

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4195096号
(P4195096)

(45) 発行日 平成20年12月10日(2008.12.10)

(24) 登録日 平成20年10月3日(2008.10.3)

(51) Int.Cl.

G06T 1/00 (2006.01)

F 1

G06T 1/00 315

請求項の数 12 (全 26 頁)

(21) 出願番号 特願平10-527508
 (86) (22) 出願日 平成9年12月11日(1997.12.11)
 (65) 公表番号 特表2001-506384 (P2001-506384A)
 (43) 公表日 平成13年5月15日(2001.5.15)
 (86) 國際出願番号 PCT/IB1997/001649
 (87) 國際公開番号 WO1998/027514
 (87) 國際公開日 平成10年6月25日(1998.6.25)
 審査請求日 平成16年12月13日(2004.12.13)
 (31) 優先権主張番号 119831
 (32) 優先日 平成8年12月15日(1996.12.15)
 (33) 優先権主張国 イスラエル(IL)

(73) 特許権者
 コグニテナス リミテッド
 イスラエル国 47282 ラマート ハ
 シヤロン ピー. オー. ボックス 171
 3 ハニビーム ストリート 55
 (74) 代理人
 弁理士 谷 義一
 (74) 代理人
 弁理士 阿部 和夫
 (72) 発明者
 アルベック, ダン.
 イスラエル国 54011 ギバット シ
 ムエル ハーザイティム ストリート 3
 5

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 3次元表面形状再構築のための装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

所与の精度まで光学的にテクスチャを付与された物体の表面形状を再構築するための 3D 表面形状再構築システムであって、

少なくとも 3 つの異なるビュー ポイントに対応する物体の少なくとも一部分のビューを生成するように動作可能な 3 ビュー光学ヘッドと、

物体の第 1 の部分が見える第 1 の相対的向きから、物体の第 2 の部分であって前記第 1 の部分と前記第 2 の部分とに含まれる該物体のオーバラップする部分が見える少なくとも 1 つの第 2 の相対的向きまで、前記所与の精度未満の精度で物体と光学ヘッドとの相対的向きを変更するように動作可能な機械式マニピュレータと、

前記光学ヘッドによって生成された前記第 1 の部分の 3 つのビューのうちの少なくとも 2 つに基づいて、物体の前記第 1 の部分の表面形状を再構築し、前記光学ヘッドによって生成された前記第 2 の部分の 3 つのビューのうちの少なくとも 2 つに基づいて、物体の前記第 2 の部分の表面形状を再構築するように動作可能なローカル 3D 表面形状再構築ユニットと、

前記第 1 の部分および前記第 2 の部分の 2D ビューに対応する光学的テクスチャを分析し、それにより前記第 1 の部分および前記第 2 の部分の対応する 2D ビューのオーバラップする部分を特定し、前記第 1 の部分および前記第 2 の部分の対応する 2D ビューのオーバラップする部分を使用して、それぞれの前記第 1 および第 2 の 3D 表面形状における対応するオーバラップする部分を特定し、それによって前記第 1 および第 2 の部分の相対位置

10

20

を決定することに基づいて前記第1および第2の部分が前記3D表面形状をスティッチできるように動作可能な表面形状スティッチユニットと
を含むシステム。

【請求項2】

前記機械式マニピュレータが、前記物体および前記光学ヘッドの1つを移動するように動作可能な物体マニピュレータを含む、請求項1に記載のシステム。

【請求項3】

前記光学ヘッドによって生成された前記3つのビューが、3D表面形状再構築が基づく2つのビューと、前記3つのビューの各内部の向きと3つのビューの相対的向きとを表すテンソルが計算される第3のビューとを含む、請求項1に記載のシステム。

10

【請求項4】

前記物体が、

前記3つのビューのうちの1つで見られる、物体の第1のセクションと、

前記3つのビューのうちの他のビューで見られる、物体の第2のセクションと、

前記第1のセクションと前記第2のセクションに含まれる、物体のオーバラップセクションとを含み、

前記3D表面形状再構築ユニットが、前記第1の部分にオーバラップする前記第2の部分のセクションのテクスチャを分析し、それにより前記第1および第2の部分の相対位置を決定するように動作可能なオーバラップセクション分析器を含むことを特徴とする請求項1、2または3に記載のシステム。

20

【請求項5】

前記テクスチャが、前記物体の表面テクスチャおよび前記物体に付着されたテクスチャを含む、請求項4に記載のシステム。

【請求項6】

前記テクスチャが、前記物体上に投影される、請求項5に記載のシステム。

【請求項7】

前記テクスチャが、前記物体上に投影されるスペックルである、請求項6に記載のシステム。

【請求項8】

それぞれが物体上にランダムスペックルパターンを投影する、複数のスペックル生成器を含む、請求項6または7に記載のシステム。

30

【請求項9】

前記スペックル生成器のそれぞれが、その上にスペックルパターンが生成され、それにより拡散器から前記物体の一部分上にスペックルパターンを投影するため光が投影される拡散器を含む、請求項8に記載のシステム。

【請求項10】

前記スペックル生成器のそれぞれが、レンズを介してレーザ光を前記拡散器上に向けるレーザダイオードを含み、前記拡散器がホログラフィ拡散器である、請求項9に記載のシステム。

【請求項11】

40

前記テクスチャが、物体と光学ヘッドとの相対的向きの変動の結果として変化するこがない、請求項4に記載のシステム。

【請求項12】

機械式マニピュレータが、物体の表面全体が光学ヘッドによって結像されるように物体と光学ヘッドとの複数の相対的向きを提供し、前記表面形状スティッチユニットが物体の表面全体を再構築するように動作可能である、請求項1に記載のシステム。

【発明の詳細な説明】

発明の分野

本発明は、3次元（以下“3D”という）表面再構築のための装置および方法に関する。

発明の背景

50

3D表面再構築に関する計算方法は、以下の論文、

“Trilinearity of three perspective views and its associated tensor”、ShashuaおよびWerman、ICCV (International Conference on Computer Vision) 95、1995年6月、

“Relative affine structure: canonical model for 3D from 2D geometry and applications”、ShashuaおよびNavab、IEEE Transactions on PAMI, 18 (9)、1996年9月、

“Algebraic functions for recognition”、A. Shashua、IEEE Transactions on PAMI, 17 (8)、1995年8月に記載されている。 10

非接触測定のための最新式の方法の調査は、Tattersall, K. G. の“Laser measurement finds its markets”、Photonics Spectra、1996年10月に記載されている。

本明細書に記載されたすべての文献およびそこに引用されている文献、ならびにイスラエル特許出願第113496号および米国特許出願第08/497224号（その開示は1996年10月31日に発行された国際公開WO96/34365号に対応する）および第08/787345号（その開示は米国特許第5598515号に対応する）の開示は、参考により本明細書に組み込まれる。 20

スペックル (speckle) 計測法およびスペックル干渉計は様々な応用例について知られている。スペックル計測法では、検査または測定するために探求された物体上でスペックルが生成される。注目 (interest) 物体上でこのように生成されたスペックルは、注目物体の各表面とその上でスペックルを生成するために使用するレーザまたは他の光源との間の角度関係に非常に依存する。スペックル計測法については、Speckle Metrology、Rajpal S. Sirohi (Ed.)、Marcel Dekker, Inc.、1993年に記載されている。

発明の概要

本発明は、新規かつ非常に効率のよい3D表面形状再構築システムを提供しようとするものである。 30

したがって、本発明の好ましい実施形態により、所与の精度まで物体の表面形状を再構築するための3D表面形状再構築システムが提供され、このシステムは、

物体の少なくとも一部分の少なくとも3つのビュー (view) を生成するように動作可能な3ビュー光学ヘッドと、

物体の第1の部分が見える第1の相対的向きから、物体の第2の部分であって第1の部分とオーバラップする部分が見える少なくとも1つの第2の相対的向きまで、所与の精度未満の精度で物体と光学ヘッドとの相対的向きを変更するように動作可能な機械式マニピュレータと、

光学ヘッドによって生成された第1および第2の部分の3つのビューのうちの少なくとも2つに基づいて、物体の第1および第2の部分の表面形状を再構築するように動作可能なローカル3D表面形状再構築ユニットと、 40

物体の第1および第2の部分の相対位置を決定するように動作可能な表面形状スティッチユニット (stitching unit) とを含む。

本発明の好ましい実施形態によれば、機械式マニピュレータは、物体を移動するように動作可能な物体マニピュレータを含む。

好ましくは、機械式マニピュレータは、光学ヘッドを移動するように動作可能な光学ヘッドマニピュレータを含む。

本発明の好ましい実施形態によれば、光学ヘッドによって生成された3つのビューは、3D表面形状再構築がそれに基づく2つのビューと、3つのビューのそれぞれの内部の向きと3つのビューの相対的向きとを表すテンソルがそれから計算される第3のビューとを含 50

む。

好ましくは、物体は、

3つのビューのうちの1つで見られる、物体の第1のセクションと、

3つのビューのうちの他のビューで見られる、物体の第2のセクションと、

第1のセクションと第2のセクションに含まれる、物体のオーバラップセクションとを含み、

3D表面形状再構築ユニットは、オーバラップセクションのテクスチャを分析するように動作可能なオーバラップセクション分析器を含む。

本発明の好ましい実施形態によれば、表面形状スティックユニットは、第1の部分とオーバラップする第2の部分の1セクションのテクスチャを分析し、それにより、第1の部分と第2の部分の相対位置を決定するように動作可能なオーバーラップテクスチャ分析器を含む。10

テクスチャは、物体の表面テクスチャまたはテクスチャ付けプロセスによって物体に付着されたテクスチャを含むことができる。

好ましくは、テクスチャは、物体と光学ヘッドとの相対的向きの変動の結果として変化することはない。

本発明の好ましい実施形態によれば、テクスチャ付けプロセスは、物体上にパターンを重ね合わせるための光学プロセスを含む。好ましくは、光学プロセスは、物体上にスペックルパターンを投影することを含む。

好ましくは、テクスチャは物体上に投影される。20

本発明の好ましい実施形態によれば、テクスチャは物体上に投影されたスペックルパターンである。

好ましくは、このシステムは、それぞれが物体上にランダムスペックルパターンを投影する、複数のスペックル生成器を含む。

各スペックル生成器は好ましくは、その上にスペックルパターンが生成され、それにより拡散器 (diffuser) から物体の一部分上にスペックルパターンを投影するために光が投影される拡散器を含む。

好ましくは、各スペックル生成器は、レンズを介してレーザ光を前記拡散器上に向けるレーザダイオードを含む。

本発明の好ましい実施形態によれば、拡散器はホログラフィ拡散器である。30

さらに、本発明の好ましい実施形態により、

結像 (imaging) ヘッドと、

結像すべき物体と結像ヘッドとの間の相対位置を変更するための位置決め装置と、物体上にスペックルパターンを投影する少なくとも1つのスペックル生成器であって、そのスペックルパターンは物体に対して固定され、そこから結像ヘッドによってそれが見られる角度によって変化しない、少なくとも1つのスペックル生成器と、

複数の画像のうちの様々な画像上のスペックルパターンの一部分を付き合わせることにより、それに対する異なる相対位置で結像ヘッドによって見られる通りに物体の複数の画像を結合するための画像結合器とを含む、3次元結像システムが提供される。

また、本発明の好ましい実施形態により、物体の表面形状を再構築するための3D表面形状再構築システムも提供され、このシステムは、40

光学ヘッドと、

少なくとも5自由度で物体と光学ヘッドとの相対的向きを変更するように動作可能な機械式マニピュレータであって、

物体を移動するように動作可能な物体マニピュレータと、

光学ヘッドを移動するように動作可能な光学ヘッドマニピュレータとを含む、機械式マニピュレータと、

光学ヘッドによって生成された物体の少なくとも一部分の画像を分析することにより、物体の表面形状を再構築するように動作可能な3D表面形状再構築ユニットとを含む。

好ましくは、機械式マニピュレータは、物体の表面全体が光学ヘッドによって結像される50

ように物体と光学ヘッドとの複数の相対的向きを提供し、表面形状スティッチユニットは物体の表面全体を再構築するように動作可能である。

さらに、本発明の好ましい実施形態により、物体の表面形状を再構築するための 3D 表面形状再構築システムが提供され、このシステムは、物体の表面上に存在する多数の位置を計算するように動作可能な表面位置計算ユニットを含む。

さらに、本発明の好ましい実施形態により、物体の 3D 表面形状を再構築するための 3D 表面形状再構築方法が提供され、この方法は、

物体と光学ヘッドとの相対的向きを手動で変更し、対応する複数の光学ヘッド / 物体の相対的向きに関する物体の少なくとも一部分の複数の画像を生成するステップと、

複数の画像を分析することにより、物体の 3D 表面形状を再構築するステップとを含む。本明細書に示し記載するシステムの好ましい実施形態の特定の利点は、従来システムでは物体の表面の上で高精度走査運動を行うために使用する精密機械要素なしに、このシステムが物体の 3D 表面形状を正確に再構築できることである。このシステムは、その一部分のみが固定結像装置によって捕捉可能になるようなサイズおよび / または形状を有する物体の再構築に特に適している。

本明細書に示し記載するシステムの好ましい実施形態の他の利点は、どのようなものであっても人間の介入なしに、完全に自動的な表面再構築を行えることである。

本明細書に示し記載するシステムの好ましい実施形態の他の利点は、特に高密度の再構築済み表面ポイントが得られることである。

本発明のロボットは好ましくは、物体を操作するための垂直自由度と、光学ヘッドを操作するための垂直自由度とを含む、6 自由度を有する。あるいは、このような垂直自由度のうちの一方だけが得られる場合もある。

【図面の簡単な説明】

本発明は、添付図面に関連して示す以下の詳細な説明から理解されるだろう。

図 1 は、本発明の好ましい実施形態により構築され、動作可能な 3D 表面結像再構築システムの簡略半絵半ブロック図である。

図 2 は、図 1 のシステムで使用する光学ヘッドの簡略絵図である。

図 3 は、図 1 のシステムで使用するテクスチャ生成器の一部を形成する照明モジュールの簡略断面図である。

図 4 は、図 1 のシステムを使用して結像可能な典型的な 3 次元物体を示す図である。

図 5 は、本発明の好ましい実施形態によりその表面上に投影されるスペックルを有する、図 4 の 3 次元物体を示す図である。

図 6 は、図 4 および図 5 の 3 次元物体に対応し、図 1 のシステムによって生成される雲状ポイントを示す図である。

図 7 は、図 1 のシステムを使用して結像可能な他の典型的な 3 次元物体を示す図である。

図 8 は、本発明の好ましい実施形態によりその表面上のテクスチャ上にペイントした図 7 の 3 次元物体を示す図である。

図 9 は、図 7 および図 8 の 3 次元物体に対応し、図 1 のシステムによって生成される雲状ポイント (a cloud of points) を示す図である。

図 10 A ~ 図 10 B は、図 7 の物体の CAD モデルを示す図である。

図 11 は、図 7 の物体の 3 次元表現と図 11 のその CAD モデルとの偏差を示す図である。

図 12 A ~ 図 12 F は、錐体対応方法 (pyramid correspondence method) のシミュレーションである。

図 13 A および図 13 B は、図 8 のテクスチャを有する図 7 の物体上の隣接区域の 2 つの部分的にオーバラップする画像を示す図である。

図 14 A および図 14 B は、図 12 A および図 12 B の画像に対応し、本発明のシステムによって生成される雲状ポイントの一部分を示す図である。

図 14 C は、図 12 A および図 12 B の画像の “スティッチ済み” 表現を表す、2 つの結

10

20

30

40

50

合した雲状ポイントの組合せを示す図である。

図15は、図1のテンソルベースの3D表面再構築モジュール50のための好ましい操作方法の簡略流れ図である。

図16は、図1の3D表面構造再構築モジュールのためにスケーリングを実行するための好ましい方法の簡略流れ図である。

図17は、ローカル再構築のための好ましい方法の簡略流れ図である。

図18は、1対の部分的にオーバラップするパッチを示す図である。

図19は、好ましいスケーリング物体の写真である。

図20は、図19のスケーリング物体の前段階(precursor)を示す等角投影図である。

図21は、図20の線XXI-XXIに沿って示す断面図である。

例示的な実施形態の詳細説明

本発明は、物体の表面形状を再構築するために動作可能な3次元表面形状再構築システムを提供する。本発明のシステムの特定の特徴は、従来システムでは物体の表面の上で高精度走査運動を行うために使用する精密機械要素なしに、それが物体の3D表面形状を正確に再構築できることである。このシステムは、その一部分のみが固定結像装置によって捕捉可能になるようなサイズおよび/または形状を有する物体の再構築に特に適している。本明細書に示し記載するシステムの他の利点は、どのようなものであっても人間の介入なしに、完全に自動的な表面再構築を行えることである。

図1を参照すると、同図は、本発明の好ましい実施形態により構築され、動作可能な3D表面結像再構築システムの簡略半絵半ブロック図である。

図1のシステムでは、位置決めアセンブリ10は、それぞれが少なくとも2通りの、好ましくは少なくとも3通りの観点から見て、所定のシーケンスで結合すべき注目物体の一部分同士がオーバラップするように注目物体20の一部分と光学ヘッド30とがオーバラップするように、相対的に大きく光学的にテクスチャを付けた注目物体20と光学ヘッド30との相対運動を行うように動作可能である。このような各オーバラップ部分から物体の表面の一部分が再構築され、このように再構築された部分は好ましくはその後、“スティッチ”され、物体の表面全体または表面全体のうち見えた部分または注目部分のいずれかからなる統一再構築が形成される。テクスチャ付き表面は、スティッチに“向きの手がかり”を提供することにより、再構築した個々の表面部分をスティッチして単一の再構築化表面の形成を容易にする。

位置決めアセンブリ10は好ましくは、光学ヘッド30とそれにより結像すべき注目物体20との相対位置決めのために合計6自由度を提供する。

本発明の好ましい実施形態によれば、光学ヘッド30は、マスト33上に取り付けられた取付けアーム34上に選択可能な方式でしかも軸32の周りを回転可能な方式で位置決めされ、マスト33内に定義される垂直軸36に沿って選択可能な方式で上下することができる。マストは、固定ベース42に対して、それぞれ相互に垂直なX軸38およびY軸40に沿って水平に移動することができる。

物体サポートアセンブリ44は、ベース42に対して固定され、垂直軸46に沿って垂直にしかも軸46の周りを回転可能なやり方で注目物体を位置決めする物体サポート45を含む。

電気モータ(図示せず)あるいは他の適当な位置決め駆動装置は、光学ヘッド30および注目物体を前述の6自由度内で互いに対し位置決めするように動作可能である。

本発明の好ましい実施形態によれば、複数のテクスチャ生成器48が物体サポート45に固定され、それにきわめて接近して配置されており、そのテクスチャ生成器は注目物体20上にテクスチャパターンを投影するように動作可能である。本発明の特定の特徴は、光学ヘッド30によるその結像中の間、テクスチャ付きパターンが注目物体に対して精密に固定された関係を維持することである。スケーリング物体50は、後述するように、テンソルベースのスケーリングを実行するために使用することができる。

本発明の他の特定の特徴は、従来技術とは対照的に、構造光ではなく未構造光を使用して

10

20

30

40

50

物体上にテクスチャを作成し、個々の画像内の対応する特徴を検出しやすくすることである。

光学ヘッド 30 と注目物体 20 との相対位置決めの制御は、通常はパーソナルコンピュータ内に実現される捕捉制御ユニット 62 の一部を形成する動き制御装置 60 によって行われる。この動き制御装置は、Silicon Graphics のワークステーションなどのワークステーション 66 内に実現される経路計画 (path planning) モジュール 64 から出力を受け取る。経路計画モジュール 64 は、適当なユーザインターフェース 67 を介してユーザ入力に応答し、その代わりにまたはそれに加えてワークステーション 66 に供給可能な CAD ファイル 68 の出力に応答する。

光学ヘッド 30 への操作入力は画像捕捉回路 70 によって供給され、光学ヘッド 30 からの画像出力は画像捕捉回路 70 に供給されるが、その画像捕捉回路は、経路計画モジュール 64 から入力を受け取り、ワークステーション 66 内に実現されるテンソルベースの 3D 表面再構築モジュール 72 に出力を供給する。また、モジュール 72 は、CAD ファイル 68 から入力を受け取り、注目物体を表す雲状ポイント (cloud of points) または雲状ポイントと CAD ファイル 68 との比較の結果を供給する。

また、照明制御回路 76 も、経路計画モジュール 64 から入力を受け取り、テクスチャ生成器 48 に出力を供給する。

本明細書では、“光学テクスチャ”という用語は、表面の不均一な光学特性を意味するために使用する。光学テクスチャは、表面上に光学パターンを投影することにより、光学手段によって生成することができ、あるいは表面粗さまたは表面の色の変化などの表面特性による場合もある。

次に図 2 を参照すると、同図は、本発明の好ましい実施形態により構築され、動作可能な光学ヘッドの好ましい実施形態を示している。この光学ヘッドは、その上に複数のカメラ 104 が取り付けられたシャシ 102 を含み、そのカメラは通常は 3 つであり、好ましくはすべて共通の点に焦点が合っている。カメラ 104 はそれぞれ、CCD カメラなど、適当なタイプの電子カメラにすることができる。

本発明の好ましい実施形態によれば、シャシ 102 上には、カメラ 104 によって見ている注目物体の諸領域上に補助テクスチャを投影するためのプロジェクタ 106 も取り付けられている。プロジェクタは、その構成のために、テクスチャ生成器 90 によって設けた投影テクスチャが欠落している物体の諸領域を見ることが望ましい場合に有用である。

また、本発明の好ましい実施形態により、照明ランプ 108 も設けられている。このランプは、通常、テクスチャ生成器 90 によって生成されたテクスチャを使用して画像の自動“スティッチ”が行われるシステムの自動動作中には使用しないが、手動経路計画モードでシステムを操作するためには有用である。

次に図 3 を参照すると、同図は、図 1 のシステムで使用するテクスチャ生成器の一部を形成する照明モジュール 120 の簡略断面図である。通常、各テクスチャ生成器 90 は複数の照明モジュール 120 を使用し、その照明モジュールはそれぞれ、注目物体上に固定ランダムテクスチャパターンを投影するように動作可能である。

ただし、注目物体上のランダムテクスチャパターンの位置がそれに対して固定されるように、テクスチャ生成器 90 は注目物体に対して固定されていることに留意されたい。通常、注目物体の所与の領域は、複数のテクスチャ生成器 90 からその上にテクスチャパターンがすでに投影されている可能性がある。このため、広い照明到達範囲角度が得られ、様々な表面の向きをより適切に照らすことになる。さらに、テクスチャパターンのランダム性のため、これは本発明のシステムの動作に干渉または影響することはない。

各照明モジュール 120 は、通常、機械的取付けハウジング 122 を含み、その一方の端部には単一モードレーザダイオード 124 が設けられ、もう一方の端部にはホログラフィ拡散器 126 が設けられている。レーザダイオード 124 とホログラフィ拡散器 126 の中間には集束レンズ 128 が配置されている。レーザダイオード出力がホログラフィ拡散器 126 に衝突すると、拡散器は注目物体上に投影されるスペックルを生成し、したがって、ランダムパターンでその物体を効果的に“ペイント”する。光学ヘッド 30 によって

10

20

30

40

50

その物体を見ている間に照明モジュール 120 と注目物体との相対運動は実際にはまったく発生せず、したがって、ランダムパターンは注目物体上の基準パターンとして機能することができ、高精度でその別々の画像の“スティッチ”を可能にすることは重要なことである。

注目物体上に投影された個々のパターンスポットの平均サイズは、レーザダイオード 124 および拡散器 126 に対するレンズ 128 の光学パワーおよび位置によって決定することができる。注目物体上での投影の成角およびその強度分布の制御を可能にするので、ホログラフィ拡散器を使用することが好ましい。また、それにより、テクスチャパターンは空間周波数が変動するパターンで構成することができる。

図 12A ~ 図 12F に関連して後述するように、周波数が変動するパターン成分を使用すると、最初に低周波パターンを使用して“対応プロセス”を行い、高周波パターンを使用してより高精度へと進化することができる。 10

スペックル生成拡散器を使用することは本発明の特定の特徴である。このような拡散器は、結像技法に基づく既存のテクスチャ投影システムとは対照的に、微細パターンと大きい被写界深度を提供しながらその上にスペックルを投影すべき注目物体から比較的短距離のところで使用することができる。

好ましくは、スペックル生成拡散器は 2 次元ランダム回折格子である。本発明の好ましい実施形態によれば、この拡散器は、所望の全体パターン構成を提供するホログラフィ光成形拡散器である。たとえば、ホログラフィ光成形拡散器は、矩形の全体スペックルパターンを提供するために使用することができる。 20

このようにスペックルを使用するのは、注目物体上にレーザビームが直接衝突するとスペックルがその上に生成される従来技術のスペックル計測法とは区別するためである。従来技術では、それから使用される角度の関数として変化するスペックルパターンを生成する。本発明では、スペックルパターンはそれから見られる角度に対して不变でなければならない。

次に図 15 を参照すると、同図は、図 1 のテンソルベースの 3D 表面再構築モジュール 50 のための好ましい操作方法を記載したものである。図 15 の方法は、本発明の好ましい実施形態により物体の 3D 表面構造を再構築するように動作可能であり、以下のステージを含む。 30

ステージ 604 : それに沿って物体の結像器 (imager) が前進する結像経路を生成する。通常、画像がスティッチされる順序は結像経路に基づくものである。

ステージ 610 : テンソルデータを生成することにより、3D 表面構造再構築プロセスのためのスケーリングを行う。

ステージ 620 : 注目物体を結像する。

ステージ 630 : ローカル 3D 表面構造再構築

ステージ 640 : 再構築したローカル 3D 表面構造をスティッチし、注目物体のための完全実際表面構造を形成する。

ステージ 640 で生成された完全実際表面構造は、別々にまたは組み合わせて実施可能なステージ 650 ~ 720 の応用例を含みかつそれに限定されない幅広いの種類の応用例で有用である。このような応用例について次に説明する。 40

ステージ 650 : 注目物体の実際の表面構造を所望の表面構造と比較する。通常、所望の表面構造は CAD モデルによって定義され、この比較プロセスは、実際の構造と所望の構造を位置合わせし、各再構築化ポイントと CAD 表面との距離を計算することによって行われる。この距離は本明細書では“再構築化ポイントの偏差”ともいう。

あるいは、所望の表面構造は“金製部品”によって定義され、図 15 のプロセスは金製部品と、その金製部品に類似させるべき注目物体について、別々に行われる。結果として得られる 2 つの雲状ポイントは位置合わせされ、次に、1 つの雲内の各個々のポイントについて以下のステップを実行することによって比較される。

a. 個々のポイントに最も近い、他の雲内の所定の数のポイント（通常は 3 ~ 6 つのポイント）を選択する。 50

b. これらのポイントに近い、平面などの幾何表面を生成する。

c. この幾何表面から個々のポイントまでの距離を計算する。この距離は本明細書では“個々の再構築化ポイントの偏差”ともいう。

目視検査を使用する応用例では、各再構築化ポイントは好ましくはその偏差に基づいて着色されている。たとえば、濃い色調は偏差が大きいポイントを意味し、淡い色調は偏差が小さいポイントを意味する。あるいは、異なる色を使用して、異なる範囲の偏差を示すこともできる。

ステージ 650 は、実際の生産出力に基づいて金型またはその他の製造工具を補正する工具補正応用例（ステージ 660）、品質管理応用例（ステージ 670）などの応用例の前段階である。

あるいは、たとえば、ステージ 680 ~ 720 の応用例のうちの 1 つが対象になる場合、ステージ 650 は省略することができる。

ステージ 680 は、スティッチステージ 640 の出力に基づいて、物体の C A D 表面の C A D モデルを生成する。このプロセスは、ミシガン州アナーバーの Image Ware Corp. から販売されている Surfaceacer などの市販の適当な工具を使用して実施することができる。

このステージは、C A D モデルを使用して、たとえば、青写真を作成し、それにに基づいて製造することにより、リバースエンジニアリングを行った物体の複製を製造する、リバースエンジニアリング応用例（ステージ 690）などの応用例の前段階である。他の応用例は、設計プロセス中にその粘土モデルなど、物体の物理的モデルが設計者によって作成される、設計改良である。物理的粘土モデルの C A D モデルを生成して分析し、その分析の結果を使用して物体の設計を改良する。

スティッチステージ 640 の出力は、米国カリフォルニア州バレンシアの 3 D S y s t e m s Inc. が製造した S L A - 190 モデルなどの適当な高速プロトタイプマシンを使用する高速プロトタイプ手順用の入力として使用することができる。高速プロトタイプは、潜在的な製品のプロトタイプの高速生成や、娯楽産業、観光業界、記念品産業、たとえば、顧客の上半身などの目新しい商品の生成など、幅広い種類の分野で有用である。

ステージ 714 では、ステージ 640 で生成した雲状ポイントに着色する。雲内の各ポイントに割り当てられる色は、注目実際の物体内のそのポイントに対応する位置の元の色である。好ましくは、従来の表面補間は、連続着色表面を生成するためにすべてのポイントについて行われる。適当な表面補間技法については、1981 ~ 1982 年に発行された W. E. L. Grimson による M I T P r e s s の書籍に記載されている。

結果として得られる着色雲は、たとえば、マルチメディア応用例、教育ソフト、コンピュータ化されたカタログ、コンピュータゲームまたはビデオゲームに挿入するために、リアルな 3 D グラフィックモデルとして表示することができる。着色雲は、その自然のテクスチャを使用して表示することができ、あるいは金属的テクスチャなどの人為的効果を発生するように変更することができる。着色雲は、3 D アニメーション映画または従来の映画の特殊効果などの娯楽目的のためにアニメーション化する（ステップ 720）ことができる。ステージ 604 ~ 640 のそれぞれについて次に説明する。

ステージ 604 : 経路計画

このステージは、通常、図 1 の経路計画モジュール 80 によって行われる。経路計画モジュール 80 は好ましくは、以下の 3 つの出力を生成する。

出力 1 : 測定中の物体の一部分に対応する 1 組の“パッチ”。各パッチは、前記一部分のオーバラップ画像のトリプレットと、そこからロボットが画像トリプレットを生成した位置とを含む。

出力 2 : 複数のパッチ対のシーケンス。第 1 のパッチ対を除く各パッチ対内の 2 つのパッチは、2 つの画像トリプレット内の対応する画像のうちの 1 つ、2 つまたは好ましくは 3 つすべてがオーバラップするという意味でオーバラップする。第 1 の対のパッチは、左側の宛先パッチと、“スティッチ”操作を使用して同じシーケンス内の残りのパッチにより宛先パッチにスティッチするための右側のソースパッチとを含む。

セット内の各パッチは、少なくとも 1 つのシーケンス内のソースパッチとして現れなければならない。

出力 3： スティッチ操作によって各隣接対のパッチ間の変換がすでに計算されていることを特徴とする、複数のパッチのシーケンス。これによって、一連の変換シーケンスが生成される。このシーケンス内の最後のパッチは、その変換シーケンスの複合変換を計算することにより、そのシーケンスの第 1 のパッチに変換することができる。

経路計画モジュール 80 によって実行される経路計画プロセスは、以下の 3 つのステップを含む。

ステップ 810 - - 出力 1 のタイリングおよび生成

ステップ 820 - - スティッチグラフを作成する

ステップ 830 - - スティッチグラフを走査し、経路自体を含む出力 1 ~ 3 を生成する
上記の各ステップについて次に説明する。

ステップ 810 - - タイリング： 経路計画モジュール 80 は好ましくは、測定すべき物体の一部分をいっしょにカバーするオーバラップ画像のシーケンスを作成するために、結像すべき物体のオーバラップ部分を選択するようユーザにプロンプト指示する対話型ソフトウェアモジュールを含む。次にユーザは、作成したすべてのシーケンスがこのプロセスの終わりに接続されるように、自分が作成した隣接シーケンスを接続する。ロボット目視位置およびその実行順序は、出力 1 を生成するこのステップで定義される。

オーバラップする隣接物体部分の画像対のリストを獲得する方法はいくつか可能である。

検査すべき物体の CAD モデル 70 が存在する場合、“ CAD モデル使用可能 ” モードで動作する経路計画モジュール 80 は好ましくは、経路を CAD モデルに重ね合わせ、どちらの画像対が隣接しオーバラップする物体部分に関係するかを決定するように動作可能である。いずれの CAD モデル 70 も存在しない場合、“ CAD モデル使用不能 ” モードで動作する経路計画モジュールは好ましくは、物体が結像されたロボット位置を記録し、したがって、どちらの画像対が隣接しオーバラップする物体部分に関係するかを決定することができる。結像が手動で行われる場合、人間のオペレータは好ましくは、どちらの画像対が隣接しオーバラップする物体部分に関係するかに関する手動入力を行えるように動作可能である。

ステップ 820 - - スティッチグラフを作成する：

本明細書で “ スティッチグラフ ” と呼ばれるグラフを作成するが、そのグラフでは、各ノードが一連の部分オーバラップ画像トリプレットであり、ノード v における少なくとも 1 つのパッチがノード u における少なくとも 1 つのパッチに部分的にオーバラップする場合にグラフの 1 対のノード v および u が 1 つの辺によって接続されている。

ステップ 830 - - スティッチグラフを走査し、経路自体を含む出力 1 ~ 3 を生成する：
ステップ 820 で生成したスティッチグラフを系統的に走査して、未処理（すなわち、隣接するものにまだスティッチされていない）画像シーケンスを求める。好ましくは幅優先検索（ breadth-first search ）などの適当な検索方式を使用することができる。求めた第 1 の未処理シーケンス内の第 1 の画像トリプレット（ “ パッチ ” ）は “ ベース ” という。そのシーケンス内のすべてのパッチはベースにスティッチされる。求めた各後続未処理シーケンスは、すでに処理された隣接するもの（すなわち、辺によってそのシーケンスに接続されたノード）にスティッチされる。このプロセスの出力は以下のものを含む。

それぞれがシーケンス内の各パッチとベースとの間のスティッチを記述する、出力 2 の複数の線と、

出力 2 の上記のフォーマットを使用する場合に 2 つのシーケンス間のスティッチを記述する、出力 2 の単一の線と、

出力 3 の上記のフォーマットを使用する場合の出力 3 の単一の線である。この線は、現行シーケンスからベースの座標系への変換の計算を記述するものである。

ステージ 610： テンソルデータを生成することによる 3D 表面構造再構築プロセスの較正

10

20

30

40

50

ステージ 610 は、図 16 に示すように、以下のステップを含む。

a . ステップ 700 : スケーリング物体を結像する - - スケーリング物体の 2D 画像のトリプレットを生成する。このトリプレットは、スケーリング物体の本質的に同じ部分の 3 つのビューを含む。スケーリング物体は、テクスチャが付けられ、複数（通常は、少なくとも 5 つ）の既知のポイントフィーチャを含むことを特徴とする。“既知のポイントフィーチャ”という用語は、コーナーまたは円の中心など、手動または自動のいずれかで容易に識別可能であり、既知の (x, y, z) 位置に発生するポイントフィーチャである。好ましいスケーリング物体については図 19 ~ 図 21 に示す。

具体的には、図 19 は、好ましいスケーリング物体の写真である。図示の通り、図 19 は、2 通りの高度レベル、すなわち、高レベルと低レベルにある複数の精密に製造した穴を含む。通常、この穴は、高レベル穴と低レベル穴が交互に“チェックカード”のフォーマット状に並んでいるグリッドとして配置される。スケーリング物体の表面は、表面の高度を高レベルから低レベルに低減し、通常は隣接低レベル穴が検出される直前に低レベルに達するように、各高レベル穴の周りに形成された複数のほぼ円錐形の部分を含む。

図 20 は、図 19 のスケーリング物体の前段階を示す等角投影図であり、それらを接続する表面なしに 2 通りのレベルの穴のみを示している。図 21 は、図 20 の線 X X I - X X I に沿って示す断面図である。

b . ステップ 710 : ステップ 760 に関連して後述するように、画像トリプレットの第 1 の画像内の“コーナー”表面ポイントを求める。第 1 の画像内の各“コーナー”表面ポイントごとに、残りの 2 つのスケーリング画像内の対応する位置を識別する。スケーリング物体が不連続表面を有する場合、ポイントフィーチャ検出が行われる。あるいは、連続するか否かにかかわらず、スケーリング物体内の対応する位置を手動で識別することもできる。ステップ (b) の出力は、1 組の対応する位置のトリプレットであり、通常は少なくとも 7 つのトリプレットである。対応する位置は必ずしも既知のポイントフィーチャではない。

c . ステップ 720 : ステップ (b) の出力を使用して、テンソルを作成する。対応する位置のトリプレットからテンソルを作成するための好ましい方法については、同時係属の米国特許出願第 08 / 497224 号に記載されている。

d . ステップ 730 : ステップ (a) で生成された 3 つのビューのそれぞれにおける既知のポイントフィーチャの位置を識別し、それにより、対応する位置の複数のトリプレット、通常は対応する位置の少なくとも 5 つのトリプレットを生成する。特定の既知のポイントフィーチャの 2D 位置からなる各トリプレットをそのポイントフィーチャの既知の 3D 位置に関連付ける。

ポイントフィーチャの既知の 3D 位置は外部に供給される。ステップ (d) は手動で実行することもできる。

ステップ (d) の出力は、それぞれ少なくとも 5 つの既知のポイントフィーチャに関する少なくとも 5 つの情報ユニットであり、各情報ユニットは、ステップ (a) で生成された 3 つのスケーリングビューのそれぞれにおけるそのポイントフィーチャの 3D 位置とそのポイントフィーチャの 2D 位置とを含む。

あるいは、一方がテクスチャ付きであり、もう一方が複数の既知のポイントフィーチャを含む、2 つのスケーリング物体を使用することができる。ステップ (b) および (c) は、テクスチャ付きの第 1 のスケーリング物体について実行される。ステップ (d) は、複数の既知のポイントフィーチャを含む第 2 のスケーリング物体について実行される。第 1 のスケーリング物体は、たとえば、注目物体そのものにすることができる。第 2 のスケーリング物体は、連続表面または不連続表面のいずれかを有する場合がある。カメラのトリプレット間の固定した同じ向きを使用して、2 つのスケーリング物体のそれぞれについて 2D 画像のトリプレットが生成される。

e . ステップ 740 : スケーリングデータの一部が通常はステップ (c) で計算したテンソルの識別コードになるので本明細書では“テンソルデータ”ともいうスケーリングデータを生成するために、ステップ (d) の出力とステップ (c) で生成されたテンソルと

を使用する。ステップ 740 を実行するための好ましい方法については、同時係属の米国特許出願第 08 / 497224 号および第 08 / 787345 号と、米国特許第 5598515 号に記載されている。テンソルデータは好ましくは、テンソル自体は別として、投影座標からユークリッド座標への変換、基本マトリックス、エピポールを含む。

ステージ 620：注目物体の結像

ステージ 620 は以下のステップ f を含む。

f. ステップ 750：注目物体の結像 - - 物体の表面の少なくとも一部分の 2D 画像の複数のトリプレットを生成する。各トリプレットは、物体の表面の本質的に同じ一部分の 3 つのビューを含む。

複数のトリプレットは通常、注目区域全体をカバーし、隣接トリプレット同士のオーバラップが発生する。たとえば、物体の表面全体が対象になる場合、トリプレットは通常、表面全体をカバーし、オーバラップが発生する。

ステージ 610 および 620 用に各トリプレットの画像を生成するには、3 台のカメラが本質的に同じ区域を結像するように、ベース上に固定して取り付けられた“写真”出力を備えた 3 台のデジタルカメラなど、相互の向きが一定の従来のカメラの可動トリプレットを使用することができる。1 つまたは複数のスケーリング物体を結像し、注目物体を結像するために、相互の向きが同じカメラを使用する。カメラトリプレットの可動性は、物体の一連のオーバラップ部分が結像されるように、ベースとカメラを携帯して物体の周りを移動し、物体を繰り返し結像する人間のオペレータによってもたらされる場合もある。

物体に光学的にテクスチャが付けられていない場合、たとえば、物体に手動でスペックルを付けることによって、光学テクスチャが人工的に施される。人間のオペレータは、自分の動きを監視し、どのトリプレットがオーバラップするかを手動で記録する。

本発明の一実施形態で使用する“写真”ファイルフォーマット出力については後述する。あるいは、ステップ (a) および (b) 用の画像トリプレットは、物体に光学的にテクスチャが付けられていない場合に光学テクスチャ付けサブシステムを含む、本明細書に示し記載する結像装置を使用することによって得られる。

ステップ (f) では、カメラの固定した相互の向きは、スケーリングステップ (a) で使用するカメラの相互の向きと同じである。ステップ (f) で使用する各カメラの焦点距離および口径はステップ (a) で使用する同じカメラの焦点距離および口径と同じである。

あるいは、ステージ 620 およびすべての後続ステージでは、2D 画像のトリプレットは、それぞれが物体の表面の同じ部分の 2 つのビューのみを含む、2D 画像の対で置き換えることができる。

ステージ 630：ローカル 3D 表面構造再構築

ローカル再構築 - - 各画像トリプレットごとに、すなわち、注目物体の特定の部分の 3 つの画像ごとに、その物体部分の 3D 表面構造を再構築する。

図 17 に示すように、ステージ 630 は、各画像トリプレットごとに以下のステップを実行することを含む。

g. ステップ 760：画像トリプレット内の 1 つの画像における“コーナー”表面ポイントを求める。

h. ステップ 770：画像トリプレット内の残りの 2 つの画像における対応するポイントを求める。

i. ステップ 780：投影再構築により 3D 表面ポイントを計算する。

j. ステップ 790：3D 表面ポイントをユークリッド座標にマッピングする。

单一の画像トリプレットについて、上記の 4 つのステップを次に説明する。

g. ステップ 760：画像トリプレット内の 1 つの画像における“コーナー”表面ポイントを求める - -

本明細書では“良好なポイント”ともいうコーナーポイントは、表面の 3 つの次元のうちの複数に沿って勾配の変化が発生している表面位置である。

ステップ 760 “良好なポイントを求める”を実行するための好ましい方法については後述する。

10

20

30

40

50

h. ステップ 770： 画像トリプレット内の残りの 2 つの画像における対応するポイントを求める - - このステップを実行するための好ましい方法については以下の“対応の記述”で説明する。この方法は、各画像を平滑化し、デシメートするために使用する錐体を構築することを含む。図 12 A に示す画像に錐体構築プロセスを適用し、それにより、5 レベル錐体を生成した結果のシミュレーションを図 12 B ~ 図 12 F に示すが、これらの図は錐体の第 1 ~ 第 5 レベルを示す図である。

ステップ (i) および (j) を実行するための好ましい方法については、イスラエル特許出願第 113496 号と、同時係属の米国特許出願第 08 / 497224 号および第 08 / 787345 号と、米国特許第 5598515 号に記載されている。

ステップ (j) の出力は、ユークリッド座標で表した 1 組の 3D 表面ポイントである。10 任意選択で、以下の“測定ノイズを除去するための方法”で説明するように、域外の 3D 表面ポイントを取り除くために、上記の方法によって生成された 3D 表面ポイントを分析する。

ステージ 640： 再構築したローカル 3D 表面構造をスティッチし、注目物体のための完全実際表面構造を形成する

スティッチプロセスへの入力は、経路計画モジュールからの出力 2 および 3 である。図 18 に示す 1 対の部分オーバラップパッチについてスティッチプロセスを実行するための方法については、以下の“2D スティッチ”に詳述する。

一般に、スティッチプロセスは、以下の 2 つのステップを含む。

ステップ j - - 出力 2 に指定された画像の各対ごとに、その対内の第 1 および第 2 の画像トリプレットからそれぞれ再構築した第 1 の表面部分と第 2 の表面部分との回転かつ並進 20 3D 変換を計算する。

ステップ k - - それぞれの表面部分についてステップ (j) で計算した変換を操作することにより、再構築した表面部分を位置合わせして单一平面を形成する。

ステップ (j) は好ましくは、各画像トリプレット内に結像した物体の部分同士の近似空間関係を識別する外部入力を頼りにする。この入力は、図 1 の経路計画モジュール 80 によって供給されるかまたはロボット 10 の実際の動きに関する情報を含む場合があり、その情報はロボットのエンコーダによって生成され、かつ / あるいはオーバラップする隣接物体部分の画像に発生する特徴を識別することにより地理的関係を識別する人間のオペレータが生成した情報を含む場合もある。あるいは、空間関係に関する外部入力はまったく供給されない。

ステップ k - - 前述のように、ステップ k は、それぞれの表面部分についてステップ (j) で計算した変換を操作することにより、再構築した表面部分を位置合わせして单一平面を形成することを含む。

ステージ 650： 注目物体の実際の表面構造を所望の表面構造と比較する

1. 実際の表面構造を所望の表面構造に位置合わせする - - このプロセス用の座標変換は好ましくは、その上に注目物体 20 (図 1) が設置され、物体の CAD モデルに対するその 3D 位置が分かっているベース (図示せず) に接続された、少なくとも 3 つの好ましくは球形の位置合せ物体 (図示せず) を結像することによって生成される。位置合せ物体が球形である場合、その位置はその中心の位置によって決定される。この位置合せ物体は、米国特許出願第 08 / 497224 号に記載されている方法を使用して再構築され、その物体の残りの部分に“スティッチ”される。球形再構築の座標系と CAD モデルの座標系との変換は、Gene H. Colub および Charles F. Van Loan による Matrix Computations の第 2 版の 582 ページ (John Hopkins University Press, 1989 年) に記載されている方法などの既知の方法を使用して計算される。この変換は、実際の表面構造と所望の表面構造を位置合わせするように機能する。

m. 実際の表面構造と所望の表面構造との偏差を識別する - - 好ましくは、このステップは以下のように実行される。物体の各再構築化ポイントごとに、CAD モデルにおける最も近いかまたはほぼ最も近いパッチを求め、反復ニュートン - ラフソン手順により、“最

10

20

30

40

50

も近いポイント” すなわち現行の再構築化ポイントに最も近いかまたはほぼ最も近いパッチ上のポイントを求める。最も近いポイントと再構築化ポイントとの距離を計算する。好みしくは、求めた偏差は、色分け、たとえば、様々な範囲内の距離を表すための様々な色の使用によって表示される。

ステージ 650 は、ステージ 610 ~ 640 の出力用として可能な唯一の応用例であることに留意されたい。あるいは、たとえば、ステージ 610 ~ 640 の出力はリバースエンジニアリングに使用することができる。

また、本発明のソフトウェア構成要素は、望ましい場合、ROM (読取り専用メモリ) の形で実現できることに留意されたい。ソフトウェア構成要素は一般に、望ましい場合、従来の技法を使用してハードウェアで実現される。

10

図 4 ~ 図 14C に関連して、本発明の動作について一般的に説明する。

図 4 は、図 1 のシステムを使用して結像可能な典型的な 3 次元物体を示している。この場合、3 次元物体は自動車のスケールモデルであり、光学ヘッド 30 によって一度にその全体が見えるほど十分小さいものである。図 5 は、本発明の好ましい実施形態によりその表面上に投影されるスペックルを有する、図 4 の 3 次元物体を示している。

本発明のシステムは、図 4 および図 5 の 3 次元物体に対応する雲状ポイントを生成するように動作可能である。この雲状ポイントについては図 6 に示す。この組上ポイントは、図 4 および図 5 の物体の 3 次元表現である。

図 7 は、図 1 のシステムを使用して結像可能な他の典型的な 3 次元物体を示している。この3次元物体は、たとえば、車両のバンパーであり、大きすぎて光学ヘッド 30 によってその全体を見ることができない。図 8 は、本発明の好ましい実施形態によりその表面上のテクスチャ上にペイントした図 7 の 3 次元物体を示している。このペイント済みテクスチャは、本発明の好ましい実施形態により提供される投影スペックルテクスチャパターンのシミュレーションとして提示される。

20

図 9 は、図 7 および図 8 の 3 次元物体に対応し、図 1 のシステムによって生成される雲状ポイントを示している。

本発明の好ましい実施形態によれば、図 1 のシステムは、図 9 の雲状ポイントを同じ物体用の対応する CAD ファイルと比較するように動作可能である。図 7 の物体の典型的な CAD モデルは、図 10A (ワイヤフレーム) および図 10B (立体モデル) に示されており、その物体用の CAD ファイルを表している。

30

図 11 は、図 7 の物体の 3 次元表現と図 10A ~ 図 10B のその CAD モデルとの偏差を示す図である。

図 12A ~ 図 12F は、ステップ 770 の対応ポイント検出プロセスの一部を形成する錐体構築プロセスのシミュレーションである。

図 13A および図 13B は、図 8 のテクスチャを有する図 7 の物体上の隣接区域の 2 つの部分的にオーバラップする画像である。

図 14A および図 14B は、図 12A および図 12B の画像に対応し、本発明のシステムによって生成される雲状ポイントの一部分である。

図 14C は、図 12A および図 12B の画像の “ スティッチ済み ” 表現を表す、2 つの結合した雲状ポイントの組合せである。

40

明瞭にするために別々の実施形態に関連して説明した本発明の様々な特徴は、単一の実施形態において組み合わせて提供することもできることに留意されたい。これに対して、簡潔にするために単一の実施形態に関連して説明した本発明の様々な特徴は、別々にまたは特定の補助的組合せにおいて提供することもできる。

対応の記述

問題 : 3D 物体の 2 つの画像の場合、その 2 つの画像間のピクセル対ピクセルの対応 (一致) を求める。

解法 : 粗大から微細へ (階層的に) 実現したローカル移動の 5×5 領域の平方和階差 (SSD : Sum of Squares Difference) の 1 次ティラー展開に基づく微分法を使用する。 $f(x, y)$ および $g(x, y)$ は 2 つの画像を示し、 $f_x(x, y)$ は $f(x, y)$ の x 方向の微分である。

50

x, y および $f_y(x, y)$ は x, y における f の勾配の成分を示すものとする。オーバラップする小さい領域（たとえば、 5×5 のウィンドウ）内の x, y について

$$\sum (f(x+u, y+v) - g(x, y))^2$$

が最小になるように u, v が最適変換である場合、以下の微分方程式

$$uf_x + vf_y + (f - g) = 0 \quad (1)$$

は、すべての位置 x, y で成り立たなければならない。式 (1) は、

$$a = \sum f_x^2, \quad b = \sum f_y^2, \quad c = \sum f_x f_y, \quad d = \sum f_x f_x, \quad e = \sum f_y f_y$$

を計算することにより、 u, v について最小にすることができる。式中、 $f_t = f - g$ である。式 (1) 中の u, v は $M z = t$ という線形系の式の解であり、式中、“ M ” はマトリクス

$$\begin{bmatrix} a & c \\ d & e \end{bmatrix},$$

“ z ” はベクトル

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix},$$

“ t ” はベクトル

$$\begin{bmatrix} -d \\ -e \end{bmatrix}$$

である。 u, v の最適化は、周囲の $k \times k$ のウィンドウを使用するすべてのピクセルに適用される（ただし、“ k ” は好ましくは 5 に対応するが、他の値を使用することもできる）。すべての x, y 位置で u, v が求められると、すなわち、変位フィールド $u(x, y)$ および $v(x, y)$ が得られると、変位フィールドを使用して画像 f および g を位置合わせし（“ゆがませ”）、プロセスを繰り返す（それにより、ニュートン-ラフソン反復最適化を実行し、 f と g との SSD を最適化する u, v を求めることになる）。

パフォーマンスを改善するため、特に大きい画像変位に沿って、粗大から微細へ反復を適用する。これは、各画像をそれぞれが周波数範囲（低周波から高周波へ）を表す一連の画像に分割することによって行うことができる。その場合、 $k \times k$ のウィンドウのサイズは、低周波の場合は増加し、高周波の場合は減少する。同様に、画像を平滑化しデシメートして、反転錐体を作成することができる。この錐体の低い方のレベルは高周波成分を表し、高い方のレベル（より小さい画像）は低周波成分を表す。反復は、錐体の最高レベル（画像の最も粗大な表現）から始まり、その詳細レベルにとって最適の変位フィールドを生成する。次に変位レベルを増幅し、錐体内の 1 レベル下のレベル（より詳細なレベルを表す）に適用し、そのレベルにとって最適の変位フィールドをもう一度生成するために反復を続行する。このプロセスは、錐体の最低レベルに到達するまで続行する。

遠距離対応 (Far - Correspondence) の記述

問題： 3D 物体の 2 つの画像の場合、画像空間内のオーバラップの量を求める、すなわち、その 2 つの画像間のオーバラップ画像情報を位置合わせする水平変換および垂直変換の大きさ u, v を求める。

解法： 2 つの画像の平方和階差 (SSD) の 1 次テイラー展開に基づく微分法を使用する。 $f(x, y)$ および $g(x, y)$ は 2 つの画像を示し、 $f_x(x, y)$ および $f_y(x, y)$ は x, y における f の勾配の成分を示すものとする。オーバラップ領域内の x, y について

$$\sum (f(x+u, y+v) - g(x, y))^2$$

が最小になるように u, v が最適変換である場合、以下の微分方程式

10

20

30

40

50

$$uf_x + vf_y + (f - g) = 0 \quad (2)$$

は、すべての位置 x, y で成り立たなければならない。式(2)は、

$$a = \sum f_x^2, \quad b = \sum f_y^2, \quad c = \sum f_x f_y, \quad d = \sum f_t f_x, \quad e = \sum f_t f_y$$

を計算することにより、 u, v について最小にすることができる、式中、 $f_t = f - g$ である。式(2)中の u, v は $Mz = t$ という線形系の式の解であり、式中、“ M ”はマトリックス

$$\begin{bmatrix} a & c \\ d & e \end{bmatrix},$$

10

“ z ”はベクトル

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix},$$

“ t ”はベクトル

$$\begin{bmatrix} -d \\ -e \end{bmatrix}$$

20

である。この最適化基準を反復することにより、ニュートン-ラフソン反復最適化を実行し、 f と g との SSD を最適化する u, v を求めることになる。

良好なポイントを求める

問題： 1つの画像の場合、他の画像内の良好な一致を有する可能性のあるポイント、すなわち、そのローカル強度分布が“コーナー”に類似するポイントの位置 (x, y 位置) を求める。

解法： そのローカル強度変動が非常に低い(平らな強度プロファイル)かまたはそのローカル変動が直線の形状になっているポイントを消去することが好ましい。 $f(x, y)$ はその画像の強度マップを示し、 $f_x(x, y)$ および $f_y(x, y)$ は x, y における f の勾配の成分を示すものとする。成分

$$M_{11} = \sum f_x^2, \quad M_{12} = M_{21} = \sum f_x f_y, \quad M_{22} = \sum f_y^2$$

30

を有するポイント x, y について 2×2 のマトリックス M が定義され、その総和がそのポイント周辺のローカル領域におけるものである場合、そのポイントが“良好なポイント”である場合のみ、マトリックス M の階数は値 2 である。階数 2 の基準は、マトリックス M の 2 つの固有値の相対規模を検討することによって実施される。固有値同士の割合が 1 に近く、小さい方の固有値の値がオペレータによって設定可能な所定のしきい値を上回る場合、そのポイントは“良好”と見なされる。この基準は好ましくは f のすべてのポイント x, y について実施され、その基準を満たすポイントだけが良好なポイントと見なされる。

2 次元スティッチ

問題： 2組の画像が存在すると想定する。第1の組の画像、すなわち、画像 A_0, A_1, A_2 はある場面のパッチ A に対応し、第2の組の画像、すなわち、画像 B_0, B_1, B_2 はある場面のパッチ B に対応する。さらに、パッチ A と B がその場面で少なくともある程度はオーバラップすると想定する。両方の組の画像が同じカメラ構成で取られた場合、再構築プロセスでこれらの画像に同じ 3 線テンソルを適用して、その場面内の 3D 再構築ポイントを求めることができる(前述のイスラエル特許出願第 113496 号および米国特許出願第 08/497224 号(その開示は 1996 年 10 月 31 日に発行された国際公開 WO 96/34365 号に対応する)を参照のこと)。すなわち、 $\{p_i, p'_i, p''_i\}_i$ がそれぞれ第1の組の画像 A_0, A_1, A_2 内の対応ポイントである場合、しかも、 $\{q_j, q'_j, q''_j\}_j$ がそれぞれ第2の組の画像 B_0, B_1, B_2 内の対応ポイントである場合、どのような 3 つ組 $\{p_i, p'_i, p''_i\}_i$ についても同じ 3 線テンソルを使用して、その

40

50

場面内の 3 D 再構築化ポイント P_i を求めることができ、同様にどのような 3 つ組 $\{q_i, q'_i, q''_i\}_j$ についてもその場面内の 3 D 再構築化ポイント Q_j を求めることができ。その目的は、画像 $A_0, A_1, A_2, B_0, B_1, B_2$ を使用して、3 D 再構築化ポイント $\{P_i\}_i$ を 3 D 再構築化ポイント $\{Q_j\}_j$ に位置合わせすることである。

解法： 第 1 のステップは、第 1 の組の第 1 の画像 A_0 と第 2 の組の第 1 の画像 B_0 との稠密な対応を決定することである。特に、画像 A_0 内のポイントであって、パッチ A および B の共通部分に現れる任意のポイント p_i の場合、対応対 $\{p_i, q_i\}$ が得られる。この第 1 のステップを実行するための好ましい方法は、以下のステップを含む。

(a) 前述の“遠距離対応の記述”の方法を使用して優性変換を求める。

(b) 前述の“対応の記述”の方法を使用して残りの変位を求める。

q_i を求めた後、前述の“対応の記述”の方法を使用して画像 B_1 および B_2 内の q'_i および q''_i を求める。画像 A_0 内のポイント p_i がパッチ A 内のポイント P_i に対応する場合、トリプレット $\{q_i, q'_i, q''_i\}$ は同じポイント P_i に対応する。

その後、3 D ポイント Q_j を再構築するために 3 線テンソルを適用する。ただし、独立した 2 組の 3 D ポイントが存在した最初の状況とは異なり、現在では、実際には 2 通りの座標系、すなわち、第 1 の組の画像 A_0, A_1, A_2 を記録するために使用したカメラ構成に関連する第 1 の座標系と、第 2 の組の画像 B_0, B_1, B_2 を記録するために使用したカメラ構成に関連する第 2 の座標系において同じ組の 3 D ポイントを表す 2 組の 3 D ポイントが存在し、第 1 の座標系を第 2 の座標系に関連付けるための変換を求めることが望ましいことに留意されたい。特に、2 組の 3 D ポイント $\{P_i\}_i$ および $\{Q_j\}_j$ の場合、

$$\sum_i \|RP_i + t - Q_i\|^2$$

を最小にする回転 “R” と並進 (translation) “t” を含む変換が生成される。その操作では並進 “t” を消去することができる。というのは、回転 “R” を求めた後、適切な並進は単に $Q_j - RP_i$ にすぎず、 P_i がポイント $\{P_i\}_i$ における平均であり、 Q_j がポイント $\{Q_j\}_j$ における平均であることは明白であるからである。また、その平均 P および Q を生成した後、新しいポイントの組 $\{P_i - P\}_i$ および $\{Q_j - Q\}_j$ を取り入れた場合、これらの組のそれぞれの中心は原点であり、このため、ある組を他の組にマッピングするための最良変換は単に回転のみを必要とする。組 $\{P_i - P\}_i$ と $\{Q_j - Q\}_j$ との間の回転 R を生成するために既知のアルゴリズムを使用する

ことができ、たとえば、Gene H. Golub および Charles F. Van Loan による “Matrix Computations” (第 2 版) (Johns Hopkins University Press, 1989 年) の 582 ページを参照のこと。

測定ノイズを除去するための方法

問題： 2 つの画像間の一致対のリストまたはセットの場合、アウトライアを除去する。

解法： いくつかの例示的な方法がある。

1. 3 D 平滑性の仮定： 一致ポイントを使用し、対応する 3 D ポイントの 3 D 座標を再構築する。表面形状が平滑であり、曲率が低いと想定した場合、すべてのポイント P について、隣接ローカル領域内のポイントの 2 次表面近似を計算する。ローカル 2 次パッチからポイント P までの距離が所定のしきい値を上回る場合、 P はアウトライアである。

2. 光度特性： 2 つの画像内でおそらく一致する各対 p, q について検討する。対応プロセスを実行することにより、 p が q をその一致対と“見なす”場合であって、しかも対応プロセスを逆に実行することにより、 q も p をその一致対と“見なす”場合、 p, q はアウトライアとは見なされない。しかし、対応プロセスを実行することにより、 p が q をその一致対と“見なす”が、対応プロセスを逆に実行することにより、 q は p をその一致対と“見なさない”場合、 p, q はアウトライアと見なされる。

他の方法も使用することができる。

“写真”ファイルフォーマットの記述

以下のデータ構造は、“C”プログラミング言語の構文で写真画像ファイルのフォーマット

10

20

30

40

50

トを記述したものである。

```

typedef structure {
    ctImage_PIX_TYPE type; /*画像ピクセルのタイプ*/
    int width; /*画像の幅*/
    int height; /*画像の高さ*/
    int border; /*画像境界線のサイズ*/
    int depth; /*ピクセルマップの数*/
    void **pixmap_arr[ctImage_MAX_DEPTH];
    /*画像へのポインタは必ず画像の先頭を指し示し、境界線を含
    むすべてのブロックを指し示すわけではない。ピクセルマップ
    要素 img->pixmap_arr[d][i][j]へのアクセス、ただし、dは深さ
    レベルであり、-border≤i<width+border,
    -border≤j<height+border はピクセル座標である。*/
}
Typedef enum {
    ctImage_PIX_TYPE_SAME=0
    ctImage_PIX_TYPE_UBYTE=2
    ctImage_PIX_TYPE_SHORT=3
    ctImage_PIX_TYPE_LONG=5
    ctImage_PIX_TYPE_FLOAT=6
    ctImage_PIX_TYPE_DOUBLE=7
    ctImage_PIX_TYPE_ENUM_END
} ctImage_PIX_TYPE

```

本発明によるシステムは、専用ハードウェアまたは汎用コンピュータシステムあるいはその組合せから全部または一部を構築でき、そのどの部分も適当なプログラムによって制御できることに留意されたい。どのようなプログラムも、全部または一部が従来通りにシステムの一部を含むかまたはシステム上に格納することができ、あるいはネットワークまたはその他の従来通りに情報を転送するためのメカニズムにより全部または一部をシステムに供給することができる。さらに、システムは、システムに直接接続可能かまたはネットワークまたはその他の従来通りに情報を転送するためのメカニズムによりシステムに情報を転送できるオペレータ入力要素（図示せず）を使用してオペレータが供給する情報により操作し、かつ／またはその他の方法で制御できることに留意されたい。

上記の説明は本発明の具体的な実施形態に限定されている。しかし、本発明の利点の一部または全部を達成しながら、本発明の様々な変形および変更が可能であることに留意されたい。本発明の真の精神および範囲に該当する上記その他の変形および変更を含むことが請求の範囲の目的である。

新規であると請求し、米国特許により保護されることを希望するものは、以下の通りであ

10

20

30

40

50

る。

【図1】

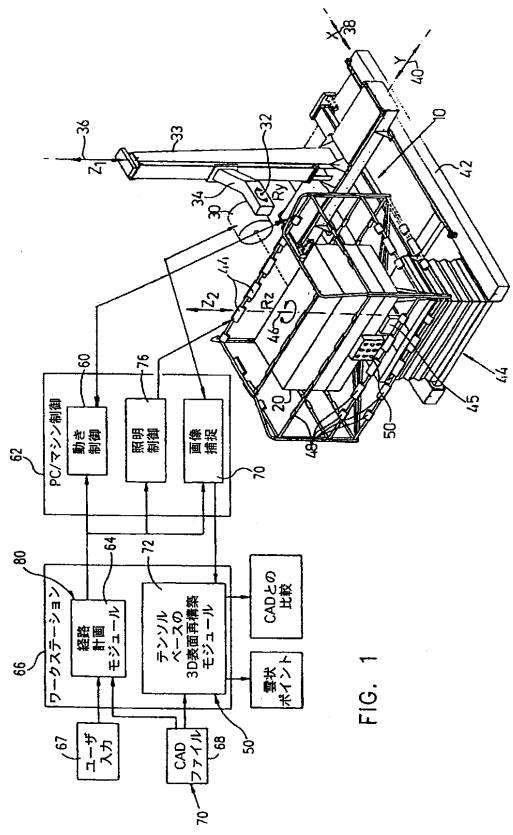


FIG. 1

【図2】

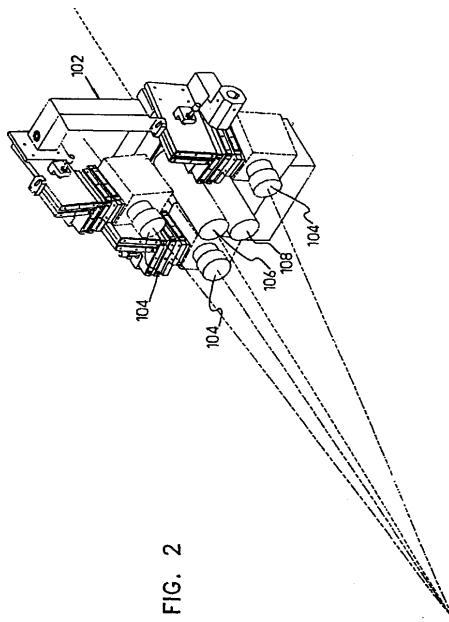


FIG. 2

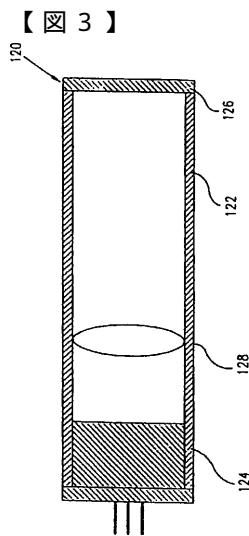


FIG. 3

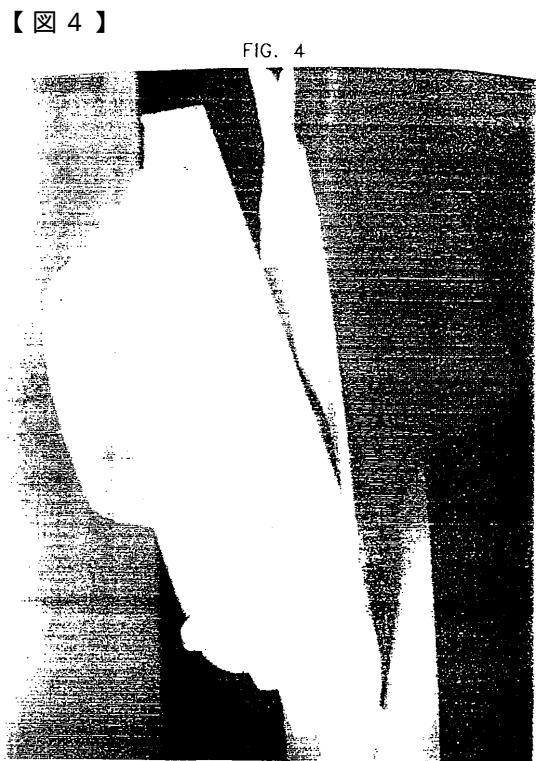
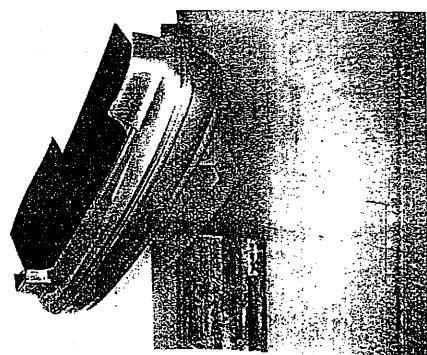


FIG. 6

【図7】

FIG. 7



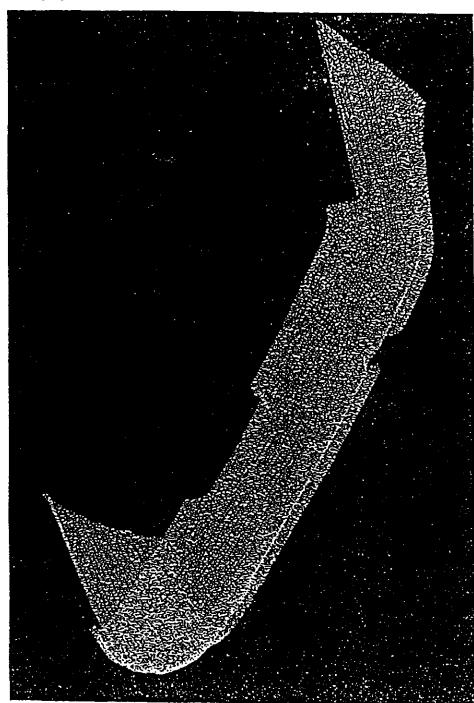
【図8】

FIG. 8



【図9】

FIG. 9



【図10A】

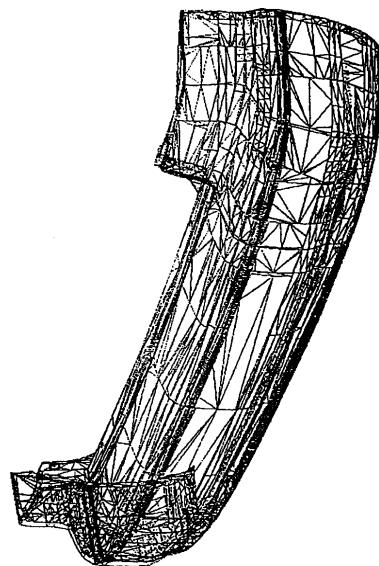


FIG. 10A

【図10B】

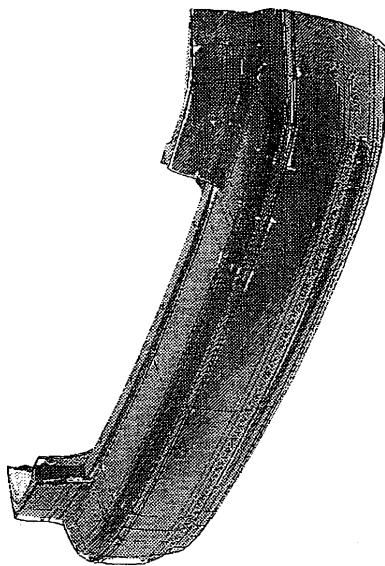


FIG. 10B

【図11】

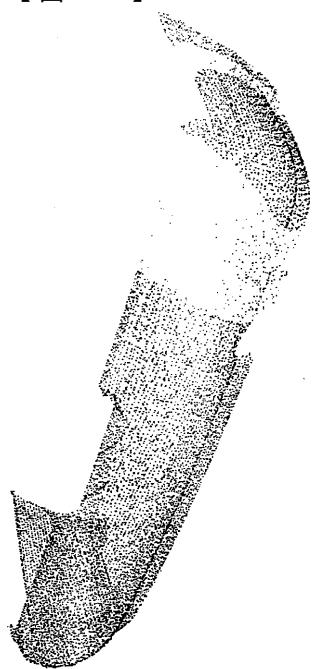


FIG. 11

FIG. 12C【図12C】

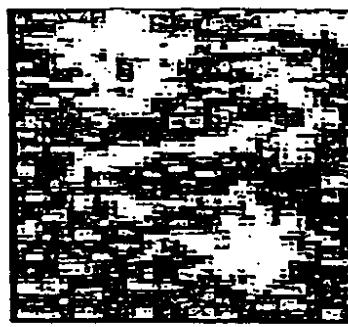


FIG. 12D 20 40 60

【図12D】

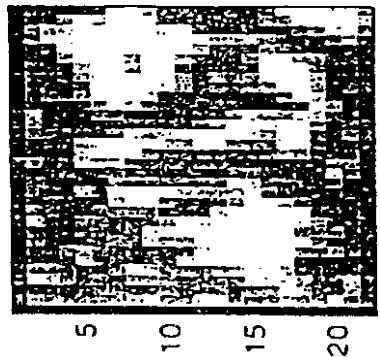


FIG. 12D 10 20 30 40

【図12A】

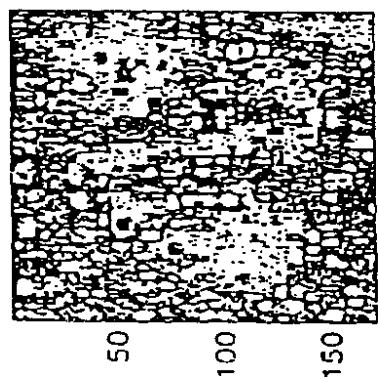


FIG. 12A

【図12B】

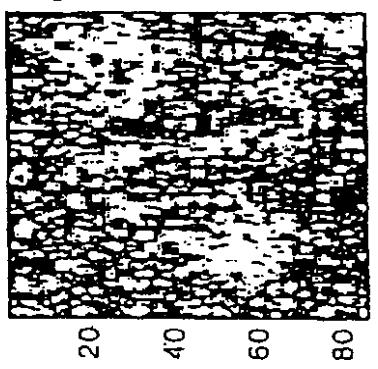


FIG. 12B

20 40 60 80 100 120

50 100 150 200 250

【図12E】

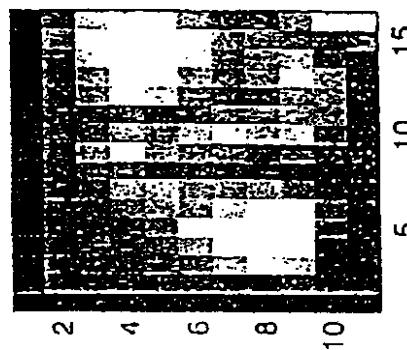


FIG. 12E

【図12F】

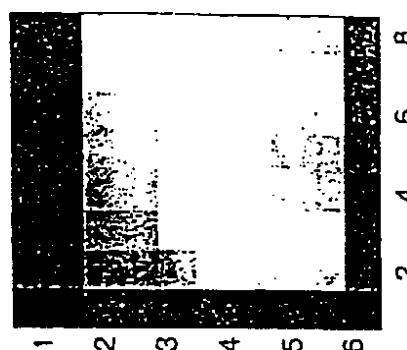


FIG. 12F

2 4 6 8 10 15

【図 13 A】

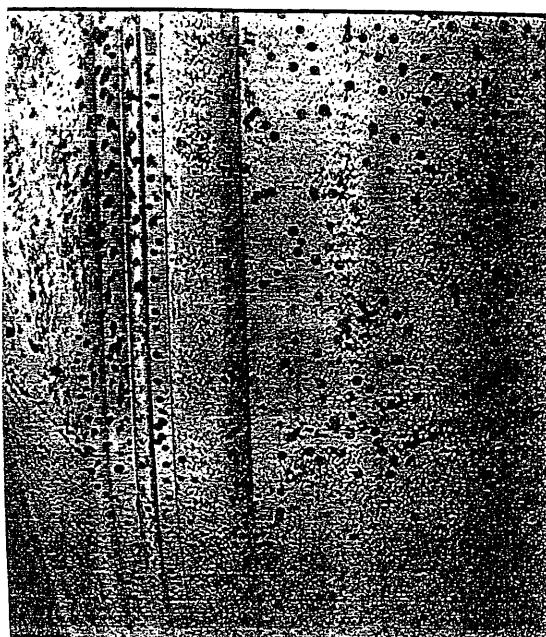


FIG. 13A

【図 13 B】

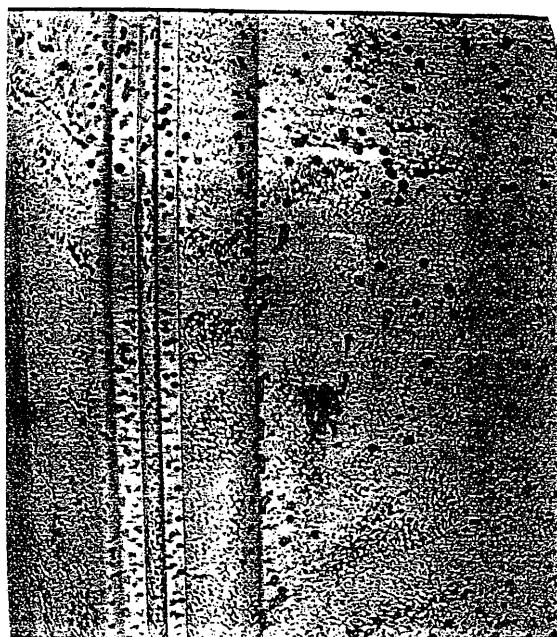


FIG. 13B

【図 14 A】

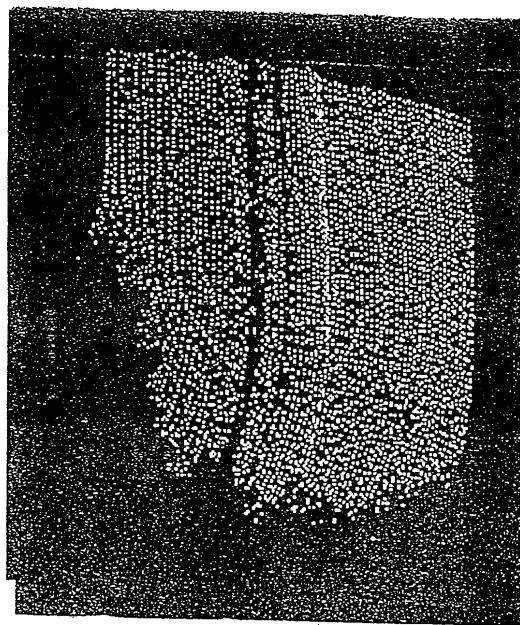


FIG. 14A

【図 14 B】

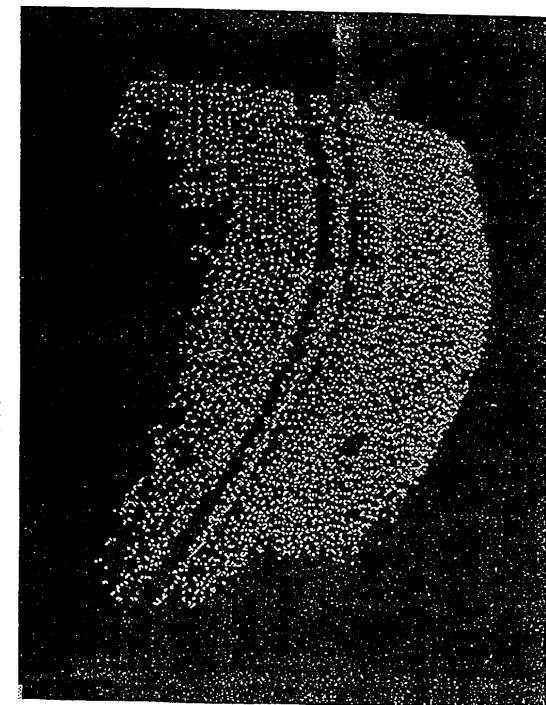


FIG. 14B

【図 14C】

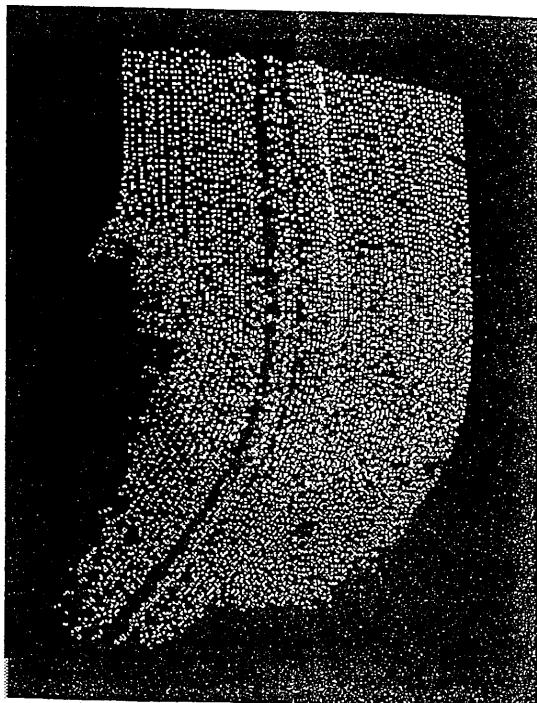
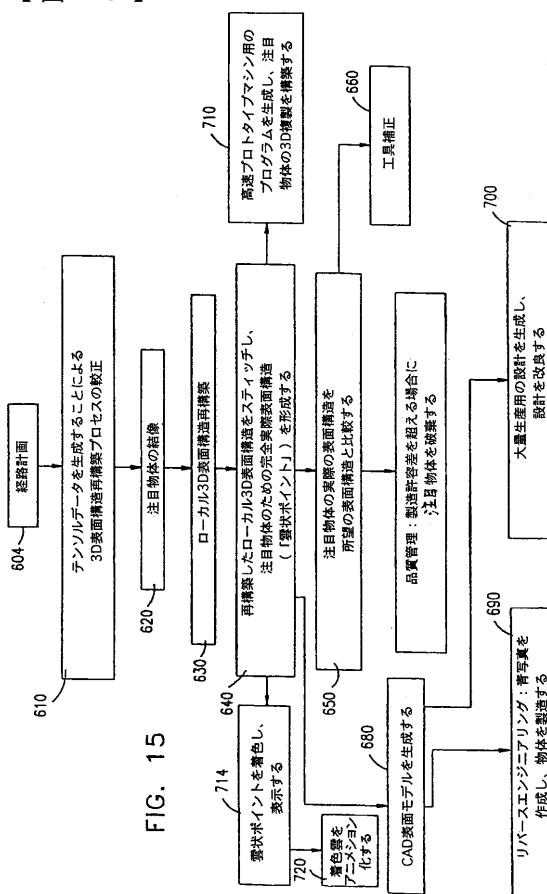


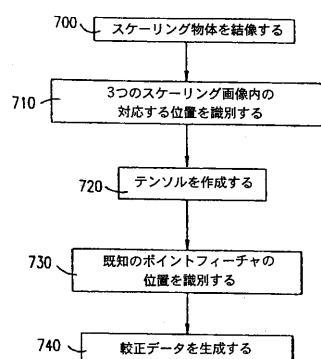
FIG. 14C

【図 15】



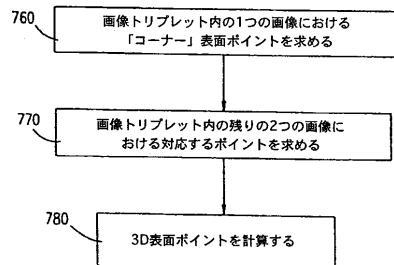
【図 16】

FIG. 16



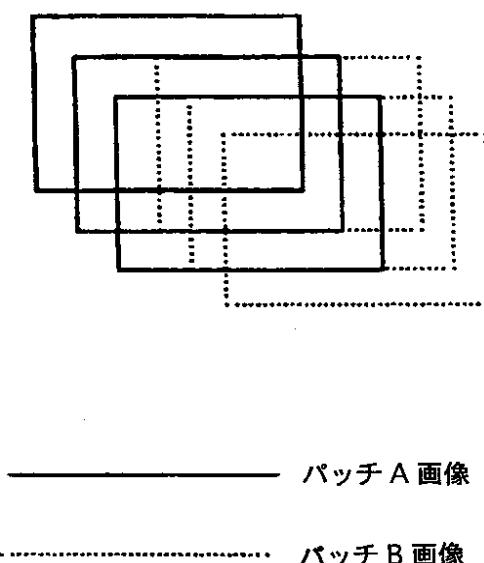
【図 17】

FIG. 17



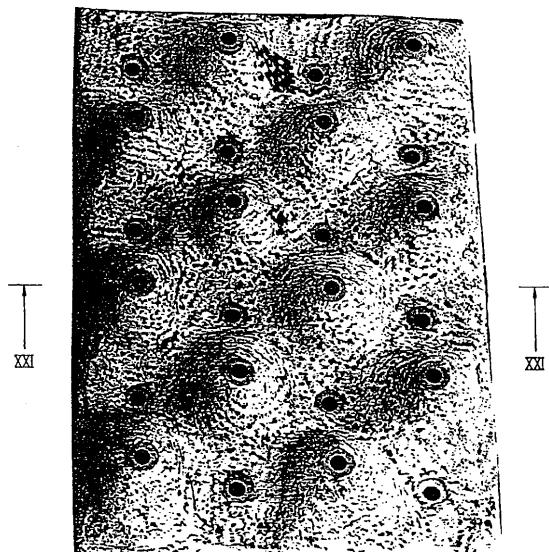
【図 18】

FIG. 18



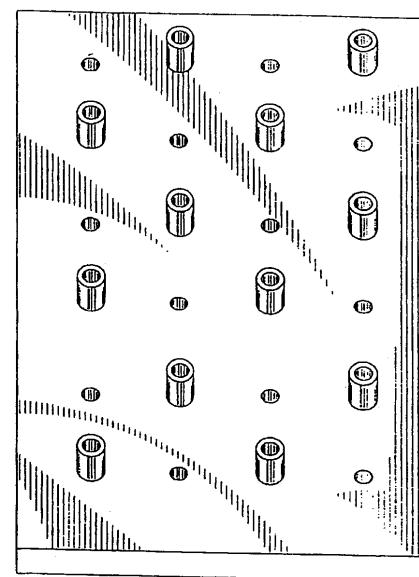
【図 19】

FIG. 19



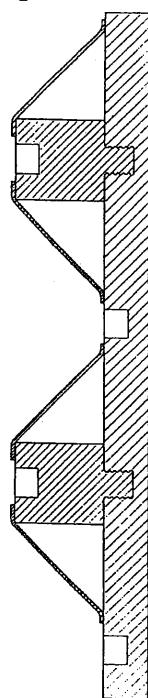
【図 20】

FIG. 20



【図 21】

FIG. 21



フロントページの続き

(72)発明者 ベナディー, メニー .
イスラエル国 69983 テルアビブ ミブトザ カデエシュ ストリート 14

(72)発明者 ルディッヒ, アリエ .
イスラエル国 63145 テルアビブ バグラショフ ストリート 40

(72)発明者 シャロム, タミル .
イスラエル国 69395 テルアビブ ラブ アシ ストリート 9

(72)発明者 シャシュア, アムノン .
イスラエル国 90805 メバセレット シオン メホー ナアマ 7

(72)発明者 ヨセフ, ヤール .
イスラエル国 75294 リショオン レジオン ワイツバード ストリート 9

(72)発明者 ゼルニック, イアン .
イスラエル国 45858 ラマート シエン ハマチャツズ ストリート 1

審査官 仲間 晃

(56)参考文献 特開平07-174537 (JP, A)
国際公開第96/034365 (WO, A1)
特開平04-086957 (JP, A)
特開平06-201337 (JP, A)
特開平01-311207 (JP, A)
特開平04-259809 (JP, A)
特開平07-098217 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G06T 1/00