

(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2019-211949
(P2019-211949A)

(43) 公開日 令和1年12月12日(2019. 12. 12)

(51) Int. Cl. F I テーマコード (参考)
G06T 7/70 (2017.01) G06T 7/70 A 5L096
 G06T 7/00 (2017.01) G06T 7/00 640

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 21 頁)

(21) 出願番号	特願2018-106820 (P2018-106820)	(71) 出願人	504133110 国立大学法人電気通信大学 東京都調布市調布ケ丘一丁目5番地1
(22) 出願日	平成30年6月4日(2018.6.4)	(74) 代理人	110000925 特許業務法人信友国際特許事務所
		(72) 発明者	▲高▼玉 圭樹 東京都調布市調布ケ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内
		(72) 発明者	石井 晴之 東京都調布市調布ケ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内
		(72) 発明者	上野 史 東京都調布市調布ケ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内
		Fターム(参考)	5L096 CA02 CA04 DA02 FA60 FA81 JA05 JA11 JA28 KA17

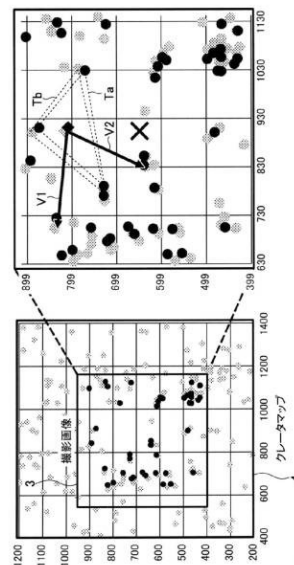
(54) 【発明の名称】 点群マッチング装置、点群マッチング方法及びプログラム

(57) 【要約】

【課題】 撮影画像とマップとの比較で、誤検出なく自己位置を短時間で高精度に推定できるようにする。

【解決手段】 画像より得た点群から所定の条件を満たす複数の点を頂点とした第1の多角形を取得する。そして、予め用意されたマップ内の点群から、画像から得た第1の多角形と相似な第2の多角形を探索する。そして、画像から得た第1の多角形と、マップから探索した第2の多角形とのそれぞれについて、多角形の周囲に存在する点である少なくとも1つの外点と多角形のそれぞれの辺に対応する複数のベクトルとの関係から、マッチングしている多角形を探し、第2の多角形のマップ内の座標位置に基づいて、画像の座標位置を確定する。

【選択図】 図2



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

探索対象となる画像から得た点群から所定の条件を満たす複数の点を頂点とした第 1 の多角形を形成する多角形形成部と、

予め用意されたマップ内の点群から、前記多角形形成部で得た第 1 の多角形と相似な第 2 の多角形を探索する候補選定部と、

前記多角形形成部で得た第 1 の多角形と、前記候補選定部で得たマップ内の第 2 の多角形とのそれぞれについて、多角形の周囲に存在する点である少なくとも 1 つの外点と多角形のそれぞれの辺に対応する複数のベクトルとの関係から、マッチングしている多角形を探すマッチング処理部と、

前記マッチング処理部で得られた第 2 の多角形のマップ内の座標位置に基づいて、前記画像の座標位置を確定して出力する出力部と、を備える

点群マッチング装置。

【請求項 2】

探索対象となる画像から得た点群から所定の条件を満たす複数の点を頂点とした第 1 の多角形を取得する多角形取得処理と、

予め用意されたマップ内の点群から、前記多角形取得処理で得た第 1 の多角形と相似な第 2 の多角形を探索する探索処理と、

前記多角形取得処理で得た第 1 の多角形と、前記探索処理で得たマップ内の第 2 の多角形とのそれぞれについて、多角形の周囲に存在する点である少なくとも 1 つの外点と多角形のそれぞれの辺に対応する複数のベクトルとの関係から、マッチングしている多角形を探すマッチング処理と、

前記マッチング処理で得られた第 2 の多角形のマップ内の座標位置に基づいて、前記画像の座標位置を確定する座標計算処理と、を含む

点群マッチング方法。

【請求項 3】

前記マッチング処理では、前記多角形取得処理で得た第 1 の多角形と、前記探索処理で得たマップ内の第 2 の多角形とのそれぞれについて、多角形の中心または重心から外点までのベクトルと多角形のそれぞれの辺に対応する複数のベクトルとの内積および外積をそれぞれ算出し、算出した内積と外積の距離が許容範囲内のとき、前記第 1 の多角形と前記第 2 の多角形とがマッチングしている多角形と判定する

請求項 2 に記載の点群マッチング方法。

【請求項 4】

前記マッチング処理は、更に、多角形取得処理で得た前期第 1 の多角形と、探索処理で得たマップ内の前記第 2 の多角形とのそれぞれについて、多角形の周囲に存在する複数の外点どうしを繋ぐベクトルと、外点と多角形の頂点とを繋ぐベクトルとの関係から、マッチングしている多角形を探すことを特徴とする

請求項 2 又は 3 に記載の点群マッチング方法。

【請求項 5】

前記マッチング処理では、前記第 1 の多角形と前記第 2 の多角形のそれぞれについて、多角形の周囲に存在する複数の外点どうしを繋ぐベクトルと、外点と多角形の頂点とを繋ぐベクトルとの内積および外積をそれぞれ算出し、算出した内積と外積の距離が許容範囲内のとき、前記第 1 の多角形と前記第 2 の多角形とがマッチングしている多角形と判定する

請求項 4 に記載の点群マッチング方法。

【請求項 6】

画像と、予め用意されたマップとの比較で、前記画像の座標位置を算出する手順を、コンピュータ装置に実行させるプログラムであり、

探索対象となる画像から得た点群から所定の条件を満たす複数の点を頂点とした第 1 の多角形を取得する多角形取得手順と、

10

20

30

40

50

予め用意されたマップ内の点群から、前記多角形取得手順で得た第 1 の多角形と相似な第 2 の多角形を探索する探索手順と、

前記多角形取得手順で得た第 1 の多角形と、前記探索手順で得たマップ内の第 2 の多角形とのそれぞれについて、多角形の周囲に存在する点である少なくとも 1 つの外点と多角形のそれぞれの辺に対応する複数のベクトルとの関係から、マッチングしている多角形を探すマッチング手順と、

前記マッチング手順で得られた第 2 の多角形のマップ内の座標位置に基づいて、前記画像の座標位置を確定する座標計算手順と、を含むプログラム。

【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、座標位置を求める点群マッチング装置、点群マッチング方法及びプログラムに関する。

【背景技術】

【0002】

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。よって、従来のアプローチは、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というものであった。

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課題になっている。

【0003】

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、探査機自身で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。つまり、探査機に搭載されるコンピュータ装置は、地上で一般的に使用されるコンピュータ装置に比べて、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。

【0004】

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の一つとして、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特定位置（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特定位置を結ぶ三角形とを取得して、双方の三角形の相似度を基に、自己位置として推定するものである。

【0005】

特許文献 1 には、月面や惑星面に軟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 に記載される手法は、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。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【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】

【0007】

10

20

30

40

50

発明者らが先に提案した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、先に提案した三角形相似マッチングを適用する場合であっても、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、三角形の相似度の計算で線対称と点对称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、誤検出が発生し易い状況になっている場合も多い。さらに、探査機の自己位置の座標を推定する際には、撮影画像の回転を考慮して補正する必要があり、回転状態の補正が正しく行われないうことで誤検出の要因が増えてしまうという問題があった。したがって、探査機が撮影した画像とクレータマップとの比較で、より高精度に位置推定できる手法の開発が望まれている。

10

【0008】

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であっても、同様の課題がある。

【0009】

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短時間で高精度に推定できる点群マッチング方法、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】

20

【0010】

本発明の点群マッチング装置は、探索対象となる画像から得た点群から所定の条件を満たす複数の点を頂点とした第1の多角形を形成する多角形形成部と、予め用意されたマップ内の点群から、多角形形成部で得た第1の多角形と相似な第2の多角形を探索する候補選定部と、多角形形成部で得た第1の多角形と、候補選定部で得たマップ内の第2の多角形とのそれぞれについて、多角形の周囲に存在する点である少なくとも1つの外点と多角形のそれぞれの辺に対応する複数のベクトルとの関係から、マッチングしている多角形を探すマッチング処理部と、マッチング処理部で得られた第2の多角形のマップ内の座標位置に基づいて、画像の座標位置を確定して出力する出力部と、を備える。

【0011】

30

本発明の点群マッチング方法は、探索対象となる画像から得た点群から所定の条件を満たす複数の点を頂点とした第1の多角形を取得する多角形取得処理と、予め用意されたマップ内の点群から、多角形取得処理で得た第1の多角形と相似な第2の多角形を探索する探索処理と、多角形取得処理で得た第1の多角形と、探索処理で得たマップ内の第2の多角形とのそれぞれについて、多角形の周囲に存在する点である少なくとも1つの外点と多角形のそれぞれの辺に対応する複数のベクトルとの関係から、マッチングしている多角形を探すマッチング処理と、マッチング処理で得られた第2の多角形のマップ内の座標位置に基づいて、画像の座標位置を確定する座標計算処理と、を含むことを特徴とする。

【0012】

また、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。

40

【発明の効果】

【0013】

本発明によると、多角形を使ったマッチング時に、多角形を構成する点のマッチングだけでなく、多角形の周囲に存在する外点と多角形の複数の辺に対応するベクトルとの関係についても判断するため、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して探査機が自己位置を推定する例を示す説明図である。

50

- 【図 2】本発明の一実施の形態例による点群マッチング処理の概要を示す説明図である。
- 【図 3】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 4】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 5】本発明の一実施の形態例による探索範囲の決定例を示す説明図である。
- 【図 6】本発明の一実施の形態例による点群マッチングの概要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ペアリング判定処理の概要を示す説明図である。
- 【図 8】本発明の一実施の形態例による外点のみがずれて検出されたペアリング判定状態を示す説明図である。
- 【図 9】本発明の一実施の形態例による内積と外積単体での外点のずれの許容範囲を示す図である。
- 【図 10】本発明の一実施の形態例による内積と外積の距離を用いた外点のずれの許容範囲を示す説明図である。
- 【図 11】本発明の一実施の形態例によるペアリング判定の例（例 1）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ペアリング判定の例（例 2）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マルチペアリングの概要（三角形の 3 つの辺のベクトルと外点を使う例）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マルチペアリング判定の例（パターン 2）を示す説明図である。
- 【図 15】本発明の一実施の形態例によるマルチペアリング判定の例（パターン 3）を示す説明図である。
- 【図 16】本発明の一実施の形態例によるマルチペアリングの概要（外点どうしのベクトルを使う例）を示す説明図である。
- 【図 17】本発明の一実施の形態例によるずれの補正処理の概要を示す説明図である。
- 【図 18】本発明の一実施の形態例による調整処理を示す説明図である。

【発明を実施するための形態】

【0015】

[1 . 本発明の一実施の形態例による点群マッチングの概要]

以下、本発明の一実施の形態例（以下、「本例」と称する）を、添付図面を参照して説明する。

本例は、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 1 a 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ものである。

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を点群化する。例えば、それぞれのクレータの中心位置が、不図示のコンピュータ装置により、図 2 に示すように、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 は、例えば図 2 に示すように、各クレータの特定位置である中心位置を点で示した点群データである。以下の説明では、クレータの特定位置の一例として、中心位置を点で示す例とするが、クレータの重心位置など他の位置から点を求めるようにしてもよい。

【0017】

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 内のクレータの点群データと同じ配列の点群データを、図 2 に示すクレータマップ 4 から探し出す処理を行う。

図 2 においては、撮影画像 3 から得た点群を黒丸で示し、クレータマップ 4 の点群をグレーの丸で示す。なお、図 2 では探索する原理を示すために、撮影画像 3 から得られた点群と、クレータマップ 4 の点群とを重ねて示すが、実際には画像側とクレータマップ側のそれぞれで独立した点群のデータであり、後述する点群マッチング処理を行うことで、それぞれが重なった領域であることが分かる。

10

20

30

40

50

【 0 0 1 8 】

探査機 1 に搭載されたコンピュータ装置で、撮影画像 3 に含まれるクレータの点群データから得られる多角形（本例では三角形）と、クレータマップ 4 の点群データから得られる多角形（本例では三角形）とが一致したとき、撮影画像 3 がクレータマップ 4 内の対応領域（画像 3 の領域）を撮影したものと判断される。したがって、撮影画像 3 とクレータマップ 4 に基づいて、探査機 1 の自己の月面上の座標位置を推定することができる。

本例においては、自己位置の推定を行うために、図 2 の右側に拡大して示すように、撮影画像 3 内の点群から、3 つの点を頂点とする一定の条件を満たす三角形 T_a を取得し、クレータマップ 4 から同じ条件を満たす三角形 T_b を取得し、それぞれの三角形 T_a 、 T_b が一致するか否かを判定する。この一致判定時には、三角形 T_a 、 T_b の中心位置（例えば重心位置）から、三角形 T_a 、 T_b の周囲に存在する別の点（この点を外点と称する）までのベクトル V_1 、 V_2 と三角形 T_a 、 T_b の特定の辺（例えば長辺）に対応する所定方向のベクトルとの内積および外積をそれぞれ計算し、撮影画像 3 の三角形 T_a において計算された内積および外積とクレータマップ 4 の三角形 T_b において計算された内積および外積がそれぞれ一致するか否かを判断し、これら内積および外積を使った判断結果を、マッチングに利用する。これらの三角形や外点のベクトルを使った判断処理の詳細は後述する。

【 0 0 1 9 】

なお、図 2 で示すように、撮影画像 3 から得た点群と、クレータマップ 4 の点群とが、常に完全に一致するとは限らない。すなわち、探査機 1 のカメラ 1 a が月面を撮影する向き、探査機 1 から月面までの距離、カメラ 1 a が備えるレンズの歪み等、様々な条件でずれが生じ、ずれを考慮して正確な判断を行う必要がある。また、撮影時の条件（日照条件など）から、月面に存在するクレータの一部が撮影画像 3 から判別できない可能性があり、撮影画像 3 とクレータマップ 4 とが同じ位置で比較を行ったとしても、撮影画像 3 には一部の点が存在しない状況も起こり得る。逆に、撮影画像中のクレータが存在しない箇所に、誤って点が発生する場合もあり得る。したがって、誤りなく正確に座標位置を判断するためには、点のずれや一部の欠落ならびに誤って発生した点を考慮する必要があり、本例においては、上述のずれや一部の欠落等があっても、正確に自己位置が推定できるようにしたものである。

【 0 0 2 0 】

[2 . 本発明の一実施の形態例の構成]

図 3 は、本発明の一実施の形態例による点群マッチング処理システム 1 0 0 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 1 0 0 は、月面を探査する探査機 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る。コンピュータ装置としては、例えば中央演算処理ユニット（CPU）と、作業領域としての RAM と、データやプログラムが格納される ROM と、大容量データ記憶部と、外部とのデータの入出力を行うインターフェースなどで構成される。

図 3 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。

【 0 0 2 1 】

点群マッチング処理システム 1 0 0 には、探査機 1 に搭載されたカメラ 1 a が撮影した画像データが供給される。カメラ 1 a から供給された画像データは、画像キャプチャ部 1 0 1 に供給され、画像キャプチャ部 1 0 1 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 1 0 1 で取り出された画素データは、点群化処理部 1 0 2 に供給される。点群化処理部 1 0 2 では、画像に含まれる特徴点であるクレータの特定位置（本例の場合には中心位置）を点で示した点群化データとする処理が行われる。

【 0 0 2 2 】

点群化処理部 1 0 2 で得られた点群化データは、三角形形成部 1 0 3 に供給される。三

10

20

30

40

50

角形形成部 103 は、各点を頂点とした三角形を作成する三角形取得処理（多角形取得処理）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。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、その他の条件で点群化データから三角形（多角形）を作成してもよい。

三角形のデータとしては、例えば 3 つの内角の角度と、3 つの辺の長さのデータを持つ。三角形形成部 103 で形成された三角形のデータは、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、マッチング候補となる三角形を選ぶ探索処理を行う。

【0023】

そして、点群マッチング処理部 105 は、マッチング候補選定部 104 で選ばれた撮影画像から選択した三角形と、マップ記憶部 107 に記憶された月面のクレータマップから選択した三角形を比較し、最も相似度が高い三角形を選ぶ点群マッチング処理を行う。マップ記憶部 107 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。マップ記憶部 107 が記憶する点群のクレータマップには、そのクレータマップ内の点群で構成される三角形のデータベースを持つ。三角形のデータベースには、それぞれの三角形の 3 つの内角の大きさ、3 つの辺の長さ、重心座標、三角形が存在する領域を示す格子番号などが格納される。

【0024】

そして、点群マッチング処理部 105 は、撮影画像から得たマッチング候補となる三角形のデータと、マップ記憶部 107 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。なお、クレータマップから比較する三角形のデータを取り出す際に、探査機 1 が周回中の月面のおおまかな範囲が分かる場合には、その範囲のクレータマップから優先して三角形のデータを取り出す。

【0025】

点群マッチング処理部 105 は、撮影画像内の三角形とマップ記憶部 107 に記憶された点群の三角形とのマッチング処理を行い、最も相似度が高い三角形を含んでいる候補領域を探し出す。そして、推定結果出力部 106 が、最も相似度が高い三角形を含んでいる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。

【0026】

[3 . 一実施の形態例の処理の流れ]

図 4 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中心位置を点で示した点群化データを得る。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、一定の条件を満たす（例えば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 S11）。

【0027】

この三角形を形成する際には、例えば、撮影画像から得られたクレータ（点）の中で信頼度が高いクレータ（点）から順に各辺の長さ l_i ($i = 1, 2, 3, \dots, l_{\min}$ $l_i \leq l_{\max}$) で、且つ、各内角の大きさ θ_i ($i = 1, 2, 3, \dots, \theta_{\min}$ $\theta_i \leq \theta_{\max}$) の三角形を形成する。ここでの信頼度とは、例えば撮影画像に写っている物体をクレータと判別したときに、それぞれのクレータが、本当にクレータである可能性を数値化したものである。

ここでの三角形の形成時には、撮影画像内の点群から得られた三角形の総数が一定個数（例えば 1500 個）に達したとき、計算時間の制約上、三角形の形成を打ち切る。一定個数で計算を打ち切るのは一例であり、計算時間に制約がない場合や、高速での演算が可能な場合には、撮影画像から条件を満たす全ての三角形を算出してもよい。

10

20

30

40

50

そして、例えば、三角形の重心が撮影画像の中心に近いものから昇順に並び替え、三角形の内角と辺の長さを計算して、データ化する。

【 0 0 2 8 】

このようにして、撮影画像から三角形を形成した後、探査機 1 の飛行制御装置（不図示）から得られる推定周回座標位置（ x_g, y_g ）を含むクレータマップ内の 1 つの格子を選択する。例えば、図 5 の左側に示すように、クレータマップを x 座標と y 座標のそれぞれで 35 画素ごとに格子状に区分けし、探査機 1 の座標位置（ x_g, y_g ）を含む格子を基準に、マンハッタン距離が 3 以内の格子を探索範囲とする。図 5 の右側は、基準（中心）の格子からのマンハッタン距離を示し、本例の場合には、マンハッタン距離が 0 ~ 3 の格子を全て探索範囲に設定する。

10

ここで、マンハッタン距離とは、幾何学における距離概念のひとつであり、各座標の差（の絶対値）の総和を 2 点間の距離とするものである。

【 0 0 2 9 】

図 4 のフローチャートの説明に戻る。ステップ S 1 1 で、探索範囲が決まると、マッチング候補選定部 1 0 4 は、撮影画像の点群から形成した三角形の内から、候補となる三角形を一つ選択する（ステップ S 1 2）。さらに、マッチング候補選定部 1 0 4 は、クレータマップ内の三角形のデータベースから、比較候補となる三角形を得る探索処理を行い、比較候補となる三角形を一つ選択する（ステップ S 1 3）。

【 0 0 3 0 】

撮影画像とクレータマップの双方から候補の三角形が選ばれると、点群マッチング処理部 1 0 5 は、ステップ S 1 1 で撮影画像から選択された候補三角形と、ステップ S 1 2 でクレータマップから選択された候補三角形とを比較する。ここでは、まず点群マッチング処理部 1 0 5 は、ステップ S 1 2 で得た候補の三角形と、ステップ S 1 2 で得た比較対象の三角形とのそれぞれが、候補三角形として予め決められた条件を満たすか否かを判断する（ステップ S 1 4）。ここでの候補三角形と判断する条件としては、例えば、線対称でない三角形である点、三辺の比率が予め決められた範囲内である点、三角形の相似度が所定範囲内である点、内角の最小角度が 15° 以上である点などがある。

20

【 0 0 3 1 】

ここで、候補三角形としての条件を満たす場合（ステップ S 1 4 の Yes）、その条件を満たした場合、点群マッチング処理部 1 0 5 は、それぞれの三角形について、三角形の周囲の点である外点が予め決められた N 個（ N は 1 以上の予め決められた整数値）以上存在するか否かを判断する（ステップ S 1 5）。ここで、それぞれの候補三角形について、外点が N 個以上存在する場合（ステップ S 1 5 の yes）、点群マッチング処理部 1 0 5 は、比較に使用する外点の候補の選択を行う（ステップ S 1 6）。さらに、点群マッチング処理部 1 0 5 は、候補となった外点を絞り込む絞り込み処理を行う（ステップ S 1 7）。そして、点群マッチング処理部 1 0 5 は、絞り込まれた外点と三角形とを使って、撮影画像側の点群の三角形と、クレータマップ側の点群の三角形とが一致しているかを判定し、その一致が判断された三角形のペアに基づいて、マッチングしていることの判断を行う（ステップ S 1 8）。

30

【 0 0 3 2 】

ステップ S 1 8 でのマッチング処理で、撮影画像から得た三角形と一致したクレータマップ内の三角形が得られた後、点群マッチング処理部 1 0 5 は、座標計算に必要な補正処理を行う（ステップ S 1 9）。ここでの補正処理の詳細については後述する。

40

そして、補正処理が行った後、点群マッチング処理部 1 0 5 は、マッチングしたクレータマップに基づいて、撮影画像の中心座標を計算し（ステップ S 2 0）、推定結果出力部 1 0 6 が、計算した自己の座標位置を出力する（ステップ S 2 1）。

【 0 0 3 3 】

一方、ステップ S 1 4 およびステップ S 1 5 の判断で、それぞれの条件に該当しない場合（ステップ S 1 4 ~ S 1 5 の no）、点群マッチング処理部 1 0 5 は、クレータマップ内の候補領域内の全ての三角形のデータを使用したか否かを判断する（ステップ S 2 2）

50

。ここで、クレータマップ内の候補領域内の全ての三角形のデータを使用していない場合（ステップS22のno）、ステップS13の処理に戻り、マッチング候補選定部104が、まだ候補として選定していない別の三角形のデータを候補三角形としてクレータマップから取り出して、点群マッチング処理部105に送る。

【0034】

また、ステップS22において、クレータマップの全ての三角形のデータを候補としたと判断したとき（ステップS22のyes）、点群マッチング処理部105は、撮影画像内の全ての三角形のデータを使用したか否かを判断する（ステップS23）。ここで、撮影画像内の全ての三角形のデータを使用していない場合（ステップS23のno）、ステップS12の処理に戻り、マッチング候補選定部104が、まだ候補として選定していない別の三角形のデータを撮影画像から得た点群から取り出して、点群マッチング処理部105に送る。

10

【0035】

さらに、ステップS23において、撮影画像内の全ての三角形のデータを使用したと判断したとき（ステップS23のyes）、点群マッチング処理部105は、マッチング未了とし、ここでのマッチング処理を終了する（ステップS24）。

【0036】

[4. マッチング処理の詳細]

次に、マッチング処理部105が撮影画像から得た候補三角形と、クレータマップから得た候補三角形とを比較して、マッチングしているか否かを判断する処理の詳細を説明する。なお、以下の説明において、マッチングと述べた場合には、候補三角形と比較対象の三角形とが一致していることを判断する処理である。また、ペアリングと述べた場合には、個々の三角形や外点に関する情報を比較して対応（一致）しているか否かを判定する処理である。本例の場合には、条件を変えて同一の三角形や外点についてのペアリング判定を行って、その複数の条件でペアリングしていると判定した場合に、最終的に画像内の三角形とマップ内の三角形とがマッチングしていると判断する。

20

【0037】

まず、図6を参照して、候補三角形の点群を比較して照合する処理の概要を説明する。

図6に示すように、撮影画像3内の点群とクレータマップ4内の点群とのマッチング処理が行われる。ここで、図6の右側に拡大して示すように、点群から三角形を形成すると共に、三角形の外側の周囲の特定の点を外点とし、三角形の重心から外点までのベクトルを生成して、撮影画像3から得たベクトルの内積および外積と、クレータマップ4から得たベクトルの内積および外積を比較する。

30

【0038】

図7は、撮影画像の三角形と外点からそれぞれ形成されるベクトルと、クレータマップの三角形と外点からそれぞれ形成されるベクトルとの具体的な例を示す。

図7の左側に示すように、撮影画像から得たクレータの中心を示す点群で三角形を取得し、その三角形の重心（図中の四角形）から、1つの外点までのベクトルを v_i とし、三角形の最大の長さの辺（長辺）に対応する所定方向のベクトルを d_i とする。また、図7の右側に示すように、クレータマップから得たクレータの中心を示す点群で三角形を取得し、その三角形の重心（図中の四角形）から、1つの外点までのベクトルを v_i とし、三角形の最大の長さの辺（長辺）に対応する所定方向のベクトルを d_i とする。

40

【0039】

このとき、マッチング処理部105でのマッチングのためのペアリング判定では、撮影画像から得た2つのベクトル v_i 、 d_i の内積と外積を計算する。同様に、クレータマップから得た2つのベクトル v_i 、 d_i の内積と外積を計算する。そして、それぞれの内積の絶対値の差と外積の絶対値の差から照合を行う。

この計算を行う際には、クレータマップと撮影画像の倍率を揃える必要があり、基準となった三角形の最大の長さの辺のベクトル d_i 、 d_i の長さの比率から、倍率を算出する。

50

各ベクトルの内積と外積を計算する計算式の例を、[数1]式～[数4]に示す。各記号の上部の「 $\vec{\quad}$ 」はベクトルを示す。

【0040】

【数1】

$$\gamma = |\vec{d}_l|/|\vec{d}_i|$$

【0041】

【数2】

$$naiskei = |\vec{d}_l \cdot \vec{v}_i - ((\vec{d}_l \cdot \vec{v}_i))/\gamma^2|$$

【0042】

【数3】

$$gaiseki = |\vec{d}_l \times \vec{v}_i - ((\vec{d}_l \times \vec{v}_i))/\gamma^2|$$

【0043】

【数4】

$$\sqrt{naiskei^2 + gaiseki^2} \leq MIND2 * \sqrt{2}/2$$

【0044】

[数4]式において、MIND2は、判断用に設定した閾値である。

[数1]式は、倍率の計算式である。[数2]式は、内積[naiskei]の計算式であり、[数3]式は、外積[gaiseki]の計算式である。内積によって、三角形から外点への相対方向が計算でき、外積によって、三角形から外点までのおおまかな相対距離が計算できる。

このため、クレータマップの三角形が、撮影画像側の三角形と一致した正しいものである場合、[数2]式の内積値と[数3]式の外積値は、いずれも小さな値になる。

[数4]式は、[数2]式と[数3]式で求めた内積[naiskei]と外積[gaiseki]の距離を計算し、得られた値が一定値以下であるとき、撮影画像とクレータマップとで比較したクレータは、一致したものであると判断する計算式を示す。

【0045】

ここで、クレータマップと撮影画像の両方で、同等の倍率で全く検出されない状態で、クレータマップから形成される三角形がマッチングしたときを想定する。すなわち、図8に示すように、クレータマップ側の三角形の長辺ベクトルの始点を(s_x, s_y)、終点を(p_x, p_y)とし、撮影画像側の三角形の長辺ベクトルの始点を(s_i, s_i)、終点を(p_i, p_i)とする。また、クレータマップ側の三角形の重心座標を(t_x, t_y)、比較する外点の座標を(v_x, v_y)とし、撮影画像側の三角形の重心座標を(t_i, t_i)、比較する外点の座標を(v_i, v_i)とする。なお、各図において横軸をx軸、縦軸をy軸とする。

このとき、ペアリング判定用の内積は、[数5]式で表すことができる。

【0046】

【数5】

$$|\vec{v} \cdot \vec{d} - (\vec{v}' \cdot \vec{d}')/\gamma^2|$$

$$= |(v_x - t_x)(p_x - s_x) + (v_y - t_y)(p_y - s_y)$$

$$- ((v'_x - t'_x)(p'_x - s'_x) + (v'_y - t'_y)(p'_y - s'_y))/\gamma^2|$$

【0047】

ここでは、撮影画像とクレータマップの倍率が等しいため、 $\gamma = 1$ であり、三角形がマッチングしている場合、 x 成分と y 成分も等しくなるため、 $(p_x - s_x) = (p'_x - s'_x)$ であり、かつ、 $(p_y - s_y) = (p'_y - s'_y)$ になる。このため、 $T = (p_x - s_x)$ 、 $S = (p_y - s_y)$ とすると、以下の【数6】式で表すことができる。

【0048】

【数6】

$$|(v_x - t_x)(p_x - s_x) + (v_y - t_y)(p_y - s_y)$$

$$- ((v'_x - t'_x)(p'_x - s'_x) + (v'_y - t'_y)(p'_y - s'_y))/\gamma^2|$$

$$= |(v_x - t_x)T + (v_y - t_y)S - ((v'_x - t'_x)T + (v'_y - t'_y)S)|$$

【0049】

さらに、2つの三角形の重心座標も等しいため、【数6】式は、以下の【数7】式に変形できる。

【0050】

【数7】

$$|(v_x - t_x)T + (v_y - t_y)S - ((v'_x - t'_x)T + (v'_y - t'_y)S)| = |(v_x - v'_x)T + (v_y - v'_y)S|$$

【0051】

したがって、【数5】式と【数7】式から以下の【数8】式が得られる。

【0052】

【数8】

$$|\vec{v} \cdot \vec{d} - (\vec{v}' \cdot \vec{d}')/\gamma^2| = |(v_x - v'_x)T + (v_y - v'_y)S|$$

【0053】

同様に、ペアリング判定用の外積を計算すると、【数9】式のようになる。

【0054】

【数9】

$$|\vec{v} \times \vec{d} - (\vec{v}' \times \vec{d}')/\gamma^2| = |(v_x - v'_x)S + (v_y - v'_y)T|$$

【0055】

ここで、【数8】式と【数9】式の条件を満たす場合、図9に示すように、クレータマップ側の外点を真の座標位置 (v_x, v_y) とすると、その外点 (v_x, v_y) を中心として斜線で正方形に囲って示す範囲内に撮影画像側の外点(クレータ)が存在すれば、クレータマップと撮影画像とで同じクレータの外点であると見なす。図9において、斜線で示す正方形の1辺を【MIND2】とする。【MIND2】は、【数4】式で設定した閾値である。この図9に示す外点の1辺が【MIND2】の正方形の許容範囲は、内積と外積単体での許容範囲である

10

30

40

50

。

【 0 0 5 6 】

この図 9 に示すような許容範囲の設定でペアリングを判断してもよいが、本例においては、誤差を小さくすることを目的として、次の図 1 0 に示す許容範囲の設定とする。

すなわち、図 9 に示すような許容範囲の設定では、撮影画像側の外点 (v_x, v_y) が、真の座標位置 (v_x, v_y) に対してずれる方向によって、許容範囲に入る場合と許容範囲外になる場合とがある。すなわち、 x 軸と y 軸とで定義される正方形で許容範囲を決めた場合、正方形の中心位置から離れる距離が同じであっても、その距離だけ離れる方向によって、許容範囲内になる場合と、許容範囲外になる場合とがある。

【 0 0 5 7 】

ここで、本例の場合には、ペアリング判定時の内積値と外積値のユークリッド距離を計算して、図 1 0 に示すように、クレータマップ上の真の外点の座標位置 (v_x, v_y) を中心とした円形で囲って示す斜線の範囲に、撮影画像の外点の座標位置 (v_x, v_y) があるか否かを判定する処理を行う。

この図 1 0 に示すように内積と外積の距離を用いた外点の許容範囲を設定することで、撮影画像の外点がどの方向にずれた場合でも、均一の判定基準でずれを評価できるようになり、誤差の少ない判定に貢献する。

【 0 0 5 8 】

具体的な判定の例について図 1 1 を参照して説明する。ここでは、撮影画像側の外点がクレータマップ側の外点に対して 4 ピクセルずれたときを想定する。ここでの 4 ピクセルとは、撮影画像を撮影するカメラが出力する画像の画素数（ピクセル数）である。

図 1 1 の左側は、クレータマップの外点に対して、 $x = 4 / (2)$ 、 $y = 4 / (2)$ ずれた撮影画像側の外点が存在する状態を示す。

一方、図 1 1 の右側は、クレータマップの外点に対して、 $x = 4$ のずれが発生した外点が撮影画像に存在する状態を示す。

【 0 0 5 9 】

まず、図 1 1 の左側に示す座標位置で、内積 [naiseki] と外積 [gaiseki] を [数 6] 式および [数 7] 式を用いて計算すると、([naiseki] , [gaiseki]) = (565, 565) になる。

一方、図 1 1 の右側に示すように x 方向に 4 ピクセルのずれがあった場合に内積 [naiseki] と外積 [gaiseki] を [数 3] 式および [数 4] 式を用いて計算すると、([naiseki] , [gaiseki]) = (800, 0) になる。

ここで、ペアリングの判定を行う基準値として、例えば [naiseki] 565、かつ [gaiseki] 565 にした場合、同じ距離のずれであっても、図 1 1 の左側の例の場合には、マッチングしたと判断されるが、図 1 1 の右側の例の場合には、マッチングしていないと判断される。

【 0 0 6 0 】

また、図 1 2 に示すように、 $x = 3$ のずれが発生した外点が撮影画像に存在する状態を考えた場合にも、([naiseki] , [gaiseki]) = (600, 0) になり、3 ピクセルのずれであっても、マッチングできない状態が生じる。このように、図 9 に示すような許容範囲の設定では、ずれの方向によっては、4 ピクセルのずれを、マッチングすると判断する場合がある一方で、3 ピクセルのずれをマッチングせずと判断することがある。ここで、本例の場合には、[数 4] 式で示した条件で、[MIND2] = 800 にすれば、図 1 0 に示すように内積と外積の距離を用いて許容範囲を設定することで、図 1 1 と図 1 2 に示す全てのケースでマッチングありと判断される。したがって、外点がどの方向にずれても、均一な基準で誤差なくマッチングの可否を判断できるようになる。

【 0 0 6 1 】

本例においては、ここまで説明したように、点群から得た三角形と外点を使った撮影画像とクレータマップとの比較で、マッチングしているか否か判断する処理を行うようにしたが、マッチングしたと判断した場合であっても、実際には撮影画像の歪みなどで誤判定

10

20

30

40

50

しているケースも存在し得る。

すなわち、クレータマップの三角形と撮影画像で形成した三角形でマッチしたが、マッチングした外点のクレータ数がクレータ最小対応点数を満たさない場合には、以下の可能性がある。

ケース1：基準となった三角形が正しくないため、マッチングした外点のクレータ数が少ない場合。

ケース2：基準となった三角形は正しいが、クレータマップと撮影画像で共通な外点のクレータ数がクレータ最小対応点数より少ない場合。

【0062】

ここで、本例においては、ケース1とケース2のいずれであるかを判断するために、以下に説明するマルチペアリングの手法によって、マッチしたクレータ群でベクトルを複数形成して、その形成した複数の組み合わせで、ずれが予め決められた一定条件を満たすか否かを判断して、正しい三角形のペアを得るようにした。

【0063】

すなわち、例えば図13に示すように、3点g、h、kで構成される三角形の外側の2つの外点i、jが存在する場合を考える。このとき三角形を基準としたベクトルを複数形成する。例えば、図13(A)に示すように、点g、h、kで構成される三角形の3つの辺の中で、最も長い辺(長辺)の所定方向のベクトル $[\quad] P_{hk}$ と、三角形の重心から外点iまたは外点jまでのベクトル $[\quad] P_i$ または $[\quad] P_j$ を得る。そして、長辺のベクトル $[\quad] P_{hk}$ と、外点までのベクトルとの内積および外積を算出して、撮影画像側とクレータマップ側とのペアリング判定を行う。この長辺のベクトルと外点までのベクトルとの内積および外積を算出して、ペアリング判定を行う点については、図8などで既に説明した通りである。この図13(A)の判定をパターン1のペアリングとする。なお、外点が、i、jの2点存在する場合を説明しているが、いずれか1点の場合でペアリング判定を行っても良い。以下の短辺、中辺の場合も同様である。

【0064】

さらにマルチペアリングでは、図13(B)に示すように、三角形の3つの辺の内の、最も短い長さの辺(短辺)の所定方向のベクトル $[\quad] P_{kg}$ と、三角形の重心から外点iまたは外点jまでのベクトル $[\quad] P_i$ または $[\quad] P_j$ とを使って、内積および外積を算出して、撮影画像側とクレータマップ側とのペアリング判定(パターン2のペアリング判定)を行う。

そしてさらに、図13(C)に示すように、三角形の3つの辺の内の、中間の長さの辺(中辺)の所定方向のベクトル $[\quad] P_{gh}$ と、三角形の重心から外点iまたは外点jまでのベクトル $[\quad] P_i$ または $[\quad] P_j$ とを使って、内積および外積を算出して、撮影画像側とクレータマップ側とのペアリング判定(パターン3のペアリング判定)を行う。

【0065】

そして、得られたパターン1, 2, 3の全ての組み合わせについて、各ベクトルの撮影画像側のずれと、クレータマップ側のずれとが、ずれの条件を満たしてペアリングしているか否かのチェックを行い、全てのパターン(あるいは少なくとも2つパターン)で、ずれの条件を満たす場合に、比較した撮影画像側の三角形とクレータマップ側の三角形がマッチングしていると判断するようにした。

【0066】

以下、マルチペアリングの手法の詳細について説明する。

ここでは、図13(A)に示す長辺と外点とを使ったペアリングの計算と、図13(B)に示す短辺と外点とを使ったペアリングの計算と、図13(C)に示す三角形の中辺と外点とを使ったペアリングの計算とを行う。図13(A)に示す長辺と外点とを使ったペアリングの計算については、既に説明したので省略する。

図14は、三角形の中辺を用いた計算方法を示し、図15は、三角形の短辺を用いた計算方法を示す。ここでは、クレータマップと撮影画像とでマッチングした外点のクレータを示している。

10

20

30

40

50

【 0 0 6 7 】

まず、図 1 4 の例について説明すると、撮影画像の中辺のベクトルを d_m 、クレータマップの中辺のベクトルを d'_m とする。これらのベクトル d_m 、 d'_m は、先に説明した [数 2] 式および [数 3] 式で計算される。したがって、[数 1] 式 ~ [数 4] 式と同様の計算式である、以下の [数 1 0] 式 ~ [数 1 2] 式で、中辺の内積 [middle Naiseki] および中辺の外積 [middle Gaiseki] を計算し、[数 1 3] 式で評価することができる。

【 0 0 6 8 】

【 数 1 0 】

$$\gamma = |d'_m|/|d_m|$$

【 0 0 6 9 】

【 数 1 1 】

$$middleNaiseki = |d'_m \cdot v_i - ((d'_m \cdot v'_i))/\gamma^2|$$

【 0 0 7 0 】

【 数 1 2 】

$$middleGaiseki = |d'_m \times v_i - ((d'_m \times v'_i))/\gamma^2|$$

【 0 0 7 1 】

【 数 1 3 】

$$\sqrt{middleNaiseki^2 + middleGaiseki^2} \leq MIND2 * \sqrt{2}/2$$

【 0 0 7 2 】

同様に、以下の [数 1 4] 式 ~ [数 1 6] 式で、短辺の内積 [short Naiseki] および中辺の外積 [short Gaiseki] を計算し、[数 1 7] 式で評価することができる。

【 0 0 7 3 】

【 数 1 4 】

$$\gamma = |d'_m|/|d_m|$$

【 0 0 7 4 】

【 数 1 5 】

$$shortNaiseki = |d'_m \cdot v_i - ((d'_m \cdot v'_i))/\gamma^2|$$

【 0 0 7 5 】

【 数 1 6 】

$$shortGaiseki = |d'_m \times v_i - ((d'_m \times v'_i))/\gamma^2|$$

【 0 0 7 6 】

【 数 1 7 】

$$\sqrt{shortNaiseki^2 + shortGaiseki^2} \leq MIND2 * \sqrt{2}/2$$

【 0 0 7 7 】

これらの式により演算して、中辺の内積および外積によるペアリング判定と、短辺の内積および外積によるペアリング判定と、長辺の内積および外積によるペアリング判定とのマルチペアリングを行って、双方の三角形や外点がマッチングしているか否かを評価することができる。なお、最初の評価時に、三角形の最大の長さの辺と外点との相対関係を計算するようにしたのは、クレータの検出ずれを想定した場合、辺の長さが大きい方が長さの誤差が小さくなるためである。ここで、最大の辺を使ってマッチングしていると判定できない場合には、このように残りの2つの辺についても、内積および外積を計算することで、正しい判定ができるようになる。したがって、マルチペアリングの手法を適用することで、マッチングの判定精度が向上する。

10

【 0 0 7 8 】

本例におけるマルチペアリングの手法として、さらに、複数の外点を使ったペアリング判定を行うようにした。すなわち、外点2つからなる線分と、その線分を形成した点以外の点(クレータ)との内積および外積を計算する。

図16は、この複数の外点と三角形とを使って、内積および外積を計算する状態を示す。

図16(A)は、2つの外点 i, j の線分からなるベクトル $[\quad] P_{ij}$ と、外点 i から三角形の各点 g, h, k までのベクトルとの内積および外積をそれぞれ計算して、ペアリング判定する場合を示す。ここでは、この図16(A)の判定を、パターン4のペアリング判定とする。

20

図16(B)は、2つの外点 i, j の線分からなるベクトル $[\quad] P_{ij}$ と、外点 j から三角形の各点 g, h, k までのベクトルとの内積および外積をそれぞれ計算する場合を示す。ここでは、この図16(B)の判定を、パターン5のペアリング判定とする。

【 0 0 7 9 】

この図16に示すように、複数の外点を結ぶ線分からなるベクトルと、いずれか一方の外点と三角形の各点を結ぶベクトルとを設定して、内積および外積を計算することでも、撮影画像側の三角形とクレータマップ側の三角形とがペアリングしているか否かを判定することができる。

すなわち、図13に示すパターン1, 2, 3のペアリング判定に加えて、図16に示すパターン4, 5のペアリング判定を行って、それぞれのペアリング判定結果を総合的に判断して、撮影画像側の三角形とクレータマップ側の三角形とがマッチングしているか否かを判断することができる。

30

このように、ペアリング判定を行うパターンが増えることで、よりマッチングの判定精度が高くなる。

【 0 0 8 0 】

次に、図4のフローチャートのステップS19で行われる推定座標の補正処理を説明する。

この補正処理は、探査機の撮影時の姿勢により、推定座標がずれることを補正するものである。すなわち、図17に示すように、マッチング処理により推定した座標 (X_e, Y_e) を得たとき、マッチしたクレータのずれ (x_i, y_i) の平均値 (μ_x, μ_y) から推定値を補正して、補正後の座標 X, Y を得るものである。補正後の座標 X, Y は、 $X = X_e - \mu_x, Y = Y_e - \mu_y$ である。

40

【 0 0 8 1 】

なお、マッチング処理を行う際には、図17に示す補正処理とは別に、マッチング処理の前処理として、探査機の姿勢や月面までの距離に応じた補正が必要である。

このマッチング処理時に、マッチング処理の前処理として行われる補正処理の詳細を以下説明する。

図18は、本例の点群マッチング処理により、撮影画像とクレータマップとでマッチングした点群(クレータ群)の例を示す。ここでは、図18(A)に示すように、撮影画像の点群は、クレータマップの点群に対して、 s の倍率があり、 c だけ回転していると想

50

定する。

【 0 0 8 2 】

まず、倍率 s の調整を行う。ここでは、点群マッチングで計算した、クレータマップと撮影画像の倍率 s を用いて、図 1 8 (B) に示すように、撮影画像の中心座標を原点に、撮影画像の点群 (クレータ群) のスケールをクレータマップの点群 (クレータ群) に合わせる処理を行う。

すなわち、撮影画像がクレータマップに対して倍率 s であるため、撮影画像に対して $1 / s$ 倍することで、撮影画像がクレータマップと同等の倍率になる。

【 0 0 8 3 】

次に、回転角 θ の調整を行う。ここでは、図 1 8 (C) に示すように、探査機 1 内で姿勢制御のために得られる情報であるカメラ回転角 θ_c を用いて、撮影画像の中心座標を原点に撮影画像のクレータ群を回転させ、クレータマップと撮影画像のクレータ群の回転角の差を 0° にする。すなわち、図 1 8 (C) に示すように、撮影画像がクレータマップに対して θ_c だけ回転しているため、撮影画像に対して $-\theta_c$ だけ回転させることで、クレータマップと撮影画像の回転角の差を 0° にする。

【 0 0 8 4 】

このようにして、撮影画像からマッチングした点群 (クレータ群) を、クレータマップの点群 (クレータ群) の倍率と回転角に合わせて、適切な座標が計算できるようにする。

【 0 0 8 5 】

[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、本例の位置推定を、以下のパターン 1 ~ パターン 1 0 の 1 0 種類のテストパターンについて、各パターンで 1 0 0 0 枚の異なるクレータ画像を用意して、合計で 1 0 0 0 0 回の位置推定を行った実験結果を示す。

テストパターン 1 : 理想的な状態で撮影されたクレータ画像

テストパターン 2 : 明度が悪いクレータ画像

テストパターン 3 : コントラストが悪いクレータ画像

テストパターン 4 : 焦点がぼけたクレータ画像

テストパターン 5 : 輝度ゆらぎが生じたクレータ画像

テストパターン 6 : 放射線ノイズが生じたクレータ画像

テストパターン 7 : 歪曲収差が生じたクレータ画像

テストパターン 8 : ぶれが生じた画像

テストパターン 9 : 周辺減光が生じた画像

テストパターン 1 0 : クレータを照らす太陽の高度がずれた画像

【 0 0 8 6 】

表 1 は、本例のマルチペアリングの手法を適用して位置推定を行った結果を示す。表 2 は、マルチペアリングを行わずに、三角形の長辺と外点とを使ったペアリング結果からマッチング処理を行って、位置推定を行った結果を示す。なお、表 1 で下地がグレーの欄は、表 2 に示す値よりも優れた値であることを示す。

【 0 0 8 7 】

【表 1】

テストパターン		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
推定結果 ケース数	推定成功	1000	984	669	592	998	973	999	999	999	776
	誤マッチング	0	0	3	0	2	8	1	1	1	4
	マッチング未了	0	16	328	408	0	19	0	0	0	220
推定誤差 [px]	平均	0.908	0.912	0.967	0.909	0.907	1.004	0.823	0.905	0.897	0.969
	最大	3.32	3.359	6.761	3.024	4.614	5.147	3.029	3.677	3.817	4.34
計算時間[ms]	最大	17	17	33	13	10	24	13	14	18	21

【 0 0 8 8 】

【表 2】

テストパターン		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
推定結果 ケース数	推定成功	999	985	668	592	997	967	1000	997	997	776
	誤マッチング	1	0	10	3	3	18	0	3	3	8
	マッチング未了	0	15	322	405	0	15	0	0	0	216
推定誤差 [px]	平均	0.834	0.851	1.759	0.887	0.859	1.262	0.756	0.835	0.849	1.003
	最大	3.379	3.145	272.252	4.289	5.838	218.21	3.357	4.785	5.942	65.601
計算時間[ms]	最大	16	21	29	17	18	30	17	15	17	27

【0089】

表 1 に示す本例の場合、理想的なクレータ画像であるテストパターン 1 では、1000 回のテストが全て成功し、誤マッチングが 0 回、マッチングできないマッチング未了が 0 回である。一方、テストパターン 2 ~ 10 では、誤マッチングした回数とマッチングできないマッチング未了の回数を合計した回数だけ、テストした回数である 1000 回から少ない回数が、成功回数になっているが、テストパターン 2, 5, 7, 8, 9 では、誤マッチングや未了の回数が非常に少なく、1000 回に近い成功回数を得られる。

この表 1 の本例による成功回数を、表 2 の従来手法による成功回数と比較すると、従来以上の成功回数になっている。

【0090】

一方、推定誤差については、表 1 に示す本例の場合、ほぼ 1 ピクセル以下の平均誤差であり、テストパターン 6 のみが、1 ピクセルをわずかに超えた平均誤差であり、表 2 に示す従来手法よりも大幅に改善されていることがわかる。また、推定誤差の最大値で見たとき、表 2 の従来手法の場合、テストパターン 3 やテストパターン 6 で、200 ピクセルを超える非常に大きな誤差が発生しているが、表 1 の本例の場合には、最大誤差がテストパターン 3 の場合で約 6 ピクセル、テストパターン 6 の場合で約 5 ピクセルであり、最大誤差が大きく改善されている。このため、従来手法では稀であっても大幅に誤差がある状態で位置推定が行われる可能性があったが、本例の場合には、位置推定時の最大誤差を常に小さくすることができ、探査機の着陸地点の誘導が非常に適切にできるようになる。

最大の計算時間についても、表 1 に示す本例の場合と表 2 に示す従来手法とを比較すると、本例の場合の方が短時間で計算できていることがわかる。この計算時間は、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、算出した時間である。

【0091】

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。

【0092】

[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 1 a が月面を撮影して、予め用意されたクレー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。

【0093】

また、上述した実施の形態例では、撮影画像やマップから生成する多角形として三角形としたが、より多くの点から形成される多角形を使って、同様の比較で自己位置を推定するようにしてもよい。

【符号の説明】

【0094】

1 探査機、1 a カメラ、2 月面、3 撮影画像、4 クレータマップ、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 点群マッチング処理部、1

10

20

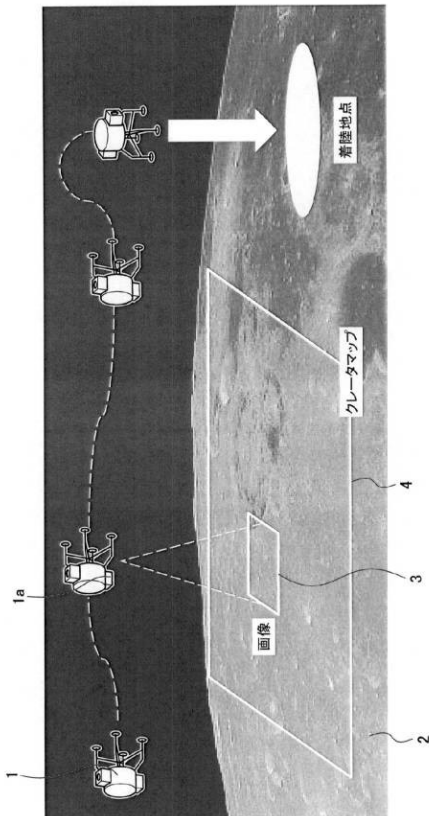
30

40

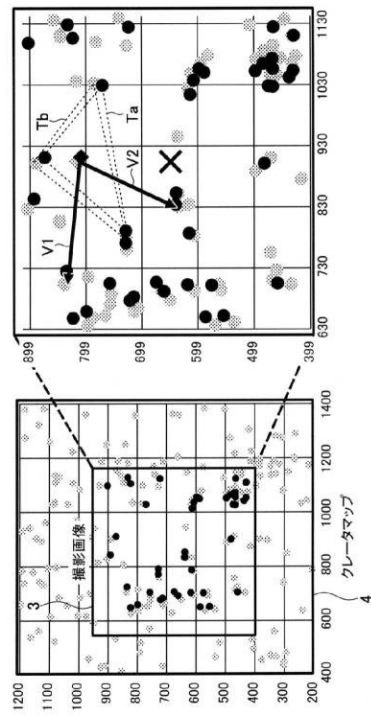
50

0 6 推定結果出力部、1 0 7 マップ記憶部

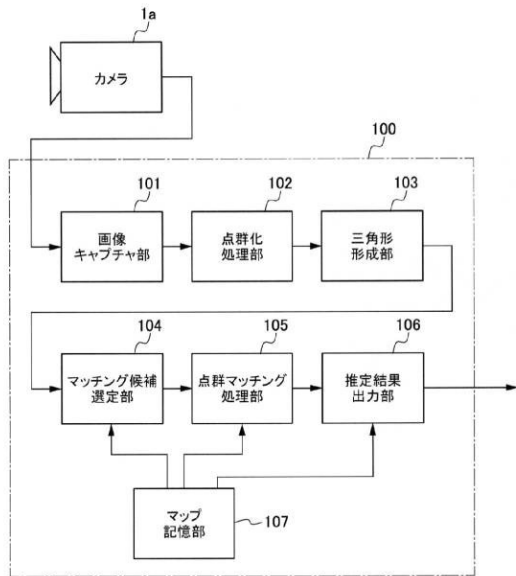
【 図 1 】



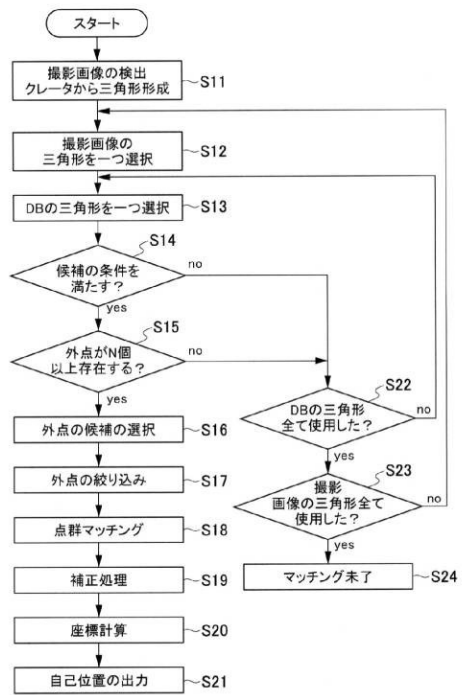
【 図 2 】



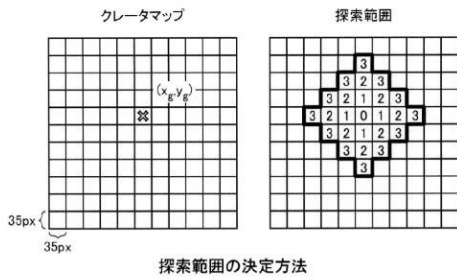
【 図 3 】



【 図 4 】

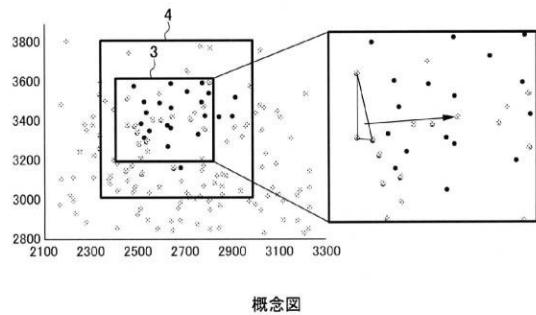


【 図 5 】



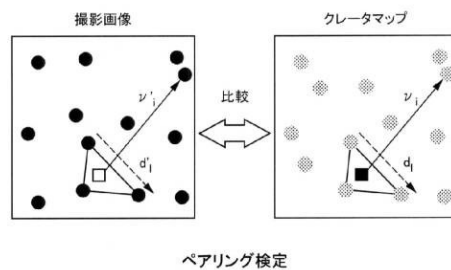
探索範囲の決定方法

【 図 6 】



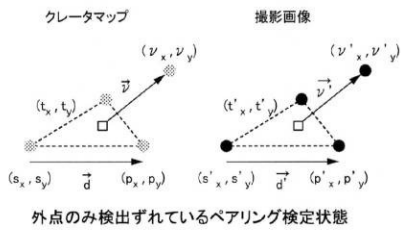
概念図

【 図 7 】

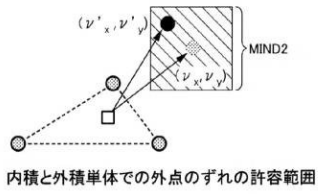


ベアリング検定

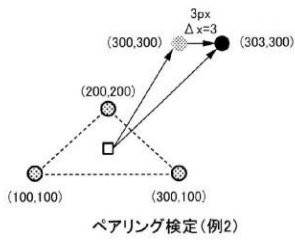
【 図 8 】



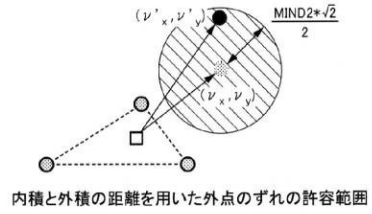
【 図 9 】



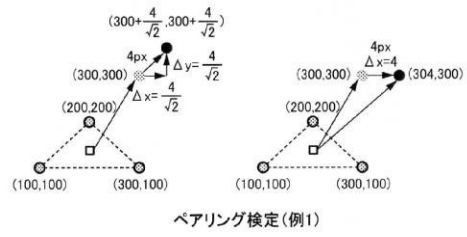
【 図 1 2 】



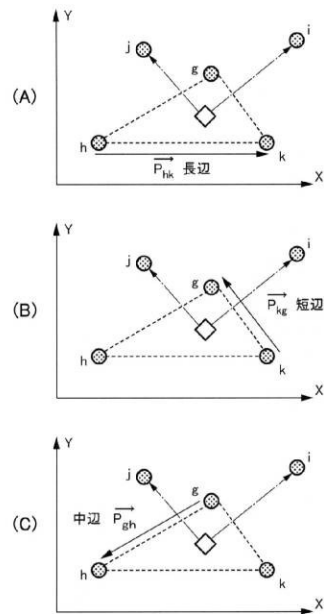
【 図 1 0 】



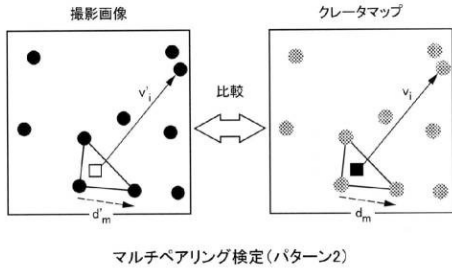
【 図 1 1 】



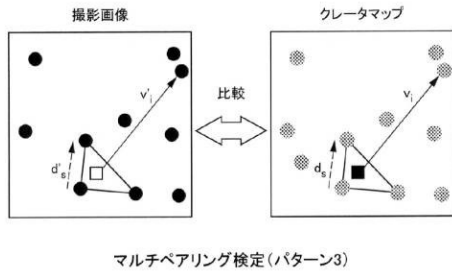
【 図 1 3 】



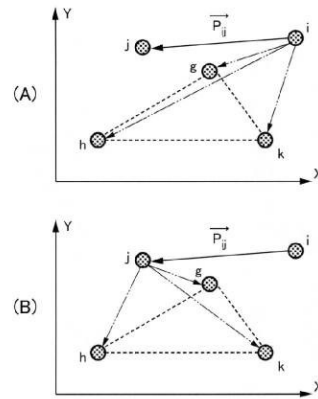
【図14】



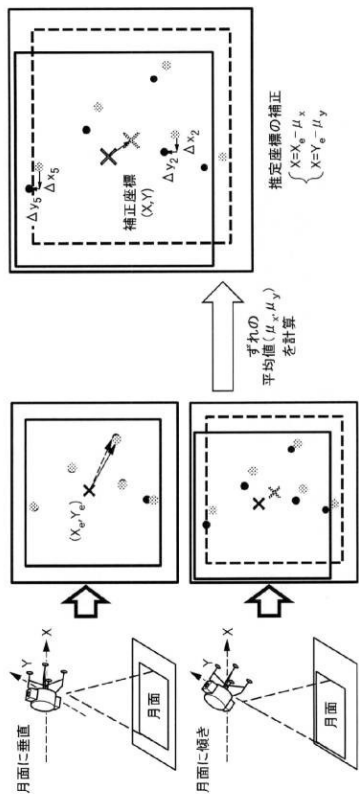
【図15】



【図16】



【図17】



【図18】

