

修士論文の和文要旨

研究科・専攻	大学院 情報システム学研究科 情報ネットワークシステム学専攻 博士前期課程		
氏名	東 佑圭	学籍番号	1152001
論文題目	着陸機からの月面画像による速度推定に関する研究		
要旨	<p>宇宙航空研究開発機構（JAXA）は、「かぐや」に続く月探査計画として、月着陸探査計画の提案を行っており、着陸機を目的地へ正確に着陸させる技術を必要としている。そのためには、着陸機の位置姿勢情報に加えて速度情報を正確に知ることが重要となる。一般的な速度推定方法では、時間の経過に伴い、誤差の影響が大きくなることが懸念される。本研究では、月を周回する着陸機によって撮影された画像を用いた速度推定について検討する。</p> <p>周回中の着陸機が撮影する画像は、着陸機的位置によって見え方の違いが生じる。この見え方の違いには、着陸機的位置情報が含まれており、高度情報とあわせて用いることで、着陸機の移動距離を推定することができ、移動の経過時間から着陸機を速度を求めることが可能となる。本研究では、着陸機の高度情報が予め与えられているものとし、着陸機が移動の前後で撮影する画像から、自動的に特徴点の検出および対応付けを行い、エピポーラ幾何学に基づいて着陸機の移動距離を求め、速度を推定する。</p> <p>着陸機の速度は実時間での推定が必要となるため、推定精度に加えて、実時間処理が必要となる。そこで本研究では、対応付けの際に、探索領域の限定や評価指標のガウス分布による重み付けを行い、処理速度および推定精度の向上を図る。実施の月面画像の利用は困難なため、月面を模したジオラマ実験装置から得られた画像を用いて実験を実施し、提案手法の有効性を確認した。</p> <p>また、着陸機の高度の変化や回転を考慮した、より現実的な模擬月面画像を取得するため、「かぐや」から得られた DEM データおよび衛星画像を用いて月面の 3 次元 CG を作成する。CG による合成画像を用いて、提案する手法での特徴点の抽出および対応付けを行い、着陸機の移動距離を推定し、推定結果と想定した移動距離との比較を実施し、より現実的な模擬月面画像を用いての速度推定が可能であることを確認した。</p>		

平成24年度修士論文

着陸機からの月面画像による 速度推定に関する研究

電気通信大学大学院 情報システム学研究科

情報ネットワークシステム学専攻 博士前期課程

学籍番号： 1152001

氏名： 東 佑圭

主任指導教員： 片山 保宏 客員准教授 (JAXA)

指導教員： 西田 信一郎 客員教授 (JAXA)

指導教員： 森田 啓義 教授

提出年月日：平成25年1月24日 (木)

目次

1. はじめに	- 1 -
1.1. 背景.....	- 1 -
1.2. 目的.....	- 2 -
1.3. 既存研究.....	- 3 -
1.4. 論文構成.....	- 4 -
2. 画像を用いた速度の推定.....	- 5 -
2.1. 画像を用いた速度推定の手順.....	- 5 -
2.1.1. 画像の取得.....	- 5 -
2.1.2. 特徴点の抽出および対応付け.....	- 6 -
2.1.3. 移動距離の算出.....	- 7 -
2.2. 提案する特徴点の抽出および対応付け方法.....	- 8 -
2.2.1. 画像を分割した特徴点の抽出.....	- 8 -
2.2.2. ウィンドウマッチングによる対応付け	- 9 -
2.3. 処理速度および推定精度の向上方法	- 12 -
2.3.1. 探索範囲の限定.....	- 12 -
2.3.2. SAD の値へ重み付けによるマッチング補正	- 13 -
3. 提案する特徴点の抽出および対応付け方法の評価.....	- 15 -
3.1. 画像の取得	- 15 -
3.2. 特徴点検出および対応付けの際のパラメータの決定.....	- 16 -
3.2.1. 分散の閾値.....	- 16 -
3.2.2. 分割ブロックサイズ.....	- 18 -
3.2.3. マッチングウィンドウサイズ.....	- 19 -
3.3. 提案手法による処理速度および推定精度の向上についての評価	- 21 -
3.3.1. 探索範囲の限定.....	- 21 -
3.3.2. SAD への重み付けによるマッチング補正.....	- 22 -
3.4. 最適としたパラメータを用いた対応付け	- 24 -
3.5. 本節のまとめ.....	- 25 -
4. 月面の 3 次元 CG を用いた移動距離推定.....	- 27 -
4.1. 月面地形 CG の作成	- 27 -
4.2. 作成した月面の 3 次元 CG を用いた移動距離推定	- 31 -
4.3. 着陸機の軌道のシミュレートと画像の平行化	- 33 -
4.4. 着陸機の高度変化および回転を考慮した画像を用いた移動距離推定	- 36 -

4.4.1. 分散の閾値.....	- 36 -
4.4.2. 分割ブロックサイズ.....	- 42 -
4.4.3. マッチングウィンドウサイズ.....	- 43 -
4.5. より現実的な軌道での移動距離推定	- 45 -
4.6. 本節のまとめ.....	- 47 -
5. おわりに	- 49 -
参考文献	- 51 -
謝辞	- 53 -
付録 F 行列の評価方法.....	- 55 -

目次

図 2-1. 画像を用いた速度推定の手順の概略	- 5 -
図 2-2. 月を周回する着陸機の軌道	- 6 -
図 2-3. 着陸機から撮影される画像	- 6 -
図 2-4. 基準画像のブロック内での特徴点検出	- 9 -
図 2-5. 3×3 のウィンドウマッチング例	- 10 -
図 2-6. 対応付けの結果	- 11 -
図 2-7. 限定された探索範囲	- 13 -
図 2-8. ガウス分布による重み付け	- 13 -
図 3-1. ジオラマ実験装置から得た画像	- 15 -
図 3-2. 分散の閾値による対応点数と処理速度の変化	- 17 -
図 3-3. 分散の閾値による距離 d と処理速度の変化	- 17 -
図 3-4. 分割ブロックサイズによる対応点と処理速度の変化	- 18 -
図 3-5. 分割ブロックサイズによる距離 d と処理速度の変化	- 19 -
図 3-6. マッチングウィンドウサイズによる距離 d と処理速度の変化	- 20 -
図 3-7. ガウス分布による重み付けの有無の比較	- 23 -
図 4-1. 使用した DEM データ範囲	- 27 -
図 4-2. DEM の座標データ	- 28 -
図 4-3. 2 通りの三角パッチあて	- 28 -
図 4-4. 作成した 3 次元 CG	- 29 -
図 4-5. 約 6[km] 範囲の 3 次元 CG	- 30 -
図 4-6. 全範囲の 3 次元 CG 内での約 6[km] 範囲	- 30 -
図 4-7. 作成した CG を用いて取得された基準画像および参照画像	- 31 -
図 4-8. 特徴点の抽出と対応付け	- 32 -
図 4-9. 着陸機の高度および回転の変化	- 33 -
図 4-10. 高度変化画像の平行化	- 34 -
図 4-11. Y 軸回転画像の平行化	- 35 -
図 4-12. Z 軸回転画像の平行化	- 35 -
図 4-13. 高度変化画像のマッチング結果	- 39 -
図 4-14. Y 軸回転画像のマッチング結果	- 40 -
図 4-15. Z 軸回転画像のマッチング結果	- 41 -
図 4-16. 降下と回転を想定した画像	- 45 -
図 4-17. 降下と回転を想定した場合のマッチング結果	- 46 -
図 A-1: エピポーラ幾何	- 55 -
図 A-2: エピポーラ線と u_b の距離 d	- 55 -

表目次

表 3-1. 分散の閾値の変化による処理速度およびマッチング精度の変化.....	- 16 -
表 3-2. 分割ブロックサイズの変化による処理速度およびマッチング精度の変化.....	- 18 -
表 3-3. マッチングウィンドウの変化による処理速度およびマッチング精度の変化 .	- 20 -
表 3-4. 探索範囲の異なる 1 つの対応点での処理速度の変化.....	- 21 -
表 3-5. 探索範囲の限定による処理速度およびマッチング精度の変化	- 22 -
表 3-6. ガウス分布による重み付けの結果	- 22 -
表 3-7. 手動によって得られた F 行列との比較.....	- 24 -
表 4-1. 分散の閾値の変化による結果（高度変化画像）	- 37 -
表 4-2. 分散の閾値の変化による結果（Z 軸回転画像）	- 37 -
表 4-3. 分散の閾値の変化による結果（Y 軸回転画像）	- 38 -
表 4-4. 分散の閾値を 170 とした場合の分割ブロックサイズの変化による結果	- 42 -
表 4-5. 分散の閾値を 160 とした場合の分割ブロックサイズの変化による結果	- 43 -
表 4-6. マッチングウィンドウサイズの変化による結果	- 44 -

1.はじめに

1.1.背景

地球の唯一の自然衛星であり，地球に最も近い自然の天体である月は，科学的な利用価値があると考えられ，古くから研究対象としてみられている．月探査は，宇宙における人類の活動領域拡大の第一歩であり，また月の組成成分の解析などによる科学データは，月の起源と進化の解明や将来の月の利用において非常に重要なものとなる．月探査は，1954年に旧ソビエト連邦によって打ち上げられた宇宙着陸機ルナ2号に始まり，1967年にはアメリカ航空宇宙局(NASA)による有人月面着陸(アポロ計画)，2007年には宇宙航空研究開発機構(JAXA)による大型月周回衛星「かぐや」(SELENE)の打ち上げなど，様々なアプローチが試みられている．

JAXAは，「かぐや」による月周回探査に成功し，現在，「かぐや」に続く月探査計画として，月着陸探査計画(SELENE-2)の提案が行われている．月面着陸探査では，月面に着陸の妨げとなる岩石や崖などの障害が存在し，さらに科学的利用価値の高い地点には障害が多く存在する可能性が高いため，着陸機を安全な場所へ正確に着陸させる必要がある．着陸機を目的地に正確に着陸させるためには，航法誘導制御が重要であり，着陸機の位置姿勢情報に加えて速度の情報を正確に知ることが重要となる．

1.2. 目的

一般的な速度推定方法では、時間の経過に伴い、誤差の影響が大きくなることが懸念される。本研究では、月を周回する着陸機が移動の前後で撮影した画像を用いて、着陸機の月表面に対する相対的な移動距離を推定し、求めた移動距離から着陸機を速度を推定することによる補正法について検討する。

周回中の着陸機が撮影する画像は、着陸機的位置によって見え方の違いが生じる。この見え方の違いには、着陸機的位置情報が含まれており、高度情報とあわせて用いることで、着陸機の移動距離を推定することができ、移動の経過時間から着陸機を速度を求めることが可能となる。本研究では、着陸機の高高度情報が予め与えられているものとし、着陸機が移動の前後で撮影する画像から、特徴点の検出および対応付けを行い、エピポーラ幾何学[1][2]に基づいて着陸機の移動距離を求め、速度を推定する。

着陸機の速度は実時間での推定が必要となるため、特徴点の抽出および対応付けは自動的に行う必要がある。また、特徴点の抽出および対応付けの精度が着陸機の速度推定の精度に深く関係するため、処理速度が速く、かつ精度の良い方法が必要となる。そこで本研究では、対応付けの際の探索領域の限定や評価指標の重み付けによるマッチング補正を行い、処理速度および精度の向上を図る。なお、実施の月面画像の取得は困難なため、月面を模した模擬月面ジオラマ実験装置から得られた画像を用いて実験を行う。また、特徴点の検出および対応付けの際のいくつかのパラメータの変化による処理速度および推定精度の変化を比較し、最適と思われるパラメータを求める。そのパラメータを用いた対応付けの結果と、高い精度が得られる手動による対応付けの結果を比較し、本研究で行う特徴点の抽出および対応付け方法の評価を行う。

また、「かぐや」の DEM 情報を用いて月面の 3 次元 CG を作成し、CG から合成される模擬月面画像を用いて、着陸機の移動距離を推定する。CG を用いて、衛星画像から得られる実際の月面の特徴を利用し、また、着陸機の高度の変化や回転を考慮した、より現実的な着陸機の軌道を想定することによって、より実施の月面画像に近似する画像での速度推定実験を行う。求めた移動距離と想定した移動距離を比較し、本研究の速度推定方法の評価を行う。

1.3. 既存研究

画像を用いた位置や速度（移動距離）推定の研究は数多くなされており，単一のカメラを用いた SLAM によるリアルタイムでの自己位置推定[3]や，着陸機の惑星への正確な着陸を目的とした，着陸機の降下中に撮影された画像を用いた着陸機の水平方向の速度や地形に対する相対的な状態を推定する研究[4][5][6][7]が行われている．ラジコンのヘリコプターを用いて，画像による速度推定のテストを行う研究もあり，同時に画像を用いて障害の検知を行うことも試みられている[8]．ステレオカメラによる，画像を用いた着陸機の速度推定の検討も古くから存在しており[9][10]，画像を用いた速度推定の論理的な有効性が示されている．

DIMES[4]は，着陸機から撮影された画像を用いて，着陸機の水平速度を推定する，惑星着陸時に着陸機を制御するために使用された初のロボットビジョンシステムであり，速度の推定には，降下画像からの特徴の選択，追跡を採用し，画像と複数のセンサの測定値を組み合わせ速度を推定している．DIMES は低コスト，ロバスト，効率的な計算速度を目指し，実際に MER の着陸時に使用され，Spirit, Opportunity の火星着陸において正しい着陸機の速度推定に成功し，火星への着陸に貢献した．DIMES の成功によって，将来の着陸アプリケーションのためのビジョンシステムの信頼性が高まっている．

また，DIMES の開発において，MOC2DIMES[11]と呼ばれる降下画像のシミュレータが，アルゴリズムの開発やパラメータのチューニング，マシンビジョンシステムの性能評価に用いられた．MOC2DIMES によってシミュレートされる降下画像は，カメラのショットノイズや衝効果，粒子状のデブリなどによる非理想的な効果も含んでおり，DIMES の開発において非常に重要な役割を果たした．

1.4. 論文構成

本論文の構成および概要について以下に記す。

2節では、画像を用いた速度推定の手順について述べ、論文内にある語句の簡単な説明を記す。また、提案する特徴点の検出および対応付け方法、処理速度および推定精度の向上方法について記す。

3節では、月面を模したジオラマ実験装置から得られる画像を用いて、提案する手法での特徴点の検出および対応付けを行う。対応付けによって得られる対応点群から求まる F 行列を評価することで、提案する特徴点の検出および対応付け方法の有効性を検討する。また、特徴点の検出および対応付けの際の、処理速度および推定精度の向上を目的とした、探索領域の限定、重み付けによるマッチング補正の効果についての検討も行う。

4節では、着陸機の高度の変化や回転を考慮した、より現実的な模擬月面画像を取得するために、月周回探査機「かぐや」によって取得された月面の数値標高モデル (DEM) のデータから 3次元 CG を作成する。着陸機の降下軌道を想定し、CG から得られる画像を用いて、提案する手法での特徴点の検出および対応付けを行い、着陸機の移動距離を推定する。推定した結果と想定した移動距離との比較を行うことで、提案する手法を評価する。

5節では、3節および4節の実験の結果をまとめ、今後の予定について記す。

2. 画像を用いた速度の推定

本研究では、月を周回している着陸機から撮影された画像を用いて、着陸機の速度推定を行う。ここでは、画像を用いた速度推定の手順について記し、本研究で提案する特徴点の抽出および対応付け方法、速度推定の処理時間および推定精度の向上方法について詳述する。

なお、今回の速度推定は補正を目的としており、一般的な速度計測方法から得られる情報を参照することを前提としているため、着陸機のおよその移動距離および姿勢情報は予め得られているものとする。また、着陸機の高度情報は高度計などから得られているものとする。

2.1. 画像を用いた速度推定の手順

画像を用いた速度推定の手順の概略を図 2-1 に示し、各手順の内容を以下に記す。

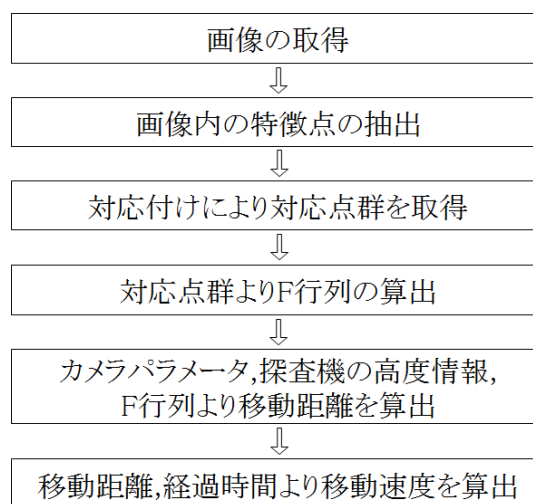


図 2-1. 画像を用いた速度推定の手順の概略

2.1.1. 画像の取得

今回の実験では、月を周回する着陸機が移動の前後で撮影する 2 枚の画像を用いる。以降、移動前に撮影された画像を基準画像、移動後に撮影された画像を参照画像と呼ぶこととする。画像の取得方法は実験によって異なるため、それぞれの実験ごとに各節で説明する。

基本として、高度 h で月を周回する着陸機の軌道をイメージし、着陸機は移動しながら月面に向かって画像を取得するものとする。高度 h で月を周回する着陸機の軌道イメージを図 2-2 に、取得される画像の例を図 2-3 に示す。図 2-3 の基準画像内の赤点は特徴点、参照画像内の赤点は基準画像内の特徴点に対応する点を示す。

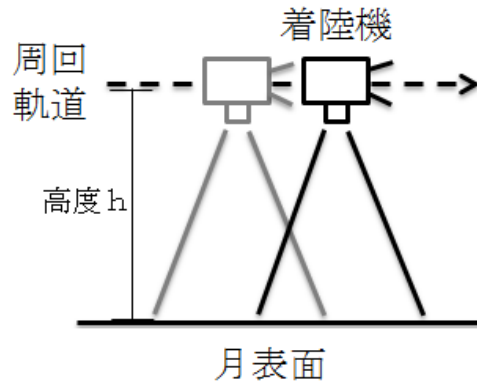
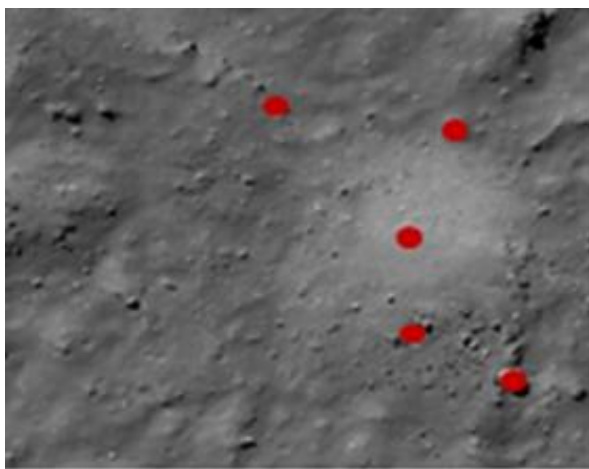
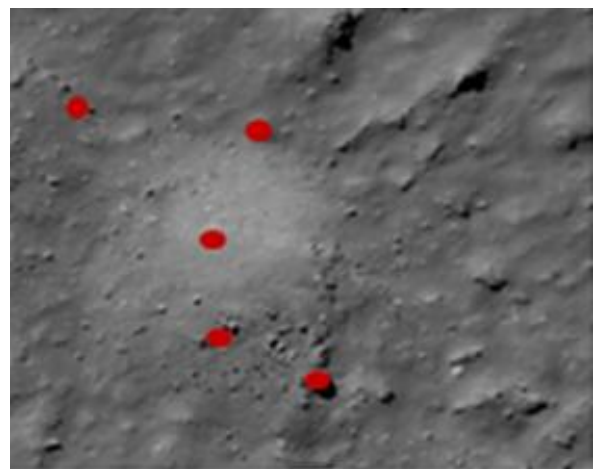


図 2-2. 月を周回する着陸機の軌道



(a) 基準画像



(b) 参照画像

図 2-3. 着陸機から撮影される画像

2.1.2. 特徴点の抽出および対応付け

2枚の画像の取得後、基準画像から特徴点を抽出し、参照画像から抽出した特徴点に対応する点を求める。対応付けによって8点以上の対応点が求めれば、8点アルゴリズム[12]によってF行列（Fundamental Matrix）が求まる。

F行列とは、基礎行列とも呼ばれ、2つのカメラ間（今回の場合では移動前後のカメラ間）の位置、姿勢、カメラの内部パラメータの要素を含む行列である。F行列とカメラパラメータ、着陸機の高度情報から、着陸機の移動距離を推定することができる。また、カメラパラメータとは、焦点距離や画像サイズなどのカメラによって決定される値を含む内部パラメータと、ワールド座標（空間内のすべての物体に共通する座標）に対するカメラの位置や姿勢情報を表す外部パラメータを表す。F行列およびカメラパラメータについては参考文献[1][2][13]にて詳述されている。

F行列は2枚の画像における対応点の変移量から求められ、対応点の取得が正しく行えているかどうか（マッチング精度）によって、求められるF行列の精度が変化し、着陸機の世界推定結果の精度も変化する。特徴点の抽出および対応付けは、人の目で見ても、手動で行う方法が非常に良い精度が得られるが、膨大な時間が必要となってしまう。着陸機の世界推定は実時間で行う必要があるため、処理速度の速い自動的、かつ高い推定精度が得られる方法が必要となる。本研究での特徴点の抽出および対応付けの方法については後に詳述する。

2.1.3. 移動距離の算出

前述の通り、F行列とカメラパラメータ、着陸機の世界情報から着陸機の移動距離を推定することができる。まず、求めたF行列とカメラの内部パラメータからE行列 (Essential Matrix) を求める。次に、E行列を特異値分解し、並進ベクトル t と回転行列 R を求め、内部パラメータが既知、外部パラメータが未知のカメラによる復元を行う[1]。ただし、そのままでは定数倍の不定性が残るため、着陸機の世界情報を用いて、移動距離を推定する。

着陸機の世界速度は、着陸機の移動距離と経過時間から推定できる。本研究では、求めたF行列の精度、または着陸機の世界移動距離の推定精度を求めることで、速度の推定精度を求める。

2.2. 提案する特徴点の抽出および対応付け方法

月を周回する着陸機が、実時間での速度推定を可能とするために、処理速度が速く、推定精度の良い特徴点の抽出および対応付け方法が必要となる。ここでは、一般的な速度計測方法や高度計から得られる情報を利用した特徴点の抽出および対応付け方法について記す。

2.2.1. 画像を分割した特徴点の抽出

2枚の画像において、対応付けを行うために、まず基準画像内から特徴点を抽出する。本研究では、基準画像において、周囲の画素値の分散の合計が最も高く、かつ閾値以上のピクセルを特徴点とする。ただし、F行列を求める際には、特徴点は画像全体に広く分布していることが好ましく、岩石などの部分は全体的に分散値が高く、特徴点が狭い範囲に集中してしまうため、画像全体を一定間隔で格子状に分割し、各ブロック内で1つ以下の特徴点を求める。

特徴点（対応点）の検出数は、F行列の精度に関係しているため、分散の閾値や分割ブロックのサイズ（分割数）の変化による特徴点数、F行列の精度の変化について実験を行う。実験については3節にて詳述する。

図 2-4 に、画像の分割グリッド（赤線）と各ブロック内で検出された特徴点（緑方形内赤丸）のイメージを示す。画像内の分散の閾値は 0 とし、特徴点の抽出結果が分かりやすいように分割ブロックサイズは 80×80 としているが、実際には分割ブロックサイズはもっと小さい値で行う。

なお、図 2-4 内左側には分割グリッドが存在していないが、これは予め得られている着陸機のおよその移動距離や高度情報を参考にし、誤差の範囲を含めても参照画像に対応する点が存在しない場所からは特徴点を検出しないようにしているためである。およその移動距離や高度情報は、一般的な速度計測方法や高度計からの情報を利用することを想定している。これによって、余分な対応付けの探索を減らし、処理時間の短縮および誤マッチングの減少を図る。

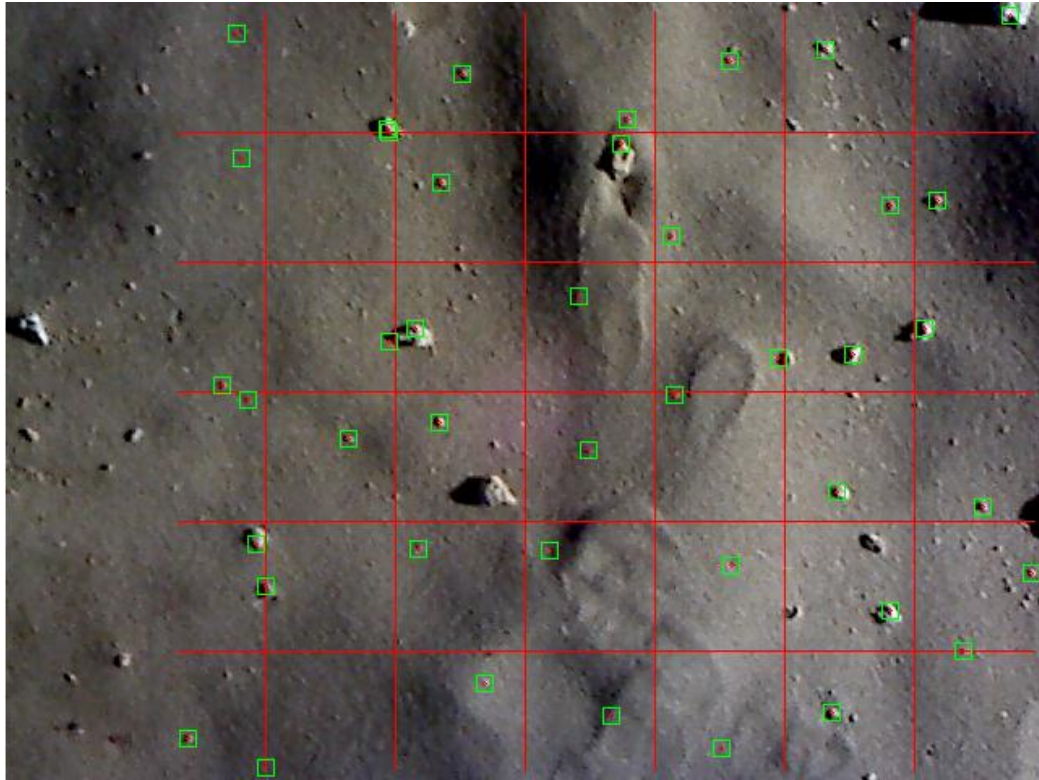


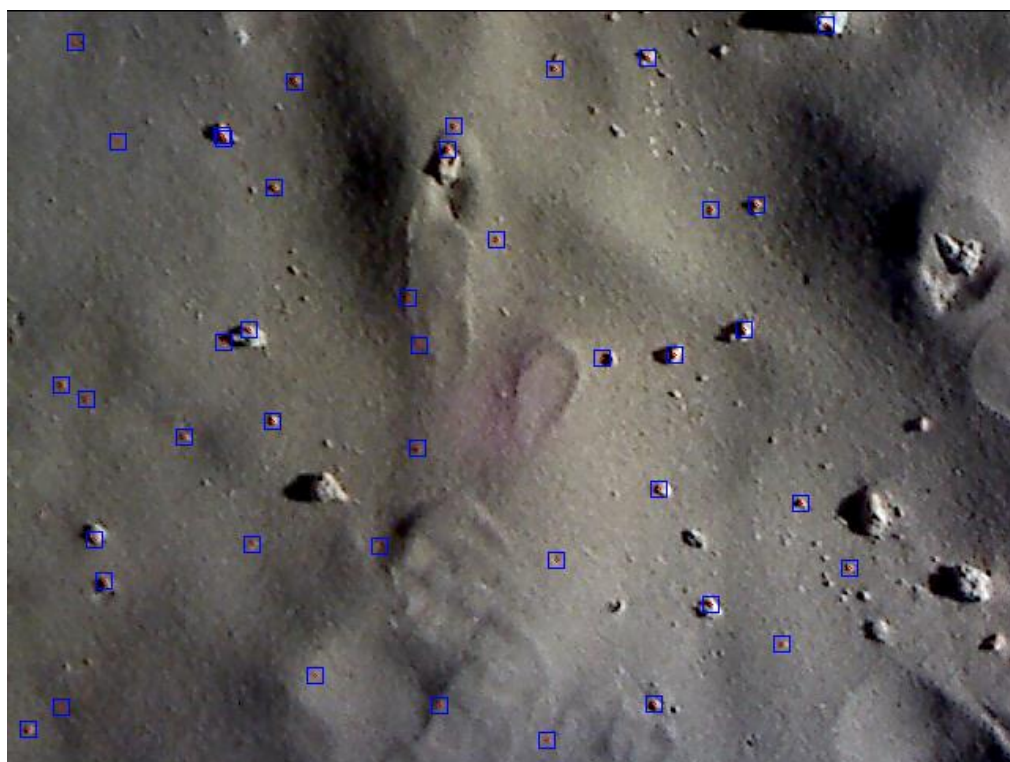
図 2-4. 基準画像のブロック内での特徴点検出

2.2.2. ウィンドウマッチングによる対応付け

基準画像で検出した特徴点に対応するピクセルを参照画像内から選択し、対応点とする。注目する特徴点の周囲をマッチングウィンドウとし、参照画像内にてマッチングウィンドウと最も近似する点を探索する、ウィンドウマッチングによって対応付けを行う。ウィンドウマッチングの際には、各ピクセルにおいて SAD(Sum of Absolute Difference) の値を求め、SAD の結果が最も小さいピクセルを対応点とする。ウィンドウマッチングを 3×3 [pixel] とした場合のウィンドウマッチングの例を図 2-5 に示す。1つの四角形が1ピクセルを表し、中央が注目ピクセル、中の数字が画素数を表す。SAD の値は、各対応するピクセル同士の差の絶対値を取り、その値を合計するため、この場合の SAD の値は 14 となる。



(a) 基準画像



(b) 参照画像

図 2-6. 対応付けの結果

2.3. 処理速度および推定精度の向上方法

処理速度および推定精度の両立は難しく、推定精度を上げるためには処理速度が長くなる可能性が高く、逆に処理速度を短くしようと思えば推定精度が下がってしまう可能性が高くなる。ここでは、一般的な速度計測方法および高度計から得られる情報を用いて、対応付けの際の探索範囲を限定することによる処理速度および推定精度の向上方法について記す。また、SADの結果への重み付けによるマッチング補正による、処理速度をあまり変えることのない推定精度の向上方法について記す。

2.3.1. 探索範囲の限定

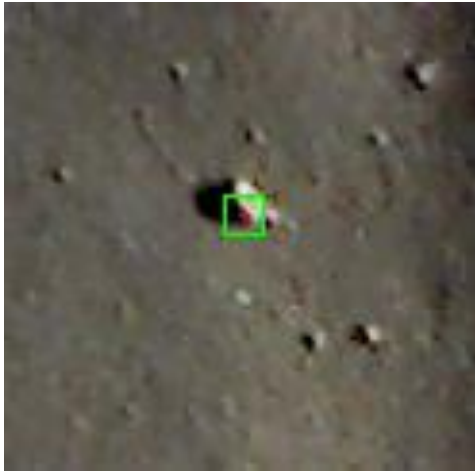
一般的な速度計測方法より得られる、誤差の含まれる着陸機の姿勢および移動距離情報と高度情報を用いて、探索範囲を限定する。全範囲の探索に比べ、対応点の探索時間を減少させることによる処理速度の向上が見込まれ、また誤マッチングを減少させることによって推定精度も向上させることができると考えられる。

着陸機の姿勢を回転行列 R 、移動距離を並行移動ベクトル t 、カメラの内部パラメータを行列 A とし、月面上のある空間座標を (X, Y, Z) とする。その空間座標が画像に投影される点 (u, v) は以下の式で求められる。 λ は定数倍の不定性を表し、着陸機の高度情報によってこの不定性を取り除くことができる。

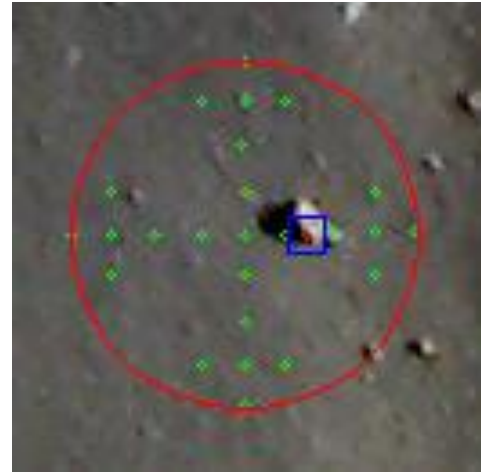
$$\lambda [u, v, 1]^T = A[R|t][X, Y, Z, 1]^T$$

高度情報によって不定性を除き、基準画像を撮影した着陸機の位置および姿勢を基準とすることで、着陸機の姿勢の変位および移動距離情報から、誤差がない場合の特徴点に対応する点（仮の対応点とする）座標が求められる。さらに、移動距離および姿勢の誤差情報から、仮の対応点の周囲に複数の仮の対応点が得られる。得られた複数の仮の対応点を内包する楕円範囲内を探索範囲とする。誤差については、ここでは移動距離の 10[%]を上下左右の 4 方向に加え、月面に対して水平方向に最大 0.5[degree]回転するものとしている。

得られた探索範囲のイメージを図 2-7 に示す。基準画像内の赤点が特徴点、緑方形がマッチングウィンドウを示し、参照画像内での赤楕円が探索範囲、緑点が複数の仮の対応点、青方形内にある赤い点が実際に求めた対応点を示す。正しくマッチングが行われ、対応付けに成功していることが示されている。



(a) 基準画像



(b) 参照画像

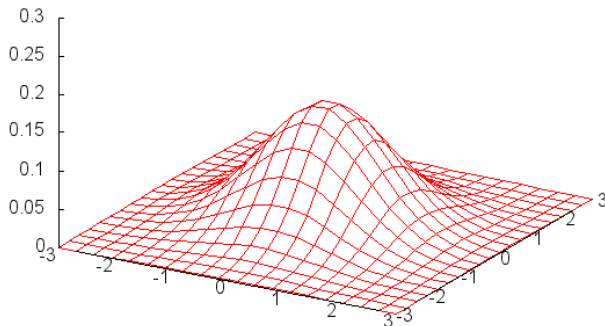
図 2-7. 限定された探索範囲

2.3.2. SAD の値へ重み付けによるマッチング補正

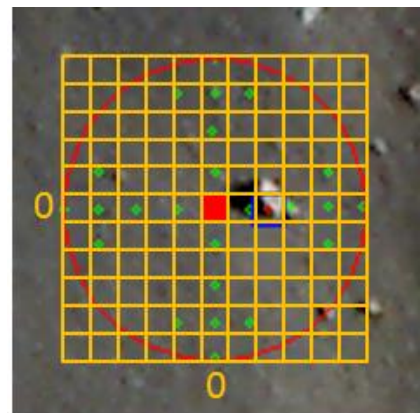
着陸機の移動距離および姿勢の誤差分布は、ガウス分布となると考えられるため、対応点の分布は、探索範囲の中央に近いほど多くなると考えられる。

そこで、図 2-8 に示すように探索範囲の中央を(0,0)とし、探索範囲の中央ほど SAD の値が小さくなるように、ガウス分布による重み付けを行うことで、マッチング結果への補正を行い、誤マッチングの減少による推定精度の向上を図る。処理速度については、最終的な SAD の結果に対してのみ計算を行うため、計算量は少なく、処理時間に大きな影響は与えないと考えられる。平均 u 、分散 σ^2 とした場合の 2 次元ガウス分布の式は以下の通りとなる。

$$h_g(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x-u)^2 + (y-u)^2}{2\sigma^2}\right)$$



(a) ガウス分布



(b) 参照画像

図 2-8. ガウス分布による重み付け

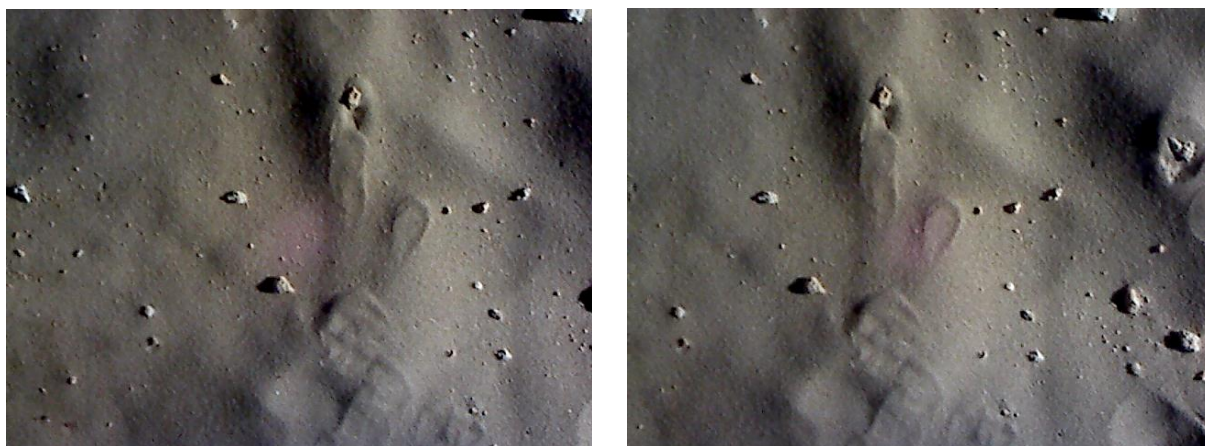
3. 提案する特徴点の抽出および対応付け方法の評価

画像を用いた速度推定では，特徴点の抽出および対応付けが重要となり，実時間での着陸機の速度推定のために，処理速度および推定精度の向上が必要となる．速度の推定精度は対応付けのマッチング精度が深く関係するため，ここでは，2 節に記した手法を用いて特徴点の抽出および対応付けを行い，処理速度およびマッチング精度の結果を評価することによって，手法の有効性を検討する．

3.1. 画像の取得

実施の月面画像の利用は困難なため，本節の実験では，月面を模したジオラマ実験装置を用いて，月面画像の代わりとなる基準画像および参照画像を取得する．高精度移動ステージに設置したカメラによって，標準砂によって形成した月を模擬したジオラマ地形を撮影する．また，単一光源によって照明環境を模擬している．ステージを地面に対して移動させ，移動の前後に取得した画像において，基準画像から特徴点を検出し，参照画像から検出した特徴点に対応する点を求めることで，速度推定に必要な 2 枚の画像間の対応点群を求め，対応点群から F 行列を求める．

取得した画像のサイズは 640×480 [pixel]であり，カメラはおよそ 1.43 [m]の高度から基準画像を撮影し，その後地面に対して 0.04 [m]平行移動した位置で参照画像を撮影した．実験に使用した画像を図 3-1 に示す．使用したカメラは株式会社マイクロビジョン社製の VC-4301 である．



(a) 基準画像

(b) 参照画像

図 3-1. ジオラマ実験装置から得た画像

3.2. 特徴点検出および対応付けの際のパラメータの決定

まず、特徴点検出および対応付けの際の重要なパラメータとなる、分散の閾値、画像の分割ブロックサイズ、マッチングウィンドウサイズについて、最適と思われるパラメータを求める。それぞれのパラメータの値を変更し、特徴点の検出および対応付けの処理速度を求め、また、得られた対応点群から求まる F 行列を評価することによりマッチング精度の評価を行う。マッチング精度については、F 行列の精度より求め、表および図内での距離 d の値が小さいほどマッチング精度が高いということを意味する。F 行列の評価方法については付録にて詳述する。

3.2.1. 分散の閾値

ここでは、特徴点検出時の分散の閾値を 0 から 700 まで 100 刻みで変化させ、各値での処理速度およびマッチング精度の評価を行う。分割ブロックサイズは 20×20 [pixel]、マッチングウィンドウのサイズは 11×11 [pixel]としている。実験の結果を表 3-1 に示し、表から得られるグラフを図 3-2、図 3-3 に示す。

表 3-1. 分散の閾値の変化による処理速度およびマッチング精度の変化

分散の閾値	0	100	200	300	400	500	600	700
対応点数	648	605	472	374	309	261	235	201
処理速度[ms]	19239	18023	14675	11368	9749	5012	7322	6440
距離 d ($\times 10^{-3}$)	67.739	53.703	49.231	46.511	25.961	26.908	23.654	24.259

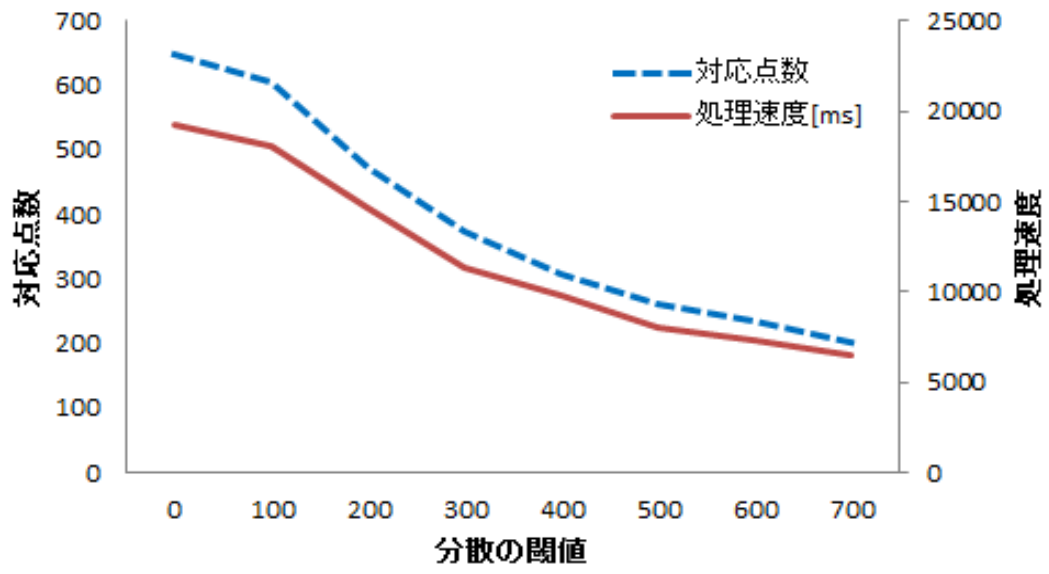


図 3-2. 分散の閾値による対応点数と処理速度の変化

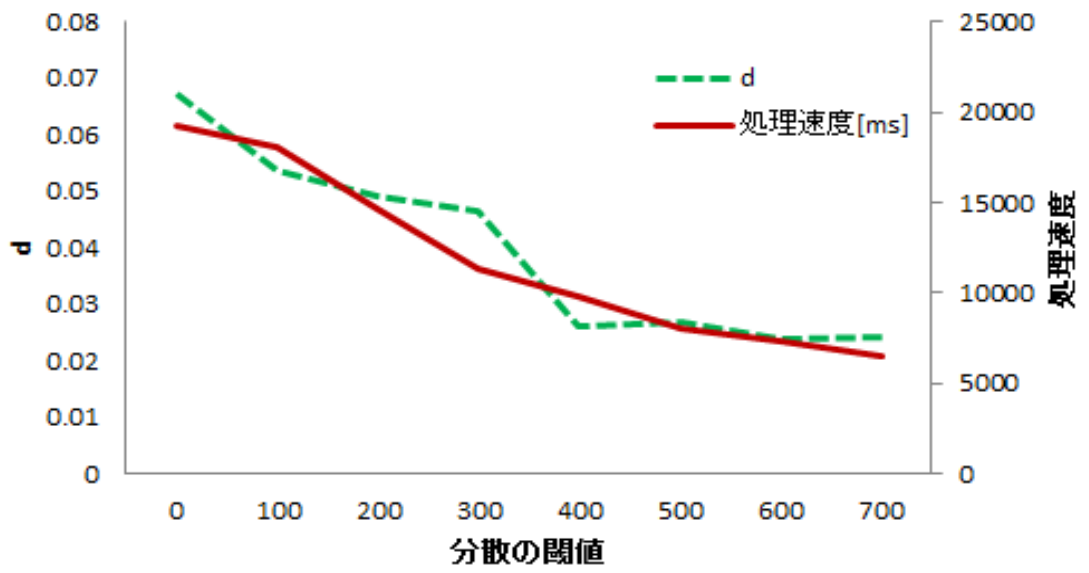


図 3-3. 分散の閾値による距離 d と処理速度の変化

分散の閾値を上げると対応点数が減り、それに伴って処理速度が速くなり、マッチング精度も向上（距離 d の値が減少）している。距離 d の値は閾値 300～400 の間で大きく減少しており、今回使用した画像、パラメータでは、閾値を 400 とすることでマッチングミスを引き起こす特徴点が多く減少していると考えられる。マッチング精度は、閾値 400 以降は大きくは変化していないが、今回の実験では、マッチング精度の最も良い 600 を最適とする。

3.2.2. 分割ブロックサイズ

ここでは、特徴点検出時の画像の分割ブロックサイズの1辺を5から30 [pixel]まで5 [pixel]刻みで変化させ、各値での処理速度およびマッチング精度の評価を行う。分散の閾値は400、マッチングウィンドウのサイズは11×11[pixel]としている。実験の結果を表3-2. 分割ブロックサイズの変化による処理速度およびマッチング精度の変化に示し、表から得られるグラフを図3-4、図3-5に示す。

表 3-2. 分割ブロックサイズの変化による処理速度およびマッチング精度の変化

分割ブロックサイズ	5×5	10×10	15×15	20×20	25×25	30×30
処理速度[ms]	28589	16632	11763	9391	7306	6270
対応点数	954	546	385	309	232	204
距離 $d(\times 10^{-3})$	13.358	21.197	16.144	25.961	22.748	22.088

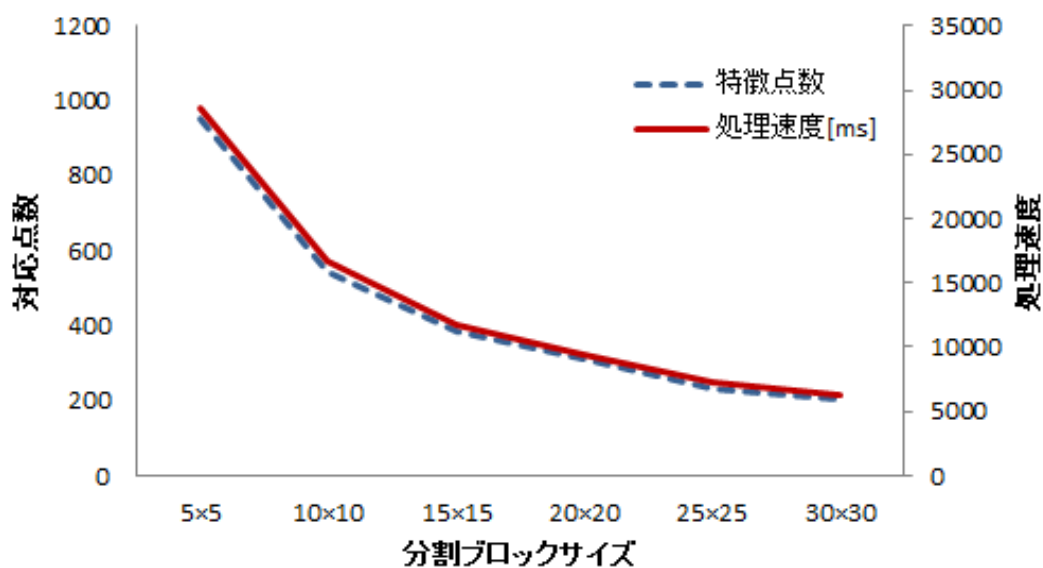


図 3-4. 分割ブロックサイズによる対応点と処理速度の変化

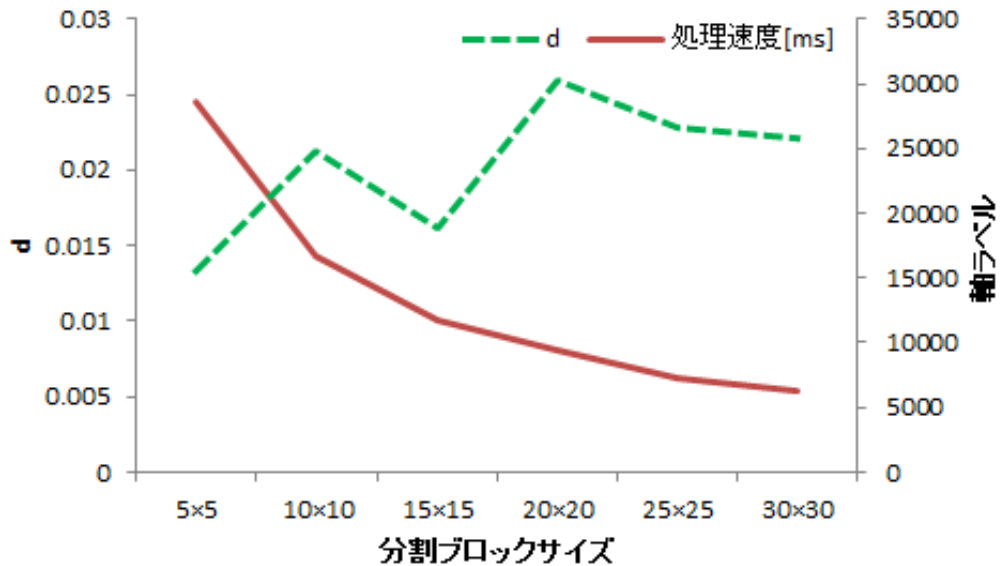


図 3-5. 分割ブロックサイズによる距離 d と処理速度の変化

分割ブロックサイズを大きくすることで、対応点数が減り、それに伴って処理速度も速くなる。マッチング精度については、基本的には分割サイズが小さいほど良くなっている。これは、分割サイズを小さくすることで、マッチング精度の高くなりやすい岩石部分などから対応点を多く取ることができるためだと思われる。しかし、分割ブロックサイズを小さくすることで、マッチングミスを引き起こす対応点を取る可能性も高くなると考えられ、分割ブロックサイズを 10×10[pixel]にした際の結果はその影響だと思われる。また、対応点は画像全体に均一に取ることが望ましく、分割ブロックサイズを小さくすると、特徴の多い部分に対応点が集中してしまうという恐れもある。そのような問題点もあり、処理速度も長くなるが、今回はマッチング精度に重きを置き、マッチング精度の最も良い 5×5[pixel]を最適とする。

3.2.3. マッチングウィンドウサイズ

ここでは、対応付け時のマッチングウィンドウサイズの 1 辺を 5 から 19 [pixel]まで 2 [pixel]刻みで変化させ、各値での処理速度およびマッチング精度の評価を行う。分散の閾値は 400、分割ブロックサイズは 20×20 [pixel]としている。実験の結果を表 3-3 に示し、表から得られるグラフを図 3-6 に示す。

表 3-3. マッチングウィンドウの変化による処理速度およびマッチング精度の変化

ウィンドウサイズ	5×5	7×7	9×9	11×11	13×13	15×15	17×17	19×19
処理速度[ms]	5214	6479	8396	9777	11539	14181	16443	19296
対応点数	312	312	310	309	307	307	307	304
距離 $d(\times 10^{-3})$	124.34	54.828	24.923	25.961	21.349	12.737	8.980	15.199

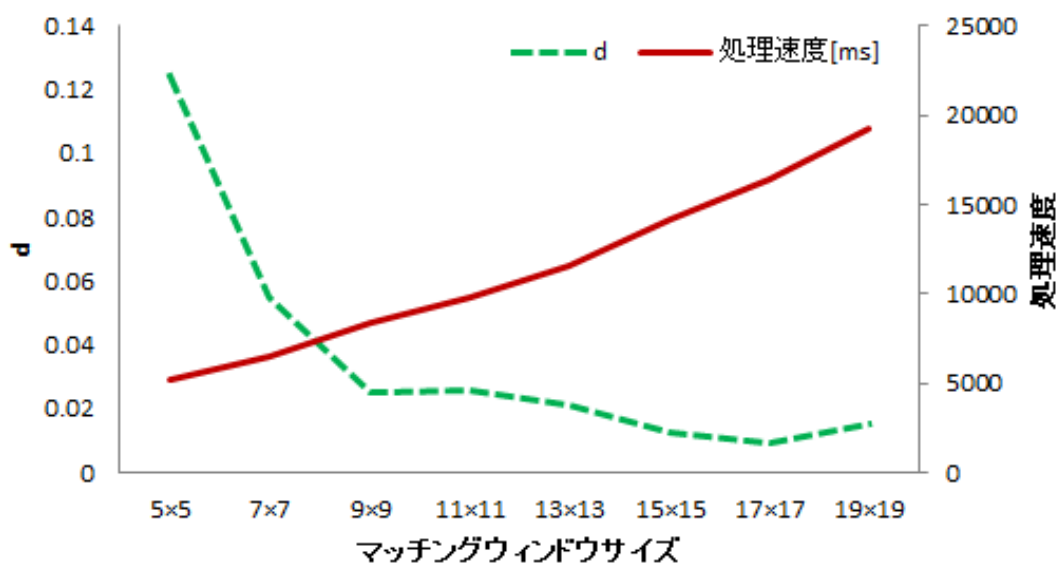


図 3-6. マッチングウィンドウサイズによる距離 d と処理速度の変化

マッチングウィンドウサイズが大きくなるほど処理時間は長くなり、マッチング精度は良くなる傾向にある。マッチングウィンドウサイズが大きい場合、テンプレートマッチングでの SAD を出す際の参照部分が多くなるのが原因だと考えられる。また、今回の実験では、端処理としてマッチングウィンドウサイズを考慮した範囲で走査をしているため、マッチングウィンドウサイズが大きくなると走査範囲が狭くなり、対応点数もやや減少しており、マッチング精度の結果に影響している可能性も考えられる。処理時間は長くなるが、今回は最もマッチング精度の高い 17×17[pixel]を最適とする。

3.3.提案手法による処理速度および推定精度の向上についての評価

次に、対応付けの際の処理速度およびマッチング精度の向上を目的とした、探索範囲の限定、SADの結果への重み付けによるマッチング補正を行った実験を行い、その効果を評価する。

3.3.1. 探索範囲の限定

ここでは、対応付け時の探索範囲の限定による効果を処理速度およびマッチング精度を参考にして評価する。2つの実験を行い、探索範囲を限定した場合と全範囲を探索した場合との結果を比較する。

まず、探索範囲を限定した場合と、画像全範囲を探索した場合での処理速度が想定している値となることを確認する。全範囲を探索した場合、画像サイズからマッチングウィンドウサイズの半分の内側の範囲を探索するため、画像サイズが640×480[pixel]、マッチングウィンドウサイズが15×15[pixel]の場合、 $(640-(7\times 2))\times(480-(7\times 2))=291716$ [pixel]となる。探索範囲を限定した場合、探索範囲は仮の対応点を含む楕円の面積分となる。今回の実験では、探索楕円の面積は最大6917[pixel]であり、探索範囲サイズのみで考えるとおよそ1/42倍となっているため、処理速度はおよそ42倍となるはずである。ただし、画像の端部分などではさらに探索範囲は小さくなる。

実験では、マッチングが成功している3つの対応点について、各対応点で処理を行い、その処理速度を比較する。処理速度はプロセス時間で計っており、誤差が含まれるため、それぞれの対応点について3回ずつ実行した結果の平均を取る。実験の結果を表3-4に示す。表3-4から、探索範囲の限定により、処理速度は40～44倍と概ね想定通りの結果となっている。試行回数を増やすことで42倍に収束していくものと思われる。

表 3-4. 探索範囲の異なる1つの対応点での処理速度の変化

対応点 No.	40	110	220
範囲限定[ms]	17.000	17.333	16.000
全範囲[ms]	737.000	700.667	706.000
全範囲/範囲限定	43.353	40.423	44.125

次に、探索範囲を限定した場合と、画像全範囲を探索した場合との処理速度およびマッチング精度を比較することで、探索範囲の限定の効果を評価する。分散の閾値を 100 から 300 まで 100 刻みで変化させ、各分散の閾値での処理速度およびマッチング精度（距離 d ）を求める。分割ブロックサイズ、マッチングウィンドウサイズについては、それぞれ 20×20 [pixel]、 11×11 [pixel]としている。実験の結果を表 3-5 に示す。

表 3-5. 探索範囲の限定による処理速度およびマッチング精度の変化

分散の閾値	100	200	300
対応点数	605	472	374
処理速度[ms]（範囲限定）	18023	14675	11368
処理速度[ms]（全範囲）	428992	354278	283256
$d(\times 10^{-3})$ （範囲限定）	53.704	49.231	46.511
$d(\times 10^{-3})$ （全範囲）	748.34	659.43	769.39

表 3-5 から、探索範囲の限定により、処理速度およびマッチング精度が大幅に向上していることがわかる。特に、マッチング精度については、全範囲で処理した場合にはマッチングミスも多く、またマッチングしたピクセルの位置も大きく外れていることが多いため、かなり精度が悪くなっている。

3.3.2. SAD への重み付けによるマッチング補正

ここでは、対応付け時のウィンドウマッチングにおいて、SAD の結果にガウス分布による重み付けを行い、得られる処理速度およびマッチング精度を参考にしてその効果を評価する。重み付けを行っていない 3.2.1 節での実験結果との比較のため、分散の閾値を 0 から 700 まで 100 刻みに変化させ、分割ブロックサイズ、マッチングウィンドウサイズについては、それぞれ 20×20 [pixel]、 11×11 [pixel]としている。実験の結果を表 3-6 に示し、図 3-7 に重み付けによる距離 d の値の変化を示す。

表 3-6. ガウス分布による重み付けの結果

分散の閾値	0	100	200	300	400	500	600	700
処理速度[ms]	19673	18623	15115	12112	10214	8174	7601	6339
対応点数	648	605	472	374	309	261	235	201
$d(\times 10^{-3})$	52.951	41.722	33.695	29.940	22.501	22.875	19.020	13.893

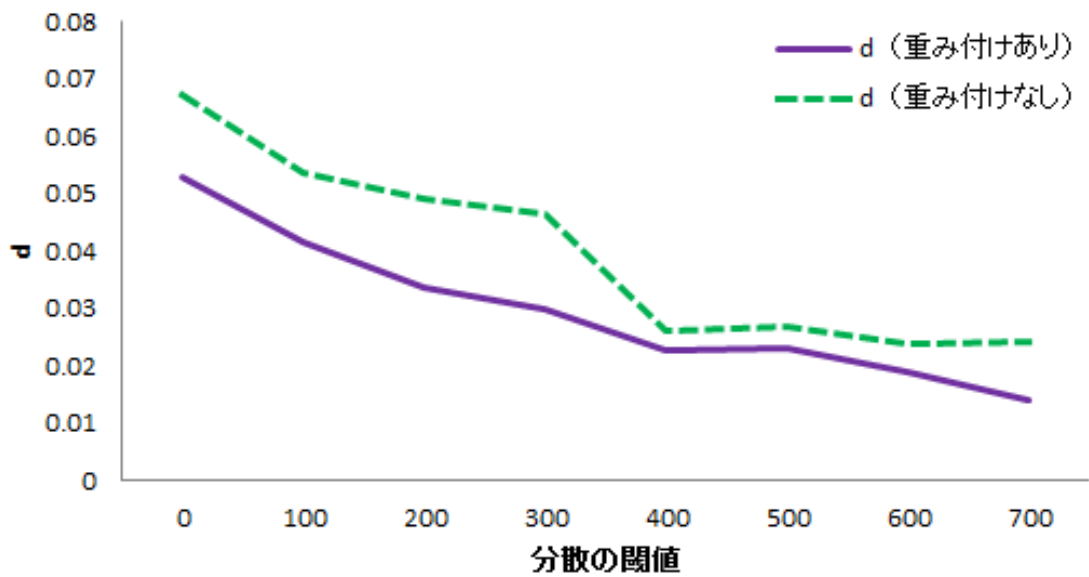


図 3-7. ガウス分布による重み付けの有無の比較

処理速度はやや遅くなっているが、ほとんど変わらず、マッチング精度は向上している。また、分散の閾値が 300 から 400 の間では、重み付けをしていない場合では大きく変化しているが、重み付けをした場合にはあまり変化が見られない。このことから、分散の閾値を 300 としたときにあった多くのマッチングミスに対して補正が加えられ、有効な対応点が得られるようになったと考えられる。

3.4.最適としたパラメータを用いた対応付け

最後に、本節での実験から得られた最適と思われるパラメータ、および探索範囲の限定、重み付けによるマッチング補正を用いて、最良と思われる対応付けを行い、処理速度およびマッチング精度を求める。その結果を、非常に良い精度が得られるとされる手動による対応付けの結果と比較することで、本研究で行う特徴点の検出および対応付け方法の評価を行う。

3.2 節での実験より、分散の閾値を 600, 分割ブロックサイズを 5×5 [pixel], マッチングウィンドウサイズを 17×17 [pixel]とする。実験によって得られた F 行列と手動によって得られた F 行列との比較結果を表 3-7 に示す。

表 3-7. 手動によって得られた F 行列との比較

	対応点数	処理速度[ms]	マッチング精度
実験結果	661	36621	3.405×10^{-3}
手動	141	-	2.123×10^{-3}

マッチング精度について、手動による対応付けの結果に及びはしないものの、かなり近づけることができている。処理速度については、手動による対応付けは非常に時間がかかるため、比較は行わない。しかし、実験の結果だけをみると、処理速度が長く、実時間での使用は難しく感じられる。解決方法として、特徴点の検出および対応付けの際のパラメータを変え、使用する対応点の質および量を変化させるなどが考えられる。

3.5.本節のまとめ

探索範囲の限定では処理速度，マッチング精度共に大きく向上させることができ，SADの結果への重み付けによるマッチング補正では，処理速度をほぼ変えることなく，マッチング精度を向上させることができた．また，実験において得られた最適と思われるパラメータと，探索範囲の限定，重み付けによるマッチング補正によって，手動によって求めたF行列の精度に近づくことができた．

このことから，提案する特徴点の検出および対応付け方法が有効であり，また探索範囲の限定およびSADの結果への重み付けによるマッチング補正が，対応付けにおいて有効であることが示された．ただし，特徴点の抽出および対応付けの際のパラメータは，使用する画像によって最適な値が変化するため，使用する画像の情報などから自動的にパラメータを求めることが今後の課題となる．

4. 月面の 3 次元 CG を用いた移動距離推定

3 節の実験より、提案する特徴点の抽出および対応付け方法が有効であることが示されたが、どの実験においても、着陸機が月面に対して平行に移動していることを仮定していた。本来、着陸機は月を周回しながら月面に向かって降下しており、また、着陸機自体が回転する可能性も考えられる。本節では、着陸機の高度の変化や回転を考慮した画像を用いての移動距離推定を行い、より現実的な画像を用いた場合の提案する手法の有効性を検討する。また、月面の衛星画像の特徴を用いた場合における、提案する手法の有効性の検討も行う。本節では、着陸機の高度の変化や回転を考慮した画像を作成するために、月面の 3 次元 CG を作成する。

4.1. 月面地形 CG の作成

月面の 3 次元 CG は、かぐや (SELENE) データアーカイブ[14]で公開されている、かぐやによって取得された月面の数値標高モデル (DEM : Digital Elevation Model) を基に作成する。なお、今回の実験では、北緯 9.7 度、西経 20.0 度に位置するコペルニクスクレータを含む範囲の DEM データを用いる。使用した DEM データの範囲の画像を図 4-1 に示す。また、CG の描画にはレイトレーシングソフトウェアである POV-Ray を用いる。



図 4-1. 使用した DEM データ範囲

DEM データでは、月面の XY 座標での高度 Z が得られる。座標データは、図 4-1 における左上の座標から右下の座標まで順に格納されている。得られる座標データのイメージを図 4-2 に示す。得られた座標データを用いて、図 4-3 に示すように三角パッチをあてることにより、3次元 CG を描画する。三角パッチのあて方には図 4-3 の①と②のように2通り存在し、作られる三角形がより正方形に近くなる方を選択する。どちらの三角形が正方形に近いかの判定は、それぞれの三角形の内角のうち最小のものを比較し、最小の内角が大きい方がより正三角形に近いとして選択する。作成した3次元 CG を図 4-4 に示す。

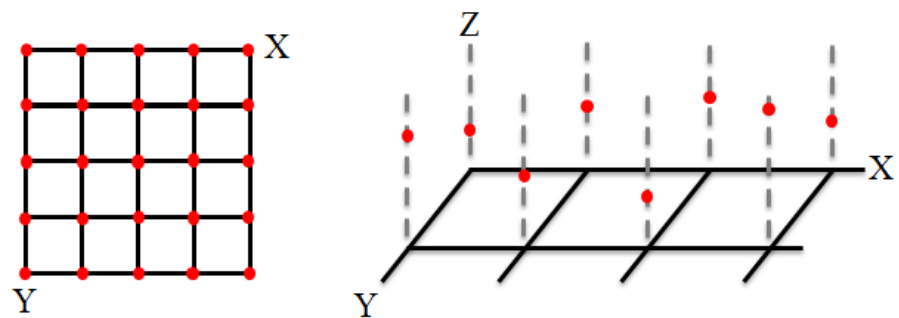


図 4-2. DEM の座標データ

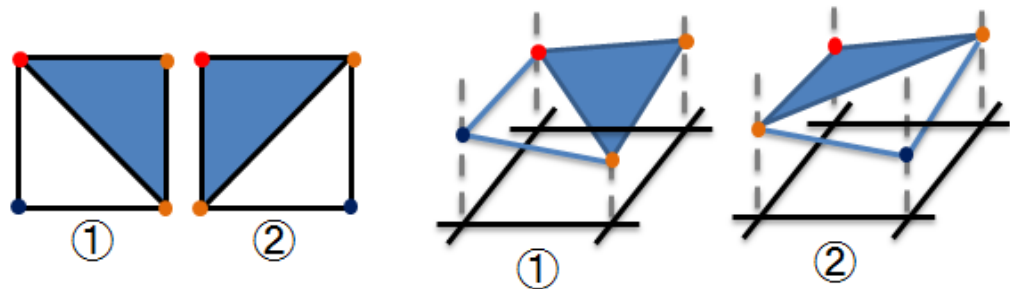
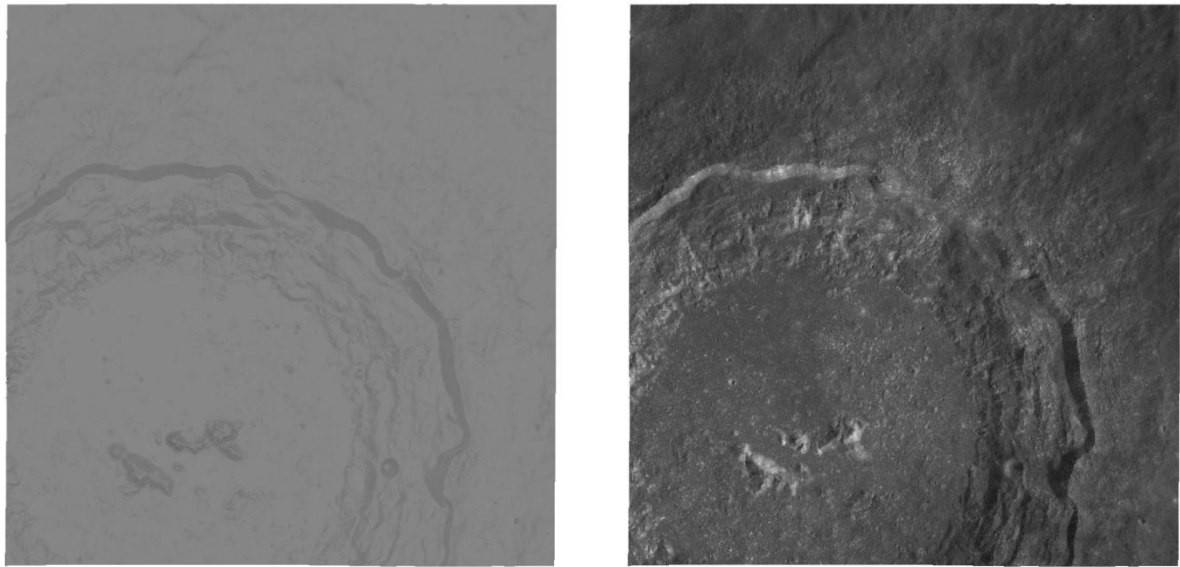


図 4-3. 2通りの三角パッチあて



(a) テクスチャなし

(b) テクスチャあり

図 4-4. 作成した 3 次元 CG

ただし，DEM データは非常に大きく，図 4-1 で示すすべての範囲を描画するとメモリが不足する恐れがある．図 4-4，図 4-5 では，データ範囲すべてを描画するために，読み込む DEM データの数を間引いているが，着陸機が低高度で画像を取得すると解像度が粗くなってしまふ．今回の実験では，着陸機の状態情報を設定し，着陸機の撮影範囲に必要な部分のみのデータを用いることで，データを間引くことなく 3 次元 CG を作成する．

着陸機が月表面に対して平行で，着陸機の最高高度 h を 20[km]，カメラの画角 α を 10[deg]，画像サイズを 1000×1000[pixl]とする．着陸機が移動しない場合，着陸機の撮影範囲 x は，

$$x = 2h \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \doteq 3.5[\text{km}]$$

となる．地形の高度や着陸機の回転なども考慮し，4[km]範囲の DEM データがあれば良いものとする．さらに，着陸機が移動する場合，移動前に取得する画像と移動後に取得する画像のオーバーラップ面積を 80[%]とする．着陸機が月表面に対して平行移動した場合，移動量は 0.8[km]となるため，それを撮影範囲 x の両端に加え，およそ 6[km]の範囲の DEM データが必要となる．使用している全 DEM データは 12288×12288[個]で，およそ 90×90[km]範囲のデータが入っているため，6[km]の範囲のデータ数は，820[個]以上必要となる．今回の実験では，座標データ数 900×900[個]の範囲の DEM データを用いて 3 次元 CG を作成する．作成した約 6[km]範囲の 3 次元 CG を図 4-5 に示し，全範囲の DEM データを用いた 3 次元 CG での約 6[km]の範囲を図 4-6 内の赤点線で示す．



図 4-5. 約 6[km]範囲の 3 次元 CG

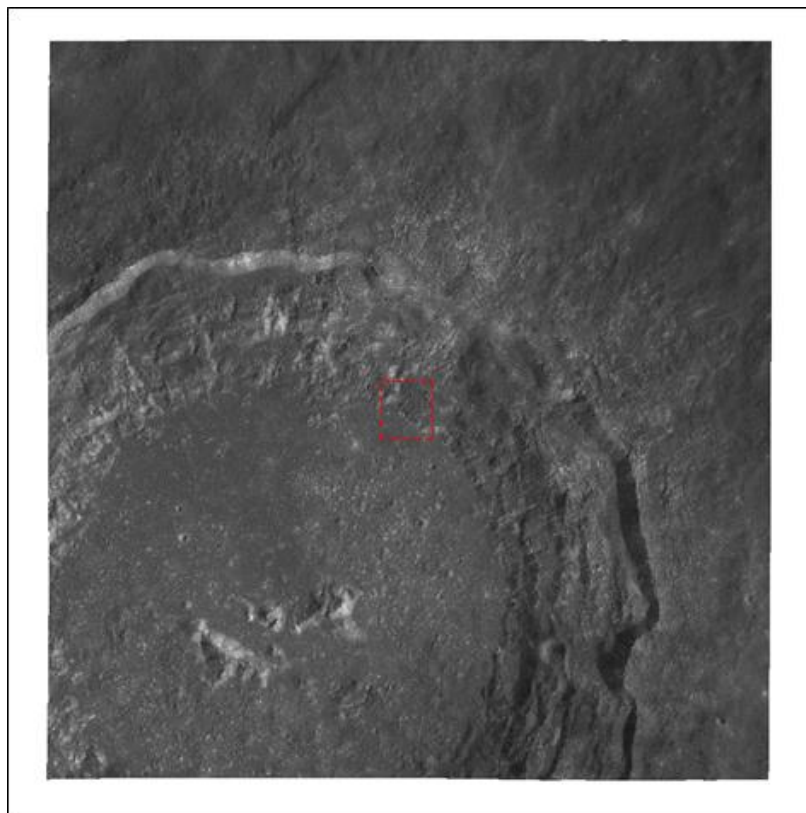


図 4-6. 全範囲の 3 次元 CG 内での約 6[km]範囲

4.2.作成した月面の3次元CGを用いた移動距離推定

ここでは、作成した3次元CGを用いて、特徴点の抽出および対応点の選択を行い、求まるF行列から着陸機の移動距離を推定することで、提案した手法が3次元CGから得られる画像でも有効かどうかを検討する。

まず、作成した3次元CGを用いて、着陸機から撮影される基準画像および参照画像を生成する。基準画像と参照画像間のオーバーラップは80[%]とし、着陸機の移動距離はX方向に0.7[km]とする。生成した基準画像および参照画像を図4-7に示す。

次に、3節での実験と同様に、基準画像から特徴点を抽出し、参照画像における対応点を求める。分散値の閾値などのパラメータは事前の実験より決定している。特徴点の抽出および対応付けの結果を図4-8に示す。基準画像における緑方形内の中央が抽出された特徴点、参照画像における青方形内の中央が抽出された特徴点に対応する点を表す。

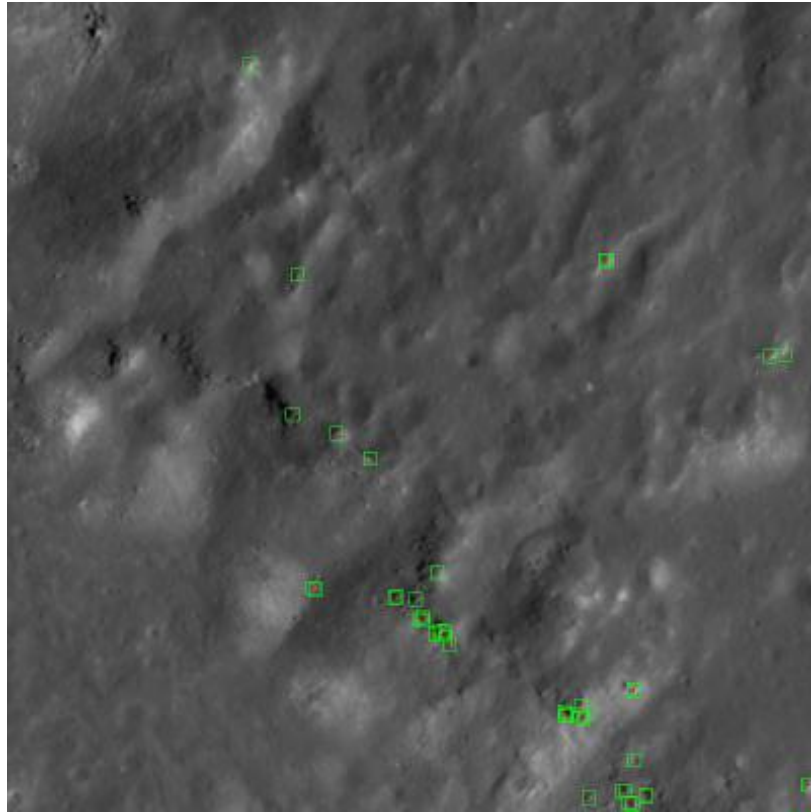
求まった対応点群から移動距離を推定した結果、X方向に696.55[m]という結果が得られた。真値は700[m]であり、相対誤差は0.4953[%]となり、正しい移動距離の推定ができているといえる。この結果より、提案した手法による対応付けが、作成した3次元CGから得られる画像においても有効であることが示された。



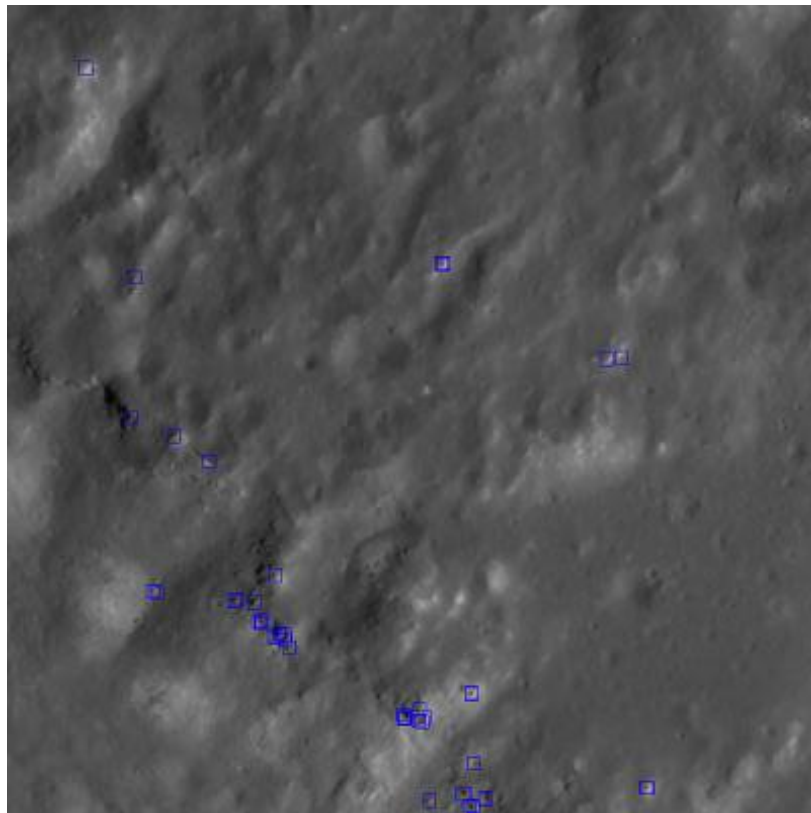
(a) 基準画像

(b) 参照画像

図 4-7. 作成したCGを用いて取得された基準画像および参照画像



(a) 基準画像



(b) 参照画像

図 4-8. 特徴点の抽出と対応付け

4.3. 着陸機の軌道のシミュレートと画像の平行化

前述の通り，着陸機は平行移動ではなく，月面に向かって降下しており，また着陸機自体が回転していることが考えられる．ここでは，着陸機の降下および回転を含めた，着陸機の軌道をいくつかシミュレートし，着陸機の高度および回転の変化を考慮した基準画像および参照画像を得る．これらの画像を用いることで，より現実的な状況での着陸機の移動距離の推定を行う．

シミュレートする着陸機の軌道は，高度 20[km]を基準とし，図 4-9 に示すような 3 通りの高度または回転の変化を加え，すべて X 方向に 0.7[km]移動することを想定する．以降，それぞれの軌道から生成した画像を高度変化画像，Y 軸回転画像，Z 軸回転画像と呼ぶ．想定した各軌道の画像において，特徴点の抽出および対応点の選択を行い，4.2 節と同様に移動距離の推定を行う．

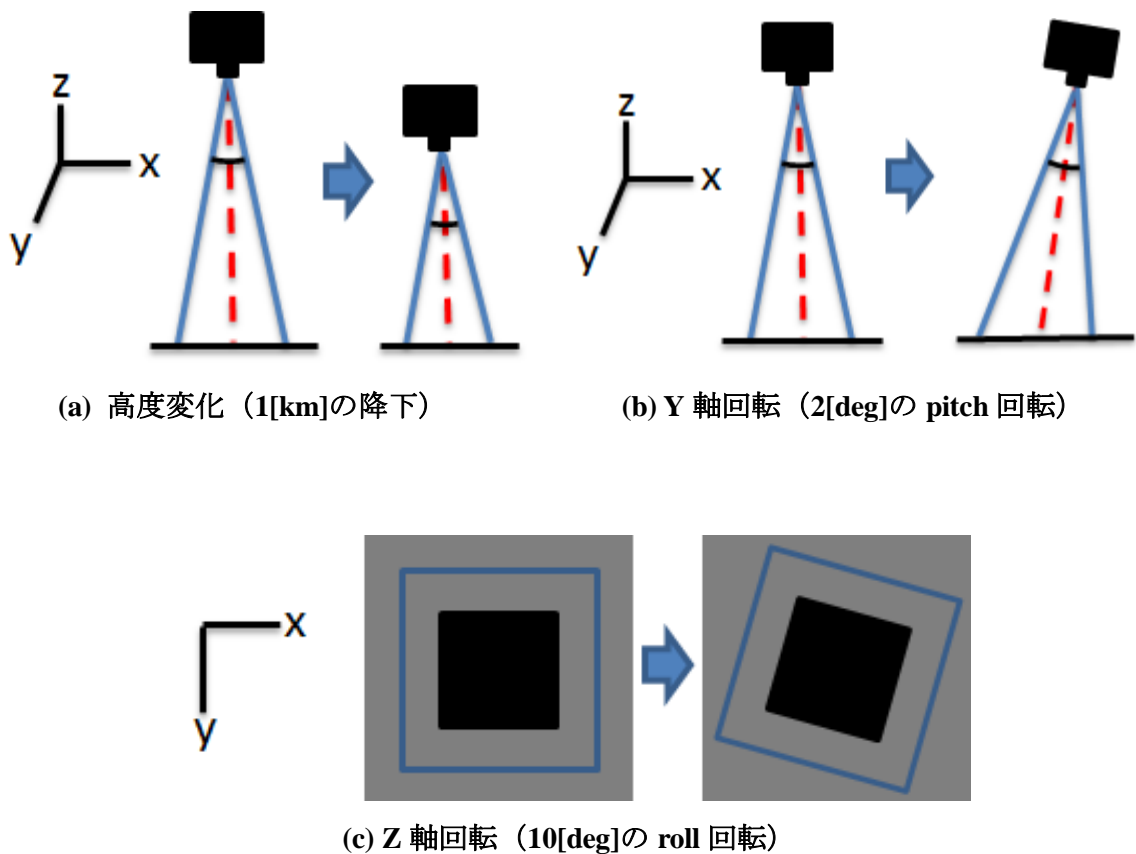
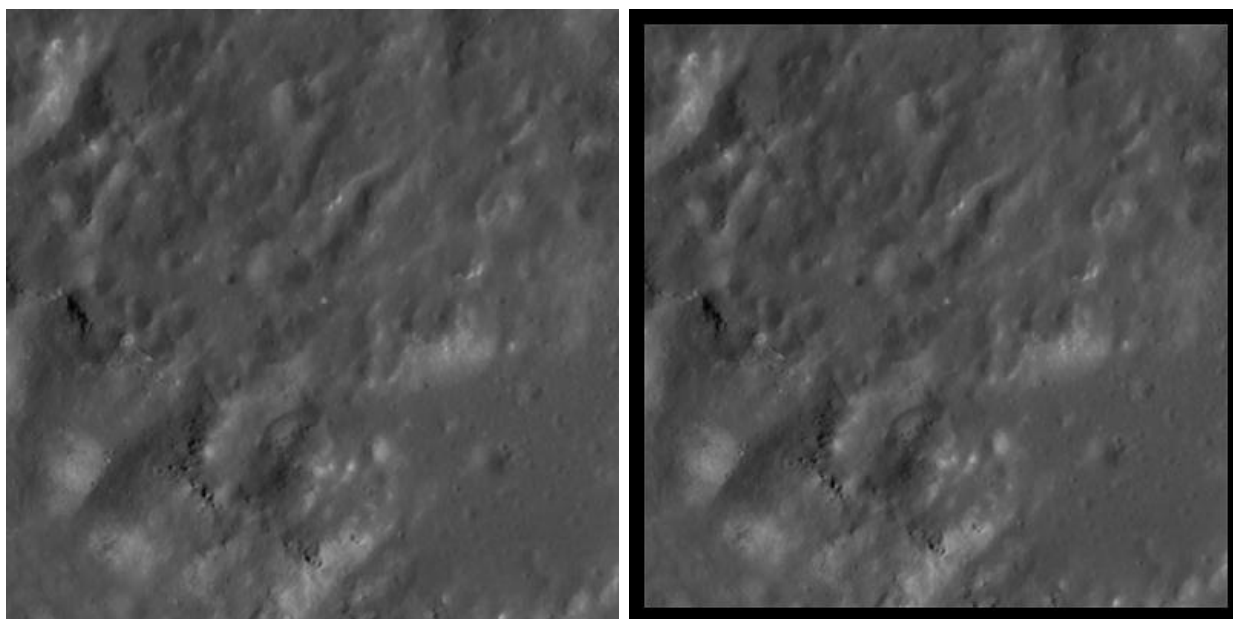


図 4-9. 着陸機の高度および回転の変化

しかし、着陸機の高度変化および回転によって、基準画像および参照画像間ではウィンドウマッチングによる対応付けが困難となる。そこで、2枚の画像間のH行列(Homography Matrix)を求め、参照画像を射影変換することによって画像を平行化し、ウィンドウマッチングを可能とさせる。ここでの射影変換とは、2次元から2次元への変換(平面射影変換)であり、H行列を用いて、任意の四角形を別の任意の四角形に移すような変換である。H行列および画像の平行化については、参考文献[15][16]に詳述されている。本研究では、平行化後の画像を用いて、ウィンドウマッチングによって対応付けを行い、求めた対応群を用いて着陸機の移動距離を推定する。ウィンドウマッチング後に得られた対応点は、2枚の画像間のH行列によって元の参照画像での座標に変換し、その対応点座標を用いることで、着陸機の移動距離だけではなく、着陸機の高度の変化や回転の情報を得ることができるが、ここでの実験では省略する。

各軌道から得られた参照画像およびH行列によって変換した参照画像を図4-10、図4-11、図4-12に示す。なお、各軌道における基準画像は図4-7(a)と同じ画像である。



(a) 参照画像

(b) 射影変換後の参照画像

図 4-10. 高度変化画像の平行化



(a) 参照画像

(b) 射影変換後の参照画像

図 4-11. Y 軸回転画像の平行化



(a) 参照画像

(b) 射影変換後の参照画像

図 4-12. Z 軸回転画像の平行化

4.4. 着陸機の高度変化および回転を考慮した画像を用いた移動距離推定

ここでは、4.3 節にてシミュレートした、3 通りの軌道から得た画像を用いて、特徴点の検出および対応付けを行い、着陸機の移動距離を推定する。ただし、参照画像を射影変換したため、各軌道によって特徴点の検出および対応付けの際の重要なパラメータとなる、分散の閾値、画像の分割ブロックサイズ、マッチングウィンドウサイズが異なる可能性がある。

そこで、3.2 節と同様に、月面の 3 次元 CG から得られる画像を用いて、特徴点の検出および対応付けの処理速度を求め、得られた対応点群から求まる F 行列を評価することによって、各パラメータの検討を行う。また同時に、求まる F 行列から移動距離の推定も行い、その結果も検討する。実験は、それぞれのパラメータごとに行う。

移動距離は X, Y, Z の 3 方向の推定結果を記し、正しく推定できていれば、X 方向がおおよそ 700[m]、Y 方向および Z 方向がおおよそ 0[m]となるはずである。移動距離が正しく推定できていると思われるものは、X 方向の移動距離の誤差を算出し、誤差が 0.5[%]未満であれば正しい距離が推定できているものとする。

4.4.1. 分散の閾値

ここでは、分散の閾値を変化させ、着陸機の移動距離推定の結果を基に、実験で使用する分散の閾値について検討する。また、実験は各画像で行い、画像による移動距離の推定が可能となる閾値の違いについても検討する。どの画像においても、分割ブロックサイズは 10×10[pixel]、マッチングウィンドウサイズは 17×17[pixel]としている。各画像での実験結果を表 4-1, 表 4-2, 表 4-3 に示し、マッチング結果の例を図 4-13, 図 4-14, 図 4-15 に示す。

表 4-1. 分散の閾値の変化による結果（高度変化画像）

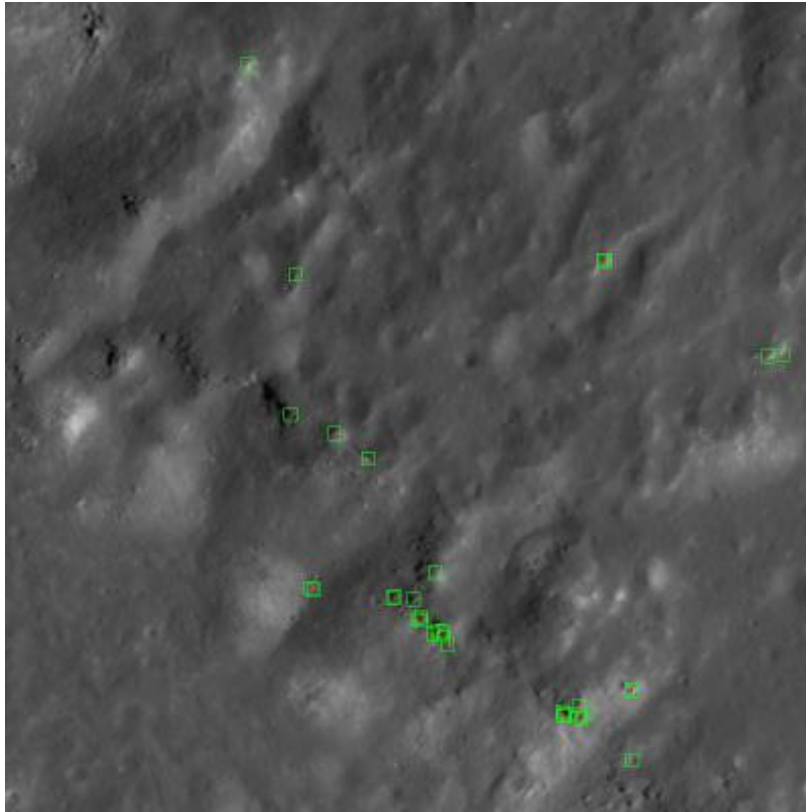
分散の閾値	150	160	170	180	200	300	400
対応点数	68	56	52	47	39	15	7
処理速度[ms]	4368	4118	3260	2948	2387	952	453
距離 d	9.9662 $\times 10^{-2}$	1.1557 $\times 10^{-2}$	3.4534 $\times 10^{-15}$	9.5445 $\times 10^{-14}$	2.7175 $\times 10^{-14}$	2.3774 $\times 10^{-14}$	7.7319 $\times 10^{-16}$
移動距離 X[m]	-684.69	-516.40	697.15	697.30	697.31	695.94	2.5309
移動距離 Y[m]	-66.678	-32.050	-1.4935 $\times 10^{-9}$	-4.4785 $\times 10^{-8}$	-1.6299 $\times 10^{-8}$	-1.0242 $\times 10^{-7}$	17.376
移動距離 Z[m]	879.96	766.56	-5.1573 $\times 10^{-8}$	-1.5523 $\times 10^{-6}$	-5.1296 $\times 10^{-7}$	-2.3798 $\times 10^{-6}$	306.08
相対誤差[%]	-	-	0.4088	0.3872	0.3858	0.5834	-
推定結果	×	×	○	○	○	△	×

表 4-2. 分散の閾値の変化による結果（Z 軸回転画像）

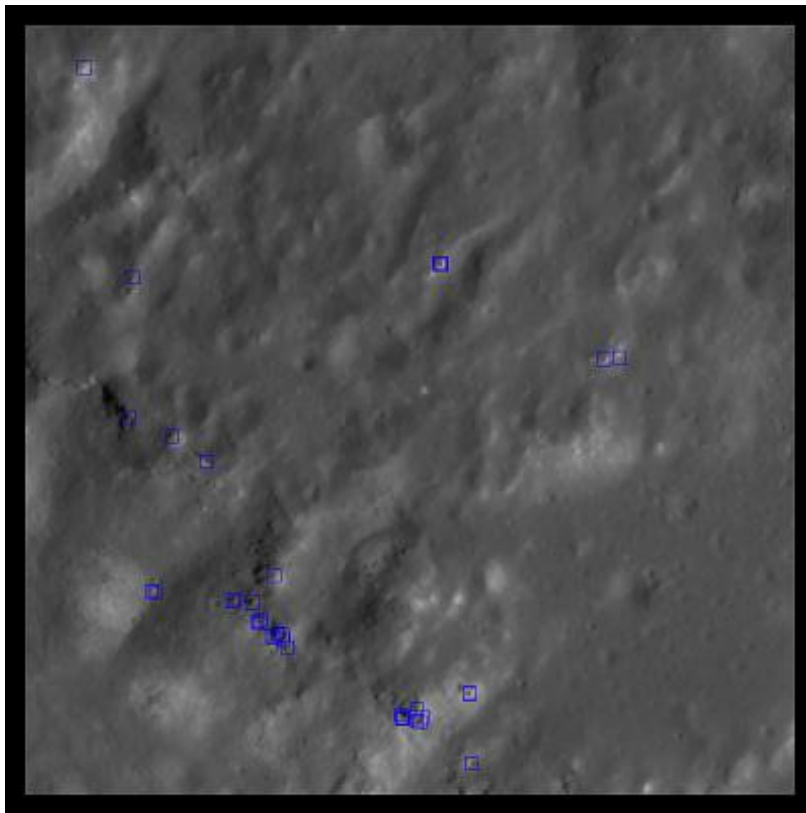
分散の閾値	170	200	210	220	230	240	250
対応点数	62	46	36	32	28	27	25
処理速度[ms]	3651	2761	2148	1919	1794	1653	1529
距離 d	3.1625 $\times 10^{-3}$	2.0170 $\times 10^{-3}$	3.2382 $\times 10^{-3}$	1.4041 $\times 10^{-3}$	1.0050 $\times 10^{-13}$	4.8323 $\times 10^{-14}$	1.4317 $\times 10^{-14}$
移動距離 X[m]	-928.30	-111.29	-45.714	274.55	697.53	697.71	696.97
移動距離 Y[m]	-2283.7	-243.62	-4.9122	-2856.4	1.1190 $\times 10^{-7}$	-5.3337 $\times 10^{-8}$	-1.2862 $\times 10^{-8}$
移動距離 Z[m]	-1480.8	-922.28	105.71	91926	1.8110 $\times 10^{-6}$	-8.6401 $\times 10^{-7}$	-2.7869 $\times 10^{-7}$
相対誤差[%]	-	-	-	-	0.3541	0.3282	0.4347
推定結果	×	×	×	×	○	○	○

表 4-3. 分散の閾値の変化による結果 (Y 軸回転画像)

分散の閾値	170	200	210	220	230	240	250
対応点数	63	47	37	33	29	27	25
処理速度[ms]	3666	2730	2262	1981	1887	1669	1513
距離 d	1.1584 $\times 10^{-3}$	1.1169 $\times 10^{-3}$	1.0088 $\times 10^{-3}$	4.4490 $\times 10^{-14}$	2.2476 $\times 10^{-13}$	4.8935 $\times 10^{-13}$	1.2008 $\times 10^{-14}$
移動距離 X[m]	37.485	24.917	-27.714	697.57	698.70	698.61	697.81
移動距離 Y[m]	8.3730	14.095	-12.269	1.3624 $\times 10^{-8}$	3.8924 $\times 10^{-8}$	7.6535 $\times 10^{-7}$	1.5127 $\times 10^{-8}$
移動距離 Z[m]	153.56	177.07	-174.36	4.3317 $\times 10^{-7}$	2.2925 $\times 10^{-6}$	1.4045 $\times 10^{-5}$	2.6606 $\times 10^{-7}$
相対誤差[%]	-	-	-	0.3484	0.1861	0.1990	0.3138
推定結果	×	×	×	○	○	○	○

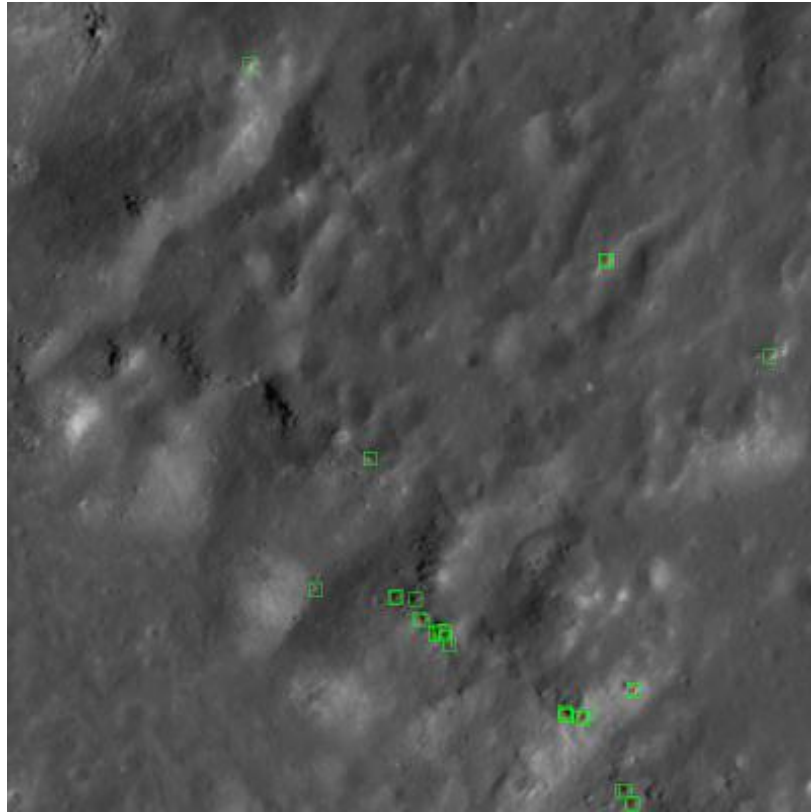


(a) 基準画像

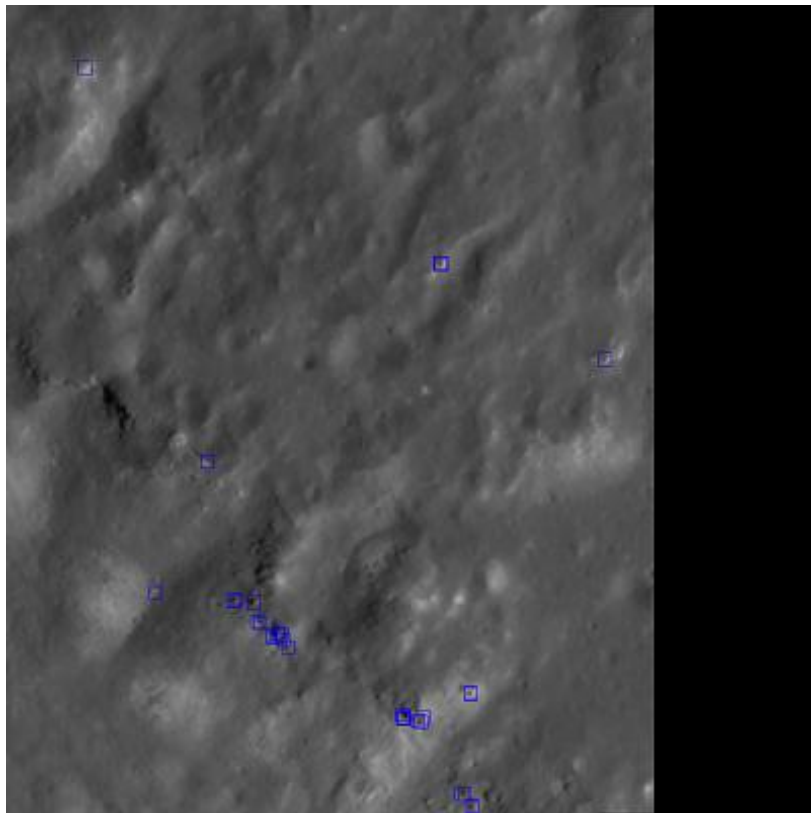


(b) 参照画像

図 4-13. 高度変化画像のマッチング結果

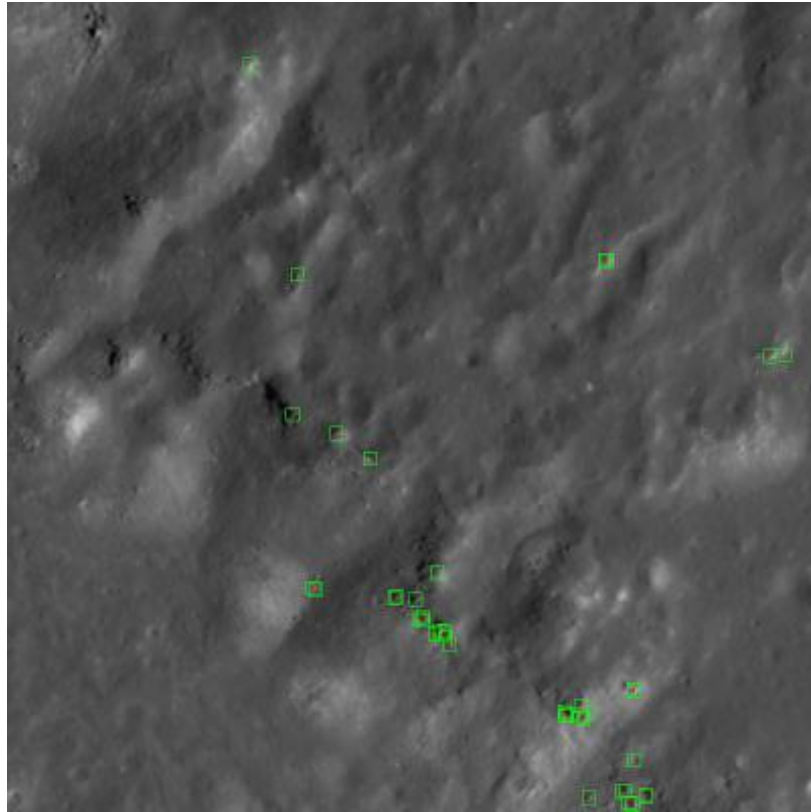


(a) 基準画像

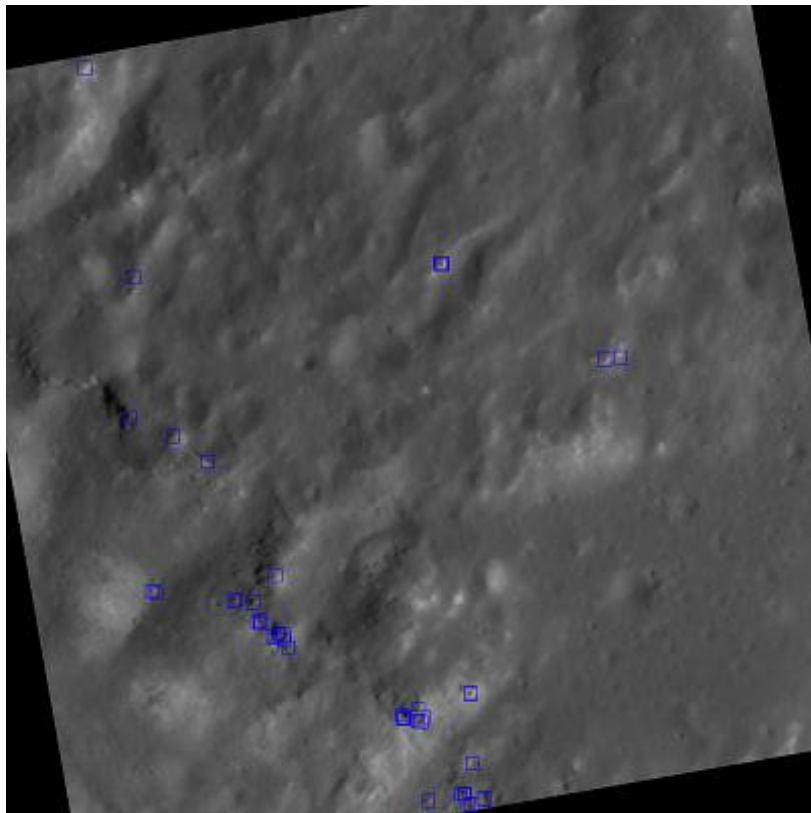


(b) 参照画像

図 4-14. Y 軸回転画像のマッチング結果



(a) 基準画像



(b) 参照画像

図 4-15. Z 軸回転画像のマッチング結果

画像によって移動距離を正しく推定できる閾値が異なり、特に画像が回転すると高い閾値が必要となっている。また、どの画像においても、特徴点数は減るが、閾値をあげることで推定結果は良くなる傾向にある。

また、3節での実験にて対応付けの精度の指標として使用した距離 d については、移動距離の推定が成功するものと失敗するものでは大きく違い、かなり小さな値でなければ移動距離の推定が失敗することが示された。ただし、閾値をあげすぎると特徴点数が大きく減少し、その結果、F 行列の精度が高くても、移動距離の推定が失敗している点もみられる。距離 d の値が小さいほど移動距離の推定結果がよくなるというわけではなく、距離 d の値がそのまま推定精度に関係するということはないようだ。これは、得られる対応点数やその精度だけではなく、得られる対応点がどのように画像内に分布しているかなどが関係していると思われる。今回の実験では、対応点数がなるべく多く、推定精度がよいものを選ぶこととする。

4.4.2. 分割ブロックサイズ

ここでは、分割ブロックサイズを変化させ、着陸機の移動距離推定の結果を基に、実験で使用する分散の閾値について検討する。実験の結果、各画像での変化はあまりみられなかったため、高度変化画像における結果のみを示す。マッチングウィンドウサイズは 17×17 [pixel] とし、分割ブロックサイズによる変化をみるため、分散の閾値を、4.4.1 節での実験より、移動距離の推定に成功している 170 と失敗している 160 の 2 つのケースを比較する。実験結果を表 4-4、表 4-5 に示す。

表 4-4. 分散の閾値を 170 とした場合の分割ブロックサイズの変化による結果

分割ブロック サイズ	5×5	10×10	15×15	20×20	25×25	30×30
対応点数	84	52	42	38	31	29
処理速度[ms]	6925	3260	2880	2364	1881	1772
距離 d	1.0315 $\times 10^{-13}$	3.4534 $\times 10^{-15}$	1.6932 $\times 10^{-14}$	2.0094 $\times 10^{-13}$	3.2416 $\times 10^{-13}$	1.3814 $\times 10^{-13}$
移動距離 X[m]	696.54	697.15	696.99	697.70	697.20	697.38
移動距離 Y[m]	-4.0333 $\times 10^{-8}$	-1.4935 $\times 10^{-9}$	6.3664 $\times 10^{-9}$	8.5643 $\times 10^{-8}$	1.2236 $\times 10^{-7}$	6.1082 $\times 10^{-8}$
移動距離 Z[m]	-1.3898 $\times 10^{-6}$	-5.1573 $\times 10^{-8}$	2.5145 $\times 10^{-7}$	3.0717 $\times 10^{-6}$	4.4020 $\times 10^{-6}$	2.1235 $\times 10^{-6}$
相対誤差[%]	0.4967	0.4088	0.4319	0.3297	0.4016	0.3757
推定結果	○	○	○	○	○	○

表 4-5. 分散の閾値を 160 とした場合の分割ブロックサイズの変化による結果

分割ブロック サイズ	5×5	10×10	15×15	20×20	25×25	30×30
対応点数	96	56	47	41	35	31
処理速度[ms]	6508	4118	2848	2518	2139	1875
距離 d	7.9155 ×10 ⁻³	1.1557 ×10 ⁻²	2.0644 ×10 ⁻³	9.3638 ×10 ⁻³	3.7672 ×10 ⁻²	1.3031 ×10 ⁻²
移動距離 X[m]	-698.60	-516.40	615.24	-396.40	710.15	-454.14
移動距離 Y[m]	-16.973	-32.050	38.243	-26.315	46.012	-28.182
移動距離 Z[m]	606.08	766.558	-793.77	761.70	-768.89	812.91
相対誤差[%]	-	-	-	-	-	-
推定結果	×	×	×	×	×	×

分割ブロックサイズによって対応点数は大きく変化しているが、それによる推定結果の変化はあまりみられなかった。分割ブロックサイズの変化による移動距離の推定精度にもあまり変化はみられないが、分割ブロックサイズを大きくすると推定精度がよくなっている傾向がみられる。これは、図 4-8, 図 4-13, 図 4-14, 図 4-15 に示されるように、使用した画像では対応点が画像内の一部分に多く集中しており、分割ブロックサイズを変化させることでその偏りが多少解消されるためだと思われる。

今回の実験では、移動距離の推定精度を考慮し、なるべく対応点数が多くなるような分割ブロックサイズを選択する。

4.4.3. マッチングウィンドウサイズ

ここでは、マッチングウィンドウサイズを変化させ、着陸機の移動距離推定の結果を基に、実験で使用するマッチングウィンドウサイズについて検討する。画像による変化はあまりみられなかったため、高度変化画像の結果のみを示す。分散の閾値は 200 とし、分割ブロックサイズは 10×10[pixel]としている。実験結果を表 4-6 に示す。

表 4-6. マッチングウィンドウサイズの変化による結果

ウィンドウ サイズ	9×9	11×11	13×13	15×15	17×17	19×19	21×21
対応点数	39	39	39	39	39	39	39
処理速度[ms]	1061	1294	1654	2059	2387	2870	3307
距離 d	1.8721 ×10 ⁻³	1.8043 ×10 ⁻³	9.6070 ×10 ⁻¹⁴	3.0044 ×10 ⁻³	2.7175 ×10 ⁻¹⁴	1.2841 ×10 ⁻¹³	1.2841 ×10 ⁻¹³
移動距離 X[m]	126.87	-14.416	697.67	-474.98	697.31	697.04	697.04
移動距離 Y[m]	-22.621	30.889	-3.3378 ×10 ⁻⁸	36.872	-1.6299 ×10 ⁻⁸	1.2945 ×10 ⁻⁷	1.2945 ×10 ⁻⁷
移動距離 Z[m]	-301.28	384.42	-1.8994 ×10 ⁻⁶	329.57	-5.1296 ×10 ⁻⁷	3.1265 ×10 ⁻⁶	3.1265 ×10 ⁻⁶
相対誤差[%]	-	-	0.3340	-	0.3858	0.4247	0.4247
推定結果	×	×	○	×	○	○	○

マッチングウィンドウサイズが大きいと、移動距離の推定が成功する可能性が高くなる傾向にある。ただし、マッチングウィンドウサイズが大きいと処理速度が長くなり、また 19×19[pixel]のときと 21×21[pixel]のときでは、F 行列および移動距離推定の精度がまったく同じ値となることから、ただ値が大きければよいというわけではないようだ。

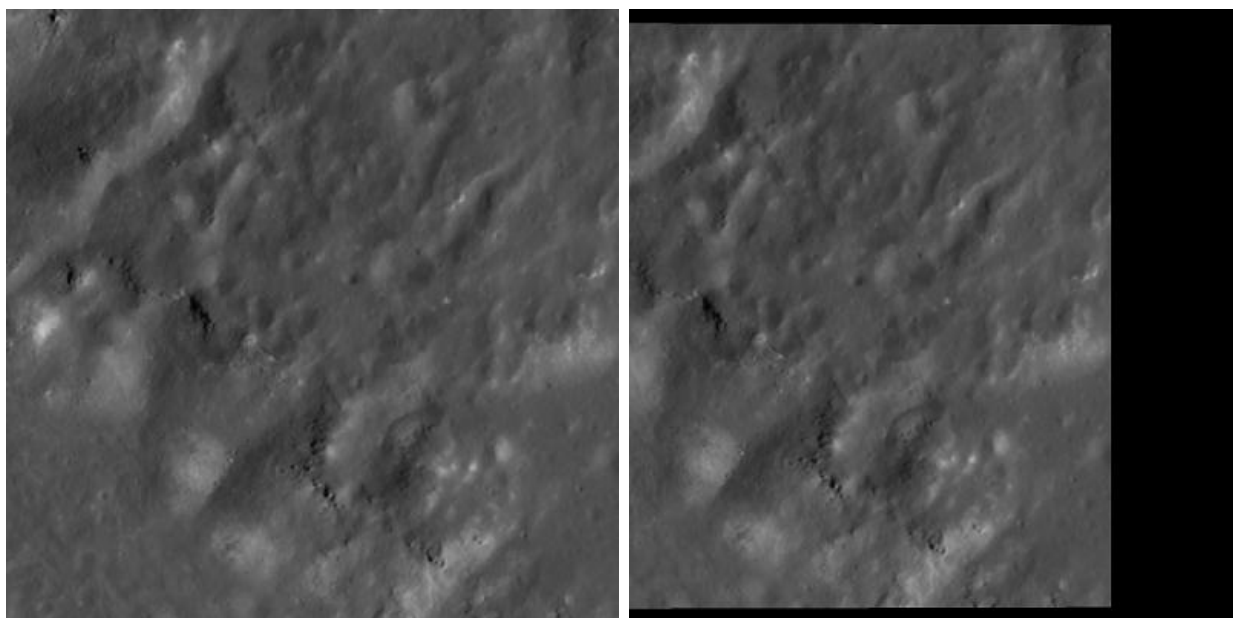
また、13×13[pixel]では移動距離の推定に成功し、15×15[pixel]では失敗している。得られる特徴点数は同じものであるため、画像によってはマッチングウィンドウサイズをどの値にしてもこのようなエラーがでる可能性が考えられる。これは、対応付けの失敗によるものと考えられ、これを解消するためには SAD の際の重みづけだけではなく、対応付けにさらに工夫をする必要があると思われる。

今回の実験では、移動距離の推定精度を考慮し、またなるべく処理時間が短くなるようなマッチングウィンドウサイズを選択する。

4.5. より現実的な軌道での移動距離推定

最後に、より現実的な降下の状況での着陸機の移動距離推定を行う。基準となる高度を20[km]とし、そこからX方向に0.7[km]移動、1[km]の降下、2度のpitch回転(Y軸回転)を加える場合を想定する。月周回中の着陸機のroll回転(Z軸回転)はあまり現実的ではないため、ここでは考慮しない。特徴点の検出および対応付けの際のパラメータは4.4節での実験を参考にし、分散の閾値を220、分割ブロックサイズを10×10[pixel]、ウィンドウサイズを17×17[pixel]とする。実験に使用する画像を図4-16に示し、ウィンドウマッチングによる対応付けの結果を図4-17に示す。

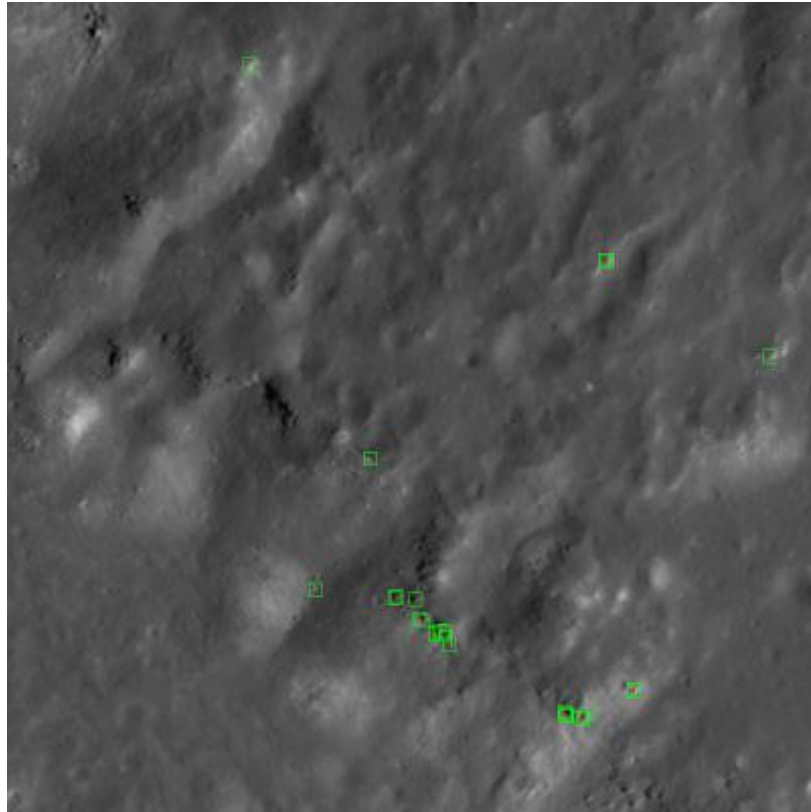
実験より、移動距離はX方向に697.62[m]、相対誤差は0.3412[%]となり、移動距離の推定に成功した。



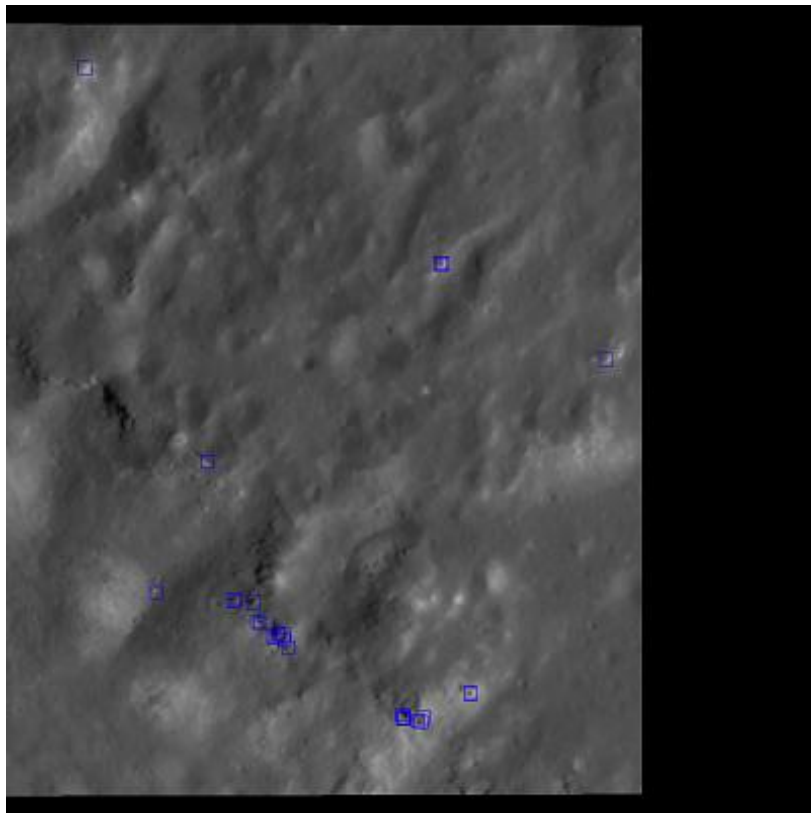
(a) 参照画像

(b) 射影変換後の参照画像

図 4-16. 降下と回転を想定した画像



(a) 基準画像



(b) 参照画像

図 4-17. 降下と回転を想定した場合のマッチング結果

4.6.本節のまとめ

本節では、月面の3次元CGを作成し、そこから得られる画像を用いることによって、着陸機の移動距離の推定を行った。実験の結果より、月面の衛星画像から得られる特徴を用いての、提案した手法による特徴点の検出および対応付けが、着陸機の移動距離の推定に使用可能であることが示された。また、月面のCGを作成することによって、様々な着陸機の軌道をシミュレートすることも可能となり、着陸機の降下や回転を考慮した対応付けを行い、より現実的な軌道で取得される画像を用いての移動距離推定が可能であることが示された。

ただし、今回の実験は、CGから作成された理想的な画像を用いて行っている。実施の月面画像ではカメラのレンズの歪みや月面の反射などの外的要因が考えられ、そのような状況でのシミュレーションが必要となる。今後の予定として、そういった外的要因をCGから得られる画像に追加し、より現実的なシミュレーションを行う必要があると考えられる。また、3節で使用した月面を模したジオラマ実験装置を用いて取得した画像と比べ、CGから取得した画像は特徴が少なく、画像の一部に対応点が集中している。対応点は画像内に広く分布していることが好ましいため、特徴点の抽出および対応付け方法に更なる改良が必要であると感じた。

また、実際に着陸機を速度を推定することを考えた場合、速度推定が必要となる着陸直前の降下中では、高度の測定の誤差が大きくなることが懸念される。探索範囲については、高度の誤差が探索範囲内に入るように探索範囲を広げることで対応可能だが、平行化の際の高度情報に誤差が乗ると現在の方法をそのまま適応することが難しい。そのため、高度情報の誤差を考慮して、複数の平行化後の参照画像を合成し、その中で最も基準画像に近いものを使用してウィンドウマッチングを行う、などの工夫が必要になってくると考えられる。

5. おわりに

JAXA は、「かぐや」に続く月探査計画として、月着陸探査計画 (SELENE-2) の提案を行っており、着陸機を安全な場所へ正確に着陸させる技術を必要としている。着陸機を目的地に正確に着陸させるためには、着陸機の位置姿勢情報に加えて速度の情報を正確に知ることが重要となる。

本研究では、月を周回する着陸機が移動の前後で撮影した画像を用いて、着陸機の月表面に対する相対的な移動距離を推定し、求めた移動距離から着陸機の速度を推定することによる補正法について検討した。

着陸機の速度は実時間での推定が必要となるため、推定精度に加えて、実時間処理が必要となる。そこで、着陸機の速度を推定するために、着陸機の移動前後の画像から自動的に特徴点の検出および対応付けを行い、対応付けの際の探索領域の限定や評価指標の重み付けによるマッチング補正によって処理速度および推定精度の向上を図った。実験の結果より、特徴点の検出および対応付け方法、処理速度および推定精度の向上方法の両方において、提案手法の有効性を確認することができた。

また、「かぐや」の DEM データから作成した 3 次元 CG を用いて、着陸機の高度の変化や回転を考慮した、より実施の月面画像に近似する画像を合成し、より現実的な状況での速度推定実験を行った。実験の結果より、提案する手法によって、より現実的な模擬月面画像を用いての速度推定が可能であることを確認できた。

今後の予定として、特徴点の抽出および対応付けの際の、パラメータの自動的な決定方法についての検討や対応点が一部に集中してしまう問題の解決、作成した月面の CG はカメラレンズの歪みや月面の反射などを含まない理想的な画像であるため、そのような多くの外的要因を考慮したシミュレーション画像の作成および速度推定実験などが挙げられる。また、処理速度について、現在の対応付けの際のウィンドウマッチング方法は非常に基本的なものであり、処理速度をさらに高速化させることができると考えられるため、対応付け方法についても改善し、火星着陸での速度推定に成功した DIMES の実験結果を参照にして、月着陸において実際に使用可能であるといえる、現実的な処理速度および速度推定の精度についての考察を行う。シミュレーションについては、CG を用いるだけでなく、実際に高高度から撮影した地形画像を用いての速度推定実験なども行い、実際の月探査での使用を目指し、本研究の有効性を示していきたいと考えている。

なお、本論文の 2 節, 3 節の内容は、2012 年 11 月 21 日に開催された第 56 回宇宙科学技術連合講演会にて発表した[17].

参考文献

- [1] 佐藤淳：“コンピュータビジョン—視覚の幾何学—”，コロナ社，1999
- [2] 徐剛：“写真から作る3次元CGイメージ・ベースド・モデリング&レンダリング”，近代科学社，2001
- [3] A. J. Davison, et al. “MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Intelligence, Vol.29, No.6, June 2007: 1052-1067
- [4] A. J. Davison, et al. “Design Through Operation of an Image-Based Velocity Estimation System for Mars Landing”, International Journal of Computer Vision, 2007, 74(3): 319-341.
- [5] Y. Cheng, et al. “The Mars Exploration Rovers Descent Image Motion Estimation System”, Intelligent Systems, IEEE, Vol.19, May-Jun 2004: 13-21
- [6] N. Trawny, et al. “Coupled Vision and Inertial Navigation for Pin-Point Landing”, NASA Science and Technology Conference 2007
- [7] A. E. Johnson, et al. “Precise Image-Based Motion Estimation for Autonomous Small Body Exploration”, Fifth International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, 1-3, June, 1999
- [8] J. F. Montgomery, et al. “The Jet Propulsion Laboratory Autonomous Helicopter Testbed: A platform for planetary exploration technology research and development”, Journal of Field Robotics, Vol.23, March-April 2006, pp.245-267
- [9] 服部, 山口, ”月面着陸機の視覚誘導の検討”, 信学技報, SANE97-46, July 1997, pp.91-98.
- [10] 服部, 山口, ”ステレオ視による月面着陸機の世界計測”, 信学技報, SANE99-20, May 1999, pp.83-90.
- [11] R. G. Willson, et al. “MOC2DIMES: A Camera Simulator for the Mars Exploration Rover Descent Image Motion Estimation System”, 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, ESA SP-603, September 2005
- [12] R. I. Hartley, “In Defense of the Eight-Point Algorithm”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Intelligence, Vol.19, No.6, June 1997, pp.580-593.
- [13] デジタル画像処理編集委員会：“デジタル画像処理”，CG-ARTS 協会，2004“
- [14] かぐや（SELENE）データアーカイブ”，<http://l2db.selene.darts.isas.jaxa.jp/index.html>
- [15] Y. Cheng, et al. “Passive Image-Based Hazard Avoidance for Spacecraft Safe Landing”, 6th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, June 2001
- [16] オライリージャパン：“詳解 OpenCV コンピュータビジョンライブラリを使った画像処理・認識”，オーム社，2009
- [17] 東, 片山, ”着陸機からの月面画像による速度推定に関する研究”，第56回宇宙科学技術連合講演会, 2012

謝辞

本研究を行うにあたり，主任指導教員である JAXA の片山保宏客員准教授からは，ご多忙の中にも関わらず，丁寧且つ熱心な御指導御鞭撻を賜りました．研究以外の内容につきましても，多くの興味深いお話をして頂き，大変有意義な学生生活を送ることができました．

JAXA の西田信一郎客員教授からは，合同発表会での御指導を賜り，また，交流会においてはたくさんの興味深く，面白いお話をして頂きました．西田研究室の歓迎会に誘って頂いたこともあり，とても楽しい時間を過ごさせて頂きました．

電気通信大学応用ネットワーク学講座の森田啓義教授，笠井裕之准教授には，合同発表会での御指導だけでなく，電気通信大学における快適な研究環境の配備など，大変お世話になりました．

その他，日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂いた応用ネットワーク学講座の同輩・先輩・後輩の方々も含め，ここに感謝の意を表し，謝辞とさせていただきます．誠にありがとうございました．

付録 F 行列の評価方法

参考文献[1] [12]を基にした，本研究での F 行列の評価方法について記す。

図 A-1 に示すように，3次元空間中のある点 P が 2つの異なる視点（時刻 t および時刻 t+1 の地点）から画像に投影されているとする．時刻 t に撮影された画像を基準画像，時刻 t+1 に撮影された画像を参照画像とし，基準画像に投影された点 a は，参照画像において点 b に対応している．点 P と 2つの異なる視点を結ぶ平面をエピポーラ平面と呼び，基準画像とエピポーラ平面が交差してできる直線を基準画像におけるエピポーラ線と呼ぶ．参照画像についても同様である．基準画像，および参照画像上の点 a, b はそれぞれのエピポーラ線上に存在する．

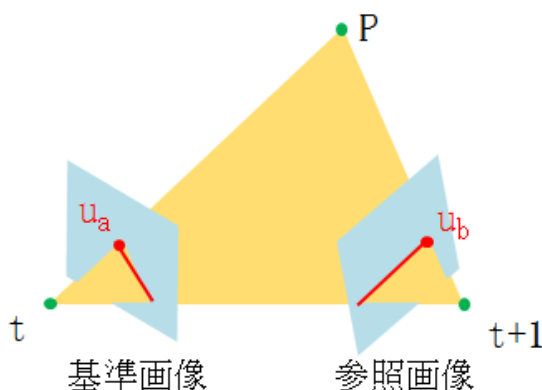


図 A-1: エピポーラ幾何

ここで，F 行列を F，基準画像で得られた特徴点を u_a ，参照画像で対応付けを行った対応点を u_b とする．正しく対応付けが行えているならば， u_b は参照画像におけるエピポーラ線上に存在する．F 行列の評価では，図 A-2 に示すような参照画像におけるエピポーラ線と u_b との距離 d を用い，距離 d は以下の式によって得られる．

$$d = u_b^T F u_a$$

距離 d の値が 0 に近いほど，参照画像におけるエピポーラ線と u_b の距離は近くなり，推定精度の指標となる．

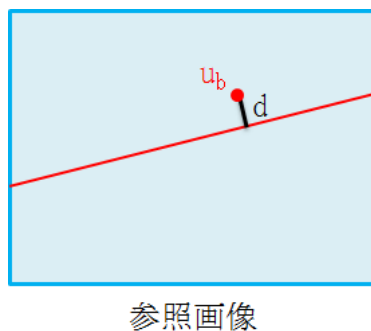


図 A-2: エピポーラ線と u_b の距離 d