

1D13 障害物検知評価のための 高精細模擬月面地形のモデリング手法

○狩谷和季 (総研大), 石田貴行 (JAXA), 本田親寿 (会津大), 大竹真紀子 (JAXA),
小島広久 (首都大), 澤井秀次郎, 坂井真一郎, 福田盛介 (JAXA)

High-Resolution Lunar Terrain Modeling for Evaluating Hazard Detection and Avoidance

Kazuki Kariya (SOKENDAI), Takayuki Ishida (JAXA),
Chikatoshi Honda (University of Aizu), Makiko Ohtake (JAXA),
Hirohisa Kojima (Tokyo Metropolitan University),
Shujiro Sawai, Shin-ichiro Sakai and Seisuke Fukuda (JAXA)

Key Words: Fractal modeling, Hazard detection and avoidance, Digital elevation model, Lunar lander

Abstract

Hazard detection and avoidance (HDA) capability plays an important role to ensure safety landing on the Moon, Mars and small bodies. For its verification and evaluation, terrain data with higher resolution than the data that currently exists is required. This paper proposes novel method to model high resolution lunar terrain digital elevation model (DEM) by combining fractal surfaces, crater models and boulder models to create crater saturated terrain for testing HDA and other image navigation methods.

1. 緒言

諸外国や我が国における宇宙探査計画において、周回機による天体表面データの取得が進み、次のステップとして惑星や小天体への着陸探査ミッションが提案されている。着陸機の重心が高い場合や、目標天体表面の起伏が激しいことが予想される場合、転倒することなく安全に着陸するために、降下中の障害物検知・回避の実施は非常に重要である。

特に画像処理による障害物検知機能の搭載について考えたとき、障害物検知は探査機高度が数十 m から数 km の範囲内で行われ¹⁾、このときの画像分解能は最高で数 cm/pix のオーダとなる。ここで問題となるのは、その検証・評価に用いる天体地表面の画像データが実際に即して確からしいかという点である。現在、周回機によって取得済みの地表面データの最高分解能は、月の場合では光学画像が数十 cm、数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM) が数 m 程度である。前者では、カメラパラメータ、姿勢や照明環境等を所望の条件に揃えることが難しい。後者では、細かなクレータや起伏等の情報が欠落しており、模擬画像生成のデータソースとしてそのまま用いる事は適当でない。またどちらの場合も、障害物として検知すべき、小さなボルダーやクレータの情報は失われている。

これらの理由から、月面を対象として DEM を高解

像度化する幾つかの手法が提案されている²⁾⁻⁴⁾。一方でこれらの手法では、数十 m 程度の起伏やクレータの再現はなされているものの、数十 cm オーダのより細かなクレータやボルダーについては論じられていない。

本稿では、画像を用いた障害物検知技術の検証を目的として、従来より小さなクレータやボルダーを再現可能な高精細月面 DEM の作成手法を提案する。当手法では、元となる DEM に対してフラクタルモデリングを用いた起伏の再現ののち、モデル化した月面クレータとボルダーについて実際の分布に従い追加することで高精細 DEM の作成を行う。

2. モデリング手順

本稿で提案する、高精細月面 DEM のモデリング手法は次のような手順となる。まず、事前取得された対象地域の月面 DEM に対し、フラクタルモデリングを行うことで解像度以下の細かな地形的起伏を再現し、ベースとなる DEM を作成する。次に、直径数 m までの小さなクレータ、ボルダーの形状と分布を決定し、ベース DEM に付加する。画像による障害物検知手法の評価に用いる場合、作成された DEM にカメラ姿勢や太陽条件を追加して陰影を施し、月面模擬画像とする。

2.1 フラクタルモデリングによる DEM の高精細化

山岳や川といった自然地形は自己アフィン・フラクタル性を持つことから、二次元の非整数ブラウン運動 (fractional Brownian motion: fBm) を模擬する事で標高モデルを生成する手法⁵⁾が、地形起伏の標準的な再現法である。既知の地形を fBm を用いて補間する手法として、中点変位法 (Midpoint Displacement Method), 特にダイヤモンド-スクエア法が広く用いられる。当手法では、周回機によって取得された月面 DEM を、ダイヤモンド-スクエア法によって対象となる解像度まで fBm で補間し、以後の処理のベースとなる DEM とする。

2.1.1 非整数ブラウン運動

D_E 次元ユークリッド空間上の関数 $f(x)$ が任意の x とその変位 Δx について、

$$\Pr \left[\frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{|\Delta x|^H} < t \right] = G(t) \quad (1)$$

を満たすとき、この $f(x)$ を非整数ブラウン関数とよぶ。ここで、 H はハースト指数と呼ばれる自己相似度を表すパラメータで $0 < H < 1$ となり、 G は分布関数である。この G が正規分布であるとき、これを非整数ブラウン運動 (fBm) とよび、その増分の平均は 0 で、分散について次の式が成り立つ。

$$\text{var}[f(x_2) - f(x_1)] \propto |x_2 - x_1|^{2H} \quad (2)$$

G が平均 0、分散 σ^2 の正規分布であるとする、式 (1) から次式を得る。

$$\log E[|f(x+\Delta x) - f(x)|] - H \log |\Delta x| = \log \left(\frac{2}{\sqrt{2\pi}} \sigma \right) \quad (3)$$

式 (3) は、 $\log |\Delta x|$ と $\log E[|f(x+\Delta x) - f(x)|]$ のプロットが線形かつ傾きが H となることを表している。したがって、自己アフィン性の成立するスケール範囲において、このプロットの傾きと切片を見ることで、フラクタル特徴であるハースト指数 H と分布関数 G の分散 σ^2 を推定する事が可能である。

2.1.2 ダイヤモンド-スクエア法による補間

まず、一次元の中点変位法について考える。便宜上、 $f(0) = 0$ とする。また、式 (2) を満たすために $\Delta x = 1$ の時の値 $f(1)$ は平均 0、分散 σ_0^2 の正規分布に従う。これらの中間に位置する $f(1/2)$ は $f(0)$ と $f(1)$ を結んだ線分の midpoint に平均 0、分散 σ_1^2 となる正規分布に従う確率変数 Δ_1 を加えた値となる。この σ_1^2 は式 (2) を満足しなければならないため、次式となる。

$$\sigma_1^2 = \frac{\sigma_0^2}{2^{2H}} - \frac{\sigma_0^2}{4} = \frac{\sigma_0^2}{2^{2H}} (1 - 2^{2H-2}) \quad (4)$$

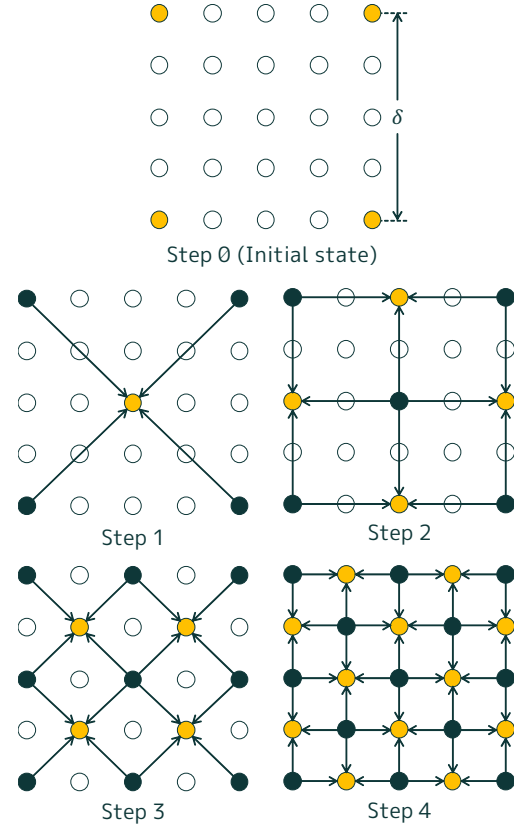


図 1: ダイヤモンド-スクエア法による補間手順、黒が既知の点、黄が補間する点を表す

同様に、 $1/4, 1/8, \dots, 1/2^n$ の値を決定すると、 n ステップ目において中点に加えられる確率変数 Δ_n の分散 σ_n^2 は次で表される。

$$\sigma_n^2 = \frac{\sigma_0^2}{(2^n)^{2H}} (1 - 2^{2H-2}) \quad (5)$$

ダイヤモンド-スクエア法はこれを二次元に拡張したものである。ただし、補間する DEM のデータは正正方格子状に並んでおり、その補間前の解像度 (格子間距離) は δ であるとする。図 1 に示すように、隣接四点の midpoint を埋める形で補間を行う。第一ステップでは初期の正正方格子の midpoint を、第二ステップでは補間された点を用いる斜方形格子の midpoint を順次補間し、所望の解像度に至るまで続ける。

一次元の時と同様、補間される midpoint は四点線形補間の値に確率変数 Δ' を加える事で与えられる。格子サイズはステップを経る毎に $1/2^{1/2}$ ずつ減少することを考えると、 n ステップ目の補間に用いられる変位 Δ'_n の分散 $\sigma_n'^2$ は式 (4), (5) と同様に、次式となる。

$$\sigma_n'^2 = \frac{\delta^{2H} \sigma^2}{2^{nH}} (1 - 2^{2H-2}) \quad (6)$$

ここで用いるフラクタル特徴 H と σ^2 は原地形となる DEM から推定されたものである。また、ここでは等方性の fBm によって表面形状を近似しているが、地

形の変位が明らかに方向性を持つ場合は、その各方向についてハースト指数と分布関数の分散を推定して同様に処理を行うことで、方向性を考慮した fBm による補間ができる。

2.2 クレータの付与

月面における一般的なクレータは衝突によって形成され、元々の地表がお椀型に取り除かれることによって形作られるクレータ内部と、その噴出物が堆積したクレータ外縁部 (ejecta blanket) で構成される。本節では、数百 m 以下の小さなクレータについて、劣化の度合いを含むこれらのクレータ形状を数学的にモデル化し、障害物検知時の画像に現れるクレータの飽和した地形をベース DEM に付与する。

2.2.1 クレータの形状モデル

いわゆるシンプルなクレータについて、クレータ内部の断面形状は概ね放物線を模している⁶⁾。また、クレータ外縁部の厚みは中心からの距離に応じて負の指数関数的に表される⁷⁾。一方で、新鮮なクレータ形状は形成後に微小隕石、太陽風、温度変化や放射線等の様々な影響を受けることで劣化するため、その深さやリムの高さは経年で変化する。そこで、クレータ内部、リム内部、リム外部とクレータ外縁部を表す、クレータ中心からの距離 r に関する四つの多項式 $h_1(r) \sim h_4(r)$ を滑らかに接続することで、クレータの形状を再現する。このクレータ形状の模式図を図 2 に示す。ここで、 R はクレータ半径、 W_r は外縁部の長さ、 H_{r0} 、 H_{c0} は新鮮なリム高さとクレータ深さ、 H_r 、 H_c は劣化したリム高さとクレータ深さを表しており、 α 、 β はそれぞれ h_1 、 h_2 と h_3 、 h_4 が接続される位置である。

クレータ内部形状 h_1 は、前述の通り二次関数で表され、クレータ中央で傾きが 0 であるとして次式となる。

$$h_1(r) = \frac{H_c + H_{r0}}{R^2} r^2 - H_c, \quad (0 \leq r \leq \alpha) \quad (7)$$

続いて、クレータ外縁部形状 h_4 を決定する。外縁部の厚み t は次で表される⁷⁾。

$$t = T \left(\frac{r}{R} \right)^{-3} \quad (8)$$

ここで、 T はリム位置での厚みである。したがって、クレータ端で厚みがゼロとなる事を考えると、

$$h_4(r) = \frac{H_r(R + W_r)^3}{(R + W_r)^3 - R^3} \left(\frac{r}{R} \right)^{-3} - \frac{H_r R^3}{(R + W_r)^3 - R^3}, \quad (\beta \leq r \leq R + W_r) \quad (9)$$

となる。新鮮なクレータ、つまり $\alpha = \beta = R$ で、 $H_{r0} = H_r$ 、 $H_{c0} = H_c$ のとき、クレータ形状は式 (7)、(9)

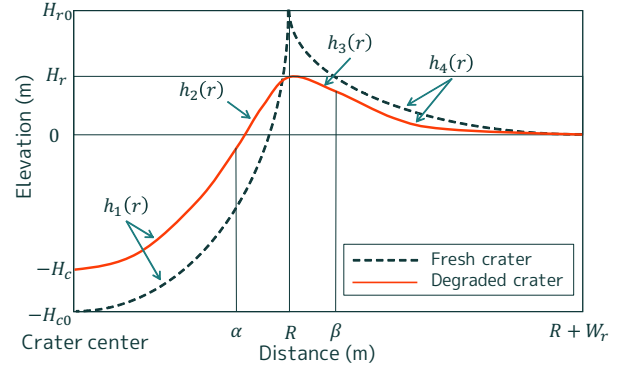


図 2: クレータ形状モデル

のみで表すことが可能で、図 2 の点線部のようにリムが尖った形状となる。

風化による劣化度合いを表現するために、 h_1 と h_4 の間を他の関数で表現する。尖ったりリムは丸く削られるため、リムの頂点では傾きがゼロで、かつ α 、 β で滑らかに接続される事が望ましい。そのような制約を満たす h_2 は次で表される。

$$h_2(r) = \left(\frac{(H_c + H_{r0})^2}{H_r - H_{r0}} - H_c \right) \left(\frac{r}{R} - 1 \right)^2 + H_r, \quad (\alpha < r \leq R) \quad (10)$$

同様に、 h_3 は次式となる。

$$h_3(r) = \frac{H_r(R + W_r)^3 A}{W_r \beta^4 (R - \beta)^2 (3R^2 + 3RW_r + W_r^2)} \times (r - R)^2 \left\{ r - \beta \left(1 + \frac{\beta^3 - R^3}{A} \right) \right\} + H_r, \quad (R < r < \beta) \quad (11)$$

ここで、

$$A = -3R^3 + 2R^2\beta + 2R\beta^2 + 2\beta^3 \quad (12)$$

また、これらの多項式を接続する位置 α 、 β は次となる。

$$\alpha = \frac{H_c + H_r}{H_c + H_{r0}} R \quad (13)$$

$$\beta = R + \left(1 - \frac{H_c + H_r}{H_c + H_{r0}} \right) W_r \quad (14)$$

これらのモデルによって、クレータの半径 R と外縁部の長さ W_r 、新鮮であるときの深さと高さ H_{c0} 、 H_{r0} 、劣化後の深さと高さ H_c 、 H_r を与えることで、クレータ形状を劣化度合いに応じて一意に決めることができる。

新鮮なクレータの深さ、リムの高さと外縁部の長さについて、クレータの直径との関係が示されており⁸⁾、本稿で対象とする、小さくシンプルなクレータの場合には以下のように表す事ができる。

$$H_0 = 0.196(2R)^{1.010} - H_{r0} \quad (15)$$

$$H_{r0} = 0.036(2R)^{1.014} \quad (16)$$

$$W_r = 0.257(2R)^{1.011} \quad (17)$$

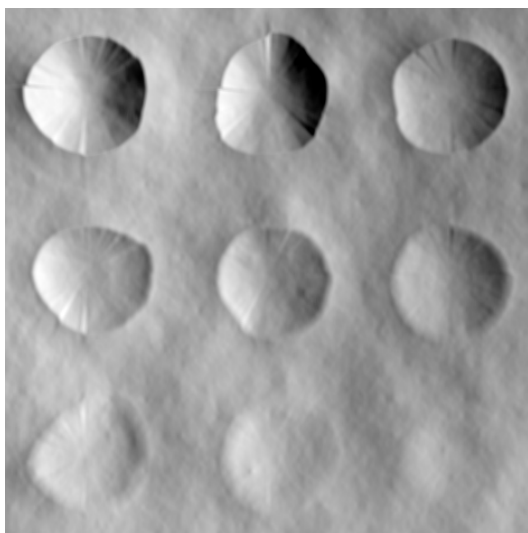


図 3: 形状の歪みと劣化度合いを与えたクレータ，左上が新鮮なもので右下が最も劣化したもの

したがって、付与したいクレータの半径によって新鮮なクレータの各パラメータが算出でき、更に対象地域の表面密度やクレータの年代から劣化度合いを推定することで、クレータモデルを決定する。

2.2.2 クレータの分布と付与方法

クレータの飽和した地形において、クレータの直径 D_c とその累積個数 N_c の理論的最大値は次の式で表される⁹⁾。

$$N_c = 1.54D_c^{-2} \quad (18)$$

地域や地質等により異なるが、実際にはこの値の 1 から 10% の範囲内、平均的には 5 から 7% に収まる値となる。ベース DEM にクレータを付与する際には、元となる DEM、あるいは輝度画像においてクレータをカウントし、その地域におけるクレータの累積個数を推定することで、実際に付与するクレータの直径に対する個数を決定する。

このようにして決定した個数だけ、ベース DEM にクレータを付与する。具体的には、付与する DEM 範囲における最小二乗面にて、クレータ中心を原点とする距離グリッドを作成し、前項のクレータモデルを計算する。その後、DEM に対して加算することで、表面の起伏を保持しつつクレータ形状を再現する。また、実際の月面クレータにおいては、侵食度合いや地形の影響、形成時の条件等によって、リム形状は完全な円形となることは珍しい。そこで、始点と終点の一致したランダムな一次元波形を用意しリム部の形状とすることで、クレータ形状の歪みを再現して付与する。この歪みと劣化度合いを与えた、クレータモデルの陰影画像を図 3 に示す。

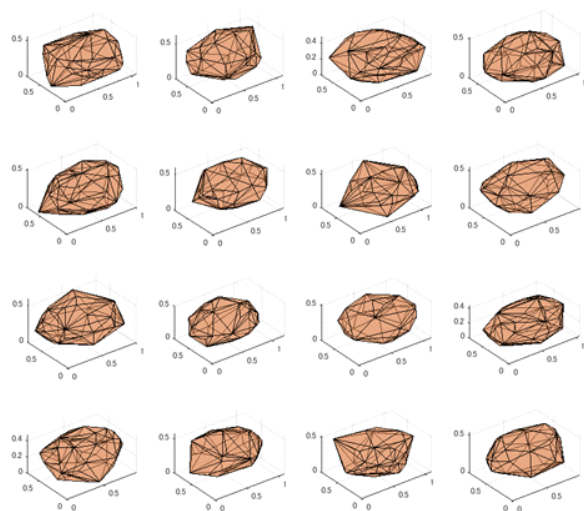


図 4: 模擬ボルダーの三次元形状

2.3 ボルダーの付与

本手法では、障害物となるボルダーを三次元モデルで模擬し、元データで欠落している数 m 以下のものについて個数分布に基づいて付与する。

2.3.1 ボルダーの形状モデル

ボルダーの形状は衝突による断片化によって形成され、その軸比 (axial ratio) は噴出速度に相関がある。ボルダーの形状が直方体であるとする、それぞれ直行する長辺 a 、中辺 b 、短辺 c を持ち、ボルダーは通常、月表面から短辺が上向きとなるように位置している。周回機による観測は上方から行われるため、その形状としては a, b の辺を見ることとなる。この比について、月の高地では概ね $b/a = 0.78$ である¹⁰⁾。また実験室での衝突実験を行い、破碎されたボルダー形状が平均して $b/a = 0.72$ 、 $c/a = 0.5$ となったとの報告がある¹¹⁾。これらのことから、本稿ではボルダーの各辺の比 $a : b : c = 1.0 : 0.75 : 0.50$ とした。

岩石の形状や表面の起伏もまたフラクタル性を持つと言われているが、今回付与対象とするボルダーのサイズは大きくとも数 m であり、目標とする DEM の解像度において数十 pix 程度のサイズであるため、その三次元モデルの作成には通常のコンピュータグラフィクスで用いられる手法を使用した。具体的には、三次元空間にランダムに配置した点群の凸包を求め、上記の比に沿うように縮尺を調整したものを、付与するボルダー毎に生成することでボルダー形状を模擬した。この方法で作成した三次元モデルを図 4 に示す。

2.3.2 ボルダーの分布と付与方法

ボルダーの直径に対する累積個数は、クレータの場合と同様に冪乗則に従うと考えられている。幾つかの

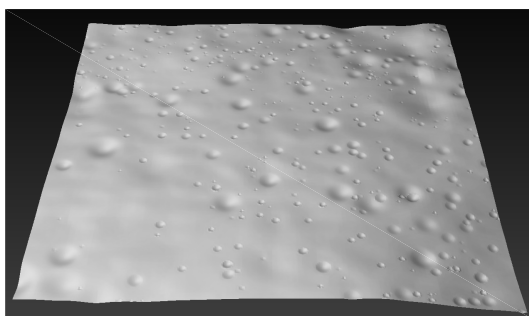


図 5: 元データ陰影画像 (約 300 m, 333 pix 四方)

月クレータ周辺についてはその関係が示されている¹²⁾が、そのモデルは、ボルダー形成の原因となった衝突物の速度やクレータに対する位置関係、経過年数によって異なるため、地域によって差が大きい。したがって、クレータ同様付与したい地域における分布を推定するのが確実である。また、高精細化する DEM の範囲が広い場合、その領域内においてボルダー位置の分布に偏りが生じる可能性があることに留意する。

推定した分布に従って、クレータモデル付与後のベース DEM にボルダーモデルを付与する。付与範囲の最小二乗面とボルダーの短辺が直交するように三次元モデルを配置し、観測方向 (DEM の高さ方向) の変位を DEM の各ピクセル毎に求めることで DEM データを模擬する。

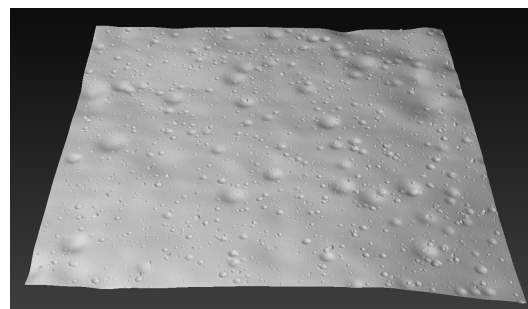
3. 高精細月面 DEM の作成と評価

2 章で述べた手法に基づいて、実際の月面 DEM を高精細化し、その評価を行う。高精細化の元となる DEM データは、NASA, LROC (Lunar Reconnaissance Orbiter Camera) で取得した輝度画像から生成された、神酒の海周辺地域 300 m 四方、解像度 0.9 m/pix ものをを用いる。この元データを図 5 に示す。

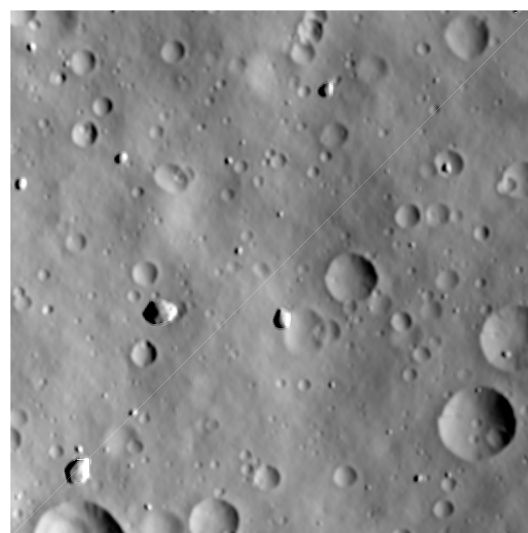
このデータに対して、0.05 m/pix の解像度までの高精細化を次の手順で行った。

1. 元データ周辺地域のクレータとボルダーの個数を数え、分布を求める。
2. 元データの各要素について等方性のフラクタル特徴 (H, σ^2) を求める。
3. 局所的にはフラクタル特徴が異なる事に注意し、各補間点毎に推定されたフラクタル特徴による、等方性の fBm で補間する。
4. 分布に従ってクレータを付与する。今回、劣化度合いは一様分布とした。
5. 分布に従ってボルダーを付与する。

DEM に陰影を施した全体画像と 25 m 四方の部分画像を図 6 に示す。また、比較のため嫦娥 3 号の着陸カ



(a) 全体陰影画像 (約 300 m, 6001 pix 四方)



(b) 部分陰影画像 (約 25 m, 512 pix 四方)

図 6: 高精細 DEM データ

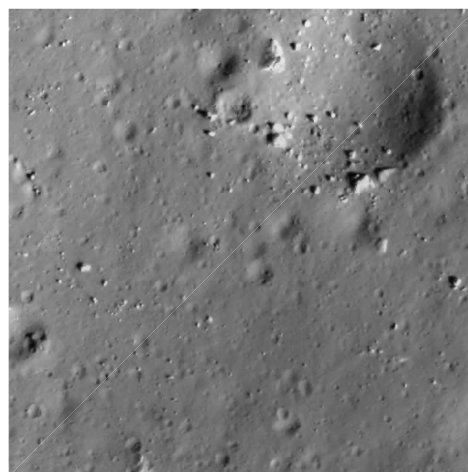
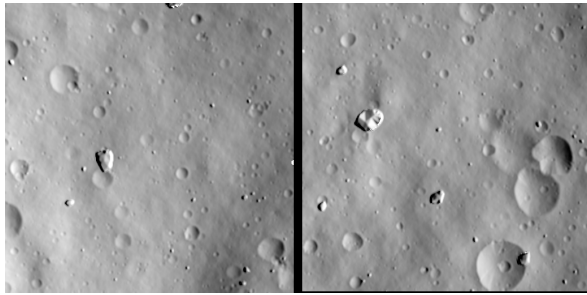


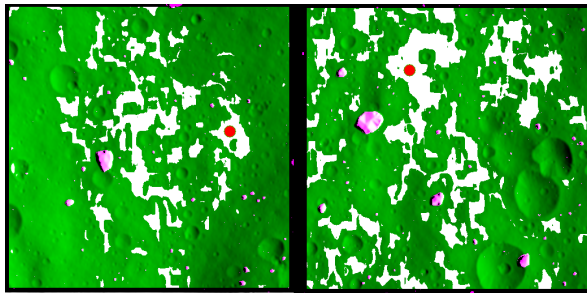
図 7: 月面実画像 (約 25 m 四方)

メラで撮影された、図 6(b) と同等の分解能を持つ月面実画像¹³⁾を図 7 に示す。これらを比較すると、大域的な地形特徴を保持しつつ、元データの 18 倍の分解能においても、小クレータやボルダー等の細かな月面地形の雰囲気が保たれていることがわかる。

続いて、画像を用いた障害物検知手法に対して、当



(a) 入力画像



(b) 検知結果
(赤丸: 着陸点, 白: 安全領域, ピンク: 障害物)

図 8: 障害物検知結果

手法で作成した DEM から生成した陰影画像が有用か確認した。ここでは、障害物検知・着陸点決定アルゴリズムとして画像の局所領域内の輝度値を評価する手法¹⁴⁾を用いた。この入力画像と障害物検知結果を図 8 に示す。入力画像領域は、元データで二十数 pix 四方であり、直接障害物検知評価を行うことは難しい領域である。障害物検知結果では、危険領域を緑色、安全領域を白色、着陸地点を赤丸で表示している。また、DEM を作成する際に取得した、真の障害物をピンク色で表している。したがって、輝度画像から肉眼で判別しづらい、数 pix 程度の障害物も検知しているか把握が可能であり、更に背景となる地形起伏は元データを反映しているため、定量的な障害物検知手法の評価に有効である。

4. 結言

本稿では、障害物検知手法の評価を目的とする、月面 DEM の高精細化について検討した。はじめに、元データにおける地形起伏のフラクタル特徴の推定法と fBm による補間法について示した。次に、月面の小さいシンプルなクレータについて、距離の関数として数学的に形状のモデル化を行い、劣化と形状の歪みの表現法、また一般的な個数分布について述べた。続いて、ボルダーの三次元モデルの作成法と分布について示した。最後に、実際に高精細化を行い、当手法の有効性を画像の様相と障害物検知手法を適用することで確かめた。

謝辞

当研究を進めるにあたり、画像を用いた障害物検知手法について御支援頂いた元首都大学東京・小島研究室の久我共生様には、この場をお借りして深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 澤井秀次郎, 福田盛介, 坂井真一郎 他: 小型月着陸実証機 SLIM のシステム設計, 航空宇宙技術, 17, 35-43, 2018.
- 2) Yoshikawa, S. and Nishiguchi, K.: Generation of Digital Elevation Map of the Moon from Observation Data Interpolated by Fractal Modeling, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers. 37, 3, 262-267, 2001.
- 3) Shankar, U., Shyong, W., Criss, T., and Adams, D.: Lunar Terrain Surface Modeling for the ALHAT Program, 2008 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, 1-10, 2008.
- 4) Martin, I., Parkes, S., and Dunstan, M.: Modeling Cratered Surfaces with Real and Synthetic Terrain for Testing Planetary Landers, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 50, 4, 2916-2928, 2014.
- 5) Mandelbrot, B.: The Fractal Geometry of Nature, WH Freeman & Co., 1982.
- 6) Melosh, H.: Impact Cratering - A Geologic Process, Oxford University Press, 1989.
- 7) McGetchin, T., Settle, M., and Head, J.: Radial Thickness Variation in Impact Crater Ejecta: Implications for Lunar Basin Deposits, Earth and Planetary Science Letters, 20, 2, 226-236, 1973.
- 8) Pike, R.: Size-dependence in The Shape of Fresh Impact Craters on The Moon, Impact and Explosion Cratering: Planetary and Terrestrial Implications, 489-509, 1977.
- 9) Gault, D.: Saturation and Equilibrium Conditions for Impact Cratering on the Lunar Surface: Criteria and Implications, Radio Science, 5, 2, 273-291, 1970.
- 10) Demidov, N. and Basilevsky, A.: Height-to-diameter Ratios of Moon Rocks from Analysis of Lunokhod-1 and -2 and Apollo 11-17 Panoramas and LROC NAC Images, Solar System Research, 48, 5, 324-329, 2014.
- 11) Fujiwara, A., Kamimoto, G., and Tsukamoto, A.: Expected Shape Distribution of Asteroids Obtained from Laboratory Impact Experiments, Nature, 272, 602-603, 1978.
- 12) Bart, G. and Melosh, H.: Distributions of Boulders Ejected from Lunar Craters, Icarus, 209, 2, 337-357, 2010.
- 13) 张洪华, 梁俊, 黄翔宇 他: 嫦娥三号自主避障软着陆控制技术, 中国科学: 技术科学, 44, 6, 559-568, 2014.
- 14) 久我共生, 小島広久, 福田盛介: 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, 日本航空宇宙学会論文集, 64, 6, 303-309, 2016.