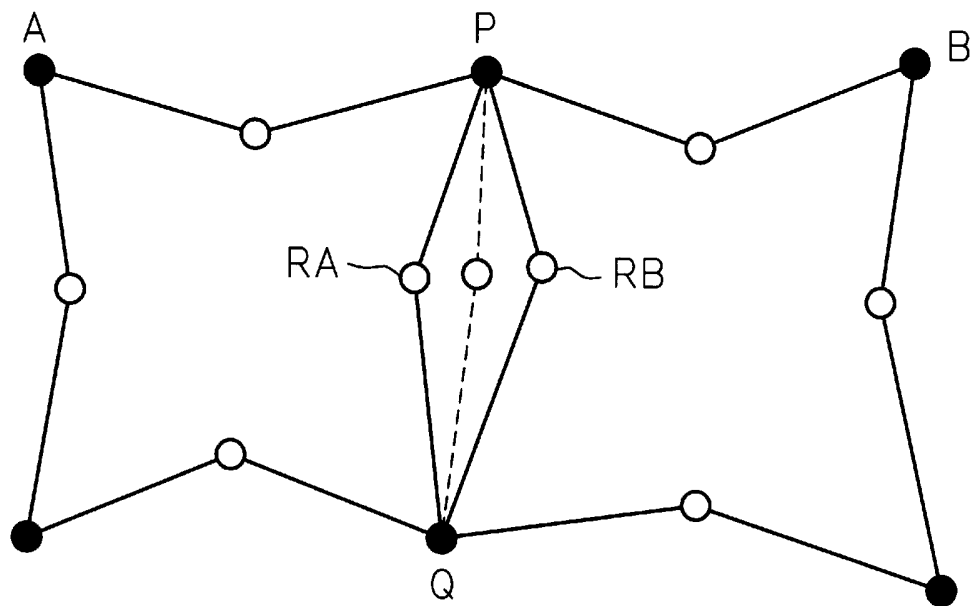
[図4]



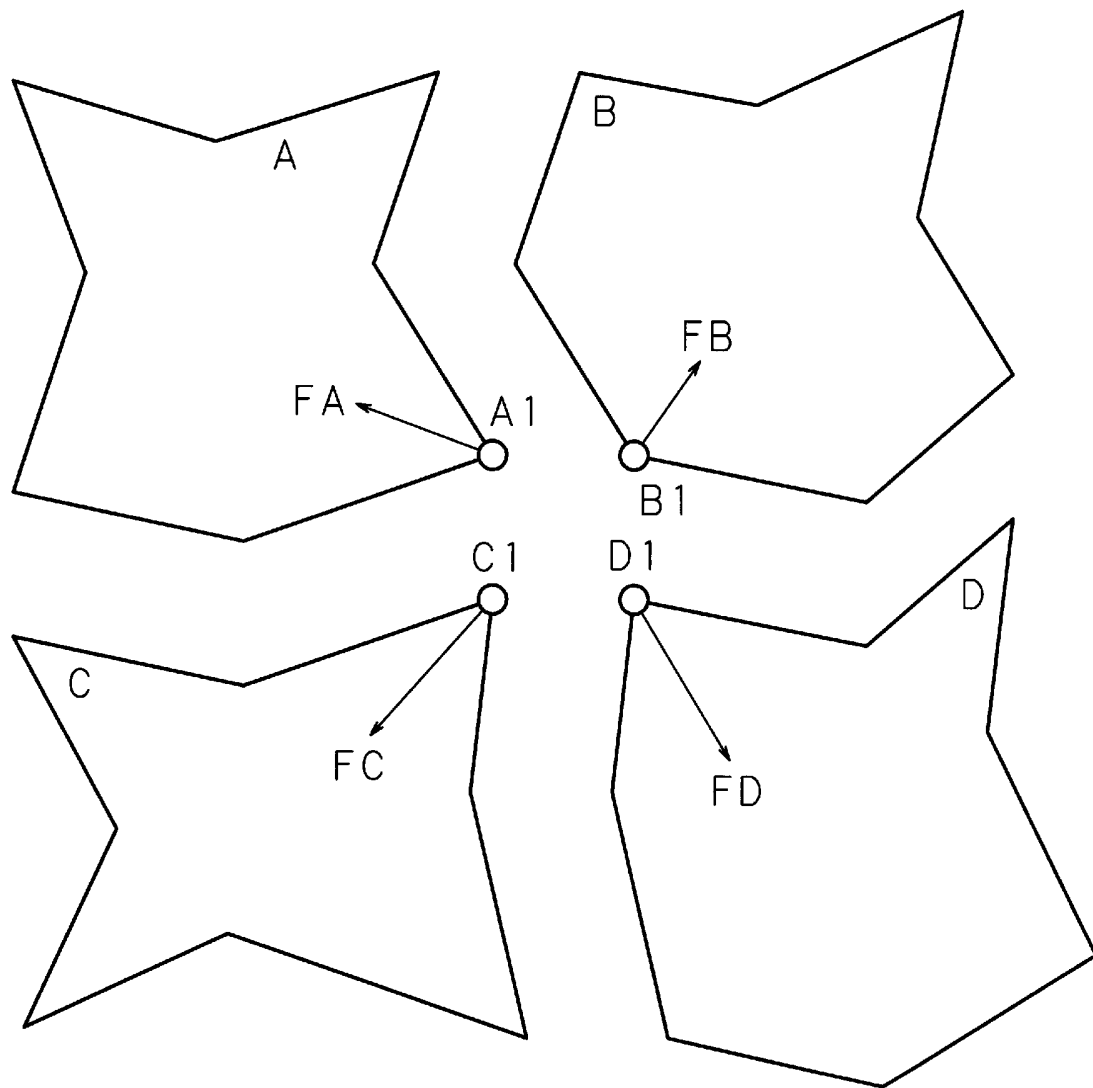
[図5]



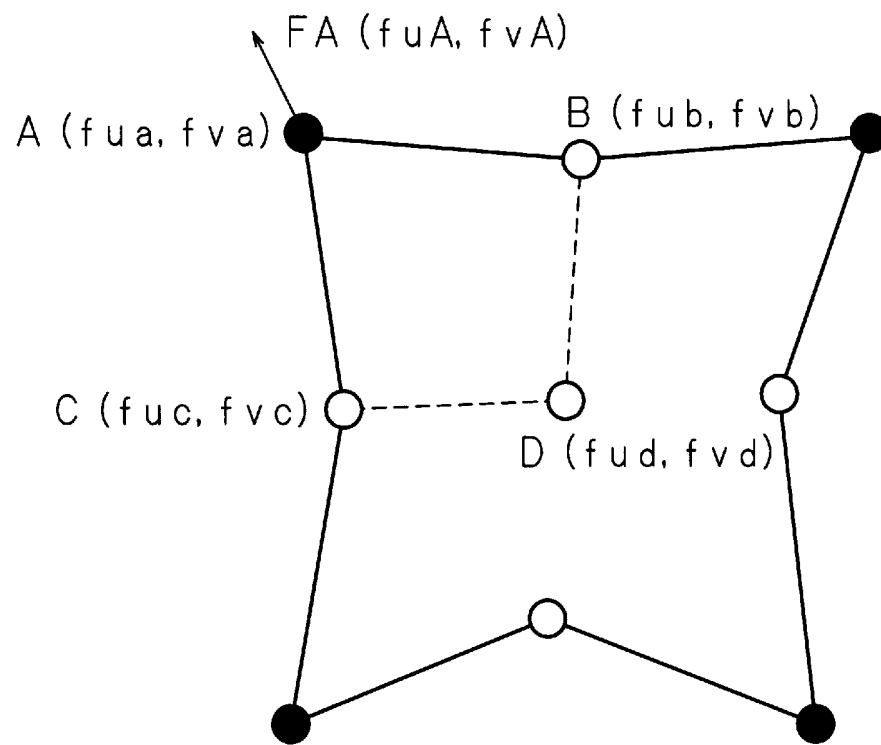
[図6]



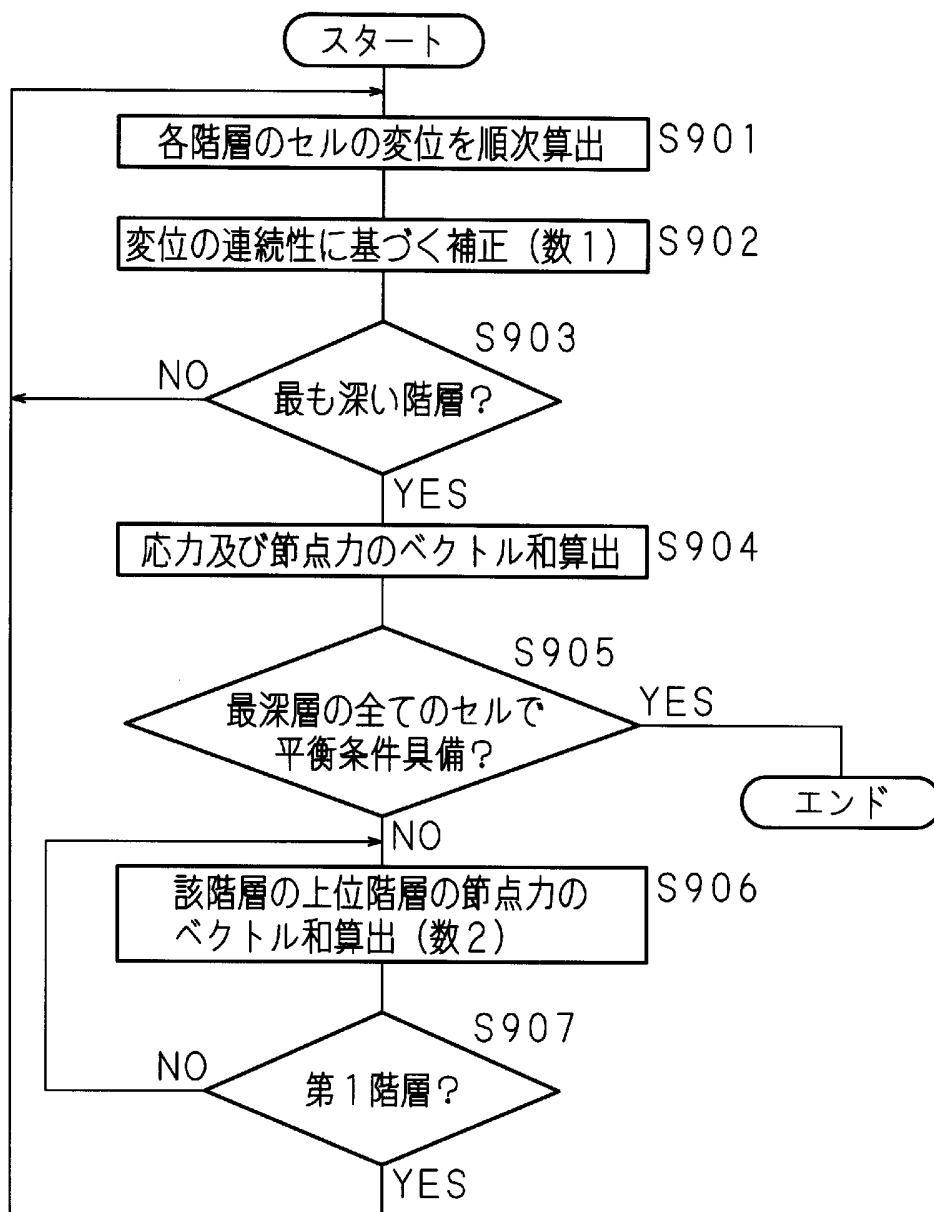
[図7]



[図8]



[図9]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2005/016447

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F17/50 (2006.01)

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F17/50 (2006.01)

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2005
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2005	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2005

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JSTPlus FILE (JOIS)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 3-63880 A (Hitachi, Ltd.), 19 March, 1991 (19.03.91), Full text; Figs. 1 to 53 (Family: none)	1-9
A	JP 2000-182081 A (Suzuki Motor Corp.), 30 June, 2000 (30.06.00), Full text; Figs. 1 to 24 & US 6407738 B1	1-9
A	JP 2004-13442 A (Toyota Motor Corp.), 15 January, 2004 (15.01.04), Full text; Figs. 1 to 9 (Family: none)	1-9

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
 "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
 "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
 "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
 "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
 "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
 "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
 "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
22 November, 2005 (22.11.05)

Date of mailing of the international search report
13 December, 2005 (13.12.05)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G06F 17/50 (2006.01)			
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G06F 17/50 (2006.01)			
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2005年 日本国実用新案登録公報 1996-2005年 日本国登録実用新案公報 1994-2005年			
国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語) JSTPlus ファイル(JOIS)			
C. 関連すると認められる文献			
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号	
A	J P 3-63880 A (株式会社日立製作所) 1991. 3. 19, 全文, 第1-53図 (ファミリーなし)	1-9	
A	J P 2000-182081 A (スズキ株式会社) 2000. 6. 30, 全文, 【図1】 - 【図24】 & US 6407738 B1	1-9	
A	J P 2004-13442 A (トヨタ自動車株式会社) 2004. 1. 15, 全文, 【図1】 - 【図9】 (ファミリーなし)	1-9	
☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。 ☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。			
* 引用文献のカテゴリー 「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す) 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願日の後に公表された文献 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」 同一パテントファミリー文献			
国際調査を完了した日 22. 11. 2005		国際調査報告の発送日 13. 12. 2005	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		特許庁審査官 (権限のある職員) 木方 庸輔 電話番号 03-3581-1101 内線 3531	5H 9649