

天体学習のための立体的な教材開発

Development of Stereoscopic Teaching Materials for Astronomical Learning

関谷 信吾†
Shingo Sekiya

白木 厚司‡
Atsushi Shiraki

大島 哲平§
Teppei Oshima

佐野 麻里恵§
Marie Sano

中山 弘敬§
Hirotaka Nakayama

角江 崇§
Takashi Kakue

下馬場 朋禄§
Tomoyoshi Shimobaba

伊藤 智義§
Tomoyoshi Ito

1. はじめに

近年、青少年の理科離れが問題となっている。理系科目の学習状況は IEA(国際教育到達度評価学会)によって TIMSS(Trends in International Mathematics and Science Study) と呼ばれる国際的な調査が実施されている。TIMSS では小学校 4 年生と中学校 2 年生を対象に算数・数学および理科の学習到達状況や意識調査が実施されている。TIMSS2011 において算数・数学および理科の日本の平均得点は共に 50 か国中 5 位以内であり、高い水準である。しかしながら、TIMSS2011 における算数・数学および理科学習に対する意識調査では、日本の学生は国際平均と比較して肯定的な回答が少なくなっている。理科の勉強は楽しいかという設問の調査結果を表 1 に示す。また、私の先生は分かりやすいかという設問の調査結果を表 2 に示す。どちらの設問についても国際平均と比較して日本の学生は肯定的な回答をする割合が低くなっていることが確認できる。特に、「強くそう思う」と回答した中学校 2 年生の割合が非常に低くなっている。

授業の楽しさと分かりやすさの問題を解決するためには授業を工夫する必要がある。教育現場において先生が生徒に学習内容を間違いなく理解させるのは非常に難しい。そこで、先生の指導と生徒の理解を助けるために教育教材が用いられる。しかし、現在使用されている教科書では物体や現象を平面上で表現しており、立体的な認識が必要とされる学習内容を理解することは容易ではない。

天体に関する学習は立体的な認識が必要とされる代表的な分野の一つである。月の満ち欠けの仕組みを学習するために用いられる教科書の図を図 1 に示す。この図では天体間の立体的な位置関係と月の満ち欠けの変化との関連性の認識が困難である。そこで、今までも教材に立体的な表現を用いる工夫が施されてきた。単純な教材としては、球体を月に見立て、球体に光を当てるもしくは球体に色を塗ることで月の満ち欠けを表現するというものである[1]。また、近代的な方法として、立体視を用いて天体の奥行きを表現する教材や、球体ディスプレイにより天体を表現し、モーショントラックを用いて操作する展示物が開発されている[2,3]。また、その他にも立体的な表現を用いた実践的な教育として、音響に関する学習が実施されている。音響に関する学

表 1 「理科の勉強は楽しい」という設問の結果

		強くそう思う(%)	そう思う(%)	そう思わない(%)	全くそう思わない(%)
小学校	日本	56.4	33.7	7.3	2.5
4年生	国際平均	64.3	23.7	6.7	5.2
中学校	日本	13.3	34.3	36.4	16.0
2年生	国際平均	33.1	37.6	17.2	12.1

表 2 「私の先生はわかりやすい」という設問の結果

		強くそう思う(%)	そう思う(%)	そう思わない(%)	全くそう思わない(%)
小学校	日本	41.5	39.8	12.5	6.2
4年生	国際平均	65.8	23.9	6.5	3.8
中学校	日本	17.9	47.3	24.2	10.5
2年生	国際平均	45.2	33.3	14.7	6.8

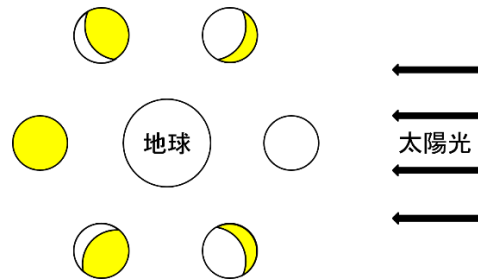


図 1 教科書の月の満ち欠けの説明図

習について、シミュレータベースのマルチメディア教材を活用した授業により学生の理解度の向上が確認されている[4]。これは、天体とは異なる分野であるものの、シミュレータを用いた教材が学習に有効であると示唆される。

シミュレータや立体視、球体ディスプレイなどの立体的な表現を活用した教材を学習に用いる活動が進められており、立体的な認識を必要とする分野の学習に有効であると考えられる。そこで、立体的な認識を必要とする天体の学習に着目し、本研究では、プロジェクションマッピングやペーパークラフト、シミュレータなどの立体的な表現を活用した天体の教材開発を目的とする。そして、初等教育から高等教育までそれぞれの学力に応じた教材を以下のように定め、教材の開発を目指す。

初等教育：ペーパークラフトとプロジェクションマッピングを用いて立体的な天体モデルを制作し、天体の位置関係と月の満ち欠けの関連を学習する教材

中等教育：シミュレータを GUI(Graphical User Interface) 上で操作することで、天体の運動と月の満ち欠けに加えコンピュータの操作を習得する教材

高等教育：シミュレータのソースコードを編集することで天体に関する物理法則に加えプログラミング技術を習得する教材

† 千葉大学大学院融合科学研究科, Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University

‡ 千葉大学統合情報センター, Institute of Management and Information Technologies, Chiba University

§ 千葉大学大学院工学研究科, Graduate School of Engineering, Chiba University

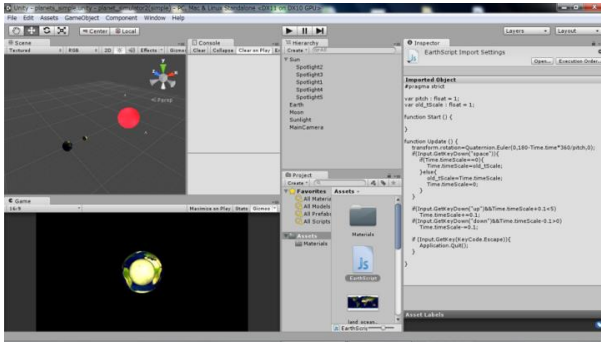


図 2 Unity の開発画面

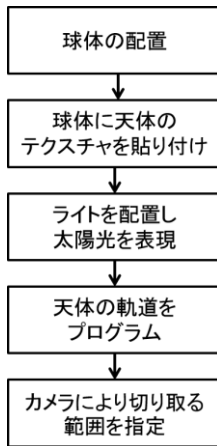


図 3 シミュレータの構成

2. 天体の教材の開発方法

2.1 開発環境

本研究では Unity を用いて開発を行う。Unity の開発画面を図 2 に示す。Unity とはグラフィックス表現に優れた統合型のゲーム開発環境である。Unity では、表示したいオブジェクトの描画はソフトウェア内の機能で提供されており、特別なコーディングを必要としない。そして、配置したオブジェクトに対して動きをプログラムするだけで簡単なグラフィックスプログラミングが行える。オブジェクトの描画などのコーディングを必要としないという特徴から、高等教育におけるプログラミングの初歩の体験に適した教材が作成できると考えられる。図 2 において、プログラムは右側に表示されており、プログラムはテキストエディタを呼び出して編集する。

2.2 シミュレータの構成

天体の動きを表現するシミュレータを開発する流れを図 3 に示す。図 3 における球体、ライト、カメラは Unity により提供される機能を用いて配置する。まず、球体にテクスチャを貼り付け、天体を表現する。Unity ではライトの種類や配置、向きなどを設定することでオブジェクトの光と影を表現することができ、このライトにより太陽光を再現し、月の満ち欠けを表現する。続いて、球体に対して各天体の軌道をプログラムにより実装する。天体の軌道の計算方法は教育課程ごとに異なり、それぞれ第 2.4.3 項と第 2.5 節で論述する。配置したオブジェクトを Unity 内のカメラによって切り取ることで、ディスプレイに表示する画像を生成する。このとき、画像の用途ごとにカメラの配置と

表 3 天体の情報

	地球	月	太陽
平均半径(km)	6.37×10^3	1.74×10^3	6.69×10^5
質量(kg)	5.97×10^{24}	7.35×10^{22}	1.99×10^{30}
平均公転半径(km)	1.50×10^{11}	3.84×10^5	—
平均速度(km/s)	29.8	1.02	—
公転周期(日)	365	29.5	—
自転周期(日)	1	29.5	25~27

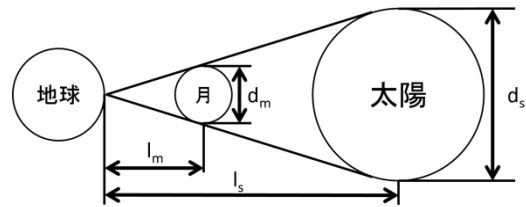


図 4 日食が発生する位置関係

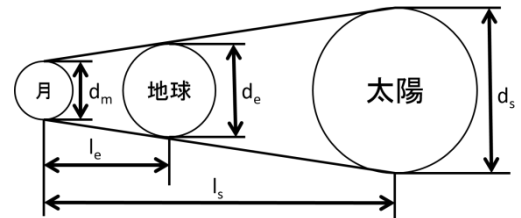


図 5 月食が発生する位置関係

向き、撮影範囲の指定を行う。カメラの設定を以下に示す。

- 太陽、地球、月の全体を映し出し、天体の動きや位置関係について観察できる視点
- 地球から月を撮影することで、地球から月を見た時の月の変化を観察できる視点
- 太陽側から地球と月を撮影することで、太陽光の当たっている地点を観察できる視点

これらのカメラの設定のうち、一番下の太陽側からの視点は初等教育向け教材のプロジェクトンマッピングに用いることも想定している。

2.3 シミュレータ内の天体の大きさの決定

シミュレータに必要な天体の情報を表 3 に示す[5]。天体のシミュレータを開発するうえで縮小比率に注意しなければならない。それは、全体を等しい比率で縮小してしまうことで太陽に対して地球と月が非常に小さくなり、目視が困難になってしまうためである。そこで、天体ごとに縮小比率を変化させる。天体の学習において日食や月食は重要な現象である。したがって、日食と月食の発生条件を考慮して縮小比率を決定する。

日食が発生するために必要な条件を図 4 に示す。地球上の人が太陽を見たときに月が太陽を遮ることで日食が発生する。図 4 において地球から月までの距離を l_m 、月の直径を d_m 、地球から太陽までの距離を l_s 、太陽の直径を d_s と置く。これらが

$$l_m : l_s = d_m : d_s \quad (1)$$

となる比であるときに日食が実現できる。

月食が発生するために必要な条件を図 5 に示す。月に届く太陽の光が地球にさえぎられることで月食が発生する。図 5 において月の直径を d_m 、月から地球までの距離を l_e 、地球の直径を d_e 、月から太陽までの距離を l_s 、太陽の直径

表 4 月の直径を 1 とした時の天体の大きさと距離

	月	地球	太陽
直径	1	2	6
地球からの距離	4	-	19

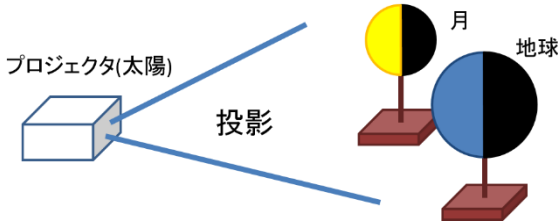


図 6 初等教育向け教材の構成

を d_s と置く. これらが

$$l_e : l_s = (d_e - d_m) : (d_s - d_m) \quad (2)$$

となる比であるときに月食が表現できる.

式(1)と式(2)の条件を考慮し, 月の直径を 1 としたときの地球と太陽それぞれの大きさと地球からの月と太陽の距離を表 4 に示す.

2.4 初等教育向けの天体教材

2.4.1 教材の構成

初等教育向けの天体教材の構成を図 6 に示す. 初等教育向けの教材では, 地球と月に見立てた球体にプロジェクタにより像を投影し, 天体を表現する. このとき, プロジェクタが太陽のような働きをしており, 球体の後方には像が当たらない. 像の投影されない部分により月の満ち欠けの欠けている部分と地球の夜を表現する.

教員が使用することを想定し, 教材の構成を単純にする. まず, 地球の公転を省き, 月の公転軌道を円形に近似する. これは, 球体を楕円形に動かすことや, 円運動同士が相互作用することで動きが複雑になり, 組み立てが困難になってしまうことを防ぐためである. また, 球体は地球を固定し, 月を手動で動かすことで投影像に重ねることを想定する. これは, 自動回転を実装するためにはモーターの導入やコンピュータとの連動などが必要であり, 教材の組み立てを困難にする要素であると考えたためである.

2.4.2 ペーパークラフト

初等教育向けの教材では投影対象となる球体にペーパークラフトを用いる. ペーパークラフトの展開図を図 7 に示す. この図で示した形状の紙を 2 枚用意し, 互い違いに重ねることで半球部分が完成する. 互い違いに重ねた状態を図 8 に示す. 半球部分をさらにもう一組作り, それらを張り合わせることで球体のペーパークラフトが完成する. 完成したペーパークラフトを図 9 に示す. 左側が張り合わせた状態である. また, 右側が上下から引っ張ることで球体となった状態である.

このペーパークラフトは上下から押すことで折り畳むことが可能である. この特徴には, 教材を収納する際にコンパクトにまとめることを可能にするという利点がある[7].

2.4.3 天体の軌道計算方法

初等教育向けの教材では, ペーパークラフトに天体を投影することを考慮し, 天体の軌道を簡略化する. 時間経過を T とすると, 太陽を原点とした月の軌道は表 3 の公転周

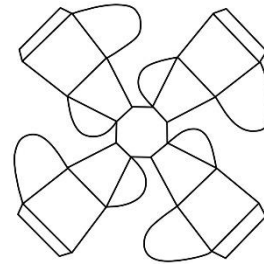


図 7 ペーパークラフトの展開図

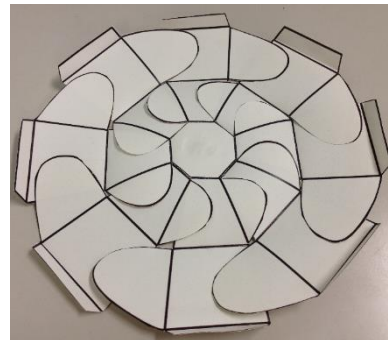


図 8 ペーパークラフトの半球部分

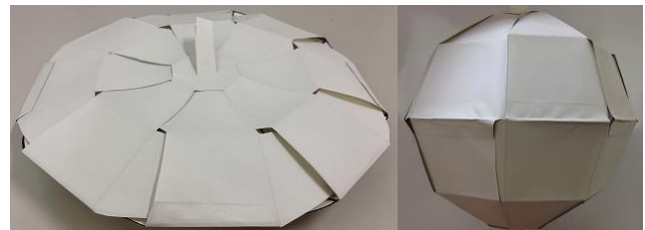


図 9 球体のペーパークラフト

期と表 4 の公転距離を用いて,

$$\begin{aligned} (x, y, z) &= (x_m, y_m, z_m), \\ x_m &= 19 + 4 \cos \frac{360T}{29.5}, \\ y_m &= 0, \\ z_m &= 4 \sin \frac{360T}{29.5} \end{aligned} \quad (3)$$

で表される. このとき, 地球は月の公転の中心である $(x_e, y_e, z_e) = (19, 0, 0)$ に配置する.

2.5 中等・高等教育向けの教材

中等・高等教育向けの教材では天体運動の原理の習得を促すために物理法則に則ったシミュレータを作成する. 天体運動は, 万有引力により天体同士が引き合うことで楕円軌道を描いている. 二つの天体の質量をそれぞれ M, m , 天体間の距離を r , 万有引力定数を G , とすると 2 天体間に働く力 F は

$$F = \frac{GMm}{r^2} \quad (4)$$

で表される[6]. また, 重さ M の物体に対し力 F が加わっているときの加速度 a , 速度 v , 変位 l は時間 t について

$$\begin{aligned} a &= \frac{F}{M} = \frac{Gm}{|l|^2}, \\ dv &= a \times dt, \\ dl &= v \times dt \end{aligned} \quad (5)$$

という関係がある. プログラムに実装するために差分形式に書き換えると,



図 10 シミュレータ内の天体

$$a_{n+1} = \frac{F}{M} = \frac{Gm}{|l|^2},$$

$$v_{n+1} = v_n + a_n \times \Delta t,$$

$$l_{n+1} = l_n + v_n \times \Delta t$$
(6)

と表される。この式を繰り返し計算し、値を更新することで天体の軌道を導き出せる。このとき初期値や各定数には表 3 の値を用いる。また、万有引力定数 G は 6.67×10^{-11} とする。

軌道計算の結果の座標は非常に大きな値となってしまうため、シミュレータ内において月と地球が目視できなくなってしまう。そこで、第 2.3 節と同様に縮小を行う。地球の座標 \vec{X}_e を縮小する式を以下に示す。このとき、縮小後の地球の座標を \vec{x}_e とする。

$$\vec{x}_e = \frac{\vec{X}_e}{8 \times 10^9}. \quad (7)$$

また、太陽の座標 \vec{X}_s についても同様に以下の式を用いて縮小する。このとき、縮小後の太陽の座標を \vec{x}_s とする。

$$\vec{x}_s = \frac{\vec{X}_s}{8 \times 10^9}. \quad (8)$$

月の座標についても縮小が必要である。月は地球を中心に楕円軌道を描いていることに注意して縮小する。月の座標 \vec{X}_m を縮小する式を以下に示す。このとき、縮小後の月の座標を \vec{x}_m とする。

$$\vec{x}_m = \vec{x}_e + \frac{\vec{X}_m - \vec{X}_e}{10^9}. \quad (9)$$

2.6 ジェスチャ入力

天体の教材はキーボードとマウスによる操作を想定している。これは、教育現場において多くの機器を使用した教材は適していないと考えたためである。しかし、教材を使用する環境によっては多くの機材の使用を想定できる。そこで、ジェスチャ入力による直感的な操作を導入し、教材に対して親しみをもち、学習の楽しさを伝えることを目指す。ジェスチャ入力には Microsoft 社が販売している Kinect for Windows を用いる。ジェスチャ入力により操作する項目はシミュレータ内における時間の進む速さである。これは、観察したい項目について時間を停止または遅くさせることで確実に観察可能にするためである。ジェスチャは 3 種類作成する。左手を右に振ると時間の進みが早くなり、右手を左に振ると時間の進みが遅くなる。また、手を上に上げることで一時停止する。

今回使用した開発環境である Unity で Kinect を使用するために、Unity の Asset store で配布されている Asset を導入する。Asset は Kinect with MS-SDK を用いる。

3. 天体の教材の作成結果

3.1 シミュレータ内の天体の表現

シミュレータ内の地球と月、太陽を図 10 に示す。球体にテクスチャを貼り付けて地球の国や地域、月の模様が表現でき、光が当たる地域が確認できた。また、模様があることにより自転による影響が表現できた。太陽は赤い球体に光を当てて表現した。

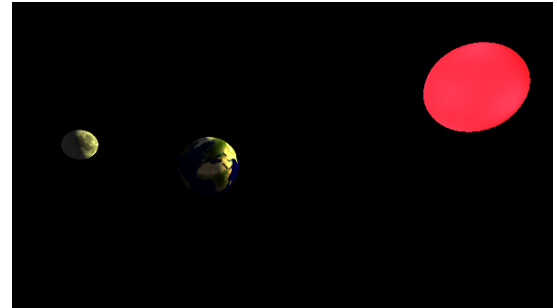


図 11 シミュレータの全体像

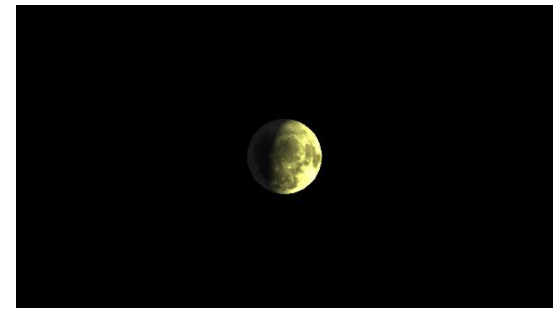


図 12 地球から月を見る視点

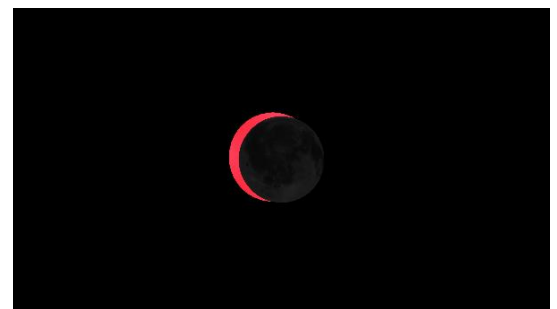


図 13 日食の様子

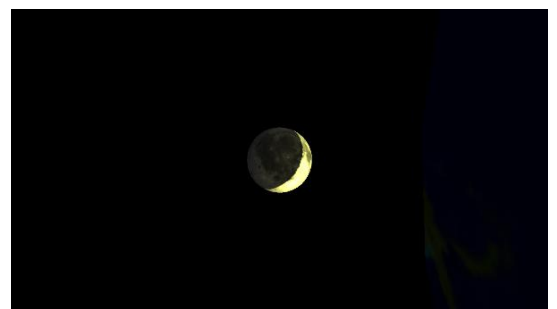


図 14 月食の様子

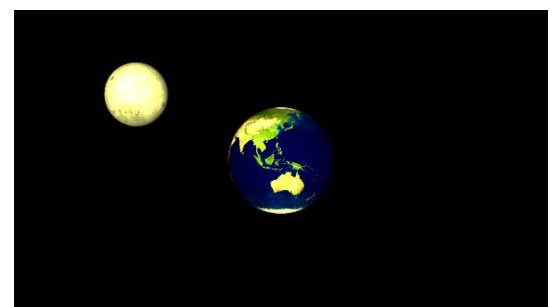


図 15 太陽から地球と月を見る視点



図 16 ペーパークラフトを土台で支えた様子

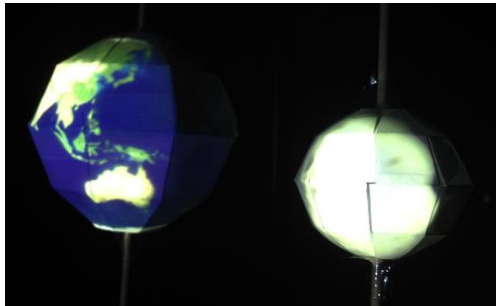


図 17 ペーパークラフトに像を投影した様子

3.2 初等教育向け教材

初等教育向け教材のシミュレータの全体像を図 11 に示す。このシミュレータの全体像が見える視点では、月と地球、太陽の位置関係が認識しやすくなっている。

シミュレータ内の地球上から月を撮影した結果を図 12 に示す。この視点では月の満ち欠けの移り変わりが確認しやすくなっている。また、この視点によって日食と月食が表現できていることが確認できた。日食の様子を図 13 に、月食の様子を図 14 に示す。

太陽側から地球と月を見た結果を図 15 に示す。この視点では目線と太陽光が重なるため、実際に光が当たっている箇所が確認しやすくなっている。また、月食と満月における地球と月の位置関係の違いが確認しやすくなっている。月食が発生する場合、月は地球の後ろに隠れ、視認できず、太陽光が届かないことが確認できる。プロジェクションマッピングではこの視点による像を利用する。

球状のペーパークラフトを木製の土台により支えた様子を図 16 に示す。土台は木製の板に穴を開け、棒を差し込んでいる。また、月と地球の土台同士は棒で繋ぎ、一定の距離を保ちやすくしている。これらの土台は接着材を使わずに固定しており、容易に解体できる。また、前述したようにペーパークラフトで作製した球体は、上下から押すことで折り畳むことができる。このように本研究で作製した教材には、コンパクトに収納できる工夫が施されている。

ペーパークラフトで作成した球体に、天体の像を投影した結果を図 17 に示す。投影した結果、球体の後ろ半分が暗くなっており、月では満ち欠けの欠けている部分を、地球では夜を表現できた、また、陸や海が綺麗に映し出されており、どの地域に太陽光が当たっているかが確認できた。

3.3 中等・高等教育向け教材

中等・高等教育向けの教材として太陽、地球、月の間に働く万有引力を計算することで、天体の軌道を描くシミュレータを開発した。初等教育向け教材のシミュレータとは軌道計算の方法が異なっているが、描画した際の見た目の



図 18 ジェスチャ入力画面



図 19 左手を左から右に振るジェスチャ

変化は少ない。また、このシミュレータにおいて初速度や質量、距離などの初期値と各定数を変更することにより天体の描く軌道の変化が確認できた。今回、最も身近な天体である地球、月、太陽の定数を実装したが、天体の追加や定数の変更によって様々な状況における天体の運動を表現することが可能である。

3.4 ジェスチャ入力

Kinect によるジェスチャ入力の実行画面を図 18 に示す。画面左上にはユーザのジェスチャの状態やユーザへの指示が表示される。画面右下には認識したユーザを表示している。ジェスチャ入力の例を図 19 に示す。このジェスチャは左手を左から右へ振ることで認識され、シミュレータ内の時間の進む速さが速くなった。また、このジェスチャは天体を停止させた状態から動かすことや、天体の動きの早送りに用いる。その他にも右手を左へ振るジェスチャ入力や手を上げるジェスチャ入力を実装した。これらのジェスチャを用いることで、シミュレータ内の時間を直感的に操作でき、天体運動の観察ができる。

4. 開発した教材の効果や活用方法の考察

4.1 初等教育向け教材

教材を開発するうえで実用性が重要になる。実用性について求められる項目は

- 分かりやすいか
- コンパクトであるか
- 使いやすいか

であると考えた。ペーパークラフトとプロジェクションマッピングにより天体を立体的に表現したことで、従来の教材に対して比較的理解しやすくなったと考えられる。ペーパークラフトを天体の学習に活用した教材について、中学生を対象に授業を行い、アンケートを実施した例がある。天体の模様を印刷した球状のペーパークラフトを中学生が作成し、授業を進めるといった形式であった。アンケートを基にした評価では、ペーパークラフトによる球体の作製は難しいが、天体の授業に親しみやすくなったという結果が得られている[8]。また、コンパクトであるかという項目について、折り畳み可能なペーパークラフトを使用したことで、小さく収納することが可能となっている。したがって、

コンパクトな教材を作成できたと考えられる。使いやすさについては天体の運動を抽象化し、教材を単純な構成にすることで実現している。これらの要素については、今後、学生や教員にアンケートを実施していきたいと考えている。

今回作成したペーパークラフトとプロジェクションマッピングを用いた教材では、地球と月の位置関係を全体的に捉える形式となっている。そのため、地球上から月を眺めたときの見え方を認識することが困難である。これは、学生が地球の位置に実際に立ち、月の模型を観察できないためである。そこで、シミュレータの併用を提案する。シミュレータ内ではカメラの設定を変更することで、視点の位置や向きを変更できる。したがって、地球上から月を見たときの景色は図 12 の視点によって確認できる。このように、シミュレータとペーパークラフトによる教材のそれぞれの苦手な表現を補い合うことで、天体の学習について理解がさらに容易になると考えている。また、図 12 の視点は地球の自転に合わせて地球上を移動する。そこで、視点の位置を変更することで他の地域における月の見え方が観察でき、同一時刻において地球の裏側から月がどう見えているのかなどの学習ができる。

近年、プロジェクションマッピングを使用したイベントやアミューズメントが話題となり、注目を集めるようになってきた。今回、月の満ち欠けを表現するためにプロジェクションマッピングを用いた。このような目新しい表現方法を授業に取り入れることで、学生の興味を引くことができ、学力の向上につながると考えている。

今回、ペーパークラフトによる球体は投影像に合わせて手動で回転させる方法を想定した。この方法により、教材の組み立てを容易にしているが、投影像に合わせて球体を回転させるという不安要素が生まれてしまった。そこで、モーターなどによる自動回転の実装を今後検討する。自動回転とジェスチャ入力を連動させることで、教材全体をジェスチャ入力のみで操作が可能になり、教材の直感的な操作が実現できると考えられる。

4.2 中等・高等教育向け教材

中等・高等教育向け教材では天体間の万有引力を計算することで軌道を導き出している。したがって、初速度、質量、初期位置などの初期値を変更すると天体の描く軌道が変化する。この性質を利用した教材の活用方法を提案する。たとえば、天体の初期値が変化した場合、天体の軌道はどのように変化するかという問題に対して、学生が考察し、学生自身でシミュレータの初期値を変更して軌道を観察する。そして、教員により解説を行うという流れで学習を進める。このように学習することで、天体の運動の原理についてより詳しく理解できると考えられる。このとき、万有引力や微分方程式を用いて解説することで、数式と天体の軌道の関連について学ぶことができる。また、学生自身の手でシミュレータを操作することで天体の運動の学習に加え、シミュレータやコンピュータグラフィックスに対する興味を引くことができると考えている。

高等教育向け教材ではプログラミング学習への利用についても視野に入れている。具体的には、運動を示した微分方程式をプログラムに実装する手段の学習への利用を検討している。第 2.5 節のような手順により実装し、学習を進める。また、この学習に伴い、計算順序による計算結果の誤差の変化についての学習に用いることができると考えている。今回、実装した計算手順を以下に示す。

$$\begin{aligned} a_{n+1} &= \frac{F}{M} = \frac{Gm}{|l|^2}, \\ v_{n+1} &= v_n + a_n \times \Delta t, \\ l_{n+1} &= l_n + v_n \times \Delta t. \end{aligned} \quad (10)$$

この式に対して、以下のように式を変更する。

$$\begin{aligned} a_{n+1} &= \frac{F}{M} = \frac{Gm}{|l|^2}, \\ v_{n+1} &= v_n + a_{n+1} \times \Delta t, \\ l_{n+1} &= l_n + v_{n+1} \times \Delta t. \end{aligned} \quad (11)$$

このように計算手順を変更することで、計算結果が変化する。物理学とプログラミングを複合的に学習することで、どちらの分野についても理解を深めることができると考えられる。

5. まとめ

本研究は立体的な表現により天体運動の教材のわかりやすさの向上を目的とし、プロジェクションマッピングとペーパークラフト、シミュレータを用いた教材を開発した。初等教育向け教材では、球状のペーパークラフトに月と地球の像を投影することで月の満ち欠けと夜を表現できた。中等・高等教育向け教材では物理法則に則った天体の運動を表現できた。

今後は、動的に天体を追加できる機能や初期値を変更するためのインターフェースを整えていく。そして、各教育課程の教材について実際に学生や教員に使用してもらい、アンケートを実施することで教材としての有用性を評価したいと考えている。さらに、球体の自動回転を実装し、ジェスチャ入力と連動させることで直感的な操作について検討していく。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費(15K16111)の助成を受けたものである。ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] 萩原庸平, 小林辰至, “月の運行モデル教材と観測を組み合わせた学習が月の見え方の理解に及ぼす効果-初等教員養成課程の学生を対象として-,” 理科教育学研究, vol.50, no.3, pp.43-56, Mar. 2010.
- [2] 小林秀明, “立体視天体コンテンツの奥行き呈示位置と教材としての有用性,” 情報処理研報, vol.150, no.15, pp.1-4, Feb. 2013.
- [3] 上石悠樹, 岡本遼, 小瀬由樹, 三上雄太, 白井暁彦, “球体ディスプレイとモーション入力を用いた科学コンテンツのエンタテインメントシステム化と展示評価手法,” エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2014 論文集, pp.235-243, Sep. 2014.
- [4] 須田宇宙, 三井田惇郎, “シミュレータを中心としたマルチメディア教材の構成とその効果,” メディア教育研究, vol.2, no.2, pp.59-68, Feb. 2006.
- [5] 大林辰蔵, “宇宙空間物理学,” 裳華房, pp.3-35, 1970.
- [6] 木下宙, “天体と軌道の力学,” 東京大学出版会, 1998.
- [7] 伊藤智義, 中山弘敬, “折りたたみ可能な立体構造物及びその製造方法,” 特開 2013-230820(2013.11.14).
- [8] 大島哲平, 白木厚司, 関谷信吾, 佐野麻理恵, 中山弘敬, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, “省スペース化を目指した教材開発,” 信学技報, vol.115, no.319, pp.1-3, Nov. 2015.