

Nonlinear dynamics and chaos

2dayclean

2025/09/30

Contents

1	Flows on the Line	2
1.1	Flows on the line	2
1.2	Autonomous system	2
1.3	Fixed points and its stability	3
1.3.1	Population - growth	4
1.3.2	Linear stability analysis	4
1.4	Existence and Uniqueness	4
1.4.1	Impossibility of oscillation	5
1.5	As a Potential	5
2	Bifurcation	6
2.1	Bifurcation	6
2.1.1	As an Inverse function theorem	6
2.1.2	AS a Taylor series	6
2.2	Saddle-Nodoe Bifurcation	6
2.3	Normal Form Theory	7
2.4	Transcritical Bifurcation	7
2.5	Pitcfork Bifurcation	8
2.5.1	Supercritical Pitchfork	9
2.5.2	Subcritical Pitchfork	9
2.5.3	Example : moving bead on a rotating hoop	9
2.5.4	Nondimensionalization	9
2.5.5	Phase plane analysis	10
2.6	Insect Outbreak	10
3	Flows on the circle	10
3.1	Uniform oscillator	11
3.2	Nonuniform oscillator	11
3.3	Ghost and Bottleneck	11
3.4	Overdamped pendulum	12
3.5	Synchronization of fireflies	12
4	Linear Systems	13

1 Flows on the Line

1.1 Flows on the line

Flows on the line이란 $\dot{x} = f(x)$ 와 같은 one-dimensional dynamical system을 의미하며, 이를 **flow** 혹은 **vector field**라고 부른다.

Example

$\dot{x} = \sin(x)$ 의 해는 어떻게 주어지는가?

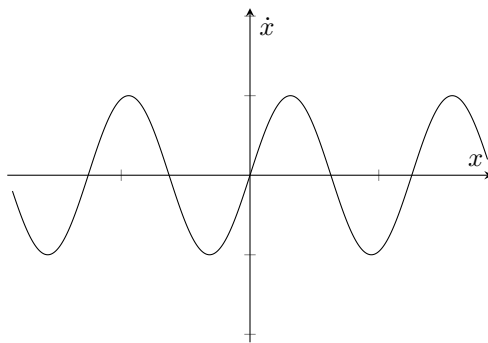
다음과 같이 변수분리법을 사용할 수 있다.

$$\int \frac{dx}{\sin x} = \int dt \implies t = \int \csc(x) dx + C = -\ln |\csc x + \cot x| + C$$

따라서, initial condition $x(0) = x_0$ 이 주어지면,

$$t = \ln \left| \frac{\csc x_0 + \cot x_0}{\csc x + \cot x} \right|$$

와 같이 쓸 수 있다. 그러나 대체 이 해는 어떻게 생겼는가? $x = x(t)$ 꼴로 explicit하게 알 방법이 없다. Qualitative 분석을 위하여 우리는 다음과 같은 $x - \dot{x}$ plot을 이용할 수 있다.



$\dot{x} = 0$ 인 점에서는 흐름이 없고, $\dot{x} > 0$ 인 점에서는 x 가 증가하는 방향으로 흐를 것이고(flow to right), $\dot{x} < 0$ 인 점에서는 x 가 감소하는 방향으로 흐를 것이다(flow to left). 이를 이용하면 qualitative하게 해를 분석할 수 있을 것이다. (do it yourself.)

1.2 Autonomous system

$$\dot{x} = f(x)$$

만일 $x(t)$ 가 $x(0) = x_0$ 인 solution이라면, $x(t - t_0)$ with $x(t_0) = x_0$ 역시 이 system의 해일 것이다.

Proof

$t' := t - t_0$ 으로 두자. 그러면,

$$\frac{dx}{dt'}(t') = \frac{dx}{dt}(t - t_0) = f(x(t - t_0)) = f(x(t'))$$

가 되고 $x(t' = 0) = x(t = t_0) = x_0$ 이 되므로, $x(t - t_0)$ 역시 해이고 따라서 일반성을 잃지 않고 $t_0 = 0$ 을 가정할 수 있다. \square

1.3 Fixed points and its stability

$$f(x^*) = 0$$

점 x^* 를 flow의 fixed point라고 하며, critical point, equilibrium point, 혹은 steady-state라고 부르기도 한다.

Note : What is the difference between equilibrium and steady-state?

공통적으로는 두 상태 모두 time-invariant하다는 것이다. 그러나, **equilibrium**은 $\nabla f = 0$, 즉 공간적으로도 uniform한 상황을 의미하고, **steady-state**는 공간적으로는 uniform하지 않을 수도 있다.

Fixed point의 stability는 다음과 같이 구분할 수 있다.

1. x^* is **stable** (혹은 *asymptotically Lyapunov stable*) : 고정점 근처의 경로는 모두 고정점을 향할 때. 즉,

$$\exists \delta > 0 \text{ s.t. } \forall x_0 > 0 \text{ with } |x^* - x_0| < \delta, \lim_{t \rightarrow \infty} |x(t) - x^*| = 0.$$

2. x^* is **unstable** : some arbitrary small perturbation이 시간이 지남에 따라 grow할 때. 즉, stable하지 않는 모든 경우.

3. x^* is **neutrally-stable** (혹은 *Lyapunov stable*) : 고정점 근처의 경로가 계속해서 고정점 근처에 있을 때. 즉,

$$\forall \epsilon > 0, \exists \delta > 0 \text{ s.t. } |x_0 - x^*| < \delta \Rightarrow |x(t) - x^*| < \epsilon \text{ for } t > 0$$

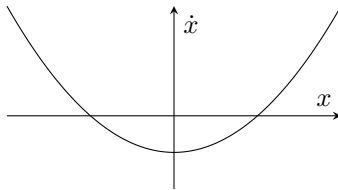
이를 좀 더 “연속” 적이게 쓰면 다음과 같다.

$$\forall \epsilon > 0, \exists \delta > 0 \text{ s.t. } |x_0 - x^*| < \delta \Rightarrow |\phi_t(x_0) - \phi_t(x^*)| < \epsilon \text{ for } t > 0$$

Example

$$\dot{x} = x^2 - 1$$

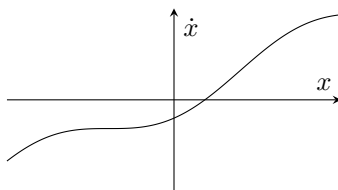
고정점은 $x^* = 1, -1$ 이고 $x = 1$ 에서 unstable, $x = -1$ 에서 stable하다.



Example

$$\dot{x} = x - \cos(x)$$

고정점은 하나 존재하고, 여기서 unstable하다.



1.3.1 Population - growth

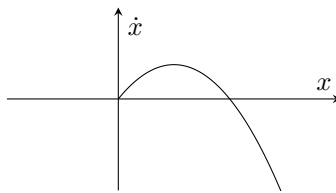
다양한 비선형 생물 시스템 중 ecosystem에 대한 연구가 제일 많이 이루어져 있고, 다루기가 상대적으로 간단하다.

$$\dot{N} = \beta N - \delta N = rN$$

여기서 N 은 population, β, δ 는 각각 birth rate, death rate, r 은 growth rate이다. 이 때, $r > 0$ 이면 이 시스템은 성장하고, $r < 0$ 이면 decay한다. 이 미분방정식의 해는 당연히 $N(t) = N_0 e^{rt}$ 일 것이다. 즉, $r > 0$ 이면 계속해서 population이 늘어나 결국 발산한다. 그러나 현실에서는 이러한 일이 일어나지 않는다.

More Realistic Model : $r = \frac{\dot{N}}{N}$ 은 상수가 될 수 없다. 일반적으로 N 이 커질수록 overcrowding/competition/resource limiting에 의해 r 이 줄어들 것이다. $r = 0$ 이 되는 N 을 K 라고 쓰고, **Carrying capacity**라고 부르면 좋을 것이다. 즉, $N > K$ 이면 $\dot{N} < 0$ 이 된다.

가장 간단한 모델로 $\frac{\dot{N}}{N} = r \left(1 - \frac{N}{K}\right)$ 를 생각할 수 있다. 그러면, $\dot{N} = rN - \frac{r}{K}N^2$ 이므로, 다음과 같은 plot을 얻을 수 있다. 즉, 간단하게 분석할 수 있다.



1.3.2 Linear stability analysis

Stability를 qualitative하게 분석해보자.

우선, **Perturbation**을 $y(t) := x(t) - x^*$ 와 같이 정의하자. 그러면,

$$\begin{aligned} \dot{y} &= \frac{d}{dt}(x(t) - x^*) \\ &= \dot{x} = f(x) = f(x^* + y) \\ &= f(x^*) + f'(x^*)y + \frac{f''(x^*)}{2}y^2 + \dots \\ &= f'(x^*)y + O(y^2) \end{aligned}$$

가 된다.

Big-Oh Notation : 함수 $g(y)$ 가 $g(y) = O(h(y))$ as $y \rightarrow 0$ 이라는 것은, 상수 $K < \infty$ 가 있어서

$$\lim_{y \rightarrow 0} \left| \frac{g(y)}{h(y)} \right| < K$$

인 것이다.

따라서, 우리는 $\dot{y} \simeq f'(x^*)y$ 와 같이 x^* 근방에서의 linearization을 사용할 수 있다. 이로부터, $y = y_0 e^{f'(x^*)t}$ 이므로, $f'(x^*) > 0$ 이면 시간에 따라 diverge하고 $f'(x^*) < 0$ 이면 시간에 따라 converge한다. 즉, f' 의 sign은 stability를 의미하며, f' 의 크기는 수렴이 얼마나 빠른지 그 time scale을 의미한다. 특히, $\tau := \frac{1}{|f'(x^*)|}$ 를 characteristic time-scale이라고 하며 이는 convergence rate과 관련이 있다.

이 방법은 $f'(x^*) \neq 0$ 에서만 유효하다. 이러한 fixed point를 **hyperbolic**하다고 하며, hyperbolic하지 않은 점은 다른 방법으로 분석해야 한다.

1.4 Existence and Uniqueness

주어진 미분방정식의 해는 유일하게 존재하는가?

공학 혹은 물리 문제에서 해가 만일 존재하지 않으면 ill-posed되어있을 가능성이 높다. (유일하지 않아도 마찬가지로이다.) 그러나 수학적으로는 꽤 중요한 문제이다. 예를 들어, $\dot{x} = x^{\frac{1}{3}}, x(0) = 0$ 이라는 미분방정식은 자명히 $x(t) \equiv 0$ 이라는 solution을 갖는다. 그러나, $x(t) = \pm \left(\frac{2}{3}t\right)^{\frac{3}{2}}$ 역시 주어진 방정식의 solution이며, 마찬가지로,

$$x(t) = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ \left(\frac{2}{3}(t - t_0)\right)^{\frac{3}{2}} & t \geq t_0 \end{cases}$$

역시 solution이 된다. 이는 주어진 미분방정식의 해가 unique하지 않고 심지어 infinitely 많이 있음을 시사한다. (time-invariant하므로 위의 함수가 해가 된다.) 수학적으로는 다음과 같은 조건이 제시된다.

Proposition 1.1

$\dot{x} = f(x), x(0) = x_0$ 에 대해,

- 만일 f 가 x_0 을 포함하는 구간 R 에서 continuous하다면 어떤 τ 가 존재하여 interval $I = (-\tau, \tau)$ 에서 해가 존재한다.
- 만일 f' 가 동일한 구간 R 에서 continuous하다면 그 해는 유일하다.

그러나 이 해가 globally 존재하는지는 알 수 없다. 예를 들어, $\dot{x} = 1 + x^2, x(0) = 0$ 의 해는 $\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ 에서만 유일하게 존재한다.

1.4.1 Impossibility of oscillation

Line에서 정의된 Time-invariant system $\dot{x} = f(x)$ 에서는 oscillation이 절대 일어날 수 없다. 따라서, trajectory는 다음의 두 가능성만을 갖는다.

1. Trajectory는 fixed point로 approach한다.
2. Trajectory는 $\pm\infty$ 로 diverge한다.

1.5 As a Potential

Flow on the line $\dot{x} = f(x)$ 는 늘 적절한 V 를 생각하여 $\dot{x} = f(x) = -\frac{dV}{dx}$ 가 될 수 있게 할 수 있다. 이러한 V 는 $V(x) = -\int f(x)dx + V_0$ 으로 주어지며, 보통 potential은 V_0 은 중요하지 않고 임의적이다. 이렇게 Potential로 해석하고 나면 다음과 같은 물리적 함의를 갖는다. Trajectory 위에서의 potential $V(x) = V(x(t))$ 는,

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dV}{dx} \cdot \left(-\frac{dV}{dx}\right) = -\left(\frac{dV}{dx}\right)^2 \leq 0$$

이므로 늘 trajectory를 따라서 potential은 monotonically 감소해야만 한다. 또, 자명히 $\frac{dV}{dx}(x^*) = 0$ 인 x^* 는 fixed point이다. linear approach에서와 같은 방법으로,

1. V 의 local minima : **stable** fixed point
2. V 의 local maxima : **unstable** fixed point

임을 알 수 있다.

2 Bifurcation

2.1 Bifurcation

Parameter r 에 의존하는 system $\dot{x} = f_r(x) = f(x, r)$ 을 생각하자. 그러면, 이 dynamical system의 fixed point는 r 에 의존하여 결정될 것이고, 이는 $f(x^*(r), r) = 0$ 과 같이 표현될 것이다. 만일, 특정한 r 에서 Structural behaviour가 크게 바뀐다면 이 r 을 r_c 라고 하고 그 때의 (x_c, r_c) 를 bifurcation point라고 부른다. (r_c 는 bifurcation parameter) 만일 $\frac{\partial f}{\partial x}(x_c, r_c) \neq 0$ 이라면 그 point는 structurally stable할 것이므로, 반드시 $\frac{\partial f}{\partial x}(x_c, r_c) = 0$ 인 non-hyperbolic point에서만 bifurcation이 생긴다.

2.1.1 As an Inverse function theorem

특히, $\dot{x} = f(x, r)$ 의 equilibria는 f 의 영점, 즉 $f(x, r) = 0$ 에서 나타날 것이다. 그런데 만일 (x_0, r_0) 에서 $\frac{\partial f}{\partial x}|_{(x_0, r_0)} \neq 0$ 이라면, 그 근방에서 $f(x^*(r), r) = 0$ 으로 매끄럽게 나타날 것이다. 즉, 전혀 bifurcation이 일어나지 않는다. 그러므로, bifurcation이 일어나기 위해서는 non-hyperbolic할 필요가 있다.

2.1.2 AS a Taylor series

테일러 전개로도 같은 이유를 찾을 수 있다. (x_0, r_0) 근방에서의 Taylor series를 생각해보자.

$$0 = f(x^*(r), r) = f(x_0, r_0) + (x^* - x_0) \frac{\partial f}{\partial x}|_{(x_0, r_0)} + (r - r_0) \frac{\partial f}{\partial r}|_{(x_0, r_0)} + \dots$$

이것이 $x^* = x^*(r)$ 로 풀리기 위해서는 당연히 $\frac{\partial f}{\partial x}|_{(x_0, r_0)} \neq 0$ 이어야만 한다. 따라서, Bifurcation이 일어나는 지점에서는,

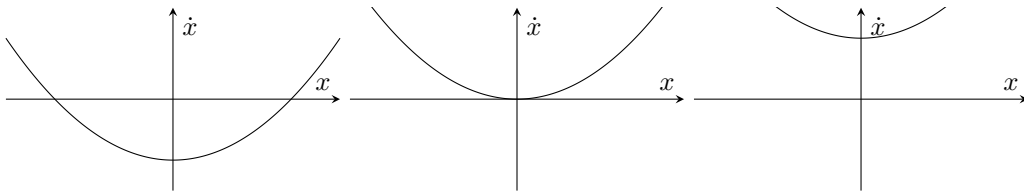
1. $f = 0$ (Fixed point 조건)
2. $\frac{\partial f}{\partial x} = 0$ (Non-hyperbolic 조건)

이를 모두 만족해야한다.

2.2 Saddle-Nodoe Bifurcation

Prototypical Example : $\dot{x} = r + x^2$

이 그래프는 r 에 따라서 다양하게 나타난다. 가장 큰 특징은 $r < 0$ 에서의 두 고정점이 $r = 0$ 에서 하나로 합쳐졌다가



$r > 0$ 에서는 사라진다는 것이다. 이러한 bifurcation을 saddle-node라고 부른다. 특히, $\dot{x} = r + x^2$ 와 $\dot{x} = r - x^2$ 는 사실 같은 plot인데, $x \rightarrow -x, r \rightarrow -r$ 의 변환을 적용하면,

$$\begin{aligned} -\dot{x} &= -r + x^2 \\ \dot{x} &= r - x^2 \end{aligned}$$

그 형태가 똑같아지기 때문이다. 이 form ($\dot{x} = r - x^2$)를 saddle-node bifurcation의 **normal form**이라고 하며, saddle-node bifurcation이 일어나는 구간에서는 local하게 늘 $\dot{x} = r - x^2$ 로 표현할 수 있다.

2.3 Normal Form Theory

다음과 같은 테일러 전개에서 시작하자.

$$\begin{aligned}\dot{x} = f(x, r) &= f(x^*, r_c) + (x - x^*) \frac{\partial f}{\partial x} + (r - r_c) \frac{\partial f}{\partial r} \\ &\quad + \frac{1}{2} (x - x^*)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + (r - r_c)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} + \dots\end{aligned}$$

특히, 첫 두 항은 Bifurcation에 대해 0이 된다. 따라서,

$$\dot{x} = (r - r_c) \frac{\partial f}{\partial r} + \frac{1}{2} (x - x^*)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + O(x^3)$$

와 같이 쓸 수 있다. 이로부터, saddle-node bifurcation은 $\frac{\partial f}{\partial r} \neq 0, \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \neq 0$ 을 요구함을 알 수 있다. 또한, 다음과 같은 변수변환을 통해 normal form으로 바꿀 수 있다.

$$\dot{x} = a(r - r_c) + b(x - x^*)^2 + \dots$$

$$X := -b(x - x^*)$$

$$R := -ab(r - r_c)$$

$$\dot{X} = R - X^2 + O(X^3)$$

심지어, 테크닉을 이용해 higher order term을 없앨 수도 있다.

$$\dot{x} = r - x^2 + ax^3 + O(x^4)$$

이와 같이 cubic term을 상정하자. 그리고, $x =: X + bX^4$ 와 같이 정의하자. 그러면,

$$X = x - bX^4 = x - b(x - bX^4)^4 = x - bx^4 + O(x^7)$$

이므로,

$$\begin{aligned}\dot{X} &= (1 - 4bx^3 + \dots)\dot{x} = (1 - 4bx^3 + \dots)(r - x^2 + ax^3 + \dots) \\ &= (1 - 4b(X + bX^4) + \dots)(r - (X + bX^4)^2 + a(X + bX^4)^3 + \dots) \\ &= r - X^2 - 4brX^3 + aX^3 + O(X^4) \\ &= r - X^2 + (a - 4br)X^3 + O(X^4)\end{aligned}$$

가 되어, $b = \frac{a}{4r}$ 을 대입하면 $\dot{X} = r - X^2 + O(X^4)$ 를 얻는다.

2.4 Transcritical Bifurcation

만일, 어떤 fixed point x^* 가 모든 r 에 대해 $f(x^*, r) = 0$ 이면, $\frac{\partial^k f}{\partial r^k}(x^*, r) = 0$ 이 모든 k 에 대해 참일 것이다.

Example

$\dot{N} = rN \left(1 - \frac{N}{K}\right)$ 의 경우에, $N = 0$ 이 parameter와 관계 없이 늘 fixed point가 된다.

테일러 전개를 통해 또 식을 조작해보자.

$$\begin{aligned}f(x, r) &= f(x^*, r_c) + (x - x^*) \frac{\partial f}{\partial x}|_{(x^*, r_c)} + (r - r_c) \frac{\partial f}{\partial r}|_{(x^*, r_c)} \\ &\quad + \frac{1}{2} (x - x^*)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}|_{(x^*, r_c)} + \frac{1}{2} (r - r_c)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial r^2}|_{(x^*, r_c)} + (x - x^*)(r - r_c) \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial r}|_{(x^*, r_c)} + \dots \\ &= \frac{1}{2} (x - x^*)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}|_{(x^*, r_c)} + (x - x^*)(r - r_c) \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial r}|_{(x^*, r_c)} + \dots\end{aligned}$$

따라서, Transcritical bifurcation이 일어날 조건이 다음과 같음을 알 수 있다.

- $f(x^*, r_c) = 0$
- $\frac{\partial f}{\partial x}(x^*, r_c) = 0$
- $\frac{\partial f}{\partial r}(x^*, r_c) = 0$
- $\frac{\partial^k f}{\partial r^k}(x^*, r_c) = 0$
- $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(x^*, r_c) = 0$
- $\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial r}(x^*, r_c) = 0$

Example

$\dot{x} = r \ln x + x - 1 : x^* = 1$ 이 모든 r 에 대해 fixed point이다.

$u = x - 1 (|u| \ll 1)$ 로 두면,

$$\begin{aligned}\dot{u} &= \dot{x} = r \ln(u + 1) + u \\ &= r \left[u - \frac{1}{2}u^2 + \frac{1}{3}u^3 - \dots \right] + u \\ &= (r + 1)u - \frac{1}{2}ru^2 + O(u^3)\end{aligned}$$

이제 $u = av$ 로 두면,

$$\begin{aligned}\dot{v} &= \frac{1}{a}\dot{u} \\ &= \frac{1}{a} \left[(r + 1)av - \frac{1}{2}ra^2v^2 + O(v^3) \right] \\ &= (r + 1)v - \frac{1}{2}rav^2 + O(v^3)\end{aligned}$$

이므로, $a \leftarrow \frac{2}{r}$ 로 넣으면,

$$\dot{v} = (r + 1)v - v^2 + O(v^3)$$

이고, $X \leftarrow v, R \leftarrow r + 1$ 로 두면,

$$\dot{X} = RX - X^2 + O(X^3)$$

가 성립한다. $R \neq 0$ 에 대해, $y := X + bX^k$ 로 두면 higher order term을 없앨 수 있다.

Physics에는 laser라는 좋은 예시가 있다.

$$\begin{aligned}\dot{n} &= (\text{gain}) - (\text{loss}) = G \cdot n \cdot N - k \cdot n \\ N(t) &= N_0 - \alpha n\end{aligned}$$

따라서,

$$\begin{aligned}\dot{n} &= Gn(N_0 - \alpha n) - kn \\ &= (GN_0 - k)n - G\alpha n^2\end{aligned}$$

2.5 Pitchfork Bifurcation

Pitchfork bifurcation은 굉장히 ideal한 상황으로, 다음과 같은 odd symmetry가 필요하다 : $f(-x, r) = -f(x, r)$. 이 경우에는, $x \rightarrow -x$ 에 대해 invariant하다. 따라서,

- $f(0, r) \equiv 0$ for all r 이고, $x^* = 0$ 은 trivial한 fixed point이다. 따라서, $\frac{\partial^k f}{\partial r^k}(0, r_c) = 0$ 이다.
- f 가 odd하므로, second derivative (짝수-번) 역시 odd하다.

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(0, r_c) = \frac{\partial^4 f}{\partial x^4}(0, r_c) = \dots = 0$$

Pitchfork bifurcation은 다음과 같은 Taylor expansion을 갖는다.

$$f(x, r) = (x - x^*)(r - r_c) \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial r}(x^*, r_c) + \frac{1}{3!}(x - x^*)^3 \frac{\partial^3 f}{\partial x^3}(x^*, r_c) + \dots$$

따라서, 중요한 것은 $\frac{\partial^3 f}{\partial x^3}$ 의 부호이다.

2.5.1 Supercritical Pitchfork

$\frac{\partial^3 f}{\partial x^3} < 0$ 인 경우, *supercritical*하고, *normal form*은 $\dot{x} = rx - x^3$ 이다.

- $r < 0$ 인 경우 : $rx - x^3$ 은 계속해서 감소하며, $x = 0$ 근처에서 exponentially decay한다 : $\dot{x} = rx$ 로부터, $x = x_0 e^{rt}$ 이기 때문이다.
- $r = 0$ 인 경우 : $\dot{x} = -x^3$ 이므로, algebraically decay한다.
- $r > 0$ 인 경우 : $|x| \ll 1$ 에서 rx 가 dominant하므로, stable한 fixed point 둘이 생기고 $x = 0$ 에서는 unstable해진다.

이는 secondary 상변이에서 일어나는 현상이다. (Ising model for magnetization)

2.5.2 Subcritical Pitchfork

$\frac{\partial^3 f}{\partial x^3} > 0$ 인 경우, *subcritical*하고, *normal form*은 $\dot{x} = rx + x^3$ 이다.

그러나 이 경우에는 $r > 0$ 에서 본질적으로 불안정하므로, $-x^5$ 를 통해 '눌러'줘야한다. 즉, $\dot{x} = rx + x^3 - x^5$ 을 생각하면, subcritical bifurcation과 saddle-node bifurcation이 모두 일어난다. 또, 그래프를 잘 관찰하면 Hysteresis의 이유를 알 수 있다.

2.5.3 Example : moving bead on a rotating hoop

반지름 r 인 hoop를 따라서 bead가 움직일 수 있고, 이 hoop가 각속도 ω 를 가지고 z -축을 회전축으로 하여 회전하고 있다고 하자. 그러면, 이 bead의 움직임을 기술하는 방정식은 다음과 같이 세울 수 있다.

$$mr\ddot{\phi} = -b\dot{\phi} - mg \sin(\phi) + mr\omega^2 \sin(\phi) \cos(\phi)$$

만일 friction이 매우 크다면, 즉 $|mr\ddot{\phi}| \ll |b\dot{\phi}|$ 인 조건에서는(overdamping) 식이 다음과 같이 바뀐다.

$$b\dot{\phi} = mr\omega^2 \sin(\phi) \cos(\phi) - mg \sin(\phi) = mg \sin(\phi) \left(\frac{r\omega^2}{g} \cos(\phi) - 1 \right)$$

따라서, $\sin(\phi) = 0$ 이 되는 ϕ^* 는 $\phi^* = 0$ 과 $\phi^* = \pi$ 이다. 분석을 용이하게 하기 위해, $\gamma = \frac{r\omega^2}{g}$ 라고 놓았다. 그러면, Supercritical pitchfork이 일어나게 된다.

2.5.4 Nondimensionalization

식을 nondimensionalization하기 위해, $\tau = \frac{t}{T}$ 로 설정하였다. 그러면,

$$\frac{d}{dt} = \frac{d}{d\tau} \frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{T} \frac{d}{d\tau}$$

이고, $\dot{\phi} = \frac{1}{T} \frac{d\phi}{d\tau}$ 이 되고 $\ddot{\phi} = \frac{1}{T^2} \frac{d^2\phi}{d\tau^2}$ 이 된다. 우리는 ϕ_T 혹은 ϕ_{TT} 가 Order 1, 그러니까 $O(1 = 10^0)$ 이길 바라고 있다. 우선, 식에 대입하여 다음을 얻는다.

$$\frac{r}{gT^2} \frac{d^2\phi}{d\tau^2} = -\frac{b}{mgT} \frac{d\phi}{d\tau} - \sin(\phi) + \frac{r\omega^2}{g} \sin(\phi) \cos(\phi)$$

$\sin(\phi)$ 가 $O(1)$ 이므로, $\frac{b}{mgT}$ 역시 $O(1)$ 이길 바라고 있다. 즉,

$$\begin{aligned} \frac{b}{mgT} &= 1 \\ T &= \frac{b}{mg} \end{aligned}$$

여야만 한다. 그러면,

$$\epsilon = \frac{r}{gT^2} = \frac{rm^2g}{b^2}$$

이고, 이 값이 1보다 매우 작을 때가 overdamping이 일어나는 것이다. 따라서,

$$\begin{aligned} \epsilon \frac{d^2\phi}{d\tau^2} &= -\frac{d\phi}{d\tau} - \sin(\phi) + \gamma \sin(\phi) \cos(\phi) \\ \gamma &:= \frac{r\omega^2}{g} \\ \epsilon &:= \frac{rm^2g}{b^2} \end{aligned}$$

이다.

2.5.5 Phase plane analysis

다음과 같이, 2nd order ODE를 1st order ODE 2개로 바꿀 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon \ddot{\phi} &= -\dot{\phi} + f(\phi) \\ \Omega &:= \dot{\phi} = \frac{d\phi}{d\tau} \end{aligned}$$

로부터,

$$\begin{cases} \dot{\phi} &= \Omega \\ \dot{\Omega} &= \frac{1}{\epsilon}(f(\phi) - \Omega) \end{cases}$$

만일 $f(\phi)$ 와 Ω 의 차이가 커서 $f(\phi) - \Omega$ 가 $O(1)$ 이라면, $\dot{\Omega}$ 는 $O\left(\frac{1}{\epsilon}\right) \gg 1$ 이다. 따라서, Ω 는 빠르게 변화하여 $f(\phi) - \Omega = O(\epsilon)$ 까지 줄어든다. 즉, 그 때는 $\epsilon \cdot \frac{1}{\epsilon} = 1$ 의 order의 $\dot{\Omega}$ 를 갖게 된다. (Quasi-steady-state)

2.6 Insect Outbreak

TBD

3 Flows on the circle

Circle, S^1 위에서의 flow는 oscillation이 일어날 수 있다. ($[0, 2\pi]/(0 = 2\pi)$ 이므로...)

3.1 Uniform oscillator

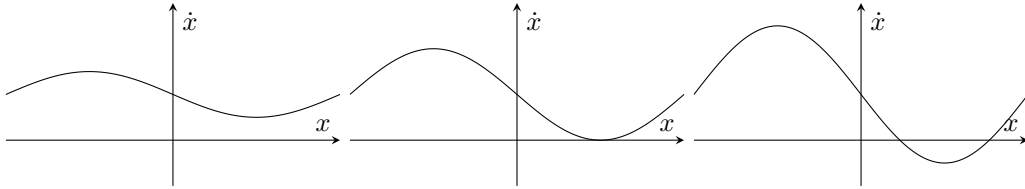
$$\dot{\theta} = \omega$$

상수 각속도 ω 에 대해, $\theta = \omega t + \theta_0$ 이 되므로, oscillation이 일어나고 period는 $T = \frac{2\pi}{\omega}$ 이다. 만일 두 명이 원형 트랙을 각각 주기 $T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1}, T_2 = \frac{2\pi}{\omega_2}$ 를 가지고 돌고 있다면 ($T_1 < T_2$), 둘의 위상차 $\phi = \theta_1 - \theta_2$ 는 $\dot{\phi} = \omega_1 - \omega_2 > 0$ 이고, overtaking의 주기는 다음과 같다.

$$T = \frac{2\pi}{\omega_1 - \omega_2} = \frac{1}{1/T_1 - 1/T_2}$$

3.2 Nonuniform oscillator

$$\dot{\theta} = \omega - a \sin(\theta)$$



각각 $a < \omega, a = \omega, a > \omega$ 인 경우이다. $a = \omega, \theta = \frac{\pi}{2}$ 에서 Saddle-node bifurcation이 일어남을 확인할 수 있다. 특히, $a < \omega$ 일 때의 oscillation의 period를 다음과 같이 계산해보자.

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= f(\theta) = \omega - a \sin(\theta) \\ T &= \int_0^T dt = \int_{\theta_0}^{\theta_0+2\pi} \frac{d\theta}{f(\theta)} = \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{f(\theta)} \\ &= \int_{-\pi}^{\pi} \frac{d\theta}{\omega - a \sin(\theta)} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega^2 - a^2}} \end{aligned}$$

따라서,

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega^2 - a^2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega + a}\sqrt{\omega - a}} \simeq \frac{2\pi}{\sqrt{2\omega}} \frac{1}{\sqrt{\omega - a}}$$

라고 할 수 있다. 즉, 주기가 $T \sim (a_c - a)^{-1/2}$ 의 속도로 발산한다.

3.3 Ghost and Bottleneck

$\dot{x} = r + x^2$ 에 대해, bottleneck이 되는 주기는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_{bn} \simeq \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx}{r + x^2} = \frac{1}{\sqrt{r}} \tan^{-1}(x)|_{-\infty}^{\infty} = \frac{\pi}{\sqrt{r}}$$

특히, $\dot{\theta} = \omega - a \sin(\theta)$ 에서 $\theta = \phi + \frac{\pi}{2}$ 로 놓으면, 다음과 같이 saddle node의 normal form으로 만들 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \omega - a \sin\left(\frac{\pi}{2} + \phi\right) \\ &= \omega - a \cos(\phi) \\ &= \omega - a \left[1 - \frac{1}{2}\phi^2 + \dots\right] = (\omega - a) + \frac{1}{2}a\phi^2 + O(\phi^4) \end{aligned}$$

이제, $x = \frac{1}{2}a\phi$ 와 $r = \frac{1}{2}a(\omega - a)$ 로 놓으면,

$$\dot{x} = \frac{1}{2}a\dot{\phi} = r + x^2 + O(x^4)$$

따라서, 주기는 $T \simeq \frac{\pi}{\sqrt{r}} = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{a}\sqrt{\omega - a}} \simeq \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{a}} \frac{1}{\sqrt{\omega - a}}$ 이다.

3.4 Overdamped pendulum

길이가 L 인 줄에 질량 m 의 구가 매달려 있고, 반시계 방향으로 Γ 의 torque를 받는다고 하자. 그러면, 다음과 같은 torque balance 식을 세울 수 있다.

$$mL^2\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + mgL\sin(\theta) = \Gamma$$

만일 b 가 크다면, $mL\ddot{\theta}$ 는 잠깐의 transient 후에 무시할 수 있다. 그러면,

$$\begin{aligned} b\dot{\theta} &= \Gamma - mgL\sin(\theta) \\ \frac{b}{mgL}\dot{\theta} &= \left(\frac{\Gamma}{mgL}\right) - \sin(\theta) \end{aligned}$$

이므로, $\tau \equiv \frac{t}{t_0} = \frac{mgL}{b}t$ 로 놓으면, $\gamma = \frac{\Gamma}{mgL}$ 을 얻는다. 그러면,

$$\theta' = \gamma - \sin(\theta)$$

이다.

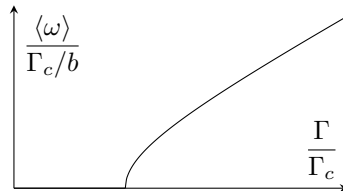
만일 $\gamma > 1$ 이면, applied torque가 충분히 커서 oscillation이 일어난다. 이 때, period는,

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\gamma^2 - 1}}$$

average frequency는 $\sqrt{\gamma^2 - 1}$ 이고,

$$\begin{aligned} \langle \omega \rangle &= \frac{1}{t_0} \sqrt{\gamma^2 - 1} \\ &= \frac{mgL}{b} \sqrt{\gamma^2 - 1} \\ &= \frac{\sqrt{\Gamma^2 - (mgL)^2}}{b} = \frac{\Gamma_c \sqrt{(\Gamma/\Gamma_c)^2 - 1}}{b} \end{aligned}$$

이다. ($\Gamma_c := mgL$) 만일 $\gamma = 1$ 이면, $\frac{\pi}{2}$ 에서 torque balance가 이뤄진다. 반대로, $\gamma < 1$ 이면, net rotation이 일어나지 않아 $\langle \omega \rangle = 0$ 이다.



3.5 Synchronization of fireflies

반딧불이의 natural (no stimulus) phase를 $\theta(t)$, frequency를 ω 라고 할 때, 반딧불이에게 Phase가 Θ 이고 frequency가 Ω 인 flash를 비춰준다고 하자. 둘 다 phase가 0이 될 때 빛나며, $\dot{\Theta} = \Omega$ 이다.

Modelling.

$$\dot{\theta} = \omega + A \sin(\Theta - \theta)$$

여기서 A 는 반딧불이의 resetting strength이다. 그러면, phase difference $\phi = \Theta - \theta$ 는 다음과 같이 나타난다.

$$\dot{\phi} = \dot{\Theta} - \dot{\theta} = \Omega - \omega - A \sin(\phi)$$

그러면, $\tau = At$ 이고 $\mu = \frac{\Omega - \omega}{A}$ 로 놓으면, μ 에 따라 분석할 수 있다. *Entrainment*는 $-1 \leq \frac{\Omega - \omega}{A} \leq 1$ 일 때만 일어난다. 즉,

$$\omega - A \leq \Omega \leq \omega + A$$

에서 일어난다.

4 Linear Systems

이번 절의 목표는 다음을 해결하는 것이다.

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2)$$

즉, $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x})$ 을 해결할 것이다.