

小型月着陸機のための画像を用いた安全着陸領域識別に関する研究*¹

Study on Image-based Safe Landing Areas Detection for Smart Lunar Lander

久我 共生*^{2,*3}・小島 広久*³・福田 盛介*⁴

Tomoki KUGA, Hirohisa KOJIMA and Seisuke FUKUDA

Key Words: Image Processing, Lunar Lander, Area Detection, Landing Point

Abstract: In recent years, investigating moon is once again drawing attentions of several countries. In Japan, an image-based autonomous navigation method is studied for a moon investigating project by the small lunar lander. The purpose of this paper is to propose a safe landing areas detection method for lunar environmental suitability that uses brightness values and to propose a landing point determination algorithm in a limited calculating area for the actual lunar lander. In addition, we study acceleration of the processing speed for hardware implementation and robustness of the proposed method.

1. 研究背景と目的

近年、着陸機による月探査を行うことが各国で提案されており、現在、日本では小型着陸実験機を用いた月面探査計画が進んでいる。探査機が着陸を行う場合、地球からの通信による遠隔操作ではタイムラグが生じるために、その間に同じ高度を維持しようとする多くの推進剤が必要となってしまう。そのため、近年では探査機が自律的に航行・着陸を行うことが必須となっている。現在、この自律着陸技術の研究において、“着陸に適した地域への着陸”から、“目的に適した地域へのピンポイント着陸”，すなわち高精度着陸を実現するための技術確立が求められており、月面探査計画においてはこの高精度着陸が重大目標の1つとなっている。また、この技術が確立できれば、リターン計画、他の惑星での着陸計画への足がかりとなる¹⁾。

一般的に着陸機では発電容量や電池容量の関係から電力消費を抑える必要があり、小型の着陸機は特にこの電力消費の面が大きな課題となる。そこで、月面探査計画では単眼カメラにより撮影した画像のみから得られる情報で判断する画像航行が検討されている。そのため、制限された条件に適した画像処理法を提案する必要がある。画像処理による障害物識別には、2つのカメラにより撮影された画像を用いたステレオ視による手法^{2,3)}や Shape from shading による識別⁴⁾など様々存在する。その中でも輝度値を用い

た手法は単純かつ正確性があるため、月面探査計画の条件に適していると考えられる。輝度値法では生成した画像を用いた研究^{5,6)}やジオラマを用いた研究⁷⁾はされてきたが、それらは「月面が Lambert 面である」という仮定のもとで検討されてきた。しかし、実際の月面は光の入射角、反射角、位相角によって明るさが変化し、月面の地質によって反射率が異なる。従って、従来の方式では画像中で安全と識別される領域の分布に偏りが生じる。これは、Lambert 面と比較して同等の識別性能が維持できているとは言い難く、反射率が変化することに対する識別性能はロバストとはいえない。そのため、実機搭載には適していない。そこで本研究では、実月面画像において適切な結果が得られるように輝度値を用いた識別法の改良を行う。また、画像を生成するにあたり Hapke の理論モデルを適用した画像による検討⁸⁾も過去に行われてきたが、本研究では「かぐや」の地形カメラで得られたオルソ画像から反射率変換をして生成したデータを用いた高精度な模擬月面画像による検討を行う。

小型着陸機が安全な着陸を行うためには障害物を回避する必要がある。月のような重力天体への着陸は高度維持を行わない場合、引力により落下速度が増加するので、障害物回避のための移動時間を確保するためには、できるだけ高高度での障害物の検知が必要となる。一方、小型着陸機はその大きさ・電力消費量の制限から、高い性能のカメラを搭載することは難しい。低分解能のカメラであっても、高高度においてできるだけ障害物を検知するためには、最小画素単位である1画素ほどの大きさの障害物まで識別できる性能が必須となってくる。また、ハードウェア実装にむけて画像処理による障害物識別に割り当てられるハード容量を抑える必要がある。その1つの方法として整数の計算領域幅に制限することが考えられる。輝度値を用いた識別

*¹ © 2016 日本航空宇宙学会
平成 28 年 4 月 15 日、日本航空宇宙学会第 47 期年会講演会にて発表

平成 28 年 4 月 14 日原稿受付

*² 連絡先著者 (Corresponding author): kuga-tomoki@ed.tmu.ac.jp

*³ 首都大学東京大学院

*⁴ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

法はこの計算領域幅での処理が可能な手法である。しかし、着陸点を安全性領域から選択する処理としてラベリングによる既存のグルーピング方式⁹⁾はメモリを多く使用してしまうため採用できない。そのため、安全性領域から着陸点を選択する方法として新たに整数のみを扱ったアルゴリズムを提案する必要がある。また、着陸機は着陸降下フェーズにおいて画像処理を開始してから終了するまでの間も降下を続けており、処理時間がかかるほど回避のロバスト性が低くなってしまふ。そこで、処理時間の改善の検討も行う必要がある。本論文ではその検討結果についても述べる。

本論文の構成は以下の通りである。2節ではフラクタルモデリング法¹⁰⁾を用いた模擬月面の Digital Elevation Model (DEM) 生成、観測された反射特性を反映した画像生成について述べる。3節では従来手法の概要と識別法の改良の概要を述べる。4節では着陸点決定のアルゴリズムを提案する。5節ではシミュレーションによる検討を行い、6節にて結論を述べる。

2. 模擬月面画像の生成

2.1 月面モデルの生成 本研究では、月周回衛星「かぐや」により観測された月面の数値標高データ (DEM) を使用する。しかし、観測された DEM は 10 m メッシュのものであり、本研究においては最低でも 0.5 m の分解能が必要なため十分な分解能ではない。そこで、フラクタルモデリング法¹⁰⁾を用いて検討に用いる DEM を生成する。フラクタルモデリング法の手順は以下の通りである。まず観測データの DEM を分解能 0.5 m になるまで線形補間した後、2次元離散フーリエ変換を行い、細部情報をもつ高周波領域のフーリエ変換を以下の式 (1) に置換し、2次元逆離散フーリエ変換することで全体構造の情報が含まれる低周波領域を保持しつつ、フラクタルに従う細かい自然な起伏を再現する。

$$F_{f\theta}(u, v) = \frac{1}{(u^2 + v^2)^{\frac{H+1}{2}}} W_f e^{i\theta_{f_{u,v}}} \quad (1)$$

ここで、 H はハースト指数、 u, v は離散化された周波数、 W_f は擬似乱数発生器によって生成したホワイト・ノイズであり、フーリエ係数を決定するための位相 $\theta_{f_{u,v}}$ を区間 $(0, 2\pi]$ の一様乱数で模擬することで、 $F_{f\theta}$ はランダム・フラクタルを表現する最も有効な数学モデルであるフラクショナル・ブラウン運動を模擬することができる関数となる。なお、式 (1) の導出の概要は以下の通りである。

$D_E (\geq 1)$ 次元において、図形の複雑さを表す定量的な尺度であるフラクタル次元 D とハースト指数 H 、スペクトル指数 β には以下の関係が成り立つ。

$$D = D_E + 1 - H = D_E + (3 - \beta)/2 \quad (2)$$

さらに、フラクショナル・ブラウン運動のスペクトル密度を $S_{fB}(f)$ とすると、周波数 f 、スペクトル指数 β との関係は

$$S_{fB}(f) \propto 1/f^\beta \quad (3)$$

となる。式 (3) の関係を $D_E (\geq 1)$ 次元に拡張すると、式 (2) から以下のような関係式となる。

$$S_{fB}(f_1, \dots, f_{D_E}) \propto \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^{D_E} f_i^2\right)^{\frac{(2H+D_E)}{2}}} \quad (4)$$

式 (4) の関係式から式 (1) が導き出される¹¹⁾。

本研究ではハースト指数 $H = 0.7$ とし、 $\sqrt{u^2 + v^2} = 5$ 以上の高周波領域でフラクタルモデリング法を行った。また、起伏に変化をつけるために $H = 0.98$ で生成した細かい起伏を付加し、実際の月面の様子に近づけた。その後、クレータモデル¹⁰⁾に順ずるクレータと、細かな岩石などの障害物を付加した。なお岩石には様々な形状が存在するが、本研究では便宜上、半球状を基礎とし、半径、高さをランダムに決定したものとした。

2.2 月面の反射率モデル 先行研究⁵⁻⁷⁾において、月面は Lambert 面であるという仮定で検討されてきた。しかし、実際の月面は Lambert 面とはかなり異なっている。Lambert 面では地形が同じであればどこから見ても同じ輝度値をもつものに対して、実際の月面は入射角、反射角、位相角の違いによって確認できる輝度値が大きく異なってくる。

実月面の反射特性を表現するためのモデルとして代表的なものの中でも Hapke の理論モデル¹²⁾が最も近いものとして知られている。光の入射角を θ_I 、反射角を θ_E 、位相角を θ_g とすると Hapke の理論モデルにおける反射率 R_H は

$$\begin{aligned} R_H(\theta_I, \theta_E, \theta_g) &= \frac{\omega\mu_0}{4\pi(\mu + \mu_0)} \\ &\times \left\{ p(\theta_g)(1 + B(\theta_g)) + H_p(\mu_0, \omega)H_p(\mu, \omega) - 1 \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

と表すことができる。ここで、 ω は単一散乱のアルベド、 $p(\theta_g)$ は単一散乱の位相関数、 $H_p(\mu_0, \omega)$ 、 $H_p(\mu, \omega)$ は Hapke の理論モデルにおける多重散乱の近似関数、 $B(\theta_g)$ は後方散乱関数であり、 μ 、 μ_0 はそれぞれ $\mu = \cos(\theta_E)$ 、 $\mu_0 = \cos(\theta_I)$ である。

Hapke の理論モデルを用いる場合、式 (5) で示した通り、多くの変数が必要となる。よって、実月面に近づけるための反射特性を模擬月面にもたせるためには同じ地域での観測を数多く行う必要がある、非常に困難である。

そこで本研究では、「かぐや」の地形カメラで得られたオルソ画像の各輝度値から、位相角を固定として推定された反射率マップを使用する。すなわち、各輝度値を月と太陽間の距離で規格化した後、文献 13) や 14) の方法を用いてフォトメトリック補正されたものである。模擬画像を生成する際には、所望の太陽方向・高度に対して、反射率マップをフォトメトリック逆変換して輝度値に戻し、これを余弦則のシェーディング処理に入力する。その際、探査機位置・姿勢との幾何関係の算出には、同じく「かぐや」の地形カメラのデータにより生成されたデジタル標高モデルを用いる。

3. 輝度値を用いた着陸領域の安全性識別

3.1 輝度値と面の様子 画像の局所領域面の様子を判断できる方法として画像全体の輝度値と局所領域面の輝度値を比べる方法⁵⁻⁷⁾がある。以下、その方法を説明する。画素 (i, j) の輝度値を $I_{i,j}$ とする。画像の全体の領域を F とし、画像全体の画素数を $|F|$ とするとき、画像全体の平均 μ と分散 σ^2 は

$$\mu = \frac{1}{|F|} \sum_{i,j \in F} I_{i,j} \quad (6)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{|F|} \sum_{i,j \in F} (I_{i,j} - \mu)^2 \quad (7)$$

と表すことができる。また、画素 (i, j) まわりの局所領域を矩形と定め、局所領域の平均 $\mu_{i,j}$ 、分散 $\sigma_{i,j}^2$ も同様に考える。局所領域を F' 、画素数を $|F'|$ とすると

$$\mu_{i,j} = \frac{1}{|F'|} \sum_{i',j' \in F'} I_{i',j'} \quad (8)$$

$$\sigma_{i,j}^2 = \frac{1}{|F'|} \sum_{i',j' \in F'} (I_{i',j'} - \mu_{i,j})^2 \quad (9)$$

となる。これらの式を用いて、局所領域面における2つの特徴量を定義できる。

$$m_{i,j} = \frac{\mu_{i,j} - \mu}{\sigma} \quad (10)$$

$$s_{i,j} = \frac{\sigma_{i,j}}{\sigma} \quad (11)$$

この特徴量 $m_{i,j}$ 、 $s_{i,j}$ はそれぞれ局所領域面の水平度、平坦度を表している。これは、局所領域面が傾いていればその分だけ輝度値の平均が μ から隔たりをもち、局所領域面に障害物が存在するほど輝度値にばらつきが生じ輝度値分散が大きくなるものになる、ということがいえるので、この2つの特徴量が定義できる。これら特徴量を使うことで局所領域面の様子を判断できる。

3.2 安全性識別 先行研究⁵⁻⁷⁾において、局所領域面の様子を判断するとき、以下の式(12)の条件を満たせば画素 (i, j) は安全性領域であるとしていた。

$$\sqrt{m_{i,j}^2 + s_{i,j}^2} < V_{th} \quad (12)$$

ここで、 V_{th} は任意のパラメータである。これは水平度、平坦度の重みを1対1とし、ベクトル長さで判断していることに相当する。この条件式を適用するためには1節でも述べたように月面が Lambert 面であるという仮定が必要であるが、実月面においては似たような地形でも場所によっては地質や観る位置の違いなどにより光の反射の様子が異なる。そのため、同じような様子の面でも水平度の値が大きく異なり安全性領域分布に偏りが生じ、安全な広い領域でも安全性領域として識別することができなくなってしまう場合があり、着陸地点を選ぶには適さない識別となってしまう。また、平坦度についても同様に同サイズの障害物が

存在しても識別できない場合が考えられる。障害物識別精度を向上するために閾値を小さいものに設定すると、水平度成分の影響により更なる領域の偏りが生じてしまい、実機に適切な安全性領域を抽出できるとは考えにくい。以上より、実月面に対応するための別の識別方法が必要となる。

Hapke の理論モデルに適應するための改良法は西口⁸⁾ が提案している。しかし、その改良法では正確な太陽方向の情報が必要となり、小型の月面着陸機では得ることが難しいため適当な識別法ではない。そこで、以下のような2つの特徴量に対して、別々に条件を与える。

$$|m_{i,j}| < V_{thm} \quad (13)$$

$$s_{i,j} < V_{ths} \quad (14)$$

これにより、画像全体と比べて水平度による識別を影などの極端に輝度値が異なる領域を排除するためだけのものとし、安全性領域の偏りを抑える役割とした。このとき、閾値を以下のように考える。

$$V_{thm} = \sum_{i,j \in F} \frac{|m_{i,j}|}{|F|} \quad (15)$$

$$V_{ths} = c \sum_{i,j \in F} \frac{s_{i,j}}{|F|} \quad (16)$$

ここで、 c ($0 < c \leq 1$) は任意のパラメータである。まず、任意の閾値をあらかじめ設定するのではなく、それぞれ特徴量から設定することにより太陽の方位角や太陽光の入射角が異なっても対応することができる。また、パラメータ c を調整することで、求められる障害物識別性能のみを向上させることができ、広範囲領域の検証が可能であると考えられる。

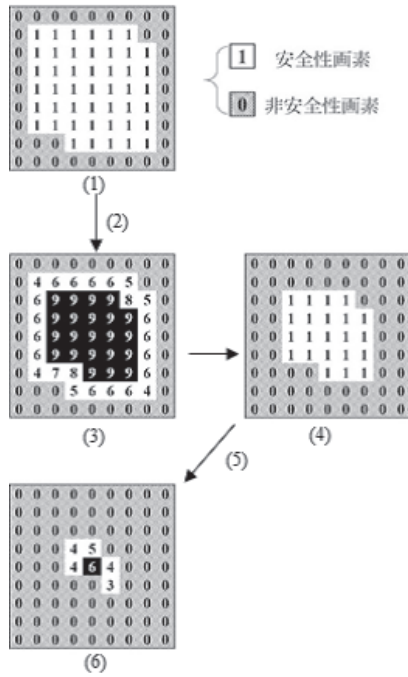
以上より、条件式(13)(14)を用いることで実月面に対する障害物識別、着陸領域抽出が可能になると考えられる。

4. 着陸点決定のためのアルゴリズムの提案

抽出された安全性領域から着陸点を決定するためのアルゴリズムを考える必要がある。また1節でも述べた通り、小型着陸機に搭載可能なものにするため、複雑な計算をせず、かつ計算範囲を整数32bit型に収めることを考慮する。

本研究では、着陸点を絞り込む条件として、画像の中の安全着陸領域と識別された画素の集合のうち、最も大きな集合の中心を選択する。言い換えると着陸に適さない領域から最も離れた画素を着陸点とする。これらの条件を満たす手法として着陸に適さない領域から最も離れた画素を着陸点とする以下のアルゴリズムを提案する。

- (1) 安全性領域と識別された画素を着陸候補点として値1を、識別されなかった画素に値0をそれぞれ与える。
- (2) 着陸候補点である画素のまわり8画素を調べ、自分を含めた値の合計を算出し、その合計値を記録する。
- (3) 画像全体の着陸候補点を調べ、記録した合計値の最大値を調べる。
- (4) 最大値と同じ合計値をもつ画素を着陸候補点として



第1図 着陸点決定までの処理過程の例

画素 1 を、それ以外のすべての画素に値 0 をそれぞれ与える。

(5) (2)~(4) を繰り返す、着陸候補点を絞っていく。

(6) 最終的に残った画素を最終着陸点とする。また、複数存在する場合、画像中心に最も近い画素を最終着陸点とする。このとき、中心画素の座標を (P_c, Q_c) とし、対象の画素の座標を (P_i, Q_j) とすると、2 点間距離： $\sqrt{(P_c - P_i)^2 + (Q_c - Q_j)^2}$ を整数丸め込みの値で比較する。

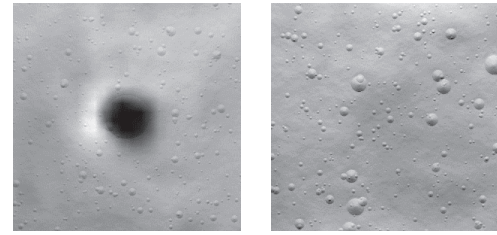
このアルゴリズムは着陸候補点の絞り込みまでの行程を 0~9 までの整数値のみで行い、計算は単純な算術のみであり、さらに着陸に適さない領域から最も離れた画素を着陸点とするアルゴリズムとして機能する。これにより、着陸機搭載のための制約を満たし、比較的早く着陸候補点を絞り込むことができると考えられる。

第 1 図は以上の着陸点決定アルゴリズムの処理過程の例を示している。灰色区画は値 0 となった画素を表し、黒塗りしている区画は合計値の最大値と同じ値をもった画素を表している。

5. シミュレーション

シミュレーションを行うために、2 節で説明した方法で 2 種類の画像を生成した。Case-1 として「マリウスヒルの縦孔周辺領域」の DEM を使用し、DEM に反映されていなかった縦孔を同サイズのクレータで模擬した画像、Case-2 として「任意の月面領域」の画像とする (第 2 図)。なお、マリウスヒルの縦孔は着陸検討のランダム的な位置づけとなっているもので、実際の月面着陸計画においても、その周辺は着陸地点候補の 1 つと考えられている。

画像の諸元として、画像サイズを 512×512 pix, カメラ高度 470 m 相当, カメラ画角 30 deg, 太陽入射角 45 deg と



第2図 模擬月面画像

し、式 (16) におけるパラメータは $c = 0.55$, 処理速度の測定は CPU: intel core i7, クロック数: 3.60 GHz, メモリサイズ: 8.00 GB, OS: Windows7 の PC により時間測定精度 1 ms で行った。次に、識別性能を測るために着陸機の脅威となるクレータ等の障害物、傾斜 (脅威傾斜角 10 deg 以上) を対象とした以下の 2 つの指標を設定した。

- ・ O_d : 画像中の障害物のうち識別できた障害物の割合
- ・ T_d : 識別された安全性領域の中で傾斜角が 10 deg 未満の割合

このとき、対象点 (i, j) における標高 $H_{i,j}$ から、最急傾斜 $S_0(i, j)$ を Sobel Filter により求める。X 方向, Y 方向の傾斜を $S_X(i, j), S_Y(i, j)$ とし、DEM の格子点の間の距離を D_X, D_Y とすると、対象点 (i, j) の X 方向, Y 方向の傾斜は次の式で算出できる。

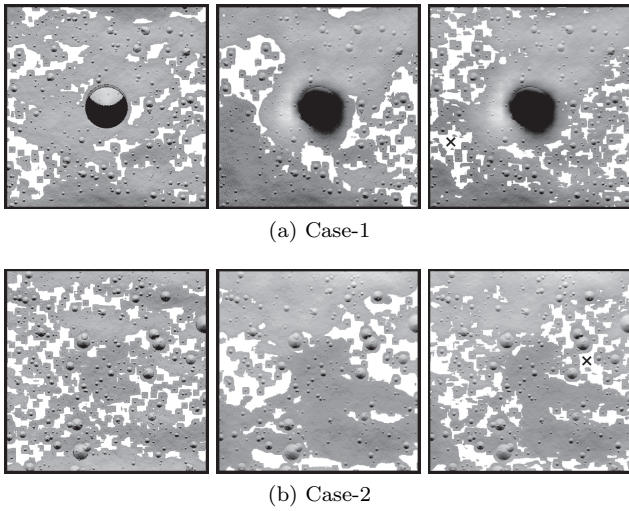
$$S_X(i, j) = \frac{(H_{i-1,j-1} + 2H_{i,j-1} + H_{i+1,j-1})}{8D_X} - \frac{(H_{i-1,j+1} + 2H_{i,j+1} + H_{i+1,j+1})}{8D_X} \quad (17)$$

$$S_Y(i, j) = \frac{(H_{i-1,j-1} + 2H_{i-1,j} + H_{i-1,j+1})}{8D_Y} - \frac{(H_{i+1,j-1} + 2H_{i+1,j} + H_{i+1,j+1})}{8D_Y} \quad (18)$$

以上の各方向の傾斜を用いて、対象点 (i, j) の最急傾斜 $S_0(i, j)$ を以下の式で算出する^{15, 16)}。

$$S_0(i, j) = \sqrt{S_X^2(i, j) + S_Y^2(i, j)} \quad [\%] \quad (19)$$

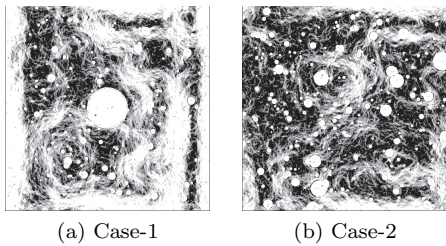
5.1 性能評価 局所領域を正方形とし画素数を $|F'| = 256$ (16×16) pix と設定してシミュレーションを行う。第 3 図では Case ごとに左から順に、Lambert 仮説の画像に対する従来法⁵⁻⁷⁾ による安全性領域抽出結果の画像、今回生成した模擬画像に対する従来法⁵⁻⁷⁾ による抽出結果の画像、今回生成した模擬画像に対する提案手法による抽出結果の画像を示しており、安全性領域と識別された画素を白塗りし、画像中の安全性領域の画素数がすべての結果でほぼ同等の画像としている。また、第 1 表には処理結果の識別性能値を示している。さらに、第 4 図は Case ごとの傾斜の様子を示しており、傾斜が急になるほど明るく、緩やかになるほど暗く表示している。なお、第 3 図 Case-1 において、左図は縦孔壁面の影をクレータの内部に投影して黒く塗り潰すことで縦孔の影を模擬しているが、右図および中央図は観測された反射率を適用して縦孔の影を模擬し



第3図 安全性領域抽出結果 (×:着陸点)

第1表 識別性能値

		O_d [%]	T_d [%]	処理時間 [ms]
Case-1	従来法	87.21	77.05	234
	提案手法	94.19	79.00	379
Case-2	従来法	80.23	94.87	218
	提案手法	93.02	95.90	344

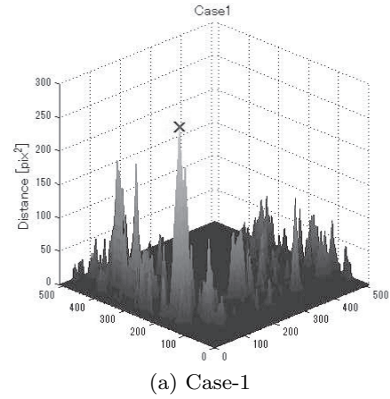


第4図 傾斜の様子

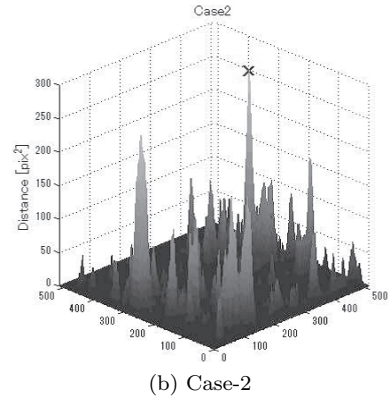
ている。

まず、提案手法の識別性能を従来法と比較して評価する。第3図より、従来法により抽出された画像である左図と中央図を比較すると、実月面画像(中央図)においては安全性領域の分布に偏りが発生していることが確認できる。一方、提案手法により抽出された画像(右図)ではその偏りが抑えられていることが確認できる。第1表より、提案手法では従来よりも100msほど処理時間が増加しているが、障害物識別に関しては10%ほどの向上が確認できる。さらに傾斜識別性能は劣化が見られない。これより、識別性能を向上しつつ安全性領域を広範囲で抽出できたといえる。

第1表では傾斜識別性能の劣化が見られないことが確認されたが、Case-1とCase-2の間には15%程度の差が生じていることがわかる。これは、傾斜識別に使用している水平度が画像全体の輝度値平均からの差を表す量であり、10deg以上を識別し得ることが定量的に示されているものではないため、画像中領域の平均の傾斜が激しい場合は画像全体の輝度値平均が傾斜の激しい領域の輝度値に近づいてしまい、適切な傾斜識別が困難となることが原因であると考え



(a) Case-1



(b) Case-2

第5図 非安全性領域からの距離 (×:着陸点)

られる。つまり、第4図で示している通り、Case-2に対してCase-1の方が画像中領域において傾斜が激しい領域が多いことにより傾斜識別性能に差が生じたと考えられる。

次に着陸に適さない領域から最も離れた画素を4節で示したアルゴリズムで選択できているか確認する。第5図は安全性領域画素が非安全性領域からどの程度離れているかを示しており、選択された画素が非安全性領域から最も離れた画素を選択できていることが確認できる。

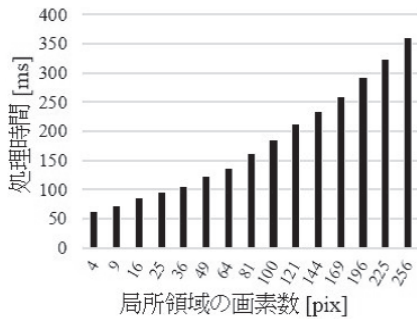
5.2 処理時間の改善 回避行動を素早く行うために着陸点を決定するまでの処理速度はできるだけ速い方が望ましい。また、従来手法と比較して処理速度の劣化が前項のシミュレーション結果から確認できた。そのため、処理時間の改善を行う必要がある。

処理時間の改善を行うにあたり局所領域の画素数を減らすことで改善できることは容易に考えられる。そこで、局所領域画素数を減らしても識別性能は維持できるか検討する。局所領域を256pixから正方形の辺の画素数を1画素ずつ減らしていったときの処理時間および識別性能値の変化をそれぞれ第6図および第7図に示す。また、局所領域画素数の違いによる安全性領域の抽出の違いを第8図に示す。まず第6図より、局所領域画素数を減らすことで処理時間の減少が確認できる。次に第7図より、局所領域画素数を減らしたところ、障害物、傾斜の識別性能値はどちらのCaseの画像でも50pix程度までなら大きな変動は見られないことが確認できる。最後に第8図より、局所領域画素数を小さくした場合、安全性領域は小さな領域が増えて

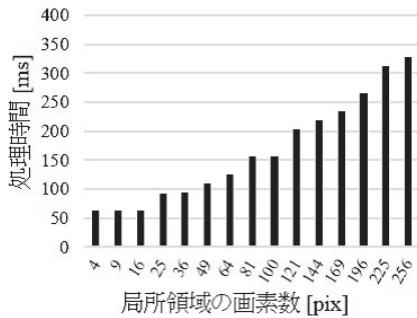
いき、全体的に小さい領域の集まりのような抽出結果となることがわかる。これは着陸点を選択するとき、256 pix では小さな領域だったところを選択する可能性が考えられるため、局所領域の画素数変化に対するロバスト性が高いとは言いがたく、好ましい結果が得られたとはいえない。一方、144 (= 12 × 12) pix の場合を見ると、256 (= 16 × 16) pix の場合とさほど変わらない纏まった安全性領域の抽出結果となっていることがわかる。また、第 6 図に示す通り、100 pix の場合、処理時間は 256 pix のときの約半分まで削減できる。よって、性能を維持しつつ処理時間を短縮する場合、局所領域の画素数は 100 pix 程度まで削減可能と判断できる。

6. 結 論

本研究では実月面画像に適応するための輝度値を用いた識別法の改良、障害物識別性能の向上、着陸点決定のためのアルゴリズムの提案および処理速度の向上を目的とした。本論文で提案した手法は従来法との比較により複数の画像で 10% ほどの障害物識別率の向上、安全性領域の偏りの抑制が確認でき、実月面画像に適応することができるといえる。また、提案した着陸点決定アルゴリズムは最も非安全性領域から離れた画素を抽出することが確認できた。さらに、局所領域画素数の変更による処理速度の改善を行った。その結果、局所領域画素数を 100 pix まで削減することで、

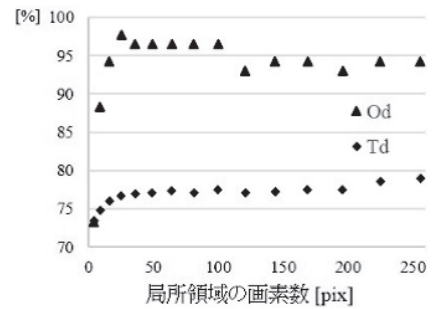


(a) Case-1

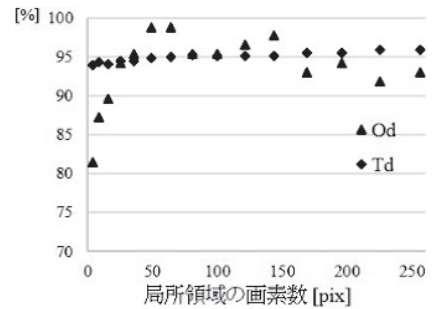


(b) Case-2

第 6 図 局所領域画素数に対する処理時間変化

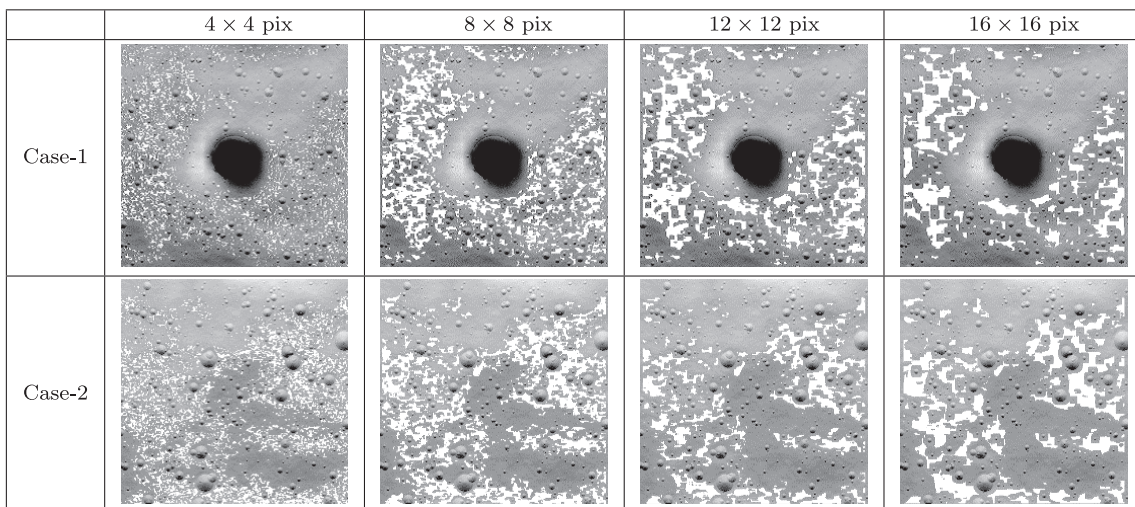


(a) Case-1



(b) Case-2

第 7 図 局所領域画素数に対する性能値変化



第 8 図 局所領域画素数の違いによる安全性領域の抽出の違い

識別性能を維持しつつ、処理時間を半減できることが確認できた。

なお、ある程度の大きさの傾斜が多く存在する地形から傾斜のない領域を正確に識別することは困難であるが、事前観測にて取得した着陸地点周辺のDEMを使用することにより、着陸地点周辺の平均的な傾斜は打ち上げ前に推定できる。よって、着陸機に許容される傾斜を考慮し、より適した閾値に調整することが今後の課題である。また、着陸機の自己位置判定誤差やDEMの分解能の粗さにより閾値の調整だけでは対応困難な場合もあるため、着陸脚の設計などで補う必要もあると考えられる。

本研究を行う機会と貴重なご助言を賜り、また「かぐや」関係のデータを利用させていただきました宇宙科学研究所澤井秀次郎先生、坂井真一郎先生、その他、関係各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 福田盛介, 小林大輔, 澤井秀次郎, 鎌田弘之, 高玉圭樹, 小沢慎治: 月小型実験機 SLIM の画像航行, 日本機械学会第 18 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス講演論文集, 2009, pp. 55-58.
- 2) 片山保宏: 月着陸における画像センサを用いた障害物検知回避, 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集, 2007, pp. 357-358.
- 3) 服部 寛, 山口慶剛: 月面着陸機の視覚誘導の検討, 電子情報通信学会, 電子情報通信学会技術研究報告, SANE, 宇宙・航行エレクトロニクス, **97** (1997), pp. 91-98.
- 4) 五味広美, 佐々修一, 山口 功, 二宮哲次郎, 濱田吉郎: Shaping from shading による月平坦地の実時間検出, 日本航空宇宙学会論文集, **52** (2004), pp. 141-147.
- 5) 西口憲一, 吉河章二, 木下貴博: 月面軟着陸のための障害物検出方式, 日本航空宇宙学会論文集, **48** (2000), pp. 55-60.
- 6) 鎌倉生大, 小島広久: 月・惑星着陸機のための着陸点決定法, 日本航空宇宙学会論文集, **63** (2015), pp. 13-19.
- 7) 西口憲一, 吉河章二: 月面軟着陸における画像からの障害物検出法のジオラマによる検証, 計測自動制御学会論文集, **38**, 4 (2001), pp. 404-410.
- 8) 西口憲一: 画像を用いた月惑星軟着陸のための障害物検出と回避, 計測自動制御学会論文集, **38**, 4 (2002), pp. 395-403.
- 9) 村上伸一: 画像処理工学, 東京電機大学出版局, 東京, 2004.
- 10) 吉河章二, 西口憲一: 実データとフラクタルモデリングによる模擬月面の生成, 計測自動制御学会論文集, **37**, 3 (2001), pp. 262-267.
- 11) H.-O. バイドロゲン/D. ザウベ編, 山口昌哉監訳: フラクタルイメージ 理論とプログラミング, シュプリンガー・フィアラーク東京, 東京, 1990.
- 12) Hapke, B.: Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy, 2nd ed., Cambridge University Press, New York, 2012.
- 13) McEwen, A.: A Precise Lunar Photometric Function, Lunar Planet. Sci., **XXVII** (1996), pp. 841-842.
- 14) Yokota, Y., Matsunaga, T., Ohtaka, M., Haruyama, J., Nakamura, R., Yamamoto, S., Ogawa, Y., Morota, T., Honda, C., Saiki, K., Nagasawa, K., Kitazato, K., Sasaki, S., Iwasaki, A., Demura, H., Hirata, N., Hiroi, T., Honda, R., Iijima, Y. and Mizutani, H.: Lunar Photometric Properties at Wavelengths 0.5-1.6 μm Acquired by SELENE Spectral Profiler and Their Dependency on Local Albedo and Latitudinal Zones, Icarus, **215** (2011), pp. 639-660.
- 15) Yajima, T. and Inoue, M.: DEM Filtering Methods for Obtaining Geological Information, 31st Asian Conference on Remote Sensing, Vol. 1, 2010, pp. 398-403.
- 16) Kamiya, I., Kuroki, T. and Tanaka, K.: Interpretation of Geomorphology and Geology using Slope Gradation Map, Geoinformatics, **11**, 1 (2000), pp. 11-24.