

ポリゴン形状モデルを基盤とした不規則形状小天体観測データ検索・解析システム

平田 成^{*1}, 川前 亘^{*2}, Dang Tuan Anh^{*2}, 北里 宏平^{*1}, 出村 裕英^{*1}, 浅田 智朗^{*3}

Archive and analysis system for observation data of irregular-shaped small bodies based on polygon shape models

Naru HIRATA^{*1}, Wataru KAWAMAE^{*2}, Dang Tuan Anh^{*2}, Kohei KITAZATO^{*1}
Hirohide DEMURA^{*1} and Noriaki ASADA^{*3}

Abstract

Archives and analysis tools of exploration data are important for scientific research in planetary sciences. Although geographic coordinate systems of planetary bodies are fundamental to construct such systems, a spherical coordinate system is failed on irregular-shaped small bodies. Here we propose a novel concept to manage coordinates on the surface of irregular-shaped small bodies with polygon shape models. With this concept, we develop a data archive system providing a location-oriented search function, and a 3D-geographical information system (3D-GIS) for small bodies. We also test a method to map polygon meshes on a sphere with the spherical parameterization technique to make mapping data independent from a specific polygon shape model.

Keywords: Asteroid, Exploration, Image, Database, Polygon model, GIS, Mapping

概 要

月惑星探査による研究において、観測データのアーカイブや、データ解析のためのツールの重要性は非常に大きい。しかしながら、小天体探査ミッションの場合は小天体の形状が非常に不規則であるため、アーカイブ・ツール開発において不可欠な地理座標の管理方法に問題が生じる。我々の研究グループでは、不規則形状を持つ小天体の観測データを取り扱うことに特化した、小天体専用のデータアーカイブと解析ツールを開発した。これらは、通常の地理座標表現に代わって、小天体形状のポリゴン形状モデルを基盤とした天体表面上での位置情報の定義、管理手法を採用することで不規則形状を持つ小天体においても位置情報の一意な処理を可能としている。位置指向検索が可能な小惑星探査データベースシステムと不規則形状小天体向け三次元 GIS はほぼ実用段階にある。また、球面パラメータ化を利用した、ポリゴン形状モデルに非依存な位置情報管理手法の開発も進めている。

1. はじめに

近年、日本の「はやぶさ」をはじめとして多くの探査機が小惑星、彗星などの太陽系小天体に送り込まれ、多くのデータが取得されている。小天体は大きな惑星や衛星では失われている太陽系形成当時の物質科学的な情報や、その後の天体の衝突過程や軌道進化の履歴もよく保存されていると考えられており、重要な探査対象である。

探査機観測データの解析は、ミッションが終了したあとも継続することが多い。このような継続的な研究の基盤とし

¹ 会津大学 コンピュータ理工学部 / 宇宙情報科学研究クラスター (ARC-Space, CAIST, The University of Aizu)

² 会津大学大学院 コンピュータ理工学研究科 (Graduate School of Computer Science and Engineering, The University of Aizu)

³ 会津大学 コンピュータ理工学部 (Department of Computer Science and Engineering The University of Aizu)

て、観測データのアーカイブや、データ解析のためのツールが重要となる。NASA の Planetary Data System (PDS)、ESA の Planetary Science Archive (PSA) は月惑星探査ミッションデータアーカイブの代表例である。我が国においても、「はやぶさ」、「かぐや」の観測データはアーカイブされ、コミュニティ向けに公開されている。さらに、International Planetary Data Alliance (IPDA) では各国のデータアーカイブの標準化に取り組んでいる。探査データ専門の解析ツールは ISIS など限られた例しかないものの、輝度校正や幾何補正などの低次処理が完了した画像データであれば、汎用の画像処理ソフトや地球のリモートセンシングデータ向けの解析ソフトを用いて解析を行なうことができる。

しかし、小天体探査ミッションについてデータアーカイブや解析ツールを準備する場合、小天体は非常に不規則な形状を持っている場合があるため、球体ないしは回転楕円体形状の天体向けに開発された既存のデータアーカイブ構築スキームや解析ソフトをそのまま適用したのでは不都合が生じる場合がある。

我々の研究グループでは、不規則形状を持つ小天体の観測データを取り扱うため、まず小天体形状のポリゴン形状モデルを基盤とした天体表面上での位置情報の定義、管理手法を構築した。また、この手法を基盤とした小天体専用のデータアーカイブと解析ツールの開発に取り組んでいる。本論文ではまず、基盤技術である小天体表面上での位置情報定義、管理手法について説明したのち、個別のソフトウェアシステムの開発成果について紹介する。

2. 不規則形状小天体における地理座標表現の問題

天体のリモートセンシングデータのアーカイブと解析にあたって、地理座標は最も重要な情報の一つである。アーカイブからのデータ検索では、地理座標に基づく位置情報は検索キーとしてよく使われる。また、複数のデータを統合して解析する場合も、位置情報を基準としてデータ統合を行ない、データの比較などを行なうことになる。このため、アーカイブされている観測データにはメタデータとして観測領域を示す地理座標（視野中心の座標や、矩形視野のデータの場合は四隅の座標など）や、地図投影情報をメタデータとして付加されている。

地球の形状は回転楕円体で近似できるため、表面上の地物の地理的な位置は重心を原点とした天体固定座標系に基づいて、球面座標（緯度、経度）で表現される。大きな惑星や衛星も形状が球体または回転楕円体で近似できるので、地球の場合と同様に地理座標を表現できる。従って、データアーカイブを構築する際にも地球と同様のスキームを適用することができるし、データ処理も（天体サイズの違いを取り扱うことができれば）地球向けのソフトを転用することができる。

しかしながら、球体や回転楕円体からはかけ離れた不規則な形状を持つ小天体において、上記のような地理座標表現を用いて位置情報を表現するのは問題がある。例えば、イトカワのように大きくくびれた部分を持つ天体の場合、重心を原点とするベクトルを考えると、一旦小惑星表面と交わって小惑星の外に出た後、再び小惑星表面に遭遇する可能性がある（図 1）。このような場合、球面座標系の定義上同じ経緯度を持つ小惑星上の地点が複数存在することになるため、経緯度表現による地理座標系の定義では、位置表現の一意性が成り立たなくなる。

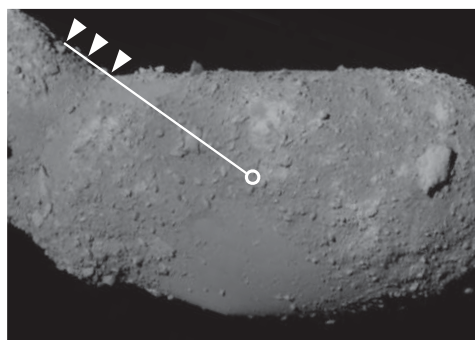


図 1 不規則形状小天体における緯度経度による位置座標表現の問題。原点（重心）から伸びるベクトルが小天体表面と複数回交差する場合、同一の経緯度を持つ地点が複数存在することになる。

3. ポリゴン形状モデルによる不規則形状小天体表面の位置表現

不規則形状をもつ小天体の形状は、多数の多角形（通常は三角形）によって構成されるポリゴンモデルによって表現することができる。イトカワの場合、最も詳細な形状モデルは三百万枚以上のポリゴンからなる¹⁾。ポリゴンモデルにおいて、各ポリゴンには暗黙または明示的に一意な ID（ポリゴン ID）が付与されている。このとき、各ポリゴンは、小惑星表面で

特定の位置を占めているので、ポリゴン ID は、形状モデル（小惑星）表面上の特定の位置を示すユニークキーとして用いることができる。本論文で紹介する各種データシステムの基本コンセプトは、不規則形状小天体の表面上の位置を、当該位置を占めるポリゴンの ID によって表現するという点にある。ポリゴンの頂点位置は、天体重心を原点とする天体固定座標系で記述されているため、ポリゴン ID が指定されればモデル上での位置を知ることが容易であるし、逆の操作も同様である。ただし、経緯度による地理座標の表現は連続的であり、天体表面の任意の位置を示すことが可能であるが、ポリゴン ID による位置表現は離散的であり、分解能はポリゴンのサイズに依存するという違いがある。

4. 位置指向検索が可能な小惑星探査データベースの開発

2章で述べた通り、位置情報をキーとした位置指向検索は、簡潔な方法データの取捨選択、絞り込みの手段として重要であり、多くの探査データアーカイブでこの機能が実装されている。しかし、不規則形状小天体表面の位置表現方法が確立していないため、「はやぶさ」、「NEAR Shoemaker」などの小天体探査機のデータアーカイブでは位置指向検索機能は提供されていない。我々の研究グループでは、先に述べた形状モデルとポリゴン ID による不規則形状小天体表面の位置表現のコンセプトに基づき、「はやぶさ」搭載カメラ AMICA の画像データを格納した、位置指向検索が可能なデータベースを開発した²⁾。

4.1 データベース構造とユーザインタフェース

我々の開発した画像データベースでは、画像視野内に含まれている小惑星表面のカバレッジをポリゴン ID のリストとして表現する（図2）。ユーザが小惑星表面の特定の領域を指定したら、まずその領域に含まれるポリゴン ID を調べ、さらにそのポリゴン ID を撮像対象に含む画像を検索することで、位置指向検索を実現できる。

通常のデータアーカイブにおける標準的なユーザインタフェース（I/F）として、天体の基本地図（ベースマップ）上で直接位置指定を行うグラフィカルな I/F がある。ベースマップには天体表面の地形画像などが用いられ、ユーザが直感的に天体表面の興味ある地域を選択することができる。これに対して本システムでは、検索対象とする小惑星表面の指定を行う I/F として、CG 表現した形状モデルそのものを採用することとした。CG 表現された小惑星の形状モデルでは、小惑星の形状そのものが地域選択の鍵となるため、ベースマップに相当する画像データがない状態でも問題はない。ベースマップ表示領域のズームイン/アウト、スクロールに相当する操作として、表示のズームイン/アウト、形状モデルの回転を行うことができる。ユーザは CG の形状モデル上をクリックすることで任意のポリゴン一つずつを選択することもできるほか、領域指定によって複数のポリゴンを一括して選択することもできる。

DB table

#	File name	Polygon IDs within the field of view
1	ST_I2345678_v.fits	1, 20, 21, 100, 134, 230...
2	ST_I2500000_v.fits	21, 400, 578, 800...
3	ST_I5999999_v.fits	15, 18, 37, 578, 699...

Image



Polygon model



File name: ST_I5999999_v.fits Polygons in FOV: 15, 18, 37, 578, 699...

図2 画像データベースの構造を示す模式図。DBには画像ファイル名と、その画像の視野内に写っている小惑星表面のカバレッジが、視野内のポリゴンのリストとして保持されている。

4.2 実装例と課題

図3に開発したシステムの画面スナップショットを示す。システムの多くの部分はJavaを使って開発された。検索機能のI/FはJava アプレットによるウェブシステムとして提供される。CG表示は3D グラフィックスライブラリのOpenGLのJava バインディングであるJOGLを用いて実装されている。データベース自体もJavaで作成されたHyperSQL Database Engine (HSQLDB)を用いている。

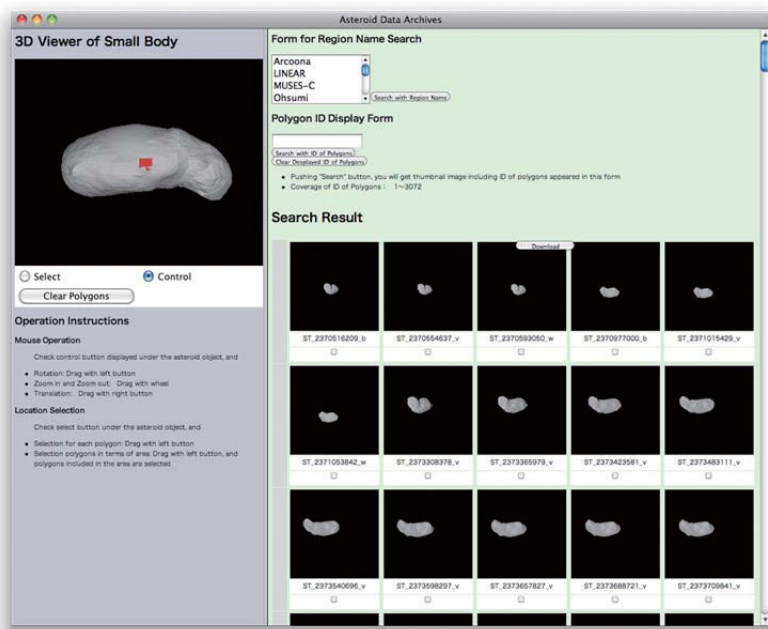


図3 小惑星探査データベースの画面スナップショット。左上にCG表現された小惑星の形状モデルが表示されている。赤く表示されているポリゴンは、この地域をユーザが選択したことを示す。ユーザが選択した地域を視野内に含む画像のサムネイルが検索結果として画面右側に表示されている。画面右上にリスト表示されているのは地名検索用のI/Fである。

画面左半分には形状モデルCGによる地域選択I/Fが配置され、右半分には検索結果画面がある。検索結果画面には、検索にヒットした画像のサムネイルが表示され、ここから実際の観測データをダウンロードできるよう設計されている。

本システムでは、前節で述べたポリゴン選択による位置指定機能のほかに、小惑星表面の地形に付与された地名による検索の機能も実装されている。地名検索のためには地名を持つ地形のカバレッジ情報もデータベース化する必要がある。本来、地名とそのカバレッジ情報のテーブルを独立して保持しておけば、画像データベーステーブルと連携させて、地名を選んだらその地形を含む画像を検索することが可能となる。しかし、本システムでは検索高速化のため、あらかじめ画像DBテーブル中に画像ごとに画像視野内に含まれる地名付き地形情報を保持する設計としている。

本システムのDBに格納されている画像ごとのポリゴンカバレッジ情報は、「はやぶさ」探査機のアンシラリー情報から計算されている。「はやぶさ」のアンシラリー、特に軌道情報はタッチダウンシーケンスやそれ以前のリハーサル運用中、探査機が小惑星に非常に接近している期間の精度が不十分であるため、この期間に撮影されたカメラ視野から小惑星像がはみ出て撮像されるクローズアップ画像については実際のカバレッジを正しく知ることができない。このような場合には機械的なカバレッジ計算に何らかの補正を行う必要がある。全ての観測データを格納した可用性の高いアーカイブシステムの実用化のためには、今後カバレッジ情報の補正方法を確立させる必要がある。

5. 不規則形状小天体向け三次元GISの開発

5.1 GISと惑星科学

地理情報システム (Geographic Information System: GIS) とは、計算機上に地図データや関連する情報をおき、これらを共通的な空間座標系 (地理座標系) のもとで整理・統合された形で可視化、あるいは解析を行うことが可能な情報システムである。Google Earth (<http://earth.google.com/>) や Google Maps (<http://maps.google.co.jp>) などの一般にも知名度のある地図ソフトウェアやWebサービスも、GISの一種といえる。

GIS の基本は、データを「共通的な空間座標系（地理座標系）のもとで整理・統合」という点にある。したがって、「共通な座標系」が定義できるならば地球以外の天体でも GIS を構築できる。米地質調査所（USGS）の惑星地質研究部門では、月や火星をはじめとした惑星・衛星の探査データを Web ブラウザの中で動作する WebGIS に載せて公開している。また、先に挙げた Google Earth や Google Maps などの一般向けソフトウェアでも月・火星のデータレイヤーが搭載され、月惑星探査活動の成果を示すアウトリーチ活動の重要なツールとして活かされているほか、プロの研究者が行なう解析でも簡単かつ利便性の高いツールとして幅広く利用されている。

5.2 不規則形状小天体向け三次元 GIS

不規則形状を持つ小天体においても、GIS の概念は有効である。イトカワの場合、画像などの直接観測データのほか、近赤外線分光計では観測データをコンパイルした反射率マップが作成されている。また、重力場マップや表面の斜度マップなど、形状モデルから導出される種々のデータが存在している。これらの情報を GIS 上で比較検討できれば、小惑星探査データの解析と、その結果に基づく科学的議論はより深くなることが期待される。そのような解析環境をコミュニティに提供することを目指して、我々の研究グループでは、不規則形状小天体向け三次元 GIS（3D-GIS）の開発に取り組んでいる（図 4）³⁻⁴⁾。

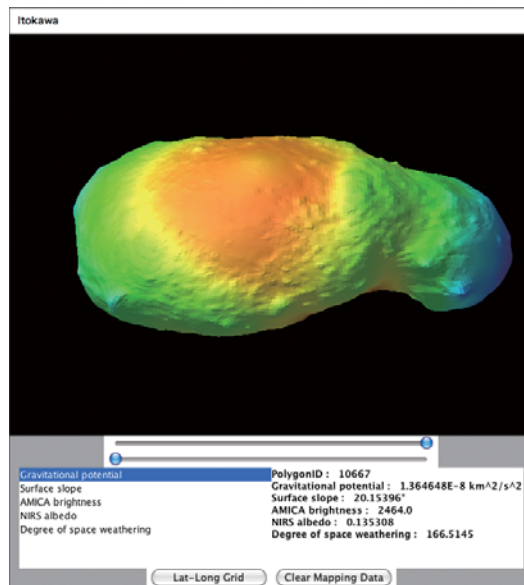


図 4 不規則形状小天体向け 3D-GIS の画面スナップショット。小惑星イトカワの形状モデル上に、表面での重力ポテンシャルマップが表示されている。画面下部左側には表示マップの切り替え I/F があり、画面下部右側には、着目しているポリゴンにおける各マップの情報値がリスト表示されている。

本システムも、形状モデルとポリゴン ID による不規則形状小天体表面の位置表現のコンセプトに基づいている。前章でも述べた通り、小惑星の形状モデルの 3D CG 表現は、小惑星の特徴的な形状そのものが空間的位置関係の把握を容易にするため、直感的にわかりやすいユーザインタフェースとなる。この 3D CG 表現に各種データの可視化機能を付け加えることで、不規則形状小天体向け GIS を構築することができる。上に挙げた各種のマップデータは、形状モデルのポリゴン一枚一枚に対して紐付けされた形で反射スペクトルや重力、斜度などのスカラー量の情報が保存されている。スカラー量の大小を、カラーテーブルを介して決定されたポリゴンの表示色に対応させ、可視化するのがこの 3D-GIS の基本的な機能である。また、前記データベースシステムのグラフィカル I/F と同様に、表示のズームイン/アウト、ポリゴンモデルの回転を行うことができる。カラーテーブル調整用のスライダーや、表示マップの切り替えのためのインタフェースは、画面下部に用意されている。同時に複数のマップを閲覧することは不可能であるものの、各マップの情報値は、画面クリックでポリゴンを選択することで参照できる。

本システムは当初スタンドアローンのアプリケーションソフトとして開発された³⁾。ユーザインタフェースライブラリとして GTK+ を、3D グラフィックスライブラリとして OpenGL を用いているため、MS-Windows, MacOSX を含む複数の OS 環境で動作可能なマルチプラットフォーム性を実現できていたが、パッケージ化を行っていなかったため、コンパイルとインストールの手順が複雑になるという問題点を持っていた。このため、2010 年度にシステムを Java アプレットの Web アプ

りに移植することで、インストール作業なしに簡単に使用できるようになった⁴⁾。また、Vertex Buffer Object (VBO) と呼ばれる技術を用いて OpenGL によるレンダリング手法に改善を加え、動作の高速化を図っている。VBO を採用したことによる描画性能の向上はフレームレート値で 10 倍程度であった。

現状のシステムは、データの閲覧機能に主眼をおいて開発されている。本格的な解析作業のためにはデータの編集機能の追加が必要である。地球の GIS においても地図編集機能は重要な機能とされており、今後の課題である。また、類似・競合するプロジェクトとして、米 APL で開発中の Small Body Mapping Tool (SBMT) がある。SBMT は 3D-GIS 的なデータ可視化機能のほかに、観測データのアーカイブからの取得機能も備えている⁵⁾。

6. 球面パラメータ化によるポリゴン形状モデル非依存のマッピングデータ作製

ここまで議論してきた通り、ポリゴン形状モデルによる不規則形状小天体表面の位置表現は、小天体探査データのハンドリングにおいて非常に有用である。しかし、ポリゴン形状モデルに完全に依存した設計のため、以下のような問題点がある。まず、位置情報とマップデータの解像度がポリゴンサイズに依存する点である。形状モデルの解像度を上げればこの問題は解決できるが、データ全体が形状モデルに依存しているため、形状モデルを入れ替えた場合は全ての情報を新しいモデル用に再度準備する必要がある。ポリゴン内の平面座標系（重心座標系）を定義することで、ポリゴンサイズより小さい実数表現可能な位置座標を定義することも可能である。三次元 CG ではテクスチャマッピングをこの概念で取り扱っているが、3D-GIS において多種多様なマッピングデータをこの手法で準備するのは複雑となる。また、ポリゴン形状モデルに依存している点に変わりはないため、例えば一つの天体に複数の形状モデルが存在する場合は、やはりモデルごとに異なるマッピングデータを準備する必要がある。

ポリゴン形状モデルに依存しない位置座標表現方法とそれに基づくマッピングデータ作製手法として、我々研究グループは球面パラメータ化によるポリゴンメッシュの球体化のアイデアを提案し、実装を試みている。小惑星形状をモデル化したポリゴンモデルは球面と同じトポロジーを持つ閉曲面である。従って、ポリゴン形状モデルと球面の相互変換を行うことができれば、ポリゴンのメッシュを球面に投影したのち、正距円筒図法などの一般の地図投影手法を用いてメッシュを矩形平面に展開することができる。展開した平面メッシュ上でマップデータを準備すれば、上記の手順を逆に辿り、テクスチャマッピングの手法を用いることで、ポリゴン形状モデル上に任意の解像度のマップデータを重ねることができる。球面パラメータ化は Gostman (2003)⁶⁾ によって定式化されたのち、Saba (2005)⁷⁾ によって実用的な手順が実装された。

我々の研究グループでは、Saba (2005) の方法によって小惑星イトカワの形状モデルを球面に変換し、三次元のポリゴンメッシュを平面メッシュに投影することを試みた。図 5 にその結果を示す。イトカワの形状モデルには源泉の高解像度モデルから派生させて作成された複数の低解像度モデルが存在する。本実験では一つのマッピングデータを解像度の異なる形状モデルに適用した際に位置のずれなどが生じるかどうかを確認した。その結果、図 6 に示す通り目視レベルでは全ての形状モデルで同じ位置にマッピングデータを対応させることができた。

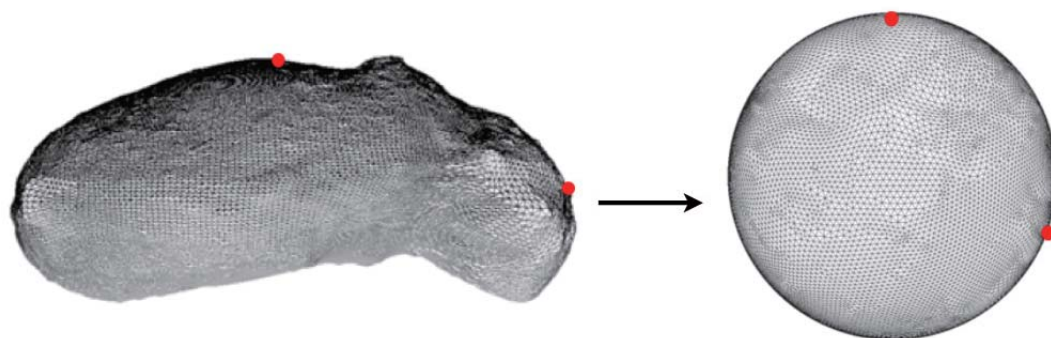


図5 球面パラメータ化による小惑星イトカワ形状モデル（左）の球面への変換結果（右）。図中の赤い点是小惑星の北極と緯度 0°、経度 0°の地点を示す。球面上にマッピングされたメッシュは元の形状モデルでの幾何学的配置を保存している。

現在のところ、この研究プロジェクトは、基本的な概念に問題がないことの確認を完了した段階に留まっており、実用的なソフトウェアへの実装には到っていない。今後変換の手順を洗練させ、3D-GIS に組み込むとともに、データフォーマットの標準化の検討も進める予定である。

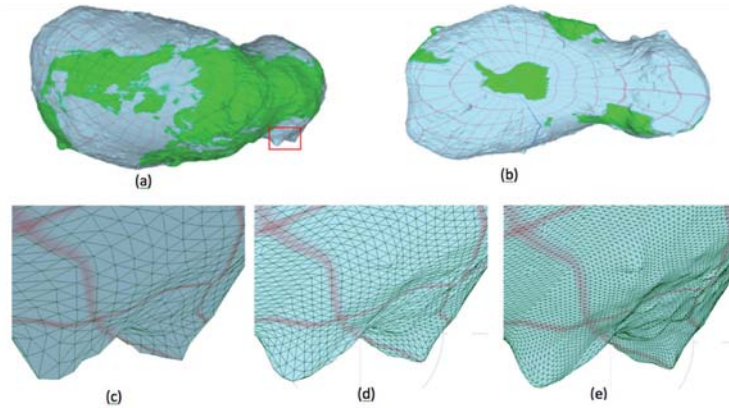


図6 小惑星イトカワの形状モデル上に、地球地図をテクスチャとしてマッピングした結果 (a), (b). 地球地図は図5で球面に変換されたポリゴンメッシュをさらに平面展開した上にマッピングされ、元の形状モデルに戻してある。(c)は(a)の赤い矩形の部分を拡大したもの。(d)および(e)は解像度の異なる形状モデルにマッピングした結果を同じ領域についてみたもの。解像度の異なるモデルでもほぼ同様にマッピングが行なわれている。

7. まとめ

ポリゴン形状モデルを基盤とした不規則形状小天体表面の位置表現手法を用いて、小天体の観測データを取り扱うことに特化した、データアーカイブシステムと解析ツールの開発について、現状を紹介した。位置指向検索が可能な小惑星探査データベースシステムはほぼ実用段階にあり、不規則形状小天体向け三次元GISも機能に不十分な点はあるものの、研究者の利用に供することが可能となっている。今後は各システム・ツールの機能強化を図るとともに、IPDAなどにおいて進んでいるデータアーカイブ・フォーマットの標準化の成果を取り込むことが望ましい。また、ポリゴン形状モデルに非依存なデータ構造の開発も進めてより汎用的なデータシステムの構築を目指す予定である。

付記

本論文で記述された内容のうち、3D-GISの開発に関わる成果は会津大学コンピュータ理工学部卒業生の長屋祐希氏、上甲祐己氏、田山拓人氏の卒業研究と、大学院コンピュータ理工学研究科卒業生の藤井良明氏の修士研究の成果を含んでいる。

参考文献

- 1) Gaskell, R. et al. Landmark Navigation Studies and Target Characterization in the Hayabusa Encounter with Itokawa. AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference 2006-6660 (2006).
- 2) Kawamae, W. et al. Development of 3D Web-based Data Archive for Hayabusa Mission Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts. Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts 41, 1687 (2010).
- 3) Hirata, N. et al. A GIS-Oriented Analysis Tool for Irregular Shaped Bodies. Lunar and Planetary Institute Conference Abstracts 39, 1584 (2008).
- 4) Nagaya, Y. Development of a 3D-GIS web application for irregular-shaped asteroids, the University of Aizu Graduation Thesis, (2011).
- 5) Kahn, E. G. et al. A Tool for the Visualization of Small Body Data. Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts 42, 1618 (2011).
- 6) Gotsman, C. Fundamentals of Spherical Parameterization for 3D Meshes, ACM Transactions on Graphics, vol. 22, no. 3, (2003).
- 7) Saba, S. Practical Spherical Embedding of Manifold Triangle Meshes, in International Conference on Shape Modeling and Applications, (2005).