

〔論文〕

# 3次元バーチャルリアリティ天文学教材の開発

野田 常雄\*<sup>1</sup>

Development of a 3D Virtual Reality Simulation for Astronomy Education

Tsuneo NODA\*<sup>1</sup>

## Abstract

In astronomy and astrophysics, gravity is the dominant force. Further-more, it is difficult to imagine the movement of astronomical objects in a gravitational field by even the university students studying science. Many students who have studied these topics in textbooks or two-dimensional sim-ulations do not understand the movement of celestial bodies. These students believe that even if the orbital elements are different, the celestial bodies are orbiting on the same plane. In astronomy lecture, providing students with a three-dimensional image of the movements of celestial bodies is difficult even when a stellar simulator, eg. *Mitaka*, is used. Recently, virtual reality (VR) devices have become readily available. By employing a VR device, we can “dive” into a virtual space constructed by a computer and “observe” what happens in the space. Hand controllers that enable a user to “touch” the vir-tual objects in the space, and influence their movements are also available. We have developed an educational simulation that demonstrates a stellar system, visualizing it in a VR environment. In this application, an operator can “throw” a planet into the stellar system and “observe” the simulated movements of planet caused by the actions of the operator.

**Keywords** : VR Simulator for Astronomy, VR, Astronomy

## 1 序

天文学・宇宙物理学は、万有引力（重力）を支配的な力とする分野である。万有引力は遠隔力であり、重力源と運動する物体の間には物理的接続がないため、力が作用しているか見た目では非常にわかりにくい。また、万有引力の影響下での物体の運動についても、3次元空間における運動となるため、イメージを持たせることが難しい。天文学系の講義において、仮想宇宙空間シミュレーションソフトウェアである *Mitaka*[1]等を利用し視点を変えながら解説を行っても、3次元での天体の運動を学習者にイメージさせることは容易ではない。

天文学を含め、科学全般の理解において、実体験とのリンクが重要であると提言されている。実体験をもとに抽象化（図示）を行い、数式や言語で記述を行うことで、目の前の現象と教科書にある内容とが接続される、というものである[2]。数式等を主とする教科書類で学んだ場合、学習者によっては、現実の現象との関連がつかず現象の理解に結びつかないことがある。

天文学・宇宙物理学分野の教育において、現象を“観る”こと以外で体験することは困難である。研究者以外においては、学校での授業以外に、観望会や科学館の展示、プラネタリウム等で体感する機会があるが、これらの機会のほとんどは“観る”だけである。観望会以外では、スクリーンに投影されたものを観ることになるが、スクリーンは2次元であり3次元空間中の天体の運動のイメージをとらえることは難しくなる。観望会では実体物を観察することになるが、時間・空間的スケールが日常スケールと比べると大きすぎ、また、地上という視点に固定されるため、全体的な運動をとらえにくい。

この分野以外の科学教育においては、実験により現象の理解を進めることが多い。現象の対象物を学習者自らの手で実際に操作・制御することで、知識と現象を強く結び付けることが可能となる。天文学・宇宙物理学のような実験が困

\*<sup>1</sup> 久留米工業大学工学部教育創造工学科  
email:noda@kurume-it.ac.jp  
平成30年11月9日受理

難な分野では、模型を用いたりシミュレーションを行うなど、対象物を仮想的に操作・制御を行うことがなされているが、現象のイメージのできていない初学者にとっては難易度が高い。

既存の天文学教材に着目すると、既存の教材は媒体で以下のように分類できる。

- 動きのない2次元媒体（紙媒体）  
教科書や図鑑等の紙面は2次元のため、3次元のイメージが困難。動きもないため運動のイメージをつかむのが難しい
- 動きのある2次元媒体（プラネタリウム）  
プラネタリウムでは地上視点のリアルな星空の再現ができるが、立体的な表現は困難。学習者が主体的に視点を移動することができないため、運動の全体イメージをつかむことは難がある。
- 動きのある3次元媒体（シミュレーション教材）  
*Mitaka* 等のシミュレーションでは、リアルな天体の運動を再現しており、視点の移動も可能。*Mitaka VR* 等の3次元バーチャルリアリティ（VR）アプリケーションでは表現力が高いが、学習者の意図的な運動への介入はできない。

紙媒体からプラネタリウム、シミュレーション教材と、教材の表現力は増している現状である。しかし、いずれの場合においても、学習者は“観る”だけである。仮想的であれ運動への介入が可能であれば、学習者の操作との間に因果が生じ、結果が変わることで、運動への理解が進みやすくなると考えられる。そこで、次のようなコンセプトを持つ新しい天文学教材を開発することにした。

- 3次元的な天体運動の再現  
3次元立体視、自由な視点移動
- リアルタイム万有引力計算  
決められた軌道上の運動ではなく、リアルタイムで天体の運動を計算
- 天体の運動への学習者の介入  
学習者の主体的な操作によって天体を動かし、運動の初期値を設定

これらのコンセプトを満たすものとして、バーチャルリアリティ（VR）によるシミュレーションの教材開発を行うこととした。

## 2 教材開発

### 2.1 バーチャルリアリティ（VR）環境の現状

近年、VR環境は初期コストの抑えられた機器が増えてきている。本研究では、Facebook社の *Oculus Rift* を使い、VR環境を構築した。VR環境では、学習者ヘッドマウントディスプレイ（HMD）を装着し、3次元の空間内を立体視できるようにする。このHMDは位置と角度をそれぞれ3自由度有し、6自由度での空間内視点を提供する。これにより、VR空間内を“歩き”、“覗き込む”ことが可能となる。また、両手にはそれぞれ6自由度を有するハンドコントローラ（*Oculus Touch*）を装着し、VR空間内に学習者の手と連動する“手”を表現できる。この仮想の手には、触覚こそないものの、仮想空間内の物体を“つかむ”ことや“触る”ことができ、学習者の手の動きと連動させることができる。実行環境は高速なグラフィックボードを用いたPCが必要となり、HMD及びハンドコントローラの位置をトラッキングするためのセンサーを接続する必要がある。

### 2.2 教材開発環境

教材の開発環境は、3Dゲーム開発環境である *Unity* を用いた。従来型のアプリケーション開発と異なり、3D処理や

表示の処理を内包しており、作成者は3Dオブジェクトの配置し物理量設定等を行うだけで、3D空間内での運動を作成できる。物理処理は物理エンジン *PhysX* を用いることで、基本的な力学運動（慣性、衝突、摩擦、地上における重力等）を高速に実行できる。今回は万有引力系を扱うため、万有引力を与える処理を別途必要としたが<sup>1</sup>、力を与えた後の処理は物理エンジンに任せることができた。物理エンジンはグラフィックボードに統合されており、ハードウェアによる高速な並列処理が実現されている。

### 2.3 教材の目的

今回作成した教材は、恒星を回る惑星系を再現し、そこに学習者が操作できる小惑星を別途配置し、学習者が小惑星を“つかみ”恒星系に投げ入れることで、天体の運動を再現した。このシミュレーションでは、学習者の頭に装着したHMDの動きに合わせて視点が移動し、視野内に表示される仮想の手は、学修者の両手に持つハンドコントローラの動きに追従する。惑星及び小惑星には軌跡を追加し、どの天体がどのような軌道を描いているかをわかりやすくした。VR空間は実際に移動できる空間より広大であり鉛直方向にも広がっているため、ハンドコントローラのジョイスティックで  $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸のそれぞれに移動機能を持たせた。

### 2.4 万有引力の実装

物体の運動については物理エンジン *PhysX* を用いたが、重力部分のみ変更を加えた。恒星系の再現には、*Unity* の物理演算で用意されている重力は使用できない。宇宙空間において、一様重力場は考えられないため、万有引力による重力場を必要とした。各3Dオブジェクトには質量を与えられており、万有引力計算にもそれを用いることとした。万有引力は2物体間にはたらくため、 $i$  番目の物体にはたらく力のベクトルは、以下のようにあらわせる。

$$\mathbf{F}_i = - \sum_j G \frac{m_i m_j}{|\mathbf{r}_{ij}|^3} \mathbf{r}_{ij} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{F}_i$  は  $i$  番目の物体に生じる力、 $m_i$  は  $i$  番目の物体の質量、 $\mathbf{r}_{ij}$  は  $i$  番目の物体から  $j$  番目の物体までの距離ベクトル、 $G$  は万有引力定数である。これをVR空間に適用するため、 $G$  をスケーリングする必要があった。今回は太陽系を模し、地球の質量を1, 1天文単位を1, 地球の公転周期を10秒となるよう、 $G=1.2 \times 10^{-6}$  の値を設定した<sup>1</sup>。また、運動の対象とする物体数  $N$  に対し、計算数は  $O(N^2)$  で増えていくため、物体の設置数には上限がある。

これを *Unity* に実装するため、Source 1 のようなソーススクリプトをC#言語で記述した。このスクリプトは万有引力の影響を受けるオブジェクトに適用するものであり、他の万有引力のソースとなるオブジェクトの検索処理を含めた。

この万有引力処理を含めることで、オブジェクト間に万有引力が働くこととなる。これ以外に惑星に相当するオブジェクトに初速度ベクトルを設定することで、オブジェクトは円・楕円軌道等を描くようになる。

なお、3体以上の力学系は安定解が存在しない。しかし、恒星系のような極端に中心天体の質量が大きく、3体目の質量が十分に小さい場合においては、制限3体問題<sup>2</sup>に帰着できる。制限を設けても厳密には解を得ることはできないが、近似的に天体の運動を理解することができる。本システムにおいては、恒星に相当するオブジェクトの“質量”を現実系相当に非常に大きくしており、初期状態における“惑星”は中心力場における運動に準じた動きをする。投げ入れる“小惑星”についても同様であるが、他の“惑星”と軌道要素が大きく異なりうるため、接近または接触する場合がある。“惑星”と“小惑星”が十分接近した場合には中心力場に準じた振る舞いはできず、互いに軌道を乱されることとなる。場合によっては乱された軌道が他の“惑星”に接近し、複数の“惑星”が系を離れることもありうる。

### 2.5 動作

万有引力処理を実装し、*Oculus Touch* のハンドコントローラに相当する“手”を組み込み、動作させた画面が、図1である。また、このアプリケーションを試用している様子を図2に示す。操作を行う学習者は、図2のように身体と手を動かし、触れることのできる小惑星を“つかみ”、太陽系を模した恒星系に“投げ入れる”ことができる（投げ入れられた様子を図3に示す）。投げ入れられた小惑星は、その初速度ベクトルによって決定される軌道を描き、太陽に衝突する軌道<sup>3</sup>や、楕円軌道、双曲軌道、放物軌道のどれかを描くこととなる。

小惑星を投げ入れる際、十分に惑星に接近する軌道となった場合、惑星と小惑星の質量によって振る舞いが異なる。

<sup>1</sup> VR環境内の値のため単位は省略する。

<sup>2</sup> 例として、太陽-地球-月の3体系においては、月の質量は太陽-地球の運動に影響を及ぼさない程度に軽く、3体問題特有のカオス的振る舞いは発生し難い。

<sup>3</sup> 太陽の半径が現実スケールに比べ非常に大きいいため衝突する。現実スケールでは太陽に衝突する軌道に投入することは難しい。

Source 1 : grav.cs

```

1 using System.Collections;
2 using System.Collections.Generic;
3 using UnityEngine;
4
5 public class grav : MonoBehaviour {
6
7     private Rigidbody rd;
8
9     // Use this for initialization
10    void Start () {
11        rd = GetComponent<Rigidbody>();
12    }
13
14    // Update is called once per frame
15    void Update () {
16        GameObject[] Objects =
17            GameObject.FindGameObjectsWithTag("grav");
18        foreach (GameObject ObjectA in Objects) {
19            ApplyGrav(rd, ObjectA.GetComponent<Rigidbody>());
20        }
21    }
22
23    void ApplyGrav(Rigidbody Me, Rigidbody GS) {
24        Vector3 distance = GS.transform.position -
25            Me.transform.position;
26        double r = distance.magnitude;
27        double G = 1.2e-6;
28        if (r > 0.01) {
29            double force = G * Me.mass *
30                GS.mass / (double)Mathf.Pow((float)r, 2f);
31            Me.AddForce(distance.normalized *
32                (float)force, ForceMode.Force);
33        }
34    }
35 }

```

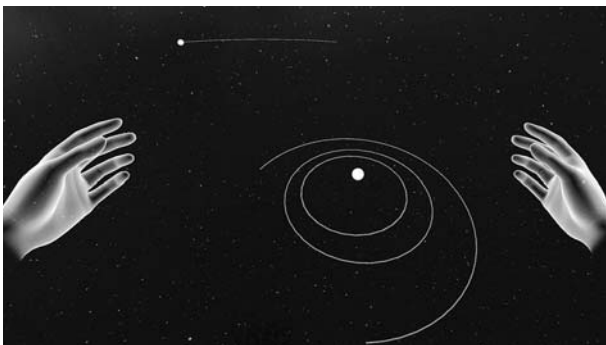


図1：動作中の画面の様子。中央部に恒星と楕円軌道を描く惑星が、遠方には遠い軌道を回る惑星が見える。



図2：操作中の様子。HMDを装着し、両手のハンドコントローラを操作し、小惑星をつかもうとしている様子。

小惑星の質量が惑星の質量に対し十分大きい場合、惑星の軌道を乱すことができる。これは、決して現実の惑星軌道が固定されたものでなく、十分重い天体が軌道をかき乱すに十分な距離に接近することで、惑星が系から外れることにもありうることを示している。また、惑星の質量  $M_{\text{sat}}$  と小惑星の質量  $M_{\text{ast}}$  を適切 ( $M_{\text{sat}} \gg M_{\text{ast}}$ ) に設定し、小惑星を適切に投げ入れることで、惑星間航行における“スイングバイ”<sup>4</sup>についても再現可能である。

<sup>4</sup> 惑星の運動エネルギーの一部を宇宙機に渡すことで、惑星接近時に速度を増減させる航法



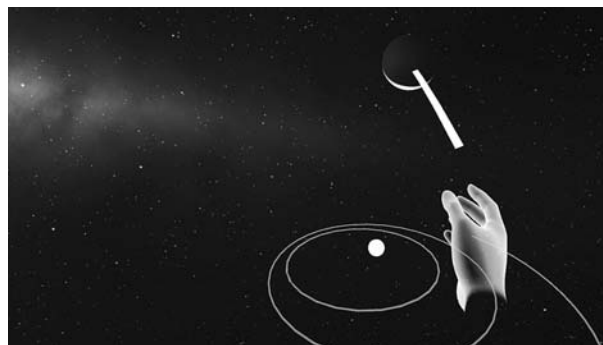


図3：小惑星を“投げ入れた”直後の様子。操作者の手の動きにより小惑星の運動が決定される。

### 3 効果とまとめ

作成したVRアプリケーションを、複数の学生に試用させ、感想を得た。ポジティブな意見として、“楽しかった。興味がわく”や“等速直線運動にはならず、速さの変化や曲線を描くイメージがついた”というものが挙げられた。また、ネガティブな意見として、“コントロールが難しかった”や現状のVR特有の問題点として女子学生の化粧ができない、というものも挙げられた。実際の天文学を扱う授業で、複数の学生に対して試用させ、他の学生はそれを大きなモニターで見ることについても試行した。VR環境で使用していた学生からは、“操作が難しかった”や“3次元での運動が体感できた”という感想を得ることができたが、全員がVR環境で行えないため、モニターを見ていた学習者からは“円軌道に載せることが難しいことがわかった”や“(平面モニターでの表示のため)立体的に見えない”という声が聞けた。

VR環境で天体運動を再現する教材は、3次元での運動を体験させイメージを持たせることができるという点では有効であると考えられる。天体運動の初期値(座標、速度)を学習者が設定できるため、どのような初期値であれば、どのような結果が得られるか、直感的に理解できるものとなった。また、従来型の“観るだけ”の教材とは異なり、学習者の動作で運動に介入することができるため、興味を引く効果が高いこともうかがえる。運動を3次元的に見ることができ、“なぜ”そのような動きになるのかの疑問を感じやすく、その後の紙面や数式を用いた学習へつなげやすくなることが期待できる。

問題点としては、大人数の講義においては体験できる学習者の人数に限られることが挙げられる。HMDの装着やVR環境中で操作へ慣れることに多少の時間を要し、スムーズな講義の運営には難がある。それを解消するためには、スマートフォンを利用する簡易VRゴーグルと連動させ、同じ仮想空間内で現象を観察することができるようにする必要がある。そのため、現状では、実際に実験ができるような現象については実験(演示実験、学生実験)を行い、実験が困難な現象や運動についてはこのようなVRを用いた手法が有効であると考えられる。

### 謝 辞

本研究は平成29年度久留米工業大学学長裁量経費の助成を受けたものです。

### 文 献

- [1] 国立天文台4次元デジタル宇宙プロジェクト, <http://4d2u.nao.ac.jp/html/program/mitaka/>.
- [2] 中村文彦, 大学の物理教育, 17, 79 (2011).