

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2018-41431  
(P2018-41431A)

(43) 公開日 平成30年3月15日(2018.3.15)

(51) Int.Cl. F I テーマコード(参考)  
**G06T 7/60 (2017.01)** G06T 7/60 300Z 5L096  
 G06T 7/60 150B

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2016-251618 (P2016-251618)	(71) 出願人	504133110 国立大学法人電気通信大学
(22) 出願日	平成28年12月26日(2016.12.26)		東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1
(31) 優先権主張番号	特願2016-187554 (P2016-187554)	(74) 代理人	110000925 特許業務法人信友国際特許事務所
(32) 優先日	平成28年9月2日(2016.9.2)	(72) 発明者	▲高▼玉 圭樹 東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内
(33) 優先権主張国	日本国(JP)	(72) 発明者	石井 晴之 東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内
		(72) 発明者	辰巳 嵩豊 東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内

最終頁に続く

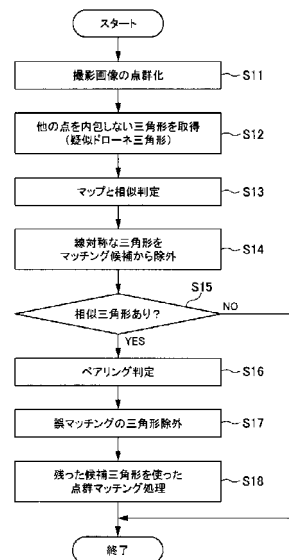
(54) 【発明の名称】 対応関係を考慮した点群マッチング方法、対応関係を考慮した点群マッチング装置及びプログラム

(57) 【要約】

【課題】 撮影画像とマップとの比較で、対応点が与えられなくても誤検出なく自己位置を高精度に推定できるようにする。

【解決手段】 撮影して得た画像内の特徴点の重心又は中心を点群化し、点群から三角形を取得し、得られた三角形から、ほぼ線対称な三角形を除外しながら、予め用意されたマップ内の点群で形成される三角形と形状の一致度を計算する。そして、一致度が閾値以上(例えば三角形の角度と辺の長さの差が閾値以下)の候補が検出された場合に、検索対象となる領域内に存在する複数の候補三角形同士の相対位置関係をマップ内の三角形と比較して、ペアリング判定要件を満たす候補三角形が存在するとき、そのペアリング判定要件を満たした候補三角形を構成する各点と、マップ内の点群とのマッチング処理を行い、画像の座標を求めるマッチング処理とを行う。

【選択図】 図8



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

撮影して得た画像内の特徴点の重心又は中心を点群化し、点群から三角形を取得する三角形取得処理と、

前記三角形取得処理で得た三角形から、ほぼ線対称な三角形を除外しながら、予め用意されたマップ内の点群で形成される三角形と形状の一致度を計算する相似判定処理と、

前記相似判定処理で一致度が閾値以上の候補が検出されたとき、検索対象となる領域内に存在する複数の候補三角形同士の相対位置関係を前記マップ内の三角形と比較して、ペアリング判定要件を満たすことを判定するペアリング判定処理と、

前記ペアリング判定処理でペアリング検定要件を満たす候補三角形が存在するとき、そのペアリング判定要件を満たした候補三角形を構成する各点と、前記マップ内の点群とのマッチング処理を行い、前記画像の座標位置を求めるマッチング処理と、を含む

10

対応関係を考慮した点群マッチング方法。

## 【請求項 2】

前記相似判定処理で一致度が閾値以上となる判断は、三角形の角度と辺の長さの差が閾値以下となる判断である

請求項 1 に記載の対応関係を考慮した点群マッチング方法。

## 【請求項 3】

前記三角形取得処理は、所定の角度以上の鈍角を有する三角形を除いた上で、前記画像内で、所定の個数まで形成されるようにした

20

請求項 1 又は 2 に記載の対応関係を考慮した点群マッチング方法。

## 【請求項 4】

前記ペアリング判定処理で複数の候補三角形同士の相対位置関係を比較する際には、複数の候補三角形で成す回転角度又は方向についても比較するようにした

請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の対応関係を考慮した点群マッチング方法。

## 【請求項 5】

前記マッチング処理を行う際には、候補三角形を構成する各点と前記マップ内の点群とのマッチング処理で、前記画像で示される自己位置座標と、前記画像の前記マップに対する回転角度と、前記マップの前記画像に対する倍率とが、最小になる位置を前記座標位置とする

30

請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の対応関係を考慮した点群マッチング方法。

## 【請求項 6】

撮影して得た画像内の特徴点の重心又は中心を点群化し、点群から三角形を取得する三角形形成部と、

前記三角形形成部で得た三角形から、ほぼ線対称な三角形を除外しながら、予め用意されたマップ内の点群で形成される三角形と形状の一致度を計算する相似判定部と、

前記相似判定部で一致度が閾値以上の候補が検出されたとき、検索対象となる領域内に存在する複数の候補三角形同士の相対位置関係を前記マップ内の三角形と比較して、ペアリング判定要件を満たすことを判定するペアリング判定部と、

前記ペアリング判定部でペアリング検定要件を満たす候補三角形が存在するとき、そのペアリング判定要件を満たした候補三角形を構成する各点と、前記マップ内の点群とのマッチング処理を行い、前記画像の座標位置を求めるマッチング処理部と、を備える

40

対応関係を考慮した点群マッチング装置。

## 【請求項 7】

撮影して得た画像内の特徴点の重心又は中心を点群化し、点群から三角形を取得する三角形取得手順と、

前記三角形取得手順で得た三角形から、ほぼ線対称な三角形を除外しながら、予め用意されたマップ内の点群で形成される三角形と形状の一致度を計算する相似判定手順と、

前記相似判定手順で一致度が閾値以上の候補が検出されたとき、検索対象となる領域内に存在する複数の候補三角形同士の相対位置関係を前記マップ内の三角形と比較して、ペ

50

アリング判定要件を満たすことを判定するペアリング判定手順と、

前記ペアリング判定手順でペアリング判定要件を満たす候補三角形が存在するとき、そのペアリング判定要件を満たした候補三角形を構成する各点と、前記マップ内の点群とのマッチング処理を行い、前記画像の座標を求めるマッチング手順と、をコンピュータ装置に実行させる

プログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、撮影した画像から得た点群とマップ上の点群とのマッチング処理を行って、座標位置を求める、対応関係を考慮した点群マッチング方法、対応関係を考慮した点群マッチング装置及びプログラムに関する。

10

【背景技術】

【0002】

従来、移動体に搭載されたカメラが撮影して得た画像から、移動体の位置を推定することが提案され、実用化されている。例えば、月面や惑星の探査を行う探査機に、位置推定を行う機能を搭載して、探査機が月面に着陸する際に、探査機に搭載されたカメラが撮影した画像と、事前に作成したマップとを比較して、探査機の位置を推定して、目的とする着陸位置を探すことが提案されている。

【0003】

20

従来、探査機が月面表面などの着陸地点を探す場合、基本的には「降りやすいところに降りる」手法であった。つまり、従来の手法は、カメラが撮影した画像から、着陸が可能な地点かどうかを判断して、降りやすい地点に着陸するものであった。

これに対して、近年、「降りたいところに降りる」手法の確立が望まれている。すなわち、例えば月面の特定の箇所のクレータを探査したい等、予め設定された着陸地点にピンポイントで着陸できる技術の確立が喫緊の課題になっている。

【0004】

このような正確な着陸地点に着陸するミッションを実現するためには、探査機がリアルタイムで正確な自己位置推定を行う必要がある。すなわち、探査機が撮影した月面表面の画像から検出したクレータと、事前に作成したクレータマップとを照合して、探査機が自己位置の推定を行う必要がある。ここで、探査機に搭載されるコンピュータ装置としては、非常に過酷な環境で長期間稼動する必要があるため、信頼性が十分に確保されたコンピュータ装置が使用されなければならない。したがって、探査機には、開発されてからある程度時間が経過して実績のある信頼性が確保された比較的古い機種（つまり演算処理能力が最新のものほど高くないコンピュータ装置）が搭載され、探査機の自己位置を推定する際の演算処理能力にも制約があり、極力少ない演算処理量で探査機の自己位置を推定する必要がある。

30

【0005】

クレータなどを撮影した画像と、クレータマップとを比較して、比較的少ない演算処理量で自己位置を推定する手法として、進化的三角形相似マッチングと称される手法がある。この手法は、本願の発明者らが先に提案した手法であり、画像内の各クレータの位置（中心位置など）を結ぶ三角形と、クレータマップ内の各クレータの中心位置を結ぶ三角形とを取得して、双方の三角形の一致度を基に、遺伝的アルゴリズムを用いて自己位置として推定するものである。ここでの遺伝的アルゴリズムとは、生物の進化を模擬した最適化手法の1つである。なお、進化的三角形相似マッチングの詳細については後述する。

40

【0006】

特許文献1には、月面や惑星面に何着陸するための画像処理方法についての記載がある。この特許文献1に記載された手法は、撮影した画像から平坦な地点を探し、探し当てた平坦な地点に着陸するものであり、上述した「降りやすいところに降りる」手法に相当する。

50

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【特許文献1】特開平11-144028号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

発明者らが先に提案した進化的三角形相似マッチングは、クレータなどを撮影した画像から探査機が自己位置を推定する上で好適な手法である。

しかしながら、進化的三角形相似マッチングを適用した場合であっても、自己位置を誤検出する場合があった。この誤検出する要因としては、クレータマップと撮影画像におけるクレータのピクセルずれ、三角形の一致度の計算で線対称と点対称の区別を考慮していない点などが挙げられる。また、月面のクレータマップ上には、撮影画像の三角形と相似な三角形が多数存在し、進化的三角形相似マッチングであっても、誤検出が発生し易い状況になっている場合も多い。

【0009】

なお、ここまでの説明では、月面などを探査する探査機が着陸地点を探す場合の課題を述べたが、探査機以外の様々な装置（移動体）において、撮影画像と予め用意されたマップとを比較して、自己位置を推定する場合に、同様の課題がある。

【0010】

本発明の目的は、撮影画像とマップとの比較で、誤検出なく自己位置を高精度に推定できる点群マッチング方法、対応関係を考慮した点群マッチング装置及びその方法を適用したプログラムを提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0011】

本発明の対応関係を考慮した点群マッチング方法は、撮影して得た画像内の特徴点の重心又は中心を点群化し、点群から他の点を内包しない三角形を取得する三角形取得処理と、三角形取得処理で得た三角形から、ほぼ線対称な三角形を除外しながら、予め用意されたマップ内の点群で形成される三角形と形状の一致度を計算する相似判定処理と、相似判定処理で一致度が閾値以上の候補が検出されたとき、検索対象となる領域内に存在する複数の候補三角形同士の相対位置関係をマップ内の三角形と比較して、ペアリング判定要件を満たすことを判定するペアリング判定処理と、ペアリング判定処理でペアリング判定要件を満たす候補三角形が存在するとき、そのペアリング判定要件を満たした候補三角形を構成する各点と、マップ内の点群とのマッチング処理を行い、画像の座標を求めるマッチング処理と、を含むことを特徴とする。

【0012】

また本発明の対応関係を考慮した点群マッチング装置は、上記点群マッチング方法の各処理を実行する部（処理部、判定部など）を備えたことを特徴とする。

さらに本発明のプログラムは、上記点群マッチング方法の各処理を実行する手順を、コンピュータ装置に実行させるプログラムとしたことを特徴とする。

【発明の効果】

【0013】

本発明によると、自己位置の推定精度を向上させることができ、誤判定を防いだ良好な座標検出が可能になる。

【図面の簡単な説明】

【0014】

【図1】クレータマップと撮影画像のクレータとを照合する例を示す説明図である。

【図2】遺伝的アルゴリズムを用いた進化的三角形相似マッチングの実行順序を示す説明図である。

【図3】進化的三角形相似マッチングにより候補領域を生成する処理の概要を示す説明図

10

20

30

40

50

である。

【図4】進化的三角形相似マッチングの概要を示す説明図である。

【図5】進化的三角形相似マッチングによる比較例を示す説明図である。

【図6】探査機の撮影姿勢によるピクセルずれの例を示す説明図である。

【図7】本発明の一実施の形態例によるシステム構成例を示すブロック図である。

【図8】本発明の一実施の形態例による処理の流れを示すフローチャートである。

【図9】本発明の一実施の形態例による疑似ドローン三角形の形成例を示す説明図である。

【図10】本発明の一実施の形態例による線対称な三角形の排除例を示す説明図である。

10

【図11】本発明の一実施の形態例による撮影画像とマップの領域とのペアリング検定例を示す説明図である。

【図12】本発明の一実施の形態例による撮影画像とマップの領域との点群マッチング例を示す説明図である。

【図13】本発明の一実施の形態例による探査機の高度が低い場合のクレータの見えた方の例を示す説明図である。

【図14】本発明の一実施の形態例による探査機の高度が高い場合のクレータの見えた方の例を示す説明図である。

【発明を実施するための形態】

【0015】

20

[1. 進化的三角形相似マッチングの説明]

まず、本発明の一実施の形態例を説明する上で、前提となる処理である、進化的三角形相似マッチングについて、図1～図6を参照して説明する。ここでは、図1に示すように、月を周回する探査機1に搭載されたカメラ1aが、月面2を撮影して、撮影画像3から探査機1の自己位置を判断する例を説明する。

探査機1に搭載されたコンピュータ装置（不図示）は、撮影画像3に含まれるクレータ31～34を点群化する。例えば、それぞれのクレータ31～34の重心位置が、不図示のコンピュータ装置により点で示した点群データとされる。

【0016】

また、探査機1に搭載されたコンピュータ装置には、予め月面2のクレータ位置を示すクレータマップ4が記憶されている。クレータマップ4も、各クレータの重心位置を点で示した点群データである。

30

そして、探査機1に搭載されたコンピュータ装置は、撮影画像3内のクレータ31～34の点群データと同じ配列の点群データ41～44を、クレータマップ4から探し出す処理を行う。クレータ31～34と点群データ41～44とが一致したとき、撮影画像3がクレータマップ4内の領域40aを撮影したものと判断され、クレータマップ4に基づいて探査機1の自己の月面上の座標位置が推定される。

【0017】

次に、撮影画像3内のクレータ31～34と、クレータマップ4内の点群とをマッチングする進化的三角形相似マッチング処理の手順を、図2を参照して説明する。

40

まず、コンピュータ装置は、クレータマップ4から候補となる領域を選択する（ステップS1）。

ここでは、最初にクレータの撮影画像から得た各点を結ぶ三角形を作成し、その三角形の中で、他のクレータの点を内包しない全三角形の内角と三角形の辺の長さを計算する。

次に、クレータマップ4を均等にN個（Nは任意の整数）に分割し、マップ4内の全範囲を網羅するような領域群を生成し、進化的三角形相似マッチングを行う際の初期集団とする。マップ4内の各領域は、例えば正方形で表現され、進化的三角形相似マッチング時の遺伝子は、例えば正方形の左下の点の座標位置（x座標，y座標）と正方形の長さ1で表現される。

なお、クレータマップ4を均等に分割する点については、一例であり、均等でない数に

50

分割してもよい。また、クレータマップ4内の全範囲を網羅する点も一例であり、特定の範囲のみから領域群を生成してもよい。

【0018】

そして、各領域内のクレータの点から、 $x$ 座標が大きい3点と小さい3点、 $y$ 座標が大きい3点と小さい3点をそれぞれ結んだ4つの三角形を取り出す。次に、 $x$ 座標が2番目から4番目までに大きい3点と小さい3点、 $y$ 座標が2番目から4番目までに大きい3点と小さい3点をそれぞれ結んだ4つの三角形を取り出す。このようにしてM個の三角形を形成し、それぞれの三角形の内角と辺の長さを計算する。

【0019】

次に、M個の三角形の内角及び辺の長さ、撮影画像内の全三角形の内角及び辺の長さとを比較する。この比較により、全三角形の中のそれぞれの三角形の内角の差と辺の長さの比の差を一致度と定義し、このようにして決定したM個の三角形の一致度が各領域の評価値となる。ここでは、内角の差と辺の長さの比の差が小さいほど相似な三角形であり、大きさも類似し、評価値が「0」に近い領域ほど、一致度が高い領域になる。このようにして評価値が「0」に近く、一致度が高い領域を選択する。実際には、評価値が「0」に近い閾値以下（例えば0.3以下）であるとき、一致しているとする。さらに、相似な三角形を含む領域の近くに、新しい領域を生成する。

10

【0020】

そして、選択された領域から、遺伝的アルゴリズムの交叉（ステップS2）と、進化的三角形相似マッチングに固有の移動の操作（ステップS3）とを行い、交叉及び移動によって新しい領域を生成する（ステップS4）。ここで、移動とは、先に説明した一致度が高く、大きさが類似している三角形を含むいずれかの方向に新しい領域を設定することをいう。

20

【0021】

次に、ステップS4で生成された全領域に対し、各領域が持つM個の三角形の中で内角の差と辺の長さの比の差が、最小の三角形の方向に近傍探索して、新たな領域へ移動する（ステップS6）。このとき、ある確率で突然変異が発生して（ステップS5）、クレータマップ4内のランダムな位置に新たな領域が変わる。そして、生成した領域群の中で、評価値が良い領域を一定数（K個）次世代の領域群に残し、残りの領域をステップS6で生成した領域と入れ替える（ステップS7）。

30

【0022】

ここまでのステップS1～S6の処理を繰り返し、1つの領域中のM個の三角形の中で一致度が高く、大きさが類似している同士でペアを作成して、重心間の距離を計算する。クレータマップ4と撮影画像3とで、これらの三角形ペアの重心間距離の誤差が一定値以下であれば、三角形の位置関係が画像とマップで等しいと判断する。そして、この三角形ペアの重心間距離の誤差が一定値以下のペアが一定の個数以上存在したとき、撮影画像3が、クレータマップ4の選択中の領域を撮影したものと判断して、領域の探索を終了する。

【0023】

図3～図5は、この進化的三角形相似マッチングの実行状況の例を示す図である。

40

まず、図3に示すように、探査機1が月面2を撮影して撮影画像3が得られると、撮影画像3内のクレータ31～34の重心位置を結ぶ三角形を取得する。そして、クレータマップ4から、候補となる三角形が存在する候補領域が取り出される。このとき、遺伝的アルゴリズムを用いて、候補領域の評価値が高い場所に確率的に高く新たな候補領域が生成される。例えば、図3に示すように、評価値が高い候補領域40aが取り出された後、その候補領域40a内で注目している三角形を含む新たな候補領域40bが、遺伝的アルゴリズムを用いて生成される。

【0024】

図4は、候補領域の評価値の生成例を示す。

図4に示すように、撮影画像3内の三角形の内角を  $\theta_i$ 、辺の長さを  $d_i$  とし、候補領

50

域内の三角形の内角を  $\theta_i$ 、辺の長さを  $d_i$  としたとき、次式に基づいて、評価値を得る。図4では、候補領域40i内の点45, 46, 47で形成される三角形の内角  $\theta_i$  と辺の長さ  $d_i$  の例を示す。[数1]式において、tri\_numは三角形の個数であり、生成した三角形の内角と辺の比の差の総和から、候補領域の評価値を得る。

【0025】

【数1】

$$\sum_{i=1}^{\text{tri\_num}} \sum_{i=1}^3 (|\cos \theta_i - \cos \theta'_i| + k * \left|1 - \frac{d}{d'}\right|) \quad (d' > d)$$

10

【0026】

図5は、ペアとなる三角形の重心間の距離を判断する処理を示す。

図5では、撮影画像3内の3つの三角形Ta, Tb, Tcと、マップ内の候補領域4x内の3つの三角形T1, T2, T3と比較した例を示す。

例えば、撮影画像3内の2つの三角形Ta, Tbの重心間距離を  $D_1$ 、候補領域4x内の2つの三角形T1, T2の重心間距離を  $D_1'$  としたとき、両距離  $D_1, D_1'$  の差を得る。同様に、三角形Ta, Tcの重心間距離を  $D_2$ 、候補領域4x内の2つの三角形T1, T3の重心間距離を  $D_2'$  としたとき、両距離  $D_2, D_2'$  の差を得、三角形Tb, Tcの重心間距離を  $D_3$ 、候補領域4x内の2つの三角形T2, T3の重心間距離を  $D_3'$  としたとき、両距離  $D_3, D_3'$  の差を得る。そして、それぞれのペアの三角形の距離の差(誤差)が一定値(閾値)以下であるとき、撮影画像3が、クレータマップ4内の候補領域4xと一致したと判断する。

20

【0027】

このように進化的三角形相似マッチングを適用することで、マップとの比較で自己位置を推定することができる。しかし、進化的三角形相似マッチングでは、誤った場所を自己位置と推定する誤判定が発生することがある。これは、探査機の高度差などから、クレータマップと撮影画像との間でピクセルずれが生じ、クレータマップ上に撮影画像と相似な三角形が多数形成されてしまうことに起因する。

【0028】

図6は、探査機の高度が想定した高度と異なっている場合に生じるピクセルずれの発生例を示す。

30

この例は、図6の右側に示すように、クレータマップの領域Maからの探査機の高度が、高度hと想定した例であり、探査機1で撮影した画像Paが、高度[h x 1.05]で撮影した画像であるとする。このとき、図6の左側に示すように、画像Paと候補となるクレータマップの領域Maとが一致したとしても、画像Pa内の点群p1, p2, p3, ...と、領域Ma内の点群m1, m2, m3, ...との位置が若干ずれてしまう。このように探査機1の高度ずれに起因して点群の位置がずれることで、位置を誤判定する可能性が高くなってしまう。

【0029】

また、一致度を計算するときには、クレータマップと撮影画像とで比較する三角形が点対称であるか線対称であるかを区別していなかった。そのため、探査機の自己位置でない場所であっても、撮影画像の三角形に線対称な三角形が存在すると、高い評価値が得られてしまう。ここでは、クレータマップと撮影画像の相似な三角形同士の間隔を重心間距離のみでしか比較していないので、クレータマップ上の自己位置でない場所に生成された候補領域内で、評価値が高い三角形のペアが存在すると、誤判定してしまう可能性が高くなると考えられる。

40

【0030】

また、進化的三角形相似マッチングは、クレータマップと撮影画像とで距離関係が一致する相似な三角形が一定数以上発見できた段階で探索を終了する。ここで、探査機の自己位置を推定する際には、撮影画像の中心座標をクレータマップ上の座標で示す必要がある

50

が、撮影画像はクレータマップに対して何度回転した状態かが分からないため、撮影画像の回転に依存しない計算をする必要がある。

本発明は、ここまで説明した進化的三角形相似マッチングの問題を解決した、精度の高い位置探索が可能な高度化された進化的三角形相似マッチングを提供するものである。

#### 【0031】

[ 2 . 本発明の一実施の形態例の構成 ]

図7は、本発明の一実施の形態例による進化的三角形相似マッチングを実行する点群マッチング処理システム100の構成を示すブロック図である。

点群マッチング処理システム100は、月面を探查する探查機1(図1)に搭載されたコンピュータ装置に、点群マッチング処理を実行するソフトウェアを実装することで実現されるシステムであり、図7はコンピュータ装置で実行される機能から見た構成を示した、いわゆる機能ブロック図である。

#### 【0032】

点群マッチング処理システム100には、探查機1に搭載されたカメラ1aが撮影した画像データが供給される。カメラ1aから供給された画像データは、画像キャプチャ部101に供給され、画像キャプチャ部101で1枚(1フレーム)の画像ごとに、その画像を構成する画素データ(ピクセルデータ)が取り出される。画像キャプチャ部101で取り出された画素データは、点群化処理部102に供給される。点群化処理部102では、画像に含まれる特徴点であるクレータの重心位置を点で示した点群化データとする処理が行われる。この点群化処理部102で点群化データを得る点群化処理は、既に知られた様々なアルゴリズムが適用可能である。

#### 【0033】

点群化処理部102で得られた点群化データは、三角形形成部103に供給される。三角形形成部103は、各点を結ぶ三角形を作成する三角形取得処理を行う。この三角形取得処理では、他のクレータの点を内包しない三角形を作成するようにする。但し、他のクレータの点を内包しない三角形を作成するのは一例であり、所定個(i個)内包点を含む三角形を生成するようにしてもよい。三角形形成部103での三角形形成処理の詳細については後述する。三角形形成部103で形成された三角形のデータは、相似判定部105に供給される。相似判定部105は、形成された三角形のデータと、マップ記憶部109に記憶された月面のクレータマップとを比較し、一致度が高く、大きさが類似している(一致度の高い)三角形を候補とする相似判定処理を行う。マップ記憶部109には、月面のクレータを点群化したクレータマップが記憶されている。

#### 【0034】

相似判定部105で得られた候補のデータは、マッチング候補選定部104に供給される。マッチング候補選定部104は、撮影画像内の三角形とクレータマップ内の三角形とのマッチング処理を行う上での前処理として、マッチング候補となる三角形を選定する。ここでは、一致度を計算する上で、マップ内の検索領域に存在する三角形に対して、その三角形と撮影画像内の線対称な三角形を候補から除外して、残りの三角形をマッチング候補とする処理を行う。

#### 【0035】

マッチング候補選定部104でマッチング候補を選定した、一致度が高い三角形のデータは、誤マッチング除外部106に供給される。誤マッチング除外部106は、一致度が高く、大きさが類似している複数の三角形のペアリング判定を行うと共に、一致度に関する誤差が閾値以下の複数の三角形の相対方向や相対位置が一致しているか否かのペアリング判定処理を行って、誤マッチングした候補を除外する処理を行う。一致度に関する誤差が閾値以下か否かを判断することで、一致度が特定の値以上に高いか否かを判断することになる。そして、誤マッチング除外部106で誤マッチングした候補を除外した一致度が高い候補の三角形のデータが、点群マッチング処理部107に供給される。

#### 【0036】

点群マッチング処理部107は、供給される一致度が高い候補の三角形のデータと、マ

10

20

30

40

50



ップ記憶部 109 に記憶された月面のクレータマップとを比較し、点群マッチング処理を行う。このとき、誤マッチング除外部 106 でのペアリング判定処理によって一致度が高く相対位置関係が正しいと判断された三角形を形成するクレータの点を用いて、点群マッチング処理が行われる。この点群マッチング処理については、既に図 1 ~ 図 5 を用いて説明した既に知られた処理が適用可能である。

#### 【0037】

点群マッチング処理部 107 は、撮影画像内の三角形とマップ記憶部 109 に記憶された点群の三角形とのマッチング処理を行い、最も一致度が高い候補領域を探し出す。そして、推定結果出力部 108 が、最も一致度が高い候補領域を参照して、撮影画像の中心座標を取得し、撮影画像の中心座標を推定結果として出力する。

10

#### 【0038】

##### [ 3 . 本発明の一実施の形態例の処理の流れ ]

図 8 は、点群マッチング処理システム 100 で実行される位置推定処理の流れを示すフローチャートである。

まず、点群マッチング処理システム 100 の点群化処理部 102 が、撮影画像の点群化処理を行い、画像に含まれる特徴点であるクレータの重心位置を点で示した点群化データを得る (ステップ S 11)。そして、三角形形成部 103 が、点群化処理で得られた点群化データから、他の点を内包しない三角形を取得する処理を行う (ステップ S 12)。この三角形取得時には、次に述べるように疑似ドロネ三角形を形成するようにする。

20

#### 【0039】

点群データから三角形を形成する従来手法では、例えば図 9 の左側に示すように、撮影画像 3 内の各領域内のクレータから x 座標 (水平座標) が大きい点を 3 点、x 座標が小さい点を 3 点、y 座標 (垂直座標) が大きい点を 3 点、及び y 座標が小さい点を 3 点選びだし、それぞれを結んだ三角形を形成するようにしていた。

この従来手法の三角形の形成処理では、図 9 の左側の撮影画像 3 内の三角形 T d , T e , T f , T g に示すように、鈍角 (ここでは  $170^\circ$  以上の角度) が含まれる三角形が形成しやすい。また、形成した三角形の内角は、従来、コサイン (cos) で表記するようであり、 $0^\circ$  もしくは  $180^\circ$  に近いほど、隣接する角度の差は小さく計算され、 $90^\circ$  に近いほど隣接する角度の差は大きく計算される。このため、図 9 の例では、鈍角が含まれる三角形 T e は、鈍角を含まない三角形 T d よりも高い評価を得やすい。

30

#### 【0040】

このような問題を解決するために、本発明の一実施の形態例では、撮影画像から三角形を形成する際に、領域の x 座標が大きい 1 点、x 座標が小さい 1 点、y 座標が大きい 1 点、及び y 座標が小さい 1 点を基準として、その基準となるクレータとそのクレータに距離が最初のものから 2 点を使用して形成される疑似ドロネ三角形を形成する。ここでは、計算量を削減しつつ、可能な限り鈍角な三角形を作成しないように分割を行うため、その鈍角な三角形が形成されないことを必ずしも保証していない分割法である疑似ドロネ三角形分割法を適用したが、計算が可能であれば、正式なドロネ三角形分割法を適用してもよい。

#### 【0041】

その後、領域内の x 座標が 2 番目に大きい点、2 番目に小さい点、y 座標が 2 番目に大きい点、及び 2 番目に小さい点のクレータを基準にして、疑似ドロネ三角形を形成する。以下、この処理を領域内で順に行い、M 個 (所定個) 三角形が形成されるまで続けて行う。

40

このように疑似ドロネ三角形を形成するようにしたことで、例えば図 9 の右側に示すように、三角形 T d , T h , T i , T j のように、鈍角が含まれない三角形が形成されるようになる。

#### 【0042】

図 8 のフローチャートの説明に戻ると、ステップ S 12 において、三角形形成部 103 が三角形を形成した後、相似判定部 105 が撮影画像 3 内の候補三角形と、クレータマッ

50

ブ内の三角形との相似判定を行う（ステップS 1 3）。この相似判定としては、各三角形の内角や辺の長さなどの条件の類似度から、相似した三角形を判定する。

その後、マッチング候補選定部 1 0 4 が、相似の計算をして類似していると判定された三角形の中から、撮影画像内の線対称な三角形をマッチング候補から除外する処理を行う（ステップS 1 4）。

従来の点群マッチング手法では、三角形の一致度を比較する際に、比較する三角形が線対称であるのか点対称であるのかは区別していなかった。クレータマップと撮影画像とで相似な三角形は点対称な関係にはなるが、線対称な関係にはならない。そのため、線対称な三角形が高い評価値を得ると、誤判定の可能性が高くなる。従来は、領域内の三角形の相似なものとして実際には正しくない線対称な三角形が選ばれてしまうことで、適切な一致度の計算ができない状況であった。

10

【 0 0 4 3 】

ここで本実施の形態例では、例えば図 1 0 に示すように、撮影画像 3 とクレータマップ 4 とを比較する際に、例えばクレータマップ内の三角形 T 1 1 と比較する撮影画像 3 の三角形として、その三角形 T 1 1 とほぼ点対称な三角形 T m , T o とし、三角形 T 1 1 とほぼ線対称な三角形 T k , T n を候補から排除し、排除した三角形 T k , T n については、ペアリングの計算を行わないようにする。なお、図 1 0 はペアリングの原理が分かりやすいように、鈍角が含まれる三角形の例で示す。

【 0 0 4 4 】

再び図 8 のフローチャートの説明に戻ると、点群マッチング処理システム 1 0 0 は、一致した三角形の候補が検出されたか否かを判断する（ステップS 1 5）。そして、一致した三角形の候補が検出された場合(ステップS 1 5 の Y E S)、誤マッチング除外部 1 0 6 がペアリング判定に移る（ステップS 1 6）。このステップS 1 6 で、誤マッチング除外部 1 0 6 は、撮影画像 3 内の複数の候補三角形と、クレータマップ内の一致度が高い三角形とを比較してペアリング判定を行う。

20

【 0 0 4 5 】

従来は、ペアリング判定では例えば図 5 に示すように、複数の三角形同士の重心間の距離 D 1 , D 2 , D 3 を比較していたが、そのような重心間の距離のみでは正確に判断できない場合がある。本発明の一実施の形態例では、相似な三角形の距離関係だけでなく、方向や回転の相対関係も比較するようにしている。

30

例えば、図 1 1 の上側の撮影画像 3 の 2 つの三角形 T p , T q と、クレータマップ内の候補領域 4 y の 2 つの三角形 T 1 2 , T 1 3 とを比較した例として示すように、撮影画像とクレータマップ内の候補領域内に形成された一致度の高い三角形で 2 組になる全組み合わせに対して、重心間の距離と長辺の距離を用いて比較する。このとき、2 つの三角形の重心間の距離を示すベクトル d\_center、d\_center と、重心間ベクトルの始点である三角形の長辺ベクトル d\_1 , d\_1 からなる内積から、例えば次の [ 数 2 ] 式を使って三角形の相対方向を判断し、[ 数 3 ] 式を使って三角形の相対距離を得て判断する。

【 0 0 4 6 】

【 数 2 】

$$\left| d_1 \cdot d_{center} - \frac{d'_1 \cdot d'_{center}}{\gamma^2} \right| < MIN\_D2$$

40

【 0 0 4 7 】

【 数 3 】

$$\left| d_1 \times d_{center} - \frac{d'_1 \times d'_{center}}{\gamma^2} \right| < MIN\_D2$$

【 0 0 4 8 】

[ 数 2 ] 式において、内積の差が、MIN\_D2以下であるとき、クレータマップの領域と三角形の相対方向が一致すると判断する。また、[ 数 3 ] 式においては、外積の差が、MIN\_

50

D2以下であるとき、クレータマップの領域と三角形の相対距離が一致すると判断する。

さらに、図 1 1 の下側の撮影画像 3 の 2 つの三角形  $T_p$  ,  $T_q$  と、クレータマップ内の候補領域 4 y の 2 つの三角形  $T_{12}$  ,  $T_{13}$  とを比較した例として示すように、2 つの三角形の長辺ベクトルのなす角度  $\theta$  ,  $\theta'$  を計算して比較する。この比較時には、重心位置を中心として、各ベクトルの角度を計算して比較してもよい。ここでの比較時には、例えば次の [ 数 4 ] 式を使って三角形の角度を判断する。

【 0 0 4 9 】

【 数 4 】

$$\cos(\theta - \theta') > \text{MIN\_DIFF2}$$

10

【 0 0 5 0 】

[ 数 4 ] 式において、角度の差が、MIN\_DIFF2以下であるとき、クレータマップの領域と三角形の相対方向が一致すると判断する。ここでは、三角形  $T_q$  と三角形  $T_{13}$  の回転角が一致する（つまりベクトル  $d_1$  に対するベクトル  $d_2$  の角度と、ベクトル  $d_1$  に対するベクトル  $d_2$  の角度が一致する）ことを判断している。

これらの [ 数 2 ] 式、[ 数 3 ] 式、及び [ 数 4 ] 式の全ての条件を満たしたとき、クレータマップと撮影画像間の三角形の相対位置関係は一致すると判断し、候補領域内にこのペアリング判定要件を満たしたペアが一定数以上存在したとき、その候補領域の場所が、探査機 1 の撮影地点であると判断する。

【 0 0 5 1 】

20

再び図 8 のフローチャートの説明に戻ると、誤マッチング除外部 1 0 6 は、ステップ S 1 6 においてペアリング判定を行った結果に基づいて、誤マッチングの三角形を候補三角形から除外する処理を行う（ステップ S 1 7）。

そして、点群マッチング処理部 1 0 7 は、大きさと角度が類似している三角形同士の相対位置関係が正しいと判断された三角形を形成するクレータを用いて、点群マッチング処理を行って、撮影画像の中心座標位置を求める処理を行う（ステップ S 1 8）。そして、推定結果出力部 1 0 8 が、算出した中心座標位置を自己位置の座標位置として出力する。

【 0 0 5 2 】

ステップ S 1 8 での点群マッチング処理時には、例えば図 1 2 に示す状態で点群マッチング処理を行う。図 1 2 の左側は撮影画像内の点群 ( $i, j, k, \dots$ )、右側はクレータマップ内の候補領域の点群 ( $i, j, k, \dots$ ) を示す。

30

図 1 2 において、 $C$  は撮影画像のクレータ群の基準点の位置ベクトル、 $C$  は候補領域のクレータ群の重心の位置ベクトル、 $q_i, q_i$  は、各点の基準点あるいは重心からの位置ベクトルである。

ここで、[ 数 5 ] 式及び [ 数 6 ] 式に示す  $Q_i, Q_i$  と、 $C, \theta, s$  を求める演算を行う。[ 数 5 ] 式に示す  $Q_i, Q_i$  は、各点の位置ベクトルを表している。[ 数 6 ] 式に示す  $C, \theta, s$  は、それぞれ自己位置座標、撮影画像の回転角、クレータマップの撮影画像に対する倍率を表す。この自己位置座標  $C$ 、回転角  $\theta$ 、及び倍率  $s$  が最小になる値を求めることで、撮影画像の中心座標位置を求める。

【 0 0 5 3 】

40

【 数 5 】

$$Q_i = C + sR_{\theta}q_i \quad (i = 1 \sim n) \quad n: \text{点数}$$

【 0 0 5 4 】

【 数 6 】

$$f(C, \theta, s) = \sum_{i=0}^n \|Q_i - Q'_i\|^2$$

【 0 0 5 5 】

[ 4 . 探査機の高度が想定高度と異なるときの撮影画像の例 ]

上述したように、本発明の実施の形態例では、自己位置を求める際に、クレータマップ

50

の撮影画像に対する倍率を求めることができる。このクレータマップの撮影画像に対する倍率は、探査機 1 の高度が想定高度と異なる場合に生じるものである。

次に、探査機 1 の高度が想定した高度よりも低い場合と高い場合とで、撮影画像がどのように変化するかを、図 1 3 及び図 1 4 を用いて説明する。

【 0 0 5 6 】

図 1 3 は、探査機 1 の高度が想定よりも低いときの撮影画像内でのクレータの見え方を示す。例えば、図 1 3 の左側に示すように、想定した高度で探査機 1 に搭載されたカメラ 1 a は、画角  $= 15^\circ$  で撮影して、水平方向及び垂直方向のピクセル数  $512 \times 512$  の画像 3 を取得するものとする。

ここで、図 1 3 の中央に示すように、探査機 1 が想定した高度  $h$  よりも 5 % 低い高度でカメラ 1 a が撮影した画像 3 が得られたとする。このとき、画像 3 で得られるクレータは、本来の高度でのピクセル数と比較して、ピクセル数  $486 \times 486$  の範囲を撮影したものに相当する。したがって、探査機 1 が想定した高度  $h$  よりも 5 % 低い高度のときには、探査機 1 に搭載されたカメラ 1 a が撮影した画像 3 は、水平方向及び垂直方向のピクセル数  $512 \times 512$  の範囲が、本来の高度で撮影した場合のピクセル数  $486 \times 486$  の範囲を示すようになる。このように、探査機 1 の高度が低い状況では、撮影画像 3 内のクレータの位置は、クレータマップ内のクレータの位置よりも中心から放射状に外側にずれる。このずれは、画像の外側になるほど、ずれ量が大きくなる。

【 0 0 5 7 】

図 1 4 は、探査機 1 の高度が想定よりも高いときの撮影画像内でのクレータの見え方を示す。この例でも図 1 3 の例と同様に、図 1 4 の左側に示すように、想定した高度で探査機 1 に搭載されたカメラ 1 a は、画角  $= 15^\circ$  で撮影して、水平方向及び垂直方向のピクセル数  $512 \times 512$  の画像 3 を取得するものとする。

ここで、図 1 4 の中央に示すように、探査機 1 が想定した高度  $h$  よりも 5 % 高い高度でカメラ 1 a が撮影した画像 3 が得られたとする。このとき、画像 3 で得られるクレータは、本来の高度でのピクセル数と比較して、ピクセル数  $537 \times 537$  の範囲を撮影したものに相当する。したがって、探査機 1 が想定した高度  $h$  よりも 5 % 高い高度のときには、探査機 1 に搭載されたカメラ 1 a が撮影した画像 3 は、水平方向及び垂直方向のピクセル数  $512 \times 512$  の範囲が、本来の高度で撮影した場合のピクセル数  $537 \times 537$  の範囲を示すようになる。このように、探査機 1 の高度が高い状況では、撮影画像 3 内のクレータの位置は、クレータマップ内のクレータの位置よりも中心から放射状に内側にずれる。このずれは、画像の外側になるほど、ずれ量が大きくなる。

【 0 0 5 8 】

このように探査機 1 の高度のずれが生じると、クレータマップと撮影画像とのずれが発生するが、上述した [ 数 6 ] 式に示すように、自己位置座標  $C$  を求める際に、回転角  $\theta$  及び倍率  $s$  を考慮することで、精度の高い自己位置の算出が可能になる。

【 0 0 5 9 】

[ 5 . 実験結果の例 ]

次に、本発明の一実施の形態例によって、クレータを撮影した画像とクレータマップとを比較して、自己位置を推定する処理を実行した実験例について説明する。

ここでは、実験例 1 ( 表 1 ) ~ 実験例 6 ( 表 6 ) として、次に示す条件での例とする。

・実験例 1 ( 表 1 ) : 撮影画像とクレータマップとの想定高度に差がなく、撮影画像の回転がない例。

・実験例 2 ( 表 2 ) : 撮影画像とクレータマップとの想定高度に差がなく、撮影画像がクレータマップに対して  $30^\circ$  回転した例。

・実験例 3 ( 表 3 ) : 撮影画像がクレータマップの想定高度よりも 5 % 低い高度で撮影され、撮影画像の回転がない例。

・実験例 4 ( 表 4 ) : 撮影画像がクレータマップの想定高度よりも 5 % 低い高度で撮影され、撮影画像がクレータマップに対して  $30^\circ$  回転した例。

・実験例 5 ( 表 5 ) : 撮影画像がクレータマップの想定高度よりも 5 % 高い高度で撮影さ

10

20

30

40

50

れ、撮影画像の回転がない例。

・実験例6(表6)：撮影画像がクレータマップの想定高度よりも5%高い高度で撮影され、撮影画像がクレータマップに対して30°回転した例。

【0060】

【表1】

高度差なし、回転なし

	1	2	3	4	5	Ave
<=3pix(%)	100	99	100	100	93	98.4
<=5pix(%)	100	100	100	100	99	99.8
<=15pix(%)	100	100	100	100	99	99.8
Time(s)	1.36	1.33	0.74	2.02	1.33	1.36

10

【0061】

【表2】

高度差なし、30°回転

	1	2	3	4	5	Ave
<=3pix(%)	100	98	100	94(4)	94	97.2
<=5pix(%)	100	100	100	96(4)	97	98.6
<=15pix(%)	100	100	100	96(4)	100	99.2
Time(s)	1.68	1.33	1.40	2.38	1.58	1.67

20

【0062】

【表3】

5%低い高度、回転なし

	1	2	3	4	5	Ave
<=3pix(%)	100	100	100	99	91	98
<=5pix(%)	100	100	100	100	100	100
<=15pix(%)	100	100	100	100	100	100
Time(s)	2.08	2.16	1.85	2.58	1.62	2.06

30

【0063】

【表4】

5%低い高度、30°回転

	1	2	3	4	5	Ave
<=3pix(%)	100	100	100	99	89	97.6
<=5pix(%)	100	100	100	99	100	99.8
<=15pix(%)	100	100	100	99	100	99.8
Time(s)	3.77	2.65	2.44	2.77	1.97	2.65

40

【0064】

【表5】

5%高い高度、回転なし

	1	2	3	4	5	Ave
<=3pix(%)	100	92	54	78	87	82.2
<=5pix(%)	100	100	100	100	100	100
<=15pix(%)	100	100	100	100	100	100
Time(s)	3.45	1.50	1.80	2.44	1.93	2.22

【0065】

【表 6】

5%高い高度、30°回転

	1	2	3	4	5	Ave
<=3pix(%)	100	98	98	72	93	92.2
<=5pix(%)	100	100	100	100	100	100
<=15pix(%)	100	100	100	100	100	100
Time(s)	5.14	1.59	4.23	2.83	2.88	3.34

## 【0066】

表1～表6に示す各実験例では、撮影画像に対して100回試行したときの、自己位置の推定に成功した数（即ち自己位置の推定成功率）と、推定に要した時間を示す。表1～表6に示す1, 2, 3, 4, 5の番号は、それぞれ撮影画像の番号を示し、それぞれ別の画像で実験した例を示す。ここでの自己位置の推定成功率は、自己位置として出力した座標と、答えであるクレタマップ上の撮影画像の中心座標との誤差が、3ピクセル、5ピクセル、15ピクセル以内であったときの3つの例を示す。なお、推定成功率の数値の隣に、括弧で囲って示す数値は、誤判定した回数（率）を示す（例えば、表2に記載）。

推定時間は、撮影画像100枚に対して試行して自己位置推定に成功するまでに要した平均時間（秒）を示す。この平均時間は、実際の探査機1に搭載されるコンピュータ装置の計算能力を想定して、換算した時間である。

## 【0067】

これらの表1～表6から分かるように、表1～表6のいずれの実験例の状況でも、5ピクセル以内の誤差でほぼ100%の自己位置推定が実現できている。また、推定時間は、高度差がある状況において、撮影画像1と撮影画像3で、3秒を超えたときがあり、特に5%高度が高い状況で30°回転して撮影した画像の場合には、平均推定時間が3秒を超えた状況が発生しているが、それ以外の状況では、3秒以内が確保されている。また、自己位置の推定成功率についても、高度差なしで30°回転した状況の撮影画像4の場合（表2）に、5ピクセル以内で成功率96%であるが、他はほぼ100%であり、誤判定する回数が従来手法よりも大幅に低下していることが分かる。

## 【0068】

以上説明したように本発明の実施の形態例によると、撮影画像から自己位置を推定する精度が向上すると共に、短時間で推定演算が行えるようになるという効果を有する。

## 【0069】

## [6. 変形例]

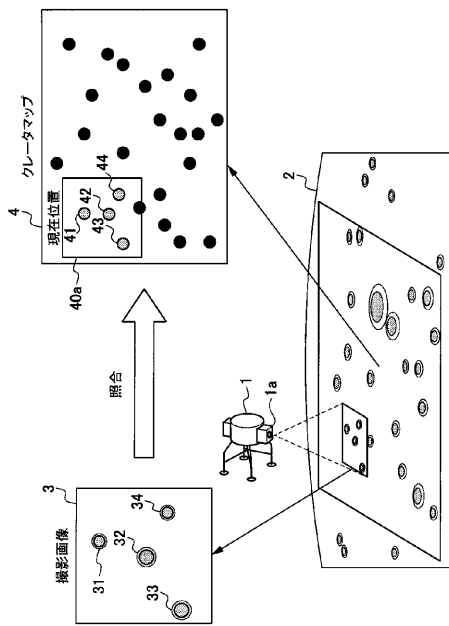
なお、ここまで説明した処理では、探査機1に搭載されたカメラ1aが月面を撮影して、予め用意されたクレタマップとの比較で自己位置を推定する場合に適用した。これに対して、本発明は、撮影した画像と、予め用意されたマップとを比較して自己位置を推定する様々な処理に適用が可能である。例えば、地上を走行又は飛行する移動体に搭載されたカメラが撮影した画像と、予め用意されたマップとの比較で、移動体の自己位置を推定する処理に適用してもよい。

## 【符号の説明】

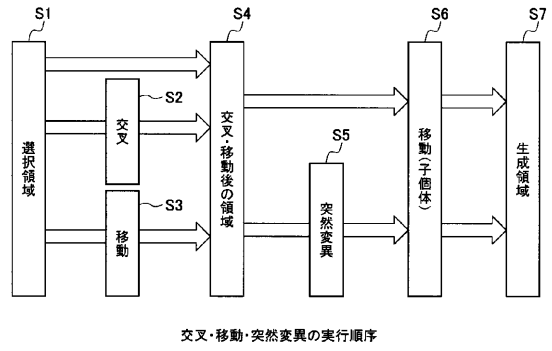
## 【0070】

1...探査機、1a...カメラ、2...月面、3...撮影画像、4...クレタマップ、100...点群マッチング処理システム、101...画像キャプチャ部、102...点群化処理部、103...三角形形成部、104...マッチング候補選定部、105...相似判定部、106...誤マッチング除外部、107...点群マッチング処理部、108...推定結果出力部、109...マップ記憶部

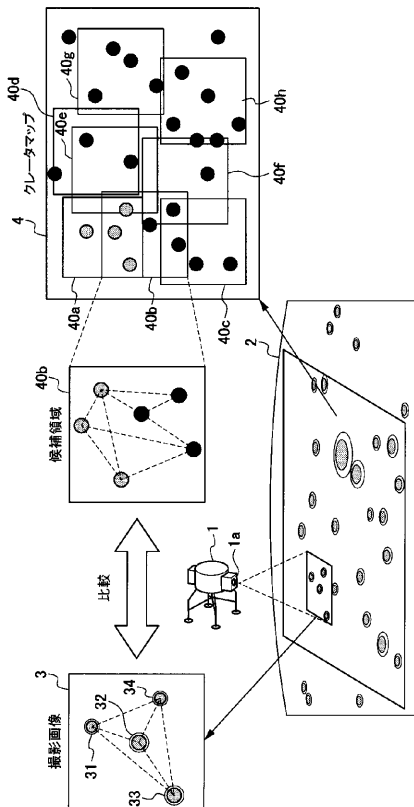
【図1】



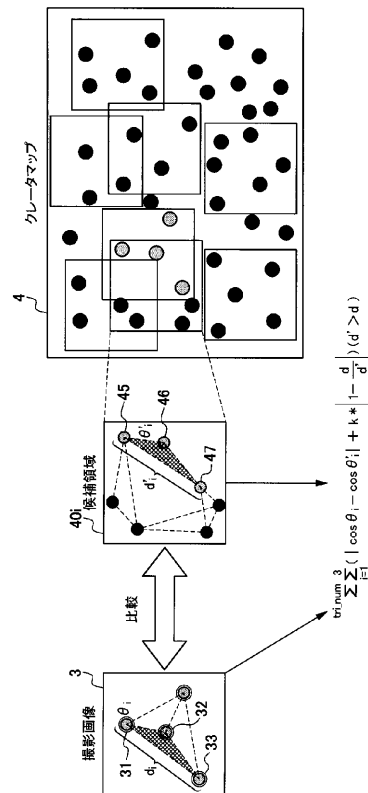
【図2】



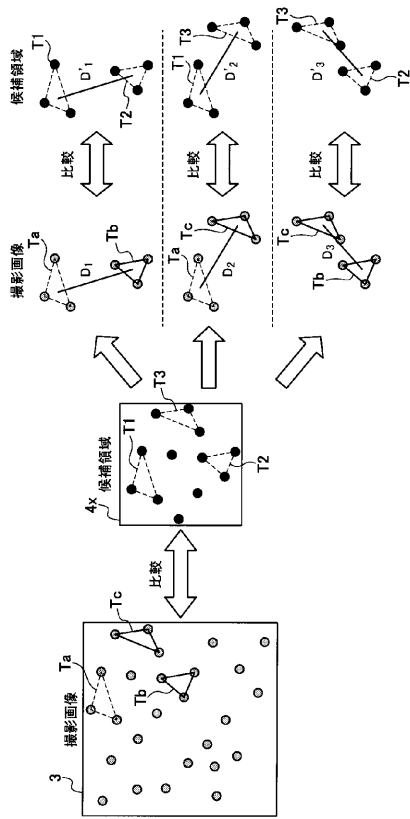
【図3】



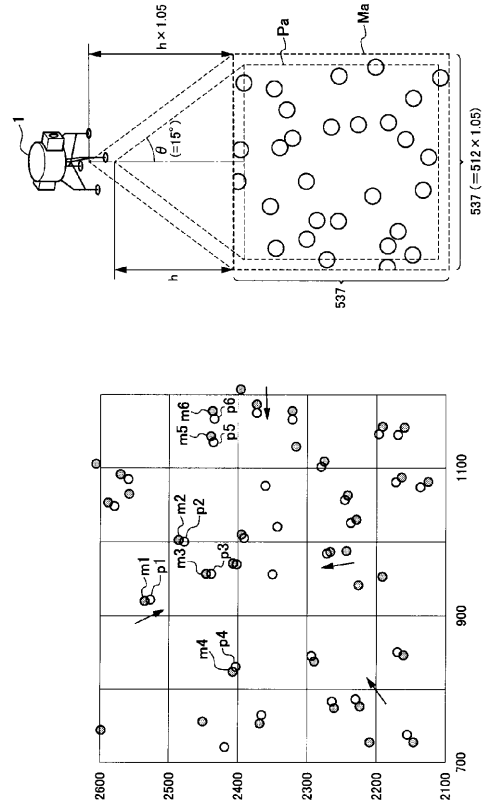
【図4】



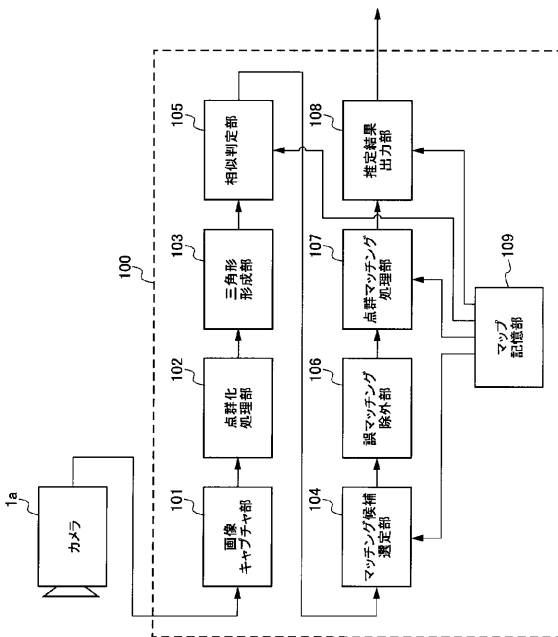
【図5】



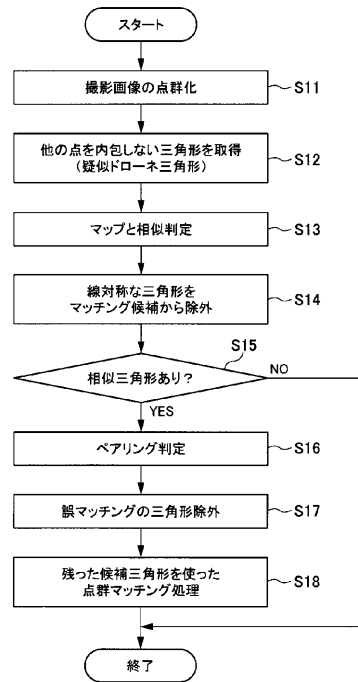
【図6】



【図7】

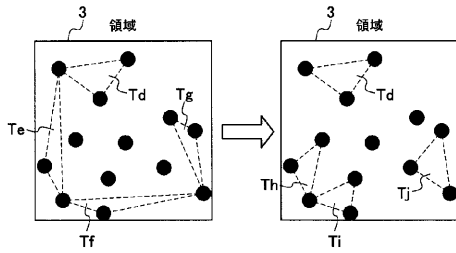


【図8】

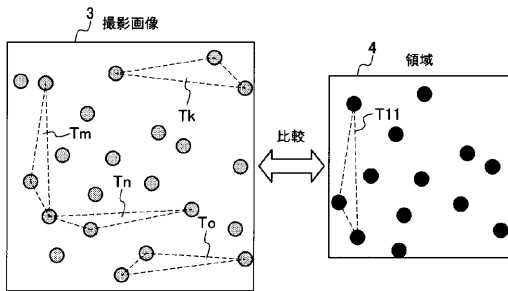




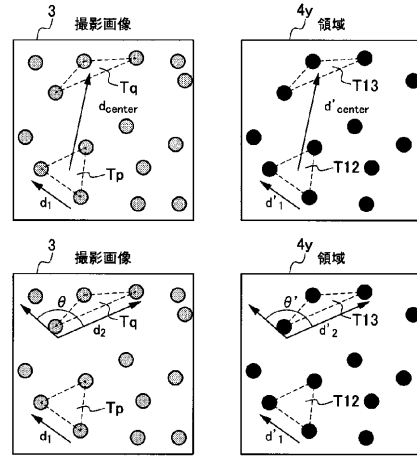
【図9】



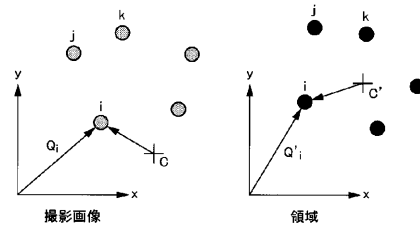
【図10】



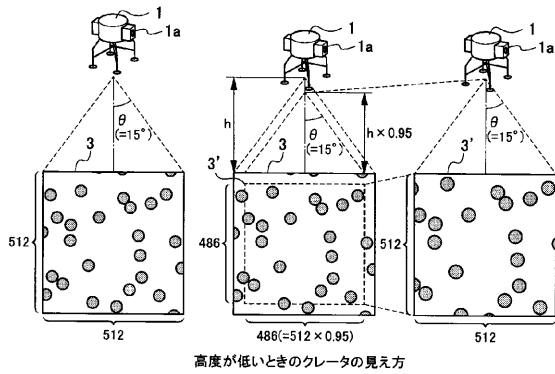
【図11】



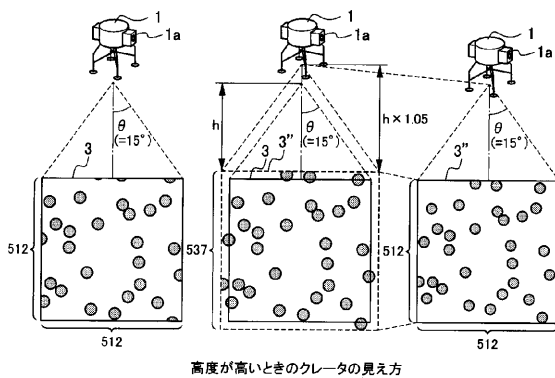
【図12】



【図13】



【図14】



---

フロントページの続き

(72)発明者 上野 史

東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内

(72)発明者 梅内 祐太

東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内

Fターム(参考) 5L096 AA06 CA02 FA05 FA60 FA62 FA67 FA69 HA07