

## 小規模天体の形状モデルにおける、不均一ポリゴン分割に係る一考察 A Study on Non-uniform Subdivision of Polygons in Shape Models of Small Celestial Objects

三浦 昭<sup>\*1</sup> 諸田 智克<sup>\*2</sup> 菊地 紘<sup>\*3</sup> 横田 康弘<sup>\*1</sup> 和田 浩二<sup>\*4</sup>  
Akira Miura Tomokatsu Morota Hiroshi Kikuchi Yasuhiro Yokota Koji Wada

### 1. はじめに

深宇宙探査における、各種模擬訓練等の一環として、筆者らは小規模天体の形状モデル生成について検討してきた。

天体の形状モデル生成にあたって、小規模のクレータやボルダ（岩石）等の特徴物を表現するに足る解像度を得るためには相応のポリゴン数を必要とする。その際、特徴物付近に絞って詳細なポリゴン分割をすることで全体的なポリゴン数の増大を抑えることが選択肢のひとつとなる。

一方で自然地形等の模擬手法のひとつである中点変位法やスムージング等の手法は、レンダリング時のポリゴンサイズと生成画像の解像度との関係によっては、適切な形状や質感を得ることが難しくなることがある。

本稿においては、上記のような不均一な分割を伴う形状モデル生成手法について述べると共に、レンダリングを含めた、当該手法の留意点等について述べる。

### 2. 研究の背景および事前検討

#### 2.1 所要解像度とモデル規模のトレードオフ

小規模天体全球をポリゴンモデルとして生成するとした場合、そこに存在する小規模のクレータやボルダ等の特徴を形状モデルに反映するためには、特徴のサイズよりも十分に小さなポリゴンを生成する必要がある。

例えば 10km 程度の規模の天体を想定し、これを均一に 1m 程度のサイズのポリゴンに分割するとした場合、20 億から 30 億ポリゴン程度が必要となる。これは近接撮像等を模擬するためには、決して十分な解像度とは言えない。

一方でポリゴンの細分化は、ポリゴンサイズの二乗に反比例してポリゴン数が増大するため、形状モデル生成に限らず、その後のレンダリング等への負担も大きくなる。

形状モデルの不均一な細分化は随所で実現されているところであり、特徴の乏しい領域の細分化を抑止することで全体的なポリゴン数低減に寄与することが期待される。

天体形状モデルを不均一に細分化する場合の課題と、それら課題に対処するために過去に考案した手法について、以下に述べる。本稿においては、これらの検討が終了している前提で議論を進める。

#### 2.2 解像度の相違に影響されない地形生成

自然地形の生成に用いられる手法の一つである中点変位法は筆者らも採用しているところであるが、この手法は疑似乱数系列を用いて地形を生成するため、僅かなポリゴン配置の変更であっても乱数系列に影響を与え、その後生成される形状が全く異なるものになる恐れがある。これは唯一の形状モデルを生成するのであれば問題にならないが、解像度の異なる複数の形状モデルを生成する場合には大きな問題となる。

また中点変位法やスムージングは、適用するポリゴンの形状の歪みや偏りが大きい場合、その歪みや偏りがあ

も地形の一部であるかのような形状を生成する場合がある。不均一な形状分割が随所で行われる場合、それらの偏り等が地形の偏りや歪等に影響しないように配慮した形状分割が必要となる。

筆者らは、ポリゴン分割の詳細度によらず矛盾のない形状モデルを生成するために、歪を生じにくい形状分割手法や、形状モデルを構成する個々の要素（頂点、辺、面）が解像度の異なるモデル間で同一であるか否かを弁別する ID 付与方法を考案した [1]。

#### 2.3 形状の規模によらない生成アルゴリズムの検討

クレータやボルダ等の形状生成に際して、基本的な生成アルゴリズムはその生成物のサイズに依存しない。一方で経年変化等を考慮する場合、大規模な形状では現実的な時間内に経年変化の模擬を完了することが困難であった。

筆者らは対象となる形状のサイズや経年変化に供するパラメータ等の比較検討を行い、経年変化模擬の高速化や係るポリゴン数の低減に寄与するアルゴリズムを考案した [2]。

### 3. 形状生成

前節の成果に鑑みつつ、本節では主要な形状生成の方針を述べる。

#### 3.1 特徴物を考慮した、形状の事前分割

本研究の手法は、中点変位法の適用を可能とするために、粗い形状モデルから、段階を追って詳細な形状モデルを生成する手順となっている。

詳細化の各段階では、配置すべき特徴物の影響を受けるポリゴン範囲を事前計算し、該当箇所に対する詳細化の仕様を決定する。特徴物生成の段階に至った時点で、当該物を生成するに足る詳細度のポリゴン群が配置されているようにするためである。また生成された特徴物に対しても、その特徴を表現するに足るだけの解像度に至るまでの間、詳細化を継続する。

一方、これらに該当しなかった領域は早い段階で詳細化が抑止され、粗いポリゴンで構成される、特徴の乏しい領域となる。

#### 3.2 ランダム形状生成の方針

本研究においては、形状変形の一過程に中点変位法やスムージングを取り入れたランダム形状生成を採用している。その一方で、前節に述べた、詳細化の過程で生成される特徴物は、自身の生成アルゴリズムにより頂点位置が変位する。これによりランダム形状生成に係る変位成分が相殺されないよう、特徴物生成アルゴリズムが適用される頂点位置とは独立にランダム形状生成に係るオフセット成分を保持するものとする。すなわち、最終的な形状モデルの頂点位置は、特徴物生成アルゴリズムに係る頂点位置と、ランダム形状生成に係るオフセット成分との和で表される。

#### 4. 実行例及び考察

図 1 以降に実行例を示す。これらは視認性向上のために輝度等を調整している。実際のシミュレーションでは、表面材質や各種物理的特性等を考慮したレンダリングとなる。

特徴物を考慮した、形状の事前分割例を図 1 に示す。小規模の構造が要求される領域について、事前に相応の形状分割を行ったものである。この例では、図中にある最大ポリゴンサイズは 1m 程度、最小ポリゴンサイズは 0.1m 程度となっている。

これにクレータ形状やランダム形状を付加した例を図 2 に示す。ランダム形状は、中点変位法やスムージングの組み合わせで計算されている。形状加工は予め分割されたポリゴンの頂点が基準になるので、領域によって形状の粗さは変化する。画像中央部分では、予め細分化された領域に 2 つの小規模クレータが重なるように生成されている。一方で画像左上隅の大きめのクレータは粗めの領域に生成されている。画像中の 2 つのボルダについても、それぞれの領域の詳細度は生成されるボルダの規模により異なる。

当該形状について、レンダリング時のスムージングを適用した例を図 3 および図 4 (広域) に示す。図 4 上部のボルダのように、レンダリング時のスムージングは対象の特徴物によっては質感を損なう場合もある。実際のシミュレーション時にはスムージングを適用する領域を適切に弁別する必要がある。

想定される質感(凹凸の程度)とポリゴンサイズに起因する質感に相違がある場合は、相応の考慮が必要になる。図 3 ではボルダの周辺に小規模の凹凸が生じている。ボルダ周辺で急激なポリゴンサイズが変化しないよう段階的にサイズ変更した影響もあり、周辺の小規模構造にランダムな変位が付加されているためである。このような凹凸が意図しないものであるならば、ランダム形状生成時に配慮する必要がある。逆に形状変化の乏しい領域に粗いポリゴンを割り当てていることで、粗いポリゴンの領域で期待される質感とレンダリング結果の質感に乖離があるようであれば、レンダリング時に中点変位法相当の表面材質を加えることによって、モデリング時に欠落した質感を再生する[3]ことも、今後の改良点として考えられる。

#### 5. おわりに

本稿では、小規模天体の形状モデルを現実的なポリゴン数で実現するにあたっての形状生成手法について述べた。この手法は、自然地形生成手法の一種である中点変位法との整合性や、特徴的な地形等の詳細を維持しつつ、形状生成のモデルサイズ軽減を実現するものである。

本稿で述べた手法は、宇宙探査分野にとどまらず、一般的な天体形状モデル生成にも寄与するものと期待される。

\*1 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所  
Institute of Space and Astronautical Science,  
Japan Aerospace Exploration Agency

\*2 東京大学大学院理学系研究科  
Graduate School of Science, The University of Tokyo

\*3 学習院大学理学部  
Faculty of Science, Gakushuin University

\*4 千葉工業大学惑星探査研究センター  
Planetary Exploration Research Center,  
Chiba Institute of Technology

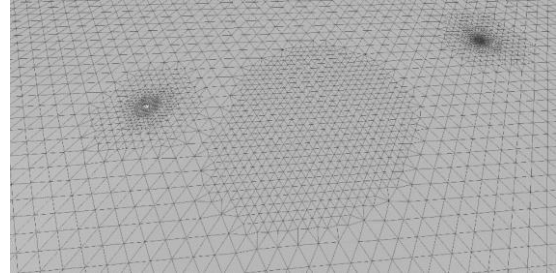


図 1 特徴物を考慮した、形状の事前分割例

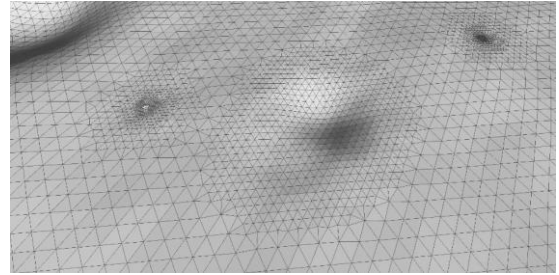


図 2 特徴物やランダムな地形の加工例



図 3 加工後の形状例

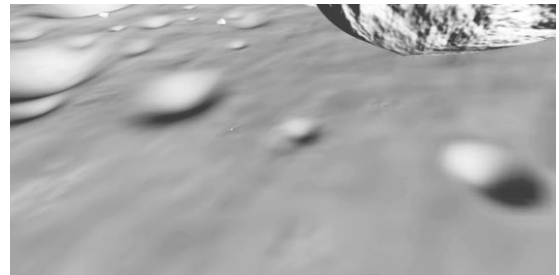


図 4 加工後の形状例 (広域)

#### 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP22K12340 により助成を受けた。

#### 参考文献

- [1] 三浦 昭, 諸田 智克, 菊地 紘, 和田 浩二, “自然地形の模擬に係る, 形状の構成要素に対するユニーク ID 付与方法”, 2023 年度宇宙科学情報解析シンポジウム, 2024.
- [2] 三浦 昭, 諸田 智克, 菊地 紘, 和田 浩二, “天体形状模擬効率化に係る局所地形の形状緩和に関する一考察”, 電子情報通信学会大会講演論文集, 2024
- [3] Akira Miura, Naoya Sakatani, Yasuhiro Yokota, et al., “Simulation of proximity imaging of Ryugu’s surface during Hayabusa2 touch-down sequence”, The 50th DPS meeting, 2018.