

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330423

研究課題名(和文) 宇宙科学データのインタラクティブ3D映像化ツールの開発

研究課題名(英文) Development of Interactive 3D Visualization Tools for Space Science Data

研究代表者

三浦 昭 (Miura, Akira)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：40280557

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙科学データを取り扱う、インタラクティブ3D映像化ソフトウェアを、補助的なツールやライブラリと共に開発した。係るソフトウェアは、GPUによるリアルタイムレイトレーシングや、宇宙科学データの読み込み、CGソフトウェア形式の読み書き、宇宙科学固有の材質表現等、宇宙科学データを取り扱う機能を備えている。補助的なツールは、大規模ポリゴンの形状も描画可能なサーバ向けプログラムや、3D CGソフトウェアとの共同作業を支援する機能、モバイルや仮想現実を含んだリアルタイムレンダリングの統合開発環境への応用等が挙げられる。ライブラリは、多様なプラットフォームへの展開を見込んで、CやC++を用いて開発した。

研究成果の概要(英文)： Interactive software for three-dimensional (3D) visualization of space science data is developed together with complementary tools and libraries. The software involves several features for visualizing space science data, such as real time ray tracing accelerated by graphics processing units (GPU), capability of reading files in formats of space science data as well as reading and writing files in a format of 3D computer graphics (CG) software, and functions to render materials with features specific to space science.

Complementary tools are as follows; server-side software that is capable of rendering objects with vast number of polygons, functions that enable co-operation with commonly used 3D CG software, application of integrated development environment (IDE) for real time rendering including mobile environment and virtual reality environment, and so forth.

Libraries in this study is developed using C and C++ so that they be used on a variety of platforms.

研究分野：宇宙科学データ可視化

キーワード：3D可視化 宇宙科学

1. 研究開始当初の背景

(1) データ利用

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所 (ISAS) では、従来から科学衛星や探査機が生み出す世界最高水準の宇宙科学データを蓄積し、宇宙科学データアーカイブ DARTS (Data ARchives and Transmission System) として公開してきた。これらのデータからは非常に多くの成果が得られており、今後もアーカイブの利用価値は高い。そのようなデータの中には、理学データの他に、探査機や科学衛星の位置・姿勢データ等の工学データも含まれている。

これら宇宙科学データの中で、天文系のデータは比較的可視化される機会が多く、一般の目にとまることも多いが、他のデータ、特に工学系のデータについては、その分野に通じた者以外が係るデータを可視化することは、必ずしも容易ではない。

(2) 宇宙科学データの可視化に係る課題

宇宙科学データは一般に、研究者向けの特殊なフォーマットで提供されているため、一般のフォトタッチソフトや CG ソフト等でデータを取り込むことは困難である。

天文観測データの場合、その単体もしくは少数のデータを表示することは、専門家でなくとも、比較的容易に実現できるツールが提供されている。しかしながら、観測データを繋ぎ合わせて全天球上にマップするには、相応の専門知識が必要となる。

工学系のデータを可視化するためには、必ずしも簡便なツールは提供されておらず、相応の専門的知識が必要となる。また広く一般に訴求するような可視化のためには、単に軌道や姿勢をグラフにするのみならず、天体や探査機等を含めた、リアリティの高い可視化が重要となる。すなわち、特殊フォーマットのデータを一般の CG ソフトウェアが解釈できる形式に変換するための知識・技術と共に、変換されたデータを取り扱う 3D CG の知識・技術が併せて要求されることとなる。

(3) 可視化の精度とインタラクティブ性

精度の高い可視化のためには、レイトレーシング等の高精度の手法が必要となる。レイトレーシングを基本とした 3D CG ソフトウェアを用いた可視化はリアリティの高い映像を制作でき、広報・アウトリーチ等の映像製作の観点では有用である。その反面、インタラクティブな用途では、レンダリングに時間を要する手法を活用することは困難である。そのような用途では、精度の高い高速レンダリング手法を検討する必要がある。

精度が高く、かつインタラクティブ性の高いツールは、広報・アウトリーチの観点にとどまらず、科学衛星・探査機の運用やミッション計画段階にあっても、有用な補助ツールとして想定されうるものである。

2. 研究の目的

本課題においては、教育・広報・アウトリーチ活動や、運用現場レベルの補助ツールとしても活用可能な、宇宙科学データのインタラクティブ 3D 可視化ツールを構築することを目指す。係るツールの構築にあたっては、以下のようなサブゴールが想定される。サブゴールの各々は、宇宙科学データの可視化にとって有用な要素となっている。

- ・ 宇宙科学データの可視化に適した、高速・高精度のレンダリング手法
- ・ モバイル環境等、端末の能力を超えるような、大規模データの可視化
- ・ 宇宙科学データ固有の表現手法の実現
- ・ 汎用 CG ソフトウェア等、他ソフトウェア等との連携
- ・ 多様なプラットフォーム、多様な用途で共有可能なライブラリ構成
- ・ モバイル環境、VR 等の活用
- ・ 簡便なユーザインタフェース
- ・ インストールの簡便性
- ・ 広報・アウトリーチ活動等への応用

3. 研究の方法

(1) 概要

次節以降の要素技術等に留意しつつ、まず据置型 PC を前提として、平面ディスプレイで宇宙科学データを可視化するアプリケーションを検討する。続いて可搬型の環境・ステレオ視・ヘッドマウントディスプレイ (HMD) 等を見通した検討を行う。

(2) レンダリング手法

宇宙科学データの可視化にあたっては、高精度のレンダリングが要求される場合が想定される。このような要求に対して、高速かつ高精度のレンダリング手法の実現を目指すと共に、インタラクティブ性とレンダリング品質のトレードオフを行う。

(3) 大規模データの可視化

高負荷の可視化は、一般的な PC の性能限界を超える場合もある。そのような用途も想定し、大規模サーバがデータ処理を補助し、クライアント側の負荷を軽減するような、クライアント・サーバ型のデータ処理を検討する。

(4) 宇宙科学データ固有の表現手法

宇宙科学データを可視化するにあたって、一般の CG ソフトウェアで実装されていないような、宇宙科学固有の表現機能を実装する。

(5) 他ソフトウェア等との連携

汎用 CG ソフトウェアで実現できる機能は、必ずしも本課題の範囲で構築する必要はない。むしろ関連するソフトウェアとのデータ互換性を実現し、多分野の可視化を支援する。

専用フォーマットの宇宙科学データを解釈

して 3D CG ソフトで読み取り可能なファイル形式に変換する、あるいは逆に 3DCG ソフトのデータ形式を読み取る等の、補助的機能を検討する。

(6) ライブラリの共有化

研究者向けのツール（アプリケーションやライブラリ類）は専門的な科学データを取り扱うことができる反面、その取り扱いには相応の専門知識が必要となる。そのような専門的なツールを意識せずともデータを取り扱えるような機能を構築する。

個々の要素機能は、本課題の可視化ツールのみならず、様々な用途への応用が可能と考えられる。将来の応用のために、共通機能をライブラリ化し、様々なプラットフォームで共有できるようにすることを目指す。

(7) モバイル環境、VR 等の活用

さらなるリアリティ実現のために、移動型の展示や、ステレオ視・HMD 等の技術を用いたアプリケーションを検討する。

(8) ユーザインタフェース

マウスやキーボード操作以外にも、インタラクティブ性の向上に寄与するようなユーザインタフェースについて検討する。

(9) インストールの簡便性

専門的機能を持つアプリケーションは、その機能に依存するパッケージを別途インストールする等の煩雑な作業を伴うことがある。本課題で構築するアプリケーションについては、インストール作業の簡便化も検討課題に含める。

(10) 広報・アウトリーチ活動等への応用

広報・アウトリーチ活動への展開を検討する。アプリケーションの展示等の他に、全天周ドーム向けの映像製作等を検討する。

4. 研究成果

(1) GUI ベースのアプリケーション構築

衛星等の位置・姿勢データ等を 3D 空間に可視化する、インタラクティブ可視化ツールのプロトタイプを作成した。実行例を図 1 に示す。現時点で位置・姿勢データは SPICE カーネルの他に、フリーの 3DCG ソフトである POV-Ray と互換のカスタムフォーマットや、軌道要素等の読み込みに対応しており、公開されている「はやぶさ」や小惑星イトカワ等の位置・姿勢データを用いて、その妥当性を検証した。また位置推定等の基本的なライブラリを作成し、可視化ツールと連動して位置推定が可能であることを確認した。これらの推定データは、POV-Ray 対応のフォーマットで書き出す仕様としており、高品質のレイトレーシングを用いた映像製作に供することも可能となっている。

X 線天文や太陽地球物理関連の衛星データについても、専門のツールに依存しない、簡

易のデータ処理用ライブラリを保守し、3次元空間に描画可能であることを確認した。

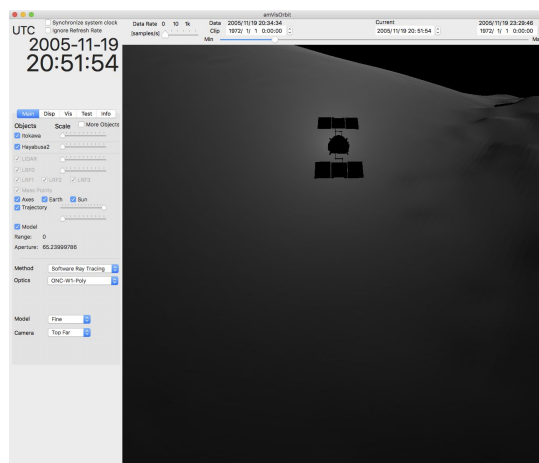


図 1 GUI ベースアプリケーション例

(2) レンダリング手法:

宇宙探査データのシミュレーションに耐えられる、高品質なレンダリング手法として、レイトレーシングを主軸とした各手法について比較検討した。比較対象の手法は、以下の通りである。

- OpenGL を用いた高速レンダリング
- Shading
- Shadow Mapping
- OpenCL を用いたレイトレーシング
- CPU を用いたレイトレーシング
- OpenGL による形状レンダリングと OpenCL による影のレイトレーシングの組み合わせ (Hybrid Method)

以上の各手法について、レンダリング用ライブラリを構築し、比較評価を行った。評価に用いた環境を表 1 に示す。評価結果を図 2、図 3 に示す。いずれも、約 5 万、20 万、80 万、300 万ポリゴンの形状モデルを 1 フレーム分計算する時間をグラフにしたものである。

レンダリングに要する時間は、モデルの形状や撮影条件等の様々な要因で変化するため、一概には言えないが、環境 1 においては、OpenCL を用いたレイトレーシングが、300 万ポリゴン程度の形状モデルにおいても、リアルタイムレンダリングに耐えうる性能であることが示唆された。環境 2 はモバイル環境であるが、CPU 内蔵の GPU を用いて、限られた条件下ではリアルタイムレイトレーシングが可能であることが示唆された。また両者において、Hybrid Method がリアルタイムレンダリングに耐えうる速度であることが示唆された。

Shadow Mapping や Shading は高速ではあるが影の描写が不十分であるため、宇宙科学データのレンダリングに用いる際には注意を要する。

表 1 性能評価に用いた環境

環境	環境 1	環境 2
種別	デスクトップ	モバイル
CPU	Xeon E5 3.5GHz	Core i7 2.8GHz
コア数	6	4
GPU	AMD FirePro D700	Intel Iris Pro 5200 NVIDIA GeForce GT750M
主記憶	64GB	16GB
出力	1024 x 1024	1024 x 1024

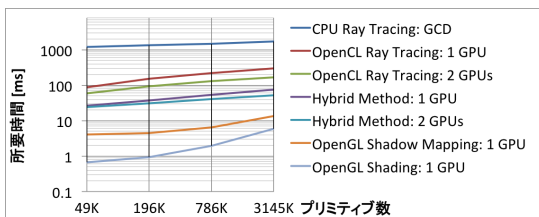


図 2 環境 1 の評価結果例

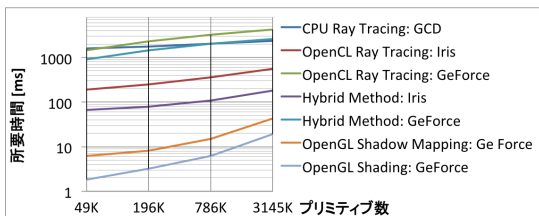


図 3 環境 2 の評価結果例

(3) 大規模データの可視化

CPU を用いたレイトレーシングは必ずしもリアルタイムレンダリングに足る性能は示していないが、大規模な形状モデルについて正確なレンダリングを行うためには、CPU を用いたソフトウェアレイトレーシングが有用である。図 2、図 3 において、CPU を用いたレイトレーシングは、プリミティブ（ポリゴン）数に対して log スケールで所要時間が伸びており、十分なメモリを搭載すれば、数億ポリゴンの形状データも現実的な時間内にレンダリング可能な性能となっている。

本課題においては、簡易のクライアント・サーバ方式の環境を構築し、クライアントからのリクエストに応じて、サーバプログラムがレンダリング結果を書き出す過程を確認した。その結果、12 コアのサーバ環境において、数億ポリゴンの形状データから、1024 x 1024 ピクセルの画像データを生成するにあたって、概ね 1 秒台の所要時間でレンダリング可能であることが見出された。

(4) 宇宙科学データ固有の表現手法

レイトレーシングを用いた 3D 可視化環境において、宇宙科学分野に特化した表面材質等の表現も含めたデータ可視化について検討

した。係る機能は、共通のライブラリを用いて、前節のような、クライアント・サーバ型のレンダリングにも適用可能なものである。

図 4 の例は、Hapke パラメータの適用にあたって、各パラメータの寄与を吟味するためのインターフェースである。図 5 は Hapke パラメータを適用したレンダリング結果と、一般的な CG ソフトウェアでサポートされている Lambert 反射を比較したものである。

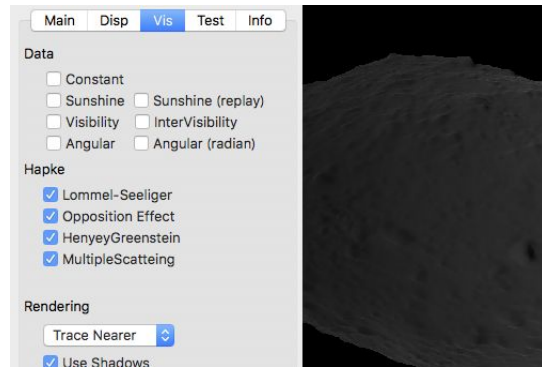
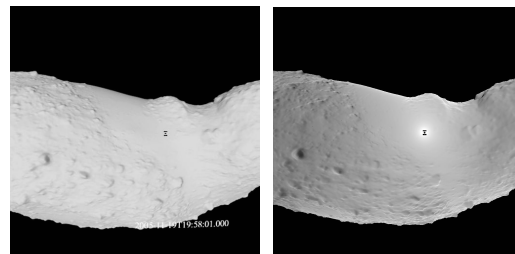


図 4 Hapke パラメータの適用例



**図 5 Hapke パラメータ適用比較
左: Lambert モデル、右: Hapke モデル**

(5) 他ソフトウェア等との連携

前述のソフトウェアと既成の 3D CG ソフトウェアとで、読み書きする科学データの互換性を確保することにより、既成の 3D CG ソフトウェアとの相補的なレンダリングが可能となった。これらの手法は、衛星運用のような実務面での応用も可能である一方で、全天周映像等の制作にあたっては、一般的な CG ソフトウェアを併用しながら、宇宙科学固有の表現を可能とするものである。係る可視化の応用として、全天周映像制作や、3D CG モデルを用いた探査機の光度推定等を行った。

また、科学データを CG 製作用素材として供するために、工学データ（「はやぶさ」の軌道データ等）の分析や理学データ（オーロラ観測データ、天文観測データ等）の汎用画像フォーマットへの変換等を行った。天文観測データについては、個々の観測結果は平面画像であるが、それらを結合することにより、全天周映像等の 3 次元空間に臨場感の高い投影が可能となる。

全天画像の活用例は、図 6 に示す。

(6) 共用ライブラリ

可視化や簡易の解析にあたって必要となる要素を共用ライブラリとして整備した。例えばレイトレーシングは可視化のための技術であるが、一方では、レーザ測距計の模擬や、天体上の各点の日照条件の算出、天体モデルのフィッティング等、多岐に渡った利用が可能である。他の要素についても、多様な応用を想定した共通ライブラリとして整備した。開発言語は C もしくは C++ を用いることにより、様々なプラットフォームへの展開を見込んでいる。

これらのライブラリ群は、GUI 等を司る環境依存のソースと、デバイス等に依存せずに共通に用いることができるソースとに分離して作成し、後々、他のデバイスに移植する際にもそのコストが低くなるように配慮している。

(7) モバイル環境・VR 等の活用

デスクトップ PC からモバイル端末まで含めた多様な環境での可視化を行うテストケースとして、リアルタイム 3D CG の統合開発環境への宇宙科学データの応用について検討すると共に、3D ヘッドマウントディスプレイを用いた仮想現実環境における小惑星模擬データや全天観測データの再現について検討した。本課題における環境では、高性能のモバイル PC を用いて、1000 万ポリゴン程度のデータをリアルタイムに操作可能であり、形状モデルの再現・検査等にも有用であることが見出された。図 6 に、試験時のスナップショットを示す。背景の星空は、(5) で作成した全天画像の活用例である。

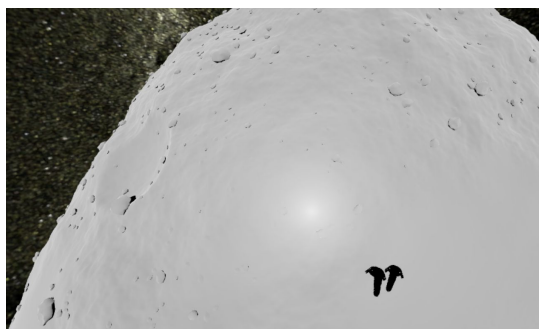


図 6 VR 環境試験

(8) ユーザインタフェース

前節の統合開発環境検討の一環として、マウス・キーボード操作の他に、HMD 向けのコントローラについても検討を行った。係るコントローラは、コントローラ自体の姿勢(向き)情報の他に、トラックパッドやトリガーを用いたアナログ操作、グリップ(握る)操作等、マウスやタッチパッドのような従来型のインタフェースでは実現困難な、多様な操作の組み合わせを、左右独立に実現できるものであり、HMD の位置・姿勢を用いたコントロールと併せて、格段の自由度をもたらす

ものであることが示唆された。

(9) インストールの簡便性

次節の広報・アウトリーチ活動の一環として、展示用のソフトウェアパッケージ(アプリケーションとデータを同梱したパッケージ)の製作を行った。係るパッケージは、展示用 PC にイメージファイルをコピーするのみでアプリケーションが起動できるものであり、展示台数の追加等にも柔軟に対応できるものであった。

(10) 広報・アウトリーチ活動等への応用

本件に係るアウトリーチ活動の応用として、広報用途の軌道表示アプリケーションを製作した。「はやぶさ 2」の地球スイングバイや「あかつき」の金星周回軌道投入時に、プレスセンター向けや一般見学者向けの展示で、予測軌道のリアルタイム表示を行った。例を図 7 に示す。プレスセンター向けの展示については、リアルタイム表示のみでなく、プレイバックや、地球スイングバイ時に「はやぶさ 2」が撮影した地球の画像の検証等の用途で、GUI ベースの操作も行った。

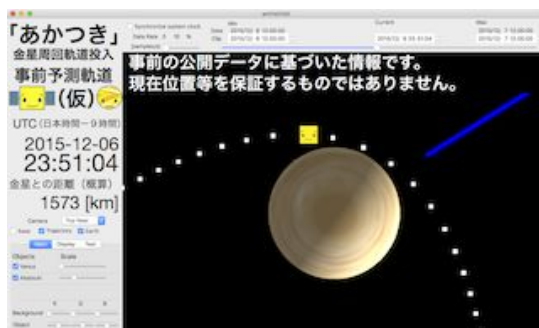


図 7 「あかつき」金星周回軌道投入

本件に係るアウトリーチ活動への、他の応用としては、(5) に述べた機能を活用した全天周ドーム向け映像を製作し、その成果を国際科学映像祭等で上映した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

[1] 三浦昭、全天周映像作成のための、簡易ドームマスター生成手法について、宇宙科学情報解析論文誌: 第 6 号、査読有、pp.153-164、JAXA、2017

[2] 三浦昭、山本幸生、吉川真、「はやぶさ 2」運用補助のための可視化手法 - 影の描写の検討 -、宇宙科学情報解析論文誌: 第 5 号、査読有、pp.133-148、JAXA、2016

[3] 三浦昭、山本幸生、吉川真、はやぶさの軌跡の可視化: タッチダウン時の位置推定、宇宙科学情報解析論文誌: 第 4 号、査読有、pp.173-183、JAXA、2015

〔学会発表〕(計 14 件)

[1] 三浦昭、仮想現実の手法を用いた宇宙科学データ可視化の検討、電子情報通信学会 2017 年総合大会、2017.3.22

[2] 三浦昭、宇宙科学データに係る可視化手法、第 7 回国際科学映像祭ドームフェスタ、2017.3.6

[3] 三浦昭、磁気圏の小箱 --- 宇宙の小箱より---、第 7 回国際科学映像祭ショートプログラムコンテスト、2017.3.6

[4] Akira Miura, Space Science Showcase - from Data Archives at ISAS -, Data to Dome Workshop, International Planetarium Society & National Astronomical Observatory of Japan, 2017.3.3

[5] Akira Miura, Visualization of Space Science Data - Using Data Archives at ISAS, Data to Dome Workshop, International Planetarium Society & National Astronomical Observatory of Japan, 2017.3.3

[6] 三浦昭、山本幸生、吉川真、CG を用いた「はやぶさ 2」地球スイングバイの再現と光度変化推定、平成 28 年度宇宙科学情報解析シンポジウム、2017.2.10

[7] 三浦昭、CG によるドームマスター制作、第 20 回デジタルプラネタリウムワークショップ、2016.9.5

[8] 三浦昭、オーロラ観測衛星データからの一般向け動画生成 ~ ハイライトシーンの推定と画像合成 ~、電子情報通信学会 信学技報 画像工学、2016.3.8

[9] 三浦昭、宇宙科学データに係る各種表現手法について、平成 27 年度宇宙科学情報解析シンポジウム、2016.2.12

[10] 三浦昭、光あやなす宇宙 / A Variety of Lights from the Universe、第 6 回国際科学映像祭ショートプログラムコンテスト、2015.9.24

[11] Akira Miura, Yukio Yamamoto, Makoto Yoshikawa, Trajectory Estimation of the "Hayabusa" Spacecraft around Itokawa using Gaskell Shape Model, 25th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, 2015.7.27.

[12] 三浦昭、山本幸生、吉川真、「はやぶさ 2」運用補助のための可視化システム開発、電子情報通信学会 2015 年総合大会、

2015.3.11

[13] 三浦昭、山本幸生、吉川真、「はやぶさ」の軌跡の可視化と、同手法の「はやぶさ 2」への応用、平成 26 年度宇宙科学情報解析シンポジウム、2015.2.13

[14] 三浦昭、山本幸生、吉川真、「はやぶさ」来し方 番外編/ Trajectories of 'HAYABUSA - Extra Edition -、第 5 回国際科学映像祭ショートプログラムコンテスト、2014.9.16

6. 研究組織

(1)研究代表者

三浦 昭 (MIURA, Akira)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：40280557