

(19) 日本国特許庁(JP)

再公表特許(A1)

(11) 国際公開番号

W02018/123559

発行日 令和1年11月7日(2019.11.7)

(43) 国際公開日 平成30年7月5日(2018.7.5)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード(参考)
G06T 7/00 (2017.01)	G06T 7/00 612	4C096
A61B 5/055 (2006.01)	A61B 5/055 380	5L096

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 26 頁)

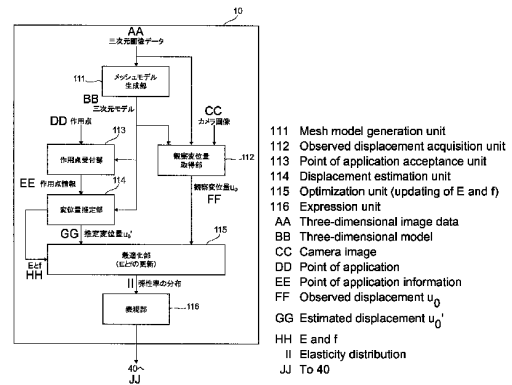
出願番号 特願2018-559002 (P2018-559002)	(71) 出願人 504132272 国立大学法人京都大学 京都府京都市左京区吉田本町36番地1
(21) 国際出願番号 PCT/JP2017/044527	
(22) 国際出願日 平成29年12月12日(2017.12.12)	
(31) 優先権主張番号 特願2016-254752 (P2016-254752)	(74) 代理人 100104880 弁理士 古部 次郎
(32) 優先日 平成28年12月28日(2016.12.28)	(74) 代理人 100114546 弁理士 頭師 教文
(33) 優先権主張国・地域又は機関 日本国(JP)	(72) 発明者 中尾 恵 京都府京都市左京区吉田本町36番地1 国立大学法人京都大学内
	(72) 発明者 松田 哲也 京都府京都市左京区吉田本町36番地1 国立大学法人京都大学内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 情報処理装置、情報処理方法及びプログラム

(57) 【要約】

情報処理装置は、弾性体の一部分を撮像した画像から取得した観察変位量と弾性体の三次元モデルについて算出される推定変位量のうち観察領域に対応する領域部分の推定変位量との差分を最小化する最適解として、既知の作用点に作用する外力の大きさと当該三次元モデルにおける弾性率の分布とを求める演算部を有する。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

弾性体の一部分を撮像した画像から取得した観察変位量と当該弾性体の三次元モデルについて算出される推定変位量のうち観察領域に対応する領域部分の推定変位量との差分を最小化する最適解として、既知の作用点に作用する外力の大きさと当該三次元モデルにおける弾性率の分布とを求める演算部

を有する情報処理装置。

【請求項 2】

前記演算部は、次式に基づいて、前記外力の大きさと、前記弾性率の分布を求めることを特徴とする請求項 1 に記載の情報処理装置。

$$E^* = \operatorname{argmin}_{E,f} J(E, f) = \operatorname{argmin}_{E,f} \{ \|u_o - L_o(E)f\|_2 + \lambda \|E - E_0\|_1 \}$$

ここで、

E^* は、評価関数 $J(E, f)$ を最小にする E と f の集合であり、

E は、弾性率であり、

E_0 は、弾性率の基準値であり、

f は、外力の大きさであり、

u_o は、観察変位量であり、

$L_o(E)$ は、弾性率 E で表現される全体剛性マトリクス K の逆行列成分のうち観察できる部分であり、

$L_o(E)f$ は、推定変位量であり、

λ は、係数であり、

$\| \cdot \|_1$ は、1次元のノルムであり、

$\| \cdot \|_2$ は、2次元のノルムである。

【請求項 3】

弾性体の一部分を撮像した画像から観測変位量を取得する取得部と、

前記弾性体に作用する外力の作用点を受け付ける受付部と、

前記弾性体の三次元モデルにおける弾性率の分布と、前記外力の大きさとを変数として、当該三次元モデルの推定変位量を推定する推定部と、

前記観測変位量と当該観測変位量に対応する前記推定変位量との差分を最小化する最適解として、前記外力の大きさと前記三次元モデルにおける前記弾性率の分布を求める最適化部と

を有する情報処理装置。

【請求項 4】

前記最適化部は、次式に基づいて、前記外力の大きさと、前記弾性率の分布を求めることを特徴とする請求項 3 に記載の情報処理装置。

$$E^* = \operatorname{argmin}_{E,f} J(E, f) = \operatorname{argmin}_{E,f} \{ \|u_o - L_o(E)f\|_2 + \lambda \|E - E_0\|_1 \}$$

ここで、

E^* は、評価関数 $J(E, f)$ を最小にする E と f の集合であり、

E は、弾性率であり、

E_0 は、弾性率の基準値であり、

f は、外力の大きさであり、

u_o は、観察変位量であり、

$L_o(E)$ は、弾性率 E で表現される全体剛性マトリクス K の逆行列成分のうち観察できる部分であり、

$L_o(E)f$ は、推定変位量であり、

λ は、係数であり、

10

20

30

40

50

$\| \cdot \|_1$ は、1次元のノルムであり、
 $\| \cdot \|_2$ は、2次元のノルムである。

【請求項5】

最適解として求められた前記弾性率の分布に基づいて前記三次元モデルを表現する表現部を更に有すること

を特徴とする請求項1又は3に記載の情報処理装置。

【請求項6】

前記画像は、単一の撮像カメラによって撮像された静止画像であること

を特徴とする請求項1又は3に記載の情報処理装置。

【請求項7】

前記最適解は、前記弾性率の分布の初期値に対する変化量の絶対値和と前記差分との総和を最小化する値として求められること

を特徴とする請求項1又は3に記載の情報処理装置。

【請求項8】

前記作用点の情報が複数与えられる場合、前記最適解は、個々の当該作用点について計算される前記差分の総和を最小化する値として求めること

を特徴とする請求項1又は3に記載の情報処理装置。

【請求項9】

前記作用点に対して複数の前記外力が与えられる場合、前記最適解は、個々の当該外力について計算される前記差分の総和を最小化する値として求めること

を特徴とする請求項1又は3に記載の情報処理装置。

【請求項10】

前記作用点は複数であり、当該作用点にはそれぞれ異なる前記外力が作用されること

を特徴とする請求項1又は3に記載の情報処理装置。

【請求項11】

前記最適解を求める空間分解能を低い状態から徐々に高めること

を特徴とする請求項1又は3に記載の情報処理装置。

【請求項12】

前記作用点に作用する前記外力の大きさが与えられる場合、前記最適解は、前記差分を最小化する前記弾性率の分布として求められること

を特徴とする請求項1又は3に記載の情報処理装置。

【請求項13】

弾性体の一部分を撮像した画像から観察変位量を取得する処理と、

前記弾性体に作用する外力の作用点を受け付ける処理と、

前記弾性体の三次元モデルにおける弾性率の分布と、前記外力の大きさとを変数として、当該三次元モデルの推定変位量を推定する処理と、

前記観測変位量と当該観測変位量に対応する前記推定変位量との差分を最小化する最適解として、前記外力の大きさと前記三次元モデルにおける前記弾性率の分布を求める処理と

を有する情報処理方法。

【請求項14】

コンピュータに、

弾性体の一部分を撮像した画像から観察変位量を取得する処理と、

前記弾性体に作用する外力の作用点を受け付ける処理と、

前記弾性体の三次元モデルにおける弾性率の分布と、前記外力の大きさとを変数として、当該三次元モデルの推定変位量を推定する処理と、

前記観測変位量と当該観測変位量に対応する前記推定変位量との差分を最小化する最適解として、前記外力の大きさと前記三次元モデルにおける前記弾性率の分布を求める処理と

を実行させるプログラム。

10

20

30

40

50

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、情報処理装置、情報処理方法及びプログラムに関する。

【背景技術】

【0002】

癌病変に対する触診にみられるように、生体組織の硬さに関する情報は、医師が診断を下す上で有用である。近年では、臓器などの生体組織の弾性情報を定量的かつ客観的に評価し、その分布を画像表示するエラストグラフィ技術が実用化されている。エラストグラフィ技術には、例えば核磁気共鳴弾性計測法（Magnetic Resonance Elastography: MRE）や超音波エラストグラフィがある。

10

【0003】

MREは、磁気共鳴画像（Magnetic Resonance Imaging: MRI）を用いる弾性率測定法であり、計測対象を外部から振動させた状態で撮影し、対象物体内を伝播する振動波を画像化する手法である。超音波エラストグラフィは、計測対象に外圧を加えたときに生じる組織のひずみ分布を利用する方法や対象組織内にせん断波を生じさせ、その伝播速度を利用する方法に代表される手法である。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0004】

【非特許文献1】O. Goksel, H. Eskandari, and S. E. Salcudean, "Mesh adaptation for improving elasticity reconstruction using the FEM inverse problem," IEEE Trans. Med. Imaging, vol. 32, no. 2, pp. 408-418, 2013.p21-23

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

ところで、エラストグラフィ技術により弾性情報を取得できる領域範囲は、波が伝播する局所領域（対象組織の表面部分）や圧力を加えた領域の近傍範囲に限られる。

【0006】

そこで、本発明は、局所的な変位情報から弾性体全体における弾性率の分布を推測する手法の提供を目的とする。

30

【課題を解決するための手段】

【0007】

請求項1に記載の発明は、弾性体の一部分を撮像した画像から取得した観察変位量と当該弾性体の三次元モデルについて算出される推定変位量のうち観察領域に対応する領域部分の推定変位量との差分を最小化する最適解として、既知の作用点に作用する外力の大きさと当該三次元モデルにおける弾性率の分布とを求める演算部を有する情報処理装置である。

請求項2に記載の発明は、前記演算部は、次式に基づいて、前記外力の大きさと、前記弾性率の分布を求めることを特徴とする請求項1に記載の情報処理装置である。

40

$$E^* = \underset{E, f}{\operatorname{argmin}} J(E, f) = \underset{E, f}{\operatorname{argmin}} \{ \| \mathbf{u}_0 - L_0(E) \mathbf{f} \|_2 + \lambda \| E - E_0 \|_1 \}$$

ここで、 E^* は、評価関数 $J(E, f)$ を最小にする E と f の集合であり、 E は、弾性率であり、 E_0 は、弾性率の基準値であり、 f は、外力の大きさであり、 \mathbf{u}_0 は、観察変位量であり、 $L_0(E)$ は、弾性率 E で表現される全体剛性マトリクス K の逆行列成分のうち観察できる部分であり、 $L_0(E) \mathbf{f}$ は、推定変位量であり、 λ は、係数であり、 $\| \cdot \|_1$ は、1次元のノルムであり、 $\| \cdot \|_2$ は、2次元のノルムである。

請求項3に記載の発明は、弾性体の一部分を撮像した画像から観測変位量を取得する取得部と、前記弾性体に作用する外力の作用点を受け付ける受付部と、前記弾性体の三次元

50

モデルにおける弾性率の分布と、前記外力の大きさとを変数として、当該三次元モデルの推定変位量を推定する推定部と、前記観測変位量と当該観測変位量に対応する前記推定変位量との差分を最小化する最適解として、前記外力の大きさと前記三次元モデルにおける前記弾性率の分布を求める最適化部とを有する情報処理装置である。

請求項 4 に記載の発明は、前記最適化部は、次式に基づいて、前記外力の大きさと、前記弾性率の分布を求めることを特徴とする請求項 3 に記載の情報処理装置である。

$$E^* = \operatorname{argmin}_{E, f} J(E, f) = \operatorname{argmin}_{E, f} \{ \|u_o - L_o(E)f\|_2 + \lambda \|E - E_0\|_1 \}$$

ここで、 E^* は、評価関数 $J(E, f)$ を最小にする E と f の集合であり、 E は、弾性率であり、 E_0 は、弾性率の基準値であり、 f は、外力の大きさであり、 u_o は、観察変位量であり、 $L_o(E)$ は、弾性率 E で表現される全体剛性マトリクス K の逆行列成分のうち観察できる部分であり、 $L_o(E)f$ は、推定変位量であり、 λ は、係数であり、 $\|\cdot\|_1$ は、1次元のノルムであり、 $\|\cdot\|_2$ は、2次元のノルムである。

請求項 5 に記載の発明は、最適解として求められた前記弾性率の分布に基づいて前記三次元モデルを表現する表現部を更に有することを特徴とする請求項 1 又は 3 に記載の情報処理装置である。

請求項 6 に記載の発明は、前記画像は、単一の撮像カメラによって撮像された静止画像であることを特徴とする請求項 1 又は 3 に記載の情報処理装置である。

請求項 7 に記載の発明は、前記最適解は、前記弾性率の分布の初期値に対する変化量の絶対値和と前記差分との総和を最小化する値として求められることを特徴とする請求項 1 又は 3 に記載の情報処理装置である。

請求項 8 に記載の発明は、前記作用点の情報が複数与えられる場合、前記最適解は、個々の当該作用点について計算される前記差分の総和を最小化する値として求めることを特徴とする請求項 1 又は 3 に記載の情報処理装置である。

請求項 9 に記載の発明は、前記作用点に対して複数の前記外力が与えられる場合、前記最適解は、個々の当該外力について計算される前記差分の総和を最小化する値として求めることを特徴とする請求項 1 又は 3 に記載の情報処理装置である。

請求項 10 に記載の発明は、前記作用点は複数であり、当該作用点にはそれぞれ異なる前記外力が作用されることを特徴とする請求項 1 又は 3 に記載の情報処理装置である。

請求項 11 に記載の発明は、前記最適解を求める空間分解能を低い状態から徐々に高めることを特徴とする請求項 1 又は 3 に記載の情報処理装置である。

請求項 12 に記載の発明は、前記作用点に作用する前記外力の大きさが与えられる場合、前記最適解は、前記差分を最小化する前記弾性率の分布として求められることを特徴とする請求項 1 又は 3 に記載の情報処理装置である。

請求項 13 に記載の発明は、弾性体の一部分を撮像した画像から観察変位量を取得する処理と、前記弾性体に作用する外力の作用点を受け付ける処理と、前記弾性体の三次元モデルにおける弾性率の分布と、前記外力の大きさとを変数として、当該三次元モデルの推定変位量を推定する処理と、前記観測変位量と当該観測変位量に対応する前記推定変位量との差分を最小化する最適解として、前記外力の大きさと前記三次元モデルにおける前記弾性率の分布を求める処理とを有する情報処理方法である。

請求項 14 に記載の発明は、コンピュータに、弾性体の一部分を撮像した画像から観察変位量を取得する処理と、前記弾性体に作用する外力の作用点を受け付ける処理と、前記弾性体の三次元モデルにおける弾性率の分布と、前記外力の大きさとを変数として、当該三次元モデルの推定変位量を推定する処理と、前記観測変位量と当該観測変位量に対応する前記推定変位量との差分を最小化する最適解として、前記外力の大きさと前記三次元モデルにおける前記弾性率の分布を求める処理とを実行させるプログラムである。

【発明の効果】

【0008】

請求項 1 記載の発明によれば、変位量を取得できる領域が弾性体の一部分に限られる場

10

20

30

40

50

合でも弾性体全域における弾性率の分布を求めることができる。

請求項 2 記載の発明によれば、変位量を取得できる領域が弾性体の一部分に限られる場合でも弾性体全域における弾性率の分布を求めることができる。

請求項 3 記載の発明によれば、変位量を取得できる領域が弾性体の一部分に限られる場合でも弾性体全域における弾性率の分布を求めることができる。

請求項 4 記載の発明によれば、変位量を取得できる領域が弾性体の一部分に限られる場合でも弾性体全域における弾性率の分布を求めることができる。

請求項 5 記載の発明によれば、弾性率の分布を三次元モデル上で視覚的に確認できる。

請求項 6 記載の発明によれば、弾性体の観察に使用する装置構成を簡素化できる。

請求項 7 記載の発明によれば、局在性が高い弾性率の分布を求めることができる。

請求項 8 記載の発明によれば、変位量の取得に用いた外力の作用点が 1 つだけの場合に比して推定精度を高めることができる。

請求項 9 記載の発明によれば、変位量の取得に用いた外力が 1 つだけの場合に比して推定精度を高めることができる。

請求項 10 記載の発明によれば、変位量の取得に用いた作用点と外力がそれぞれ 1 つだけの場合に比して推定精度を高めることができる。

請求項 11 記載の発明によれば、時間の経過とともに精度の高い推定結果を得ることができる。

請求項 12 記載の発明によれば、外力の大きさが与えられない場合と比して推定精度を高めることができる。

請求項 13 記載の発明によれば、変位量を取得できる領域が弾性体の一部分に限られる場合でも弾性体全域における弾性率の分布を求めることができる。

請求項 14 記載の発明によれば、変位量を取得できる領域が弾性体の一部分に限られる場合でも弾性体全域における弾性率の分布を求めることができる。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図 1】実施の形態で説明する発明の概念イメージを説明する図である。

【図 2】情報処理システムのハードウェア構成例を示す図である。

【図 3】コンピュータプログラムの実行を通じて実現される機能構成例を説明する図である。

【図 4】弾性体のメッシュモデル例を示す図である。

【図 5】弾性体のメッシュモデルの変形例を説明する図である。

【図 6】二次元のメッシュモデルを示す図である。

【図 7】要素剛性マトリクス K_e の重ね合わせ処理の概念を説明する図である。

【図 8】シミュレーション実験の真値を与える弾性率 E の分布例を示す図である。

【図 9】観察できる部分の割合を説明する図である。

【図 10】推定ブロック数と弾性率 E が推定される単位区画（ブロック）の大きさとの関係を説明する図である。

【図 11】推定ブロック数 N が 10 個の場合、20 個の場合、40 個の場合の実験結果を示す図である。

【図 12】実施の形態 2 で使用する観察条件を説明する図である。

【図 13】弾性率 E の分布の推定に用いたパターンが 1 組（実施の形態 1）の場合と、パターンが 2 組（実施の形態 2）の場合の実験結果を示す図である。

【図 14】弾性率 E の分布の推定に用いたパターンが 1 組（実施の形態 1）の場合と、パターンが 2 組（実施の形態 2）の場合と、パターンが 2 組（実施の形態 2）の場合に更に弾性率 E の変化のスパーシティを加えた場合（実施の形態 3）の実験結果を示す図である。

【図 15】実施の形態 3 の場合における観測頂点数の割合と観測精度の関係を説明する図である。

【発明を実施するための形態】

【0010】

以下、添付図面を参照して、本発明の実施の形態について詳細に説明する。

【0011】

<概念イメージ>

図1は、後述する実施の形態で採用する推定手法の概念イメージを説明する図である。図1に示すように、各実施の形態は、弾性体1の全体を観察できない場合（すなわち、観察できる部分と観察できない部分がある場合）を前提条件とし、各実施の形態では、観察できる部分における局所的な変位情報を用いて弾性体全体における弾性率の分布を推定する手法について記述する。

【0012】

各実施の形態では、弾性体1を変形させる外力Fの作用点Paの位置情報が既知であることを利用して推定処理を実行する。

作用点Paの位置情報は、推定処理が始まる前に処理システムに与えられればよく、作用点Paの位置は任意である。従って、図1に示すように、作用点Paの位置が観察できる部分に存在する必要はない。

作用点Paの個数についての制限もなく、必ずしも1つである必要はない。従って、作用点Paの個数は、1個でも、複数個でも、弾性体1の表面全体でも良い。

【0013】

一方で、作用点Paに作用する外力Fの大きさfを与える情報や弾性体1が周囲に固定されている部位（固定点）Pfの位置情報は、既知であっても未知であっても良い。一般には、既知である情報が増えるほど、推定精度が高くなり、推定に要する計算時間も少なくて済む。

【0014】

図1では、観察できる部分と観察できない部分の説明のため、弾性体1の一部が遮蔽物2によって覆われている様子を表しているが、弾性体1の一部が遮蔽物2で覆われていることを必須とするものではない。例えば弾性体1を一方向のみから観察する場合、観察視野に含まれる部分が観察できる部分であり、観察視野に含まれない部分が観察できない部分となる。従って、観察方向から見て弾性体1の陰になる部分（例えば裏側や背面側）は、観察できない部分の一例である。

【0015】

また、後述する実施の形態では、弾性体1のうち観察できる部分の変位量は、部位毎に特定できるものとする。すなわち、外力Fの作用による弾性体1の変位量は既知の情報として処理システムに与えられるものとする。

変位量は、観察手段の違いにより、弾性体1の表面領域についてのみ与えられる場合と弾性体1の内部領域も含めて与えられる場合がある。一般には、変位量が特定された領域が多いほど（観察できる部分の割合が増えるほど）、弾性率の推定精度が高くなる。

【0016】

<用語>

各実施の形態における弾性率には、押込・引張方向についての硬さを表すヤング率E、せん断方向についての硬さを表す剛性率G、ポアソン比、体積弾性率Kなどが含まれ、後述する実施の形態では、弾性率がヤング率であるものとして使用する。

各実施の形態において、弾性体1とは、外力Fの作用により歪が生じる（変形する）一方、外力Fの作用が停止されると元の寸法に戻る性質を有する物質をいうものとする。本実施の形態では、例えば生体組織における各種の臓器などの近似的にフックの法則を用いて表現される弾性体を想定する。

もっとも、各実施の形態では、弾性体1における弾性率の分布が一様でない場合を想定する。ここで、弾性率の分布が一様でない場合とは、例えば弾性体1の少なくとも一部の弾性率が周囲の弾性率と異なることをいう。

【0017】

<実施の形態1>

<システム構成>

10

20

30

40

50

図2は、情報処理システム100のハードウェア構成例を示す図である。

情報処理システム100は、弾性体1(図1参照)の弾性率の分布を推定する演算処理を実行する情報処理装置10と、弾性体1の撮像に用いる少なくとも1つの撮像カメラ20と、弾性体1のメッシュモデルの作成に使用する三次元画像データ(ポリウムデータ)を記憶する三次元画像データ記憶装置30と、推定された弾性率の分布の表示等に用いる表示装置40と、ユーザが操作するマウスやポインティングデバイス等で構成される入力装置50とを有している。

【0018】

情報処理装置10は、いわゆるコンピュータであり、プログラムを実行するCPU(Central Processing Unit)11と、BIOS(Basic Input / Output System)やファームウェアなどのプログラムやデータを記憶するROM(Read Only Memory)12と、プログラムに作業エリアを与えるRAM(Random Access Memory)13と、処理対象とする画像データを記憶する記憶部14とにより構成される。記憶部14は、ハードディスク装置や半導体メモリなどの記憶装置である。CPU11によるプログラムの実行を通じて実現される機能については後述する。

10

【0019】

撮像カメラ20は、弾性体1の観察に使用される撮像装置である。撮像カメラ20は、弾性体1の観察に適した撮像装置であればよい。例えば撮像カメラ20には、赤外線カメラ、内視鏡カメラ、超音波イメージング装置、光超音波イメージング装置などを使用する。

20

赤外線カメラや内視鏡カメラを用いる場合、情報処理装置10は、弾性体1の表面に存在する特徴点や赤外線マーカの移動を通じて各部位の変位量を特定することができる。超音波イメージング装置を用いる場合、情報処理装置10は、弾性体1の内部も含めて各部位の変位量を特定することができる。なお、内視鏡カメラの撮像素子は、CCD(Charge Coupled Device)でもCMOS(Complementary MOS)でもよい。

本実施の形態では、単一の撮像カメラ20を使用し、弾性体1を一方向から撮影した静止画像を出力する。

【0020】

三次元画像データ記憶装置30は、弾性体1を断層撮影することにより取得した断層画像データを積み重ねるように再構成した画像(再構成画像)を三次元画像データとして記憶する大容量のハードディスク装置等で構成される。

30

三次元画像データ記憶装置30は、情報処理装置10に対して直接接続される場合だけでなく、ネットワーク上にサーバやネットワークストレージとして存在してもよい。ここで、断層画像データの取得には、例えばCT(Computed Tomography)、PET(Positron Emission Tomography)、MRI等を使用する。

【0021】

表示装置40は、例えば液晶ディスプレイで構成される。液晶ディスプレイは、液晶パネル、バックライトなどで構成される。なお、表示装置40は、有機EL(ElectroLuminescence)ディスプレイ等でもよい。

【0022】

図3は、CPU11によるコンピュータプログラムの実行を通じて実現される機能構成例を説明する図である。

40

処理機能の観点から見た情報処理装置10は、三次元のメッシュモデルを生成するメッシュモデル生成部111と、撮像カメラ20から出力されるカメラ画像から観察部位についての変位量(観察変位量 u_o)を取得する観察変位量取得部112と、作用点Paの位置情報を受け付ける作用点受付部113と、作用点情報をメッシュモデルに適用してメッシュモデルの各部位における変位量(推定変位量 u_o')を計算する変位量推定部114と、推定変位量 u_o' と観察変位量 u_o との差分を最小化する弾性率E(結果として弾性率Eの関数である要素剛性マトリクスK)と外力Fの大きさfを最適解として求める最適化部115と、最適解とする要素剛性マトリクスKから特定される弾性率の分布をメッシ

50

ュモデルに重ねて表現した画像を生成して表示装置 40 に出力する表現部 116 とを有している。これらの機能部は、請求の範囲における「演算部」の一例である。

【0023】

メッシュモデル生成部 111 は、三次元画像データ記憶装置 30 から観察対象とする弾性体 1 の三次元画像データを取り込むと、連続体として与えられた三次元画像データから単純な形状要素の集合体であるメッシュモデルを生成する機能部である。ここでのメッシュモデルは三次元モデルの一例であり、最小要素は立方体や四面体（三角錐）で表現される。

【0024】

図 4 は、弾性体 1 をメッシュ構造で表現したメッシュモデル 200 の例を示す図である。図 4 は、外力 F（図 5 参照）が作用点 P a（図 5 参照）に加えられた前のメッシュモデル 200 を表している。図中の丸印は最小要素のノードを示す。なお、図 5 は、メッシュモデル 200 の右端下部を作用点 P a として外力 F を加えて弾性変形させた後のメッシュモデル 200 を表している。

10

【0025】

観察変位量取得部 112 は、外力 F が作用点 P a に加えられる前のカメラ画像と外力 F が作用点 P a に加えられた後のカメラ画像とを比較して画像内に現れる各部位の観察変位量 u_o を取得する機能部である。

なお、観察変位量取得部 112 で取得される観察変位量 u_o は、カメラ画像上で特定される各位置についての変位量であり、メッシュモデル 200 を構成するボクセルとの位置関係は不明である。

20

【0026】

そこで、観察変位量取得部 112 には、三次元画像データ又はメッシュモデル 200（図 4 参照）とカメラ画像をマッチングし、観察変位量 u_o をメッシュモデル 200 の個々の頂点に対応付ける処理機能が用意されている。ここでの対応付けの際には、三次元画像データ又はメッシュモデル 200 の寸法とカメラ画像の寸法とを揃える処理も実行される。

【0027】

一般には、三次元画像データ又はメッシュモデル 200 に含まれる画像情報が多いほどカメラ画像とのマッチング精度が高くなる。例えばメッシュモデル 200 をマッチングに使用する場合、メッシュモデル 200 の表面に三次元画像データの表面情報をレンダリングしたレンダリング画像をカメラ画像の輝度情報と比較すれば、メッシュモデル 200 の頂点に高いマッチング精度で観察変位量 u_o を対応付けることができる。

30

【0028】

作用点受付部 113 は、作用点 P a の位置情報を、入力装置 50 を通じて受け付ける機能部である。作用点受付部 113 は、例えばクリック操作が検出された際に、マウスカーソルが位置していたメッシュモデル 200 上の部位を外力 F の作用点 P a として受け付ける。

作用点受付部 113 は、受け付けた作用点 P a の位置を、メッシュモデル 200 上の頂点の識別番号で特定し、変位量推定部 114 に出力する。

40

【0029】

変位量推定部 114 は、線形有限要素法で使用する力の釣り合い式（すなわち、フックの法則を表現する式）を用いて、メッシュモデル 200 を構成する全ての頂点について推定変位量 u_o' を計算する機能部である。

具体的には、変位量推定部 114 は、メッシュモデル 200 の各頂点に加わる外力 F の大きさを f 、各頂点における推定変位量を u_o' 、全体剛性マトリクスを K とする力の釣り合い式（ $f = K \cdot u_o'$ ）を変形した式 1 に基づいて、推定変位量 u_o' を計算する。

$$u_o' = K^{-1}f = Lf \quad \dots \text{式 1}$$

なお、添え字の o は、観測できる部分に位置する頂点を意味し、 L は、全体剛性マトリク

50

ス K の逆行列 (K^{-1}) を意味する。

【 0 0 3 0 】

本実施の形態の場合、弾性体 1 の弾性率 E の分布と弾性体 1 に加わる外力 F の大きさ f (ベクトル) が最終的な推定対象となる。なお、弾性率 E は、全体剛性マトリクス K の内包パラメータであるので、全体剛性マトリクス K が特定されれば、弾性率 E も特定される。

【 0 0 3 1 】

以下では、説明を簡単にするために、全体剛性マトリクス K と弾性率 E の分布との関係を、図 6 を用いて説明する。図 6 は、二次元のメッシュモデルである。言うまでもなく、情報処理システム 100 で扱うのは、三次元のメッシュモデル 200 である。

10

【 0 0 3 2 】

図 6 に示すメッシュモデルの場合、三角形の要素 I は頂点番号 1、2 及び 3 で規定され、三角形の要素 II は頂点番号 2、3 及び 4 で規定される。このとき、頂点番号 i に作用する力 f_i ($i = 1 \sim 4$) と頂点番号 i における変位量 u_i ($i = 1 \sim 4$) は、全体剛性マトリクス K を用いた線形有限要素法での力の釣り合い式 (式 2) として与えられる。

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix} = \left[\begin{array}{c} K \end{array} \right] \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{pmatrix} \quad \dots \text{式 2}$$

20

【 0 0 3 3 】

ここで、個々の頂点番号 i ($i = 1 \sim 4$) に作用する外力 F の大きさ f_i ($i = 1 \sim 4$) とその変位量 u_i ($i = 1 \sim 4$) との関係付けに用いる要素剛性マトリクス K_e は、以下の式 3 により導出される。

$$K_e = VB^T D^T B \quad \dots \text{式 3}$$

ここで、 V は三角形の要素の体積である。

また、 B マトリクスは、要素の形状関数から求まるマトリクスであり、 D マトリクスは、弾性率 E とポアソン比 から求まるマトリクスである。

30

【 0 0 3 4 】

D マトリクスは、次式 (式 4) により表すことができる。

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

40

…式 4

式 4 から分かるように、 D マトリクスは弾性率 E の関数である。従って、要素剛性マトリクス K_e も弾性率 E の関数として表現される。

【 0 0 3 5 】

全体剛性マトリクス K は、三角形の要素 I の要素剛性マトリクス K_e と、三角形の要素

50

IIの要素剛性マトリクス K_e との和で与えられる。すなわち、全体剛性マトリクス K は、頂点番号1、2、3で構成される三角形の要素Iの要素剛性マトリクス K_e と、頂点番号2、3、4で構成される三角形の要素IIの要素剛性マトリクス K_e との和で表される。

【0036】

図6に示すように、三角形の要素Iと三角形の要素IIとは、互いに重なり合う頂点が存在する。そこで、重なり合う各頂点に対して要素剛性マトリクス K_e の重ね合わせを行う。

図7は、要素剛性マトリクス K_e の重ね合わせ処理の概念を説明する図である。図7は、全体剛性マトリクス K が、要素Iの要素剛性マトリクス K_e と要素IIの要素剛性マトリクス K_e との和で表されることを示している。前述したように、要素剛性マトリクス K_e は弾性率 E の関数であったので、その和で表される全体剛性マトリクス K も弾性率 E の関数となる。

従って、本実施の形態におけるメッシュモデル200における全体剛性マトリクス K も弾性率 E の関数となる。

【0037】

ところで、本実施の形態のカメラ画像は、前述したように、作用点 P_a は既知であるが大きさ f が未知の外力 F によって弾性変形された弾性体1の一部分を撮像した画像である。

従って、式2のうち未知のパラメータは、弾性率 E の分布（全体剛性マトリクス K ）と外力 F の大きさ f （ベクトル）となる。

【0038】

そこで、変位量推定部114では、これら未知のパラメータにそれぞれ任意の値を設定して推定変位量 u_o' を計算する。なお、推定変位量 u_o' の初回推定時には、変位量推定部114は、未知パラメータである弾性率 E の分布（全体剛性マトリクス K ）と外力 F の大きさ f のそれぞれに初期値を与えて推定変位量 u_o' を計算する。

【0039】

式2をマトリクスで表現すると、次式（式5）となる。

$$\begin{bmatrix} u_o' \\ u_i' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_o \\ L_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_o \\ f_i \end{bmatrix} \quad \dots\text{式5}$$

ここで、 u_o' は観察できる部分の推定変位量であり、 u_i' は観察できない部分の推定変位量である。また、 L_o は弾性率 E で表現される全体剛性マトリクス K の逆行列成分のうち観察できる部分であり、 L_i は弾性率 E で表現される全体剛性マトリクス K の逆行列成分のうち観察できない部分である。 f_o は観察できる部分の頂点に作用する外力 F の大きさ、 f_i は観察できない部分の頂点に作用する外力 F の大きさである。

【0040】

観察できる部分の推定変位量 u_o' に着目すると、式5は、次式（式6）として表現できる。

$$\begin{bmatrix} u_o' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_o \\ f_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \end{bmatrix} \quad \dots\text{式6}$$

10

20

30

40

50

ここで、作用点 P a が既知であるので、外力 F の大きさ f のうち作用点 P a 以外の頂点に対応する外力 F の大きさを 0 (ゼロ) で表すことができる。

変位量推定部 114 は、この式 6 を用いて弾性率 E で表される成分 L_o と外力 F の大きさ f により推定変位量 u_o' (初期値を含む) を計算する。

【0041】

最適化部 115 は、メッシュモデル 200 の全ての頂点番号 (観察できる部分だけでなく観察できない部分の頂点も含む) について推定された推定変位量 u_o' と、撮像カメラ 20 によって撮像された部分画像から特定された観察変位量 u_o との差分を最小化する全体剛性マトリクス K (すなわち弾性率 E の分布) と外力 f が得られるまで、未知パラメータの組み合わせを更新する。

10

【0042】

具体的には、最適化部 115 は、推定変位量 u_o' と観察変位量 u_o との差分を最小化する (すなわち、観察結果に最も近い変形を与える) 未知パラメータを求める最適化問題を解く処理を実行する。当該処理を式で表すと次式 (式 7) となる。

$$E^* = \operatorname{argmin}_{E, f} J(E, f) = \operatorname{argmin}_{E, f} \|u_o - u_o'\|_2$$

…式 7

$$= \operatorname{argmin}_{E, f} \|u_o - L_o(E)f\|_2$$

20

ここでの E* は、評価関数 J (E, f) を最小にする E と f の集合を意味する。

本実施の形態の場合、評価関数 J (E, f) は、推定変位量 u_o' と観察変位量 u_o の差分の L² ノルムで与えられる。

【0043】

最適化部 115 は、評価関数 J の最小値が求まるまで、未知パラメータ E と f を更新し、更新された値を変位量推定部 114 にフィードバックする。すなわち、未知パラメータ E と f の更新値を用いた変位量推定部 114 による推定変位量 u_o' の再計算と、最適化部 115 による推定変位量 u_o' の評価とが、評価関数 J の最小値が求まるまで繰り返し実行される。

【0044】

30

本実施の形態では、最適化問題を解く手法として、共分散行列適応進化戦略 (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy : CMA-ES) を使用した。もっとも、最適化問題を解く手法には既知の他の手法を用いてもよい。例えば勾配法、モンテカルロ法、焼きなまし法などを用いてもよい。

なお、図 3 では、変位量推定部 114 と最適化部 115 を別の機能部として描画しているが、一つの機能部に含めてもよい。

【0045】

表現部 116 (図 3 参照) は、最適解として特定された弾性率 E の分布と外力 F の大きさのうち弾性率 E の分布を、メッシュモデル 200 に重ねて表現した画像を表示装置 40 (図 2 参照) に表示する。弾性率 E の分布がメッシュモデル 200 と関連付けて表現されることにより、ユーザは、観察できない部分も含めた弾性体 1 の弾性率 E の分布を視覚的に理解できる。

40

なお、表現部 116 は、弾性率 E の違いを色や輝度の違いとして表現する。また、表現部 116 は、メッシュモデル 200 の各部に対応する弾性率 E の数値を表示してもよい。なお、表現部 116 は、必要に応じ、最適解として求めた外力 F の大きさ f を出力する。

【0046】

<シミュレーション実験による検証>

以下では、弾性体 1 について作成したメッシュモデル 200 (すなわち、図 4 に示すメッシュモデル) と、弾性体 1 を局所的に観察して得られる観察変位量 u_o と、弾性体 1 に

50

作用する外力 F の作用点 P_a の情報とを用いて推定した弾性率 E の分布の精度を検証した結果について説明する。

【 0 0 4 7 】

以下では、シミュレーション実験では、弾性体 1 に対応するメッシュモデル 2 0 0 が N 個の頂点を有するものとし、そのうちの M 個 ($N > M$) の頂点の観測変位量 u_0 を用いて弾性体 1 全体の弾性率 E の分布を推定する場合に、観測できる頂点の数が推定精度に与える影響について説明する。

【 0 0 4 8 】

シミュレーション実験では、Visual C/C++を用いて、実施の形態に係る手法をプログラムとして記述し、作成されたプログラムを汎用計算機 (OS : Windows 10 Pro、CPU : Intel Core i7-6700K、メモリ : 16GB) で実行した。

なお、シミュレーションは、直方体形状のメッシュモデル 2 0 0 (図 5 参照) について実行した。このメッシュモデル 2 0 0 は、全体で 9 9 個の頂点を有し、最小要素を四面体とする。

【 0 0 4 9 】

また、図 5 に示すように、メッシュモデル 2 0 0 の左端に位置する 9 個の頂点を固定端 P_f とし、それ以外の点を自由点とした。

さらに、図 5 に示すように、外力 F の作用点 P_a として、メッシュモデル 2 0 0 の右端下部に位置する 3 個の頂点を指定した。これら 3 個の頂点には、同じ大きさ f の外力 F がいずれも下向き ($-z$ 軸方向) に作用するものとした。

【 0 0 5 0 】

メッシュモデル 2 0 0 の外力 F による変形は、弾性体 1 の内部構造を与える弾性率 E の分布状態に依存する。ここでは、本実施の形態で提案する手法によって推定された弾性率 E の分布の推定精度を評価するために使用する真値としての内部構造について説明する。図 8 は、真値として使用する弾性率 E の分布をメッシュモデル 2 0 0 に重ねて表した図である。図 8 に示すメッシュモデル 2 0 0 は、一部分の弾性率 E だけが大きく (硬く)、他の部分の弾性率 E は同じ値を採る。図中、白丸のノードは観測できる部分に位置することを表し、黒丸のノードは観測できない部分に位置することを表している。

【 0 0 5 1 】

図 8 に示すメッシュモデル 2 0 0 は、4 0 個の立方体ブロックのうち右端から左方向 ($-x$ 方向) に 7 番目と 8 番目の左列に位置する 4 個の立方体ブロックの弾性率 E が 2 . 0 [MPa] と硬く、他の部分の弾性率 E が 1 . 0 [MPa] である場合を示している。

シミュレーション実験では、図 8 に示すメッシュモデル 2 0 0 に外力 F を作用させた場合に観測されたカメラ画像と作用点 P_a の位置に基づいて、メッシュモデル 2 0 0 の全ての頂点の弾性率 E の分布を推定した。

【 0 0 5 2 】

なお、図 8 に示すメッシュモデル 2 0 0 は、図 5 の説明と同じく、弾性体 1 のメッシュモデル 2 0 0 の右端下部にある 3 個の頂点に下方向 ($-z$ 軸方向) へ 1 0 N の外力 F を作用させて変形した状態を表している。勿論、情報処理装置 1 0 にとっては、外力 F の大きさ f も未知パラメータである。

【 0 0 5 3 】

前述したように、シミュレーション実験の目的は、観測できる頂点の数が弾性率 E の推定精度に与える影響を評価することである。

そこで、シミュレーション実験では、観測できる頂点の数 (観測変位量 u_0 が与えられる頂点の数) が全体の 1 0 % の場合、2 0 % の場合、... 9 0 % の場合について評価した。図 9 は、メッシュモデル 2 0 0 のうち観測できる頂点の数の割合を説明する図である。図 9 は、メッシュモデル 2 0 0 を横方向 ($x-z$ 平面) から観察した図であり、 x 軸方向について 1 0 個の小区分に分割されている。このうち 1 つの小区分を観察する場合が全体の 1 0 % を観察する場合に相当し、2 つの小区分を観察する場合が全体の 2 0 % を観察する場合に相当する。以下同様に、9 つの小区分を観察する場合が全体の 9 0 % を観察する場

10

20

30

40

50

合に相当する。

【 0 0 5 4 】

ところで、弾性率 E の推定精度は、推定空間の次元数の影響を受けると予想される。ここで、推定空間の次元数とは、弾性率 E の推定解像度で表現される。例えば推定空間の次元数が低いことは低解像度で推定することを意味し、次元数が高いことは高解像度で推定することを意味する。換言すると、推定空間の次元数は、1つのメッシュモデル 200 を何個の単位区画（ブロック）に分割するかを表している。

【 0 0 5 5 】

以下のシミュレーション実験では弾性率 E の推定解像度を表す推定ブロック数 N を 10 個とする場合、N = 20 とする場合、N = 40 とする場合について検討した。

図 10 は、推定ブロック数 N と弾性率 E が推定される単位区画（ブロック）の大きさとの関係を説明する図である。

【 0 0 5 6 】

例えば N = 10 の場合は、メッシュモデル 200（図 9 参照）を 10 個の単位区画（ブロック）で表現することを意味し、N = 20 の場合は、メッシュモデル 200 を 20 個の単位区画（ブロック）で表現することを意味し、N = 40 の場合は、メッシュモデル 200 を 40 個の単位区画（ブロック）で表現することを意味する。

つまり、N = 40 の場合の単位区画（ブロック）は、図 8 において説明した立方体ブロックと同じ形状になる。当然ながら推定ブロック数 N の値が大きいほど（推定される単位区画の大きさが小さいほど）空間分解能が高くなり、弾性率 E の分布を高精細に推定できる。

【 0 0 5 7 】

続いて、推定ブロック数 N と高い推定精度を得るために必要とされる観察点数の割合との関係を説明する。後述するように、推定ブロック数 N が大きいほど（推定される単位区画の大きさが小さいほど）、高い推定精度を得るにはより多くの割合で弾性体 1 を観察することが必要になる。

図 11 は、推定ブロック数 N が 10 個の場合、20 個の場合、40 個の場合の実験結果を示す図である。図 11 の縦軸は真の弾性率 E と推定された弾性率 E' との平均二乗誤差（Root Mean Square Error: RMSE）であり、横軸は観察できる頂点数の全体に占める割合（図 9 参照）である。

勿論、弾性率 E' の推定に際しては、前述したように、メッシュモデル 200 の全ての頂点に同じ値の弾性率 E を与えた状態で最適解を求める推定処理が開始される。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \{(E_i - E'_i)^2\}} \quad \dots \text{式 8}$$

【 0 0 5 8 】

図 11 によれば、メッシュモデル 200 を 10 個のブロックで表現する場合（低解像度で推定する場合）には、観測できる頂点数の数がメッシュモデル 200 全体の 15% 程度でも高精度で弾性率 E を推定できることが分かる。また、この場合にはブロック数が少ないので、計算コストも低く済む。

また、メッシュモデル 200 を 20 個のブロックで表現する場合（中解像度で推定する場合）には、観測できる頂点数の数がメッシュモデル 200 全体の 50% 程度になると高精度で弾性率 E を推定できることが分かる。

メッシュモデル 200 を 40 個のブロックで表現する場合（高解像度で推定する場合）には、観測できる頂点数の数がメッシュモデル 200 全体の 70% 程度にならなければ最小二乗誤差が十分に小さくならないことが分かる。なお、ここでの低解像度、中解像度、高解像度は、単に 3 つの解像度間の相対的な関係を表したものにすぎない。

【 0 0 5 9 】

< 小括 >

以上の通り、実施の形態 1 によれば、弾性体 1 の一部分（例えば全体の 50%）を撮像した画像から取得した観察変位量 u_o と弾性体 1 のメッシュモデル 200 について算出される推定変位量 u_o' のうち観察領域に対応する領域部分の推定変位量との差分（ $u_o - u_o'$ ）を最小化する最適解として、既知の作用点 P_a に作用する外力 F の大きさ f とメッシュモデル 200 全域における弾性率 E の分布とを求めることにより、観察変位量 u_o を取得できる領域が弾性体 1 の一部分に限られる場合でも弾性体 1 全域における弾性率 E の分布を求めることができる。

【0060】

また、推定精度は、推定空間の解像度と観察できる頂点の割合に依存し、もし高解像度で弾性体 1 の弾性率 E を推定したい場合には、撮像カメラ 20 によって撮像される弾性体 1 の面積を広くする必要があり、低解像で弾性体 1 の弾性率 E を推定したい場合には、撮像カメラ 20 によって撮像される弾性体 1 の面積は狭くてもよい。

【0061】

< 実施の形態 2 >

本実施の形態では、前述した実施の形態 1 に比して、弾性率 E の分布の推定精度を高めるための手法について説明する。

図 12 は、実施の形態 2 で使用する観察条件を説明する図である。本実施の形態では、外力 F と作用点 P_a の組を 2 組用意する。図 12 (A) は、外力 F_1 と作用点 P_{a1} の第 1 の組（パターン 1）を示し、図 12 (B) は、外力 F_2 と作用点 P_{a2} の第 2 の組（パターン 2）を示す。

なお、図 12 に示すメッシュモデル 200 は、図 8 の場合と同じく、周囲より硬い弾性率 E を有する立方体ブロックを網掛けで表現している。

【0062】

図 12 (A) に示す第 1 の組（パターン 1）は、メッシュモデル 200 の右端下部の 3 つの頂点を作用点 P_{a1} として、下向き（ $-z$ 軸方向）に第 1 の外力 F_1 を作用させた場合の変形を表している。図 12 (B) に示す第 2 の組（パターン 2）は、メッシュモデル 200 の右端のうち端面に向かって左辺に位置する 3 つの頂点を作用点 P_{a2} として、左向きに（ $-y$ 軸方向）に第 2 の外力 F_2 を作用させた場合の変形を表している。

【0063】

なお、図 12 においては、作用点 P_a だけでなく外力 F が作用する方向も異なる例を示しているが、作用点 P_a は 1 つで外力 F の作用方向が複数でもよいし、作用点 P_a は 2 つで外力 F の作用方向は 1 つでもよい。

この場合も、実施の形態 1 の場合と同様、情報処理装置 10 は、各パターンについての観察変位量 u_o を求め、その後、それぞれについて観察変位量 u_o と推定変位量 u_o' との差分（ $u_o - u_o'$ ）を最小化する外力 F_1 の大きさ f_1 と外力 F_2 の大きさ f_2 と、メッシュモデル 200 全域における弾性率 E の分布を最適解として求める。

【0064】

すなわち、最適化部 115 は、次式（式 9）を満たす未知パラメータを最適解として求める。

$$E^* = \operatorname{argmin}_{E, f} J(E, f)$$

$$= \operatorname{argmin}_{E, f_1, f_2} \{ \|u_{1o} - L_o(E)f_1\|_2 + \|u_{2o} - L_o(E)f_2\|_2 \} \quad \dots \text{式 9}$$

$$= \operatorname{argmin}_{E, F} \|U_o - L_o(E)F\|_2$$

ここで、 U_o は u_{1o} と u_{2o} を列方向に並べた行列であり、 F は f_1 と f_2 を列方向に並べ

10

20

30

40

50

た行列である。また、3行目の式における2次元のノルムは行列のノルムであり、例えばフロベニアスノルムなどである。

【0065】

図13は、弾性率Eの分布の推定に用いたパターンが1組（実施の形態1）の場合と、パターンが2組（実施の形態2）の場合の実験結果を示す図である。図13の縦軸は真の弾性率Eと推定された弾性率E'との平均二乗誤差（Root Mean Square Error: RMSE）であり、横軸は観察できる頂点数の割合（図9参照）である。

図13からも分かるように、弾性率Eの分布の推定に使用する作用点Paと外力Fの大きさfとで規定される組数が「2」の場合には、実施の形態1の場合（組数が「1」の場合）に比して、観察できる部分の割合が同じであっても、推定精度を高めることができる。

10

【0066】

なお、本実施の形態では作用点Paと外力Fの大きさfとで規定される組数を「2」としているが、組数は3以上でもよい。一般的に組数が増えるほど推定精度を高めることができる。例えば超音波などの振動を加えることによって評価対象物（例えば臓器）に生じるひずみ像を非侵襲的に評価するための手法の一例であるエラストグラフィ法では、評価対象物に作用させる外力Fが時間的に変化する。すなわち、エラストグラフィ法では、作用点Paと外力Fの大きさfとで規定される組数が複数である。従って、本実施の形態は、エラストグラフィ法との相性がよく、高い精度での推定が可能である。

20

【0067】

<実施の形態3>

本実施の形態でも、前述した実施の形態1に比して、弾性率Eの分布の推定精度を高めるための他の手法について説明する。

ここでは、弾性率Eの変化にスパース性を推定できる場合について説明する。スパース性があるとは、要素の大部分が0（ゼロ）を持つという性質のことである。具体的には、一部分だけが硬い又は柔らかいといった局在性があることが知られている弾性体1に適用できる手法である。例えば臓器は、健常組織の弾性率Eは均一であるのに対し、一部の腫瘍部位だけは健常組織に比して硬い（弾性率Eが高い）ことが想定される。従って、臓器の弾性率Eの分布の推定にはスパース性を利用することができる。

30

【0068】

最適化問題に弾性率Eの変化にスパース項を導入することにより、弾性率Eの推定値の変化が局所的であるという制約を与えることができ、その分、推定精度の向上が期待できる。

本実施の形態の場合は、最適化部115は、次式（式10）を満たす未知パラメータを最適解として求める。

$$E^* = \operatorname{argmin}_{E, f} J(E, f) = \operatorname{argmin}_{E, f} \{ \|u_o - L_o(E)f\|_2 + \lambda \|E - E_0\|_1 \} \quad \dots \text{式 10}$$

【0069】

式10の第2項がスパース項である。ここで、E₀は、ほとんどの頂点に適用される弾性率の基準値である。従って、スパース項は、各頂点について推定された弾性値Eと基準値との差分（すなわち E - E₀）について1次元のノルムL¹を求める式となる。

40

本実施の形態では、係数λを0.1とした。この式の場合、弾性率Eが基準値と異なる一部の頂点についてのみ差分 E (= E - E₀) が非0（ゼロ）となり、大部分の頂点においての差分 E は0（ゼロ）となる。このスパース項は、推定された弾性率Eの分布の局在性が高い場合にノルムが小さくなる。従って、スパース項のノルムが大きい弾性率Eの分布は評価が低くなる。なお、係数λの値は一例である。

【0070】

図14は、弾性率Eの分布の推定に用いたパターンが1組（実施の形態1）の場合と、パターンが2組（実施の形態2）の場合と、パターンが2組（実施の形態2）の場合に更

50

に弾性率 E の変化のスプース性を加えた場合（実施の形態 3）の実験結果を示す図である。図 14 の縦軸は真の弾性率 E と推定された弾性率 E' との平均二乗誤差（Root Mean Square Error: RMSE）であり、横軸は観察できる頂点数の割合（図 9 参照）である。

【0071】

図 14 から分かるように、実施の形態 2 に対して弾性率 E の変化のスプース性を組み合わせた場合には、実施の形態 1 の場合（組数が「1」の場合）及び実施の形態 2 の場合（組数が「2」の場合）のいずれに対しても、推定精度を高められることが分かる。特に、実施の形態 2 に対して弾性率 E の変化のスプース性を組み合わせた場合には、観察できる頂点数の割合が低い場合でも高い推定精度を得ることができる。

【0072】

図 15 は、本実施の形態の場合における観測頂点数の割合と観測精度の関係を説明する図である。図 15 の縦軸は弾性率であり、横軸はブロック番号である。図 15 は、推定ブロック数 N が 40 の場合について表している。図では、真の弾性率 E の変化が矩形パルスで表され、推定された弾性率 E の変化が折れ線で表されている。

図 15 (A) に示すように観測頂点数が全体の 49% の場合には 2 つの波形がおおよそ一致し、図 15 (B) に示すように観測頂点数が全体の 66% の場合には 2 つの波形の重なり具合が一段と高くなっている。従って、図 15 が前提とする観測条件の場合には、観察対象である弾性体 1 の約 50% 程度を観察できればどの部位が硬いかをおおよそ推定でき（ $RMSE = 0.091907 MPa$ ）、約 60% 以上を観察できればどの部位が硬いかをより高い精度（ $RMSE = 0.024834 MPa$ ）で推定できることが分かる。

【0073】

<他の実施の形態>

前述の実施の形態においては、外力 F の大きさ f と弾性率 E の分布がいずれも未知である場合について説明したが、外力 F の大きさ f が既知である場合には、未知パラメータの数が減るため、弾性率 E の分布の推定精度を実施の形態 1 に比して高めることができる。

【0074】

前述した各実施の形態は、様々な用途において活用できる。例えば医師による診断や手術を支援する医療支援システムに情報処理システム 100 を活用できる他、医療分野以外の産業分野にも、観察や分析の用途にも、生産又は製造の用途にも活用できる。

【0075】

例えば情報処理システム 100 を医療支援システムとして活用する場合には、前述したように、視野が限られるために臓器の全体像を一度に観察できなくても、観察できる部位に生じた臓器の変化の情報（観察変位量 u_0 ）を用いて、被検体である患者の臓器に固有の弾性率 E の分布を高精度に推定することができる。

【0076】

前述の実施の形態においては、撮像カメラ 20 を通じて静止画像を撮像することを前提に説明したが、撮像カメラ 20 は弾性率 E の推定対象である弾性体 1 を動画像として撮像できる撮像手段であってもよい。この場合には、撮像された動画像からキャプチャされた静止画像を用いて前述した観察変位量 u_0 を取得してもよい。

【0077】

また、前述の実施の形態においては、撮像カメラ 20 が 1 台である場合について説明したが、撮像カメラ 20 は複数台あってもよい。また、撮影方向も 1 つに限らず、複数あってもよい。外力 F による変形を複数の方向から撮影した画像を用いることによっても観察変位量 u_0 の情報を増やすことができ、推定精度を向上させることができる。

【0078】

また、前述の実施の形態（例えば実施の形態 1）では、推定ブロック数 N が固定値として与えられる場合を前提に説明したが、推定ブロック数 N を増やしながらか推定結果の空間分解能を徐々に高める手法を採用してもよい。すなわち、弾性率 E の分布の推定処理を複数ステップに分割してもよい。

例えば初回の推定ステップでは、推定ブロック数 N が 10 個の場合について推定処理を

10

20

30

40

50

実行して短時間のうちに推定結果を得て推定結果を表示装置40に表示し、次の推定ステップでは、推定ブロック数Nを予め定めた値(例えば20個)に増加して推定処理の実行と推定結果の表示の更新を繰り返してもよい。このような手法によれば、ユーザは、弾性率Eの分布のおおよそのイメージを早期に把握しつつ、時間の経過につれてより高い空間分解能で取得できる。

【0079】

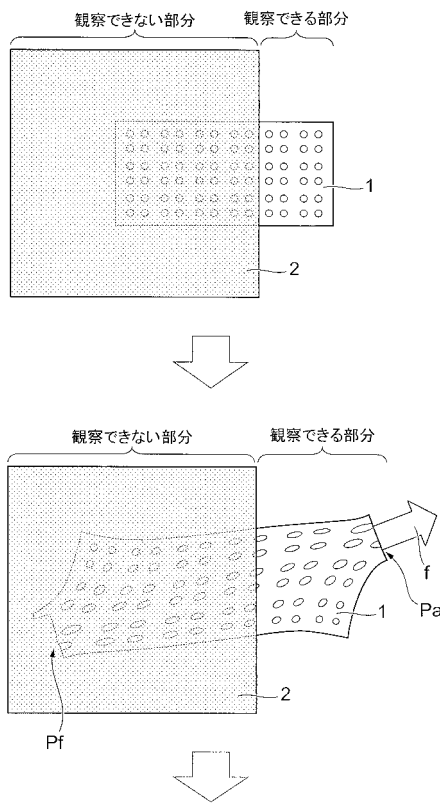
以上、本発明の実施の形態について説明したが、本発明の技術的範囲は上記実施の形態に記載の範囲には限定されない。上記実施の形態に、種々の変更又は改良を加えたものも、本発明の技術的範囲に含まれることは、請求の範囲の記載から明らかである。

【符号の説明】

【0080】

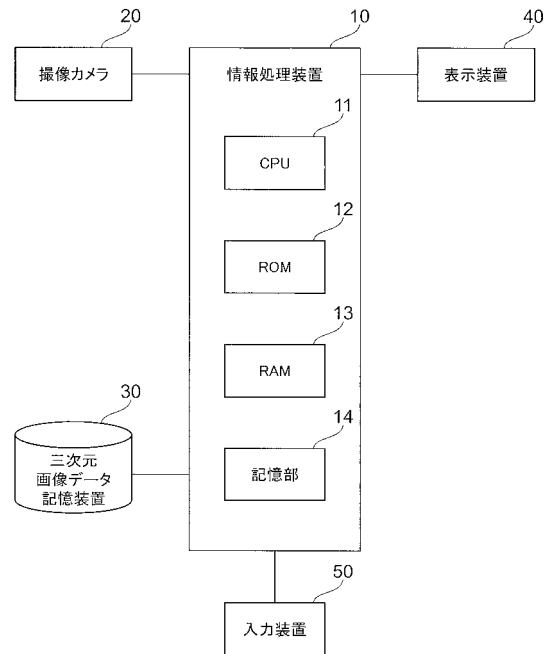
1...弾性体、10...情報処理装置、100...情報処理システム、111...メッシュモデル生成部、112...観察変位置取得部、113...作用点受付部、114...変位置推定部、115...最適化部、116...表現部、200...メッシュモデル、E...弾性率、F...外力、f...外力の大きさ、 u_o ...観察変位置、 u_o' ...推定変位置、 P_a ...作用点、 P_f ...固定点

【図1】



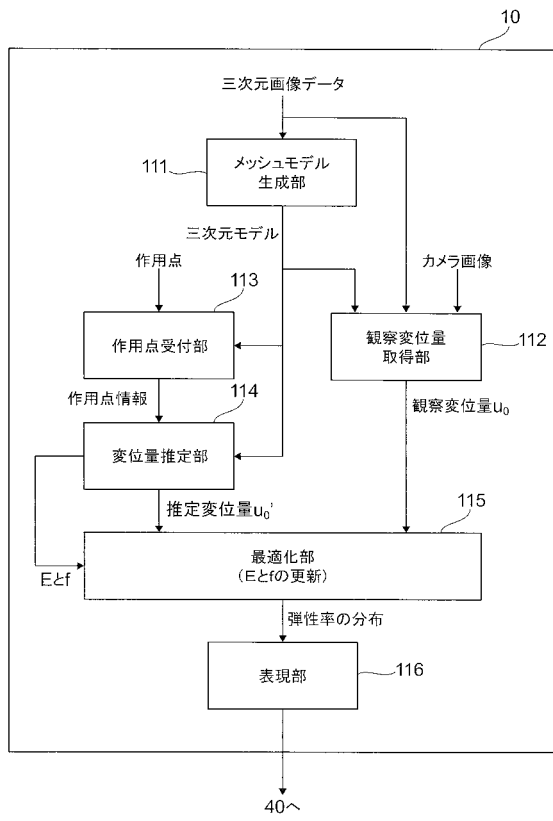
観察できない部分を含めた弾性体の全体について弾性率の分布の推定

【図2】

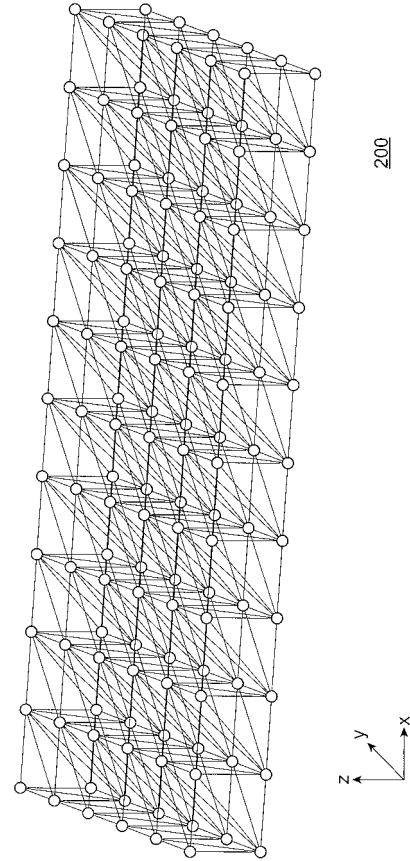


100

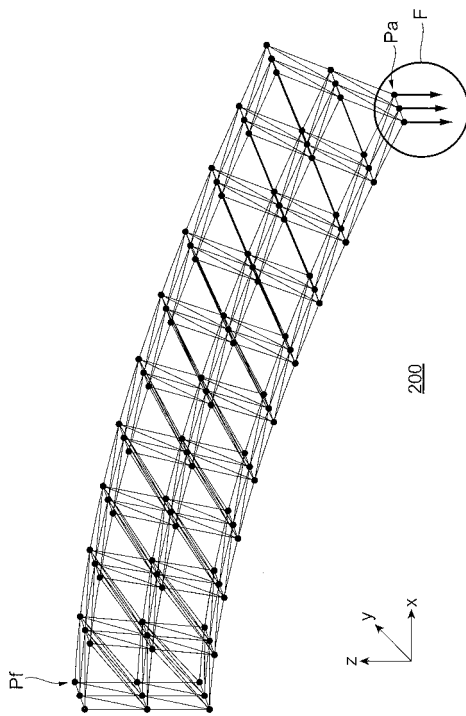
【 図 3 】



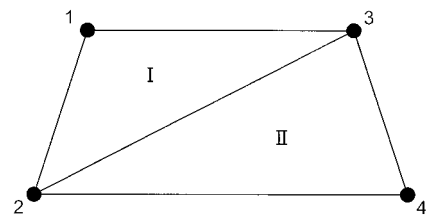
【 図 4 】



【 図 5 】



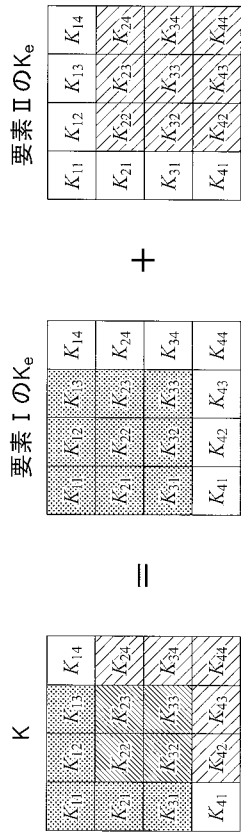
【 図 6 】



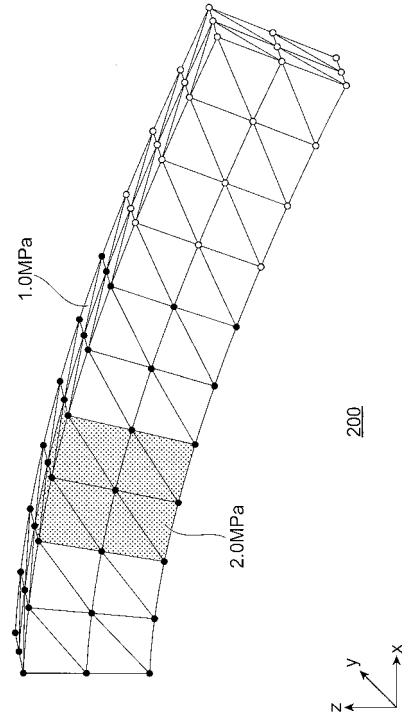
要素 I ⇒ 1,2,3で構成

要素 II ⇒ 2,3,4で構成

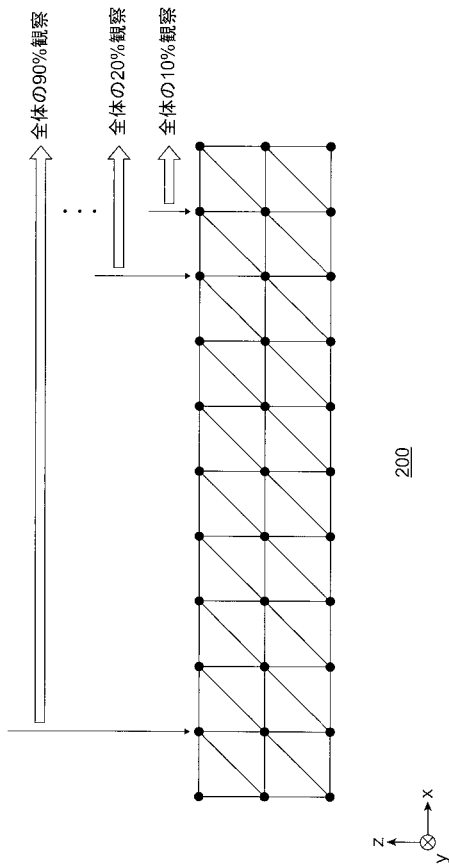
【 図 7 】



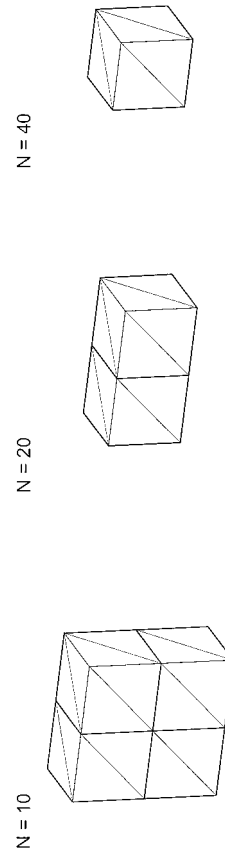
【 図 8 】



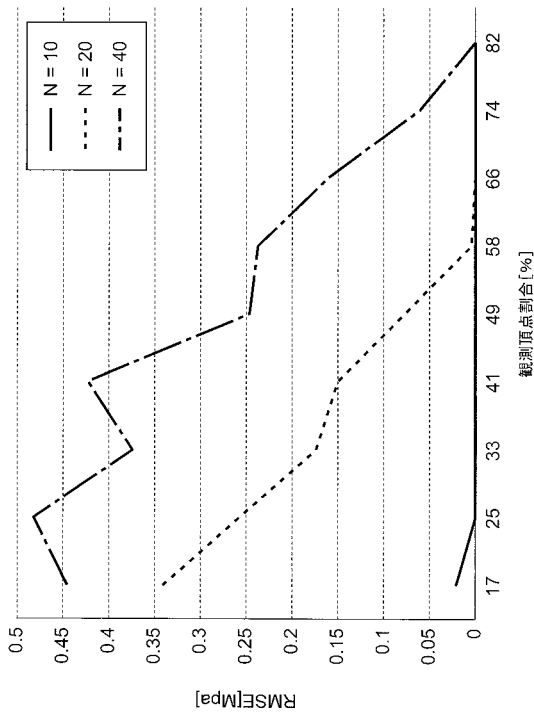
【 図 9 】



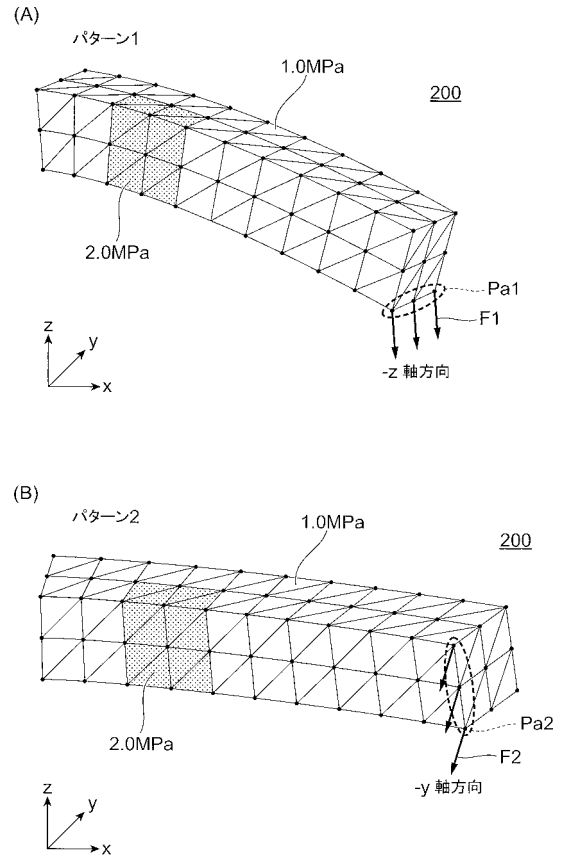
【 図 10 】



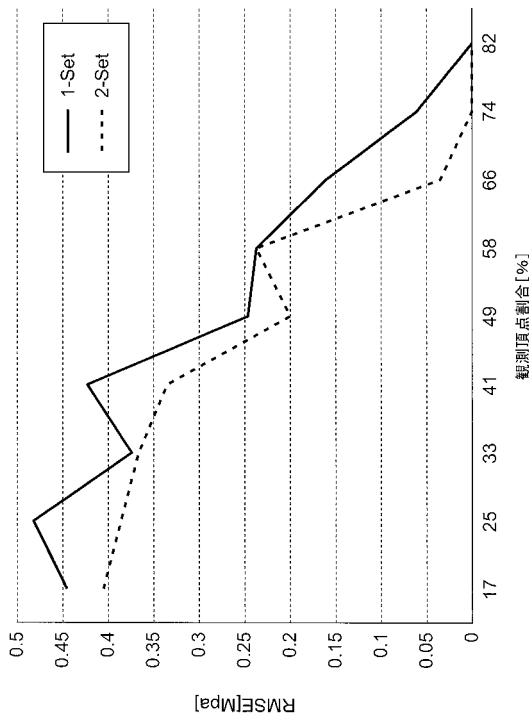
【 図 1 1 】



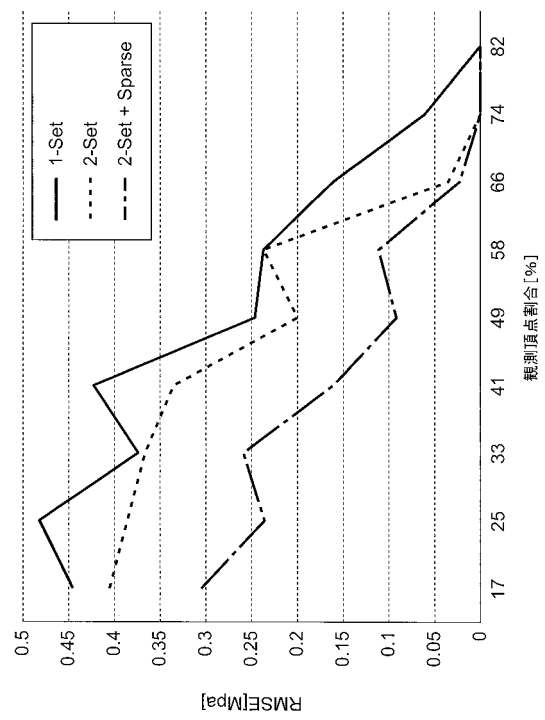
【 図 1 2 】



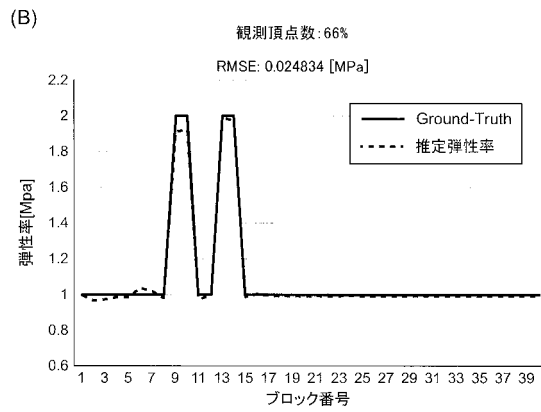
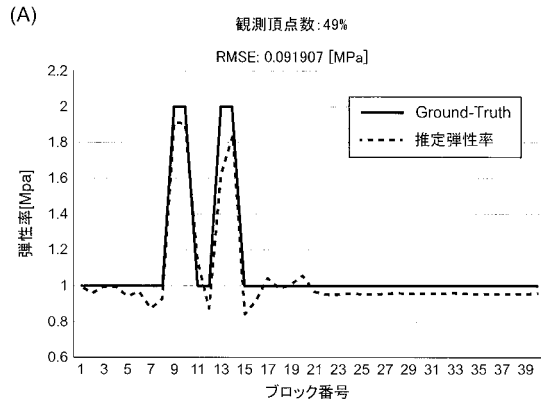
【 図 1 3 】



【 図 1 4 】



【 図 1 5 】



【 手続補正書 】

【 提出日 】 令和1年6月27日 (2019.6.27)

【 手続補正 1 】

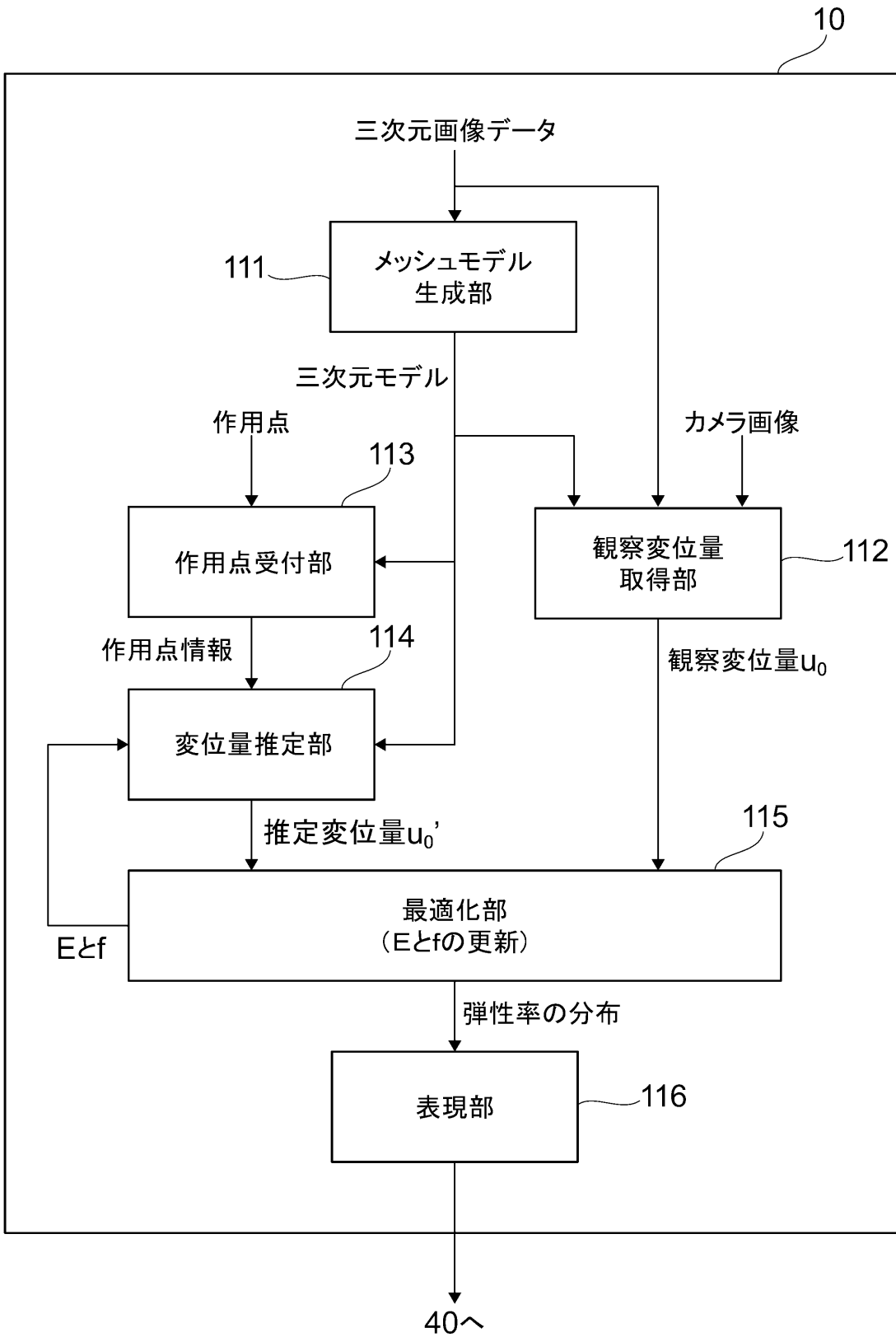
【 補正対象書類名 】 図面

【 補正対象項目名 】 図 3

【 補正方法 】 変更

【 補正の内容 】

【図3】



【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/JP2017/044527
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER Int. Cl. G06T7/00 (2017.01) i, A61B1/045 (2006.01) i, A61B8/08 (2006.01) i		
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) Int. Cl. G06T7/00, A61B1/045, A61B8/08		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Published examined utility model applications of Japan 1922-1996 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2018 Registered utility model specifications of Japan 1996-2018 Published registered utility model applications of Japan 1994-2018		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 2011-177535 A (GEN HOSPITAL CORP) 15 September 2011, paragraphs [0031]-[0034], [0038]-[0048], [0104] & US 2006/0058592 A1, paragraphs [0043]-[0046], [0050]-[0055], [0091] & WO 2006/024014 A2 & EP 1989997 A1	1, 5-12 2-4, 13-14
Y A	JP 2015-97724 A (TOSHIBA CORP.) 28 May 2015, paragraphs [0040]-[0047], [0066]-[0067] (Family: none)	1, 5-12 2-4, 13-14
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> 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		Date of mailing of the international search report
Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan		Authorized officer Telephone No.

国際調査報告		国際出願番号 PCT/J P 2 0 1 7 / 0 4 4 5 2 7													
A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G06T7/00(2017.01)i, A61B1/045(2006.01)i, A61B8/08(2006.01)i															
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. G06T7/00, A61B1/045, A61B8/08															
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 <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922-1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971-2018年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996-2018年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994-2018年</td> </tr> </table>				日本国実用新案公報	1922-1996年	日本国公開実用新案公報	1971-2018年	日本国実用新案登録公報	1996-2018年	日本国登録実用新案公報	1994-2018年				
日本国実用新案公報	1922-1996年														
日本国公開実用新案公報	1971-2018年														
日本国実用新案登録公報	1996-2018年														
日本国登録実用新案公報	1994-2018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)															
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 請求項の番号													
Y A	JP 2011-177535 A (ザ ジェネラル ホスピタル コーポレイション) 2011.09.15, 段落 [0031] - [0034], [0038] - [0048], [0104] & US 2006/0058592 A1, 段落[0043]-[0046], [0050]-[0055], [0091] & WO 2006/024014 A2 & EP 1989997 A1	1, 5-12 2-4, 13-14													
Y A	JP 2015-97724 A (株式会社東芝) 2015.05.28, 段落 [0040] - [0047], [0066] - [0067] (ファミリーなし)	1, 5-12 2-4, 13-14													
<input type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。															
<table border="0"> <tr> <td>* 引用文献のカテゴリー</td> <td>の日の後に公表された文献</td> </tr> <tr> <td>「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの</td> <td>「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</td> </tr> <tr> <td>「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</td> <td>「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</td> </tr> <tr> <td>「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)</td> <td>「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</td> </tr> <tr> <td>「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献</td> <td>「&」 同一パテントファミリー文献</td> </tr> <tr> <td>「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願</td> <td></td> </tr> </table>				* 引用文献のカテゴリー	の日の後に公表された文献	「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの	「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	「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	「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	「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)	「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	「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献	「&」 同一パテントファミリー文献	「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願	
* 引用文献のカテゴリー	の日の後に公表された文献														
「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの	「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														
「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	「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														
「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)	「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														
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献	「&」 同一パテントファミリー文献														
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願															
国際調査を完了した日 19.02.2018		国際調査報告の発送日 27.02.2018													
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) ▲広▼島 明芳 電話番号 03-3581-1101 内線 3531	5H 9853												

フロントページの続き

(81)指定国・地域 AP(BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), EP(AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT

(特許庁注：以下のものは登録商標)

1 . W I N D O W S

(72)発明者 森田 充樹

京都府京都市左京区吉田本町36番地1 国立大学法人京都大学内

Fターム(参考) 4C096 AA18 AB38 DC21 DC35 DC40

5L096 AA06 AA09 BA06 BA13 DA02 HA09

(注)この公表は、国際事務局(WIPO)により国際公開された公報を基に作成したものである。なおこの公表に係る日本語特許出願(日本語実用新案登録出願)の国際公開の効果は、特許法第184条の10第1項(実用新案法第48条の13第2項)により生ずるものであり、本掲載とは関係ありません。