

パソコンでできる

天体の軌道運動の3次元シミュレーション

吉川 真, 木村 和宏

〈通信総合研究所鹿島宇宙通信センター 〒314 茨城県鹿島郡鹿島町平井 893-1〉

e-mail: makoto@crl.go.jp

天体の軌道運動というものは、現代の天文学の中ではあまり人気のない分野である。その理由としては、本に書かれていることを読んで理解するという手段しかないということがあげられる。ここでは、軌道運動を身近にあるパソコンを用いて3次元の画像として「眺める」方法を紹介する。このことで、より多くの人に天体の軌道運動というものを体験し楽しんでもらいたい。

1. 今、時代は3次元……

最近、ランダムドットとかステレオグラムと呼ばれる立体視の本が流行している。これは、一見するとランダムな点の集まりや意味もないような模様が描かれているだけなのであるが、じっと見ていると急に立体映像が紙面上に浮かび上がるのである。なかなか立体が浮かび上がらない人もいるようであるが、いったん立体が見えるとあたかも実物が目の前に存在しているようにさえ思えてくる。実際、見る角度を少しだけ変えてみると、それにつれて立体像も紙面上を動く（ただし、本物の立体を見る場合とは異なった動きではあるが）。そして目の焦点をちょっとずらすと、立体はふっと消えてしまうのである。

さて、よく知られていることであるが、このような最新の立体視が出現する以前から、立体視というものは存在していた。この「古典的」立体視の代表として、2つの図を並べてそれぞれの目で別々の図を見るものがある。その1例を図1に示す。これは、立方体の輪郭を描きその中心に点を打ったものである。紙面を目線に対して垂直にし、

目から30～50 cm 離して右目で右の図を左目で左の図を見る（平行法という）と立方体が浮き上がってくるはずである。どうしてもうまくいかないときには、2つの図の間に堅めの紙などの仕切を置いてみると見やすくなる。

図1がうまく見えるようになったら、図2に挑戦していただきたい。この図は、中心に太陽があり内側から木星、土星、天王星、海王星、冥王星の軌道および大きな軌道を持つ小惑星5145（仮符号は1992 AD）の軌道を示したものである。立体視ができれば、冥王星や小惑星の軌道が他の惑星の軌道に対して傾いている様子がわかるであろう。

さらに、図3および図4により複雑な図を示す。図3には水星から火星までの惑星と5個の特異な軌道を持つ小惑星が描かれている。この図に描かれている小惑星は、1580, 2101, 2102, 3200, 3752という確定番号を持つものであるが、いずれも軌道の離心率や傾斜角が大きいものである。立体視をすれば、軌道が非常に入り組んでいるようすがわかる。また、図4には水星から木星までの惑星の軌道とある時刻での小惑星の位置を示した。ここでは1番から2000番までの小惑星がプロットしてあるが、小惑星の分布が実は太陽をとりまく巨大なドーナツ状をしていることがわかると思

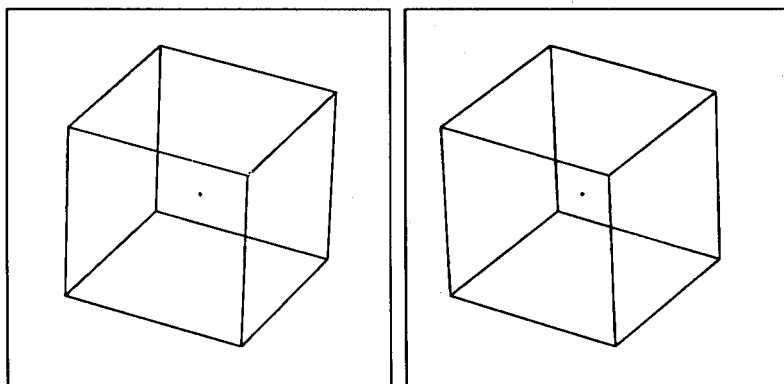


図1 立方体とその中心にある点
(立体視)

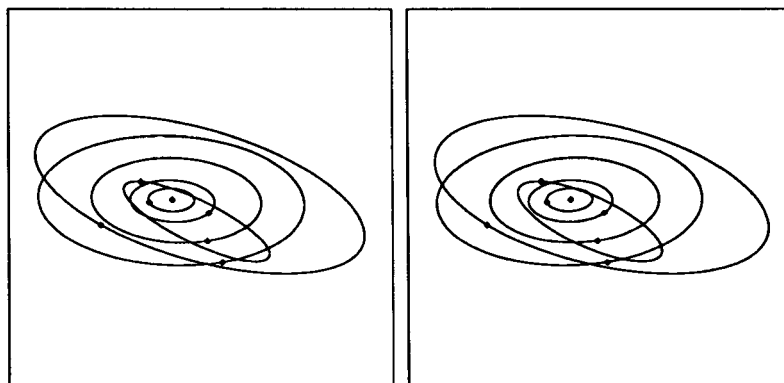


図2 木星から冥王星までの惑星の軌道と大きな軌道を持つ小惑星の軌道 (立体視)

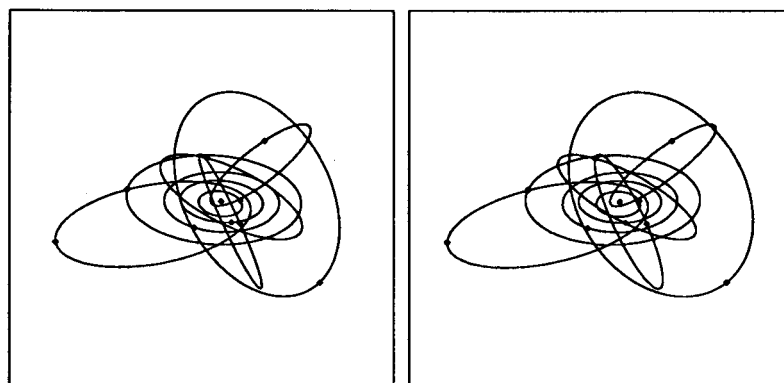


図3 水星から火星までの惑星の軌道と5つの特異小惑星の軌道 (立体視)

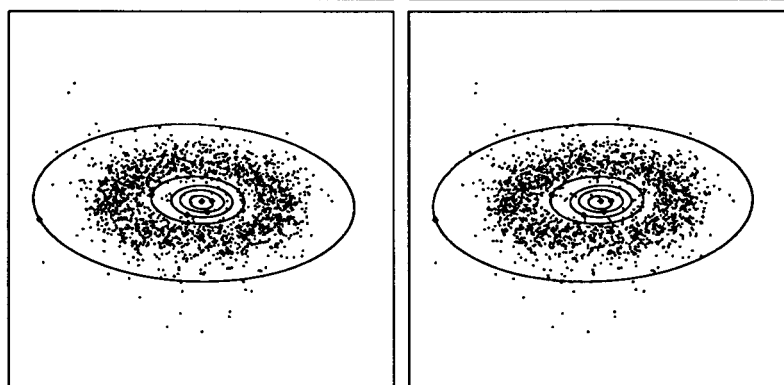


図4 水星から木星までの惑星の軌道と2,000個の小惑星(立体視)

う。

このように、天体の分布や軌道を直観的に理解するためには古典的な立体視でも十分に役に立つ。ただし、図1から図4は2つの図を左右それぞれで目で見なければならず、少し練習が必要なの人もいることであろう。楽に立体視するために、立体視用のビューワなどの器具もある。さらに、どこかで見たことがあると思うが、2つの図をたとえば赤と青のように色を変えて重ねて描き、それを赤青のセロファン眼鏡を通して見るという方法もある。このやり方ならば左右の目の視力にかなりの差がない限り手軽に立体視ができる。この方法に‘ハイテク’を導入したものが遊園地などにある3次元の映画である。

ここでは、この赤青のセロファン眼鏡を用いた古典的な立体視をパソコンを用いて行い、太陽系天体や地球の周りの人工衛星の軌道や運動を立体的に見ることについて解説する。立体的に眺めることで、天体の軌道や運動というものについて理解し興味をもってもらえれば幸いである。[小惑星の軌道や運動の軌跡の立体視については、参考文献(1)も関連する記事が掲載されている。]

2. 原理は簡単……

さて、図1から図4に示した立体視の原図を作る方法であるが、その原理はいたって簡単である。要するに、物体を平面に投影した図を右目と左目のそれぞれの場合について描けばよいのである。

改めて説明するまでもないことではあるが、念のため簡単に解説しておこう。

ここでは、図5のように座標系 $x-y-z$ をとることとする。つまり、描くべき物体が原点付近にあり、それを x 軸の方向から眺めている場合を考える。物体から目までの距離を L (これは紙面や画面と目との距離にも対応する)、左右の目の間隔を $2S$ とし、目は xy 平面内にあるとする。すると右目 I_1 と左目 I_2 の座標はそれぞれ $(L, S, 0)$ と $(L, -S, 0)$ となる。これら I_1 および I_2 から見た物体上の点 P の yz 平面へ投影された位置をそれぞれ P_1, P_2 とすると、点 P が物体上を動くときの P_1 と P_2 の軌跡を描けば図1のような立体視の図が描けるのである。

点 P_1 および P_2 の座標を求めるのは簡単である。空間図形の知識を用いるならば、直線 PI_1 や PI_2 と yz 平面との交点を計算すればよいし、初歩的には三角形の相似関係を使って求めることができる。ここでは、点 P の座標を (x', y', z') とし点 P_1, P_2 の座標をそれぞれ $(0, y_1, z_1), (0, y_2, z_2)$ として計算結果を示すと、

$$y_1 = \frac{Ly' - Sx'}{L - x'}, \quad z_1 = \frac{Lz'}{L - x'} \quad (1)$$

$$y_2 = \frac{Ly' + Sx'}{L - x'}, \quad z_2 = z_1 \quad (2)$$

となる。従って、 y を横軸、 z を縦軸として P_1, P_2 のつくる図形を描けば立体視の図が得られることになる。ここで、 L や S の値はたとえば $L=50$

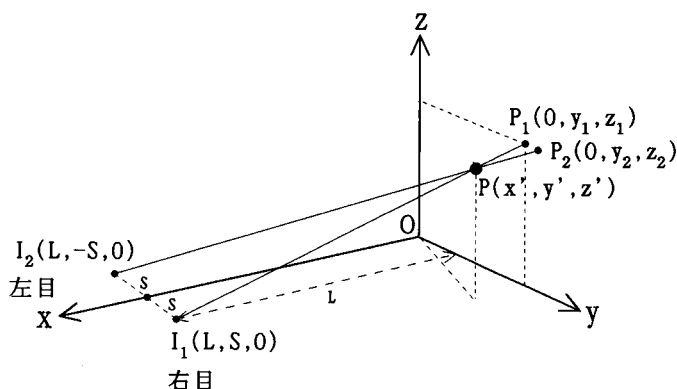


図5 座標

cm, $S=3$ cm 程度にとる。

ところで、物体を立体的に見るときには、どの方向から見るかということがパラメータとしてはいつてくる。ここでは、物体を地球儀にたとえた場合、経度 θ 度、緯度 ϕ 度から見た場合の図を描くことを考える。つまり、図5において x 軸を経度 θ 、緯度 ϕ の方向に移動した場合を考えるわけであるが、この座標変換で座標 (x, y, z) は、

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3)$$

で計算される (x', y', z') に変換される。ここでは、まず xy 平面を z 軸の周りに θ 度回転させ、次に新しい y 軸の周り zx 平面を $-\phi$ 度回転させる変換を行っている(右手系で見た場合)。この変換でできた新しい座標系を改めて図5の x - y - z 座標とみなして、上で述べたようにして図を描けばよい。

まとめてみると、次のような手順となる。

- (1)描きたい図形の座標 (x, y, z) を求める。[ここでは全体のスケールに注意する。つまり、図1のような数センチメートル四方の図やパソコンのディスプレイ画面などそれぞれの場合に応じて全体のスケールを縮小したり拡大したりしておく。センチメートル単位の実寸で求めておくのがよい。]
- (2)次に図形を眺める方向 θ と ϕ をきめ、(3)の式を用いて (x, y, z) 座標から (x', y', z') の値を求める。
- (3)最後に、(1)式および(2)式を用いて、 P_1 と P_2 の値を求め、右目と左目で見た図をそれぞれ描く。

3. パソコンにプログラムしてみよう…

以上述べてきたように、描きたい図形の座標データさえあれば、(1)から(3)の式を使ってデータを変換して図を描けばよい。データの数が少ない

ければ電卓で計算して手で図を描くこともできるが、データ数が多いとそうもしていられないので、ここでパソコンの出番となる。

もし、図1から図4で示したような2つの図を描いて立体視をすればよいのならば、ここまで書いてきたことだけで十分であろう。あとは、表示だけの問題であり、画面上でもプリンターにでもいいから図を描いて出力するプログラムを作ってもらえばよい。実際、図1から図4もそのようにして描いたものである。

しかし、どうせパソコンを使うのなら2つの図形を2色の色を用いて重ねて描き、それをセロファン眼鏡を通して立体視する方法に挑戦してほしい。そうすると、ここで示した図形のような「静止画」だけでなく、天体が動いているようすも立体的に見ることができるのである。もちろん、計算量は多くなるわけであるが、計算はパソコンにさせるわけであるから問題はない。ただし、いろいろ工夫が必要であるので、パソコンでグラフィックスをするのが好きな人のみにお勧めする。

ここでは、グラフィックスの細かい点までは解説できないが、セロファン眼鏡を使った立体視のプログラムを作る上での注意点についていくつか触れておくことにする。

まず、画面上に右目で見た図である P_1 の軌跡を赤で、また左目で見た図である P_2 の軌跡を緑で描く。もちろん色は逆でもいいし他の色を使ってもよいが、以下の解説はこの色の組み合わせになっていることを前提とする。ここで問題となることは、赤の図形と緑の図形が重なった場合である。このときは両方の色が見えないといけなないので、ここでは黄色でプロットしなければならない。パソコンの機種によっては、図形を重ねて描いたとき自動的に重なった部分の色を変えるようにできるものがあるが(たとえばFMRのベーシック)、そうっていない場合も多いので(PC98など)、工夫が必要である。この点が最も難しいところである。たとえば、PC98のベーシックでは色の論理

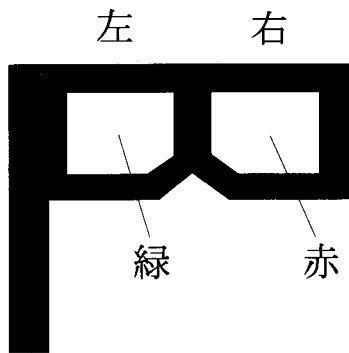
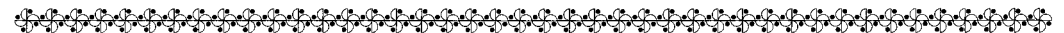


図6 セロファン眼鏡の例

和 (or) をとる命令があるが、この命令をうまく活用してプログラムを作る必要がある。

また、天体の軌道を描いてその軌道上に天体が動いている様子を図示するためには、天体は描いては消すことを繰り返すが、軌道の方はそのまま残す必要がある。このためには、たとえば同じ赤色を2つの色番号に割り当てておき、軌道を描くときと天体を描くときでは同じ赤でも異なった色番号の赤を用いるなどのやり方がある。このあたりのことは、用いるパソコンやプログラム言語に依存するので、各自で工夫してもらいたい。

プログラムの次に必要となるものはセロファン眼鏡である。図6にその1例を示すが、厚紙で眼鏡の枠を作り、緑と赤のセロファンを張り付けるだけでよい。注意することとしては、パソコンの画面に背景を黒として赤と緑で表示した場合には、赤いセロファンを通してみると赤い図形が見え、緑のセロファンを通してみると緑の図形見えるということである。これは、白い紙の上に赤と緑の図形を描いた場合とは逆になる。従って、上記のような色のとり方をした場合には図6のように右目が赤で左目が緑の眼鏡を作ることになる。また、場合によってはセロファンの色とディスプレイの色とがうまく一致せず、片方の目で2つの図形が見えてしまい立体視が困難になるときがある。そのような場合には、ディスプレイの色を調整したりセロファンを何枚か重ねて、それぞれの色で見て片方の図形のみが見えるようにする

必要がある。

さて、プログラムとセロファン眼鏡ができればあとは表示すべきデータを作るのみとなる。図1のような図形データならば比較的簡単であろうが、図2から図4のような天体の軌道データを x - y - z の座標で示すためには、天体の軌道運動についての知識が必要である。ここでは、紙面がないので天体の軌道や運動についての解説はできないが、たとえば参考文献(2)などを参照してほしい。

4. プログラムをつくるのが面倒な人のために……

立体視はしたいがプログラムやデータを作るのは大変だという人には、我々の研究室で試作したプログラムと表示データを利用させていただきたい。このプログラムは通信総合研究所の一般公開のために作ったものを改良したものである。このプログラムは太陽系天体（惑星・衛星・小惑星・彗星）や地球の周りの人工衛星についてその軌道と軌道上を運動する天体を表示するものである。このプログラムを用いると天体の軌道の形だけでなく運動の様子もわかる。

まず、立体視のプログラムであるが、基本的にはここで説明したように左右の目で見た図形を赤と緑で表示するものであるが、次のような機能を持たせてある。

- (a) 視線の方向や視線の周りの角度の変更
 - (b) 図形の拡大や縮小
 - (c) 表示速度の変更・表示の停止
 - (d) 運動の軌跡の表示
 - (e) 中心位置の変更（太陽の周りの運動の場合）
 - (f) 自転を示す点の表示（惑星の周りの運動の場合）
- ここで、(e)の中心位置の変更というのは、原点をずらすものであるが、たとえばあたかも太陽系が完全にディスプレイの外に浮かんでいるように見せることができる。また、(f)は惑星の周りの衛星の運動を示す場合に惑星の表面で点を動かすことで惑星の自転の速度もわかるようにしたものであ

る。また、パソコンなので表示速度が遅いときのためにそなえて、上記の機能はほとんどないが表示速度を速くする別のプログラムも準備している。

また、表示するデータとしては、今のところ次のようなものをそろえている。

- ・惑星（9個）
- ・4大小惑星や特異小惑星
- ・地球に接近した小惑星トータチス
- ・カイパーベルトに対応する小惑星
- ・小惑星4,500個の分布
- ・彗星（いろいろな遠日点距離を持つもの）
- ・ハレー彗星やスィフトタットル彗星
- ・地球から冥王星までの各惑星の衛星
- ・地球の周りの人工衛星

（静止軌道、モルニア軌道、GPS衛星）

- ・地球の周りのごみ（スペースデブリ）

この他、興味ある天体があれば適宜データをそろえていくつもりである。このように、内容は興味深かつ教育的なものでもあるので、関心のある方は是非とも利用していただきたい。

5. さいごに……

現在は、映像文化が進み我々はかなり高品質の映像に日々ふれている。しかし、今までは映像は平面的なものが主流であった。これからは立体映像というもの身近になる時代を迎えることになる。実際、最近3Dとかヴァーチャル・リアリティなどと言った言葉を盛んに耳にするようになってきている。ここで紹介した軌道の3次元表示は、そのようなハイテクとは程遠い旧式の立体視である。しかし、実際にプログラムを動かして眺めてみると、天体の運動が予想以上にリアリティックに見えることに驚かされる。

ここで紹介したプログラムは通信総合研究所の一般公開以外に、鹿島祭（茨城県鹿島町の夏祭）や国立天文台（三鷹）の一般公開でも展示し、かなり好評であった。特に、軌道のことなど何もわからない小さな子供がセロファン眼鏡を通して見て、一生懸命軌道を手でつかもうとしていたことが印象に残っている。もし、この文章を読んで興味を持った人は是非、軌道運動の立体視を試みていただきたい。きっと、天体の運動の面白さを感じていただけることと思う。

参 考 文 献

- 1) 吉川 真：「小惑星の分布と運動」，日経サイエンス，1992年10月号
- 2) 長沢 工：天体力学入門（上），地人書館

●プログラムの問い合わせと請求方法について

本文で述べました3次元軌道表示のプログラムとデータを希望者には無料で配布します（セロファン眼鏡は自作して下さい）。プログラムはPC 98のパソコン（MS-DOS上）で動きます。ただし、ラムディスクまたはハードディスクがある方が適しています。ご希望の方は次のものを下記までお送り下さい。

- (1) 2HDのフロッピーディスク2枚。
ディスクは3.5，5インチのどちらでもいいですが、MS-DOSでフォーマットをしておいて下さい。
- (2) 郵送の時にディスクを保護する厚紙など。
（必要な場合のみ）
- (3) 上記のディスクを送るための返信用の封筒。
表には送り先の住所と名前を明記し、上記のディスク2枚と厚紙等の重量に見合った切手を貼っておいて下さい。

プログラム等についてのお問い合わせも下記まで、郵便、FAX，またはe-mailをお願いします。

〒314 茨城県鹿島郡鹿島町平井 893-1

通信総合研究所 鹿島宇宙通信センター
宇宙制御技術研究室
吉川 真

FAX：0299-84-4129

e-mail：makoto@crl.go.jp