CG アニメーションを用いた宇宙現象のインタラクティブな可視化システムとシューメーカー・レビー第9彗星の木星衝突現象への適用

東海彰吾[†], 安田孝美^{††},
横井茂樹^{††}, 正会員 鳥脇純一郎[†]

An Interactive CG Animation System for Visualization of Space Phenomena, and Application to the Collision of the Comet Shoemaker-Levy 9 with Jupiter

Shogo Tokai[†], Takami Yasuda^{††}, Shigeki Yokoi^{††} and Jun-ichiro Toriwaki[†]

Abstract In this paper, we describe a system to generate CG animation as an introduction for space phenomena. We are currently able to obtain a great deal of information and data on phenomena on computer networks, but each item of information is independent and we are unable to understand the complete phenomena. Our visualization system is able to provide CG animation, using the latest information, showing phenomena which are usually invisible. This system has three functions, data integration, CG generation and interactive operation. Using these functions, we arbitrarily can observe space phenomena based on information available through the network through the interactive use of a mouse. To illustrate the system's usability, we made CG animation on the behavior of the comet Shoemaker-Levy 9 that collided with Jupiter on July 1994.

1. ま え が き

コンピュータグラフィックス (以下, CG) を用いて実際に不可視な物体や現象を観察することは, Scientific Visualization と呼ばれる応用分野である. これを宇宙現象に対して適用する研究は有意義であ

り, NASA-JPL (ジェット推進研究所) による, 宇宙探査衛星ボイジャーの土星への接近を表現した CG 映像は代表的なもののひとつである. これは, 直接目で見るのが難しい宇宙現象を可視化する手段として CG が有効であることを示した好例といえる.

一方, 近年の世界的なコンピュータネットワークや

キーワード: コンピュータグラフィックス, アニメーション, 宇宙現象, 可視化, シューメーカー・レビー第9彗星, ネットワーク
1994年11月, NICOGRAPH 論文集, pp. 57-66 に発表

1995年3月1日受付, 1995年6月2日再受付

[†] 名古屋大学 工学部 (〒464-01 名古屋市千種区不老町, TEL 052-789-3310)

^{††} 名古屋大学 情報文化学部 (同上)

[†] Faculty of Engineering, Nagoya University (Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01, Japan)

^{††} School of Information and Science, Nagoya University (ditto)

CD-ROM などの発達により、様々なマルチメディア情報がこれらの新しいメディアによって提供されるようになってきた。これらのメディアは、最新のデータ提供が可能（即時性）、広範囲への配布が可能（広域性）、あるいは大量のデータを扱うことが可能（大容量）などの特徴を持つ。天文分野においても、多くの観測結果やそれらをもとにしたコンピュータによる予測結果などの情報が提供されている。しかし、これらのデータは数値や静止画の状態で示されることが多く、これら個別の情報から現象すべてを正しく理解することは難しい。そこで、これらの情報を統合して扱うことができ、また、これらの情報から、よりわかりやすいCG映像を生成することが可能で、さらにその映像をインタラクティブに操作することができるシステムが強く望まれてきた。

本論文では、グラフィックワークステーション（以下、GWS）上で、上記機能を有するものとして開発したインタラクティブソフトウェアシステムについて述べると共に、システムの実用性の検証として、シューメーカーレービー第9彗星と木星との衝突現象の可視化に適用した実験について述べる。

2. 宇宙現象の可視化のためのインタラクティブソフトウェアシステムの概要

本システムは、以下に示す3つの主な機能を有する（図1）。

- （1） 各種データの導入・統合機能：インターネットやCD-ROMなどの様々な形式の情報を、システム内で統一的に扱うことのできる形式や座標系に変換する機能である。
- （2） CGアニメーション生成機能：得られたデータを基にしてCGによって現象を映像化する機能である。さらに、必要に応じて惑星などの表示を行うことにより、現象の理解を助ける。
- （3） インタラクティブ操作機能：マウスやダイヤルなどのI/Oデバイスを用いて、CGアニメーションの視点位置変更や時間軸の速度調節を対話的に行う機能である。

これらの機能が1つのシステム内で連携して動作することにより、映像化の対象となる現象に関する最新情報を導入したCG画像を比較的短時間で生成することが可能となる。以下、個々の機能の詳細について述べる。

2.1 各種データの導入・統合機能

世界的情報ネットワークであるインターネットなどで提供される最新の情報を速やかに導入するために、

図1 宇宙現象可視化システムの概要
The outline of space phenomena visualization system.

様々な形式や座標系で表現されている情報を統一した座標系に変換する機能を開発した。また、観測データ等に見られる不連続な値をアニメーションで利用する上で必要となるデータの補間機能も併せて開発した。

（1） 座標変換、単位変換の機能

インターネットなどのメディアを通じて収集される情報には、文字情報や数表、あるいは計算機用のフォーマットなど様々な形で記述されたものがあり、異なった座標系や単位系を用いたものも多く含まれる。本システムでは、これらを同時に使用するために以下に示す座標系、距離単位、時間単位を用いた。

- （a） 座標系：太陽を原点とする3次元直交座標系である日心黄道座標系を用いる。これは、X軸を春分点方向、Z軸を黄道面に垂直な方向（北が正）、Y軸を右手直交座標系となる方向にとるものである。
- （b） 距離単位：地球と太陽との平均距離を1とする単位系である天文単位を用いる。1天文単位は約 1.50×10^8 kmである。
- （c） 時間単位：天文分野で用いる表現方法であるユリウス日を用いる。これは紀元前4713年1月1日12時からの通算日数による表現である。

各データは、本システムへの導入時にこれら統一した形に変換される。また、現象によっては異なった座標系での観察がその現象の把握には有効である場合もある（例えば、ある天体の動きを太陽系全体の中でとらえる場合と、地球など特定の惑星からの視点でとらえる場合など）。本システムでは、一度統一した座標系に変換されたデータを新たに任意の座標系に再変換

する機能を持たせることにより、任意の座標系を用いた可視化を可能としている。

(2) 線形補間による近似

天体の位置や大きさの変化などの観測データは、関数表現ではなくて不均一なサンプリング間隔で記録された不連続な値の並びで表されることが多い。本システムでは、これらを直接用いることとし、必要に応じて線形補間によってこれらのデータの内挿を行い、任意の時点での位置や距離などを算出する。これは、複雑な計算が不必要なため、描画時間が比較的短く、リアルタイムアニメーションとしての映像化が可能といった利点が考えられる。さらに、任意の時間間隔で位置計算ができ、様々な時間進行のアニメーションを作ることが可能となる。

2.2 CG アニメーション生成機能

収集したデータをもとにして、GWS の持つ描画能力を最大限に利用することにより、リアルタイムのアニメーションによる映像化を行う。

本機能は、対象となる現象の描画部分とその他の基本的な表示物の描画部分とからなる。対象となる現象の描画は、収集した情報をもとにした描画ルーチンにより行い、得られる数値データに基づいて科学的に根拠のある映像生成を行う。基本的な表示対象としては、太陽系内の惑星と、映像の背景となる恒星の表示を可能にしている。各対象は、画面上でインタラクティブに表示と非表示の切り替えが可能であり、作成する場面で必要に応じて切り替える。これにより、各シーンで表現したい現象を明確にし、理解を容易にすることができる。

また、宇宙現象を扱う上で、表示物のスケールの問題が生じる。これは、現象を観察する視点によって画面の解像度に対して、表示物の画面上での大きさが極端に小さくなる場合があるためであり、例えば、太陽系全体を観察するシーンにおいては地球の大きさが極めて小さくなってしまふ。本システムでは、必要に応じて対象物ごとにその大きさを誇張して表現する。この場合、現象の理解を妨げない程度の誇張とすることが重要であり、実際には当該現象の専門家の指示によって行うことになる。後述の適用例では、彗星の軌道については誇張を行わず、惑星の大きさ(赤道半径)についての誇張のみを行っている。

以下、基本的な表示要素について述べる。

(1) 惑星の表現手法

太陽系における現象の表現において惑星は不可欠な要素であり、とりわけ、後述の彗星のように惑星の引力によって軌道が決まるような天体を扱う場合、同時

表 1 地球の軌道要素
Orbital parameters of earth.

軌道長半径	1.0 天文単位
離心率	0.0167
軌道傾斜	0.001°
近日点黄経	102.921°
昇交点黄経	354.865°
平均近点離角	175.979°
赤道半径	6378 km

に表示しなければ意味がない。

惑星は基本的に楕円軌道上を運動する。個々の惑星の楕円軌道と任意の時点での位置を表すために、軌道要素と呼ばれる各惑星に固有のパラメータを与え、これを用いて位置を算出することができる¹⁾²⁾。一例として、地球の軌道要素を表 1 に示す。

惑星の形状は多面体近似した球を用い、各惑星の固有の表面模様のテクスチャをマッピングで張り付けて表現した。テクスチャは、実際にその惑星の天体写真からその特徴をよく表している長方形領域を切り出して使用している。ただし、木星については、NASA の探査衛星ボイジャーが撮影した木星表面の帯状の展開写真 (NASA : P-21771 C) を利用し、他の惑星に比べてよりリアルな表現が可能となった (図 2)。

また、ある時点での惑星の位置だけでなく、その惑星がどのような軌道上を動いているかも必要に応じて表示可能な機能を有している。

(2) 恒星の表現手法

背景の恒星は、生成した CG 映像の視線方向の変化を理解する手段としての効果大きい。ここでは、恒星の位置データである Yale Bright Star Catalog³⁾を利用する。CG 映像では背景にこれらの恒星を配置するが、実際の恒星がほぼ無限遠にあると仮定できるため、CG シーン内の表示物と視点を囲む充分大きな半径を持つ透明な球面上にこれらを配置して表示した (図 3)。また、各恒星はその等級に応じて大きさを変えて表示し、2 等級までを 3×3 画素、4 等級までを 2×2 画素、それ以外を 1×1 画素で表現している。

2.3 インタラクティブ操作機能

現象の理解を容易にするような最終的な映像を得るためには、CG の各シーンにおける視点位置や時間経過速度を適切に与える必要がある。本システムでは、マウスやダイヤルを使用した対話的操作によって、視点位置決定や時間経過の速度調節を自由に行うことが可能である。また、映像がリアルタイムアニメーション

図 2 テクスチャマッピングによる惑星の表現例 (木星)

An example of rendering planet with texture mapping. (Jupiter)

図 3 背景の恒星の表現
Stars mapped on an environmental sphere.

ンとして映像化されているため、アニメーション映像を見ながらの視点変更などが可能である。

3. 実 験 例

本システムの有効性を検証するため、本システムを利用して、1994年7月のシューメーカー・レービー第9彗星の木星への衝突現象のCGアニメーション化を行った。CG映像は、この現象の事前に制作し、名古屋市科学館プラネタリウムの1994年7月のプログラムとして、来館者への現象の解説に利用された。また、

現象の事後に新たに観測された事実の導入も試み、部分的な変更を行った。本システムは最新情報の利用を即座に行うことが可能であるため、この変更は数分で実行された。

3.1 天体現象「彗星の木星への衝突」の概要

1994年7月に、シューメーカー・レービー第9彗星(1993年3月発見)が木星に衝突するという、天文学的に珍しい現象が観測された^{4)~6)}。彗星は20数個の核が一直線に並ぶなどの外観の特徴を持ち(写真1(92ページに掲載))、さらに、過去に遡って彗星の軌道を解析した結果、1992年7月の木星への最接近時に核が複数に分裂したらしいことがわかった。この現象について、各国の天文機関による最新の観測画像や予測値・予測図などがインターネットなどを通して多数公開され、情報は随時更新された。実際の衝突現象は、1994年7月20日前後に発生し、衝突時の閃光や衝突の痕跡などが観測された⁵⁾⁶⁾。衝突後の画像もインターネットを通して公開された。

3.2 CG映像化のための表現要素

この現象のCGアニメーションによる映像化に際して、彗星の挙動を表現するのに必要な表現要素としては、(1)彗星の過去から衝突までの軌道、(2)彗星の核の分裂と一直線上に並ぶ核や彗星の尾、および、(3)核の衝突現象が、特に重要である。また、惑星やその軌道、背景の恒星などの表現を必要に応じて行い、現象の理解の助けとした。

ところで、この適用例においては、以下のデータを使用した。

- (1) 観測画像：ハッブル宇宙望遠鏡や各国の天文台が撮影した観測画像で、NASAからGIF形式やJPEG形式の画像フォーマットで公開されており、インターネットを通じて取得することができる。これは、生成したCG映像の検証に利用した。
- (2) 彗星の軌道解析結果⁷⁾：観測データに基づいた計算機シミュレーション結果であり、衝突までの100年間の位置情報である。
- (3) 各核の衝突時刻予測⁸⁾：天文学的なモデルによって計算された衝突時刻予測であり、彗星のそれぞれの核の名前(A核-W核)とその衝突時刻からなる数表である。これは、新しい観測結果を用いて、衝突の4日前まで随時更新された。これは、FAQと呼ばれるインターネット上でよく出る質問とその答からなる文書に含まれたデータである。
- (4) 核の並び長さの変化⁹⁾：地球からの見かけの

大きさとそれを実際の長さに換算した数表であり、観測値と予測値からなる。(3)と同様にFAQに含まれたデータであり、情報は随時更新された。

これらをまとめて扱うためには、各々の数値の座標系や単位系を統一して使用する必要がある。以下では、これらのデータを用いたCG映像の中の個々の要素の表現手法について述べる。

(1) 彗星の軌道と運動の表現

彗星の軌道や運動は、このCG映像の最も重要な要素である。ここでは、彗星の発見後の観測結果を用いた1899年から1994年7月の衝突までの約100年間にわたる計算機シミュレーションによる軌道解析結果⁷⁾を利用した。太陽中心の座標系および木星中心の座標系における彗星の軌道をそれぞれ図4に示す。

ところで、彗星の動きは全体として一様ではなく、以下のような4つのstageに大きく分けることができる。

stage 1: 太陽を周回する軌道 (1900年頃から1960年頃)

このstageでは、彗星は惑星とほぼ同様に太陽中心の楕円軌道上の運動であった。しかし、1920年頃に一度土星に接近した後、軌道が変わり木星に接近していった。

stage 2: 木星の重力に捕まり、木星近傍での運動へ (1960年頃から1992年)

木星の重力に捕まった後、彗星は木星の近傍を運動するようになった。このstageでもグローバルには太陽を周回する運動に見えるが、実際には木星と共に運動し、木星の回りでの複雑な運動で

ある。

stage 3: 核の分裂から衝突へ (1992年から1994年7月)

このstageでは、発見時(1993年3月)に観測された様々な特徴が重要となる。具体的事項としては、木星に1度目の最接近と核の分裂(1992年7月)、彗星の発見、木星との衝突(1994年7月)などが含まれる。

stage 4: 彗星の木星への衝突 (1994年7月16日から22日)

これは、stage 3の最終的な部分で、彗星の個々の核が次々に木星に衝突する。

それぞれのstageで彗星の動きの性質が変化し、その運動の複雑さは極端に異なる。また、現象を観察する視点が変化すると相対的な移動量も大きく変わり、必要とされる計算および表示の精度が変化する。このため、上記の全stageにわたって同一のサンプリング間隔による座標データを用いて彗星の挙動全体を表現することは難しい。そこで、各stageにおける彗星の挙動に応じた適切な時間間隔でサンプリングし、彗星の位置を算出したデータを用意した。実際には、10日間隔～1時間間隔と徐々に細かくサンプリングしたデータを用いている。用いた座標データのサンプリング間隔とデータ数を表2に示す。CG映像では線形補間(折れ線近似)によって彗星の軌道を表現することとし、実際に映像化を行いながら折れ線でつないで違和感がない程度の細かさとなるように、軌道データのサンプリング間隔を設定した。

とりわけ、木星に非常に接近した部分では彗星の速度は極端に速く、1時間間隔のサンプリングでも軌道

(a) 太陽中心の座標系での軌道。惑星は1994年7月20日の位置

(b) 木星中心の座標系での軌道

図4 軌道シミュレーション結果
Result of the orbital analysis.

(a)アリゾナ大(キットピーク:s19.93.03.30.gif)

(b)ハッブル宇宙望遠鏡(NASA:P-43510)

写真 1 実際のシューメーカー・レビー第9彗星
Photograph of Shoemaker-Levy 9.

写真 2 太陽系における SL-9 の軌道 (シーン 1)
The orbit of the comet SL-9 in the solar system.(Scene 1)

写真 3 木星と共に動く SL-9(シーン2)
The comet SL-9 moves with Jupiter.(Scene 2)

写真 4 木星中心の座標系で観察した木星の周りを動く SL-9(シーン3)
The SL-9 moves around Jupiter in Jupiter's coordinate.(Scene 3)

写真 5 SL-9 の最後の3年間 (シーン4)
The last 3 years of the comet SL-9. (Scene 4)

写真 6 潮汐力による核の分裂(シーン5)
The tidal force break the comet nucleus. (Scene 5)

写真 7 木星への衝突(シーン6)
The collision with Jupiter.(Scene 6)

期 間	サンプリング間隔	データ数	備 考
1899.12/24～ 1949.12/22	10 日	1827	木星接近前
1950.1/1～ 1989.12/27	5 日	2922	木星周回軌道へ
1990.1/1～ 1994.4/30	1 日	1583	木星を周回，1 回目の最接近
1994.5/1～ 1994.7/20	1 時間	1910	木星を周回，衝 突へ
☆ 1992.6/30 ～7/15	0.01 日(約 15 分)	1500	核の分裂の前後 の詳細な軌道
☆ 1994.7/15 ～7/20	0.002 日(約 3 分)	2770	衝突の前後の詳 細な軌道

ここで軌道表現の基になる軌道座標データは、以下の3つの要素からなる。

- 3 次元座標値は，日心黄道座標系に従い，天文単位で表現されている．軌道データにはさまざまなサンプリング間隔のデータが含まれるが，これらはユリウス日の順にソートして扱う．

$$C = \frac{(T_{k+1} - t)C_k + (t - T_k)C_{k+1}}{T_{k+1} - T_k} \quad (1)$$

(2) 彗星の核の位置の算出 (図 6)

● : 存在する軌道データ
○ : 求めたい点 (時刻 t ($T_k < t < T_{k+1}$))

The diagram illustrates the geometry for observing comet NEOWISE from Jupiter. A dashed circle represents Jupiter (木星) at position P_j . A curved line represents the comet's orbit (彗星の軌道). The comet's center of mass (彗星の重心) is marked with an arrow pointing to point P_g on the orbit. Other points on the orbit include P_a , P , and P_w . A dashed line connects P_j to P . Two segments of length $L/2$ are marked along the orbit, one from P_a to P and another from P to P_w . Time intervals $T - T_a$ and $T_w - T$ are indicated near points P_a and P_w respectively.

直線上に並ぶことが挙げられる．核の並びはほぼ一直線であり，木星と彗星の重心座標を通る直線上に並ぶと考えてよい．3.2 節(1)で述べたの軌道解析結果からは，核の並びの重心位置だけが得られるため，各々の核の位置は衝突時刻予測値(表 3)の差を用いて算出した．具体的には，最初に衝突する核 (A 核) と最後に衝突する核 (W 核) のそれぞれの衝突時刻を T_a, T_w とし，時刻 t での彗星の重心位置をベクトル P_g ，木星の位置をベクトル P_j とし，核の並びの長さを L とすると，A 核の位置ベクトル P_a および W 核の位置ベクトル P_w は

$$\begin{aligned} P_a &= P_g + \frac{(P_j - P_g)}{|P_j - P_g|} \times \frac{L}{2}, \\ P_w &= P_g - \frac{(P_j - P_g)}{|P_j - P_g|} \times \frac{L}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

$$P = \frac{(T - T_a)P_w + (T_k - T)P_a}{T_w - T_a} \quad (3)$$

論文 □ CG アニメーションを用いた宇宙現象のインタラクティブな可視化システムとシューメーカー・レビー第9彗星の木星衝突現象への適用

表 3 各核の衝突時刻予測
Predicted impact time of fragments.

核名	衝突時刻 (7月, 日本時間)	核名	衝突時刻 (7月, 日本時間)
A	17日 04:58	N	20日 19:21
B	17 11:54	P 2	21 00:10
C	17 15:59	Q 2	21 04:32
D	17 20:46	Q 1	21 05:00
E	18 00:05	R	21 14:24
F	18 09:27	S	22 00:10
G	18 16:28	T	22 03:06
H	19 04:26	U	22 06:53
K	19 19:18	V	22 13:15
L	20 07:07	W	22 16:57

A-W: 核の名前, 衝突順に A, B, C, ... (I, O は使わない, J, M, P 1 は消滅)

表 4 核の並びの長さの変化
The length change of the fragment train.

日時	実長(km)
1993 03/25	158,000
07/01	265,000
1994 01/01	584,000
02/01	669,000
03/01	762,000
04/01	893,000
05/01	1,070,000
06/01	1,366,000
07/01	2,059,000
07/15	3,593,000
A 核衝突時	4,907,000

図 7 彗星の尾の表現
Rendering the tail of the comet by particles.

(3) 彗星の尾の表現

尾は彗星の持つ大きな特徴のひとつである。本システムでは、ランダムな方向に水平投射した細かな粒子(質点)の運動によってこの尾を簡易的に表現した。す

なわち、図7のような座標を考え、Z軸方向に下向きの重力場を与え、乱数によってXY平面上の投射方向と初速を与えて粒子を投射する。各描画フレームで1個の粒子を新たに発生し、すでに存在する粒子は、次の時間での位置を計算し描画位置を更新する。発生からある一定時間以上経過した粒子は消去し、新たに1個の粒子を投射することを繰り返す。また、彗星の尾は太陽と反対の方向にできることが知られているため、上記の座標軸をシーンの座標系における彗星と太陽の位置関係により正しい位置に回転したもので表現する。この手法は、ここでは彗星の尾の表現として使用したが、仮想的な重力の与え方等を変えれば、その他の放射物の表現として利用できると考えられる。

(4) 衝突の表現

木星大気に上記の核が衝突した場合、大気に何らかの変化が起こるのではないかとすることは現象前から予測された。実際の現象観測の結果、衝突の瞬間に赤みがかった閃光が発生し、以後、何日にもわたって黒い痕跡が観測された^{4)~6)}。

各核の衝突時刻は表3の時刻を用い、この日時に衝突するように個々の核に時間の差を与えて動かす。すべての核は木星のほぼ同じ位置に衝突するが、木星の自転のために、衝突箇所は木星のある緯度のところに帯状に分布することになる。閃光・痕跡は半透明の球によって表現し、閃光を半透明の赤い球、痕跡を不透明の黒い球で描いている。核が木星中心から木星半径の距離に入ったときに閃光を表示し、数フレームにわたって徐々に透明度を増し、完全な透明になった後に消える。消えた後に黒い球で痕跡を表現する。これらの透明度の変化の様子を図8に示す。

3.3 CGアニメーション

生成したCGアニメーションは、およそ3.2節(1)で述べた4つの各stageに対応した6シーン(それぞれ約1分程度の動画)から構成される。座標系と視点は、専門家の意見を聴きながら各シーンにおいて、彗星の挙動を表現するために最も適切なもの実験的に選択した。各シーンの具体的な内容を以下に述べると共に代表的なフレームの例を示す。

(1) 彗星の過去の軌道の表現(シーン1, 2, 3)

軌道解析から知られた彗星の過去の軌道を座標系や視点を変えて観察した。また、太陽系内の惑星を同時に表示することにより、彗星の運動に太陽や他の惑星の重力の影響があること表現した。92ページに示すシーン1(写真2)は、stage1を太陽中心の座標系で観察し、視点は太陽系全体を見おろす位置に置いた視点である。土星や木星と彗星との位置関係の変化か

図 8 閃光と痕跡の表現における透明度変化
The transition of transparencies on rendering flash
-lights and black-marks.

ら、他の惑星の重力の影響の存在を観察することができた。シーン 2 (写真 3) は、stage 2 を太陽中心の座標系で観察するが、視野の木星を中心に捉える視点とし、彗星の軌道を太陽中心の座標系でのものとする。これにより、木星の重力に捉えられ、その周りを絡みつくように運動する彗星が観察できた。従来、このような軌道変化を 3 次元 CG 化した例はなく、天文学的に極めて有効な成果となった。シーン 3 (写真 4) は、stage 2 を木星中心の座標系で観察するもので、木星から見た彗星の軌道および運動が観察できる。

(2) 彗星の特徴の表現 (シーン 4, 5)

発見後の観測によって明らかになった彗星の外観の特徴を表現した。具体的には、核の分裂や並び、およびその長さの変化や彗星の尾などを可視化した。シーン 4 (写真 5) は、stage 3 を木星中心の座標系で観察するもので、木星衝突までの約 3 年間を表現した。一度目の木星への最接近、地球からの発見、そして衝突に至る過程を可視化した。シーン 5 (写真 6) は、一度目の木星への最接近時に木星の潮汐力により核が分裂した様子を表現した。彗星の核に働く力を矢印で表現し、分裂現象を模式的に表現した説明的なシーンとした。

(3) 彗星の木星への衝突の表現 (シーン 6)

彗星の最後の特徴である木星への衝突を表現したシーン 6 (写真 7) では、いくつかの代表的な視点を考え、各視点から衝突現象がどのように見えるかを映像化した。具体的な視点としては、地球方向からの視点 (この視点では衝突地点は直接見ることができない)、宇宙探査衛星ガリレオ (米) からの視点 (木星の昼夜の境が中心に見え、衝突箇所も確認できる)、彗星か

らの視点 (観察者も彗星の核といっしょに衝突していく) である。現象自体は計算機内に統一座標系で一意に記述され、それぞれの視点の位置の制御を適切に行うことで上記の各映像化を行った。

4. 開発環境

本システムには、GWS である IRIS Crimson + Reality Engine を使用した。3 章で述べた実験では、1 秒当たり 10 フレーム程度の描画を行うことができる。

実験例で生成した CG 映像は 1994 年 7 月に名古屋市科学館プラネタリウムで使用され、一般の多くの人々に対する解説に利用された。また、CG 映像のビデオは天文学会などを通じて希望する研究者にも配布され、この映像の有用性を示している。さらに、生成した CG 映像の静止画および動画の一部は名古屋大学の WWW (World Wide Web) サイトに置かれ、インターネットを介して世界中に公開されている (1995 年 5 月現在)。

5. むすび

本文では、従来行われていなかったインターネット上に散在する各種マルチメディア情報を統合し、それをもとに対話的に自由な 3 次元 CG アニメーションを生成することが可能なシステムについて述べた。また、本システムをシューメーカー・レビー第 9 彗星と木星との衝突現象に適用し、システムの有効性を示した。世界各地でインターネット、CD-ROM などの最新のメディアを介して公開される時々刻々正確なものとなっていく観測データやシミュレーション結果にもとづいた 3 次元 CG アニメーションを即座に生成して、さらにインターネット上へ還元することによって、現象の把握がより容易なものとなった。

今後の課題としては、以下の事項が挙げられる。

(1) 1 データを構成するサンプル数の問題

これまで使用したものは、比較的細かなサンプリングによって観測されたデータが多かったが、もし、少ないデータのみを有効に利用するためには、線形近似では限界がある。例えば、さらに高次のデータ補間やモデル化などにより観測データを加工する必要が生じる可能性は高い。また、観測データなどに含まれるノイズの影響についても、あらかじめフィルタ処理するなどの考慮が必要であろう。

(2) 科学教育への応用

一般に科学教育において最新データを利用した CG 映像化は大きな教育効果が期待されることから、イン

ターネットなどの最新情報メディアを有効に利用する方法の確立が必要である。さらに、仮想現実感やマルチメディアなど対話性を含む技術の導入が、今後の科学映像には重要であると考えられる。

最後に、本システムにより制作した木星への彗星の衝突アニメーションは第36回科学技術映像祭において、科学技術庁長官賞を受賞した。

貴重な彗星軌道の解析結果を提供して下さった郵政省通信総合研究所の吉川真博士、天文学的見地から様々なアドバイスをいただいた名古屋市科学館の北原天文掛長、毛利、鈴木両学芸員、日頃から御討論いただいた名古屋大学工学部および情報文化学部の皆様に感謝致します。また、その他貴重なデータを使用させていただいた各方面の関係者の皆様に感謝致します。本研究の一部は文部省科研費および、(財)人工知能研究助成による。

〔参考文献〕

- 1) 国立天文台(編):“理科年表”,丸善(1994)
- 2) 長沢工:“天体の位置計算”,地人書館(1985)
- 3) Yale Bright Star Catalog 5th Rev. Ed (Hoffleit & Warren), 1991 (CD-ROM “Selected Astronomical Catalog”より, NASA Goddard Space Flight Center)
- 4) 特集「木星に衝突する彗星」,日本惑星科学会誌, 2, 4, pp. 164-192 (1993)
- 5) 特集「シューメイカー・レビー第9彗星の木星衝突」,日本惑星科学会誌, 3, 4, pp. 232-291 (1994)
- 6) Comet Shoemaker-Levy 9, Science, **267**, 5202 (1995)
- 7) 吉川真:“彗星の軌道運動”,日本惑星科学会誌, 2, 4, pp. 164-172 (1993)
- 8) D. Bruton, J. Harper: “Frequently Asked Questions about the Collision of Comet Shoemaker-Levy 9 with Jupiter”, 1994-07-13, <ftp://tamsun.tamu.edu/pub/comet> (日本語版「彗星と木星の衝突についてのFAQ」, <ftp://sasun11.kusastro.kyoto-u.ac.jp/usr3/pub/shoji>)

とうかい しょうご
東海 彰吾 平成3年,名古屋大学工学部情報工学科卒業。平成5年,同大学博士課程前期課程修了。同後期課程に進学し,現在に至る。CGにおける自然物の質感表現,現象の可視化に関する研究に従事。工学修士。

やすだ たかみ
安田 孝美 昭和57年,三重大学工学部電気工学科卒業。昭和62年,名古屋大学大学院博士課程修了。同年,同大学工学部情報工学科助手。平成5年,同大学情報文化学部助教授となり現在に至る。この間,日本学術振興会特別研究員(昭和61年)。CG,VR,医用画像の3次元表示とその応用に関する研究に従事。工学博士。

よこい しげき
横井 茂樹 昭和52年,名古屋大学大学院博士課程修了。同年,同大学助手。昭和53年,三重大学助教授。昭和57年,名古屋大学工学部情報工学科助教授。平成5年,同教授を経て,現在,同大学情報文化学部教授。画像処理,CGの基本手法とその医学応用に関する研究に従事。工学博士。

とりわけじゅんいちろう
鳥脇 純一郎 昭和42年,名古屋大学大学院博士課程修了。同年,同大学助手。昭和45年,同助教授。昭和49年,名古屋大学大型計算機センター助教授。昭和55年,豊橋技術科学大学情報工学系教授。昭和58年,名古屋大学工学部電子工学科教授を経て,昭和60年より,同情報工学科教授。パターン認識,画像処理,CGおよび,それらの医学応用などの研究に従事。工学博士。正会員。