

1 常微分方程式

1.1 初期値問題

d 個の $[t_0, \infty) \times \mathbb{R}^d$ 上の関数 $f_i : [t_0, \infty) \times \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ と d 次元ベクトル $\mathbf{u}^{(0)} = (u_1^{(0)}, \dots, u_d^{(0)})$ に対し,

$$\begin{cases} \frac{du_i}{dt} = f_i(t, u_1(t), \dots, u_d(t)) \\ u_i(t_0) = u_i^{(0)} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, d)$$

を満たす d 個の $[t_0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ 関数の組 $(u_1, \dots, u_d)$ を求める問題を, **初期値問題**と言う. これは, ベクトル値の関数

$$\mathbf{f} : [t_0, \infty) \times \mathbb{R}^d \ni (t, x_1, \dots, x_d) \mapsto (f_1(t, x_1, \dots, x_d), \dots, f_d(t, x_1, \dots, x_d)) \in \mathbb{R}^d$$

を用いれば

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \mathbf{f}(t, \mathbf{u}(t)) \\ \mathbf{u}(t_0) = \mathbf{u}^{(0)} \end{cases} \quad (1)$$

を満たす $\mathbf{u} : [t_0, \infty) \ni t \mapsto (u_1(t), \dots, u_d(t)) \in \mathbb{R}^d$ を求める事であると書ける.

1.2 高階の常微分方程式の初期値問題への帰着

初期値問題は 1 階の連立常微分方程式であるが, 現実の問題では, しばしば高階の常微分方程式が問題となる. 例えば, 質点の運動をシミュレーションしようとする場合でさえ運動方程式 $F = ma$ は, 位置 x に対する 2 階の常微分方程式

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F}{m} \quad (2)$$

である. 然しながら, これは次の様に 1 階の微分方程式の連立方程式, 即ち初期値問題に帰着できる.

例 1. 位置 x と速度 v を考えれば, 運動方程式 (2) は

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= v \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{F}{m} \end{aligned}$$

なる 1 階の連立常微分方程式となる. $\mathbf{u} = (u_1, u_2) = (x, v)$ とすれば, $\mathbf{f} = (f_1, f_2)$ を

$$f_1(t, x_1, x_2) := x_2, \quad f_2(t, x_1, x_2) := \frac{F}{m}$$

とおいて

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \mathbf{f}(t, \mathbf{u}(t))$$

と書ける. 具体的に書き下せば

$$\begin{cases} \frac{du_1}{dt} = u_2, & \frac{du_2}{dt} = \frac{F}{m}, \\ u_1(0) = x^{(0)}, & u_2(0) = v(0) \end{cases}$$

一般に高階の連立常微分方程式は, 次の様に, より高次の 1 階連立常微分方程式に帰着できる.

命題 1. m 階の d 次連立常微分方程式

$$\begin{cases} \frac{d^m \mathbf{u}}{dt^m} = \mathbf{f}(t, \mathbf{u}, \frac{d\mathbf{u}}{dt}, \dots, \frac{d^{m-1}\mathbf{u}}{dt^{m-1}}) \\ \mathbf{u}(t_0) = \mathbf{u}^{(0,0)} \\ \frac{d}{d\mathbf{u}} dt(t_0) = \mathbf{u}^{(1,0)} \\ \vdots \\ \frac{d^{m-1}\mathbf{u}}{dt^{m-1}}(t_0) = \mathbf{u}^{(m-1,0)} \end{cases}$$

は $d \times m$ 次元の 1 階の常微分方程式に帰着できる.

Proof. $\tilde{\mathbf{u}} := (\mathbf{u}, \frac{d\mathbf{u}}{dt}, \dots, \frac{d^{m-1}\mathbf{u}}{dt^{m-1}})$, $\tilde{\mathbf{u}}^{(0)} := (\mathbf{u}^{(0,0)}, \mathbf{u}^{(1,0)}, \dots, \mathbf{u}^{(m-1,0)})$ と置けば, 第 2—第 m 式は $\tilde{\mathbf{u}}(t_0) = \tilde{\mathbf{u}}^{(0)}$ と書ける.

一方,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{d^k \mathbf{u}}{dt^k} \right) &= \frac{d^{k+1} \mathbf{u}}{dt^{k+1}} \quad (0 \leq k < m-1) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{d^{m-1} \mathbf{u}}{dt^{m-1}} \right) &= \frac{d^m \mathbf{u}}{dt^m} = \mathbf{f}(\tilde{\mathbf{u}}) \end{aligned}$$

であるから, $\mathbf{g}_k(t, \mathbf{x}) = x_{k+1}$, $\tilde{\mathbf{f}} = (\mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_{m-1}, \mathbf{f})$ と置けば, 第 1 式は $\frac{d\tilde{\mathbf{u}}}{dt} = \tilde{\mathbf{f}}(t, \tilde{\mathbf{u}})$ と書けるので, 結局与式は次に帰着できる;

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{\mathbf{u}}}{dt} = \tilde{\mathbf{f}}(t, \tilde{\mathbf{u}}) \\ \tilde{\mathbf{u}}(t_0) = \tilde{\mathbf{u}}^{(0)} \end{cases}$$

□

1.3 初期値問題の解の存在

初期値問題 (1) に解が存在する為の十分条件が次で与えられる:

定理 1. 区間 $[t_0, T]$ において, $\mathbf{f}$ を空間に関する関数 $\mathbb{R}^d \ni \mathbf{y} \mapsto \mathbf{f}(t, \mathbf{y}) \in \mathbb{R}^d$ と見て一様にリプシッツ連続である時, 即ち, ある定数 L_0 が存在して任意の $\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2 \in \mathbb{R}^d$ と $t \in [t_0, T]$ について

$$\|\mathbf{f}(t, \mathbf{y}_1) - \mathbf{f}(t, \mathbf{y}_2)\| \leq L_0 \|\mathbf{y}_1 - \mathbf{y}_2\|$$

を満たすとき, $[t_0, T]$ で初期値問題の解が一意的に存在する, 即ち $\mathbf{u} : [t_0, T] \rightarrow \mathbb{R}^d$ で (1) を満たすものが存在する.

例 2. 例 1 においてばねに付いた重りの運動, 即ち, $F = kx$ の場合を考える.

$$f_1(t, x_1, x_2) = x_2, \quad f_2(t, x_1, x_2) = \frac{F}{m} = \frac{kx_1}{m}.$$

とおけば初期値問題であって, 特に

$$\begin{aligned} \|\mathbf{f}(t, \mathbf{y}) - \mathbf{f}(t, \tilde{\mathbf{y}})\| &= \left(\sum_{i=1}^2 (f_i(t, \mathbf{y}) - f_i(t, \tilde{\mathbf{y}}))^2 \right)^{1/2} \\ &= \left((y_2 - \tilde{y}_2)^2 + \left(\frac{ky_1}{m} - \frac{k\tilde{y}_1}{m} \right)^2 \right)^{1/2} \\ &\leq \max\left\{1, \frac{|k|}{m}\right\} ((y_2 - \tilde{y}_2)^2 + (y_1 - \tilde{y}_1)^2)^{1/2} \\ &= \max\left\{1, \frac{|k|}{m}\right\} \|\mathbf{y} - \tilde{\mathbf{y}}\| \end{aligned}$$

よって $L_0 = \max\{1, \frac{|k|}{m}\}$ でリプシッツ条件を満たす.

Proof. $T' := \min\{T, t_0 + \frac{1}{2L_0}\}$ とし, $[t_0, T']$ 上の $\mathbb{R}^d$ -値連続関数で $\mathbf{v}(t_0) = \mathbf{u}^{(0)}$ なるもの全体の成す線形空間 B 上に

$$\|\mathbf{v}\|_B = \sup_{t \in [t_0, T']} \|\mathbf{v}(t)\|$$

でノルムを定めれば B は完備ノルム空間になる.

この B 上の不動点定理に帰着することを示す.

B 上の写像 $\Phi: B \ni \mathbf{v} \mapsto \mathbf{w} \in B$ を $\mathbf{w}(t) = \mathbf{u}^{(0)} + \int_{t_0}^t \mathbf{f}(s, \mathbf{v}(s)) ds$ で定めると Φ はノルム $\|\cdot\|_B$ に対し縮小写像となることを示そう. Schwarz の不等式を用いて

$$\begin{aligned} \|\Phi(\mathbf{v}_1) - \Phi(\mathbf{v}_2)\|_B &= \sup_{t \in [t_0, T']} \|\Phi(\mathbf{v}_1)(t) - \Phi(\mathbf{v}_2)(t)\| \\ &= \sup_{t \in [t_0, T']} \|\mathbf{u}^{(0)} + \int_{t_0}^t \mathbf{f}(s, \mathbf{v}_1(s)) ds - (\mathbf{u}^{(0)} + \int_{t_0}^t \mathbf{f}(s, \mathbf{v}_2(s)) ds)\| \\ &= \sup_{t \in [t_0, T']} \left\| \int_{t_0}^t \{\mathbf{f}(s, \mathbf{v}_1(s)) - \mathbf{f}(s, \mathbf{v}_2(s))\} ds \right\| \\ &= \sup_{t \in [t_0, T']} \left(\sum_k \left(\int_{t_0}^t \{f_k(s, \mathbf{v}_1(s)) - f_k(s, \mathbf{v}_2(s))\} ds \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= \sup_{t \in [t_0, T']} \left(\sum_k \left(\int_{t_0}^{T'} 1_{[t_0, t]} \{f_k(s, \mathbf{v}_1(s)) - f_k(s, \mathbf{v}_2(s))\} ds \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ &\leq \sup_{t \in [t_0, T']} \left(\sum_k (t - t_0) \int_{t_0}^{T'} \{f_k(s, \mathbf{v}_1(s)) - f_k(s, \mathbf{v}_2(s))\}^2 ds \right)^{\frac{1}{2}} \\ &\leq ((T' - t_0) \int_{t_0}^{T'} \sum_k \{f_k(s, \mathbf{v}_1(s)) - f_k(s, \mathbf{v}_2(s))\}^2 ds)^{\frac{1}{2}} \\ &= ((T' - t_0) \int_{t_0}^{T'} \|\mathbf{f}(s, \mathbf{v}_1(s)) - \mathbf{f}(s, \mathbf{v}_2(s))\|^2 ds)^{1/2} \\ &\leq ((T' - t_0) \int_{t_0}^{T'} (L_0 \|\mathbf{v}_1(s) - \mathbf{v}_2(s)\|)^2 ds)^{1/2} \\ &\leq ((T' - t_0)^2 (L_0 \|\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2\|_B)^2)^{1/2} \\ &\leq (T' - t_0) L_0 \|\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2\|_B \end{aligned}$$

T' を $(T' - t_0)L_0 < 1$ なる様に採ったので, Φ は縮小写像である. よって, 不動点定理により Φ の不動点 $\mathbf{u}$ が一意に存在する. また, 不動点 $\mathbf{u}$ は

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}^{(0)} + \int_{t_0}^t \mathbf{f}(s, \mathbf{u}(s)) ds$$

を満たし, 故に微積分の基本定理により $\mathbf{u}$ は (1) を満たす.

$T' \neq T$ ならば $t_0 = T'$, $\mathbf{u}^{(0)} = \mathbf{u}(T')$ として同じ議論を繰り返せば良い. $\square$

例 3 (3 体問題). $\mathbb{R}^2$ 上での 3 つの天体の挙動は次の様に初期値問題に帰着できる. 各天体の座標を $\mathbf{P}_i = (x_i, y_i)$, 速度ベクトルを $\dot{\mathbf{P}}_i = (\dot{x}_i, \dot{y}_i)$, 加速度ベクトルを $\ddot{\mathbf{P}}_i = (\ddot{x}_i, \ddot{y}_i)$ ($i = 1, 2, 3$) とする. また各天体の質量を m_i , 重力定数を G とする.

天体 1 が天体 2 から受ける引力は其の重量の積 $m_1 m_2$ に比例し, 距離 $r_{12} := |\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2| = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$ の 2 乗に反比例する. 方向ベクトルは $\frac{\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1}{r_{12}}$ であるから, 結局天体 1 が天体 2 から受ける力は

$$\frac{G m_1 m_2}{r_{12}^3} (\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1)$$

他の天体についても同様である. 天体 i に掛かる力は他の 2 天体による引力の和であるので, 天体 i が受ける力の総和 $\mathbf{F}_i$ は

$$\mathbf{F}_i = \sum_{j: j \neq i} \frac{G m_i m_j}{r_{ij}^3} (\mathbf{P}_j - \mathbf{P}_i)$$

運動方程式 $\mathbf{F}_i = m_i \ddot{\mathbf{P}}_i$ に代入すれば,

$$\ddot{\mathbf{P}}_i = \sum_{j:j \neq i} \frac{Gm_j}{r_{ij}^3} (\mathbf{P}_j - \mathbf{P}_i)$$

成分表示に書き下せば

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i &= \sum_{j:j \neq i} \frac{Gm_j}{((x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2)^{3/2}} (x_j - x_i) \\ \ddot{y}_i &= \sum_{j:j \neq i} \frac{Gm_j}{((x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2)^{3/2}} (y_j - y_i) \end{aligned}$$

である. $\frac{d^2 \mathbf{P}_i}{dt^2} = \ddot{\mathbf{P}}_i$ とすれば, 2 階の常微分方程式だが.

座標と速度, 速度と加速度の間に $\frac{d\mathbf{P}_i}{dt} = \dot{\mathbf{P}}_i$, $\frac{d\dot{\mathbf{P}}_i}{dt} = \ddot{\mathbf{P}}_i$ なる関係があることを使えば, 1 次の微分方程式

$$\begin{aligned} \frac{dx_i}{dt} &= \dot{x}_i \\ \frac{dy_i}{dt} &= \dot{y}_i \\ \frac{d\dot{x}_i}{dt} &= \sum_{j:j \neq i} \frac{Gm_j}{((x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2)^{3/2}} (x_j - x_i) \\ \frac{d\dot{y}_i}{dt} &= \sum_{j:j \neq i} \frac{Gm_j}{((x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2)^{3/2}} (y_j - y_i) \end{aligned}$$

を得る. これは $\mathbf{u} = (x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, \dot{x}_1, \dot{y}_1, \dot{x}_2, \dot{y}_2, \dot{x}_3, \dot{y}_3)$ と

$$\begin{aligned} f_{2(i-1)+k}(t, \xi) &:= \xi_{6+2(i-1)+k} \\ f_{6+2(i-1)+k}(t, \xi) &:= \sum_{j:j \neq i} \frac{Gm_j (\xi_{2(j-1)+k} - \xi_{2(i-1)+k})}{((\xi_{2(j-1)} - \xi_{2(i-1)})^2 + (\xi_{2(j-1)+1} - \xi_{2(i-1)+1})^2)^{3/2}} \end{aligned}$$

($i = 1, 2, 3, k = 0, 1$) についての初期値問題と見なせる.

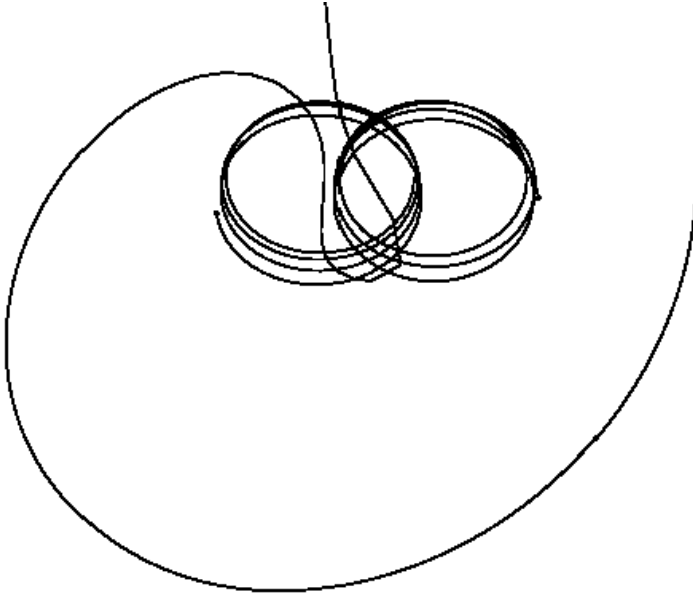


図 1: 連星系に進入した小天体の軌跡