Keio University

日時：2013年12月2日（火） 16:10～17:10
会場：首都大学東京　秋葉原サテライトキャンパス
秋葉原ダイビル12階 1202室（会議室C）

電気学会　電子・情報・システム部門（C部門） 制御研究会

[委員長]　山本　透（広島大学）
[幹事]　佐藤孝雄（兵庫県立大学），日高浩一（東京電機大学）
[幹事補佐]　田村健一（首都大学東京）
[テーマ]　制御工学・制御技術の新しい展開
[協賛]
- データに基づく適応型スマートシステム調査専門（委員長　水本郁朗，幹事　中本昌由）
- 安全制御・故障診断系設計調査専門（委員長　鄧明聡，幹事　逸見知弘，幹事補佐　姜長安）
- 高機能PID制御とそのビジネス環境に関する調査専門（委員長　田中雅人，幹事　大西義浩）
- 制御工学・制御技術教育の方法および評価に関する協同研究（委員長　川田和男，幹事　秋山岳夫）

“極値探査法の理論と応用”

Theory and Applications of Extremum Seeking Control

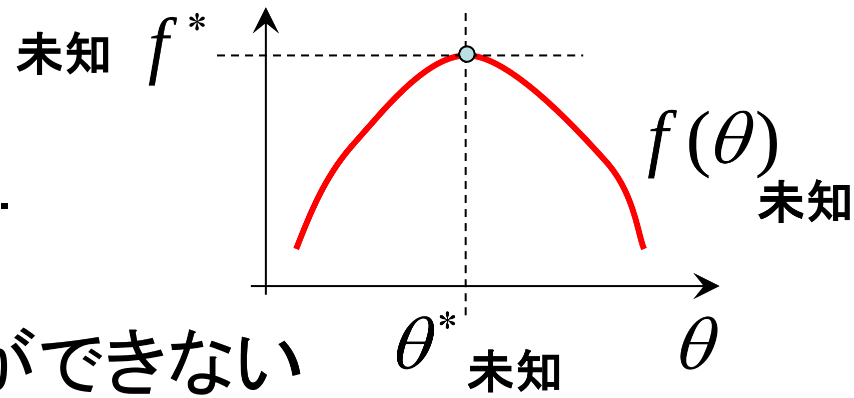
大森 浩充（慶應義塾大学）
E-mail: ohm@sd.keio.ac.jp

OUTLINE OF MY TALK

1. 極値探査法(ES)の簡単な例
2. ES理論の歴史と適用例
3. どのようにして働くか？
   [1]フィルタ解析, [2]平均化法解析, [3]特異摂動解析
4. 応用
   [1]省エネルギーを目的とした極値探査による剛性最適化
   [2-1]スイッチング法による極値探査法
   [2-2]アンチロックブレーキ（内部モデル原理）
   [3]音源方向推定（振幅可変）
   [4]PID パラメータ調整（離散ES）
   [5]最適バイオリアクター

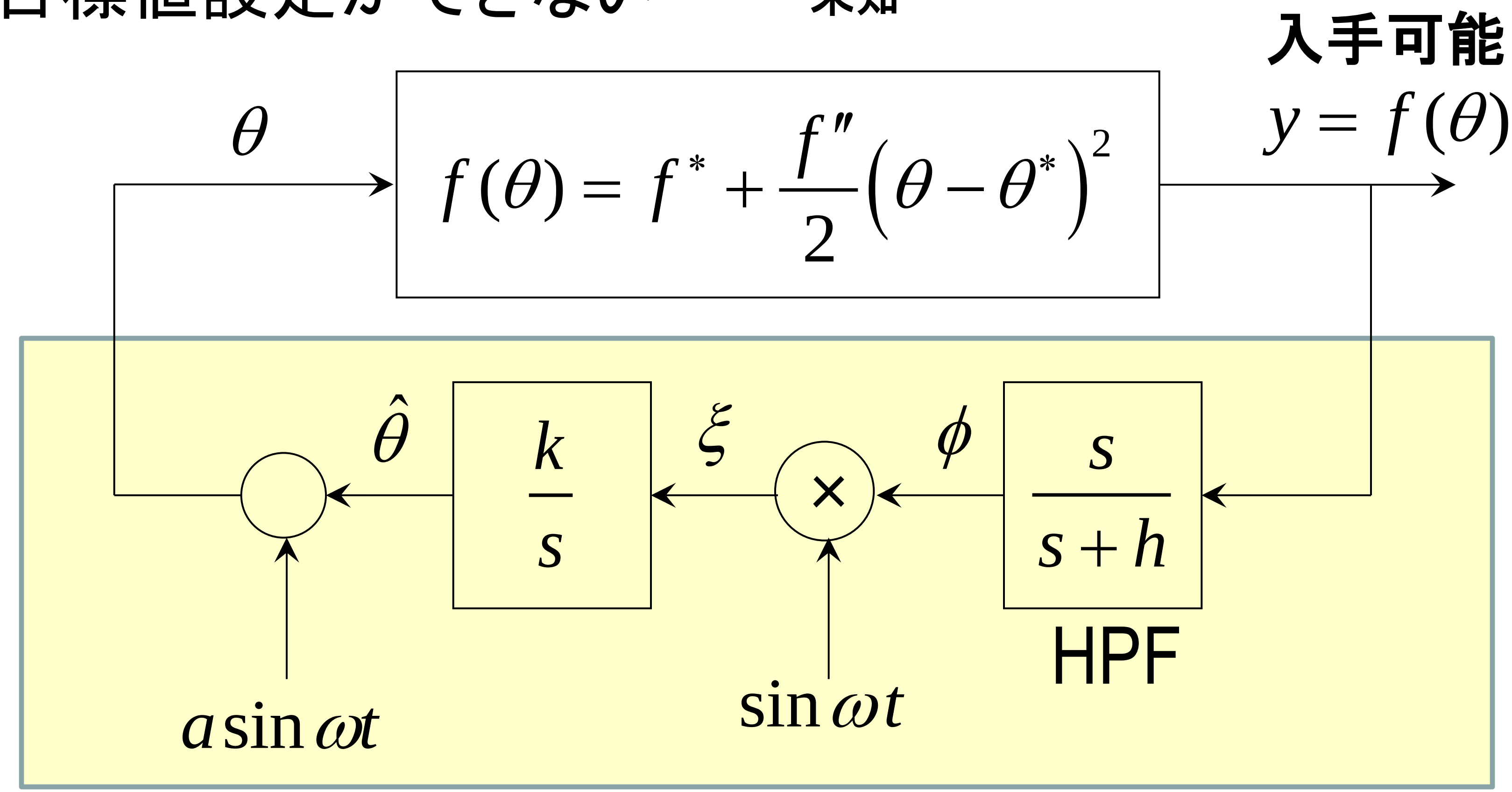
1. 極値探査法(ES)の簡単な例

$y = f(\theta)$
を最大にしたい.
$f(\cdot)$ が未知
→目標値設定ができない

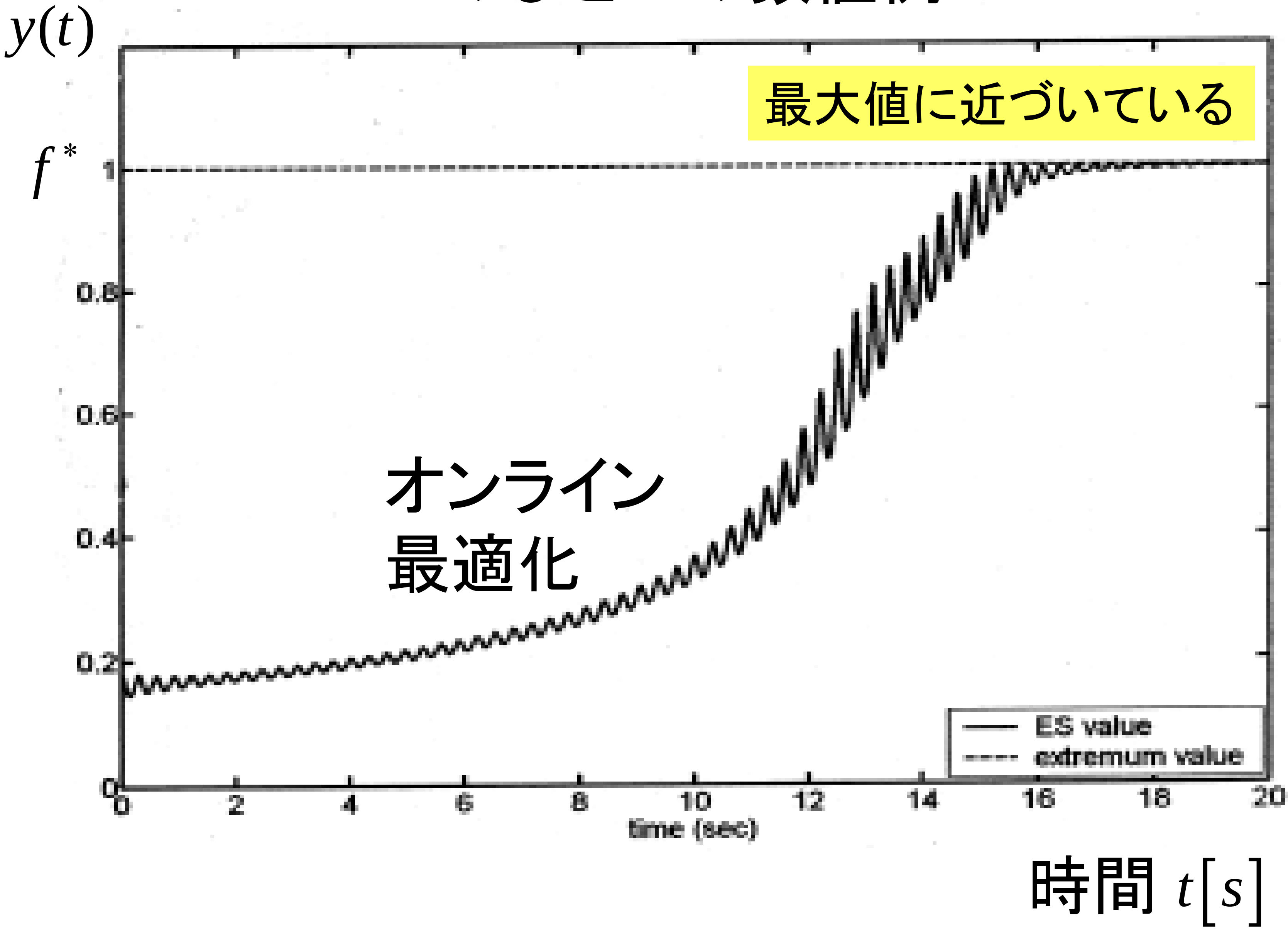


$f'' < 0$

(最大値)



ESのひとつの数値例



$y(t)$
最大値に近づいている
f^*
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
オンライン
最適化
ES value
extremum value
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
time (sec)
時間 $t[s]$

2. ES理論の歴史と適用例

ESの発展経過

・Leblance(1922; Franch) 鉄道
・Early Russian Literatures(1940's) 多くの論文
・Drapper and Li (1951)　SIエンジンのスパークタイミング制御
・Tsien(1954, not control engineer) サイバネティクス
・Feldbaum(1959)　"Computers in Automatic Control Systems"
・Blackman(1962) 本
・Wilde(1964) 本
・Chinaev(1969) セルフチューニングシステムのハンドブック
・Late 50'-Early 70': ロシアからの多くの成果
・Meerkov(1967, 1968)Averaging analysis,first closed loop analyze
・Sternby(1980) Survey paper, "*Extremum control systems: an area for adaptive control?*", Joint ACC, 1980, WA2-A.
・ Aström and Wittenmark(1995) in Book "Adaptive Control", rates ES as one of *the most promising areas for adaptive control*.

- Krstic and Wang (2000, Automatica) stability proof of Single Parameter ES by using averaging theory.
- Ariyur, ES in discrete time 離散時間系
- Ariyur; *Ohmori*, IMC for parameter changes
- Kristic, Limit cycle minimization via ES
- Kristic, Performance improvement of ES
- Rotea; Walsh; Ariyur, Multi-parameter ES
- Ariyur, Slop seeking
- Tan, Nesic, Mareels(2005), Semi-global stability of ES.
- Other Approaches:
  - Guay, Dochain, Tirica, and Coworkers
  - Zak, Ozguner, and and Coworkers (sliding mode)
  - Banavar, Chichka, Speyer
  - Popvic, Teel (flight formation)
  - Ohmori (Time-delay)

ESの応用例

- 制御弁（ミシガン大学，Peterson and Stephanopoulou)
- 人工心臓（カーネギーメロン大学，Antaki and Paden)
- エクスサイズ機械，福祉（Zhang and Dawson)
- ガソリン精製（many）
- ハードディスク装置（UCSD(Univ. of California, San Diego））
- アンチロックブレーキ(Ariyur; *Ohmori*)
- ジェットエンジンのコンプレッサの不安定化解消(Kristic, Ariyur)
- 燃焼系の不安定化解消(Banaszuk)
- ディフューザー (Banaszuk)
- 熱音響冷凍機(Rotea)
- 粒子加速器におけるビームマッチング(Schuster)
- フォーメーションフライト（編隊飛行) (Ariyur, Popvic, Teel)
- PIDチューニング(Killingsworth)
- 自動運転走行(Kristic)
- バイオリアクター(Krstic; *Ohmori*)

Edited by Chen, Sun, Shen, and, Ohmori, “Advance Robust and Adaptive Control Theory and Applications”, Springer. 2004.

(1) Kartik B. Ariyur, Miroslav Krstic, “Real-time Optimaizatin by Extremum-Seeking Control,” Wiley, 2003.

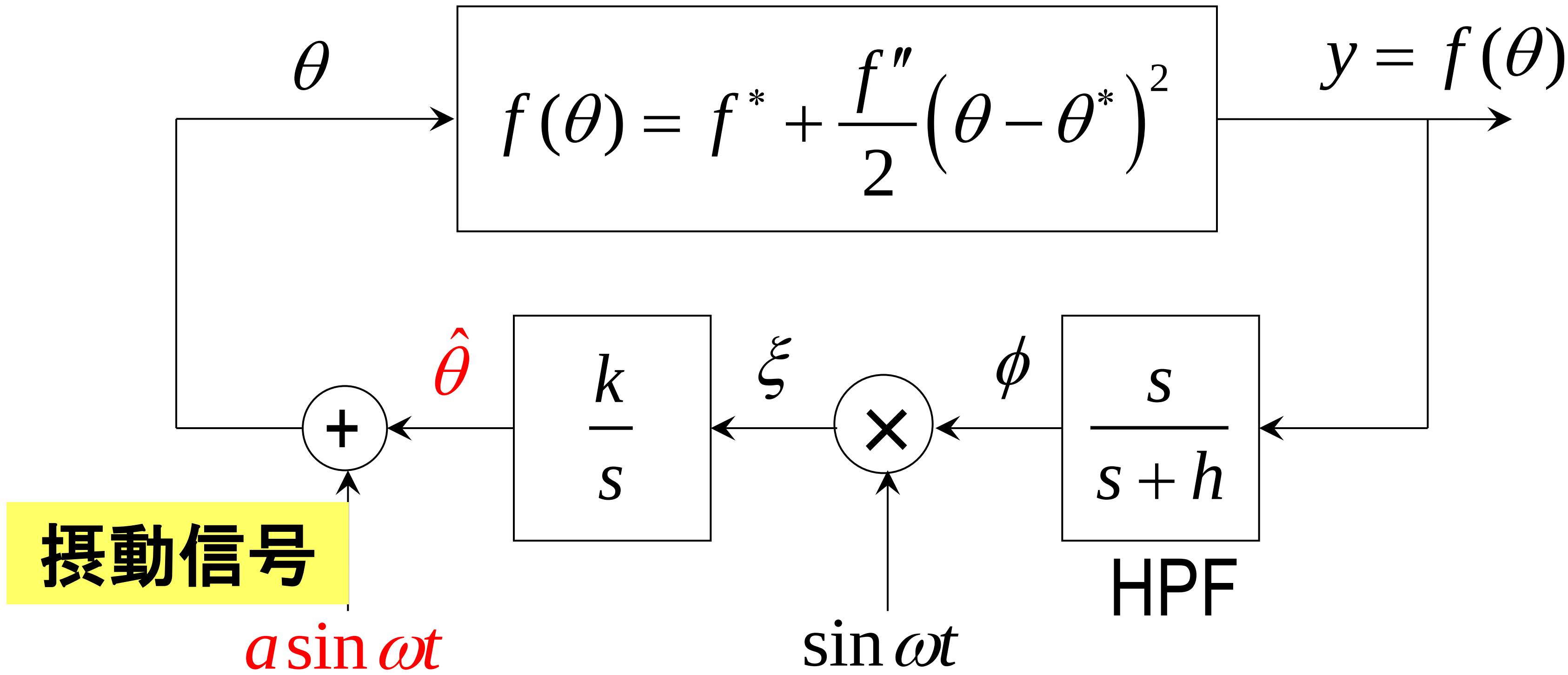
(2) IEEE Control System Magazine, Feb. 2006

(3) Shu-Jun Liu and Miroslav Krstic, “Stochastic Averaging and Stochastic Extremum Seeking, Communications and Control Engineering,” Springer-Verlag London 2012.

(4) Chunlei Zhang, Raúl Ordóñez , “Extremum-Seeking Control and Applications: A Numerical Optimization-Based Approach (Advances in Industrial Control),” Advances in Industrial Control, Springer-Verlag London Limited 2012.

- antilock brake system
- semiconductor plasma-processing chamber
- co-ordinated control of a swarm of agents

3. どのようにして働くか？
[1] フィルタ理論による解析

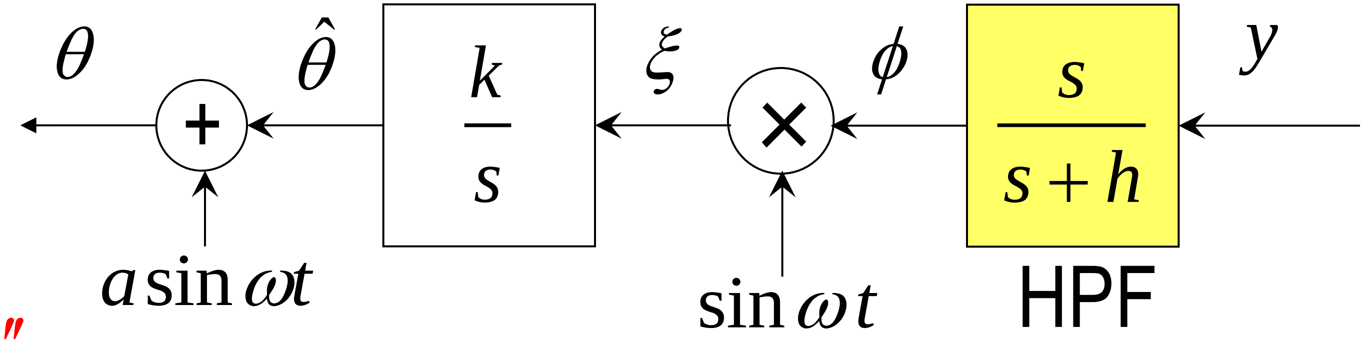


$$y = f(\theta) = f^* + \frac{f''}{2}(\theta - \theta^*)^2 = f^* + \frac{f''}{2}(a \sin \omega t + \hat{\theta} - \theta^*)^2$$

$$= f^* + \frac{f''}{2}(a \sin \omega t - \tilde{\theta})^2$$

$$\theta = a \sin \omega t + \hat{\theta}$$

$$\tilde{\theta} := -\hat{\theta} + \theta^*$$



$$y = f^{*} + \frac{f''}{2}(a\sin\omega t - \tilde{\theta})^2$$

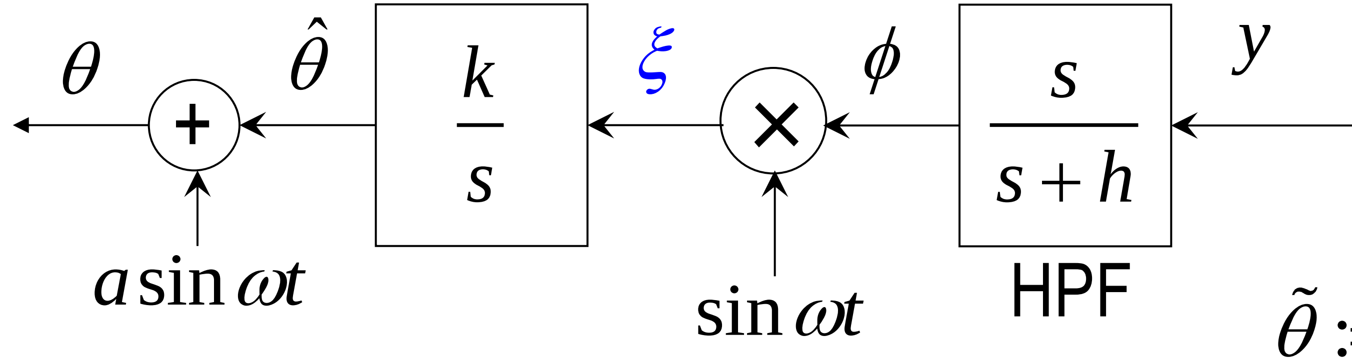
ローカル解析

$$= f^{*} + \frac{f''}{2}\left[a^2\left(\frac{1}{2} - \frac{\cos 2\omega t}{2}\right) - 2a\sin\omega t\cdot\tilde{\theta} + \tilde{\theta}^2\right]$$

$$\phi = \frac{s}{s+h}[y] = -\frac{f'' a^2}{4}\cos 2\omega t - f'' a\sin\omega t\,\tilde{\theta} \qquad \because \text{HPF}$$

$$\xi = \phi\cdot\sin\omega t = -\frac{f'' a^2}{4}\sin\omega t\cos 2\omega t - f'' a\sin^2\omega t\cdot\tilde{\theta}$$

$$= -\frac{f'' a^2}{4}\frac{\sin\omega t - \sin 3\omega t}{2} - f'' a\frac{1-\cos 2\omega t}{2}\cdot\tilde{\theta}$$



$$\tilde{\theta} := -\hat{\theta} + \theta^*$$

これが
取り出せた

$$\xi = -\frac{f''a^2}{4}\frac{\sin\omega t - \sin 3\omega t}{2} - f''a\frac{1-\cos 2\omega t}{2}\tilde{\theta}$$

$$= \underbrace{-\frac{f''a^2}{8}\left(\sin\omega t - \sin 3\omega t\right) + \frac{f''a\,\tilde{\theta}}{2}\left(\cos 2\omega t\right)}_{\text{Integratorによって減衰する高周波数成分}} - \frac{f''a}{2}\tilde{\theta}$$

$$\tilde{\theta} := -\hat{\theta} + \theta^* \Rightarrow \dot{\tilde{\theta}} = -\dot{\hat{\theta}} + \dot{\theta}^* = -\dot{\hat{\theta}} = -k\xi = -\frac{k|f''|a}{2}\tilde{\theta}$$

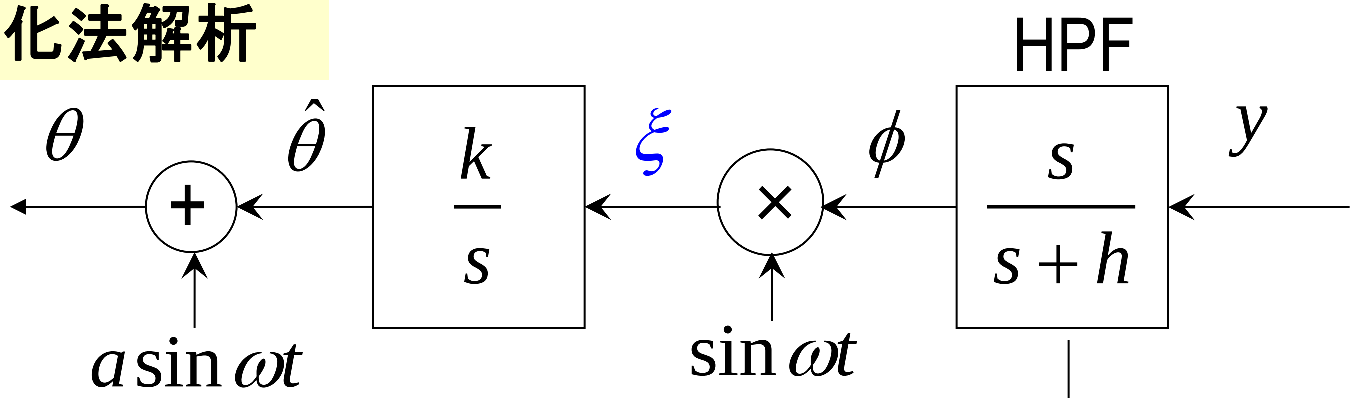
$f'' < 0$

$$\boxed{\dot{\tilde{\theta}} = -\frac{k|f''|a}{2}\tilde{\theta}} \Rightarrow \tilde{\theta} = \theta^* - \hat{\theta} \to 0$$

$$\Downarrow$$

$$\theta = a\sin\omega t + \hat{\theta} \to \underline{a\sin\omega t} + \theta_*$$

[2] 平均化法解析



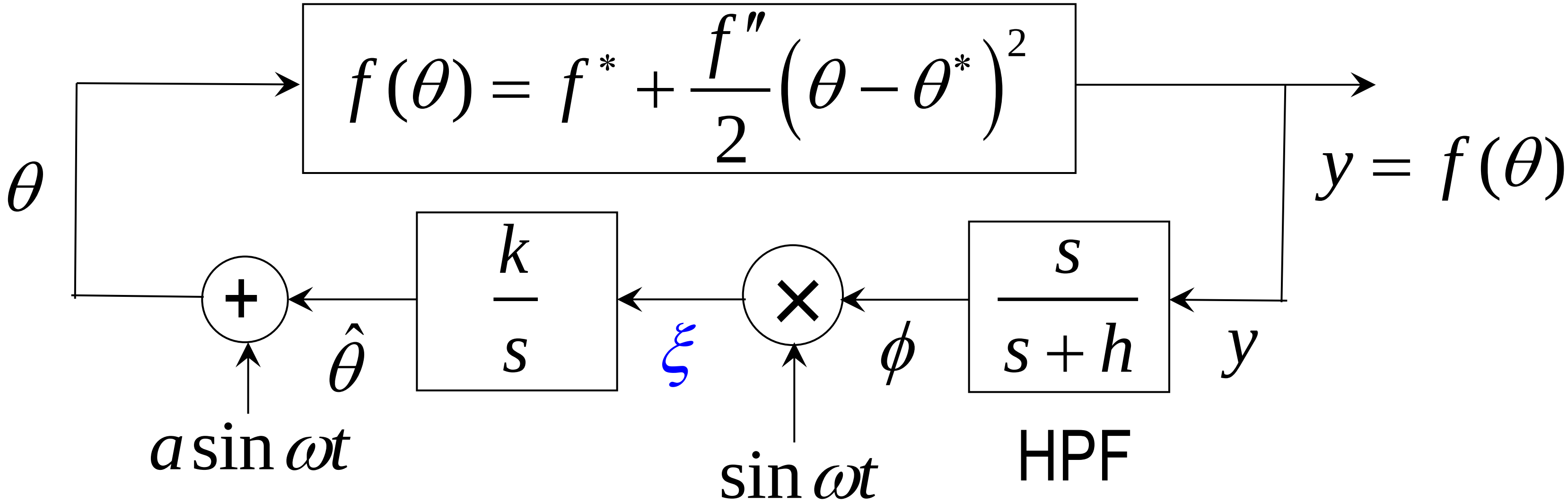
$$\begin{cases} \tilde{\theta} := -\hat{\theta} + \theta^* \\ e := f^* - \dfrac{h}{s+h}[y] \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \dot{\tilde{\theta}} = -\dot{\hat{\theta}} = -k\xi = -k \cdot \phi \cdot \sin\omega t \\ (s+h)e = (s+h) f^* - hy \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \dot{\tilde{\theta}} = -k\left[\dfrac{s}{s+h}[y] \right] \cdot \sin\omega t \\ \dot{e} = h\left(-e + f^* - y \right) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \dot{\tilde{\theta}} = -k\left[y - \dfrac{h}{s+h}[y] \right] \cdot \sin\omega t = -k\left[y + e - f^* \right] \cdot \sin\omega t \\ \dot{e} = h\left(-e + f^* - y \right) \end{cases}$$

$$= k\left(-e + f^* - y \right)$$



$$\begin{cases} \dot{\tilde{\theta}} = k\left(-e + f^* - y\right) \cdot \sin \omega t \\ \dot{e} = h\left(-e + f^* - y\right) \end{cases}$$

$$y = f^* + \frac{f''}{2}(a \sin \omega t - \tilde{\theta})^2$$

非線形・時変系

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\theta}} = -k\left(e + \frac{f''}{2}(a \sin \omega t - \tilde{\theta})^2\right) \cdot \sin \omega t \\ \dot{e} = -h\left(e + \frac{f''}{2}(a \sin \omega t - \tilde{\theta})^2\right) \end{cases}$$

非線形・時変系

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\theta}} = -k\left(e + \dfrac{f''}{2}(a\sin\omega t - \tilde{\theta})^2\right)\cdot\sin\omega t \\ \dot{e} = -h\left(e + \dfrac{f''}{2}(a\sin\omega t - \tilde{\theta})^2\right) \end{cases}$$

$\tau = \omega t$

$d\tau = \omega dt$

$$\frac{d}{dt} = \omega\frac{d}{d\tau}$$

$$\begin{cases} \dfrac{d\tilde{\theta}}{d\tau} = -\dfrac{k}{\omega}\left(e + \dfrac{f''}{2}(a\sin\tau - \tilde{\theta})^2\right)\cdot\sin\tau \\ \dfrac{de}{d\tau} = -\dfrac{h}{\omega}\left(e + \dfrac{f''}{2}(a\sin\tau - \tilde{\theta})^2\right) \end{cases}$$

1周期積分すると
（平均化法）

$$\frac{dx}{d\tau} = f(x,\tau) \rightarrow \frac{dx_{av}}{d\tau} = \frac{1}{T}\int_0^T f(x,\tau)d\tau$$

平均化システム

$$\begin{cases} \dfrac{d\tilde{\theta}_{\mathrm{av}}}{d\tau} = -\dfrac{|f''|ka}{2\omega}\tilde{\theta}_{\mathrm{av}} \\ \dfrac{de_{\mathrm{av}}}{d\tau} = -\dfrac{h}{\omega}\left(e_{\mathrm{av}} + \dfrac{f''}{2}\left(\tilde{\theta}_{av}^2 + \dfrac{a^2}{2}\right)\right) \end{cases}$$

平衡点の計算

$$\begin{cases} \tilde{\theta}_{\mathrm{av}} = 0 \\ e_{\mathrm{av}} = -\dfrac{a^2 f''}{4} \end{cases}$$

平衡点回りでのJacobian

$$J_{av} := \begin{bmatrix} -\dfrac{|f''|ka}{2\omega} & 0 \\ 0 & -\dfrac{h}{\omega} \end{bmatrix}$$

局所安定性の条件

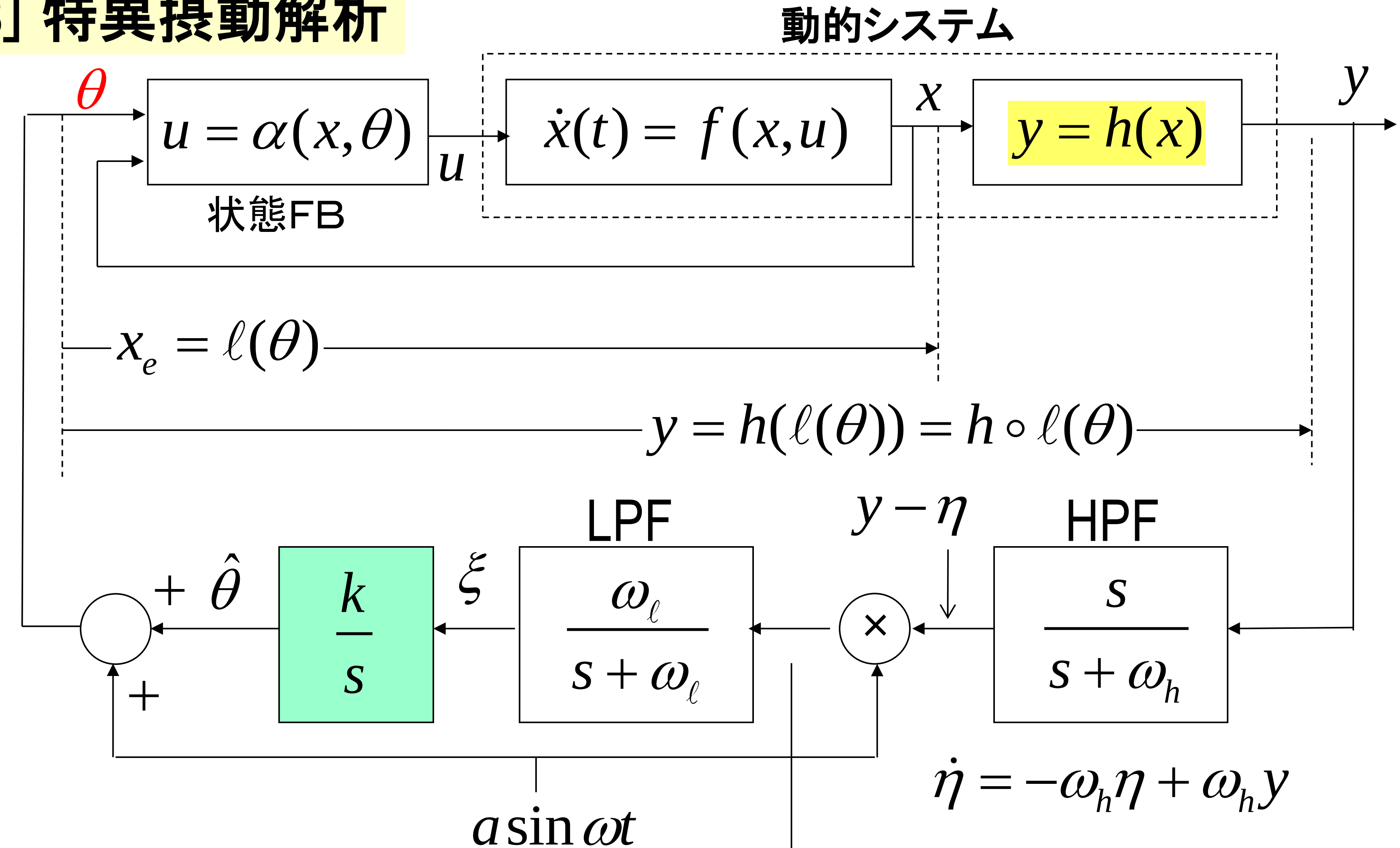
$k, a, h > 0$

$$\boxed{\begin{array}{c} \left|\tilde{\theta}_{\mathrm{av}}\right| + \left|e_{\mathrm{av}} + \dfrac{a^2 f''}{4}\right| \le O\left(\dfrac{1}{\omega}\right) \\ \left(y - f^*\right) \to f'' \cdot O\left(\dfrac{1 + a^2\omega^2}{\omega^2}\right) \end{array}}$$

定義

$$f(t) = O\left(g(t)\right) \Leftrightarrow \lim_{t\to\infty}\left|\frac{f(t)}{g(t)}\right| < \infty$$

[3] 特異摂動解析



$$\dot{x}(t) = f(x, \alpha(x, \hat{\theta} + a\sin\omega t))$$

$$\dot{\hat{\theta}} = k\xi \qquad \dot{\xi} = -\omega_\ell \xi + \omega_\ell \left[(y - \eta) a \sin\omega t \right]$$

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, \alpha(x, \hat{\theta} + a\sin\omega t)) \\ \dot{\hat{\theta}} = k\xi \\ \dot{\xi} = -\omega_\ell \xi + \omega_\ell \left[(y - \eta) a \sin\omega t \right] \\ \dot{\eta} = -\omega_h \eta + \omega_h y \end{cases}$$

$$\boxed{y = h(x)}$$

$$\tilde{\theta} := \hat{\theta} - \theta^* \qquad \dot{\tilde{\theta}} = k\xi$$

$$\dot{\tilde{\eta}} = -\omega_h \tilde{\eta} + \omega_h \left[y - h \circ \ell(\theta^*) \right]$$

$$\tilde{\eta}(t) := \eta - h \circ \ell(\theta^*)$$

時間軸変換 $\boxed{\tau = \omega t}$

$$\boxed{\omega \cdot d/d\tau = d/dt}$$

$$\omega_\ell := \omega\delta\omega_L,\ \omega_h := \omega\delta\omega_H,\ k := \omega\delta K$$

$$\begin{cases} \omega \dfrac{dx}{d\tau} = f(x, \alpha(x, \theta^* + \tilde{\theta} + a\sin\tau)) \\ \dfrac{d}{d\tau}\begin{bmatrix} \tilde{\theta} \\ \xi \\ \tilde{\eta} \end{bmatrix} = \delta \begin{bmatrix} K\xi \\ -\omega_L \xi + \omega_L \left[h(x) - h \circ \ell(\theta^*) - \tilde{\eta} \right] a \sin\tau \\ -\omega_H \tilde{\eta} + \omega_H \left[h(x) - h \circ \ell(\theta^*) \right] \end{bmatrix} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \omega \dfrac{dx}{d\tau} = f(x, \alpha(x, \theta^* + \tilde{\theta} + a\sin\tau)) \\ \dfrac{d}{d\tau}\begin{bmatrix} \tilde{\theta} \\ \xi \\ \tilde{\eta} \end{bmatrix} = \delta \begin{bmatrix} K\xi \\ -\omega_L \xi + \omega_L \left[h(x) - h \circ \ell(\theta^*) - \tilde{\eta} \right] a \sin\tau \\ -\omega_H \tilde{\eta} + \omega_H \left[h(x) - h \circ \ell(\theta^*) \right] \end{bmatrix} \end{cases}$$

前頁と同じ式

$$z := \begin{bmatrix} \tilde{\theta} & \xi & \tilde{\eta} \end{bmatrix}^T \quad \frac{dz}{d\tau} = \delta G(\tau, x, z)$$

指数安定な周期解 $\bar{z}$ をもつ

$$\frac{d\bar{z}}{d\tau} = \delta G(\tau, x_e, \bar{z})$$

$$x_e = \ell(\theta^* + \tilde{\theta} + a\sin\tau)$$

$$\tilde{z} := z - \bar{z}$$

② $$\frac{d\tilde{z}}{d\tau} = \delta \tilde{G}(\tau, x, \tilde{z})$$

ただし， $\tilde{G}(\tau, x, \tilde{z}) = G(\tau, x, \tilde{z} + \bar{z}) - G(\tau, x_e, \bar{z})$

① $$\omega \frac{dx}{d\tau} = \tilde{F}(\tau, x, \tilde{z})$$

ただし，$\tilde{F}(\tau, x, \tilde{z}) = f(x, \alpha(x, \theta^* + \tilde{z}_1 + \bar{\theta} + a\sin\tau))$

① $\omega \frac{dx}{d\tau} = \tilde{F}(\tau, x, \tilde{z}) \xrightarrow{\text{境界層モデル}} \frac{dx}{dt} = \tilde{F}(\tau, x_b + \overline{x}, \tilde{z})$

② $\frac{d\tilde{z}}{d\tau} = \delta \tilde{G}(\tau, x, \tilde{z}) \xrightarrow{\text{縮小モデル}} \frac{d\tilde{z}_r}{d\tau} = \delta \tilde{G}(\tau, x, \tilde{z}_r + \overline{z})$

Tikhonov's Theorem on the infinite interval

$$\left(x(t), \hat{\theta}(t), \xi(t), \eta(t) \right) \to B_{O(\omega+\delta+a)} \left(\ell(\theta^*), \theta^*, 0, h \circ \ell(\theta^*) \right)$$

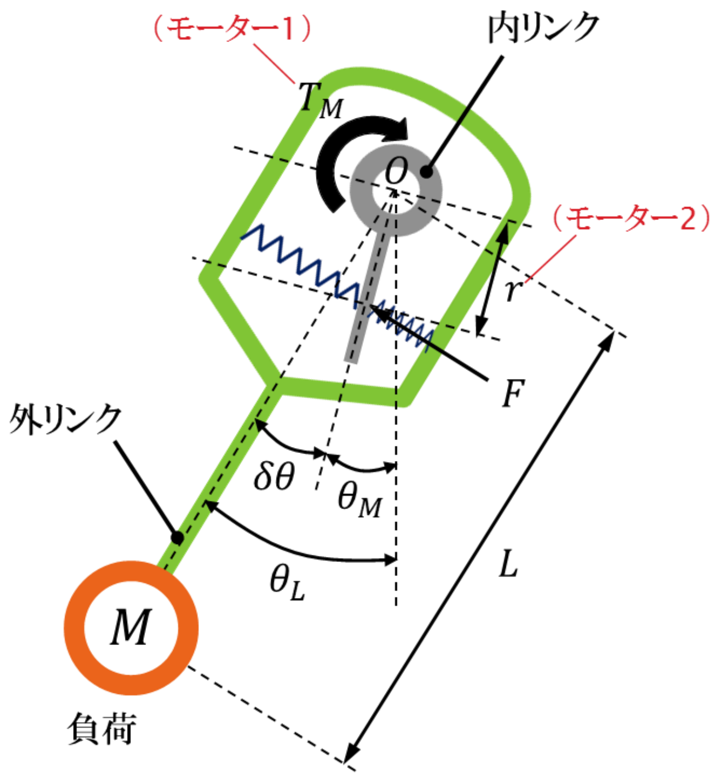
$$y(t) = h(x(t)) \Big\downarrow$$

指数収束

$$y(t) \to B_{O(\omega+\delta+a)} \left(h \circ \ell(\theta^*) \right)$$

指数収束

応用[1]　省エネルギーを目的とした極値探査による剛性最適化



記号	説明
T_M	モーター1によるトルク
r	回転の中心Oから弾性要素までの距離
L	中心Oから負荷までの距離

AwAS（可変剛性アクチュエータ）(1/2)

弾性要素によって内リンクに発生する力

$$F = 2K_s r \sin \delta\theta$$

（K_s : 取り付けられているバネの弾性定数）

これによって発生するトルク

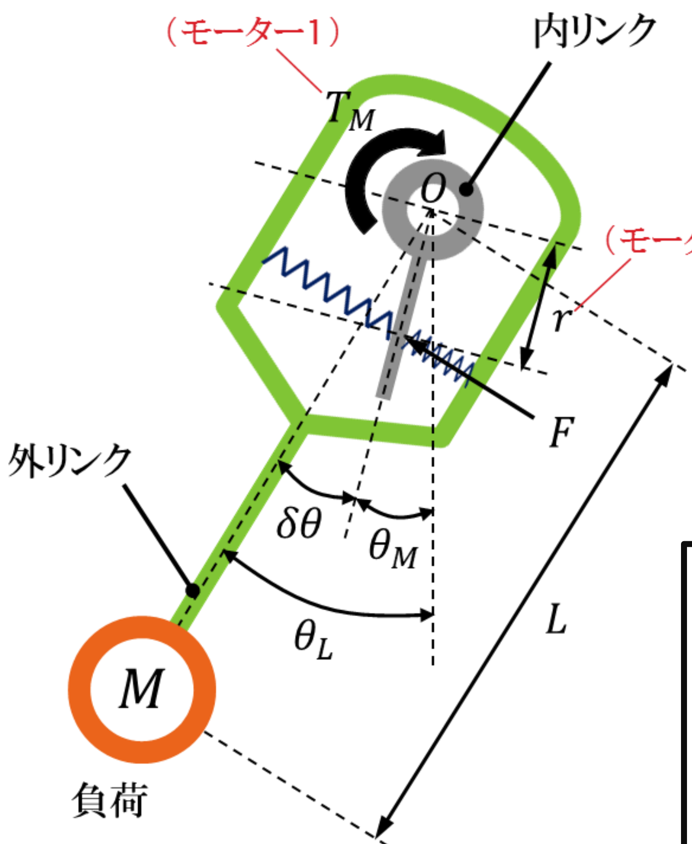
$$T = Fr \cos \delta\theta = 2K_s r^2 \sin \delta\theta \cos \delta\theta$$

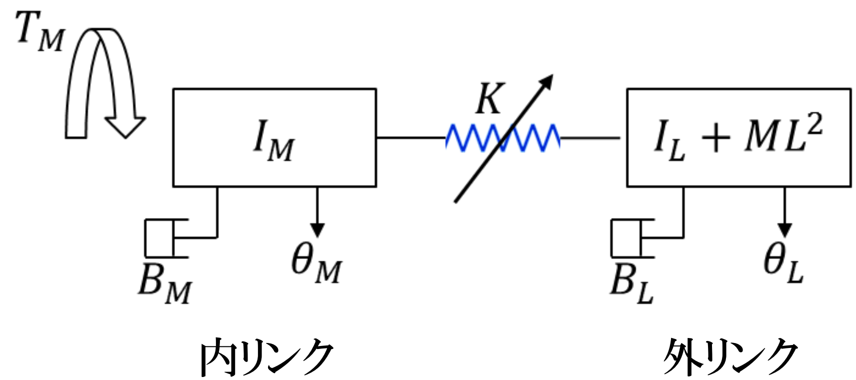
これを角度変位で偏微分して

$$K = \frac{\partial T}{\partial(\delta\theta)} = 2K_s r^2 (2\cos^2 \delta\theta - 1) \geq 0$$

→r によって剛性を変えることができる

AwAS（可変剛性アクチュエータ）(2/2)





運動方程式

$$\begin{cases} I_M\ddot{\theta}_M + B_M\dot{\theta}_M - K\delta\theta = T_M & \text{（内リンク）} \\ (I_L + ML^2)\ddot{\theta}_L + B_L\dot{\theta}_L + K\delta\theta = 0 & \text{（外リンク）} \end{cases}$$

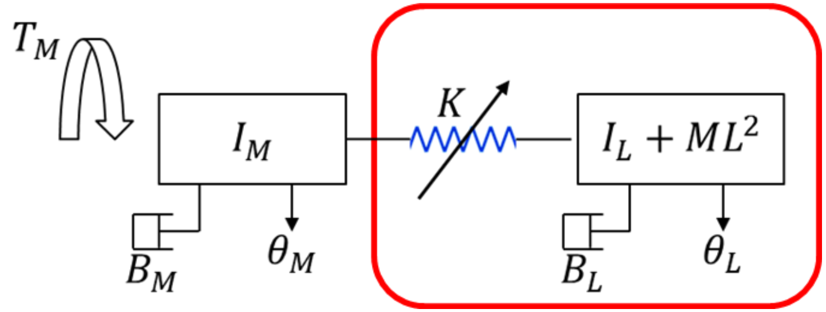
ただし、

$$\delta\theta = \theta_L - \theta_M$$

$$K = 2K_s r^2(2\cos^2\delta\theta - 1)$$

オフライン法（事前計算が必要）

最適剛性値 K_d の算出



AwASの固有周波数（ただし、$B_L = 0$ とする）

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{(I_L + ML^2)}} \quad \Longrightarrow \quad K_d = 4\pi^2 f^2 (I_L + ML^2) \quad — ①$$

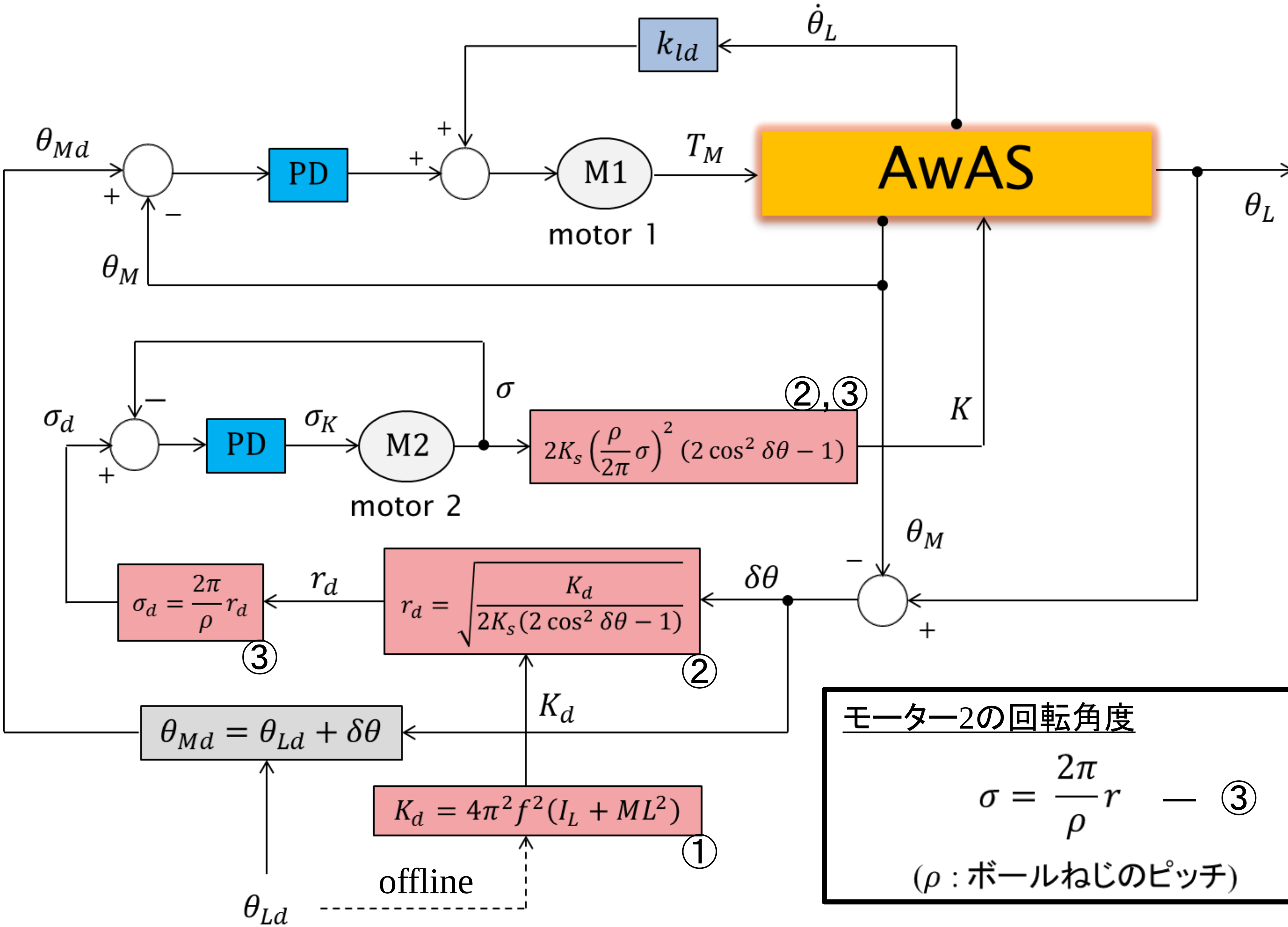
この式より、$f_n = f$ (目標運動の周波数)となる K を求める。

代入

K_d を用いて r_d を計算

$$K = 2K_s r^2 (2\cos^2\delta\theta - 1) \quad \Longrightarrow \quad r_d = \sqrt{\frac{K_d}{2K_s(2\cos^2\delta\theta - 1)}} \quad — ②$$

従来システムの概略図



モーター2の回転角度

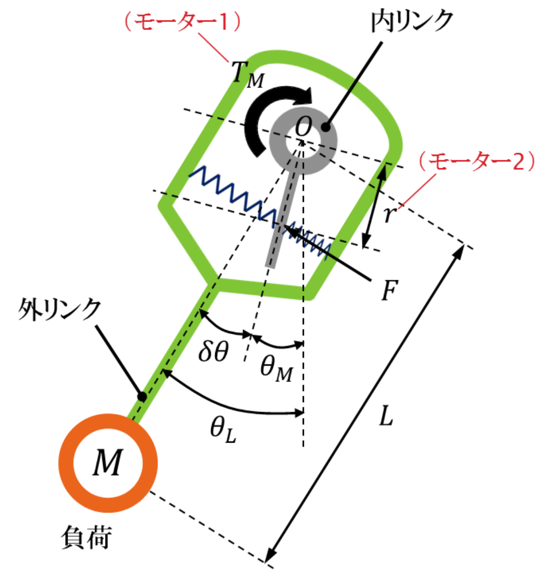
$$\sigma=\frac{2\pi}{\rho}r \quad — ③$$

(ρ：ボールねじのピッチ)

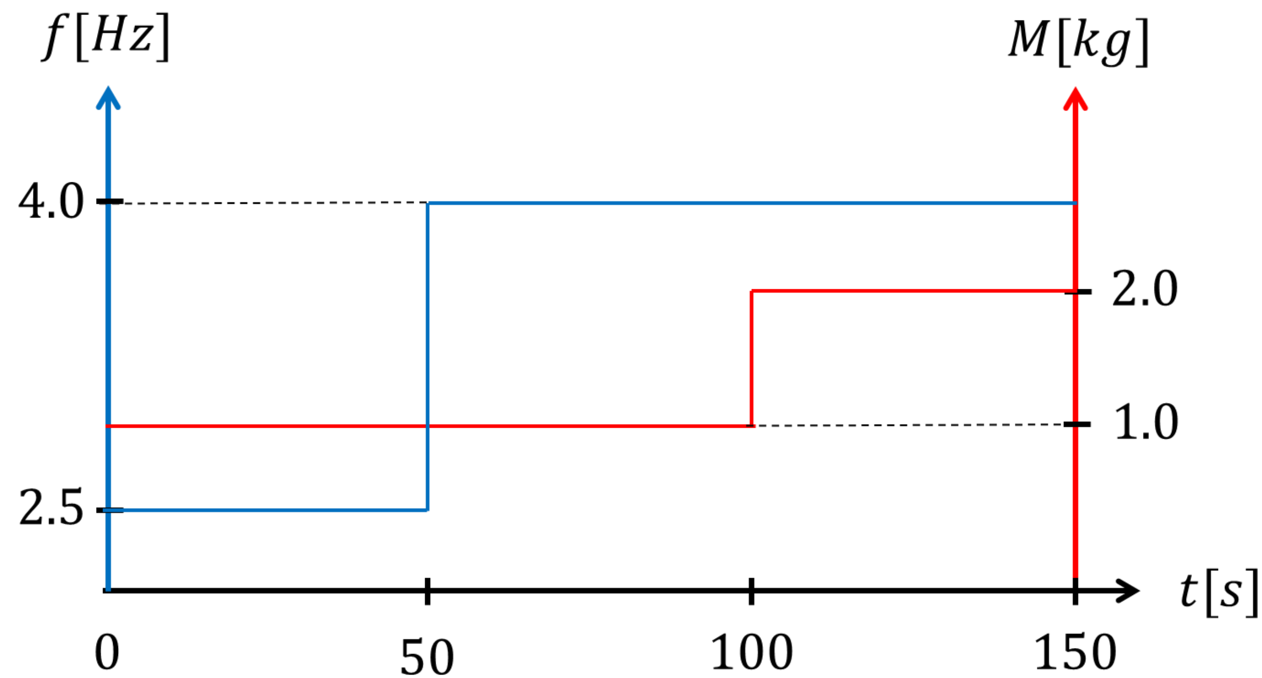
数値シミュレーション結果 (1/3)

- 目標運動

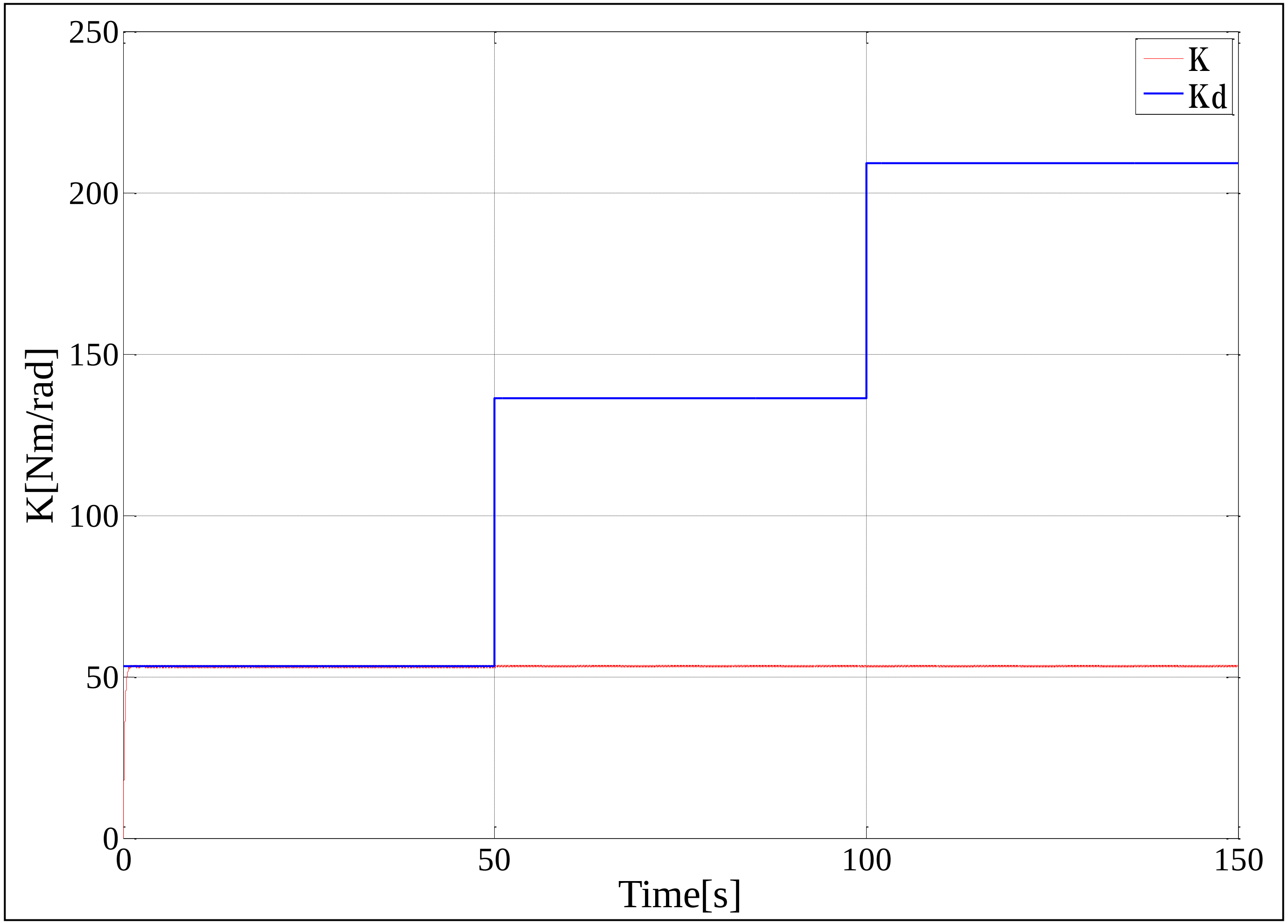
$$\theta_{Ld} = 0.2\sin(2\pi f t)\ \ [\mathrm{rad}]$$



- シミュレーション条件

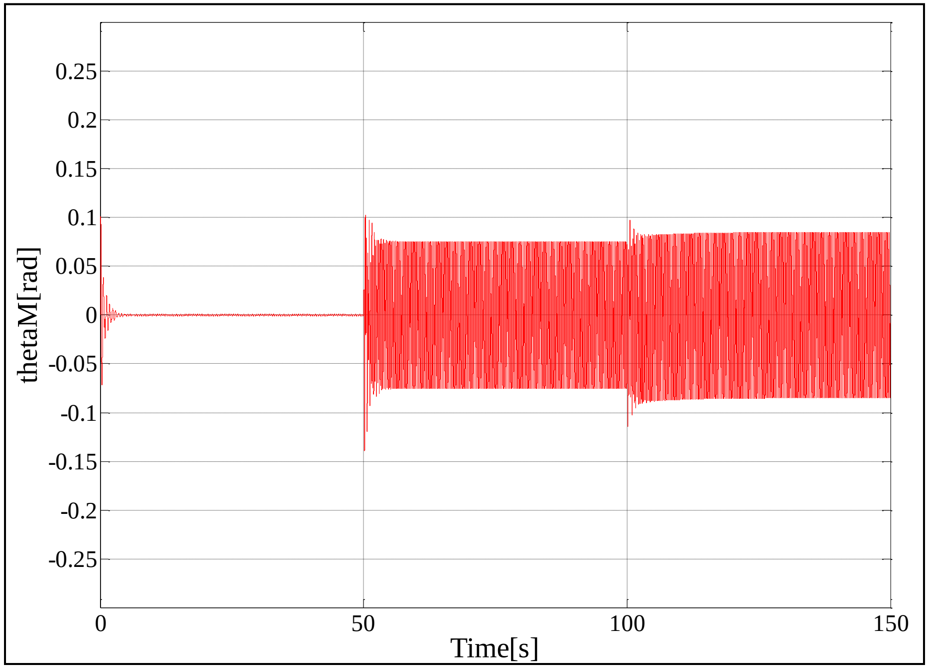


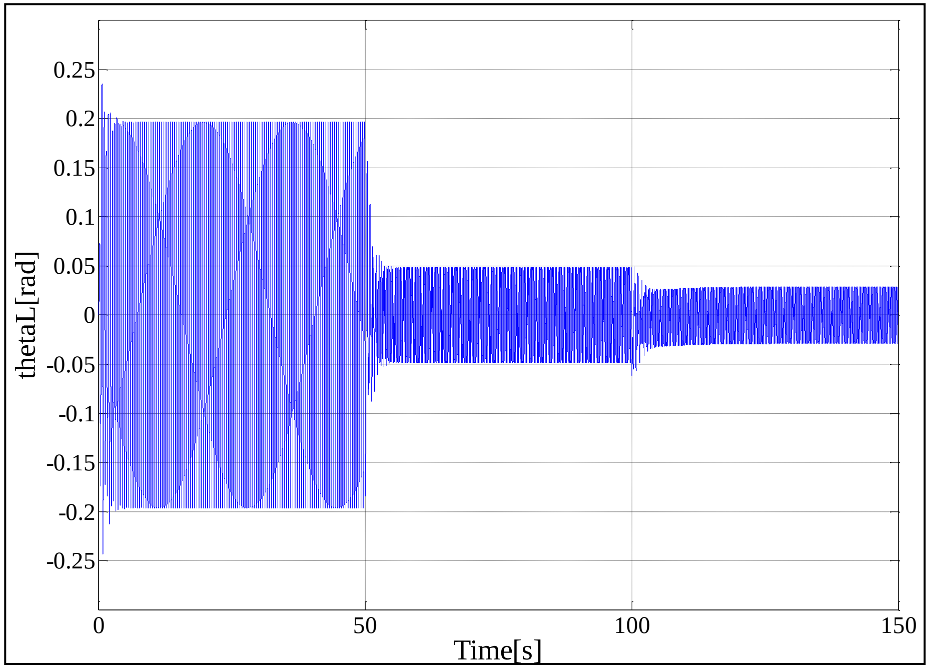
数値シミュレーション結果 (2/3)



最適剛性 K_d (青) とAwASの剛性 K (赤)

数値シミュレーション結果 (3/3)

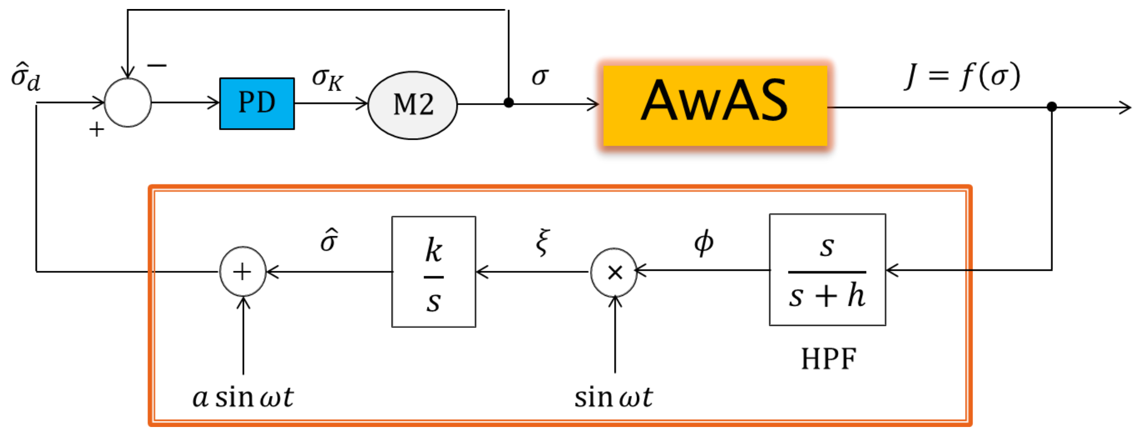




内リンクの軌道 θ_M	外リンクの軌道 θ_L

極値制御

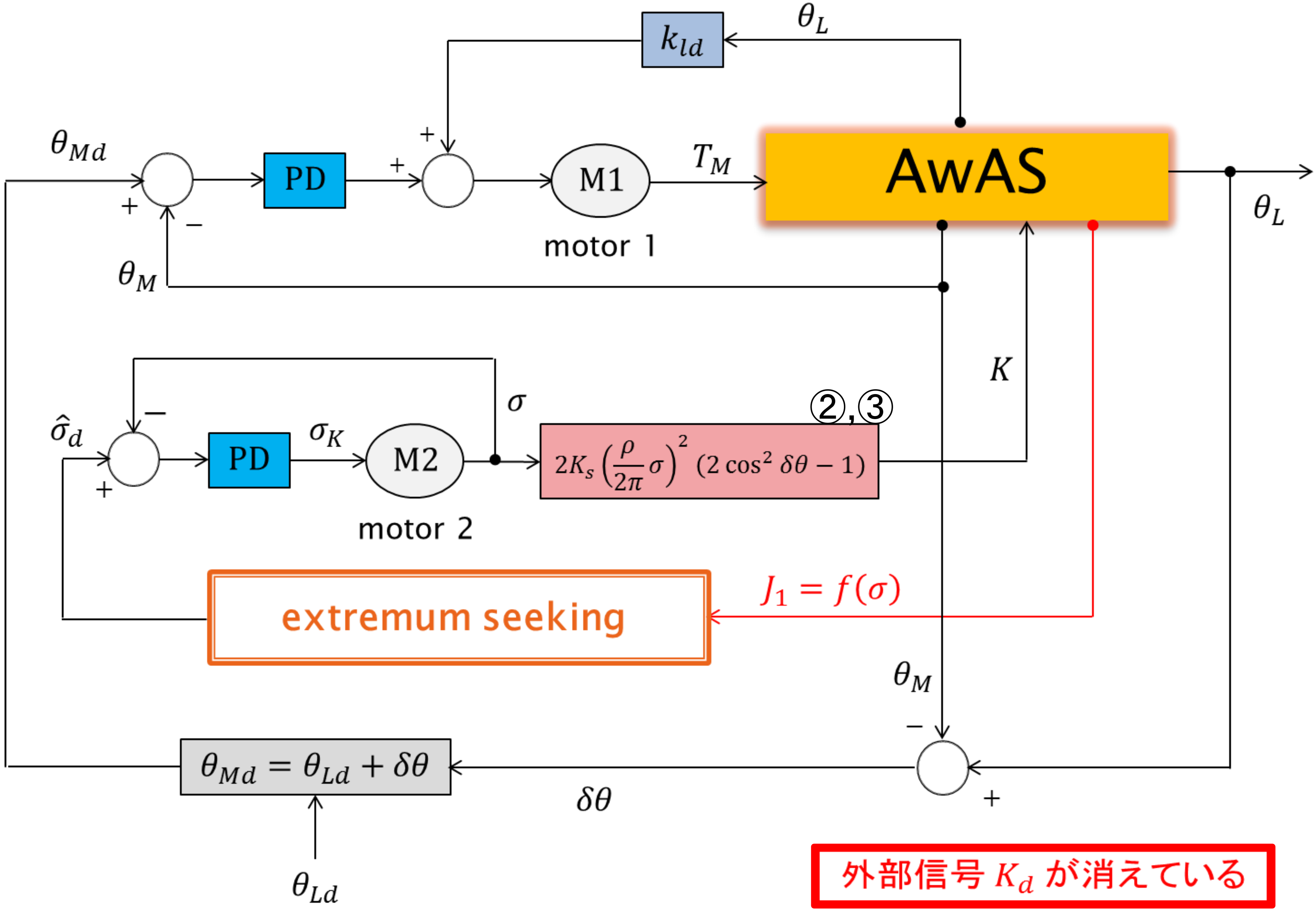
評価関数を与えると、それを極小(or極大)にするようにパラメータをオンラインで調節する。



今回の場合、パラメータは σ である。
評価関数は、内リンクの時刻 t までの総運動エネルギーとした。

$$J_1 = f(\sigma) = \int_0^t \frac{1}{2} I_M \, \dot{\theta}_M{}^2 \, dt$$

提案システムの概略図(極値制御)

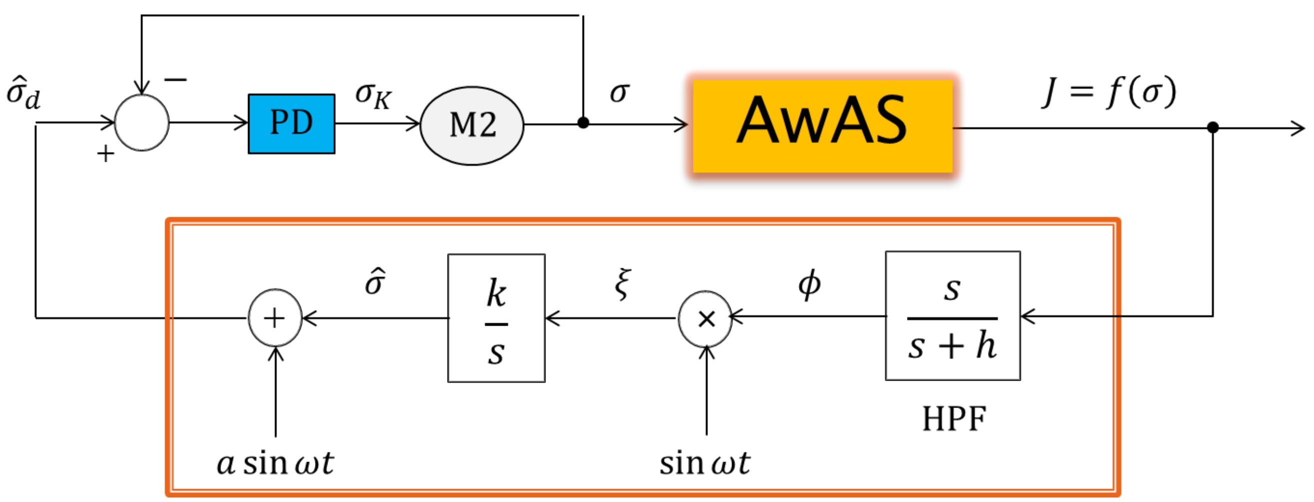


外部信号 K_d が消えている

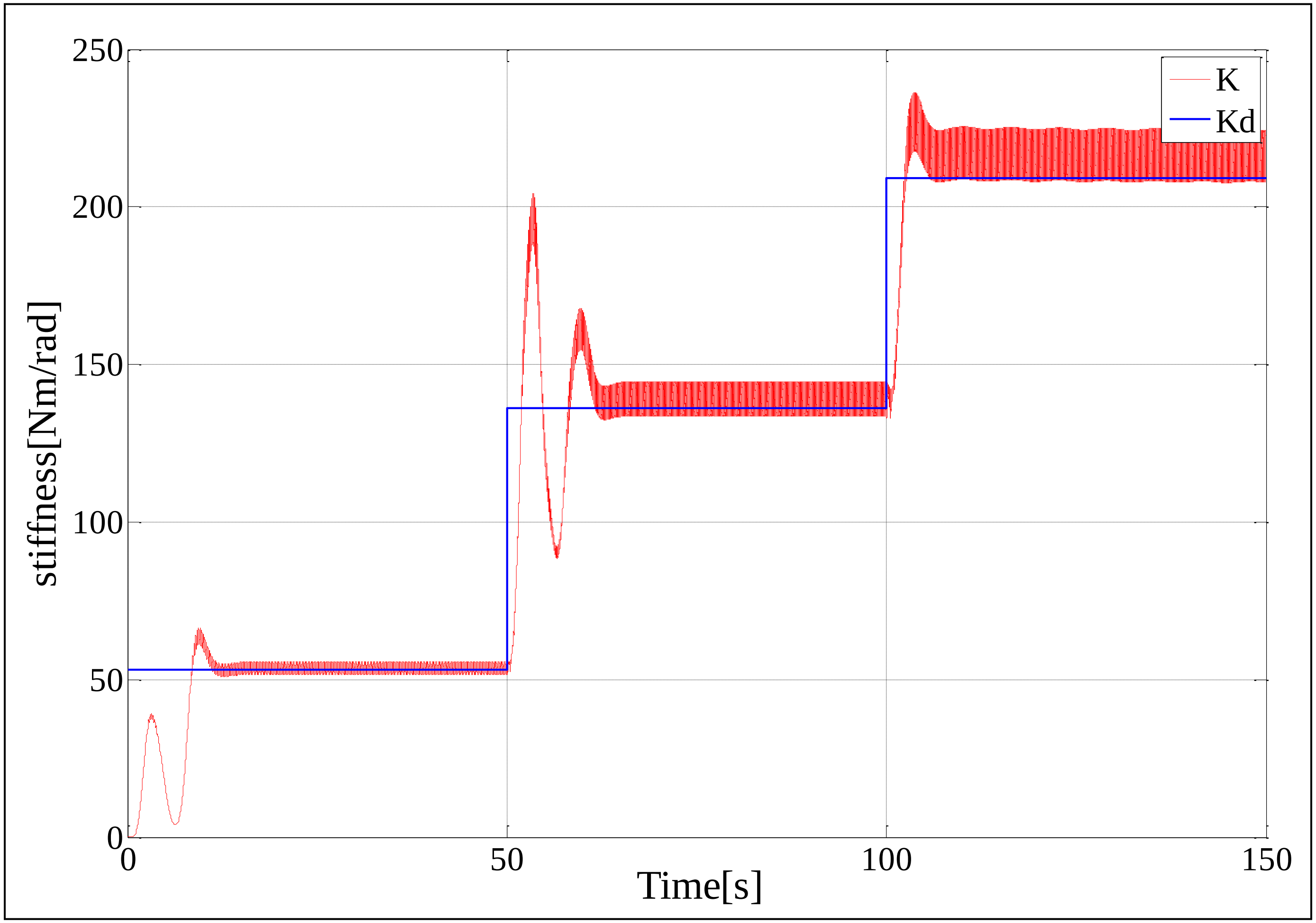
数値シミュレーション結果 (1/4)

- 目標運動，シミュレーション条件は従来法の場合と同じ
- 極値制御に用いる各パラメータの値

$$a = -0.01, \quad k = 80, \quad h = 1.0, \quad \omega = 1.0$$

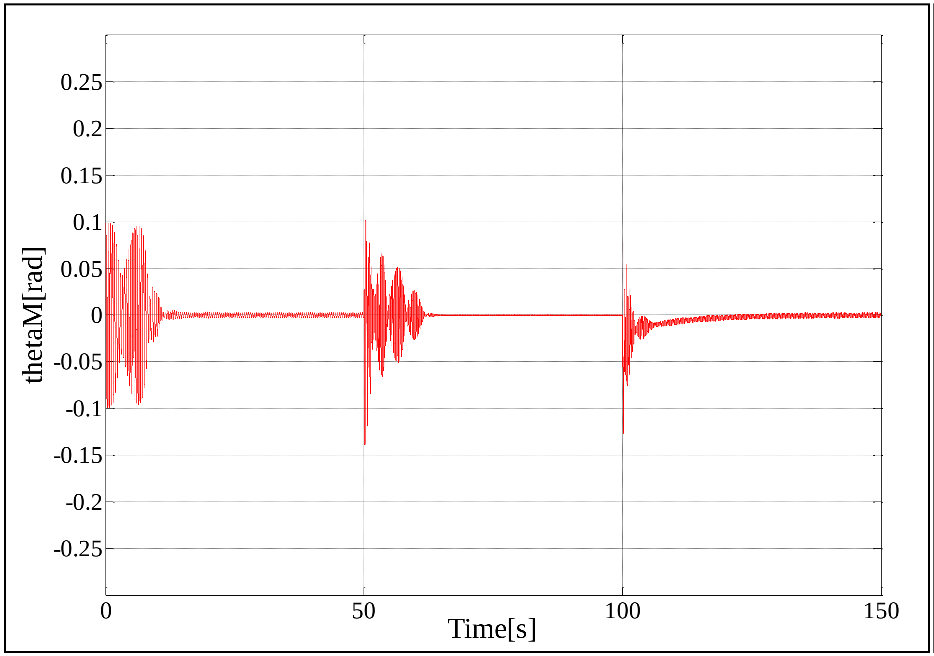


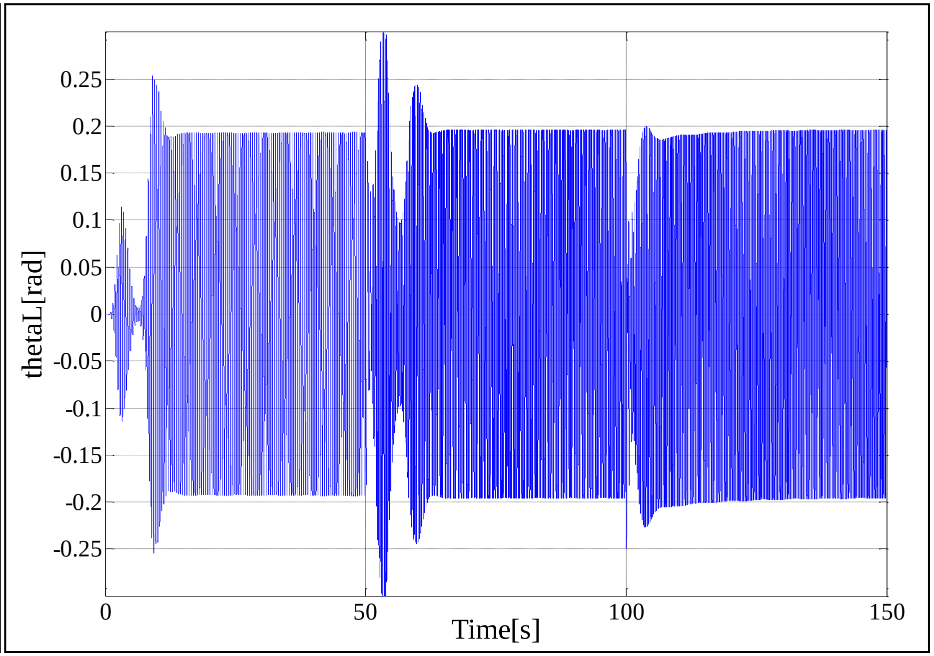
数値シミュレーション結果 (2/4)



最適剛性 K_d (青) と AwASの剛性 K (赤)

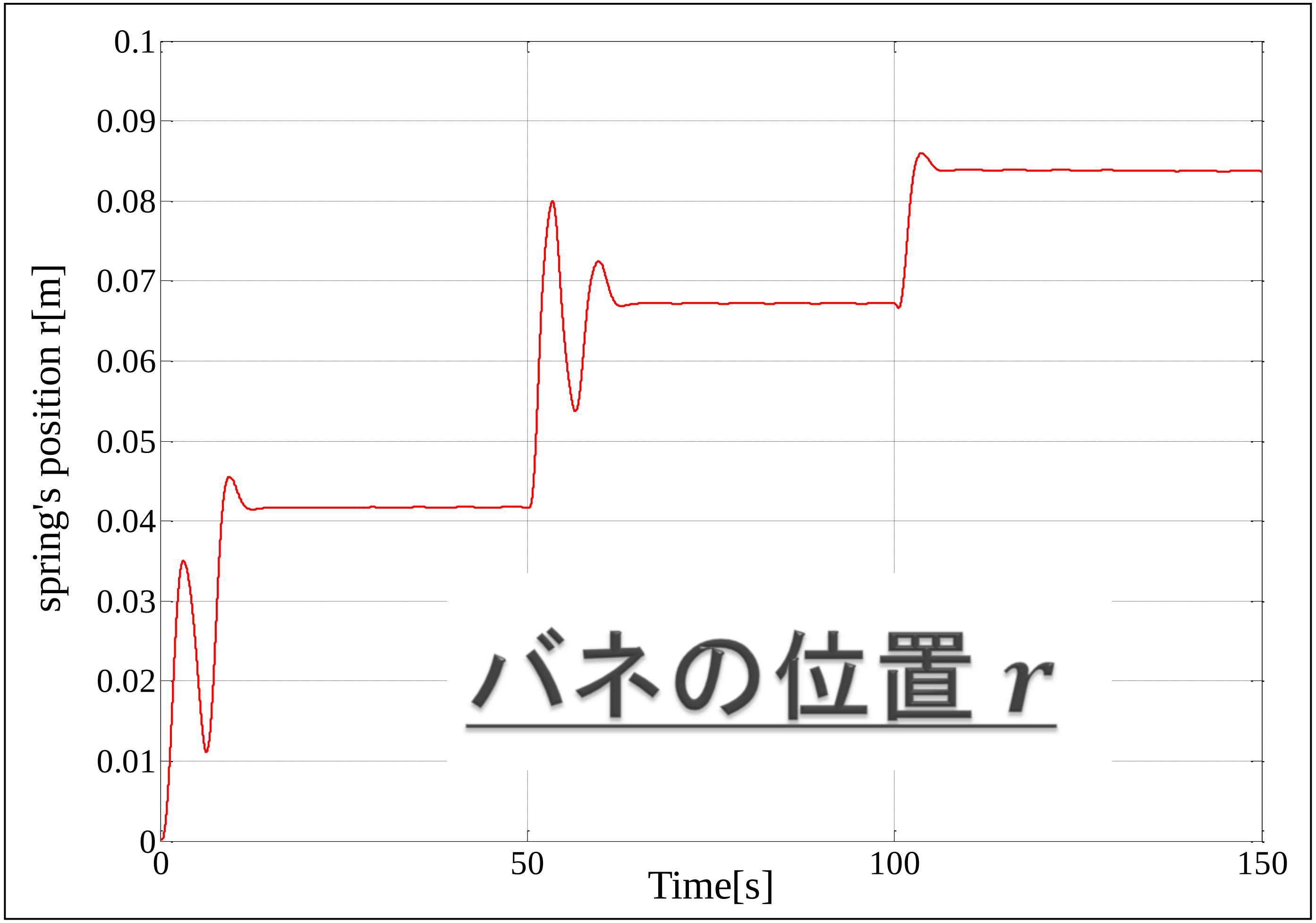
数値シミュレーション結果 (3/4)





内リンクの軌道 θ_M	外リンクの軌道 θ_L

数値シミュレーション結果 (4/4)



バネの位置 r

[2-1] Extremum-seeking control by Ozguner, Switching Method

To introduce the basic idea, consider the following fundamental system:

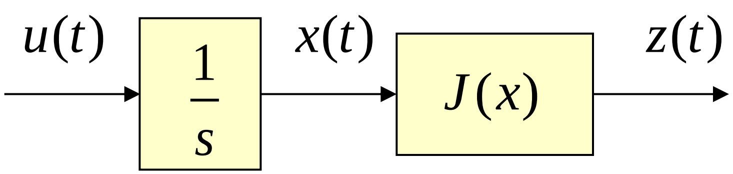
Plant: $$\frac{dx}{dt} = u(t)$$

unknown

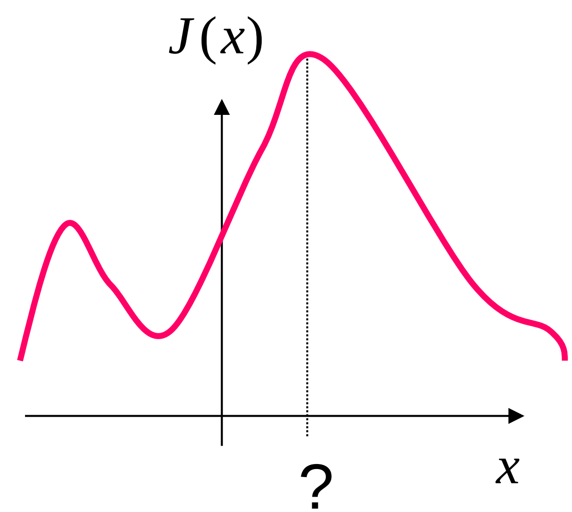
Performance index variable: $$z(t) = J(x)$$

Available on line

Unknown performance index, function of x

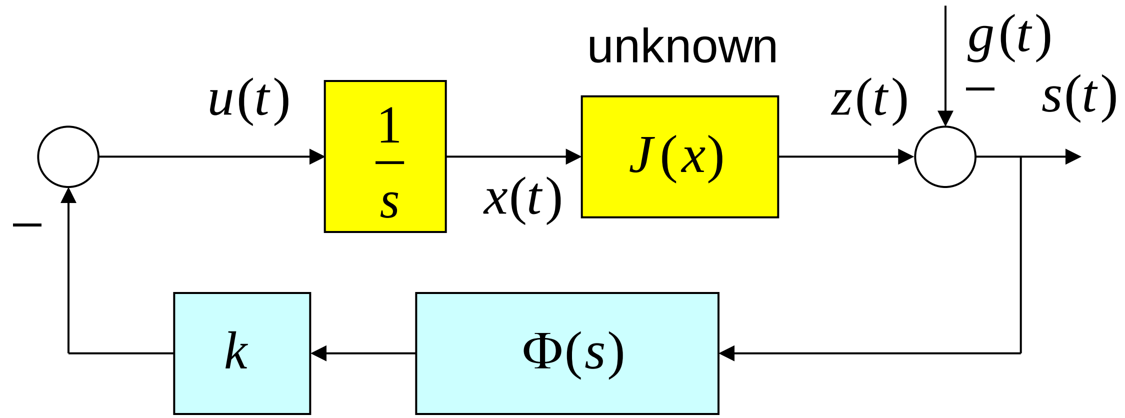


Problem:
To maximize the performance index variable of a poorly modeled, often time varying system in real time, in the absence of a priori knowledge about how the performance index variable depends on the unknown states or inputs.



Unknown setpoint

Seek this point !



Extremum-seeking control

$$u(t) = -k\Phi(s),\, k > 0$$

$\Phi(s) := \operatorname{sgn}\sin\left(\dfrac{\pi s(t)}{\alpha}\right)$: periodic switching function

$s(t) := z(t) - g(t)$

$g(t)$: Arbitrarily time increasing function, for example $\dot{g}(t) = \rho > 0$

Local Stability is proved based on the Lyapunov function technique in H. Yu and U. Ozguner, "Extremum-seeking control strategy for ABS system with time delay," Proceedings of the American control Conference, pp. 3753-3758, Anchorage, AK May8-9, 2002.

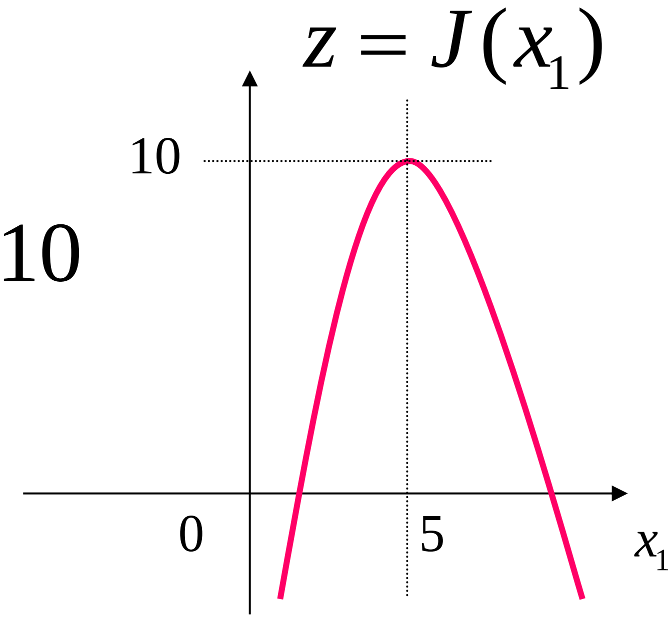
Numerical Simulations

Second order plant

Plant:
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2(t) \\ \dot{x}_2 = -30x_1(t) - 11x_2(t) + u(t) \end{cases}$$

Performance index variable:

$$z(t) := J(x_1) = -10\left(x_1 - 5\right)^2 + 10$$



Extremum-seeking control

$$\begin{cases} \dot{q}(t) = -0.05\,\mathrm{sgn}\sin\left(\dfrac{\pi s(t)}{0.05}\right) \\ u(t) = 30q(t) \end{cases}$$

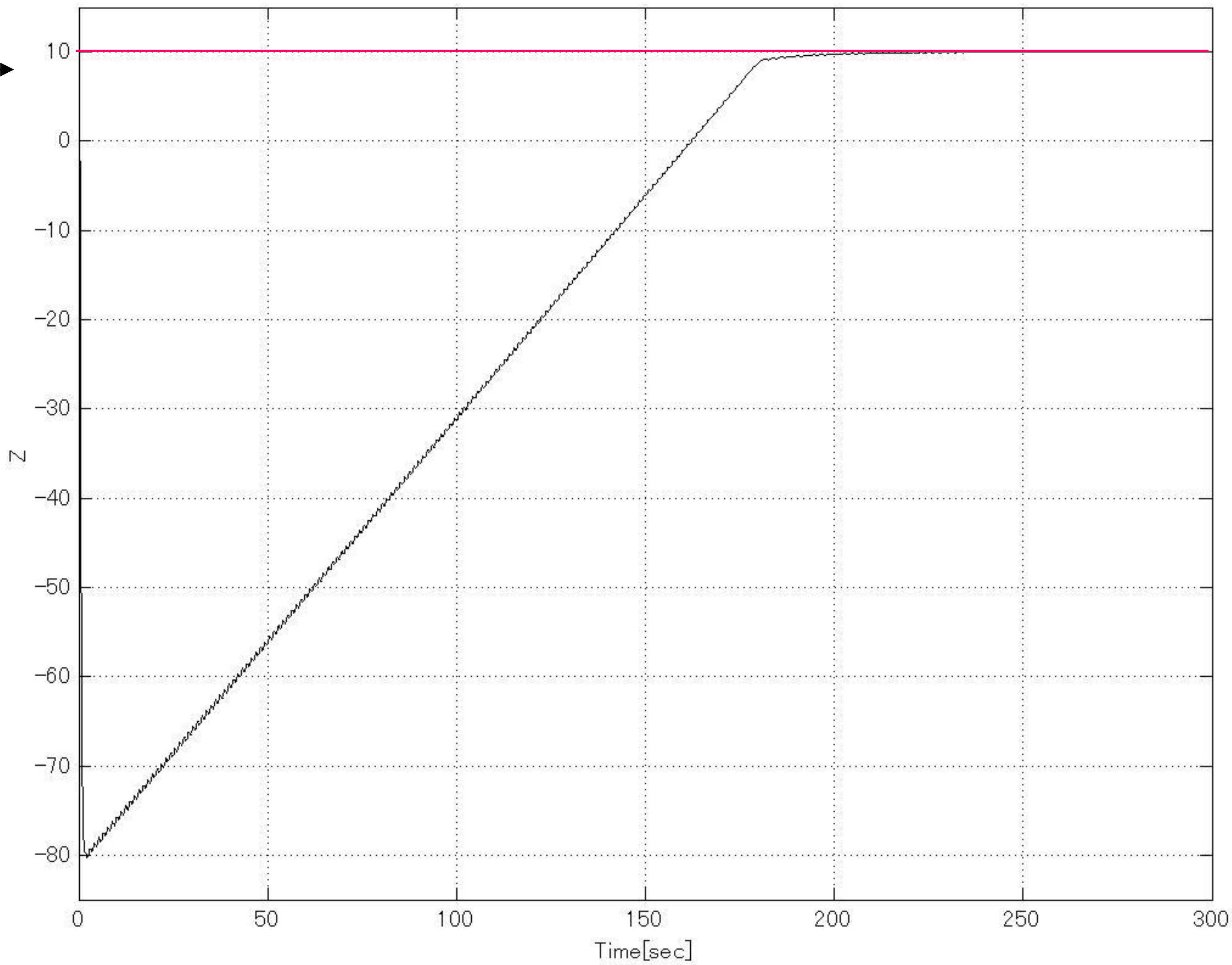
$$s(t) := z(t) - g(t)$$

$$\dot{g}(t) = 0.5,\ g(0) = 0$$

First order controller

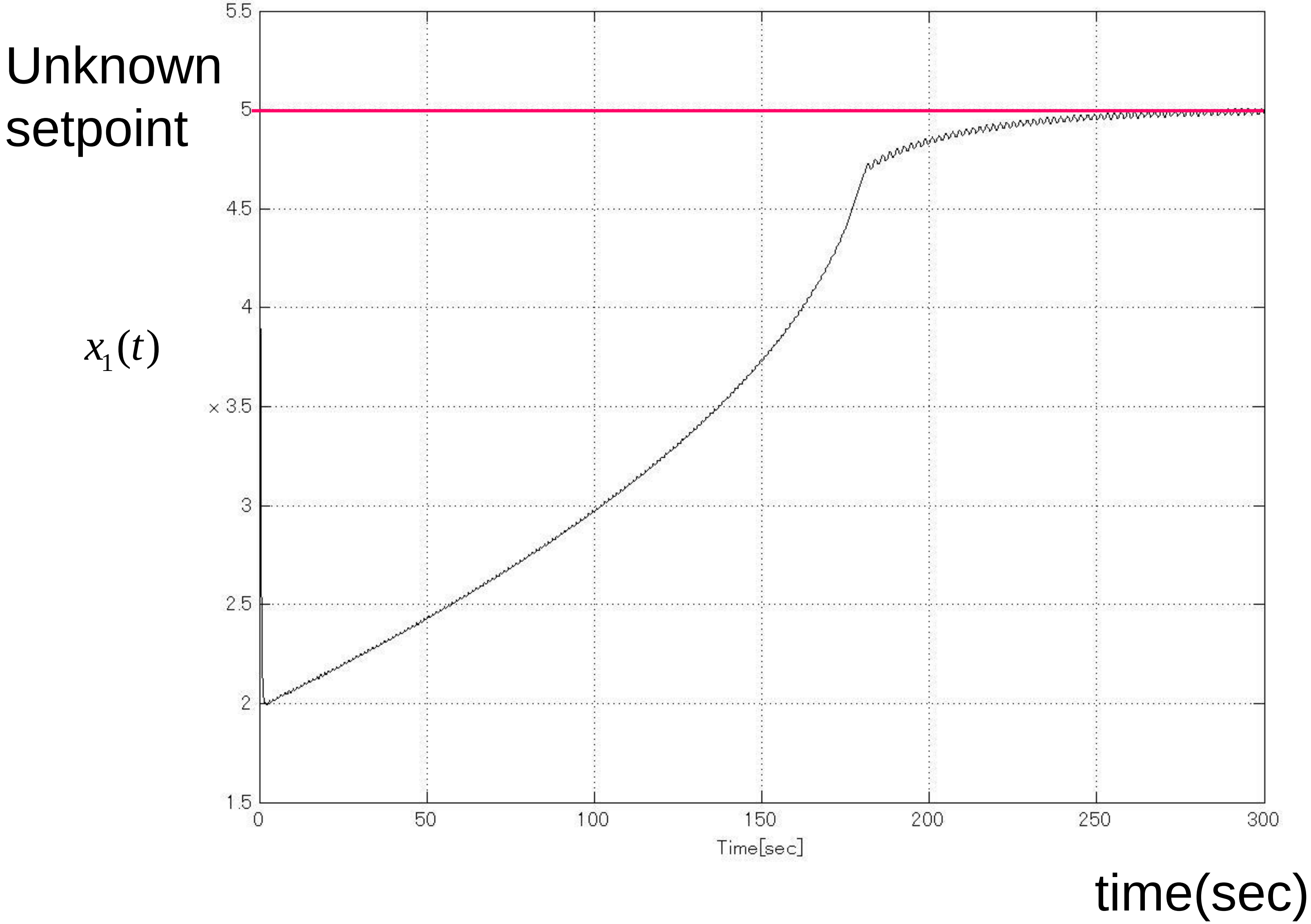
Performance index variable z(t)

Max



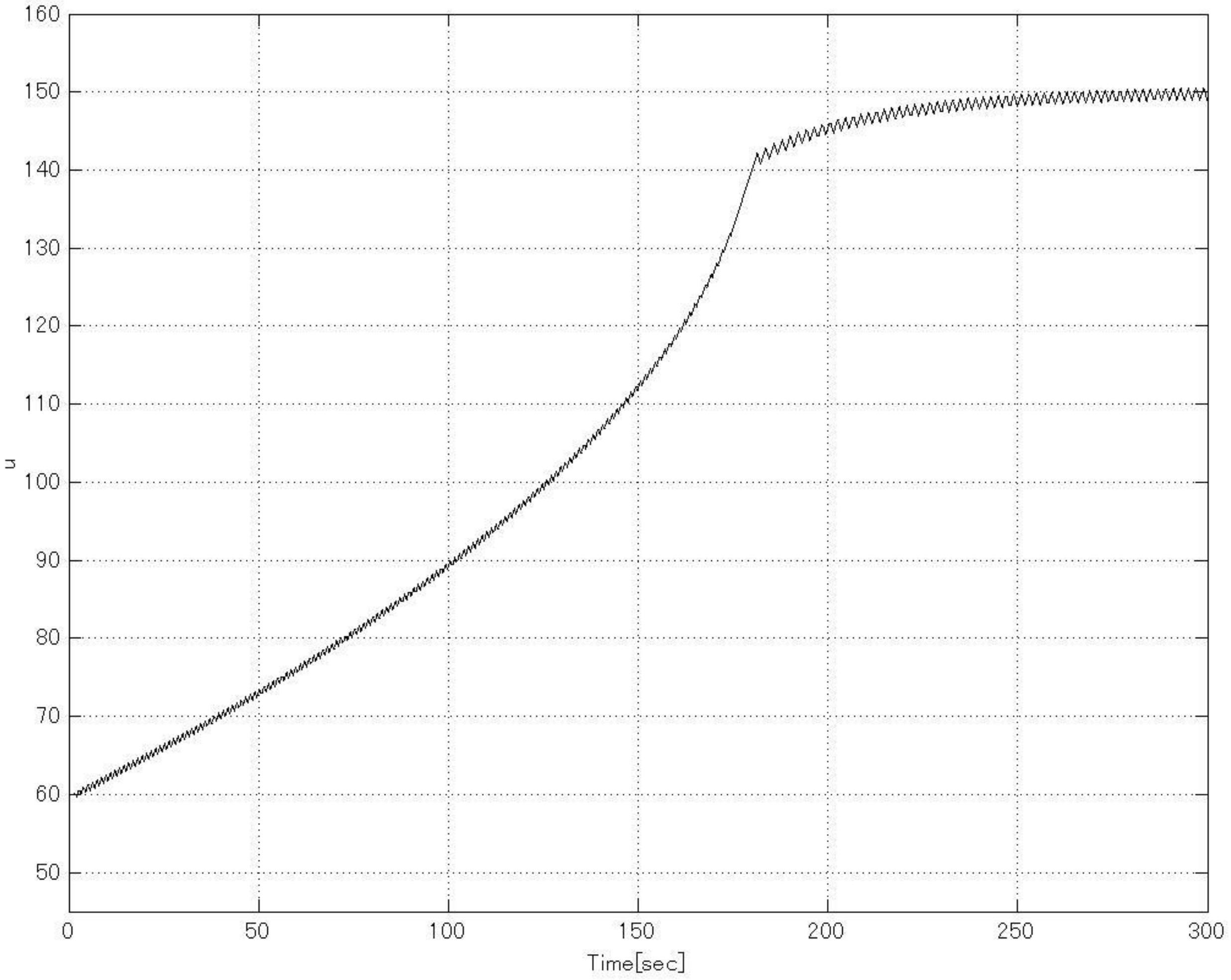
time(sec)

Time profile of $x_1(t)$



Time profile of control input $u(t)$

$u(t)$

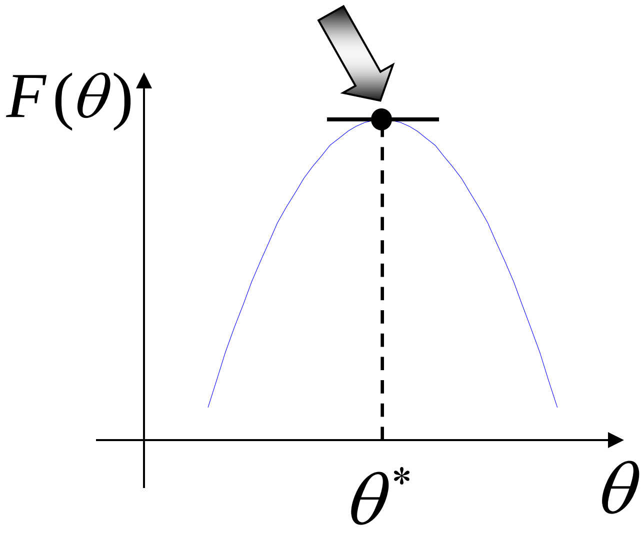


time(sec)

Conventional Method

(Perturbation, Switching)

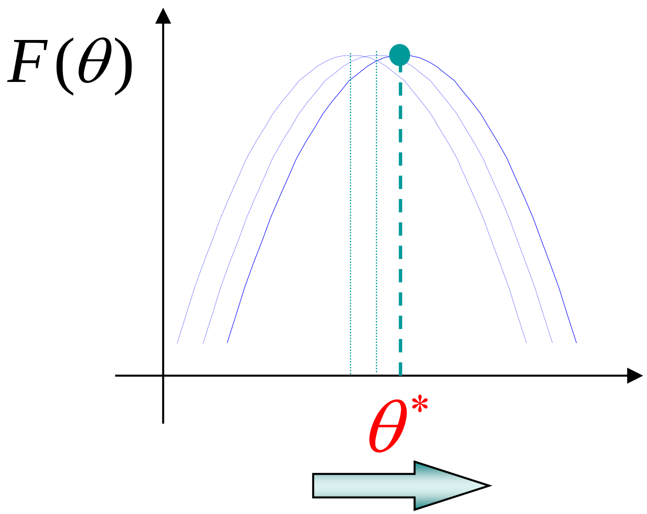
Gradient=0



This is not time variant

Proposed method

(Extend petrubagtion, switching)

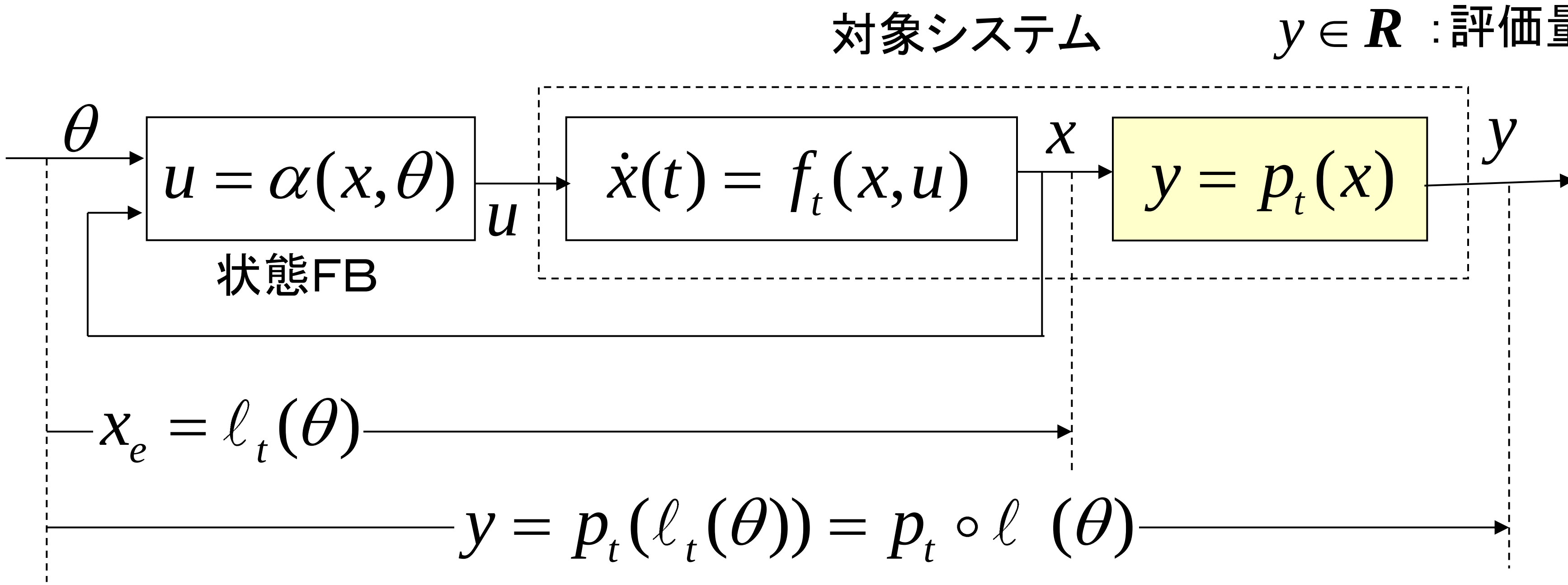


It may be time-varinat

	Extremum seeking	ES based on IMC
Perturbation	M. Krstic(1997)	Proposed by Ohmori
Switching	U. Ozgner(1995)	Proposed by Ohmori

[2-2] IMC-based ES and Antilock Braking

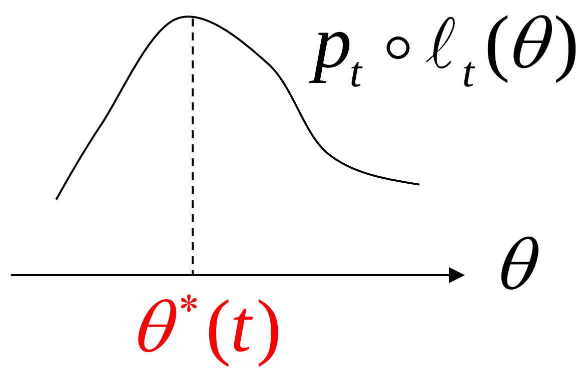
$\boldsymbol{x} \in \boldsymbol{R}^n$: 状態
$u \in \boldsymbol{R}$: 入力
$y \in \boldsymbol{R}$: 評価量



仮定1： $f_t\left(\boldsymbol{x}_e, \alpha(\boldsymbol{x}_e,\theta)\right) = 0$ となる平衡点　$x_e = \ell_t(\theta)$ が存在し，
すべてのθに対して，局所的に指数安定

仮定2： $\dfrac{\partial\left(p_t \circ \ell_t\right)}{\partial\theta}\left(\theta^*(t)\right) = 0$

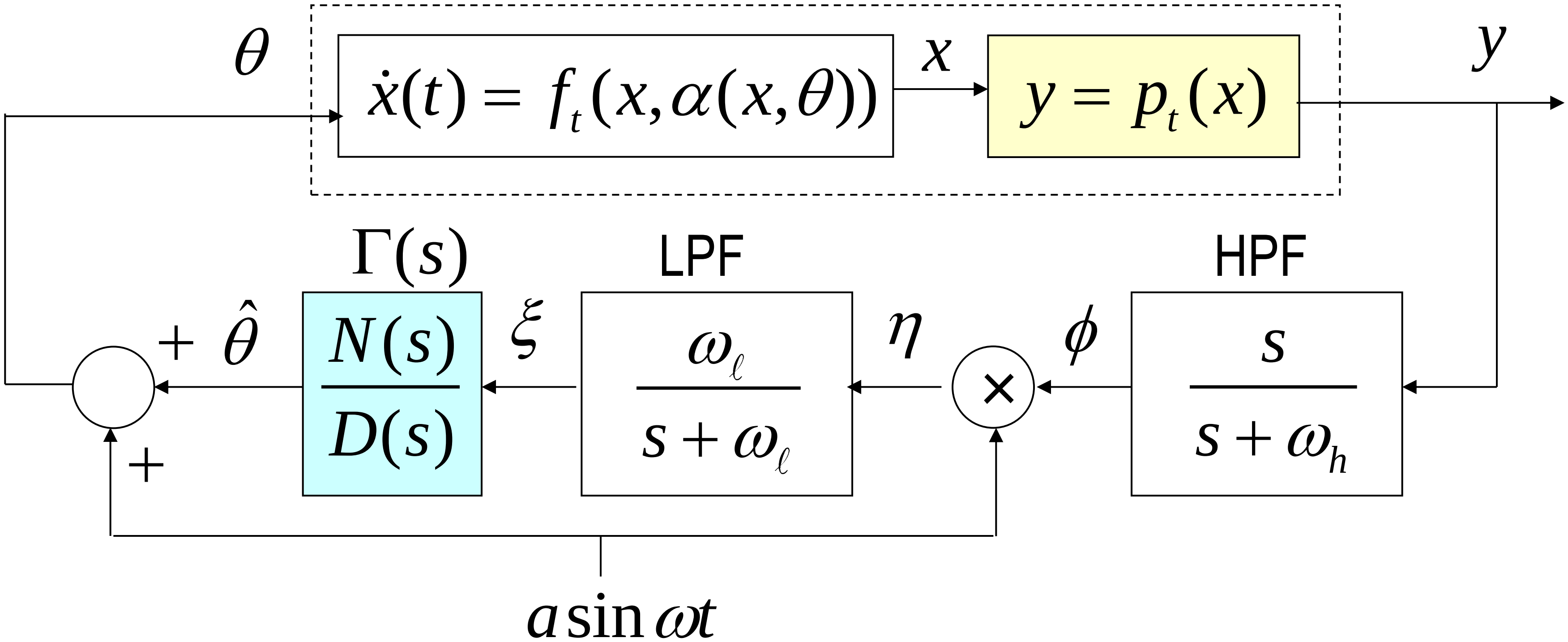
かつ　$\dfrac{\partial^2\left(p_t \circ \ell_t\right)}{\partial\theta^2}\left(\theta^*(t)\right) < 0$



$D(s)\theta^*(t) = 0$

変化のクラスを
規定する

内部モデル原理に基づく極値制御



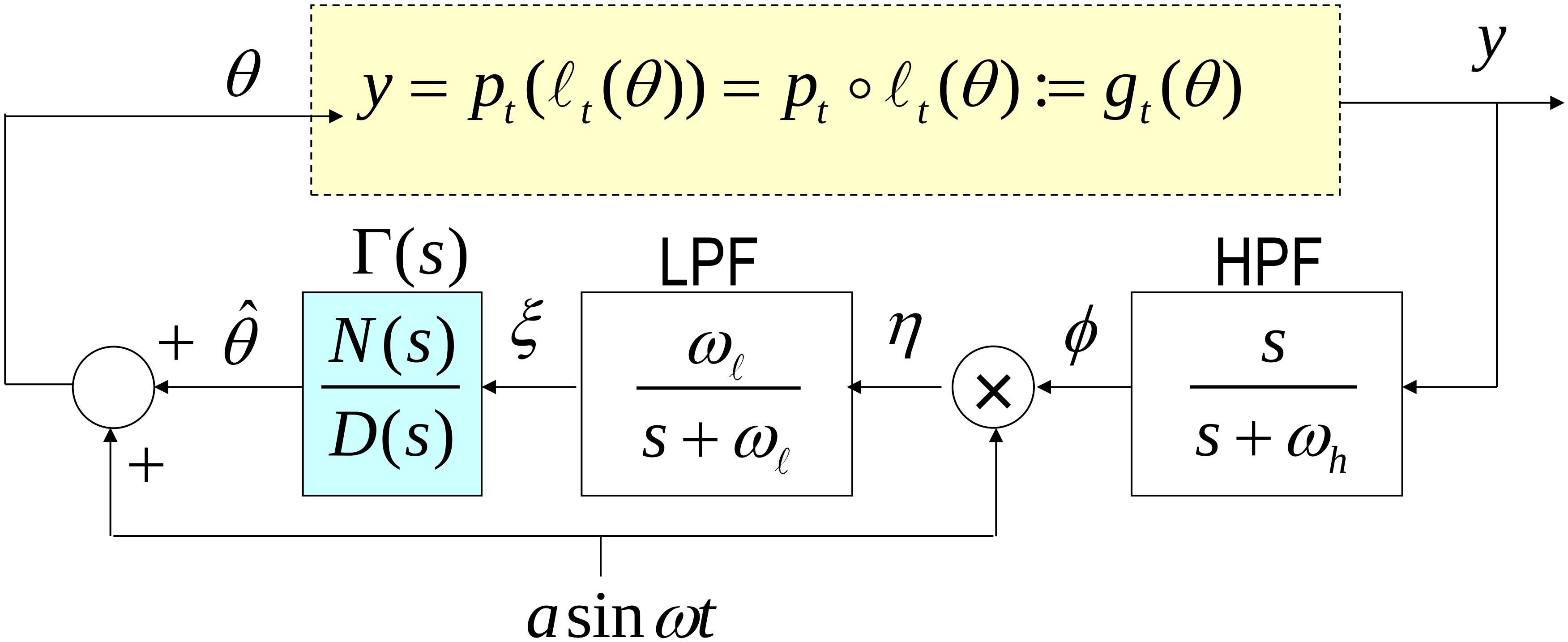
たとえば,　$s^2\theta^*(t) = 0$

従来法　$\Gamma(s) = \dfrac{k}{s}$

本手法　$\Gamma(s) = \dfrac{N(s)}{D(s)}$

$$\Gamma(s) = \frac{\gamma_2 s^2 + \gamma_1 s + \gamma_0}{s^2}$$

提案手法の解析（1）



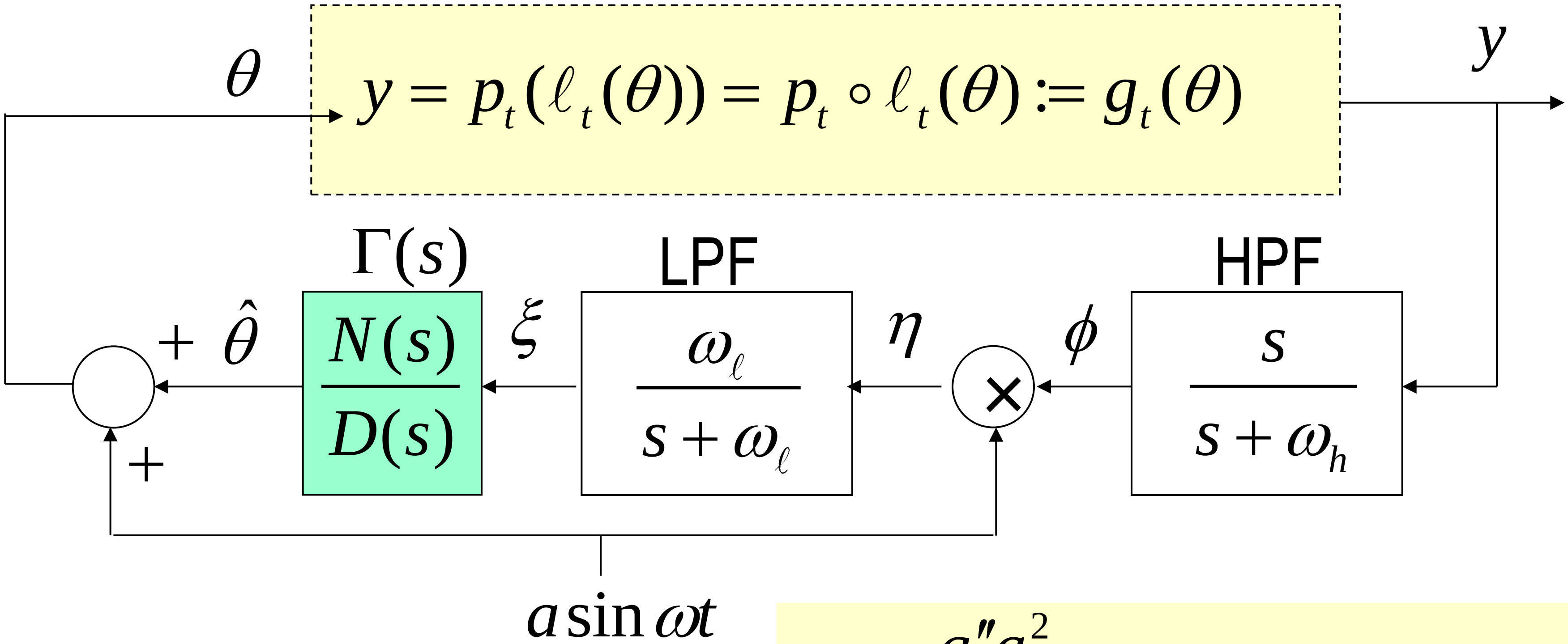
$$y = g_t(\theta) := g^* + \frac{g''}{2}(\theta - \theta^*)^2 = g^* + \frac{g''}{2}(a\sin\omega t + \hat{\theta} - \theta^*)^2$$

$$= g^* + \frac{g''}{2}(a\sin\omega t - \tilde{\theta})^2$$

$$\theta = a\sin\omega t + \hat{\theta}$$

$$\tilde{\theta} := -\hat{\theta} + \theta^*$$

提案手法の解析(2)



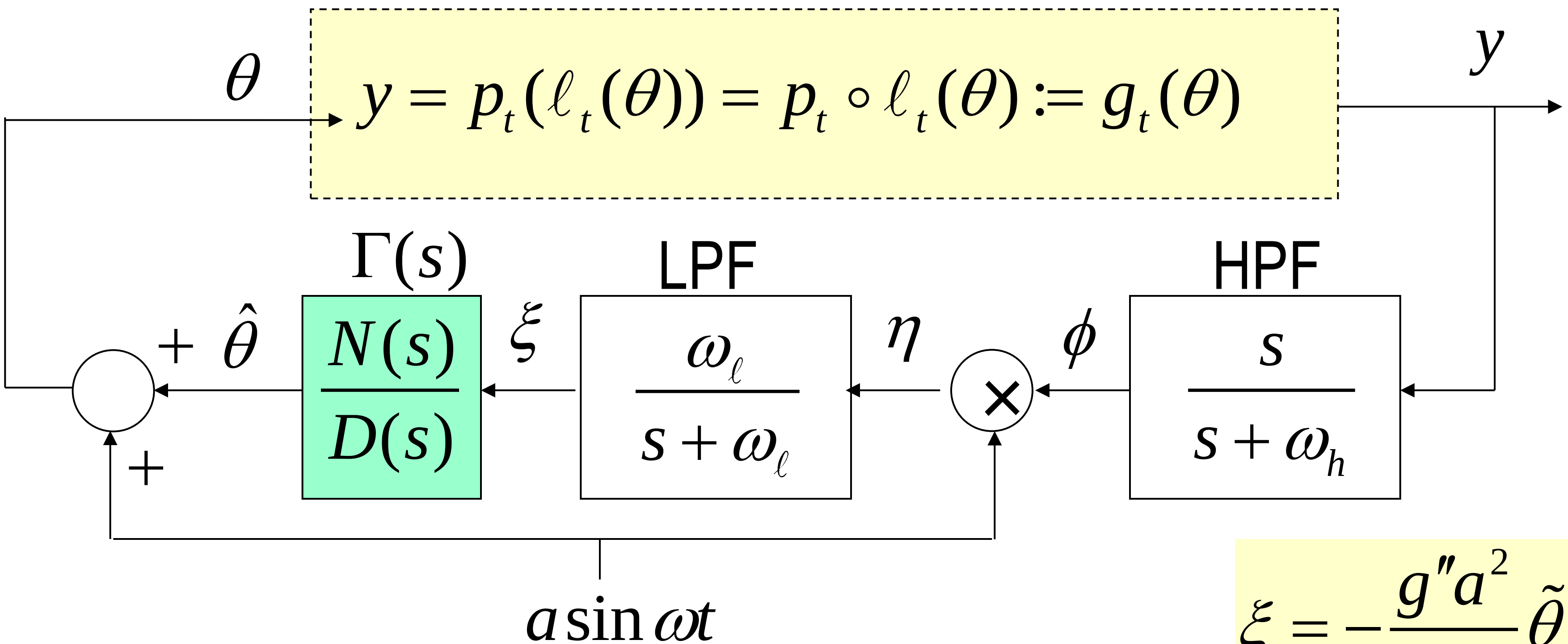
$$\phi = -\frac{g'' a^2}{4} \cos 2\omega t - g'' a \sin \omega t \tilde{\theta}$$

$$y = g^* + \frac{g''}{2}(a \sin \omega t - \tilde{\theta})^2$$

$$= g^* + \frac{g''}{2}\left[a^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos 2\omega t}{2} \right) - 2a \sin \omega t \tilde{\theta} + \tilde{\theta}^2 \right]$$

ローカル解析

提案手法の解析(3)

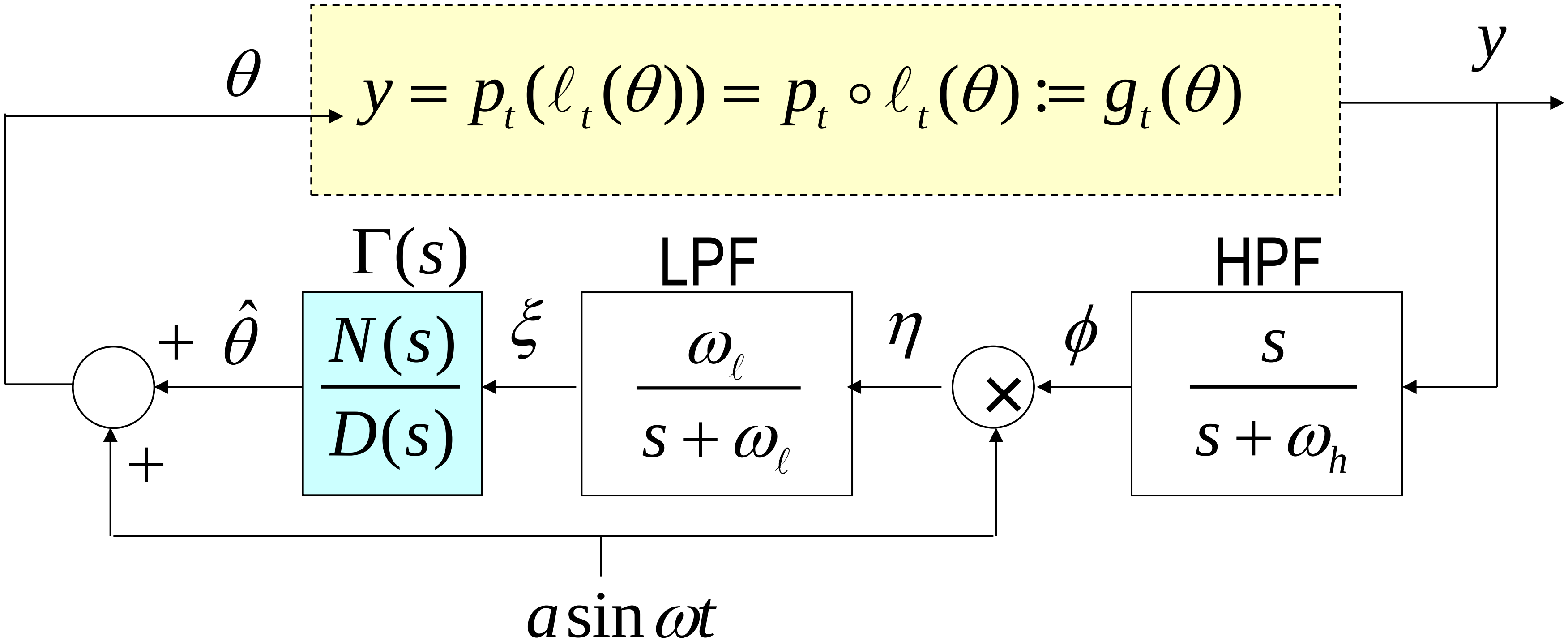


$$\xi = -\frac{g'' a^2}{2}\tilde{\theta}$$

$$\eta = \phi \cdot a\sin\omega t = -\frac{g'' a^3}{4}\sin\omega t\cos 2\omega t - g'' a^2 \sin^2 \omega t\tilde{\theta}$$

$$= -\frac{g'' a^3}{4}\frac{\sin\omega t - \sin 3\omega t}{2} - g'' a^2 \frac{1-\cos 2\omega t}{2}\tilde{\theta}$$

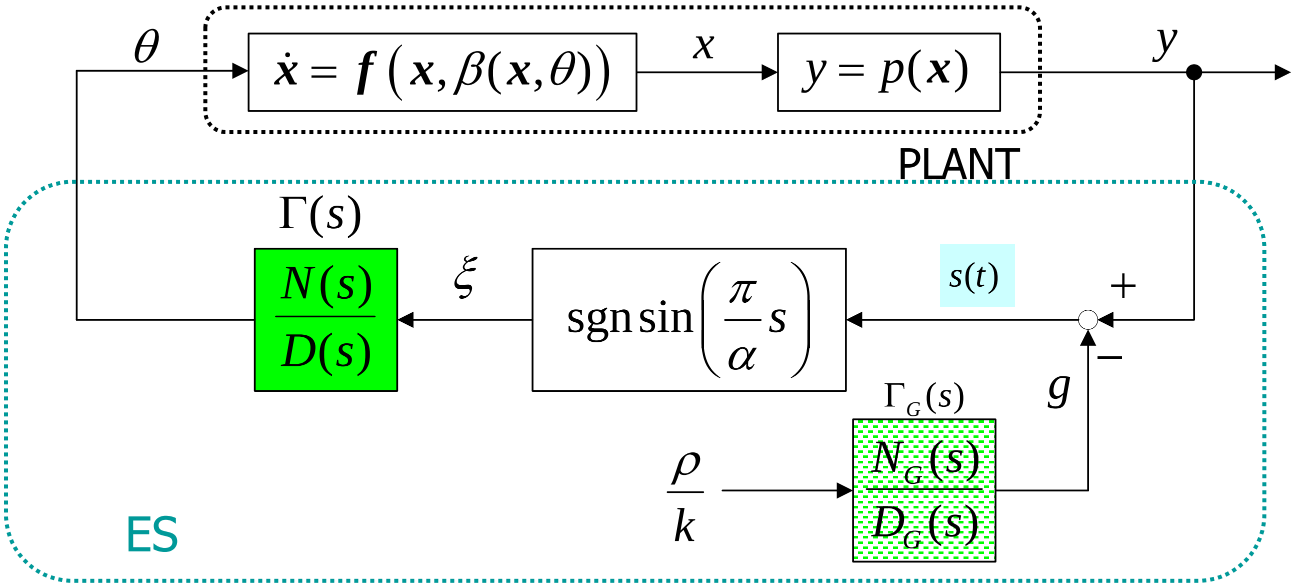
提案手法の解析(4)



$$D(s)\hat{\theta} = N(s)\xi = N(s)\left(-\frac{g'' a^2}{2}\tilde{\theta}\right) \longrightarrow \boxed{\left(D(s) + \frac{|g''| a^2}{2} N(s)\right)\tilde{\theta} = 0}$$

$$\hat{\theta} = \theta^* - \tilde{\theta} \longrightarrow D(s)\hat{\theta} = \underbrace{D(s)\theta^*}_{=0} - D(s)\tilde{\theta} = -D(s)\tilde{\theta}$$

Analysis of Switching method based on IMC



Switching function

$$s(t) = y(t) - g(t)$$

Parameter low

$$D(s)\theta = N(s)\cdot \mathrm{sgn}\left(\sin\left(\frac{\pi}{\alpha}s(t)\right)\right)$$

Ozguner $\Gamma(s) = \frac{k}{s}$ $\qquad \Gamma_G(s) = \frac{k}{s}$

OHMORI $\Gamma(s) = \frac{N(s)}{D(s)}$ $\qquad \Gamma_G(s) = \frac{N_G(s)}{D_G(s)}$

Class of variation $\qquad$ Generation function of g(t)

Switching function

拘束させる

$$s(t) = \boxed{y(t)} - \boxed{g(t)}$$

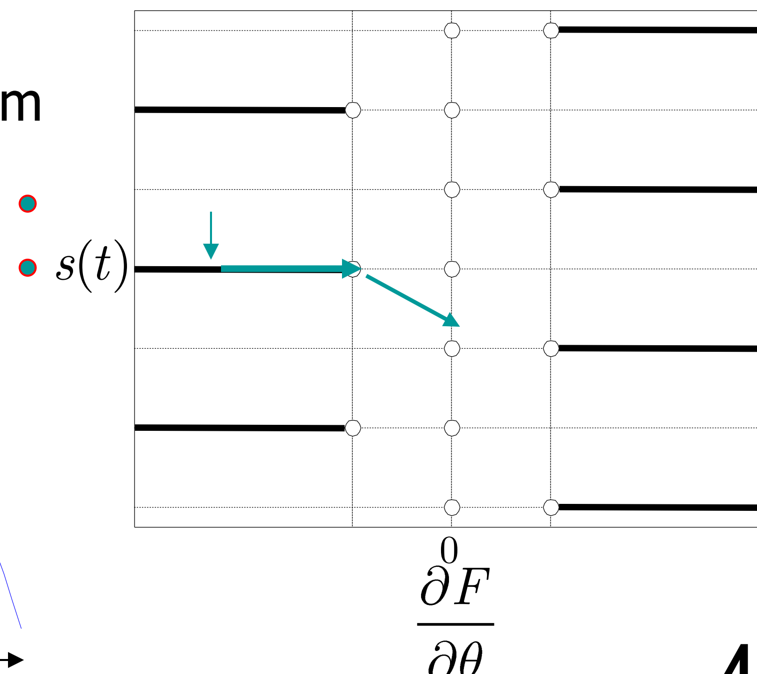
Increasing function

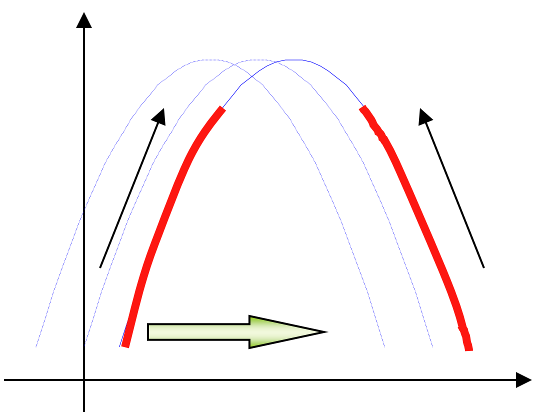
Parameter low

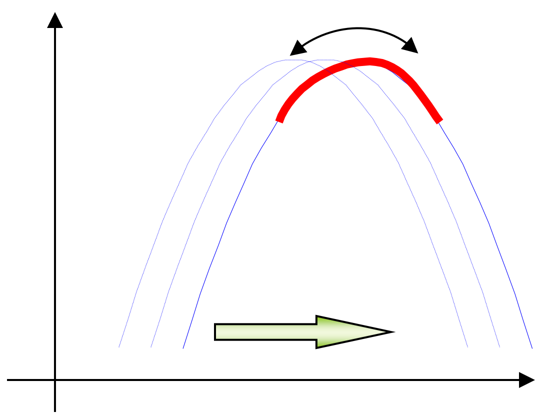
$$D(s)\theta = N(s)\cdot \mathrm{sgn}\left(\sin\left(\frac{\pi}{\alpha}s(t)\right)\right)$$

sliding mode occurs

- Output goes to maximum
- Sliding mode disappear neighbor maximum
- Oscillation around maximum



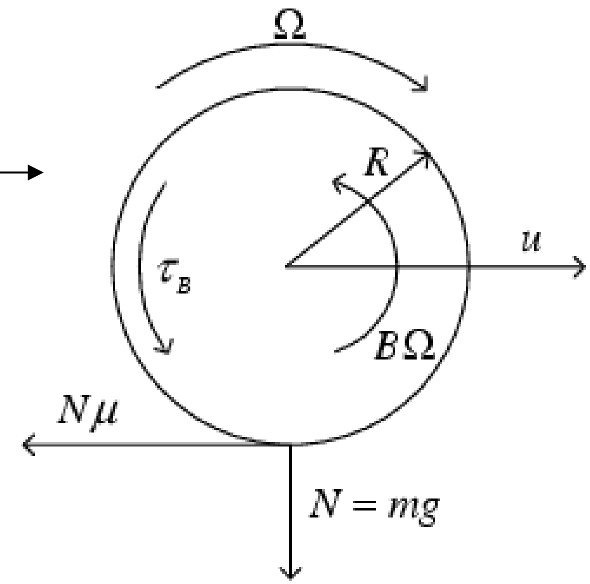




数値例 (Antilock Braking Systems) (1/3)

車輪のダイナミクス

$$\tau_B \longrightarrow \boxed{\begin{cases} m\dot{u} = -N\mu(\lambda) \\ I\dot{\Omega} = -B\Omega + NR\mu(\lambda) - \tau_B \end{cases}} \longrightarrow \dot{u}$$



m: 質量　　Ω: 角速度

u: 速度　　I: 慣性モーメント

$N = mg$: 重量　　R: ホイールの半径

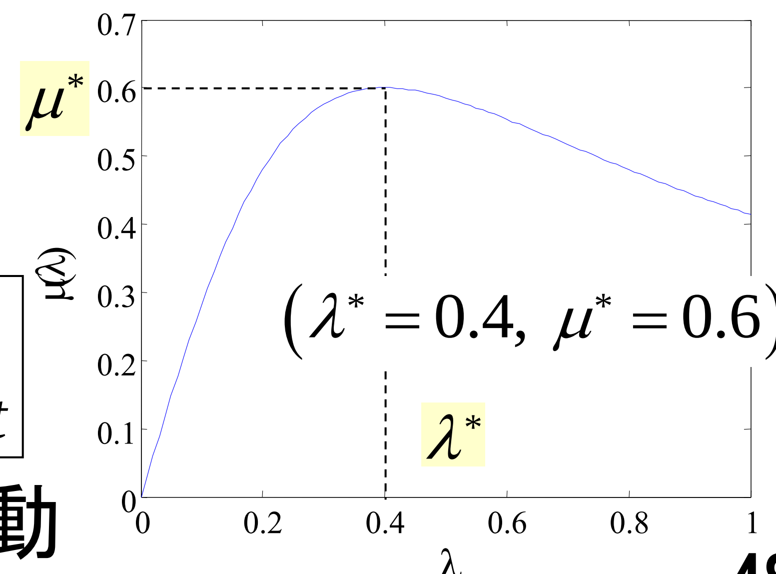
τ_B: ブレーキトルク　　$B\Omega$: ベアリング摩擦トルク

$\mu(\lambda)$: 摩擦力係数 ---- 路面の状況等，周囲の環境に左右される

$$\mu(\lambda) = 2\mu^* \frac{\lambda^* \lambda}{\lambda^{*2} + \lambda^2}$$

$$\boxed{\begin{aligned} \lambda^* &= 0.2 + 0.1t \\ \mu^* &= 0.3 + 0.01t \end{aligned}}$$

未知，変動



ホイールスリップ

$$\lambda(u, \Omega) = \frac{u - R\Omega}{u}$$

数値例 (ABS) (2/3)

加速度センサにより測定可能
（エアバッグにも使われている）

制御入力の決定

λ_0

$$\tau_B = \alpha(x, \lambda_0)$$

τ_B

$$\begin{cases} m\dot{u} = -N\mu(\lambda) \\ I\dot{\Omega} = -B\Omega + NR\mu(\lambda) - \tau_B \end{cases}$$

$$\mu(\lambda) = 2\mu^* \frac{\lambda^* \lambda}{\lambda^{*2} + \lambda^2}$$

$$\lambda(u, \Omega) = \frac{u - R\Omega}{u}$$

$\dot{u}$

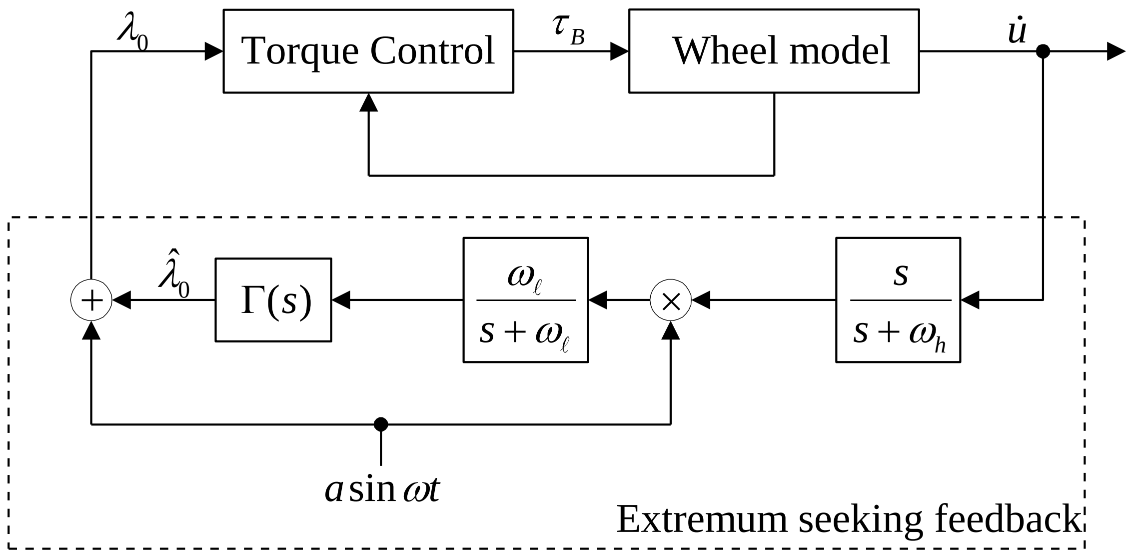
$$x = \begin{bmatrix} u & \dot{u} & \Omega & \lambda \end{bmatrix}^T$$

$$\dot{\lambda} = \frac{R}{Iu}\left(\tau_B + B\Omega + mR\dot{u} + \frac{I\Omega\dot{u}}{u}\right)$$

$$\dot{\lambda} = -c\lambda + c\lambda_0$$

$$\tau_B = -c\frac{Iu}{R}(\lambda - \lambda_0) - B\Omega - mR\dot{u} - \frac{I\Omega\dot{u}}{u}$$

数値例 (ABS) (3/3)



シミュレーションにおける初期値

$$u(0) = 300\ \text{[km/h]}$$
$$= 83.33\ \text{[m/s]}$$
$$\lambda(0) = 0$$
$$\Omega(0) = 277.77$$

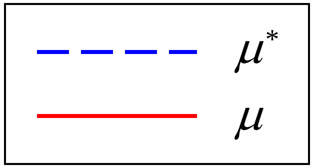
パラメータの設定値

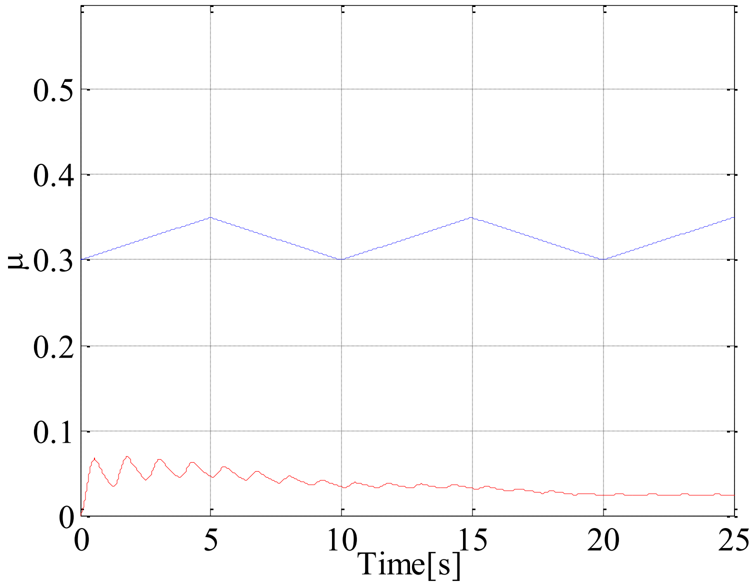
$$\Gamma(s) = \frac{s^2 + 5s + 6}{s^2}$$

$$\begin{cases} \omega = 3.5 \\ a = 0.1 \end{cases} \qquad \begin{cases} \omega_\ell = 0.8 \\ \omega_h = 0.6 \end{cases}$$

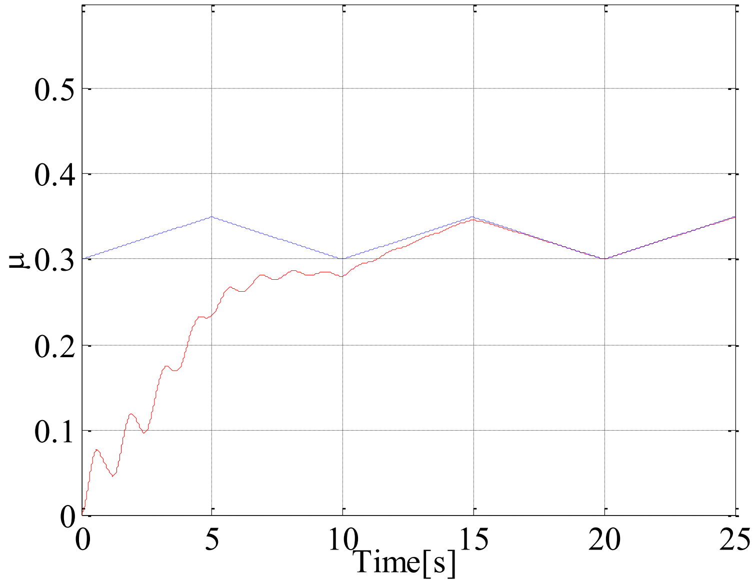
摂動法

$\mu(\lambda)$: Friction force coefficient



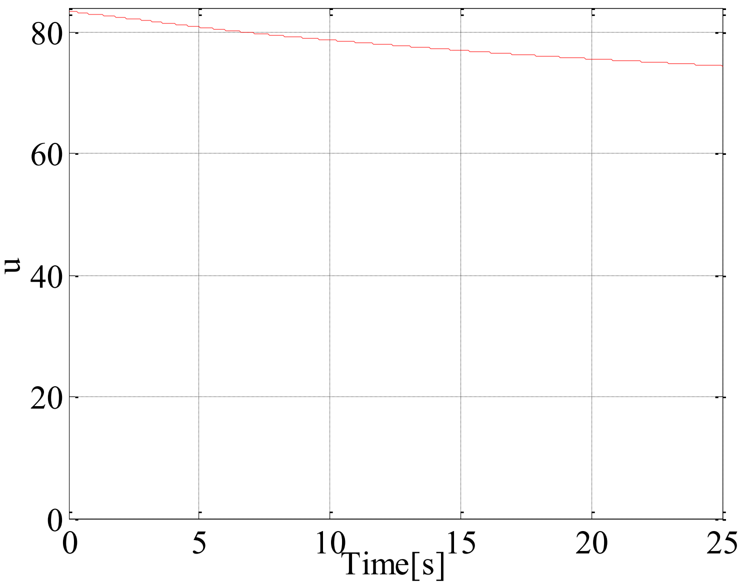


Perturbation method
without IMC

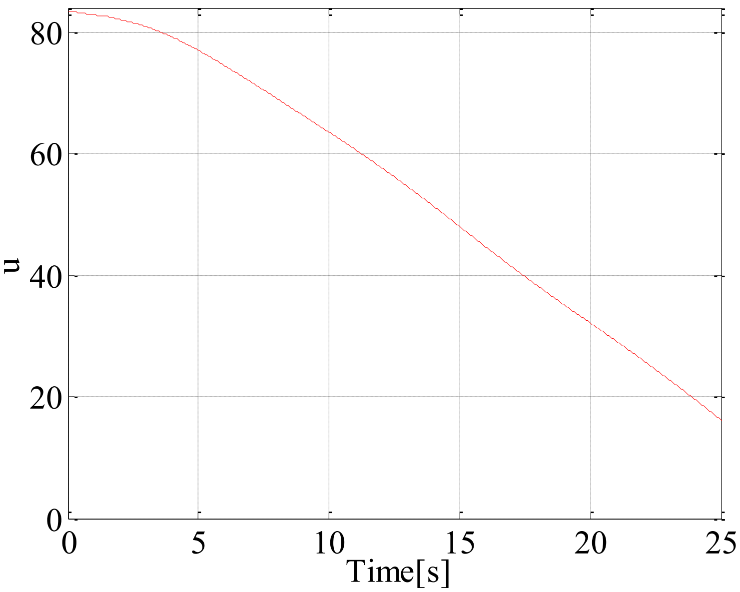


Perturbation method
With IMC (Proposed)

Linear velocity u(t)

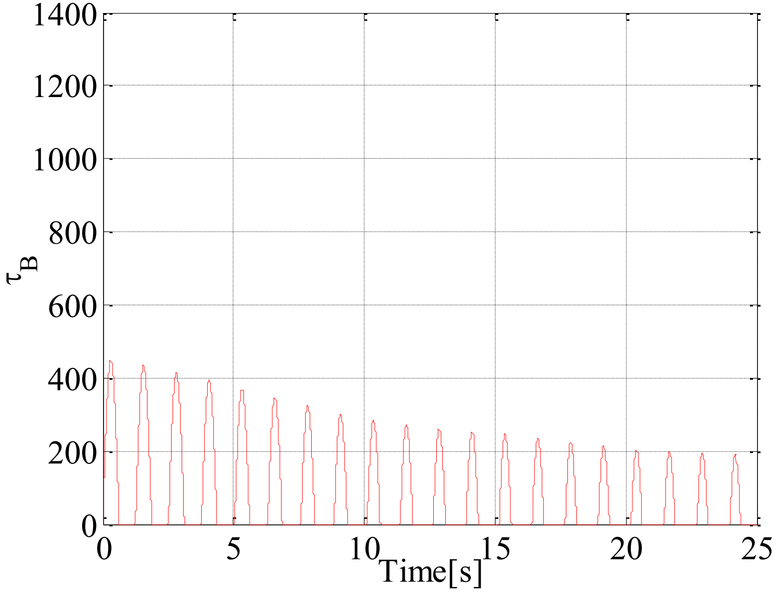


Perturbation method
without IMC

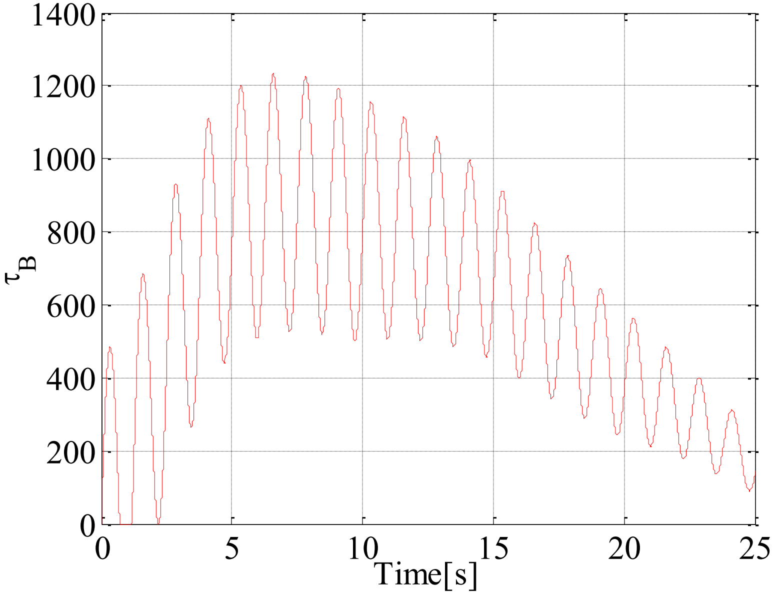


Perturbation method
With IMC (Proposed)

Control input τ_B



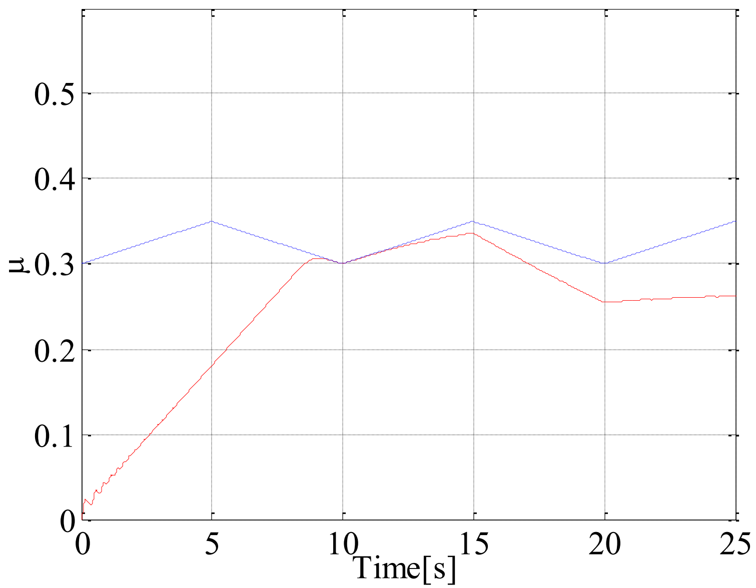
Perturbation method
without IMC



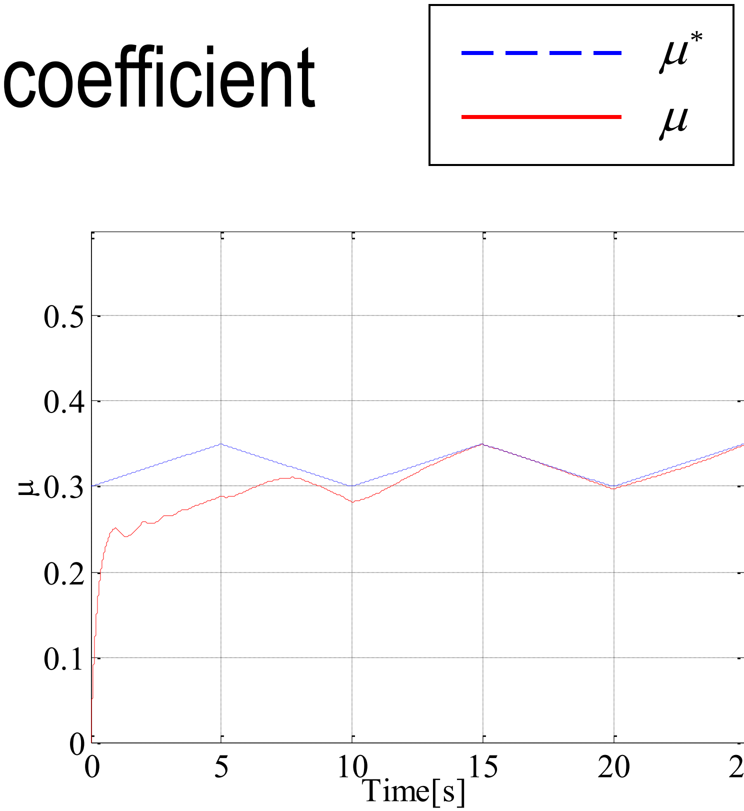
Perturbation method
With IMC (Proposed)

スイッチング法

$\mu(\lambda)$: Friction force coefficient

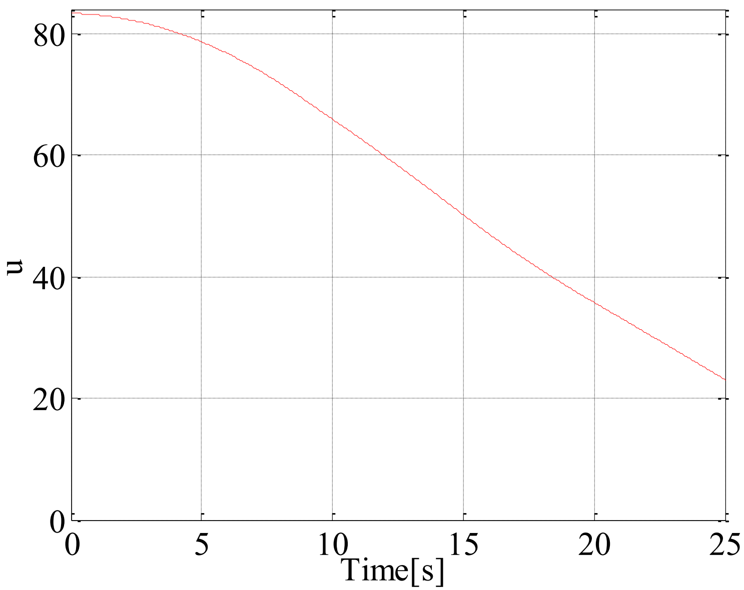


Switching method without IMC

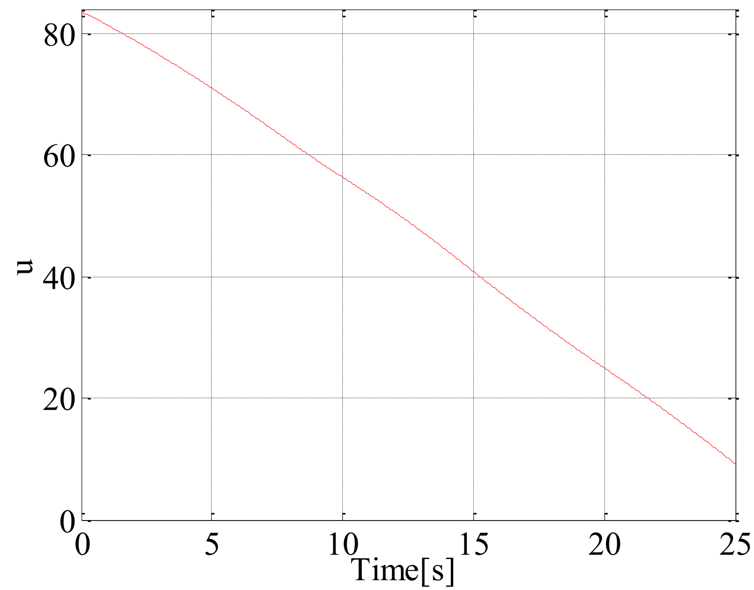


Switching method With IMC (Proposed)

Linear velocity u(t)

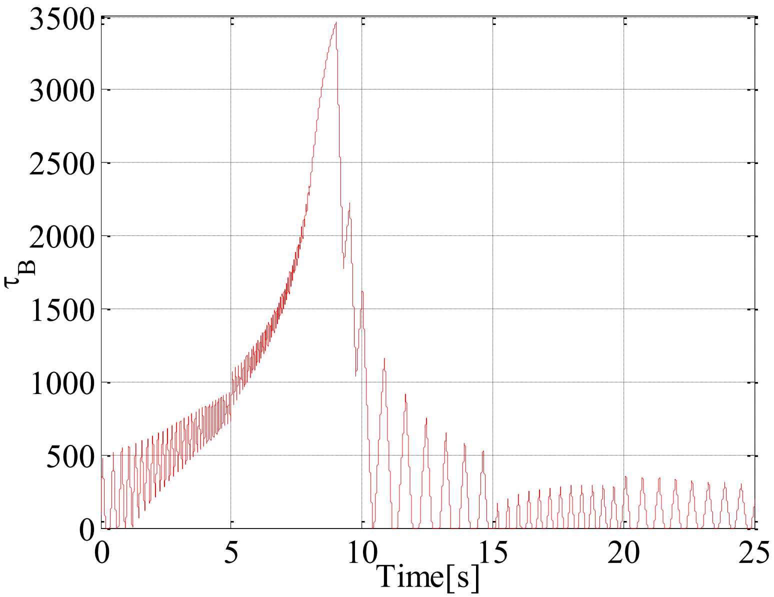


Switching method without IMC

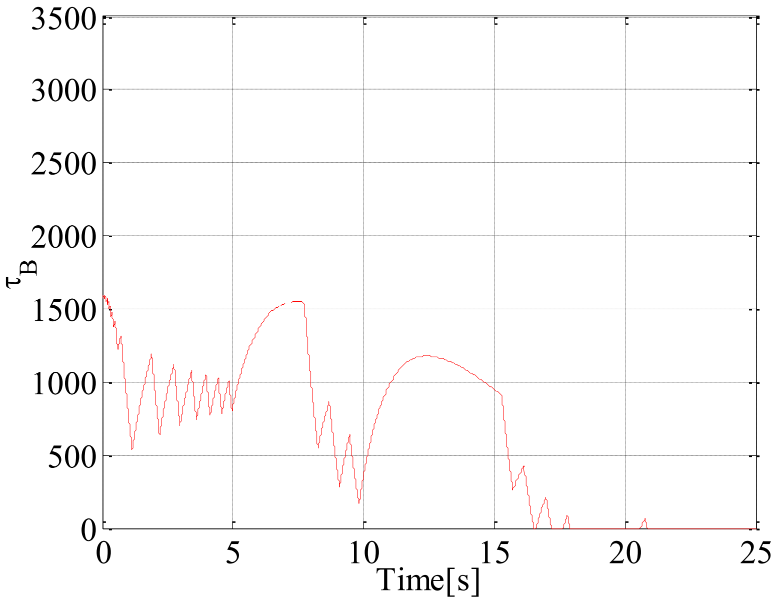


Switching method With IMC (Proposed)

Control input τ_B

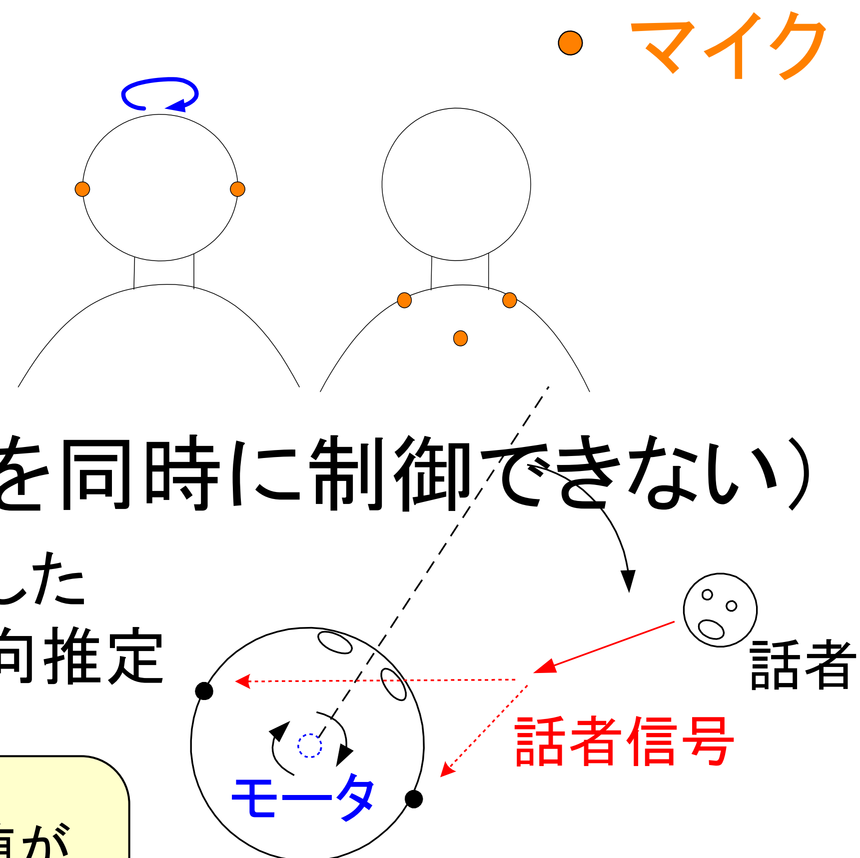


Switching method without IMC



Switching method With IMC(Proposed)

応用[3]　音源方向推定（振幅可変）



背景

・頭部に耳があることの必然性

・話者方向推定の一連の流れ

従来法:MUSIC法，ESPRIT法

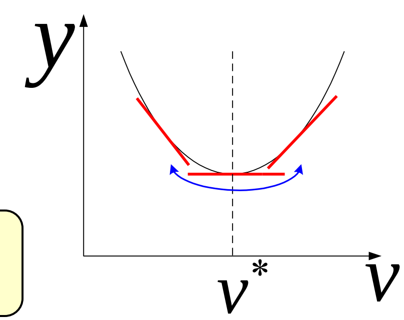
目的

（運動系と音響系を同時に制御できない）

・音響系と運動系を同時に制御した話者方向推定

極値制御手法

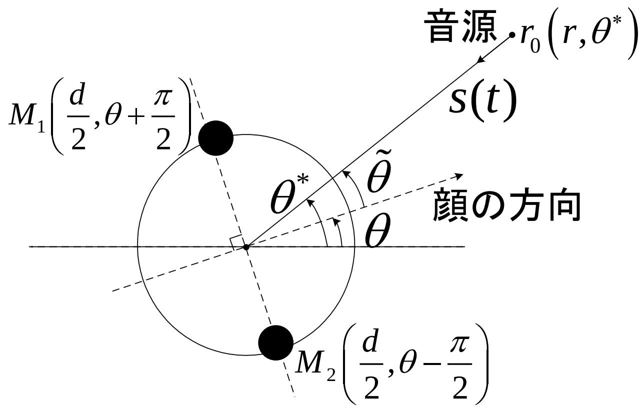
システムの状態や評価関数の所望の値が未知なとき，その状態や評価関数の所望の値を探索し，維持する制御手法



極値制御手法を用いた話者方向推定

ロボット頭部の運動系とマイクロホン音響系

マイクと顔の方向，話者方向の位置関係



音響システム

受信信号を$\boldsymbol{x}(t)=\left[x_1(t)\quad x_2(t)\right]^T$とすると，

$$\boldsymbol{x}(t)=s(t)\boldsymbol{a}\left(r,-\tilde{\theta},f\right)+\boldsymbol{n}(t)$$

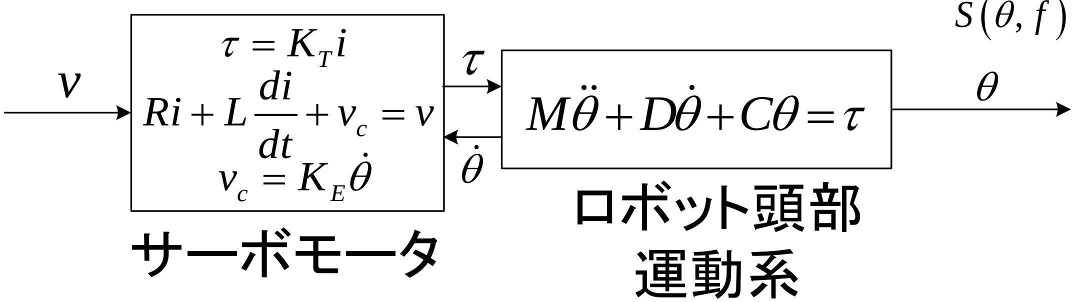
ただし，$\tilde{\theta}(t)=\theta^*-\theta(t)$，$\boldsymbol{a}(r,\theta,f)=\left[1\quad \frac{1}{\rho_s(\theta,f)}e^{j(\omega t-\Delta\varphi_s(\theta,f))}\right]^T$

$$\Delta\varphi_s(\theta,f)=\arg\left(S_1(\theta,f)\right)-\arg\left(S_2(\theta,f)\right),\ \rho_s(\theta,f)=\frac{|S_1(\theta,f)|}{|S_2(\theta,f)|}$$

$$S_1(\theta,f)=S\left(\frac{\pi}{2}-\theta,f\right),\ S_2(\theta,f)=S\left(-\frac{\pi}{2}-\theta,f\right)$$

$$S(\theta,f)=-\left(\frac{c}{\pi df}\right)^2\sum_{n=0}^{\infty}(2n+1)P_n(\cos\theta)\frac{h_n^{(1)}\left(\frac{2\pi r_0}{c}f\right)}{h_n^{(1)'}\left(\frac{\pi d}{c}f\right)}$$

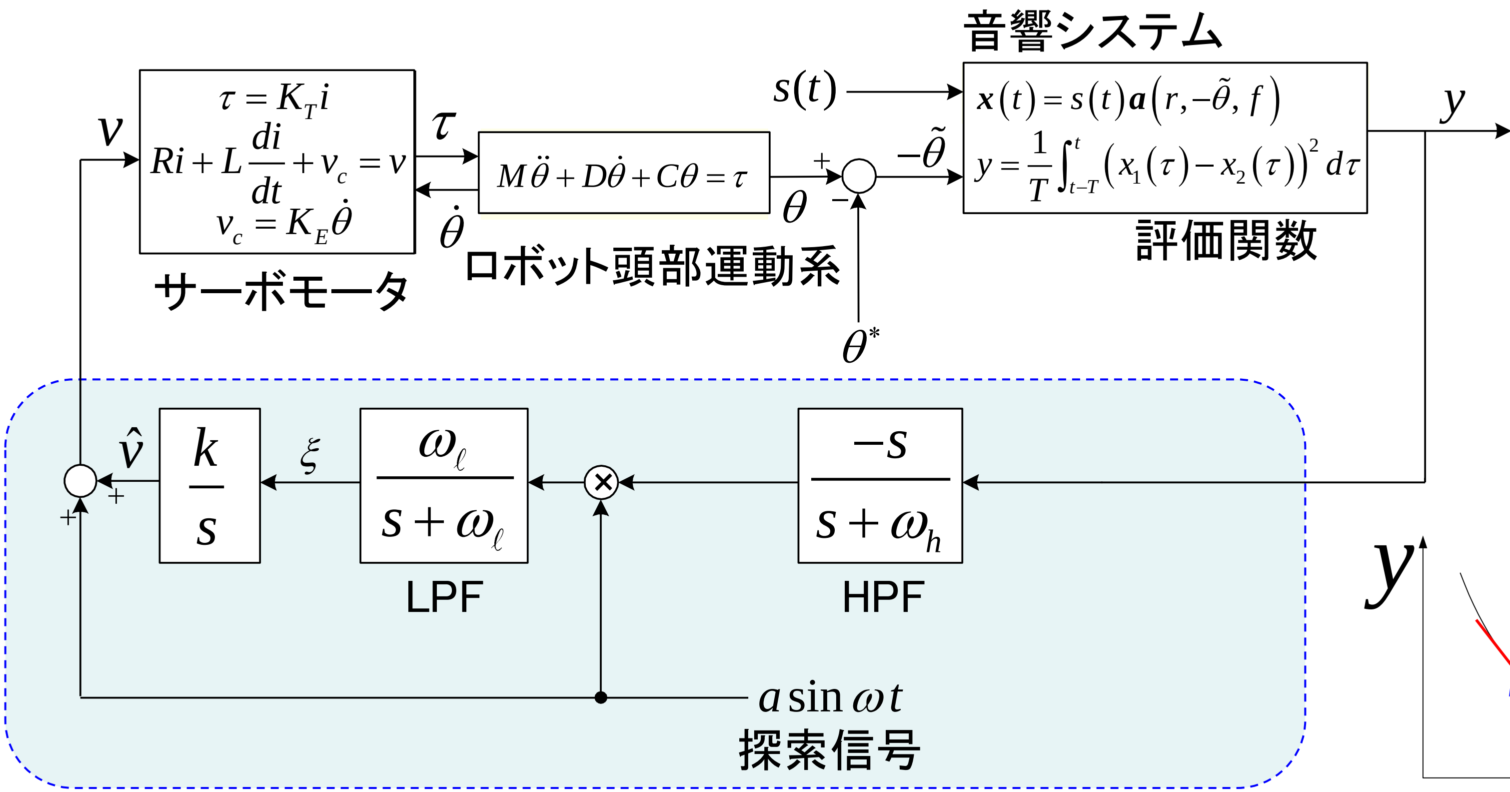
サーボモータと頭部運動系のモデリング



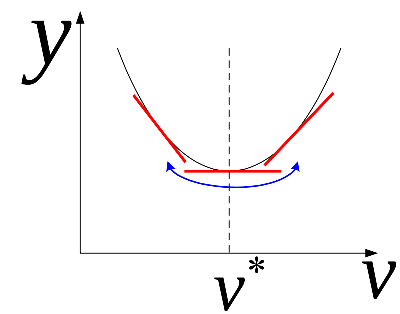
c:音速，d:ロボット頭部の直径
r_0:音源までの距離，P_n:第一種$Legendre$関数
$h_n^{(1)}$:第一種球ハンケル関数 $\arg(S)$:Sの偏角
$\boldsymbol{n}(t)$:ノイズ信号，$s(t)$:代表周波数fの話者音

i:電流，v:電圧，θ:顔の方向，τ:トルク，R:抵抗，L:インダクタンス
K_E:逆起電力定数，K_T:トルク定数 M:慣性モーメント，D:ダンピング定数
C:ねじりばね定数

極値探査法の応用



極値制御手法（摂動法）に基づくコントローラ



システムを静的なものと仮定．局所的な解析により

$y\to 0$ とするvの真値v^*との誤差 $\tilde{v}=v^*-v$ は

$$\dot{\tilde{v}}\approx-\frac{ka^2|y''|}{2}\tilde{v}$$

$k>0$より，$\tilde{v}\to 0$ 近傍に収束．$y\to 0$ 近傍に収束．

数値シミュレーション

各パラメータ設定

モータ＆頭部運動系

$R = 4.9,\ L = 0.018,\ K_E = K_T = 0.405,\ M = 0.01,\ D = 0.12\ \ C = 0.9$

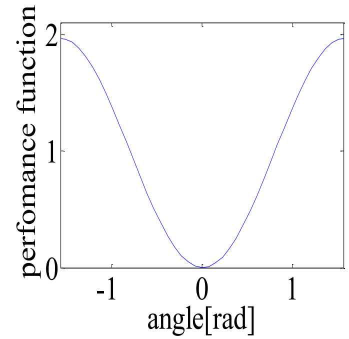
音響システム

$c = 340,\ \ d = 0.2,\ \ s(t) = \sin(2\pi 140 t)$

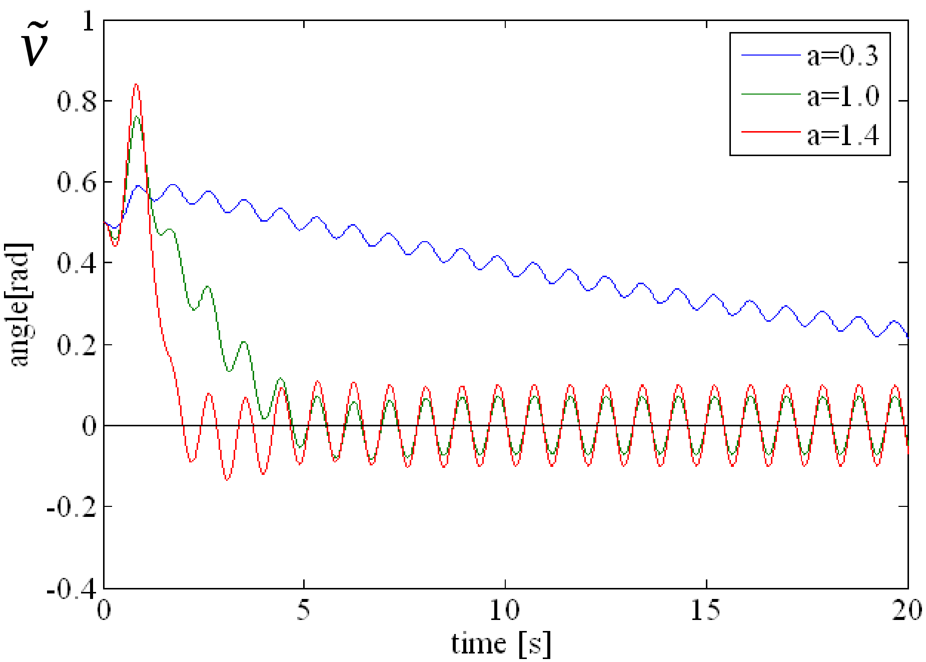
摂動法に基づくコントローラ

$\omega_l = 2,\ \omega_h = 6.6,\ k = 1000,\ T = 0.1,\ \omega = 2.23,\ v(0) = 0,\ v^* = 0.5$

探索信号の振幅aを変えてシミュレーションを行った



yと$\tilde{v}$の関係



顔方向と話者方向との誤差角度$\tilde{\theta}$の推移

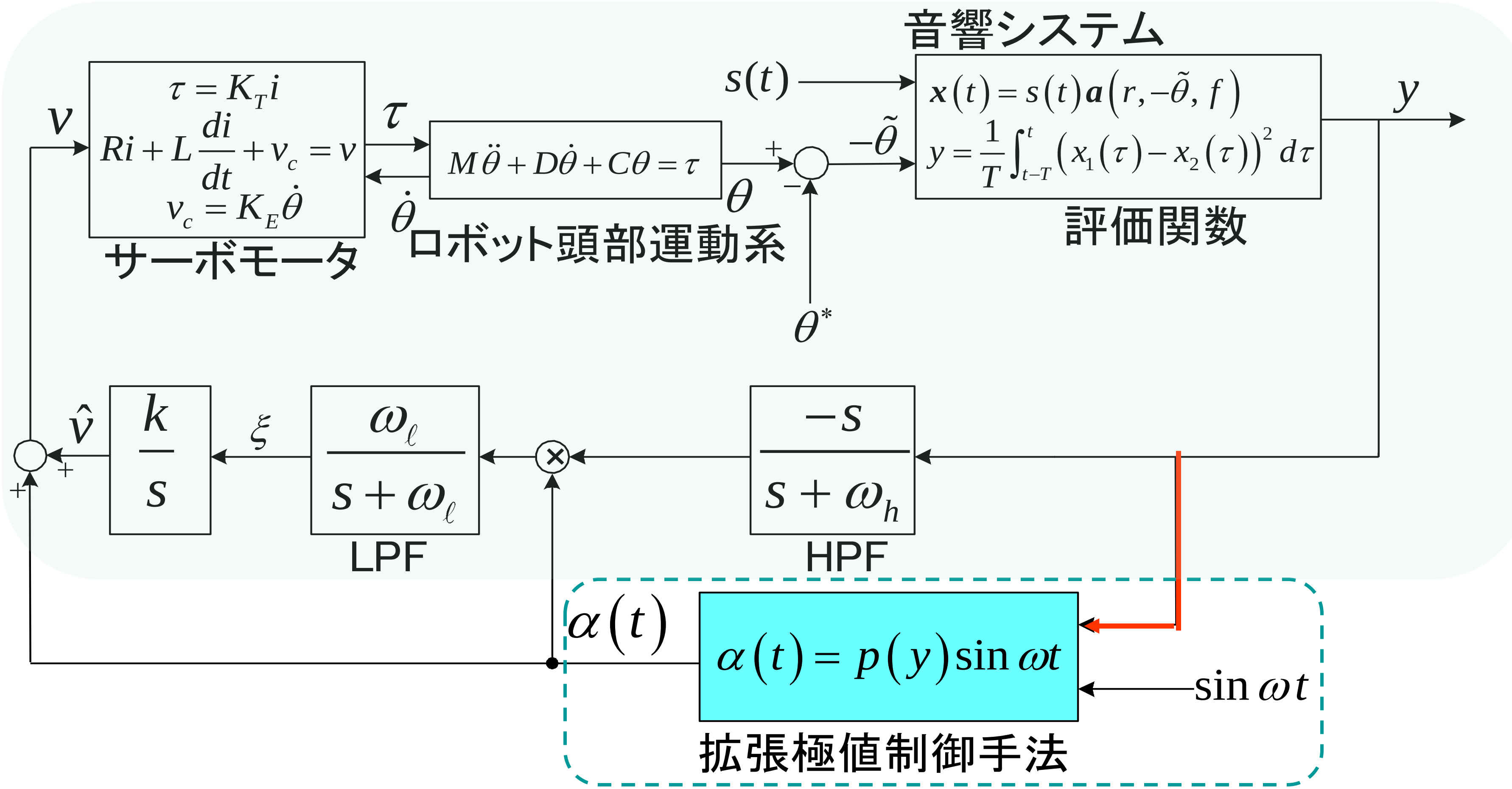
- 追従後の定常振動の大きさは探索信号の振幅aに依存する。
- 追従速度は探索信号の振幅aに依存する

ゼロ近傍での定常振動が小さく，収束速度の速い振幅が望ましい

評価関数の値を振幅に利用

拡張極値制御手法

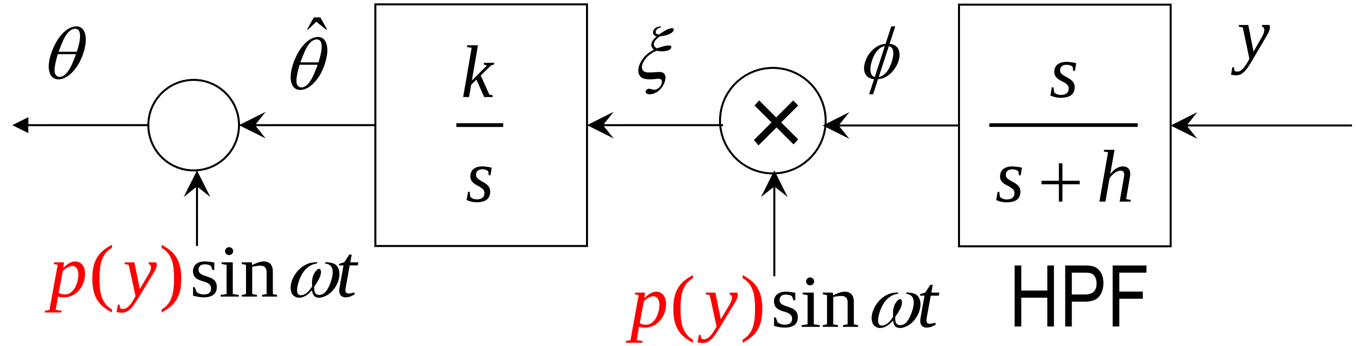
振幅可変機構をもつ極値探査法



$p(y)$は連続微分可能で単調増加であり

$$p(y)\geq 0$$

を満足する関数とする



ローカル解析

$$y = f^* + \frac{f''}{2}\left(p(y)\sin\omega t - \tilde{\theta}\right)^2$$

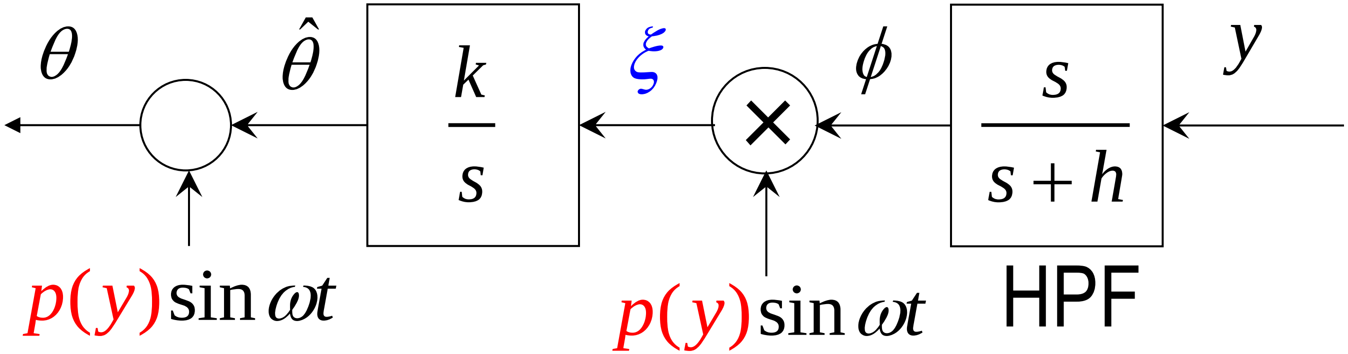
$$= f^* + \frac{f''}{2}\left[p(y)^2\left(\frac{1}{2} - \frac{\cos 2\omega t}{2}\right) - 2p(y)\sin\omega t\tilde{\theta} + \tilde{\theta}^2\right]$$

$$\phi = \frac{s}{s+h}[y] = \frac{f''}{2}\left[p(y)^2\left(\frac{1}{2} - \frac{\cos 2\omega t}{2}\right) - 2p(y)\sin\omega t\tilde{\theta}\right]$$

$$\xi = \phi \cdot p(y)\sin\omega t = \frac{f''}{2}\left[p(y)^2\left(\frac{1}{2} - \frac{\cos 2\omega t}{2}\right) - 2p(y)\sin\omega t\tilde{\theta}\right]p(y)\sin\omega t$$

$$= \frac{f''}{4}p(y)^3\sin\omega t - \frac{f''\,p(y)^3}{4}\sin\omega t\cos 2\omega t - f''p^2(y)\sin^2\omega t\tilde{\theta}$$

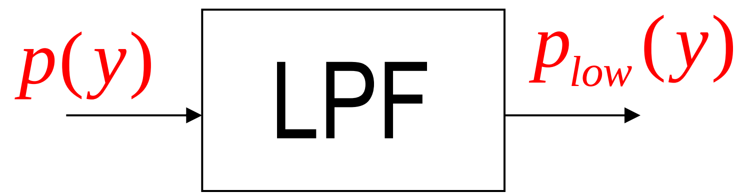
$$= \frac{f''}{4}p(y)^3\sin\omega t - \frac{f''p(y)^3}{4}\frac{\sin\omega t - \sin 3\omega t}{2} - f''p^2(y)\frac{1-\cos 2\omega t}{2}\tilde{\theta}$$



$$\xi = \frac{f''}{4}p(y)^3\sin\omega t - \frac{f''p(y)^3}{4}\frac{\sin\omega t - \sin 3\omega t}{2} - f''p^2(y)\frac{1-\cos 2\omega t}{2}\tilde{\theta}$$

$$\rightarrow -\frac{f''p_{low}^2(y)}{2}\tilde{\theta} = \frac{|f''|\,p_{low}^2(y)}{2}\tilde{\theta}$$

$$f'' < 0$$



$$\tilde{\theta} := -\hat{\theta} + \theta^*$$

$$\Rightarrow \dot{\tilde{\theta}} = -\dot{\hat{\theta}} + \dot{\theta}^* = -\dot{\hat{\theta}} = -k\xi = -\frac{k|f''|\,p_{low}^2(y)}{2}\tilde{\theta}$$

$$\boxed{\dot{\tilde{\theta}} = -\frac{k|f''|\,p_{low}^2(y)}{2}\tilde{\theta}}$$

$$\boxed{\text{従来法 } \dot{\tilde{\theta}} = -\frac{k|f''|a}{2}\tilde{\theta}}$$

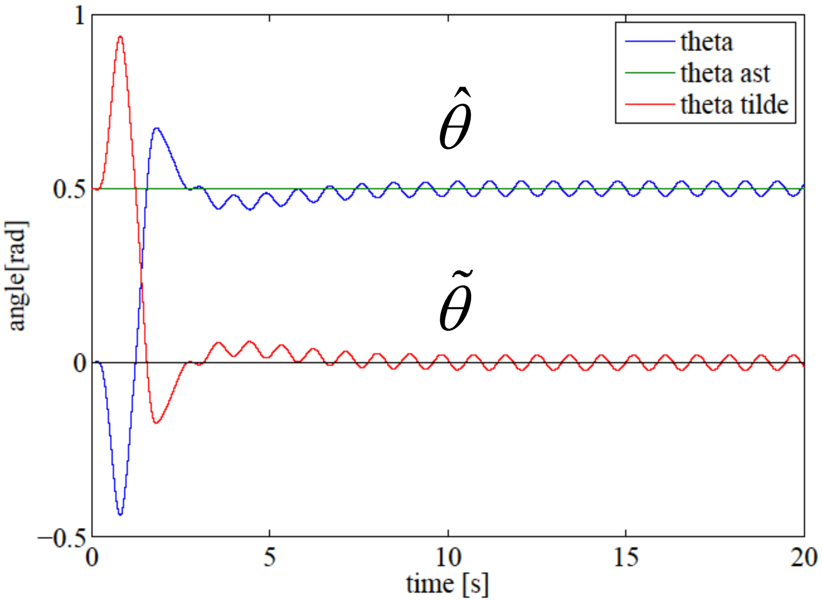
振幅可変機構をもつ極値制御手法のシミュレーション

従来法と提案法の比較

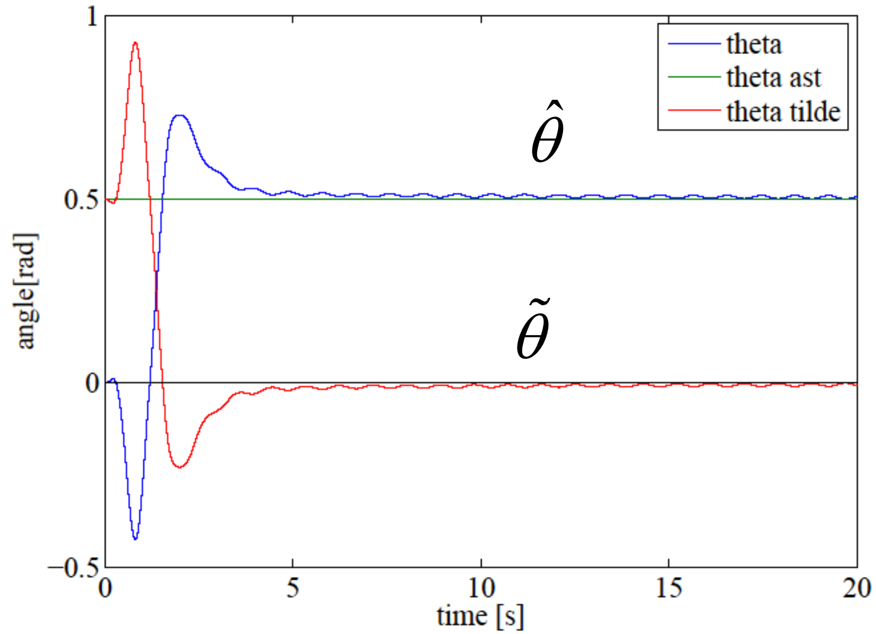
音源の位置 $\theta^* = 0.5$
顔の初期方向 $\theta_0 = 0$

従来法の探索信号 $\alpha(t) = 0.3\sin\omega t, k = 6800$
提案法の探索信号 $\alpha(t) = 1.7\sqrt[3]{y}\sin\omega t, k = 950$

従来



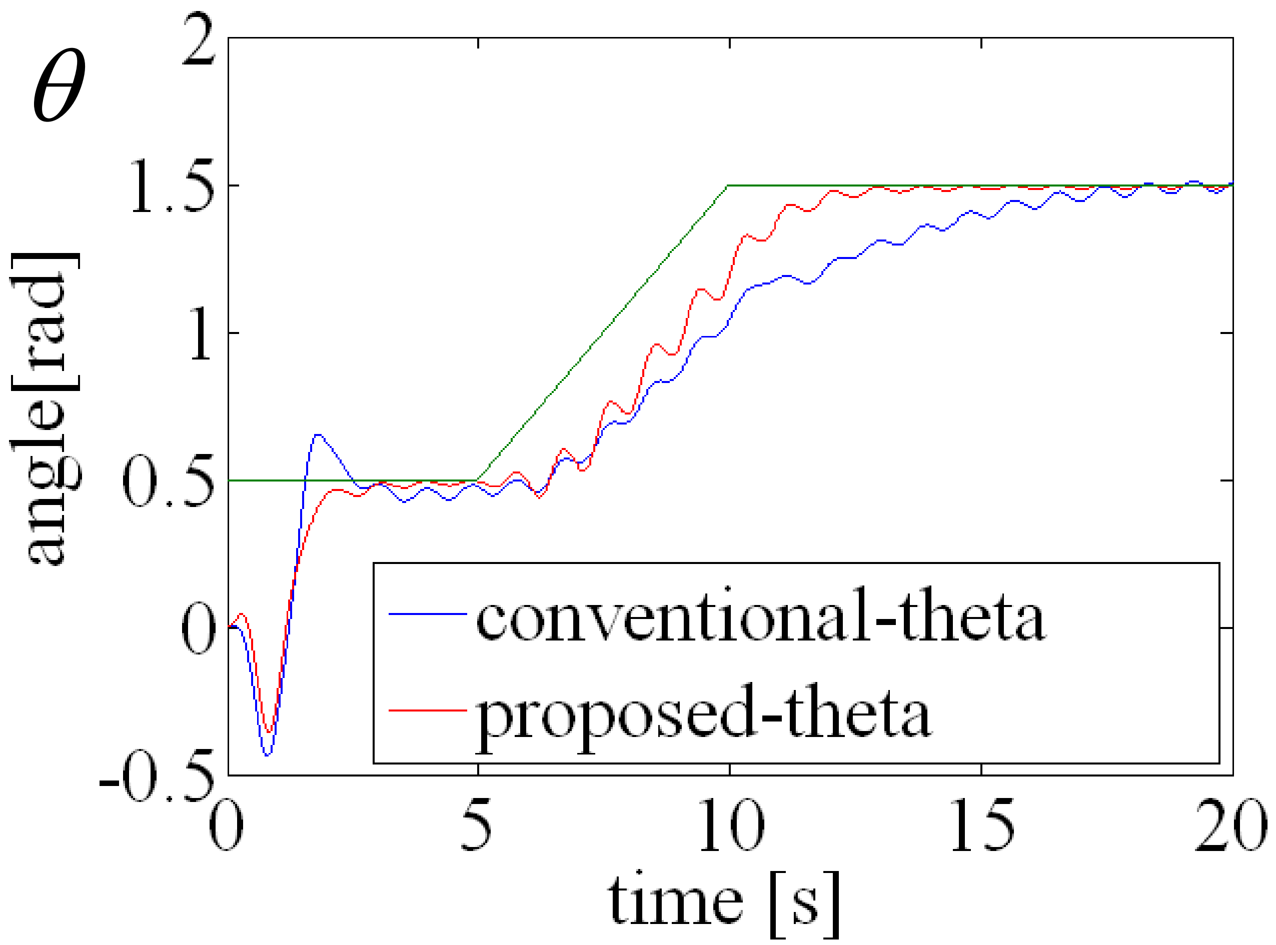
提案



従来法（左）と提案法（右）のシミュレーション比較

音源方向が時間変化する場合の応答

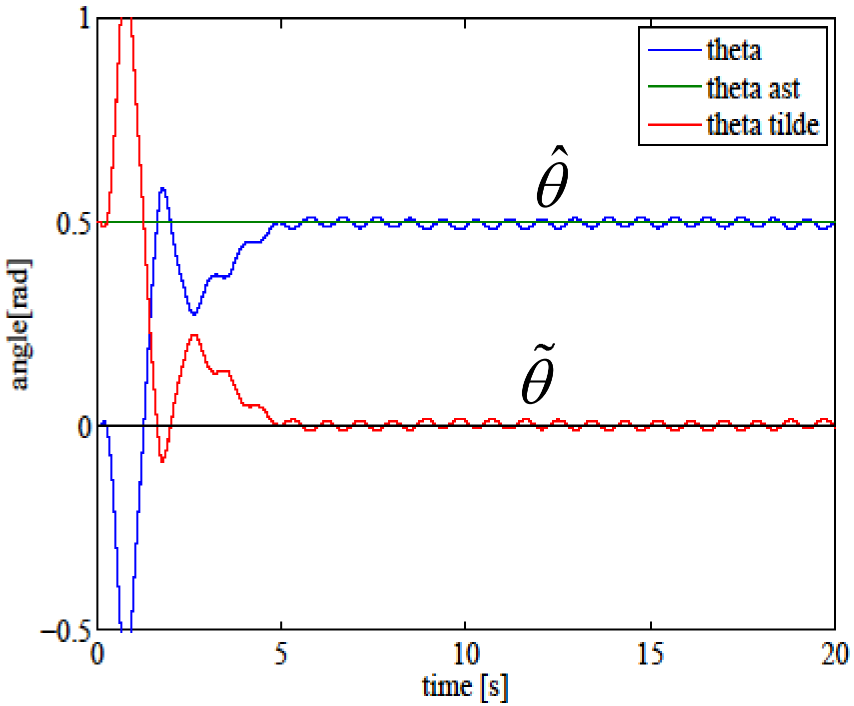
移動音源に対する音源方向推定

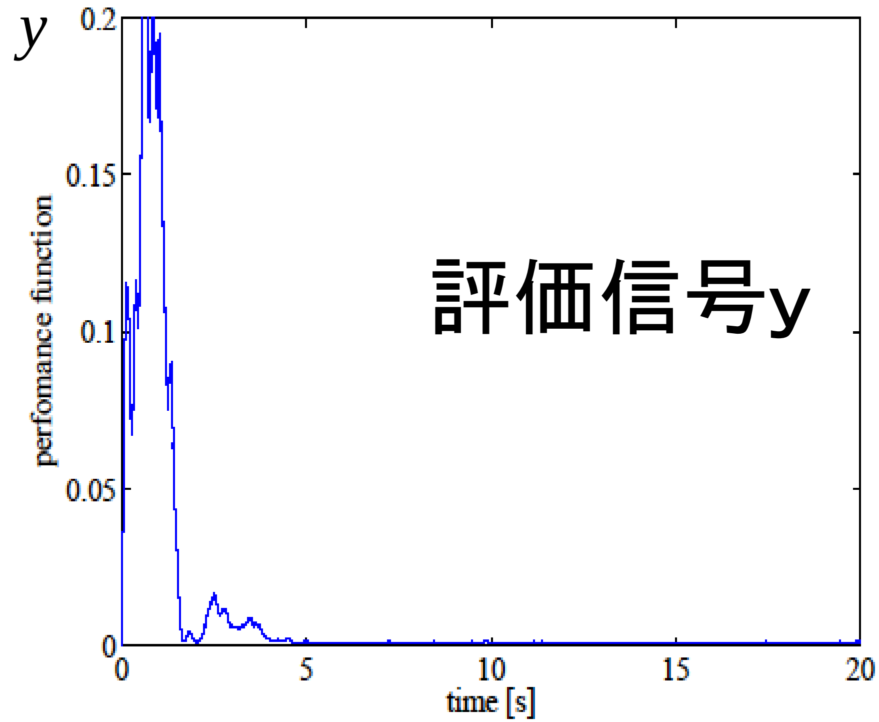


移動音源に対する音源方向推定

実音データによる有効性検証

実音データを用いて音源方向推定を行った





実音データによる音源方向推定（提案法）

応用 [4]PID パラメータ調整（離散ES）

$$e(t) := r(t) - y(t)$$

Proportional term: $u_p(t) = Ke(t)$

gain

Integral term: $u_I(t) = \dfrac{K}{T_I} \int e(\tau) d\tau$

Integral time

Derivative term: $u_D(t) = KT_D \dfrac{de(t)}{dt}$

Derivative time

There are many methods of PID Tuning

Some require a plant model or special experiment

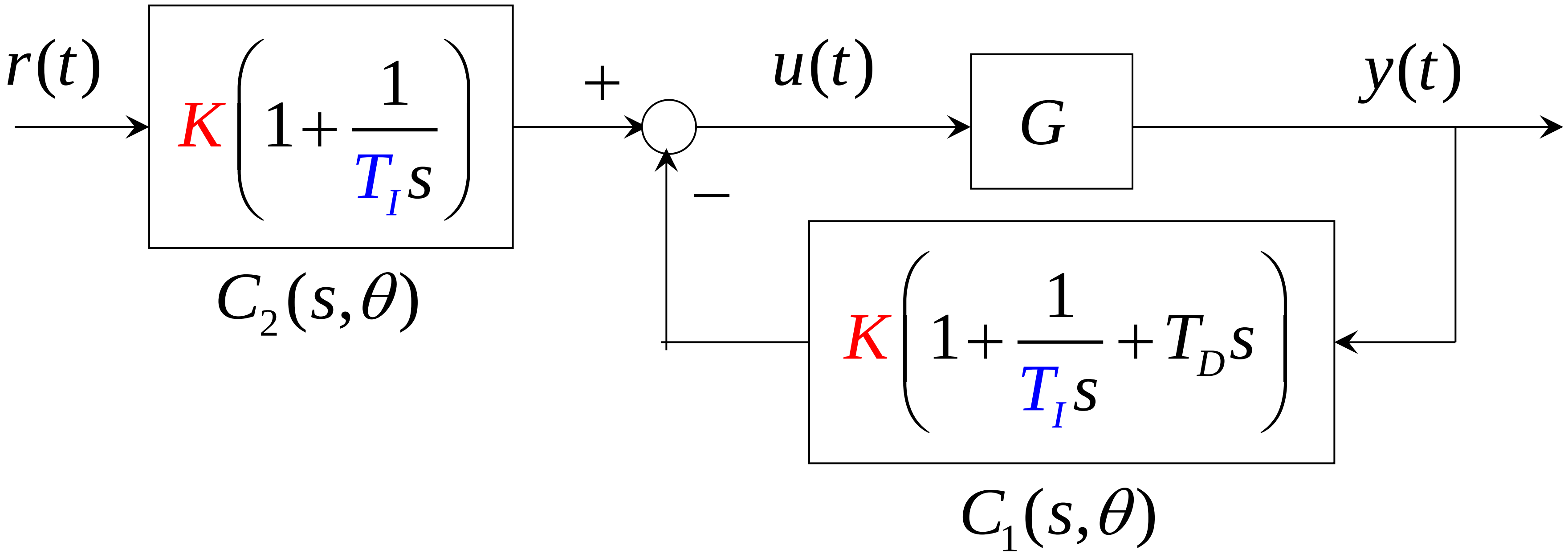
- Ziegler-Nichols (ZN) method
- Kappa-Tau Tuning
- Internal model control method (IMC)

Closed loop method

- Relay feedback tuning
- Iterative feedback Tuning (IFT)

We will apply discrete version of ES to tune PID parameters. Goal to optimize step response of a closed loop system. Method can tune controller for many plants in only a few iterations. Yields performance at least at good as many popular PID tuning methods.

PID Parameter-Tuning using ES



Two-degree of freedom PID controller

Tuning PID Prameters $\theta := \begin{bmatrix} K & T_I & T_D \end{bmatrix}$

Implementation

① 第k回目のステップ応答試験で用いるPIDパラメータを次とする.

$$\theta[k] := \begin{bmatrix} K[k] & T_I[k] & T_D[k] \end{bmatrix}$$

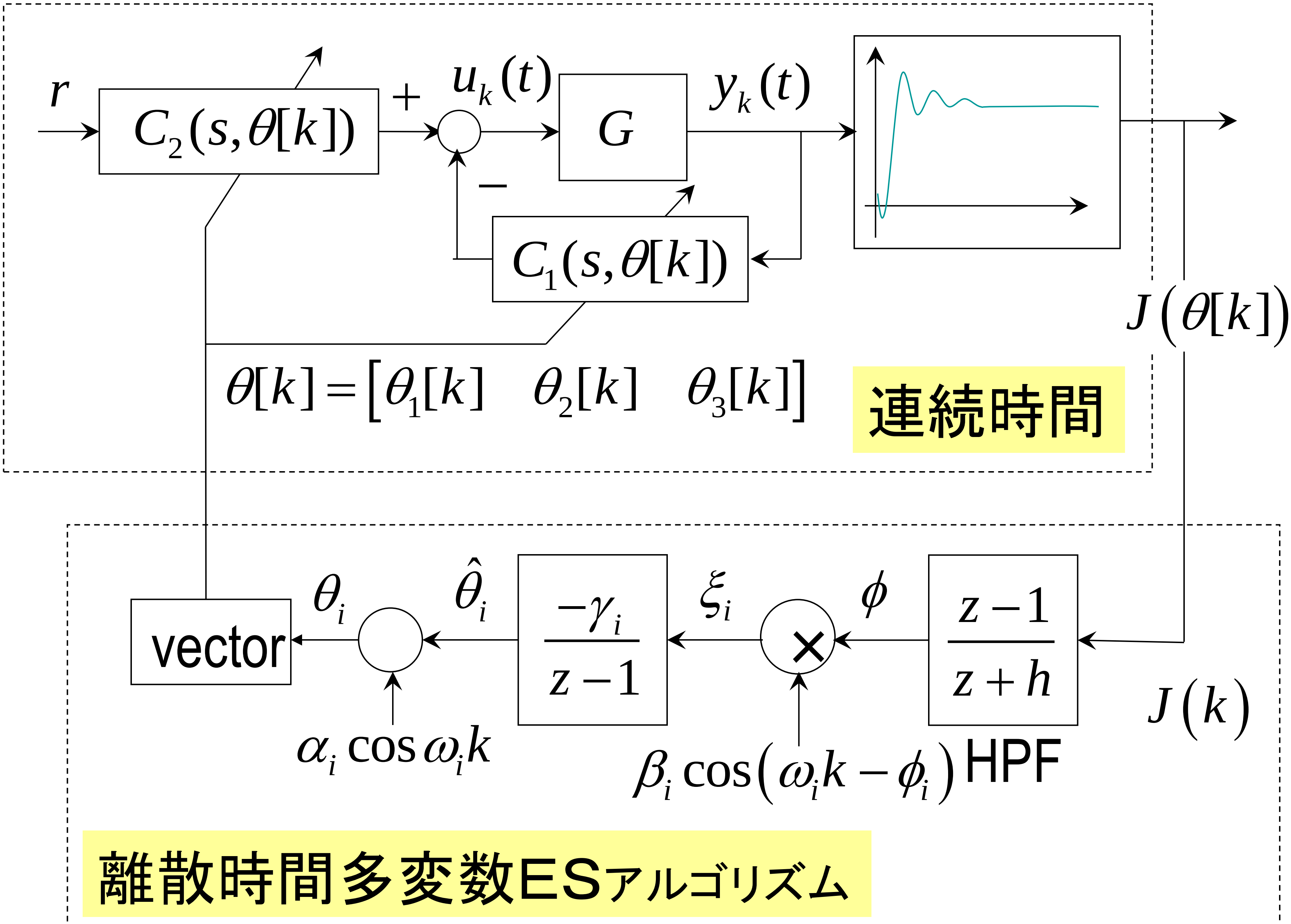
② つぎの評価関数 $J\left(\theta[k]\right)$ を計算する.

$$J\left(\theta[k]\right) := \frac{1}{T - t_0} \int_{t_0}^{T} \left(r - y_k(t)\right)^2 dt$$

ただし, $y_k(t)$ はk回目のステップ応答試験における出力

③ ②で求めたJを最小にするPIDパラメータを離散時間ESアルゴリズムで求める.

$$\theta[k+1] = \begin{bmatrix} K[k+1] & T_I[k+1] & T_D[k+1] \end{bmatrix}$$



r
$C_2(s,\theta[k])$
$+$
$u_k(t)$
$-$
G
$y_k(t)$
$C_1(s,\theta[k])$
$J(\theta[k])$
$\theta[k]=[\theta_1[k] \quad \theta_2[k] \quad \theta_3[k]]$
連続時間
vector
θ_i
$\hat{\theta}_i$
$\frac{-\gamma_i}{z-1}$
ξ_i
$\times$
ϕ
$\frac{z-1}{z+h}$
$J(k)$
$\alpha_i \cos\omega_i k$
$\beta_i \cos(\omega_i k-\phi_i)$
HPF
離散時間多変数ESアルゴリズム

Simulations [Kilingsworth]

(1) Four Plants:

$$G_1(s) = \frac{e^{-5s}}{1+20s} \qquad G_3(s) = \frac{1}{(1+10s)^8}$$

$$G_2(s) = \frac{e^{-20s}}{1+20s} \qquad G_4(s) = \frac{1-5s}{(1+10s)(1+20s)}$$

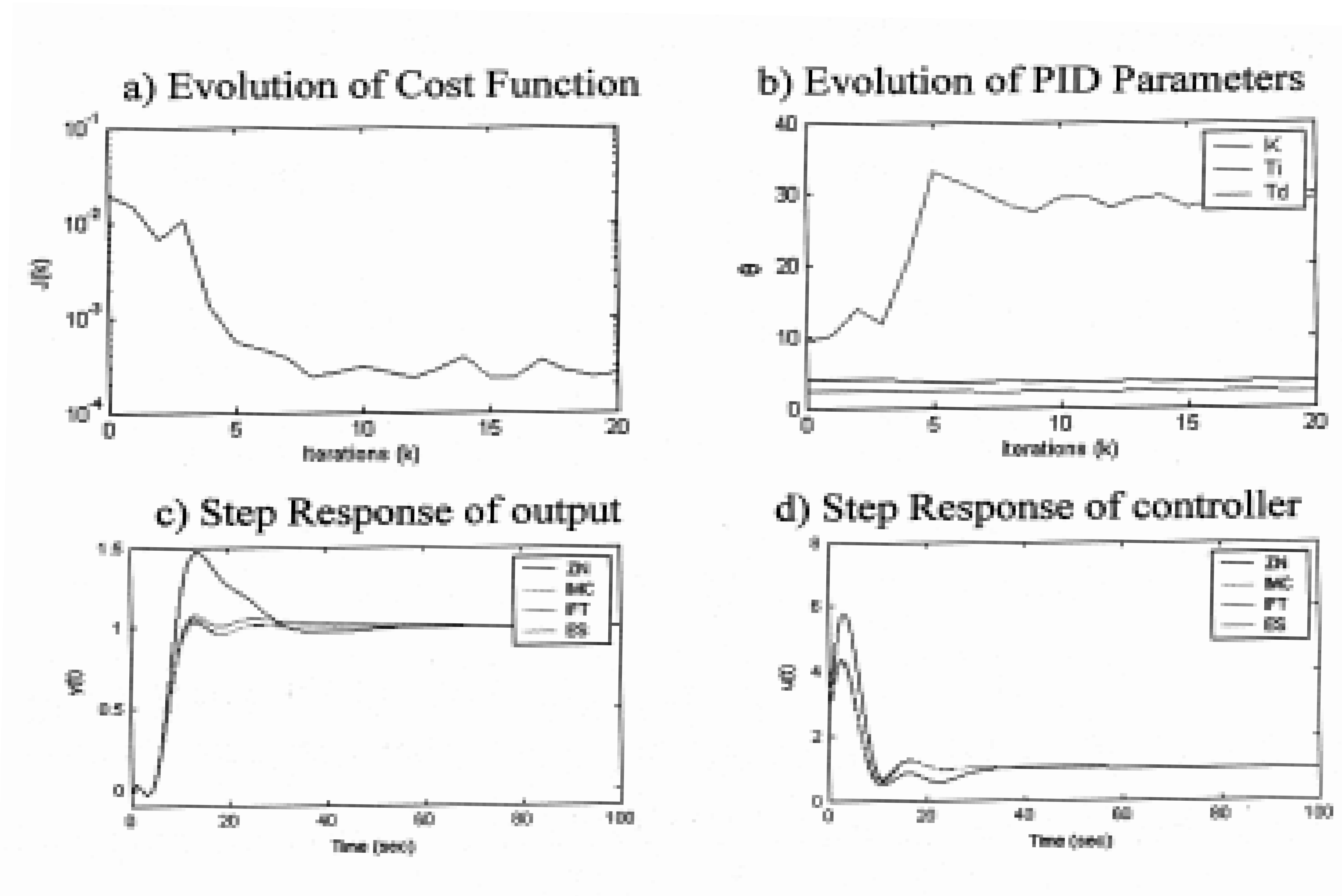
(2) Comparison:

ZN: The Ziegler-Nichols tuning rules

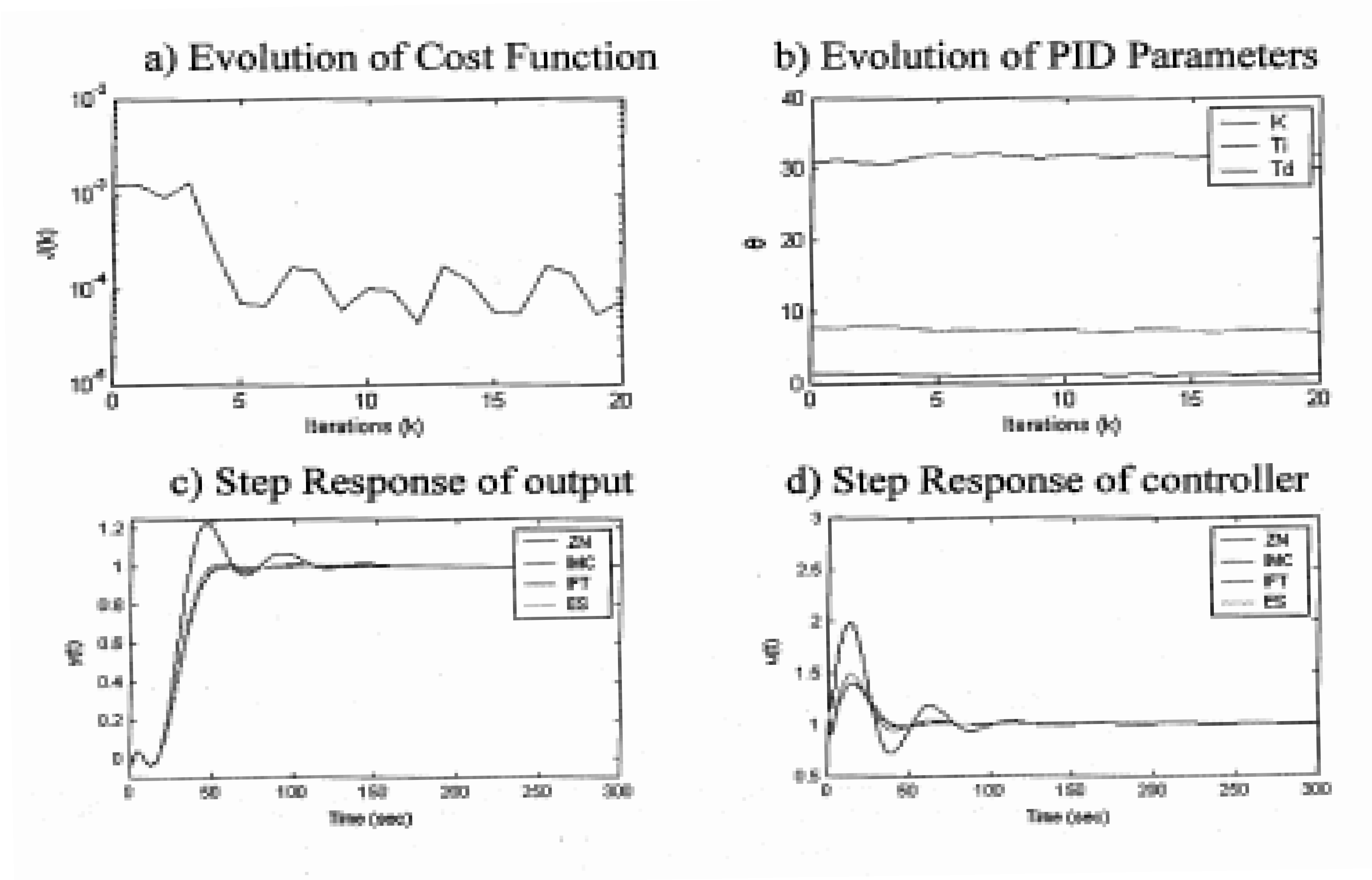
IMC: The internal model control method

IFT: The iterative feedback tuning method (Gevers, 94, 98)

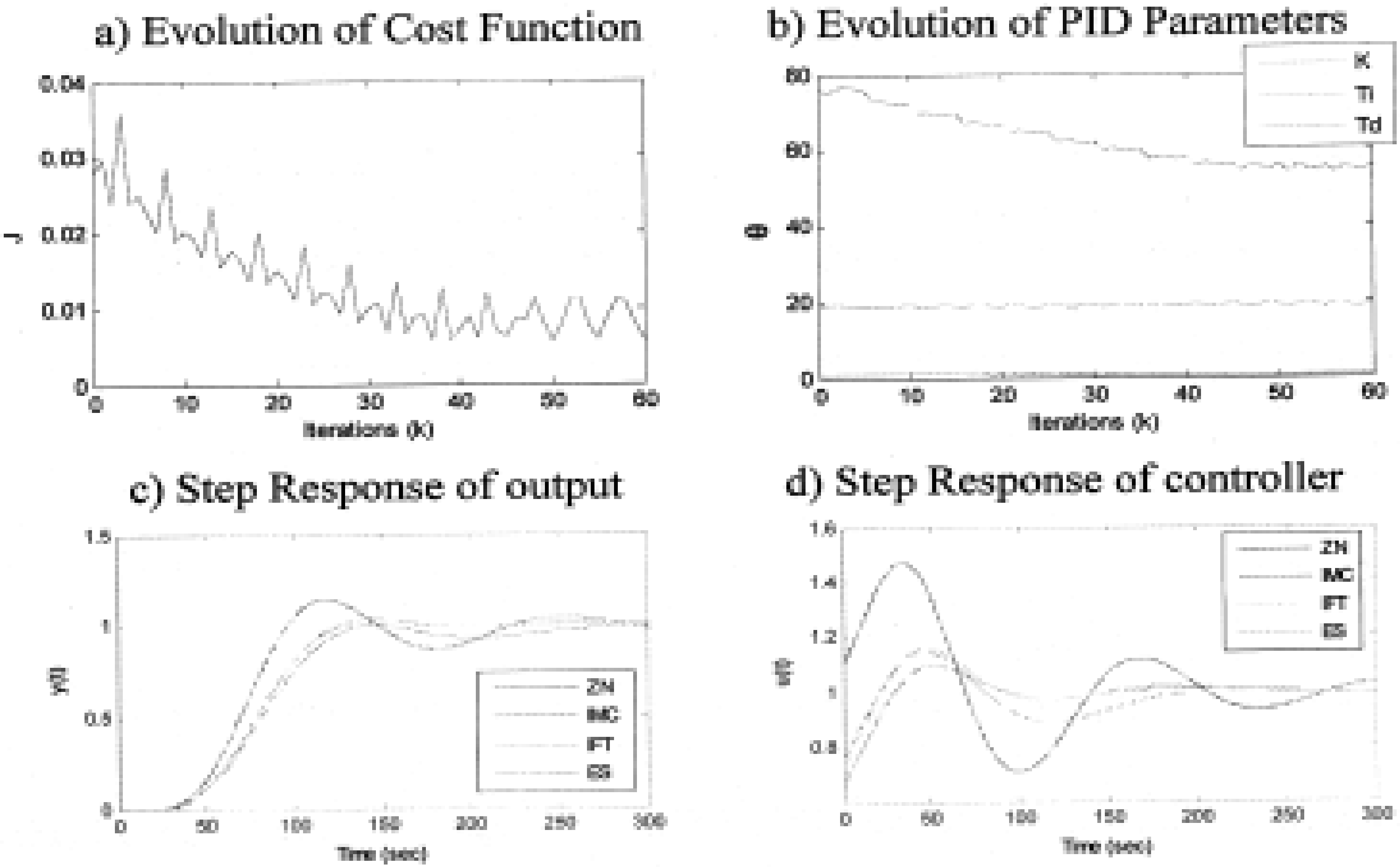
$$G_1(s) = \frac{e^{-5s}}{1+20s}$$



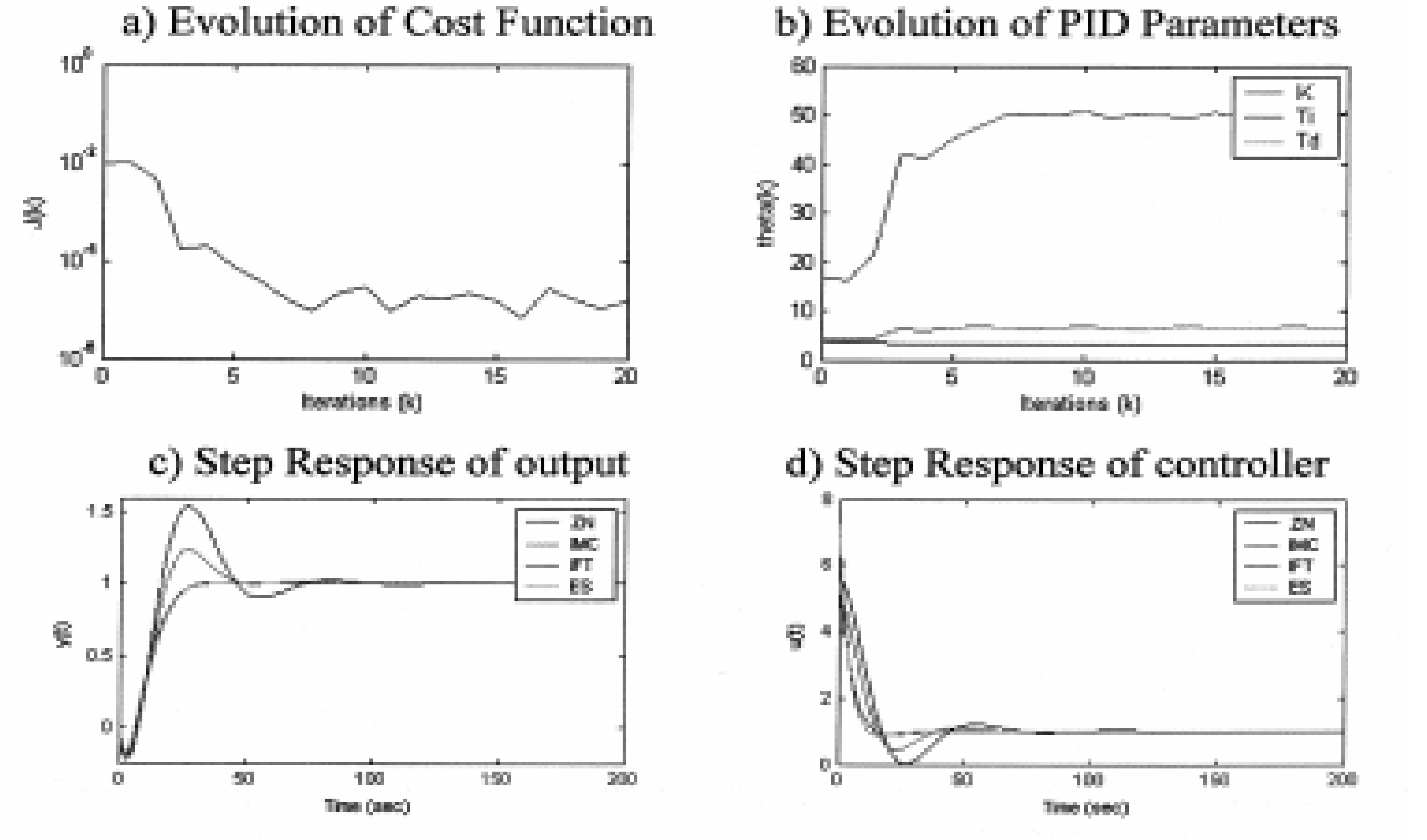
$$G_2(s) = \frac{e^{-20s}}{1+20s}$$



$$G_3(s) = \frac{1}{(1+10s)^8}$$

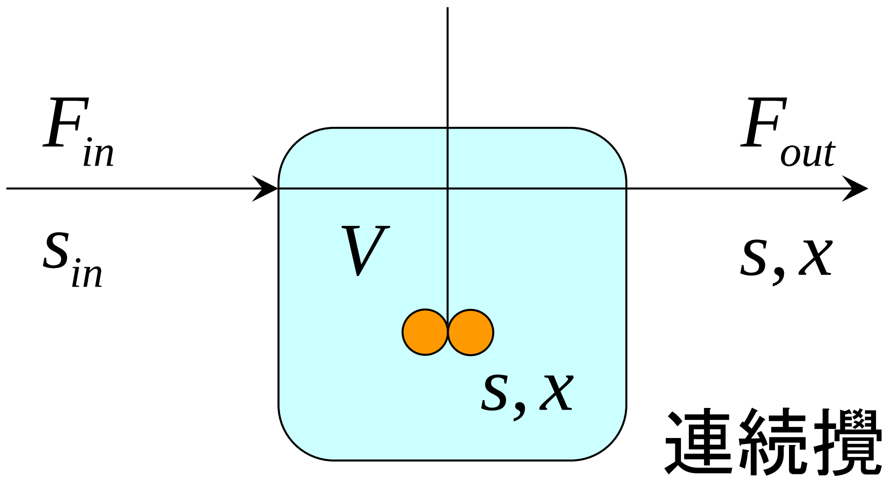


$$G_4(s) = \frac{1-5s}{(1+10s)(1+20s)}$$



応用[5] 最適バイオリアクター

酵素や微生物を利用して，物質の分解・合成・化学変換を行う装置



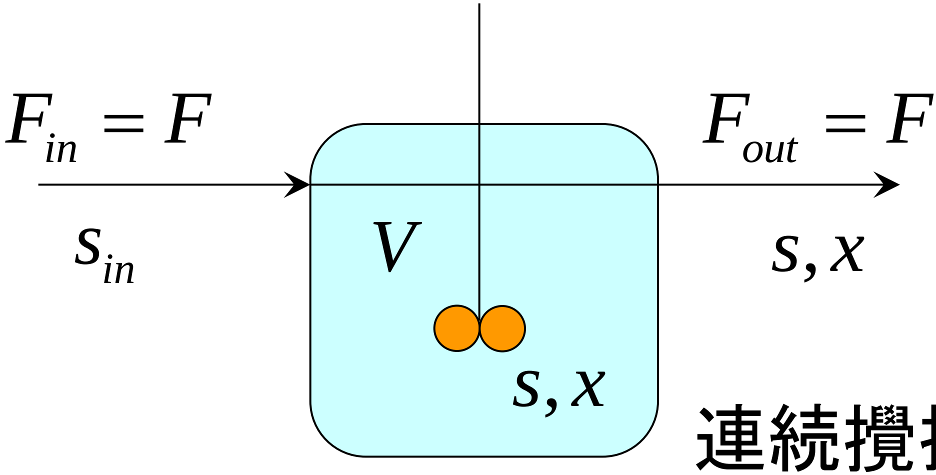
連続撹拌

x : バイオマス濃度
s: 基質濃度
μ:増殖率
K: 収量係数
$D=F_{in}/V$: 稀釈率

$$\frac{d(Vx)}{dt} = \mu(s)Vx - F_{out}x \longrightarrow \boxed{\frac{dx}{dt} = \mu(s)x - Dx}$$

$$\frac{d(Vs)}{dt} = -K\mu(s)Vx + F_{in}s_{in} - F_{out}s \rightarrow \boxed{\frac{ds}{dt} = -K\mu(s)x + D\left(s_{in} - s\right)}$$

$$\frac{dV}{dt} = F_{in} - F_{out} \xrightarrow[F_{in} = F_{out}]{\text{連続撹拌}} \frac{dV}{dt} = 0 \qquad \boxed{D = F_{in}/V}$$



連続攪拌

$$\frac{dx}{dt} = \mu(s)x - Dx$$

$$\frac{ds}{dt} = -K\mu(s)x + D\left(s_{in} - s\right)$$

$D = F_{in}/V$ 制御入力

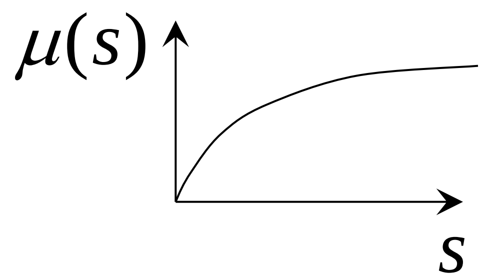
$y = Dx$ これを最大にしたい

反応速度に見合った流入量を決定して，y=Dxを最大にしたい

Monod model (Michaelis-Menten Law):

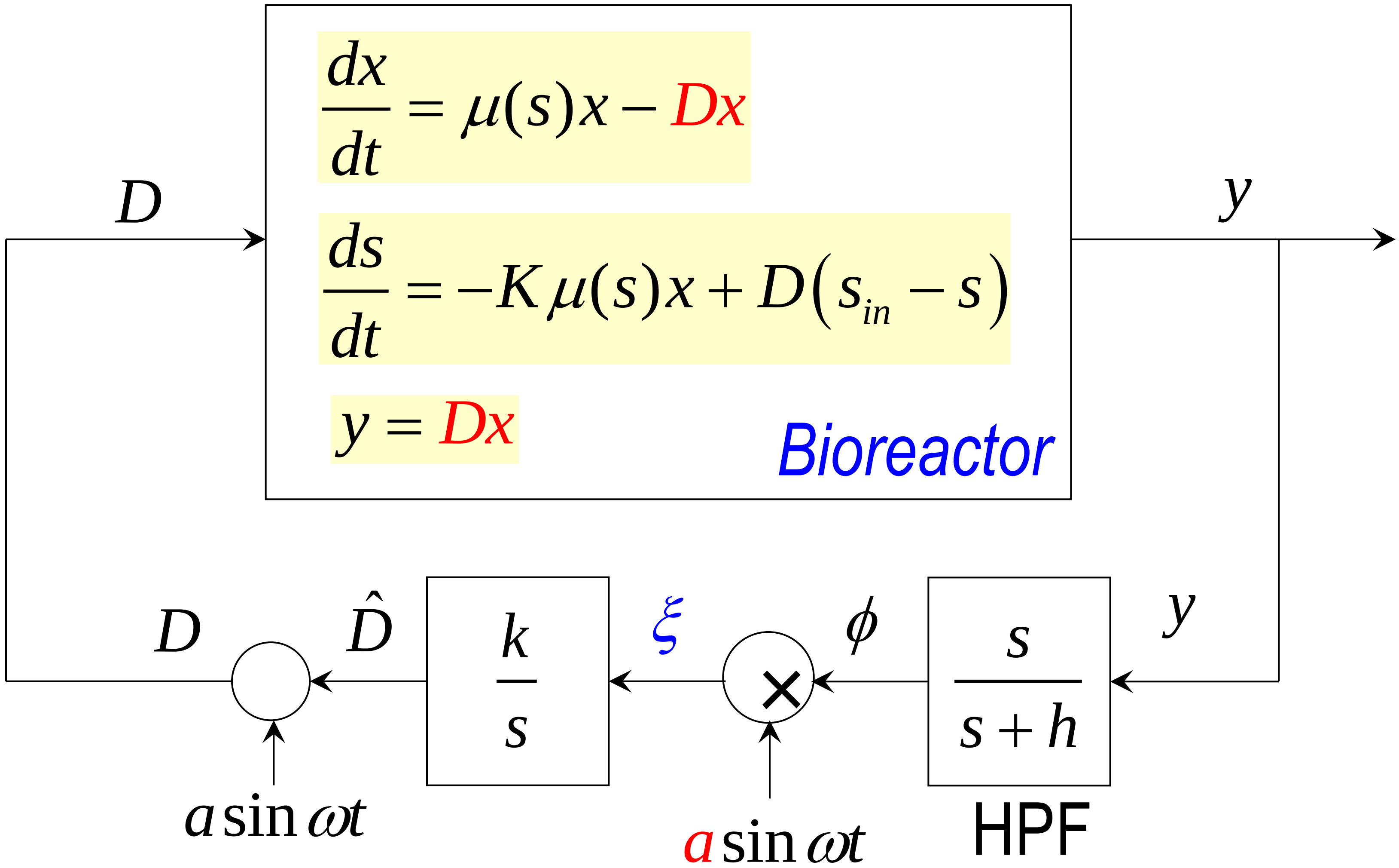
$$\mu(s) = \mu_{\max}\left(\frac{s}{K_S + s}\right)$$

$K_i = 0$



Haldane model (Andrews):

$$\mu(s) = \mu_{\max}\left(\frac{1}{1 + \left(K_S / s\right) + \left(K_i / s\right)}\right)$$



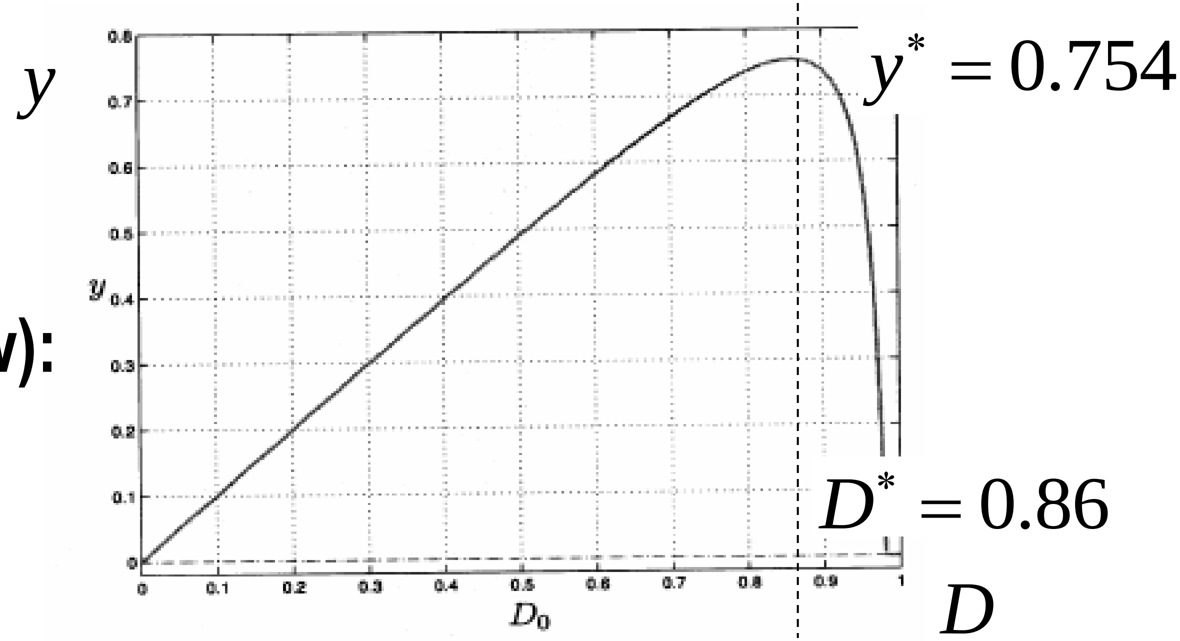
シミュレーション

$$h = 0.04,\ \omega = 0.08,\ a = 0.03,\ k = 5$$

定常解析

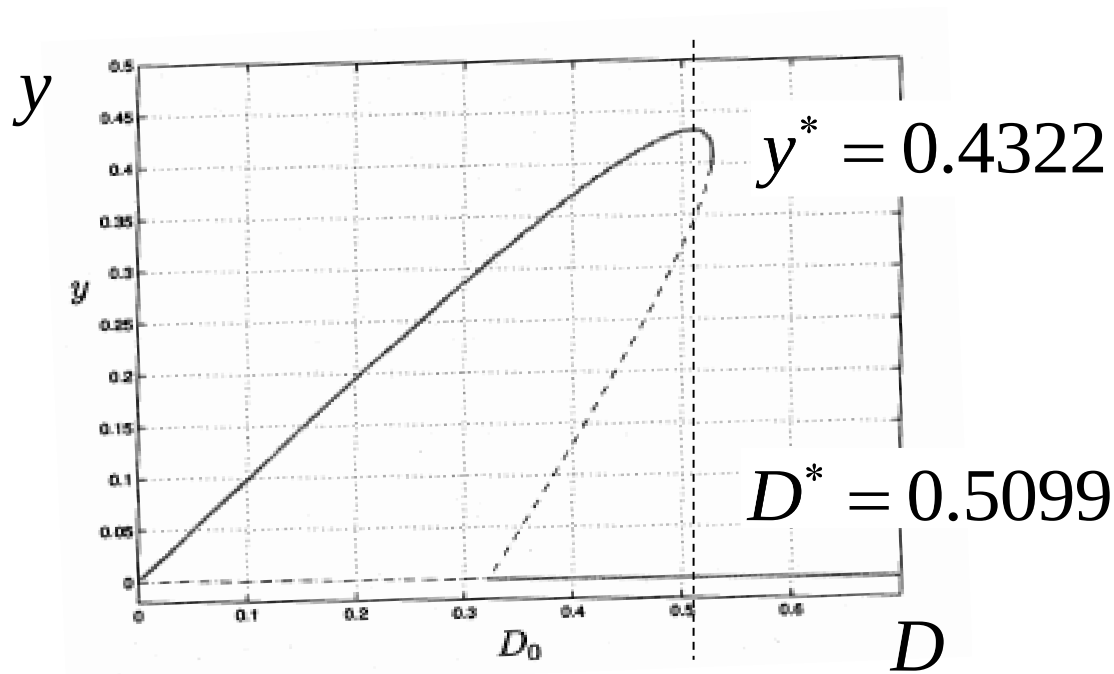
Monod model (Michaelis-Menten Law):

[1] $D(0)=0.6$
[2] $D(0)=0.9$

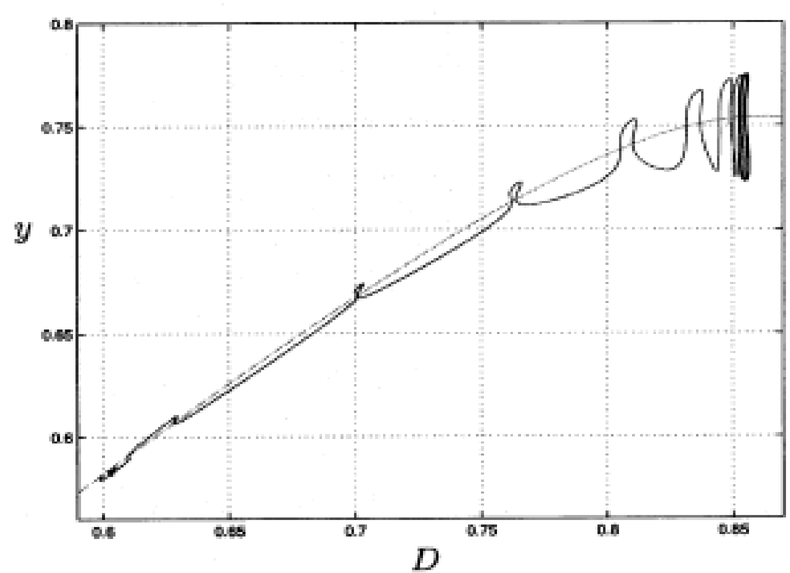


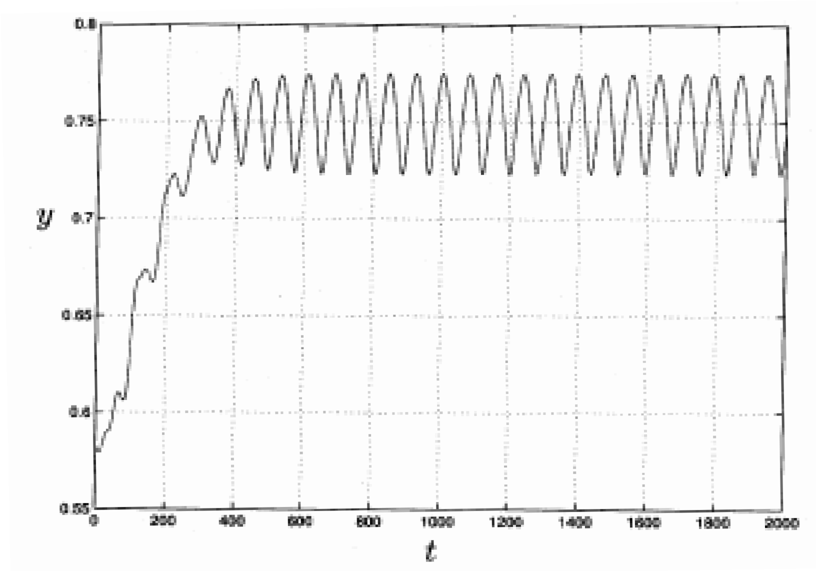
Haldane model (Andrews):

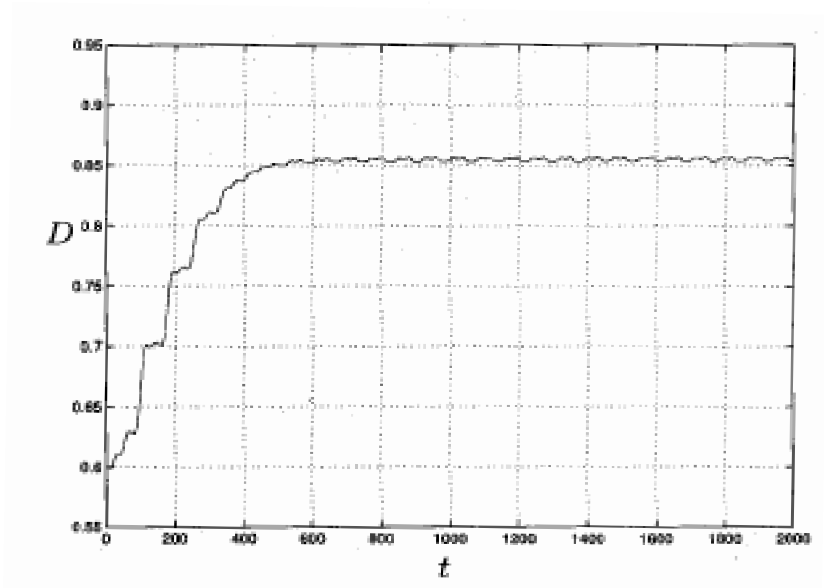
[1] $D(0)=0.4$
[2] $D(0)=0.52$



Monod model (Michaelis-Menten Law) [1]



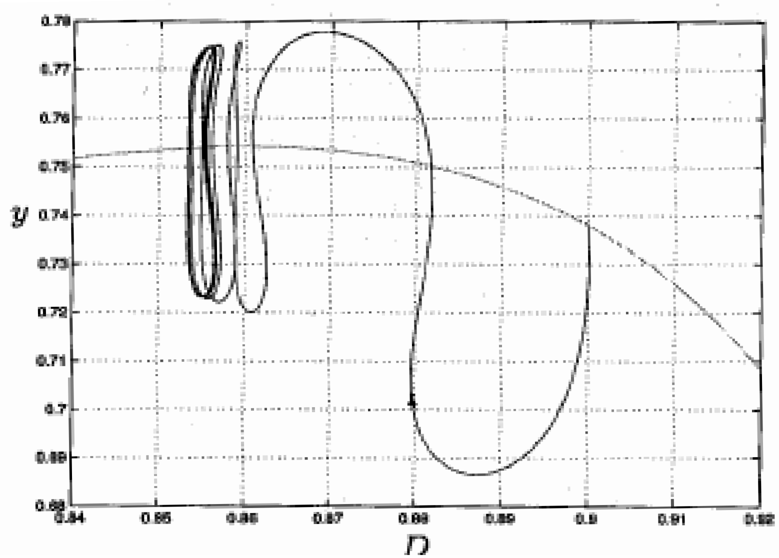


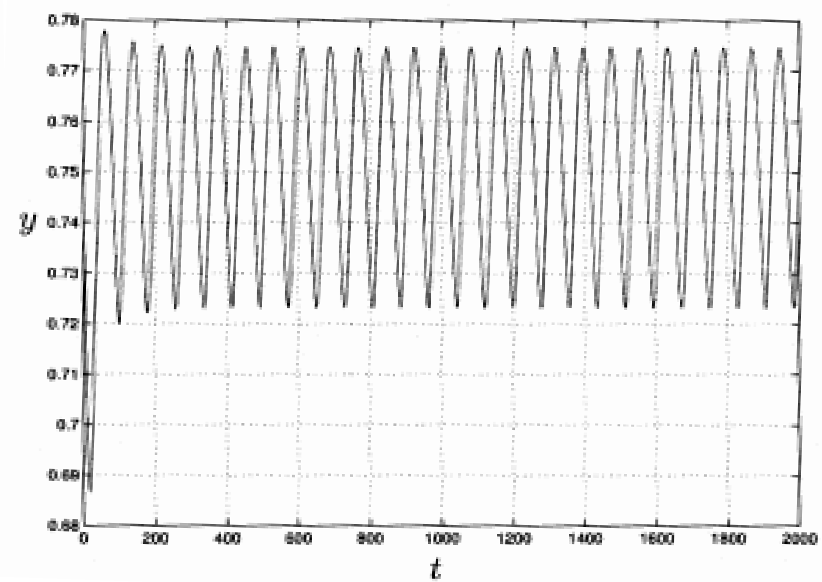


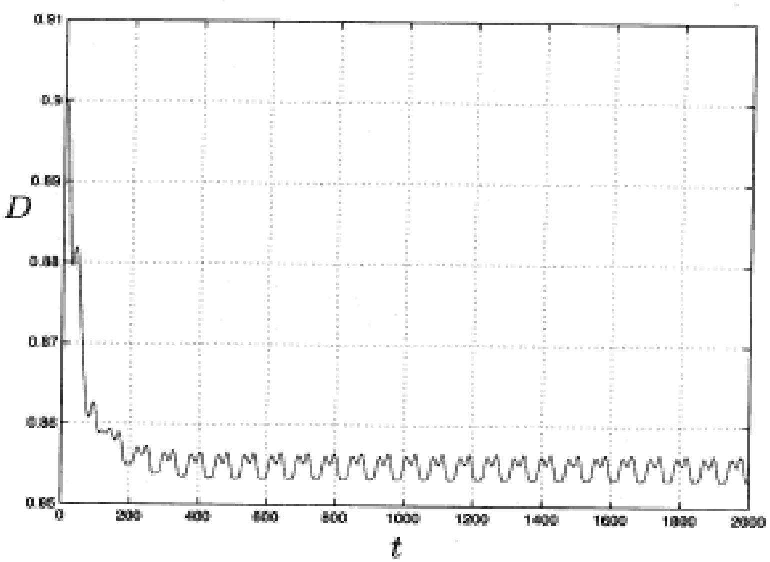
[1] $D(0) = 0.6$

$D^* = 0.86$

Monod model (Michaelis-Menten Law) [2]



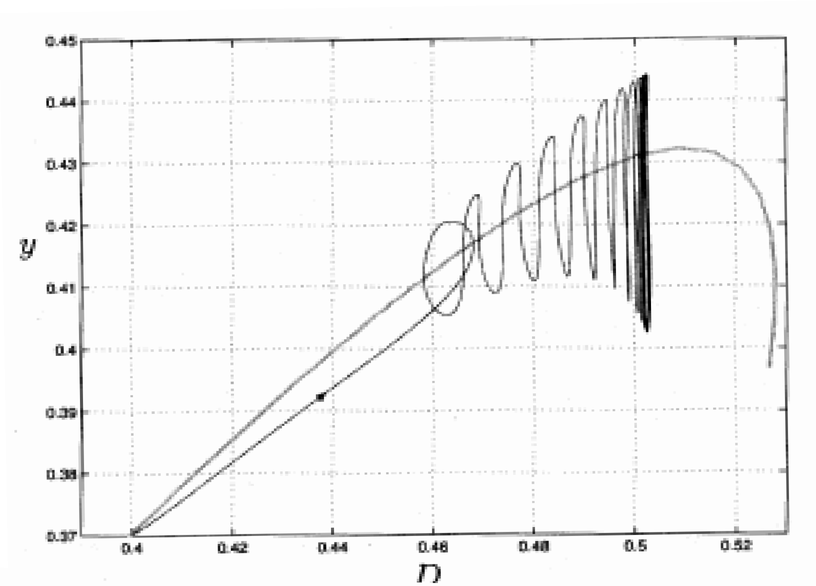


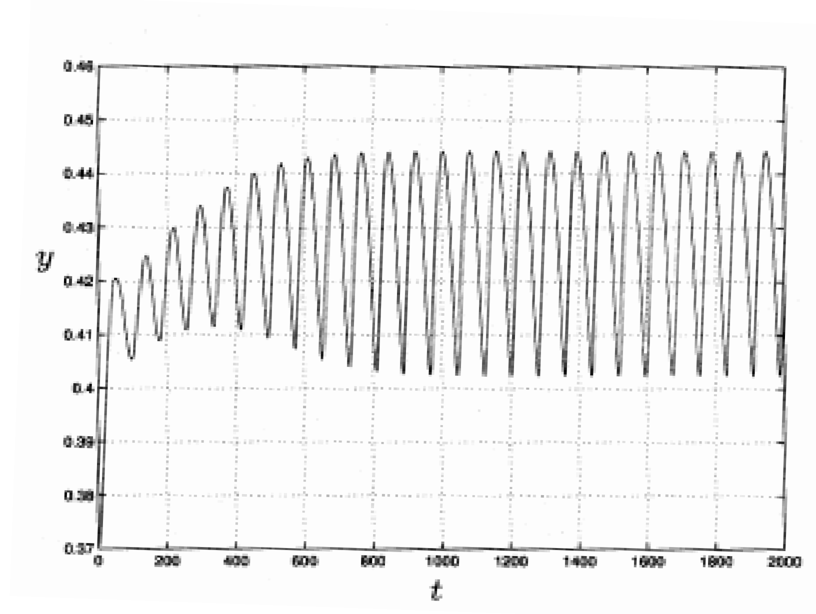


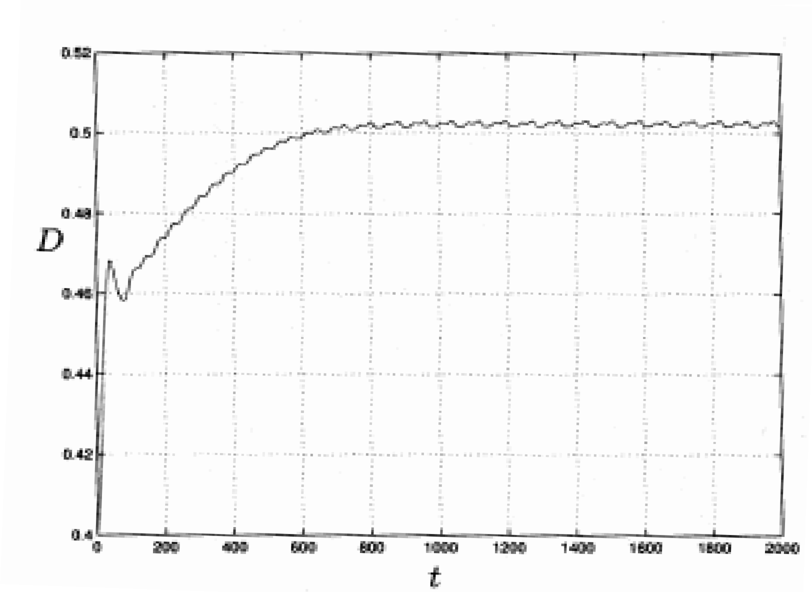
$D^* = 0.86$

[2] $D(0) = 0.9$

Haldane model (Andrews)[1]





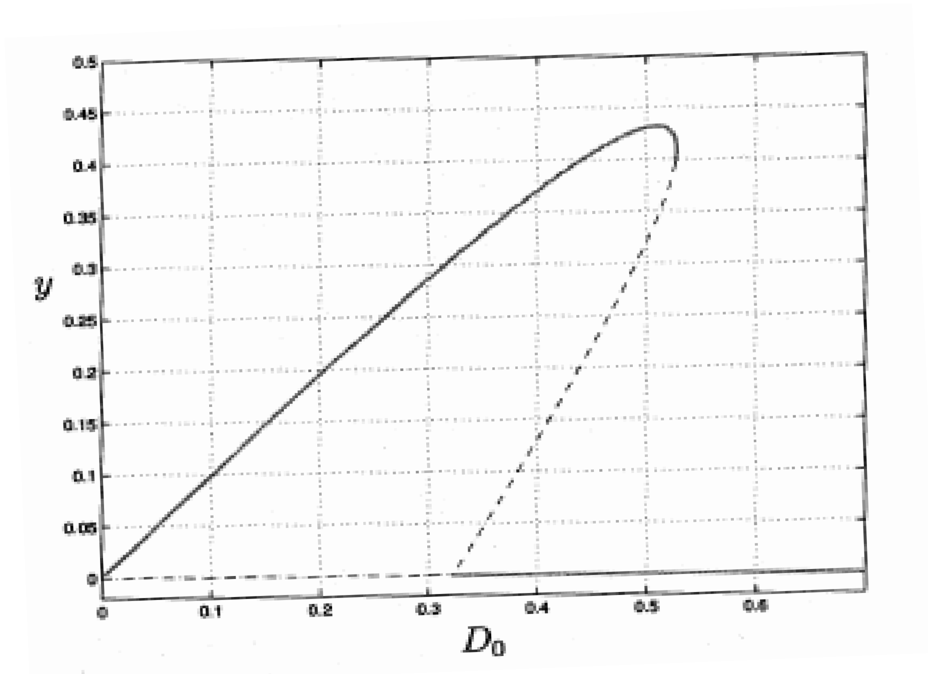


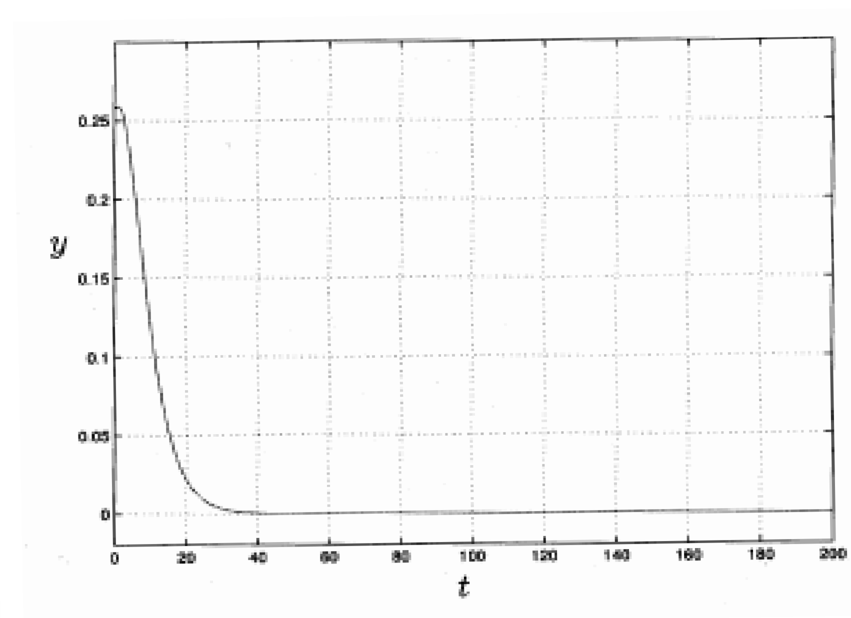
$$D^* = 0.5099$$

[1] $D(0) = 0.4$

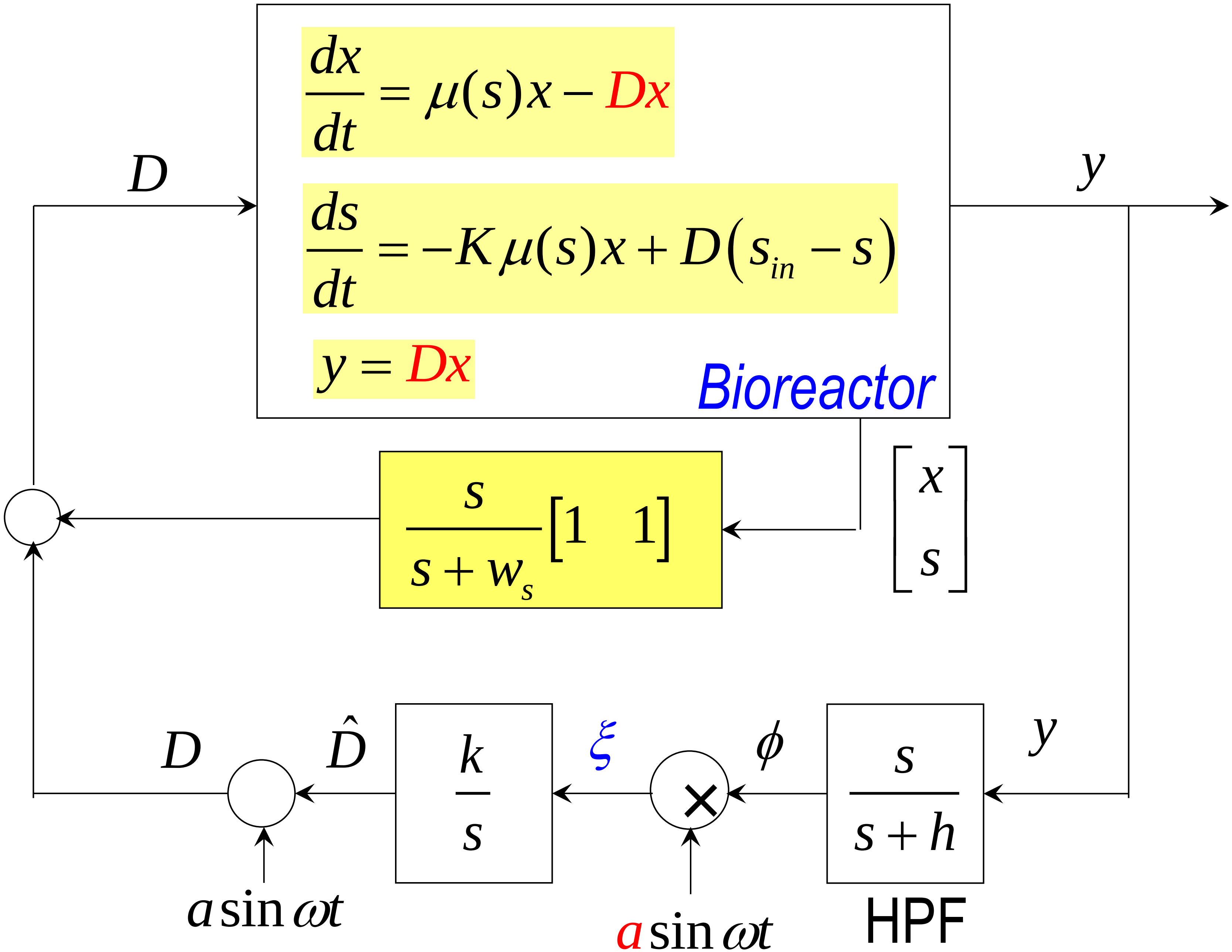
Haldane model (Andrews)[2]

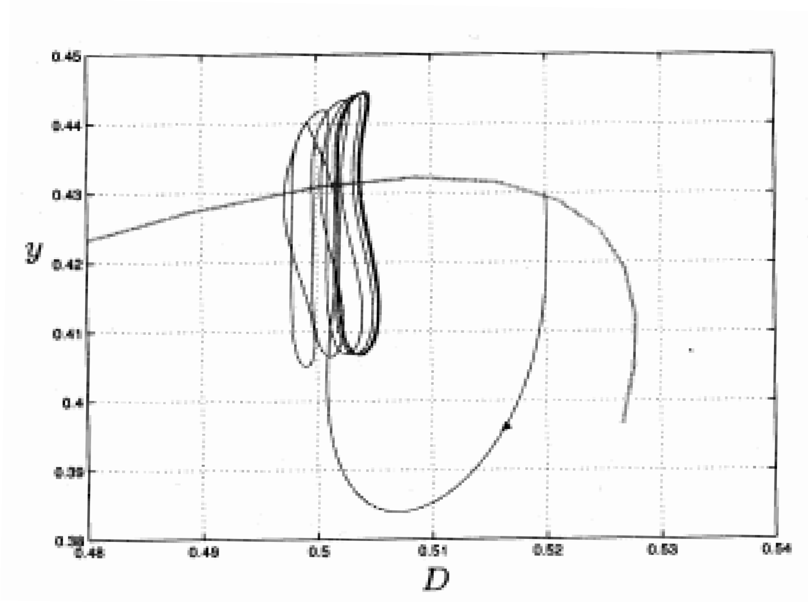
Wash-outが発生している!!

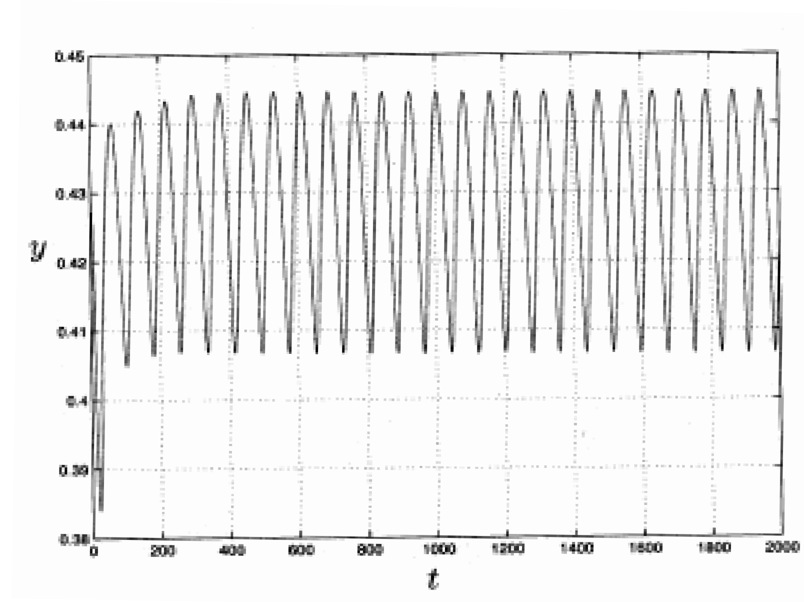


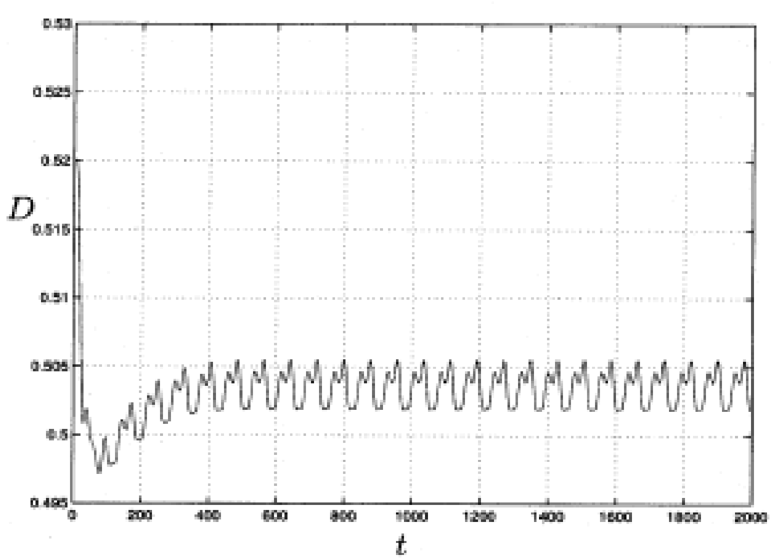


[2] $D(0) = 0.52$


$\frac{dx}{dt} = \mu(s)x - Dx$
$\frac{ds}{dt} = -K\mu(s)x + D(s_{in} - s)$
$y = Dx$
Bioreactor
D
y
$\frac{s}{s+w_s}[1 \quad 1]$
$\begin{bmatrix} x \\ s \end{bmatrix}$
D
$\hat{D}$
$\frac{k}{s}$
ξ
ϕ
$\frac{s}{s+h}$
y
$a \sin \omega t$
$a \sin \omega t$
HPF







[2] $D(0) = 0.52$

$D^{*} = 0.5099$

Thank you for kind attention

Keio University

1858

CALAMVS GLADIO FORTIOR