

情報処理演習Ⅱ グループ課題 5

連星運動のシミュレーション

16 班

2024-01-01

役職	学籍番号	名前	備考
リーダー	BQ23107	窪田 大輝	
プログラムリーダー	BQ23008	脇家 優太	
企画係	BQ23071	平川 奨	
連絡係	BQ23060	塚田 水月	
書記 1	BQ23110	信賀 晃	欠席
書記 2	BQ23103	山田 泰我	欠席

1 概要

1.1 連星とは

連星とは、2つの恒星が互いに万有引力により結びつき、それぞれ楕円軌道を描くものである。

1.2 連星の運動方程式

Fig. 1 連星の模式図

図 1 に連星の模式図を示す。質点 1,2 をデカルト座標系で表す。それぞれの質点 1,2 に対して、万有引力の法則より質点 1 にかかる力は質点 2 から、質点 2 にかかる力は質点 1 からとなる。

$$|\vec{F}_{1\rightarrow 2}| = |\vec{F}_{2\rightarrow 1}| = G\frac{m_1m_2}{r^2} \quad \vec{F}_{1\rightarrow 2} = -\vec{F}_{2\rightarrow 1}$$

質点 1 の位置ベクトル $\vec{r}_1 = (\vec{x}_1, \vec{y}_1)$ 、質点 2 の位置ベクトル $\vec{r}_2 = (\vec{x}_2, \vec{y}_2)$ とする。

運動方程式を立てると、

$$\begin{cases} m_1\ddot{\vec{r}}_1 &= \vec{F}_{1\rightarrow 2} \\ m_2\ddot{\vec{r}}_2 &= \vec{F}_{2\rightarrow 1} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} m_1\ddot{x}_1 &= (\vec{F}_{1\rightarrow 2})_x \\ m_1\ddot{y}_1 &= (\vec{F}_{1\rightarrow 2})_y \\ m_2\ddot{x}_2 &= (\vec{F}_{2\rightarrow 1})_x \\ m_2\ddot{y}_2 &= (\vec{F}_{2\rightarrow 1})_y \end{cases}$$

ここで、質点 1 と質点 2 の位置ベクトルの差を

$$\vec{r}_{12} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$$

とすると, $F_{1 \rightarrow 2}^{\vec{}} / r_{12}^{\vec{}}$ となり, 単位ベクトルを \vec{e} とすると

$$F_{1 \rightarrow 2}^{\vec{}} = |F_{1 \rightarrow 2}^{\vec{}}| \vec{e}$$

ベクトルの規格化 $\vec{e} = \frac{\vec{r}_{12}}{|\vec{r}_{12}|}$ を行い, $|\vec{F}_{1 \rightarrow 2}| = |\vec{F}_{2 \rightarrow 1}| = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ とすると

$$F_{1 \rightarrow 2}^{\vec{}} = |F_{1 \rightarrow 2}^{\vec{}}| \frac{\vec{r}_{12}}{|\vec{r}_{12}|} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \frac{\vec{r}_{12}}{|\vec{r}_{12}|} = G \frac{m_1 m_2}{r^3} (\vec{r}_2 - \vec{r}_1)$$

よって

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = G \frac{m_1 m_2}{r^3} (x_2 - x_1) \\ m_1 \ddot{y}_1 = G \frac{m_1 m_2}{r^3} (y_2 - y_1) \end{cases}$$

また, 質点 2 に働く力は質点 1 に働く力は逆向きであるから,

$$\begin{cases} m_2 \ddot{x}_2 = -G \frac{m_1 m_2}{r^3} (x_2 - x_1) \\ m_2 \ddot{y}_2 = -G \frac{m_1 m_2}{r^3} (y_2 - y_1) \end{cases}$$

となる.

1.3 重心

重心は, 質量の重み付き平均で表される. 質点 1,2 の重心を \vec{r}_g とすると (考え方: 重心周りのモーメントは 0 になる),

$$\vec{r}_g = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2}{m_1 + m_2}$$

この時 x,y 成分はそれぞれ

$$\begin{cases} (\vec{r}_g)_x = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2} \\ (\vec{r}_g)_y = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2}{m_1 + m_2} \end{cases}$$

2 検証

以下の図 2 のプログラムが検証に用いたプログラムである. 中点法を用いている.

```
/*
```

```
情報処理演習 II グループ課題 5-2
```

```
連星シミュレーション
```

```
*/
```

```
#include<stdio.h>
```

```
#include<math.h>
```

```
const double m1 = 1.0; // 質点 1 の質量
```

```
const double m2 = 2.0; // 質点 2 の質量
```

```

const double G = 10.0; // 描画しやすいような値にする

double r(double x1, double y1, double x2, double y2) { //質点 1 と質点 2 の距離
    return sqrt(pow(x1-x2, 2) + pow(y1-y2, 2));
}

double grax(double x1, double y1, double x2, double y2) { //質点 1 と質点 2 の x 方向の引力
    return G*m1*m2*(x2-x1) / (pow(r(x1, y1, x2, y2), 3));
}

double gray(double x1, double y1, double x2, double y2) { //質点 1 と質点 2 の y 方向の引力
    return G*m1*m2*(y2-y1) / (pow(r(x1, y1, x2, y2), 3));
}

double cgx(double x1, double y1, double x2, double y2){ //重心点を表す x 方向の関数
    return (m1*x1+m2*x2)/(m1+m2);
}

double cgy(double x1, double y1, double x2, double y2){ //重心点を表す y 方向の関数
    return (m1*y1+m2*y2)/(m1+m2);
}

int main(){

    double t0,t1,x10,x20,vx10,vx20,y10,y20,vy10,vy20,x1,x2,vx1,vx2,y1,y2,vy1,vy2,vmax,dt;
    double k1x,k1y,k1vx,k1vy,k2x,k2y,k2vx,k2vy;
    int i,nint;

    t0 = 0.0; //初期時刻
    t1 = 30.0; //終了時刻

    x10 = 2.0;
    y10 = 0.0;
    vx10 = 1.0;
    vy10 = -2.0;

    x20 = -1.0;
    y20 = -1.0;
    vx20 = -1.0;
    vy20 = 1.0;

```

```

x1 = x10;
x2 = x20;
y1 = y10;
y2 = y20;

vx1 = vx10;
vx2 = vx20;
vy1 = vy10;
vy2 = vy20;

dt = 0.001; //中点法の時間の刻み幅
nint = (t1-t0)/dt;

FILE *fp;
fp = fopen("binary_star_simulation.dat", "w");

for(i=1; i<=nint; i++){
    if(i%300 == 0){
        fprintf(fp,"%f %f %f %f %f %f\n", x1, y1, x2, y2, cgx(x1, y1, x2, y2), cgy(x1, y1, x2, y2));
    }
    k1x = x1 + dt/2*vx1;
    k1y = y1 + dt/2*vy1;
    k1vx = vx1 + dt/2*(grax(x1, y1, x2, y2))/m1;
    k1vy = vy1 + dt/2*(gray(x1, y1, x2, y2))/m1;

    k2x = x2 + dt/2*vx2;
    k2y = y2 + dt/2*vy2;
    k2vx = vx2 + dt/2*(grax(x2, y2, x1, y1))/m2;
    k2vy = vy2 + dt/2*(gray(x2, y2, x1, y1))/m2;

    x1 = x1 + dt*k1vx;
    y1 = y1 + dt*k1vy;
    vx1 = vx1 + dt*(grax(k1x, k1y, k2x, k2y))/m1;
    vy1 = vy1 + dt*(gray(k1x, k1y, k2x, k2y))/m1;

    x2 = x2 + dt*k2vx;
    y2 = y2 + dt*k2vy;
    vx2 = vx2 + dt*(grax(k2x, k2y, k1x, k1y))/m2;
    vy2 = vy2 + dt*(gray(k2x, k2y, k1x, k1y))/m2;
}

```

```

}

fflush(fp);
fclose(fp);

// 新たに gnuplot のプロセスを立ち上げるポインタを定義
FILE *gp;
gp = popen("gnuplot -persist", "w");

// Gnuplot に送るコマンドを定義
char *gnuplotscript =\
    "set terminal gif animate delay 5 optimize size 640,480\n"
    "set output \"binary_star_simulation.gif\"\n"
    "set title \"binary star simulation\"\n"
    "do for [i=0:99] {\n"
    "plot [-12:3][-6:5]\"binary_star_simulation.dat\" every ::i::i using 1:2 w p pt 7 ps 1 title\n"
    "        \"binary_star_simulation.dat\" every ::i::i using 3:4 w p pt 7 ps 1 title\n"
    "        \"binary_star_simulation.dat\" every ::i::i using 5:6 w p pt 7 ps 1 title\n"
    "        \"binary_star_simulation.dat\" using 1:2 w l title \"Point mass 1 with li\n"
    "        \"binary_star_simulation.dat\" using 3:4 w l title \"Point mass 2 with li\n"
    "        \"binary_star_simulation.dat\" using 5:6 w l title \"The center of gravit\n"
    "}\n"
    "unset output\n"; //明示的に終了

// Gnuplot のプロセスにコマンドを送る
fprintf(gp, "%s", gnuplotscript);

// プロセスを閉じる
pclose(gp);

return 0;
}

```

Fig.2 連星のシミュレーションを行うプログラム

以下は上記のプログラムの内、アニメーションを作成するためのプログラムを抜粋したものである。逐一ポインタから渡すのは面倒であるし、コードが読みにくくなる。それを解消するために、ポインタ `gp` に渡す文字列を定義している。この文字列は `gnuplot` のコマンドと同様である。以下がそのプログラムの流れを説明したものである。

1. `dat` ファイルに必要なデータを書き出す

```
FILE *fp;
```

- ```
fp = fopen("binary_star_simulation.dat", "w");
```
- と記述し、`fprintf(fp,~~~)` でポインタを介して `binary_star_simulation.dat` にデータを書き出す.
2. `gnuplot` のコマンドを文字列として定義しておく.  
`FILE *gp;`  
`gp = popen("gnuplot -persist", "w");`  
と記述し、`fprintf(gp,~~~)` でポインタを介して `gnuplot` のコマンドを送る.
  3. `gnuplot` のコマンドをポインタに渡す. 渡した内容は以下の通りである.
    1. gif アニメーションを作成するための設定
    2. 繰り返しを用いてデータファイルをプロットするための設定これらを記述して実行し、gif アニメーションを作成する.

### 3 結果

図 3 に連星のシミュレーションの結果を示す.

Fig.3 連星のシミュレーションの結果

### 4 考察

質点 1 と質点 2 が直線とは程遠い動きをしていても、重心はほぼ直線を描いていることがわかる. 検証の章で記述したプログラムの通りに、中点法の刻み幅を  $dt = 0.001$  とすれば連星の挙動が十分わかることが明らかとなった. しかし、そのままのデータを描画すると、データが多すぎて過剰なので、`if(i%300 == 0)` として 300 回に 1 回のデータを描画するようにした. この描画頻度であっても、十分に挙動を確認することは可能であった. また、アニメーションを描画する際には、逐一 `gnuplot` のプロセスにデータを送るのではなく、一度 `dat` ファイルに格納したファイルを描画するほうが効率的であると感じた. 加えて、今回は重心が直線となることを確認したいため、重心の軌跡を線分として描画したほうが直感的であると考え、そのようにした.