機械工学実験1
A) 制御工学
2017年度版 v2r1

機械工学科
機械制御システム研究室
加藤恵輔

本日の進め方

本日の実験にあたって

- 実験時間は3～5限一杯.
  - 計算作業や実験ごとに時間を決めて確保.
  - 落ち着きじっくり取り組みを.
- 課題によっては途中で出題. その場で記述を.
  - その場で観察した現象を記録し, 考え, 仕上げることも重要.
  - 実験後, すぐに提出

- 授業で未だ扱っていない内容の実験.
  - 習っていないからよく分からないと決めつけてしまわないようにしましょう.
  - 説明から今学び, 学んだことを実験に反映し, すぐにレポートにしていきましょう.
  - 実験を理解するための計算も行いますので, とにかくやってみることにしましょう.

資料について

1. 機械工学実験1テキスト

2. 配布資料

3. (PPTスライド)

- PPTスライド資料は以下のURLにPDFがあります.

http://www.isc.meiji.ac.jp/~mcelab/kikai_jikken1/kikai_jikken1_j.htm

本日の実験のステップ

	内容		関連する課題	時間
1	制御とは何か？	説明	［課題1］	13:30～14:10
2	制御対象の特性を知る	説明・実験1	［課題２～３］	14:15～15:45
3	外乱に対応する制御系を作る	説明・実験2	［課題４～５］	15:45～16:45
4	制御系の設計・調整と特性改善	説明・実験3	［課題６～７］	16:45～17:50
5	まとめ	説明	［課題８～１０］	17:50～18:20

1. 制御とは何か
2. 制御対象を知る
3. 制御系を作る
4. 制御系の設計・改善

課題1に関係します.

制して　御する　こと

自動車用レシプロエンジン

鉄道台車モータ

工場・ビル設備用
ガスタービン

航空機用
ターボファンジェット

建設機械用シリンダ

建物用
アクティブダンパ

液体燃料ロケットエンジン

強大な出力を持った
アクチュエータ

状態を計測して

自動車用ECU

設備用制御盤

運行司令室

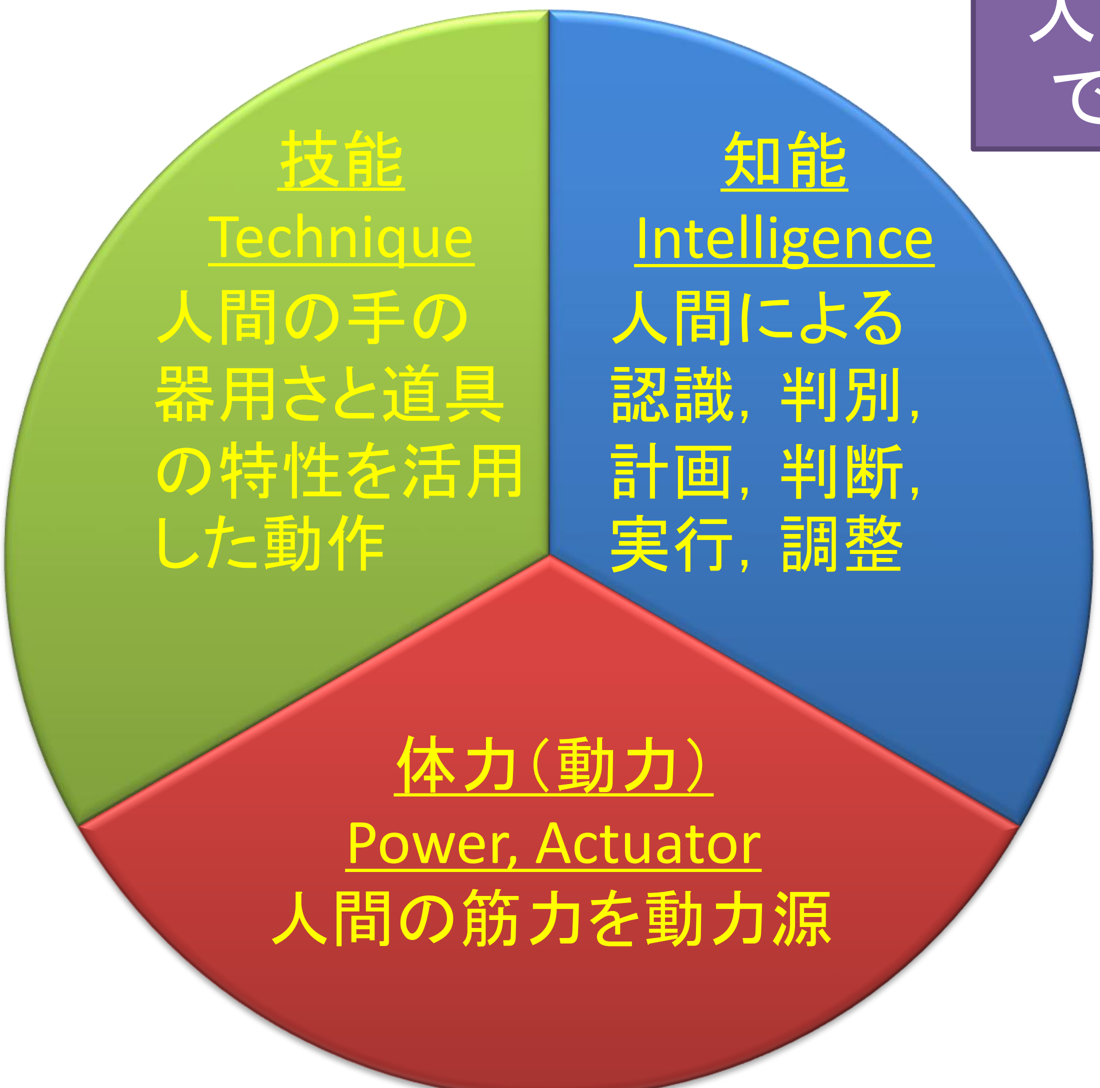
必要量を
演算

欲しい
高精度な
応答

必要量に制限し，設計した
通りに動かす仕組み

人間や道具によるタスクの実行

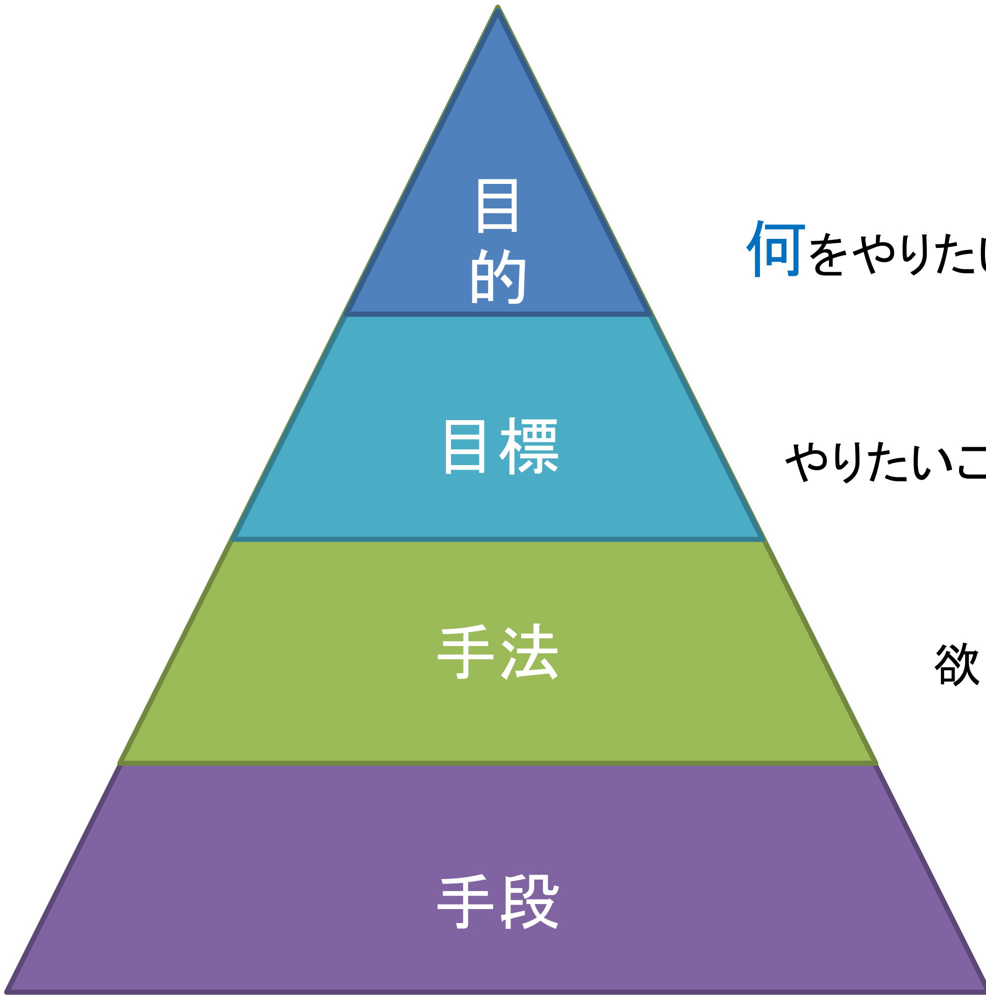
人間の望む機能を実現
できることが最終目標



動力，技能，知能
とも人間が担当

動力，技能の一部，
知能を人間が担当

制御の考え方（概念）



何をやりたいのか？

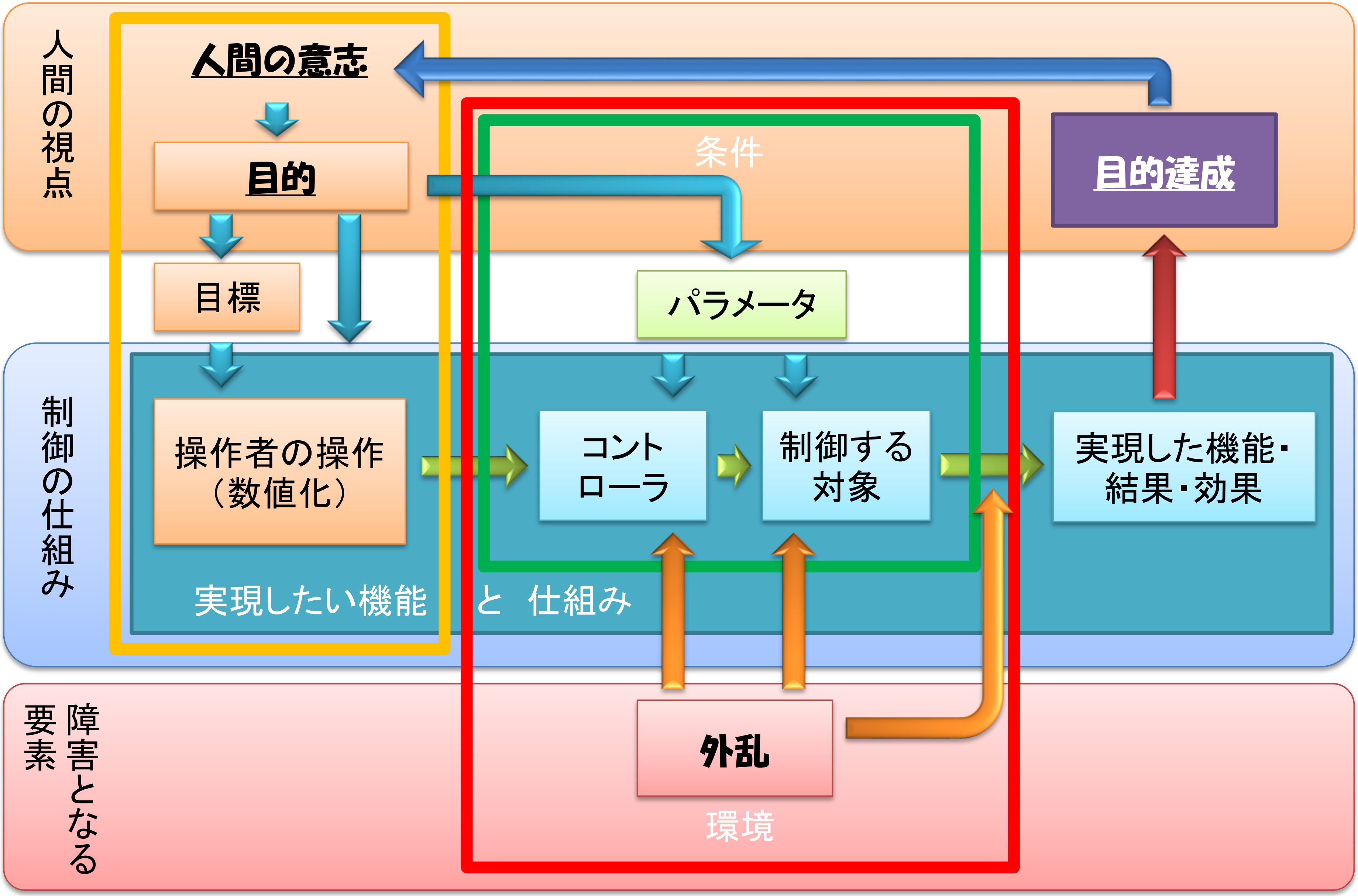
やりたいことを数値と数式で表現しなおせるか？

欲しい数値を得るための仕組みは？

具体的にどのようにするのか？

これらの類義語
様式，方法，技法，方式など

制御の考え方



人間の視点
制御の仕組み
障害となる要素
人間の意志
目的
目標
条件
パラメータ
目的達成
操作者の操作（数値化）
コントローラ
制御する対象
実現した機能・結果・効果
実現したい機能　と　仕組み
外乱
環境

制御の役割（いろいろ）

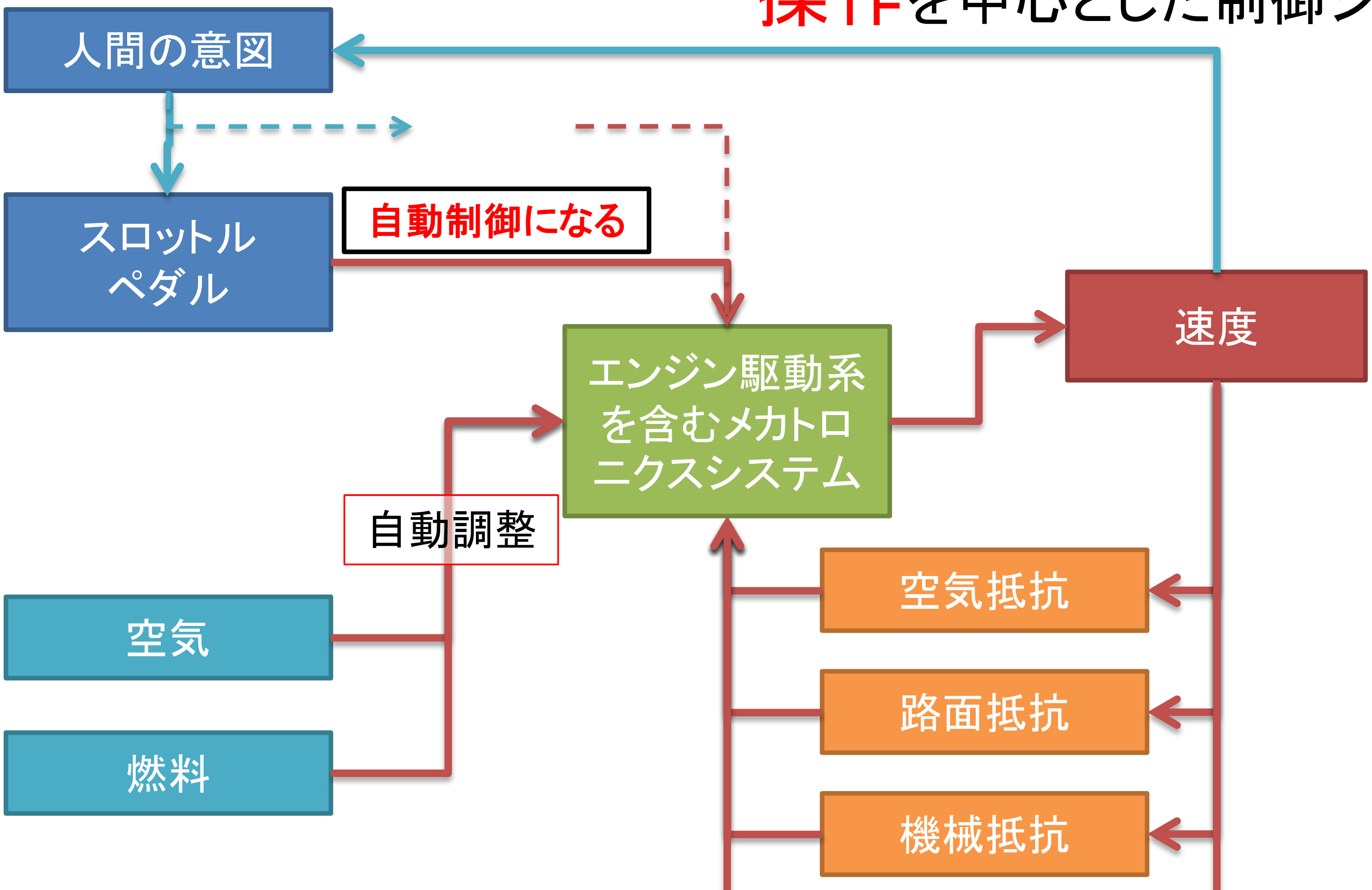
制御法	（遠隔）操作	自動制御	自律制御
役割	機能拡大	支援	代行
目的決定 （意志）	操作者	操作者	操作者
目標設定 （行動原理）	操作者	操作者	制御系
判断	操作者	制御系	制御系
動作・調整	制御系	制御系	制御系
例（乗り物 以外）			

制御の役割（乗り物編）

制御法	操作	自動制御	自律制御
役割	機能拡大	支援	代行
目的決定（意志）	操作者	操作者	操作者
目標設定（行動原理）	操作者	操作者	制御系
判断	操作者	制御系	制御系
動作・調整	制御系	制御系	制御系
例（乗り物）			

制御の面から自動車を考える

操作を中心とした制御システム



島根-鳥取　県境
江島大橋
(勾配6.1%)

知能を持ち，状態を認識しながら自ら行動を決定し判断する制御システム

歩行ロボット

WildCat:https://www.youtube.com/watch?v=wE3fmFTtP9g&list=UU7vVhkEfw4nOGp8TyDk7RcQ

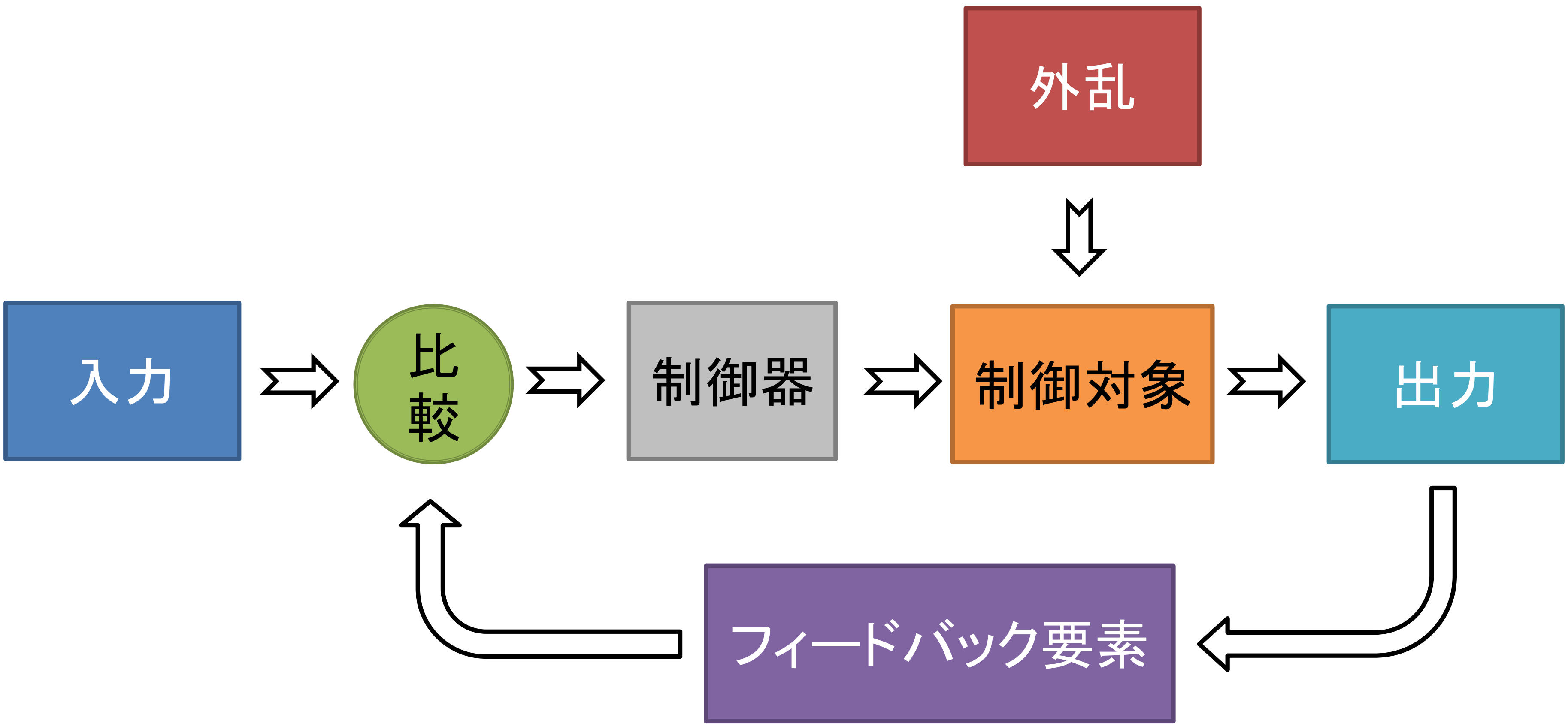
SpotMini:https://www.youtube.com/watch?v=tf7IEVTDjng

Atlas:https://www.youtube.com/watch?v=fRj34o4hN4I

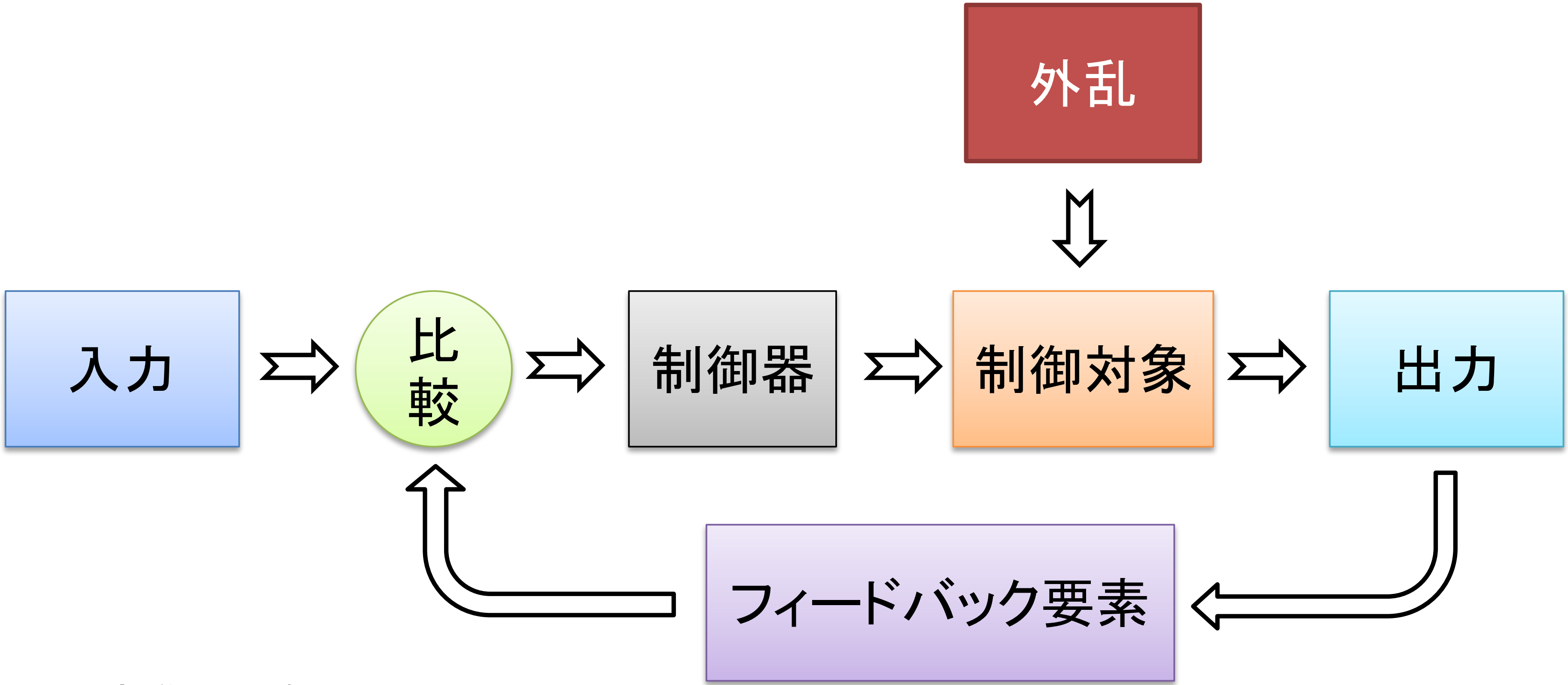
Petman:https://www.youtube.com/watch?v=tFrjrgBV8K0&list=UU7vVhkEfw4nOGp8TyDk7RcQ&index=4

基本的な制御系の概念

制御の基本となる自動制御



課題1に関係します.



制御とは何か

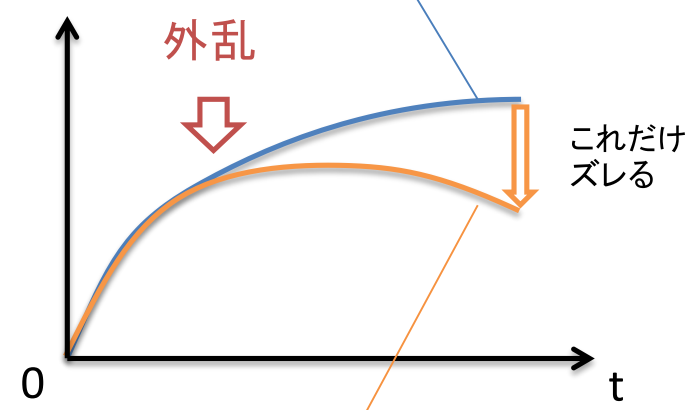
外乱とは？

外乱とは？

入力 → 対象 → 出力結果

どんな条件でも欲しい結果が得られれば制御は不要

想定した対象の応答を阻害する要素



外乱

入力 → 対象 → 出力結果

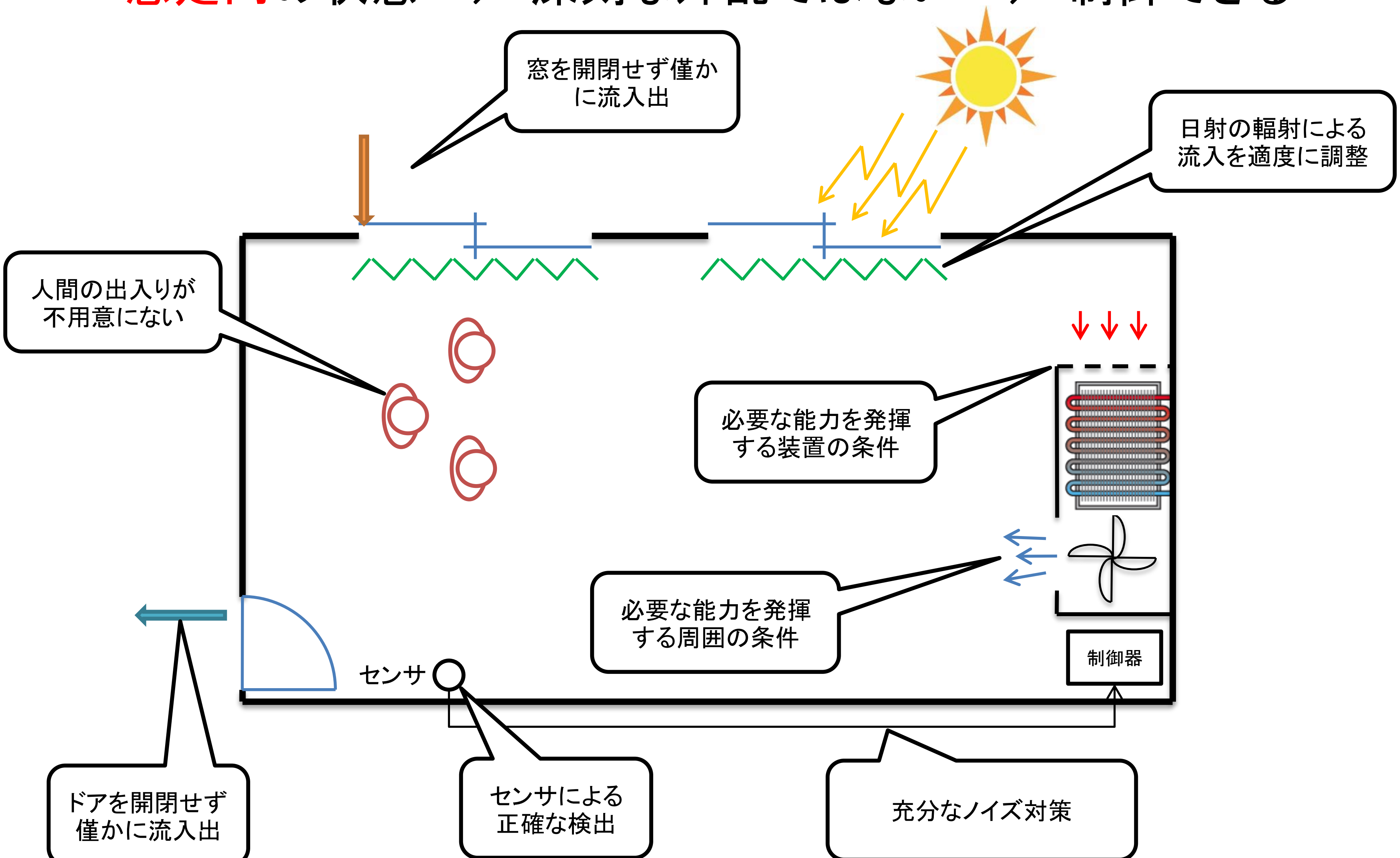
外乱により欲しい結果から外れる

制御の重要な役割 → 外乱の影響を抑制 → 狙い通りの結果

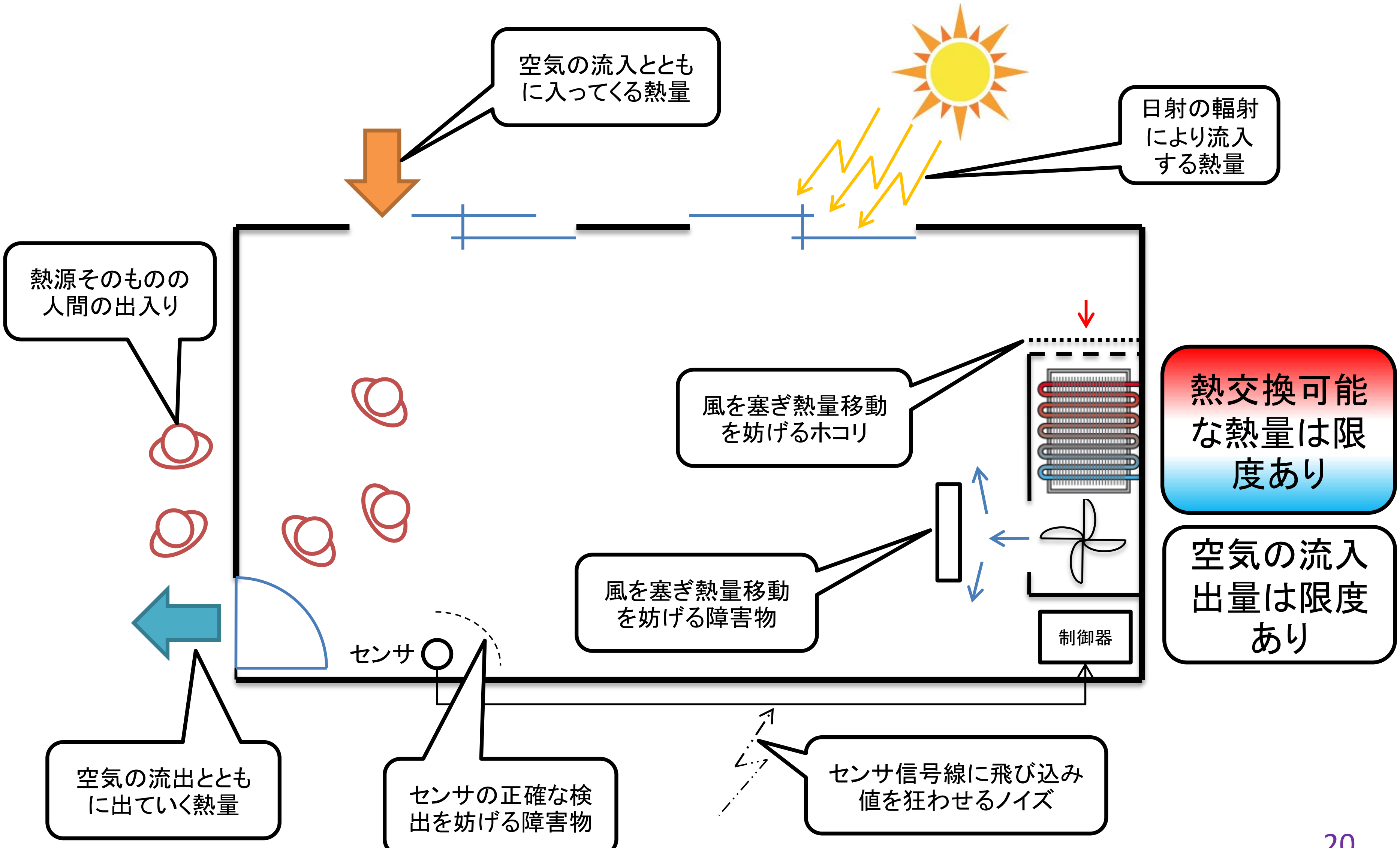
外乱の影響が過大 → 想定外の結果 → 制御できていない

室温調整にとってのよい状態

想定内の状態 → 深刻な外乱ではない → 制御できる



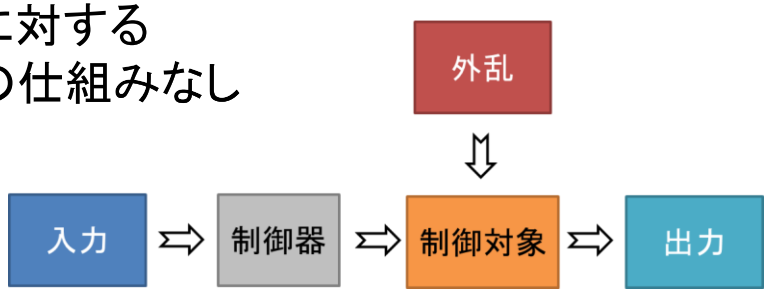
室温調整にとっての深刻な外乱とは？



何を言いたかったかと言うと(1)

外乱の対処の必要性

外乱に対する
制御の仕組みなし

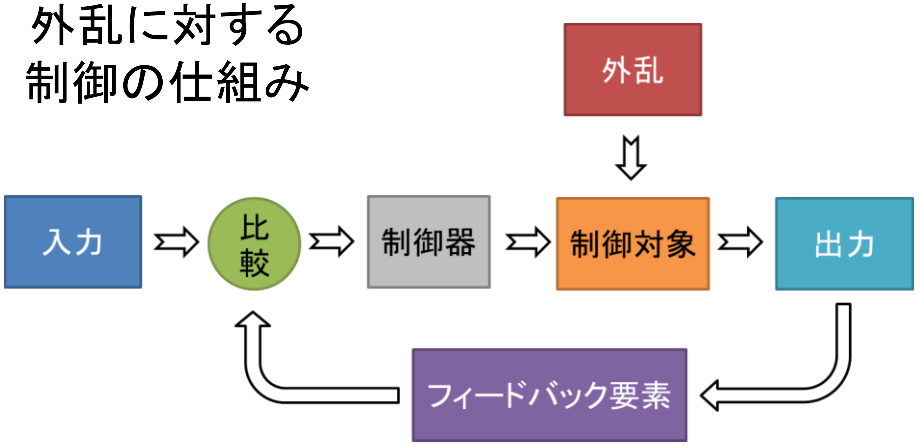


- 外乱が加わる

↓

- 欲しい応答から外れる

外乱に対する
制御の仕組み



- 外乱の影響分を補正

↓

- 欲しい応答にする

何を言いたかったかと言うと(2)

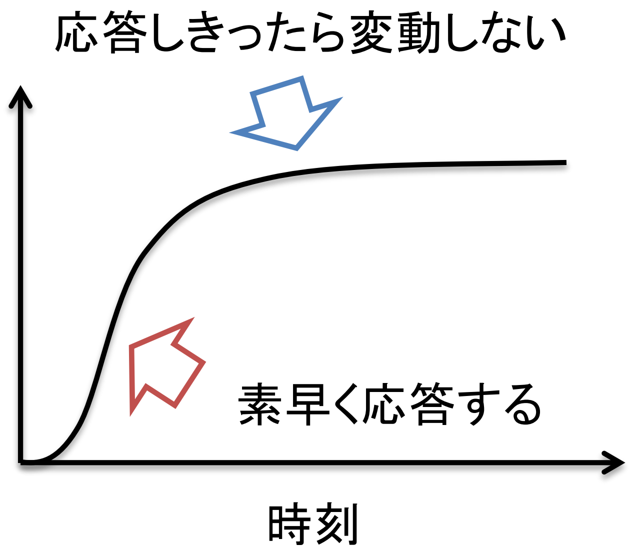
想定すること(設計)の考え方

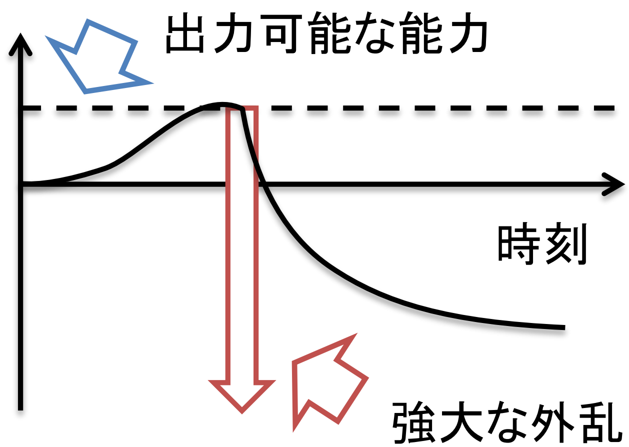
欲しい応答の実現

- 利用条件を想定した設計
- 環境を整えた運用・動作

欲しい応答から外れる危険

- 使用環境と想定した条件の過大な相違
- 過大な外乱の影響





保つ制御　と　操る制御

プロセス制御	サーボ制御

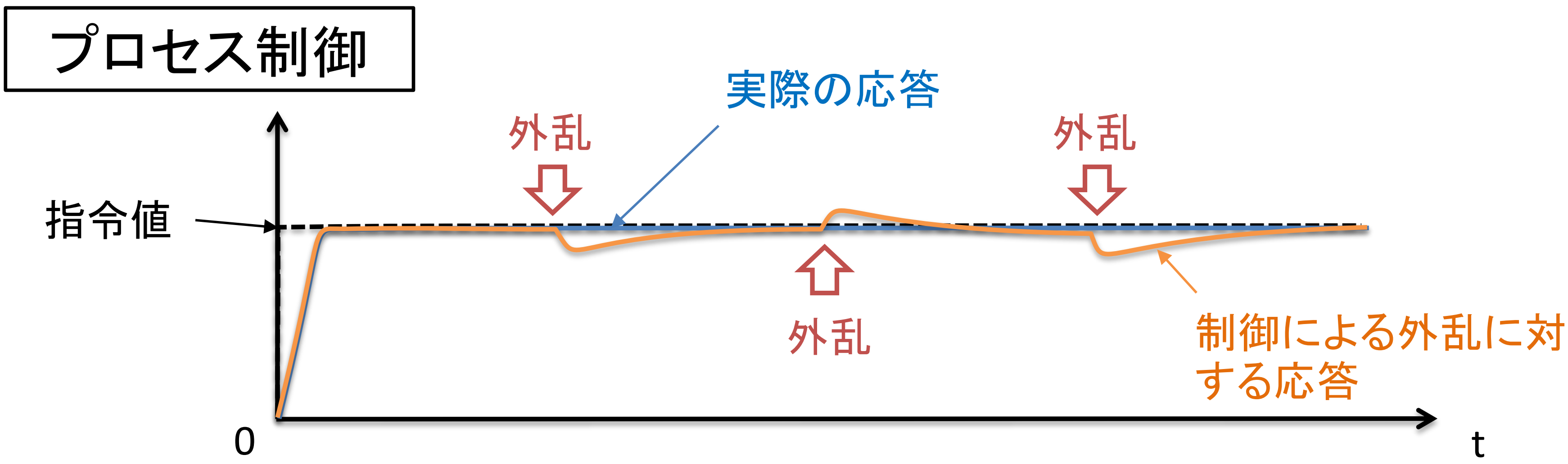
- 欲しい状態を維持し続ける制御
  - 狙い通りの出力を得る
  - 応答が安定して変動しない
  - 外乱が加わっても確実に復旧

- 思い通りに操り，変化に追従させる制御
  - 狙い通りの変化に応じた出力を得る
  - 応答が安定して滑らか
  - 外乱が加わっても確実に補完して狙いの変化

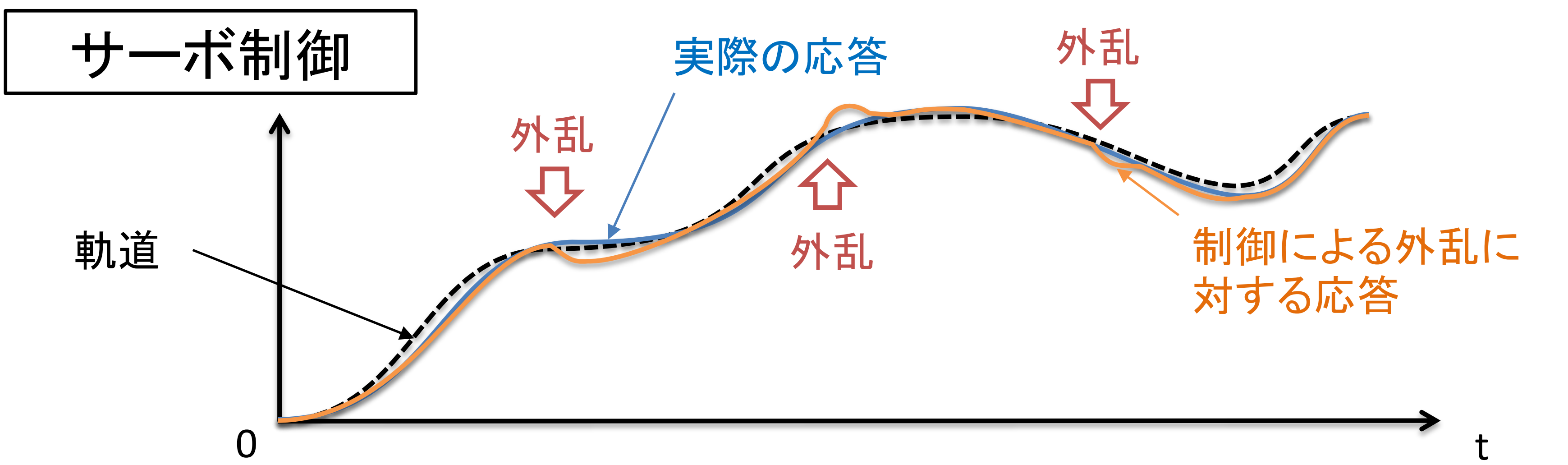
室温を保つ　　化学反応速度を保つ

手先を軌道に合わせて動かす

外乱に対する応答



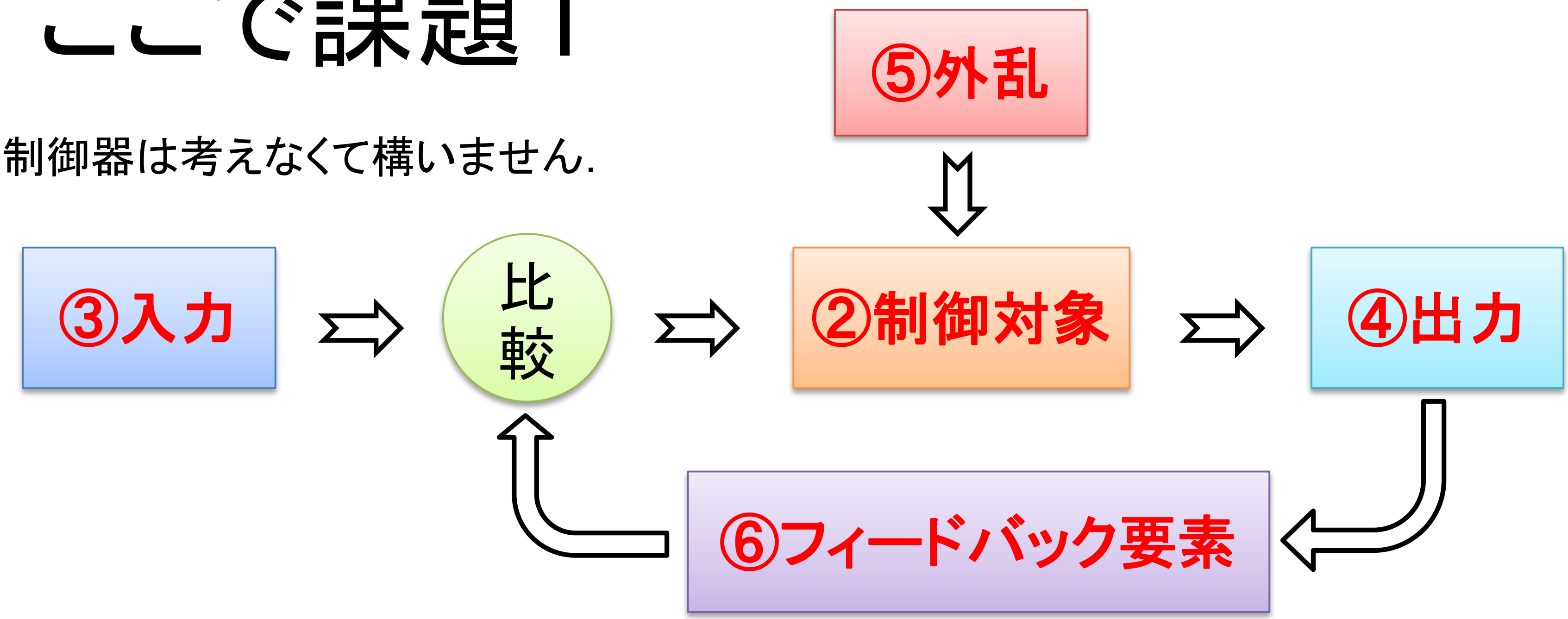
プロセス制御
実際の応答
外乱
外乱
指令値
外乱
制御による外乱に対する応答
0
t



サーボ制御
実際の応答
外乱
外乱
軌道
外乱
制御による外乱に対する応答
0
t

ここで課題1

※制御器は考えなくて構いません.



- 周囲の人々と議論しながら考えてみましょう.
- 今の段階で想像する「制御」の仕組みを持つものを考えましょう.

- 正しい答えを書く必要はありません.
- 授業中分は清書の必要ありません.

書くとよいもの
①制御の目的, 何をしたいか
⑦制御の効果, どのようにするか
制御の手段, 上記の各要素

赤字をレポートにしてください.
エアコンの制御はナシ.

１．制御とは何か
２．制御対象を知る
３．制御系を作る
４．制御系の設計・改善

課題2，実験1，課題3に関係します．

制御モデル

例えばこんな式

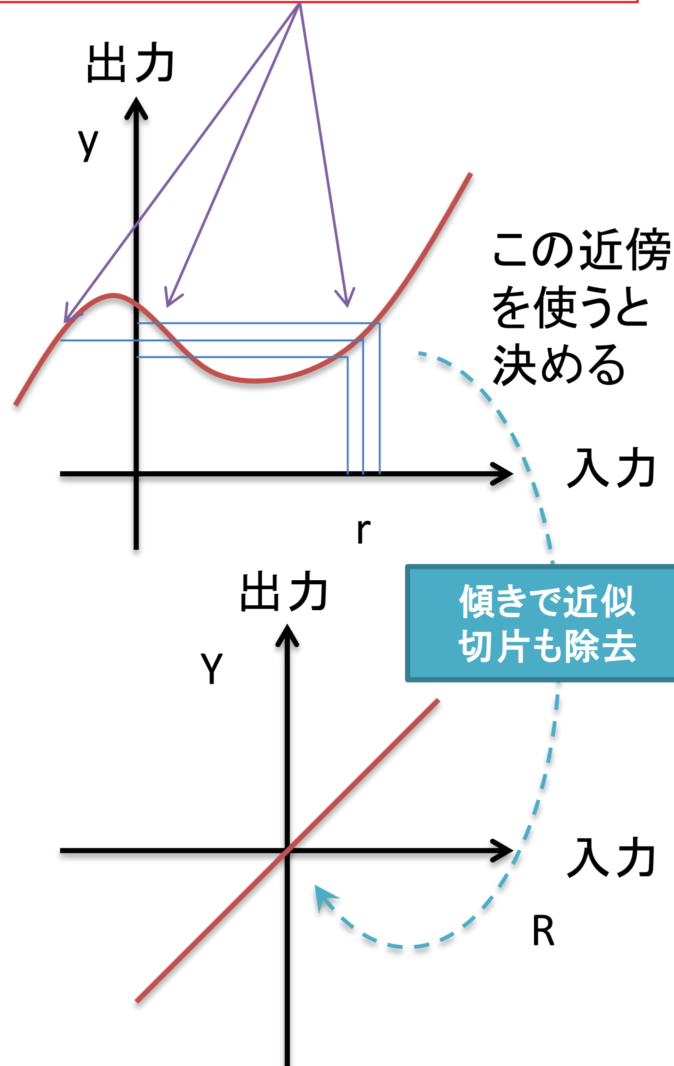
$$m\frac{d^2}{dt^2}x + c\frac{d}{dt}x + kx + \alpha\left(\frac{d}{dt}x\right)^3 = f$$

運動方程式は力の釣り合い

1. 微分方程式
   - 運動方程式など
   - 時間変化の関係を表す　制御らしい
2. 近似
   - 制御したい範囲（条件）※を決定
   - 制御可能な方程式に変換
3. 伝達関数
   - 指令値に対する応答の関係

R $\xrightarrow{\text{入力}}$ G(s) $\xrightarrow{\text{出力}}$ Y

解が3つあっては制御できない

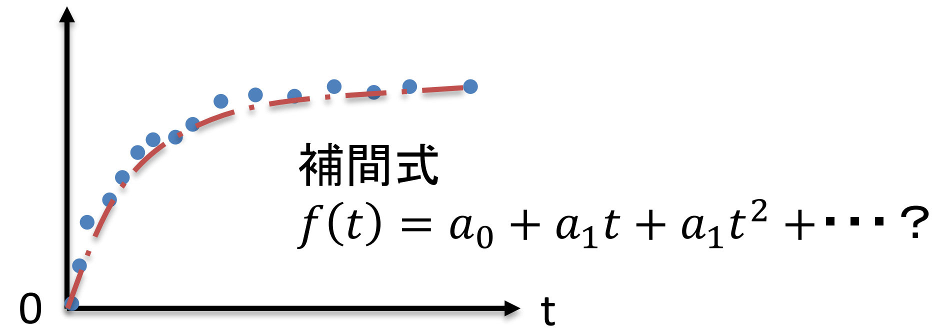


※主に扱う中心の状態（釣り合い）を平衡状態といい，制御則を決める基本

制御モデルの決め方

方法1

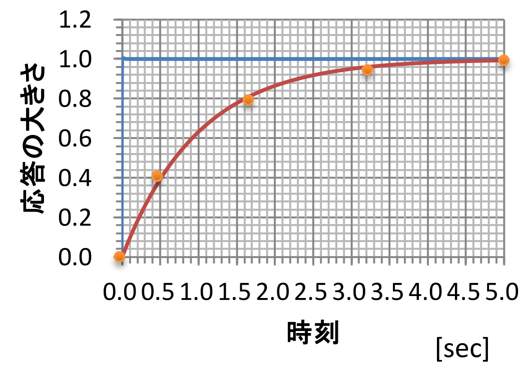
- 実際の動作を計測して応答を示す数式を割り出しパラメータ値を得る



方法2

- 選択した対象の既存の制御モデルを選定
- 仕様書の値を利用
- 足りない値を実測してパラメータの値を得る

モータ型番			RE40	
停動（起動）	mNm	A	2560	42.4
無負荷	rpm	A	7590	0.0686
最大効率時（定格）	W	1	150	0.91
	rpm	A	7000	3.17
	mNm		187	
駆動電圧	V		48	
重量	g		480	



利用できる知見を的確に選択する発想も工学的に重要

ラプラス変換

$$F(s) = L\{f(s)\} = \int_0^\infty e^{-st} f(t) dt$$

重解，特殊解（右辺が0ではない）が存在するような複雑な微分方程式が楽に解ける

1. 初期値に注意すれば，微分方程式を明快な代数方程式として解くことができるので簡単
2. 式のパターンから制御特性を見出しやすい

⇩

初期条件とラプラス変換表を使って簡単に解ける

今日はラプラス変換の結果を使うだけ

（参考）ラプラス変換表

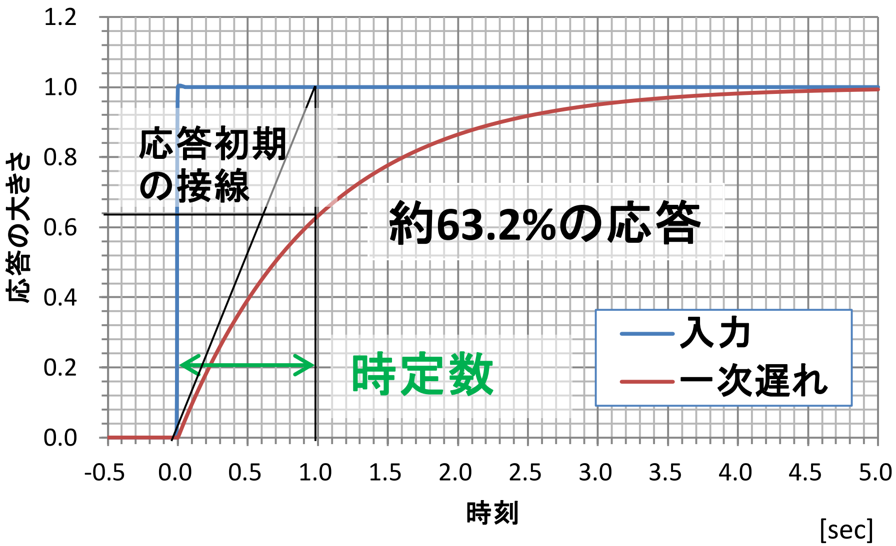
t関数　$f(t)$	s関数　$F(s)$	t関数　$f(t)$	s関数　$F(s)$
1，$u(t)$	$\frac{1}{s}$	$\sin\,\omega t$	$\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$
a	$\frac{a}{s}$　（aは定数）	$\cos\,\omega t$	$\frac{s}{s^2+\omega^2}$
$\delta(t)$	1	$e^{-at}\sin\,\omega t$	$\frac{\omega}{(s+a)^2+\omega^2}$
t	[illegible]	$e^{-at}\cos\,\omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2+\omega^2}$
t^2	[illegible]	[illegible]	$\frac{\omega}{s^2-\omega^2}$
t^n	[illegible]	[illegible]	$\frac{s}{s^2-\omega^2}$
t^p	$\frac{\Gamma(p+1)}{s^{p+1}}$　$(p>0)$	$t\sin\,\omega t$	$\frac{2\omega s}{(s^2+\omega^2)^2}$
e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$	$t\cos\,\omega t$	$\frac{s^2-\omega^2}{(s^2+\omega^2)^2}$
te^{-at}	$\frac{1}{(s+a)^2}$	$\sin(\,\omega t+\theta)$	$\frac{\omega\cos\theta+s\sin\,\theta}{s^2+\omega^2}$
$t^n e^{-at}$	$\frac{n!}{(s+a)^n}$	$\cos(\omega t+\theta)$	$\frac{s\cos\theta-\omega\sin\,\theta}{s^2+\omega^2}$

変換した式のパターンで
応答の概形が分かる．

計算手順

1. 時間に関する関数についてラプラス変換する
2. 必要な演算を行う
3. ラプラス逆変換により時間に関する関数に戻す

応答の代表例：　一次遅れの応答



$$y(t) = K\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)u(t)$$

ラプラス変換した伝達関数

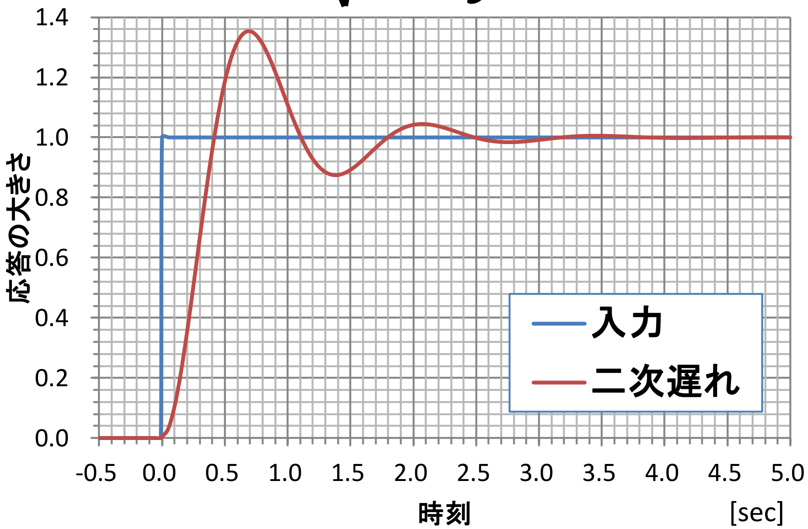
$$G(s) = \frac{K}{Ts+1}$$

ここが1次であり，遅れて応答するから1次遅れ

- 入力が加わった後
  - 初めは素早く応答
  - 時間が経つにつれて徐々になだらかに応答
  - 充分に時間が経つにつれ目標値に漸近

応答の代表例：　二次遅れの応答

$$y(t)=1-\frac{1}{\sqrt{1-\varsigma^2}}e^{-\zeta\omega_n t}\sin\left\{\sqrt{1-\varsigma^2}\,\omega_n t-\tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{1-\varsigma^2}}{\zeta}\right)\right\}u(t)$$



ラプラス変換した伝達関数

$$G(s)=K\frac{\omega_n^2}{s^2+2\varsigma\omega_n s+\omega_n^2}$$

ここが2次であり，遅れて応答するから2次遅れ

- 入力が加わった後
  - 初めは素早く応答
  - 振動的に変化しながら目標値に向かう（ζによる）
  - 充分に時間が経つにつれ目標値に漸近

（DCブラシ付き）モータのコントロール

実物を触ってみてください．軸を回してみてください．

物理量		応用対象	センサ
回転角	θ	ロボットアームの関節角	回転角センサ（ポテンショメータ，ロータリーエンコーダ，レゾルバ）
角速度	$\dot{\theta}$	車両の速度，設備の運転状態	角速度センサ（タコジェネレータ，ロータリーエンコーダ，レゾルバ），電子ガバナ（回転速度を推測）
トルク	τ	柔らかい制御	トルクセンサ
角加速度	$\ddot{\theta}$	飛行機，ヒューマノイドの姿勢制御	外付けのジャイロセンサ
ジャーク	$\dddot{\theta}$	自律ヘリコプタの軌道・姿勢制御 エレベータや鉄道の乗り心地改善	演算によって算出

（参考）ヘリコプタの自律飛行制御

1980～1990年頃の常識：当時の高性能なコンピュータでもヘリコプタの完全な姿勢制御・自律制御は極めて困難

<u>センサ</u>
- 性能向上
- 低コスト化

<u>画像処理での位置決め制御</u>

<u>演算デバイスの性能向上</u>

<u>制御則の研究</u>
- 自律制御
- ジャークまで利用した運動制御

http://www.ted.com/talks/lang/ja/vijay_kumar_robots_that_fly_and_cooperate.html

（参考）
Amazon’s “Prime Air”
Oct-copter（2014）

国内でも2012年に
空撮用オクタコプタ
は作られていた

（参考）
Matternet’s “On-demand Delivery Platform”
Quad-copter（2017）

http://www.04u.jp/video2.html

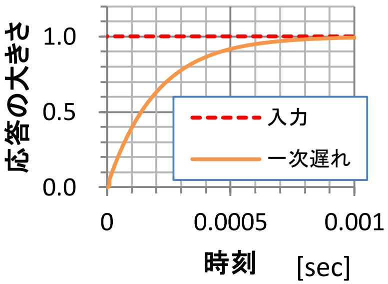
ブラシ付きDCモータの構造

http://toshiba.semicon-storage.com/design_support/elearning/elearning/brushless_motor/chap2/__icsFiles/artimage/2011/04/21/c_el_blm2/P15_01anm.gif

ブラシ付きDCモータの特性を決める要素

電機子の電気特性

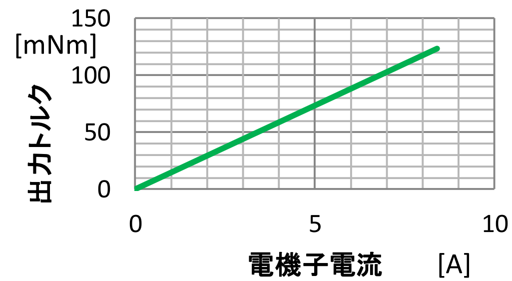
- 電圧Eが掛かったときの電流Iは一次遅れの応答



磁気回路の特性

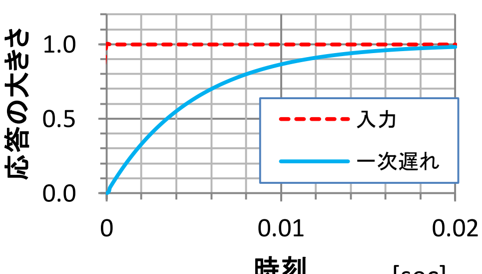
フレミング左手の法則

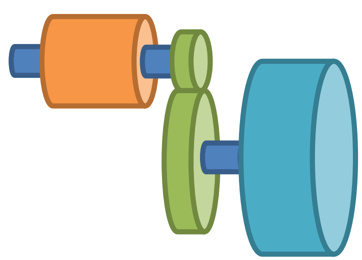
- 電流で即座に応答し，電流の大きさに比例した発生トルク



モータの機械特性

- 発生したトルクTを受けたとき回転数は一次遅れの応答

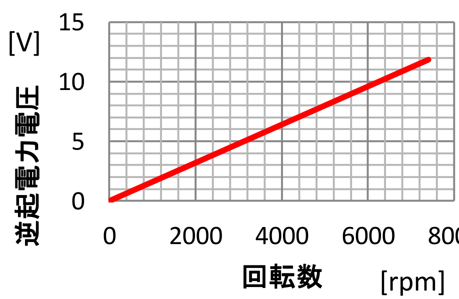




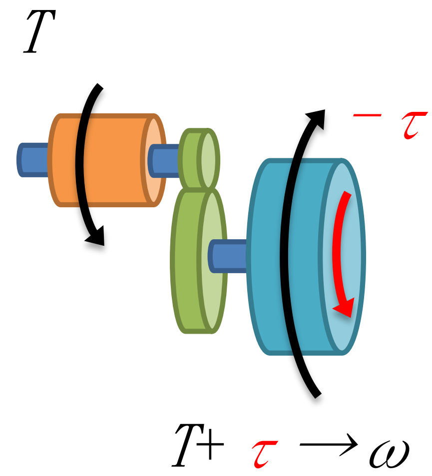
逆起電力

フレミング右手の法則

- 回転数で即座に応答し，回転数に比例した電圧E_G
- 電圧E_Gは電圧Eを妨げて差となる

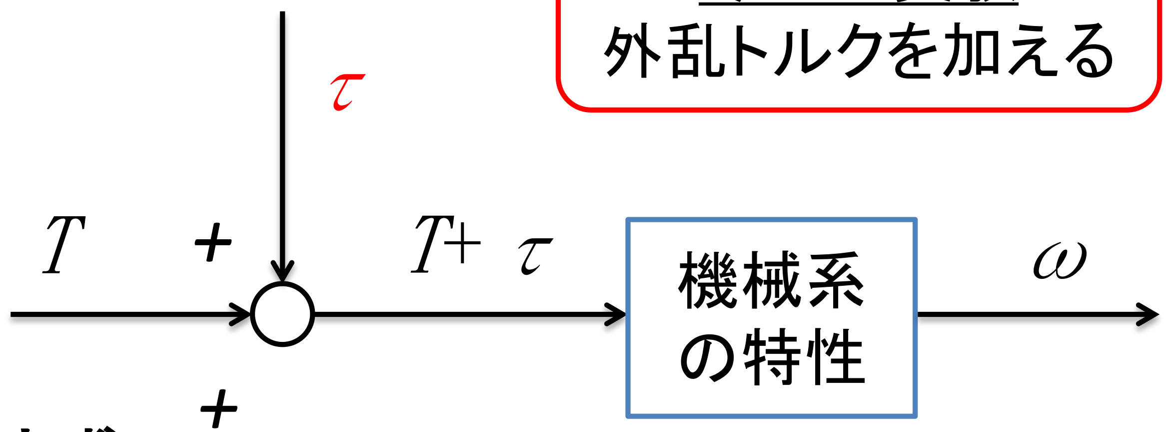


外乱の加わり方



1. 想定外の外部の要因により制御の平衡状態を乱す要素
2. 初期状態から制御系の特性(定数)が変化すること(制御モデル誤差)

<u>今日の実験</u>
外乱トルクを加える



狙い通りの制御ができず，
欲しい機能が実現できない

課題2のための説明

仕様書･データシートから制御モデルを決める

1. 簡素化できる要素を探す
2. データシート･グラフから分からないパラメータを推定する

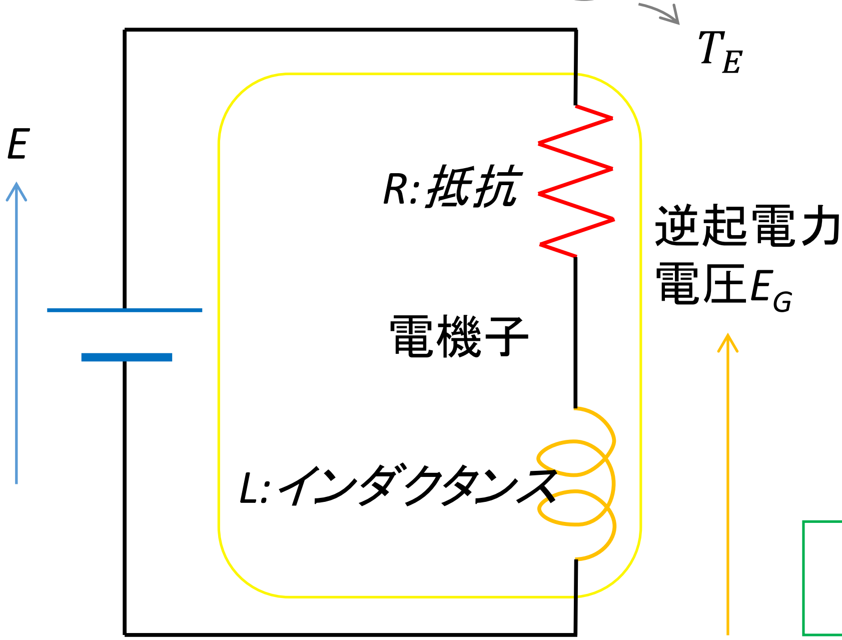
モータの微分方程式とラプラス変換

モータ電気回路の方程式

$$RI(t) + L\frac{d}{dt}I(t) = E - E_G$$

$$\Downarrow \mathcal{L}$$

$$I(s) = \frac{1}{Ls+R}(E - E_G) = \frac{\overbrace{1/R}^{K_E}}{\underbrace{L/R}_{T_E}\,s + 1}(E - E_G)$$



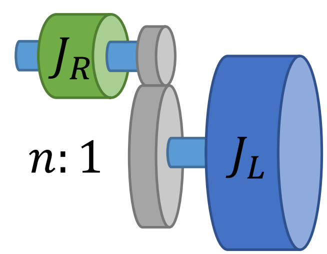
モータ機構の運動方程式

モータの粘性抵抗

$$J\frac{d^2}{dt^2}\theta(t) + b\frac{d}{dt}\theta(t) = T + \tau_{dis}$$

$$\Downarrow \mathcal{L}$$

$$\omega(s) = \frac{1}{Js+b}(T + \tau_{dis}) = \frac{\overbrace{1/b}^{K_M}}{\underbrace{J/b}_{T_M}\,s + 1}(T + \tau_{dis})$$

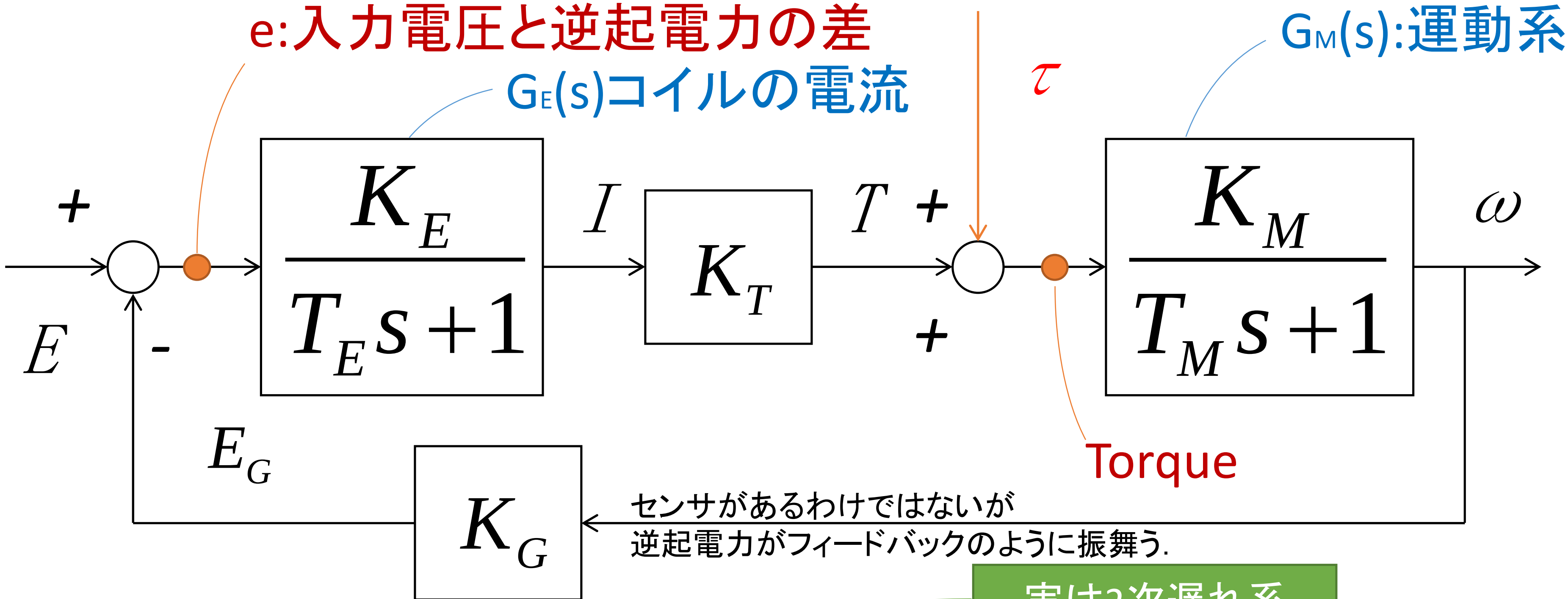


$$J = J_R + \frac{J_L}{n^2}$$

電気系も機械系も1次遅れ

モータの制御モデル

目的:モータの入出力の関係を式で示す.



実は2次遅れ系

$$\omega(s)=\frac{K_E K_T K_M}{T_E T_M s^2+(T_E+T_M)s+1+K_E K_T K_M K_G}E$$

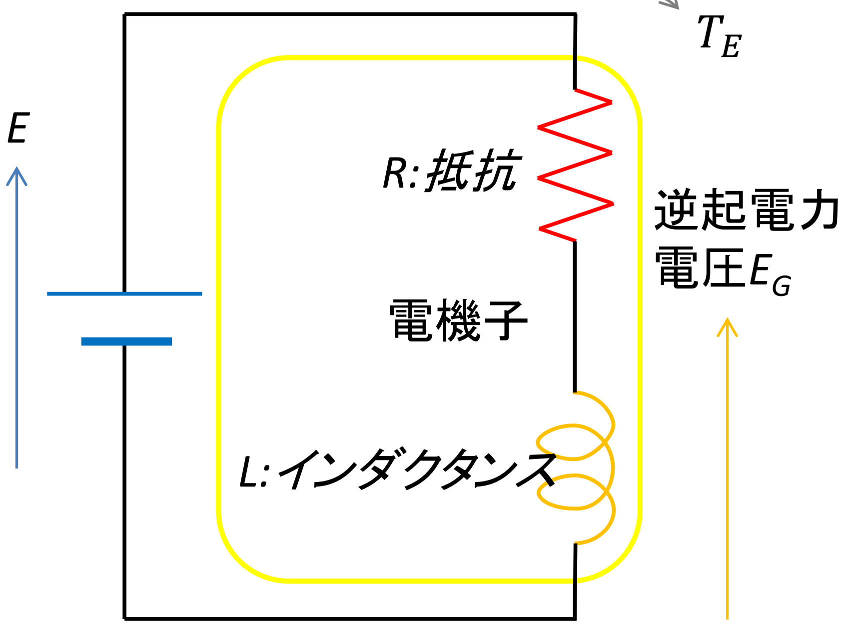
$$+\frac{(T_E s+1)K_M}{T_E T_M s^2+(T_E+T_M)s+1+K_E K_T K_M K_G}\tau$$

モータ固有の特性

モータの微分方程式とラプラス変換

モータ電気回路の方程式

$$I(s) = \frac{1}{Ls+R}(E - E_G) = \frac{\overbrace{{}^{1}/_{R}}^{K_E}}{\underbrace{{}^{L}/_{R}}_{T_E}\,s+1}(E - E_G)$$

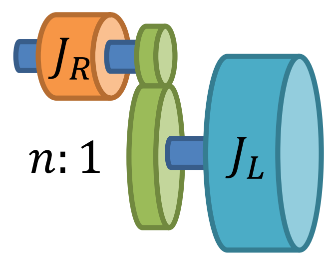


$K_E = {}^{1}/_{R} = ?$

$T_E = {}^{L}/_{R} = ?$

モータ機構の運動方程式

$$\omega(s) = \frac{1}{Js+\underbrace{b}_{\text{モータの粘性抵抗}}}(T + \tau_{dis}) = \frac{\overbrace{{}^{1}/_{b}}^{T_M}}{\underbrace{{}^{J}/_{b}}_{K_M}\,s+1}(T + \tau_{dis})$$



$$J = J_R + \frac{J_L}{n^2}$$

これらの値は？

K_E T_E K_M T_M R L b J

モータのスペック

実験機のモータ		RS-540SH	RS-755VC (3765)	C-326401	RE40
電機子抵抗	Ω	0.1253	1.674	1.4	0.299
電機子インダクタンス	mH	0.1145	1.851	0.12	0.0823
電機子慣性モーメント	g cm^2	※	※	29.1	142
電機子粘性抵抗	−	−	−	−	−

データシートにない値を
LCRテスタで計測した.

課題2に記入

Step1
以下の値を計算してみよう.

$$K_E = {}^{1}/_{R} = ? \qquad T_E = {}^{L}/_{R} = ?$$

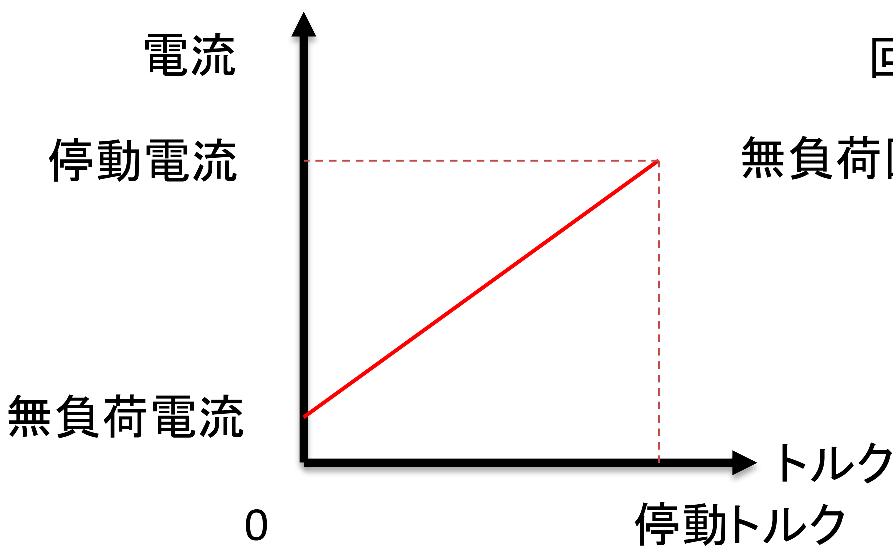
※　分解しないと実測できないが
汎用モータはカシメてあり,
分解不可能のため計測不可

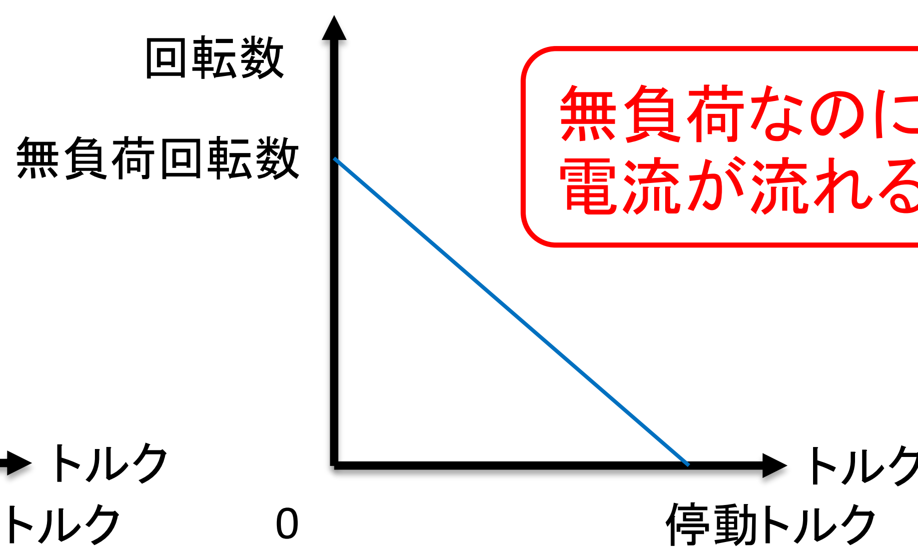
Step2
値の大きさからどのように判断できるか？

Step3
粘性抵抗がスペックとして示されていないが, どのように扱えばよいか？
（粘性抵抗なし, として扱ってよいだろうか？）

モータのスペック

実験機のモータ			RS-540SH		RS-755VC (3765)		C-326401		RE40	
メーカ			タミヤ（マブチ）		マブチ		シチズン		マクソン	
停動（起動）	mNm	A	196	70.0	387.6	13.74	118	8.40	2560	42.4
無負荷	rpm	A	23400	2.40	7408	0.439	7400	0.140	7590	0.0686
最大効率時（定格）	W	1	63.2	0.72	137	0.66	14.6	0.72	150	0.91
	rpm	A	19740	13.0	6050	10.4	5850	1.85	7000	3.17
	mNm		30.6		130		24.5		187	
駆動電圧	V		7.2		24		12		48	

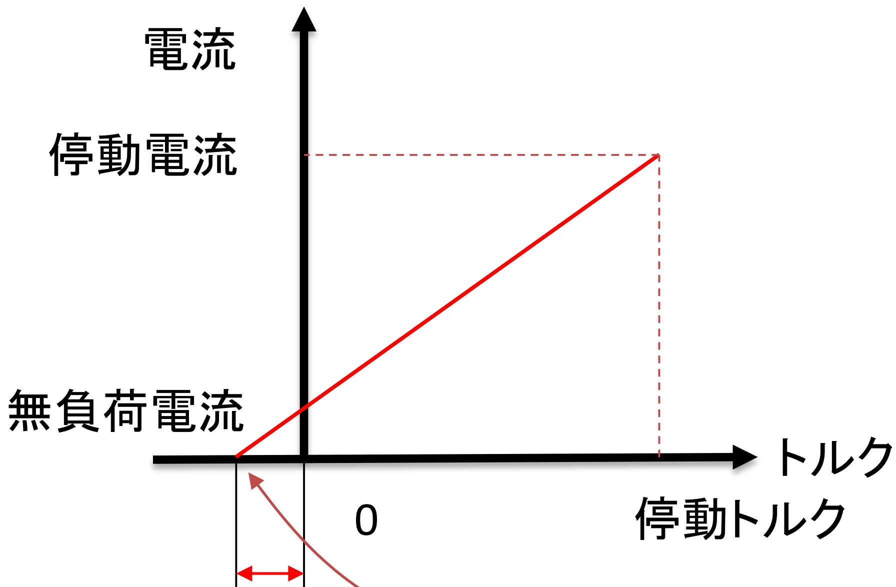


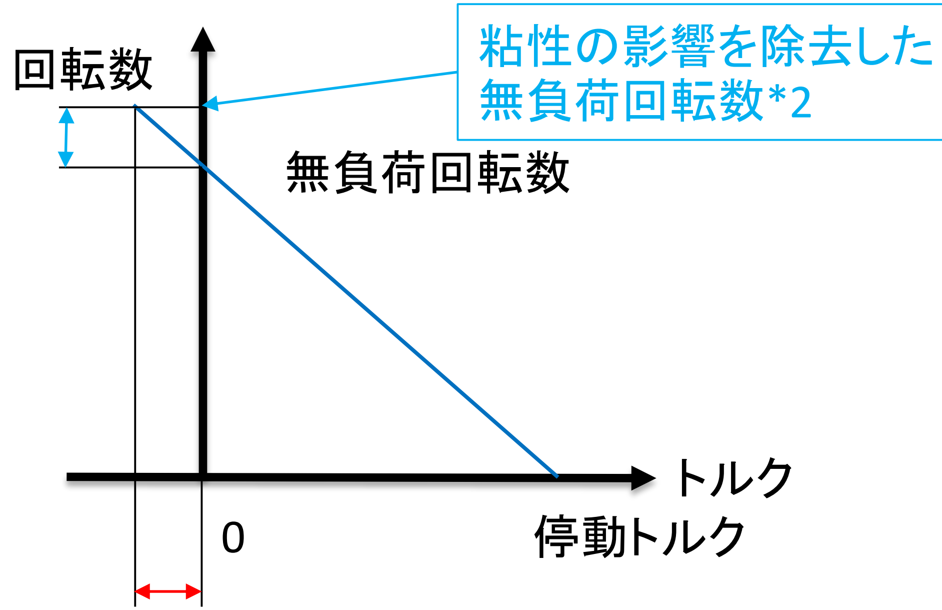


無負荷なのに何故電流が流れるか？

Step4

粘性抵抗を推定できるか考える.





粘性の影響
によるトルク*1

$$I = k_I T + I_{無負荷}$$

$$\left(k_I = \frac{I_{停動} - I_{無負荷}}{T_{停動} - T_{無負荷}}\right)$$

0

$$n = k_n T + n_{無負荷}$$

0

$$\left(k_n = \frac{n_{停動} - n_{無負荷}}{T_{停動} - T_{無負荷}}\right)$$

0

0を代入

$$T = \frac{I - I_{無負荷}}{k_I}$$

0

$$b_n = -\frac{T_{無負荷} - T_{*1}}{n_{無負荷} - n_{*2}}$$

実験機のモータ			RS-540SH		RS-755VC (3765)		C-326401		RE40	
メーカ			タミヤ（マブチ）		マブチ		シチズン		マクソン	
停動（起動）	mNm	A	196	70.0	387.6	13.74	118	8.40	2560	42.4
無負荷	rpm	A	23400	2.40	7408	0.439	7400	0.140	7590	0.0686
最大効率時（定格）	W	1	63.2	0.72	137	0.66	14.6	0.72	150	0.91
	rpm	A	19740	13.0	6050	10.4	5850	1.85	7000	3.17
	mNm		30.6		130		24.5		187	
駆動電圧	V		7.2		24		12		48	

課題2に記入

Step5
粘性抵抗の推定のための計算を行う.

$$I = k_I T + I_{無負荷}$$

粘性の影響によるトルク*1

$$\left(k_I = \frac{I_{停動} - I_{無負荷}}{T_{停動} - T_{無負荷}} \right)$$

$$T = \frac{I - I_{無負荷}}{k_I}$$

0を代入

$$n = k_n T + n_{無負荷}$$

粘性の影響を除去した無負荷回転数*2

$$\left(k_n = \frac{n_{停動} - n_{無負荷}}{T_{停動} - T_{無負荷}} \right)$$

0

0

$$b = -\frac{T_{無負荷} - T_{*1}}{n_{無負荷} - n_{*2}}$$

0

単位に注意 $\left[{}^{Nm}\!/\!{}_{rad/s} \right]$

実験機のモータ			RS-540SH		RS-755VC (3765)		C-326401		RE40	
メーカ			タミヤ(マブチ)		マブチ		シチズン		マクソン	
停動(起動)	mNm	A	196	70.0	387.6	13.74	118	8.40	2560	42.4
無負荷	rpm	A	23400	2.40	7408	0.439	7400	0.140	7590	0.0686
最大効率時(定格)	W	1	63.2	0.72	137	0.66	14.6	0.72	150	0.91
	rpm	A	19740	13.0	6050	10.4	5850	1.85	7000	3.17
	mNm		30.6		130		24.5		187	
駆動電圧	V		7.2		24		12		48	

課題2に記入

Step5
粘性抵抗の推定のための計算を行う.

$$b = -\frac{\overset{\nearrow 0}{T_{無負荷}} - T_{*1}}{n_{無負荷} - n_{*2}}$$

粘性の影響によるトルク*1

粘性の影響を除去した無負荷回転数*2

単位に注意 $\left[{}^{Nm}/{}_{{}^{rad}/{}_{s}}\right]$

$$T_{*1} = \frac{\overset{\nearrow 0を代入}{I} - I_{無負荷}}{\dfrac{I_{停動} - I_{無負荷}}{T_{停動} - \underset{\searrow 0}{T_{無負荷}}}}$$

$$n_{*2} = \frac{\overset{\nearrow 0}{n_{停動}} - n_{無負荷}}{T_{停動} - \underset{\searrow 0}{T_{無負荷}}} T_{*1} + n_{無負荷}$$

計算例

実験機のモータ		RS-540SH	RS-755VC(3765)	C-326401	RE40
ki	A/Nm	344	34.3	70.2	16.5
T*1	Nm	-0.00696	-0.0128	-0.00199	-0.00415
kn	rpm/Nm	-120	-19100	-62900	-2960
n*2	rpm/Nm	24200	7650	7530	7600
bn	Nm/rpm	8.38E-06	5.23E-05	1.59E-05	0.000337
b	Nm/rad/s	8.00E-05	0.000500	0.000152	0.00322
T*1/停動トルク		-0.0355	-0.0330	-0.0170	-0.00162

粘性抵抗によるトルクは停動（最大）トルクの0.15～3.5%程度，
許容誤差として扱っても良さそうだろうか？

制御を掛けるから誤差は吸収されるのではないか？と判断

粘性係数bは僅少として扱うか？

実験機のモータ		RS-540SH	RS-755VC (3765)	C-326401	RE40
電機子抵抗	Ω	0.1253	1.674	1.4	0.299
電機子インダクタンス	mH	0.1145	1.851	0.12	0.0823
電機子慣性モーメント	gcm^2	※	※	29.1	142
電機子粘性抵抗	–	–	–	–	–

課題2に記入

Step6
以下の値を計算してみよう

$K_m = {}^{1}/_{b} = ?$　　$T_m = {}^{J}/_{b} = ?$　　単位に注意[kgm^2]

Step7
値の大きさを見てどのように判断できるか？

課題2に記入

Step8
省略できそうなパラメータ値はあるか？

これらの値は？

K_E　T_E　K_M　T_M　R　L　b　J

⇨ T_E　T_M　(L　b)　のどちらかまたは両方をゼロとして扱ってよい？

T_E　T_M　を比べてみよう.

計算例

実験機のモータ		RS-540SH	RS-755VC (3765)	C-326401	RE40
抵抗	Ω	0.1253	1.674	1.4	0.299
インダクタンス	mH	0.0001145	0.001851	0.00012	0.0000823
慣性モーメント	kgm^2	-	-	0.00000291	0.0000142
粘性抵抗	Nm/rad/s	7.99856E-05	0.000499637	0.000151756	0.003220843
Ke	A/V	7.98084597	0.597371565	0.714285714	3.344481605
Te	sec	0.000913807	0.001105735	8.57143E-05	0.000275251
Km	rad/s/Nm	12502.25648	2001.454969	6589.5084	310.4777115
Tm	sec	-	-	0.019175469	0.004408784

TmはJが大きくなる（負荷慣性モーメントが大きくなる）と大きくなる
実験装置のTmは少なくともこの20倍以上

⇩

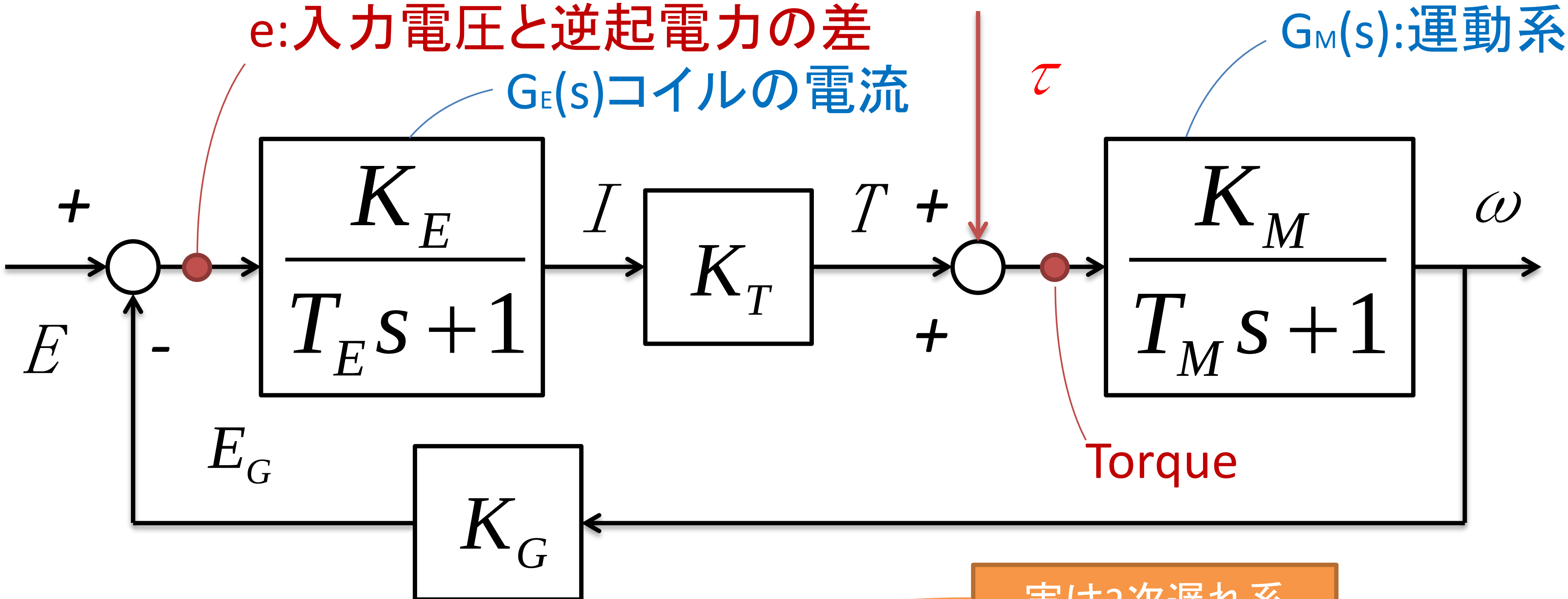
TeはTmの1/200以下なのでごく小さい

⇩

インダクタンスLは僅少として扱うか？

モータの制御モデル

目的:モータの入出力の関係を式で示す.



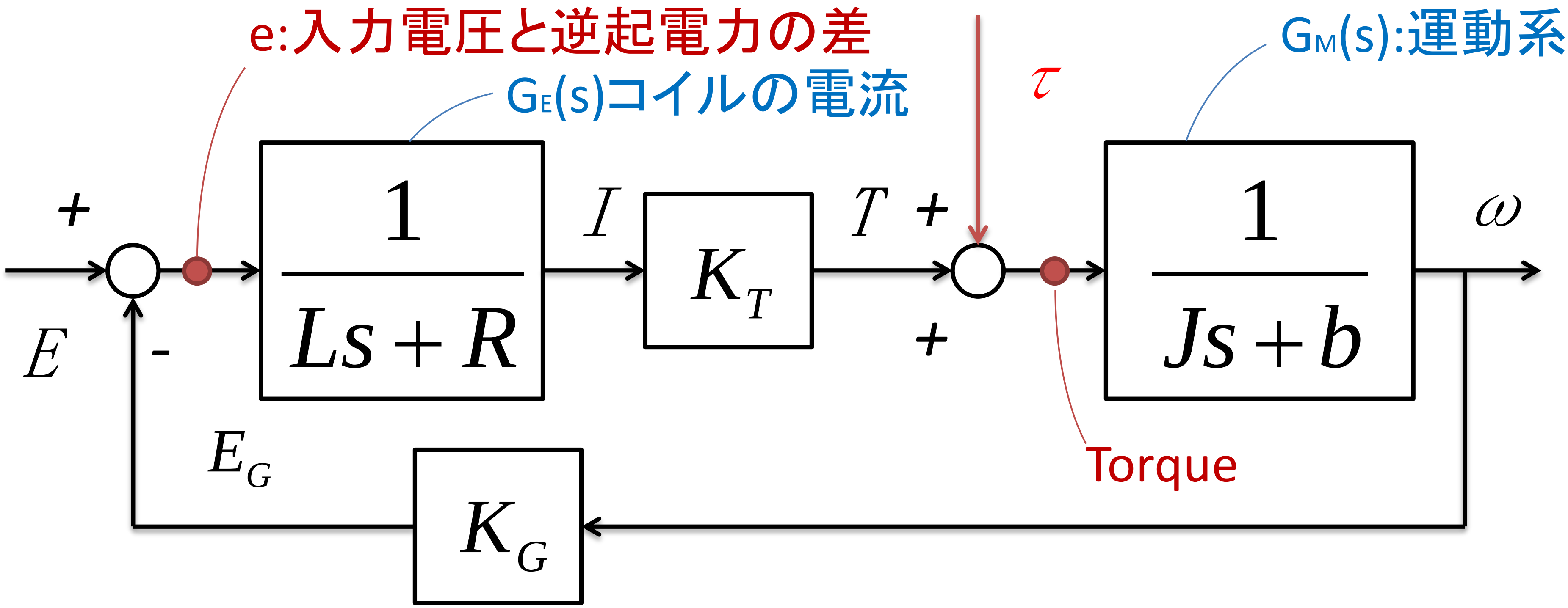
実は2次遅れ系

$$\omega(s)=\frac{K_E K_T K_M}{T_E T_M s^2+(T_E+T_M)s+1+K_E K_T K_M K_G}E$$

モータ固有の特性

$$+\frac{(T_E s+1)K_M}{T_E T_M s^2+(T_E+T_M)s+1+K_E K_T K_M K_G}\tau$$

モータの制御モデル 目的:モータの入出力の関係を式で示す.



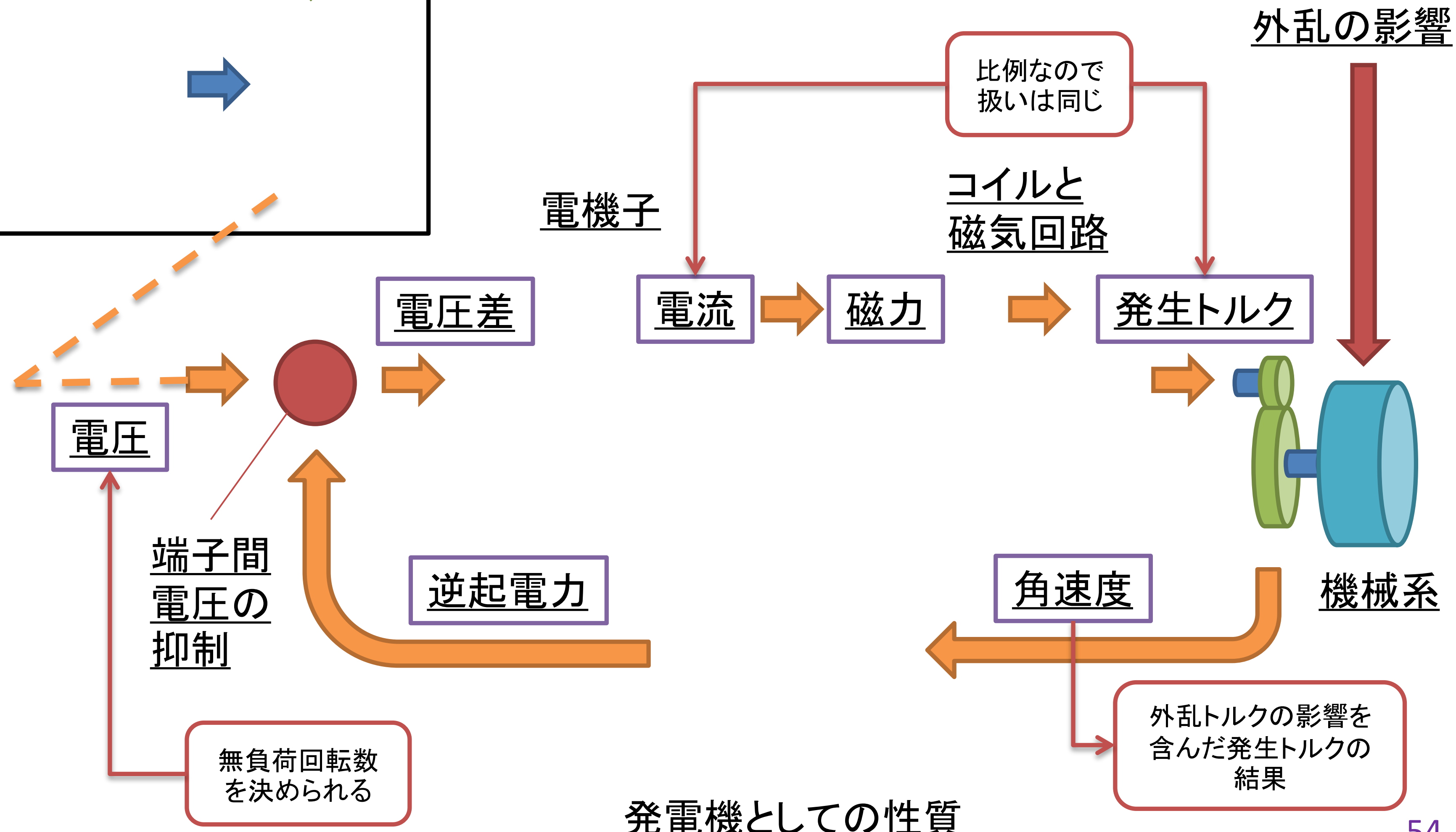
$$\omega(s)=\frac{\frac{1}{R}K_T\frac{1}{b}}{\frac{LJ}{K_TK_G}s^2+\frac{Lb+RJ}{K_TK_G}s+1+\frac{1}{R}K_T\frac{1}{b}K_G}E+\frac{\left(\frac{L}{R}s+1\right)\frac{1}{b}}{\frac{LJ}{K_TK_G}s^2+\frac{Lb+RJ}{K_TK_G}s+1+\frac{1}{R}K_T\frac{1}{b}K_G}\tau$$

$\boxed{\text{僅少の値を掛けたり割ったりしている}}$

これはこれで誤差のもと?

モータ特性を決める要素間の関係

実機
- コントローラ
- ドライバ
- 電源



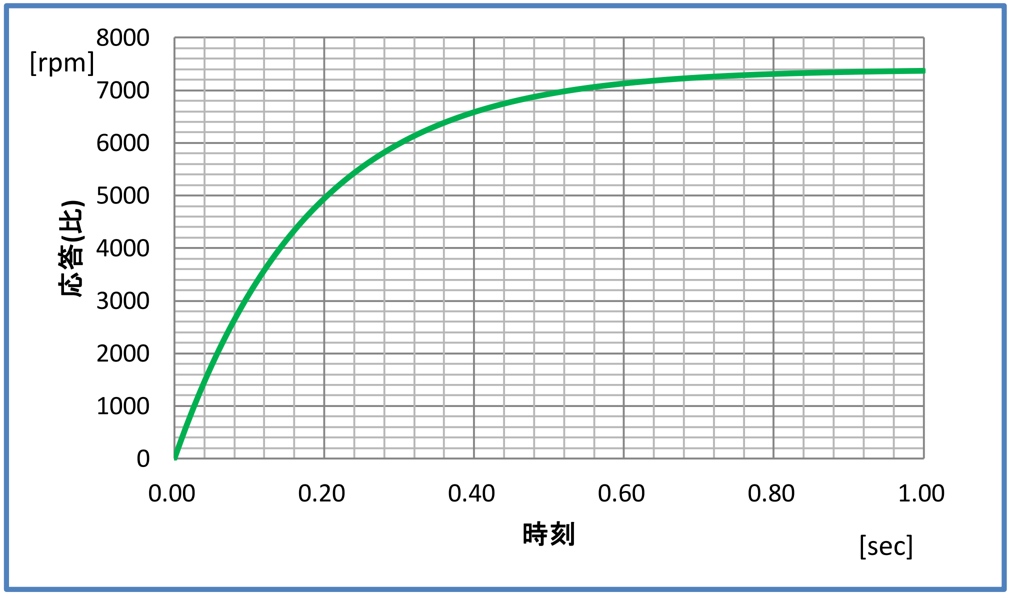
モータの実例を考える

モータの仕様(スペックシート)
から算出したパラメータ

K_E	0.714	A/V
K_I	0.0147	Nm/A
K_M	6380	rad/s/Nm
K_G	0.0153	V/(rad/s)
T_E	0.0000857	sec
T_M	0.0186	sec

2次遅れ(振動系と同じ)
としてのパラメータ

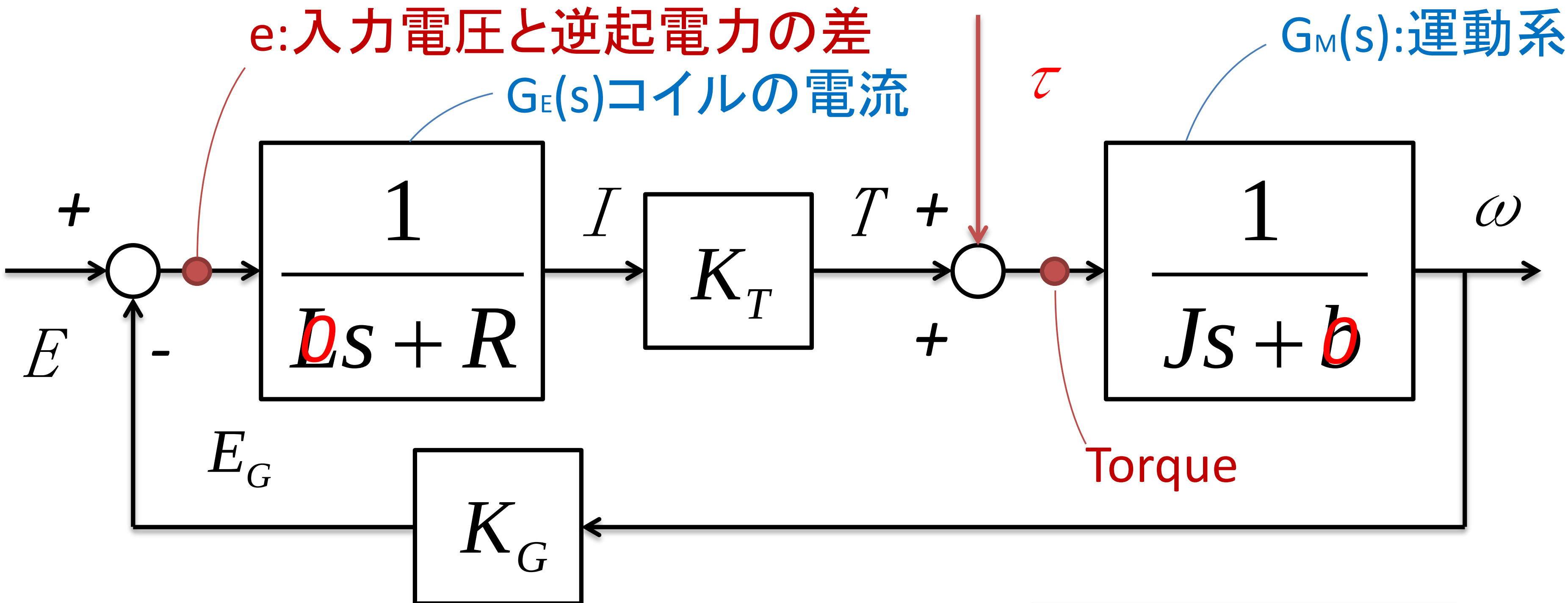
ω_n	1130	rad/s
ζ	5.19	1



モータの応答シミュレーション

これはどう見ても
1次遅れの応答に
そっくりではないか？

モータの制御モデル 目的：モータの入出力の関係を式で示す．



K

$$\omega(s)=\frac{\frac{1}{K_G}}{\frac{RJ}{K_T K_G}s+1}E+\frac{\frac{R}{K_T K_G}}{\frac{RJ}{K_T K_G}s+1}\tau$$

T

1次遅れのモデル
にまとめられる

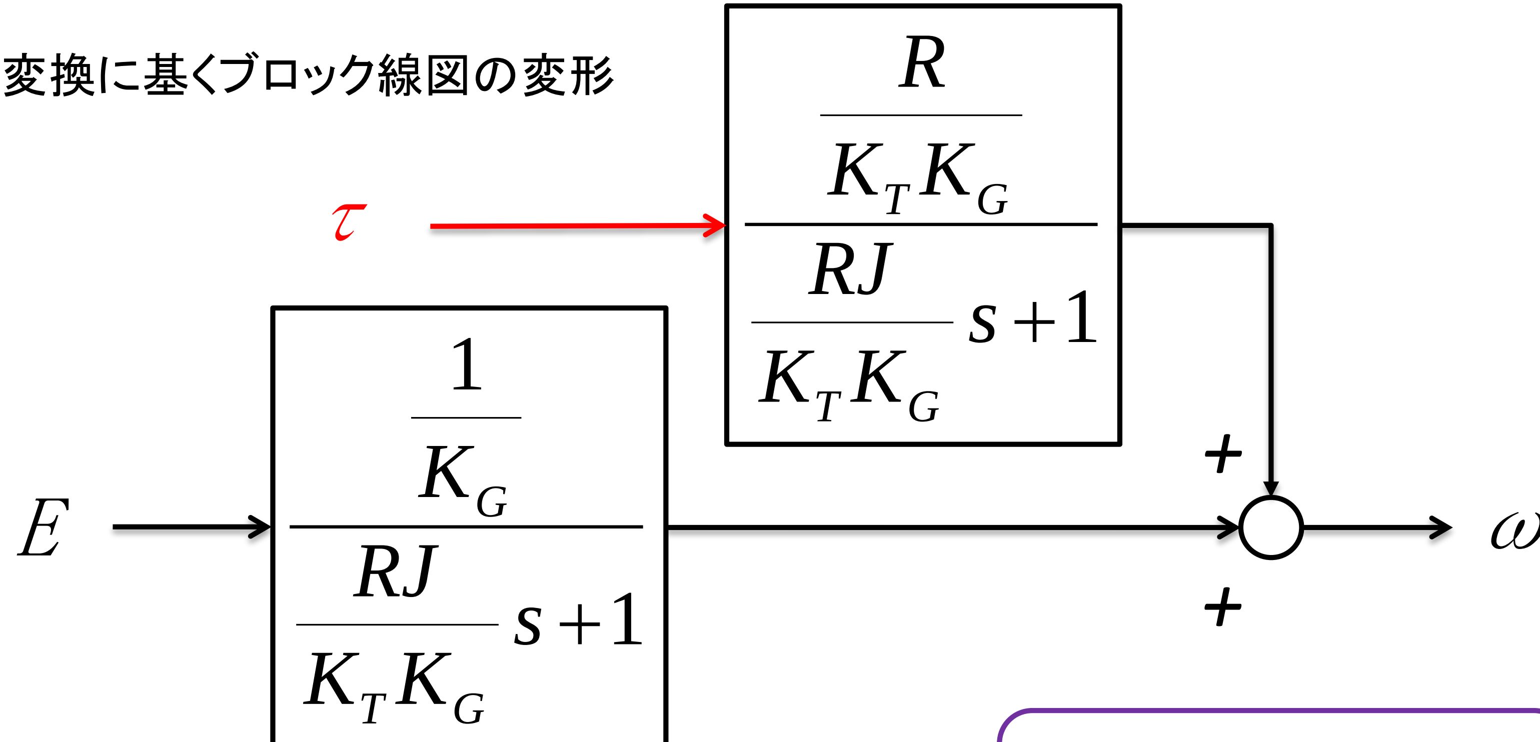
Eとτに対する応答
の感度が異なる

課題2 Step8終わり

モータの制御モデル

目的：モータの入出力の関係を式で示す．

ラプラス変換に基くブロック線図の変形

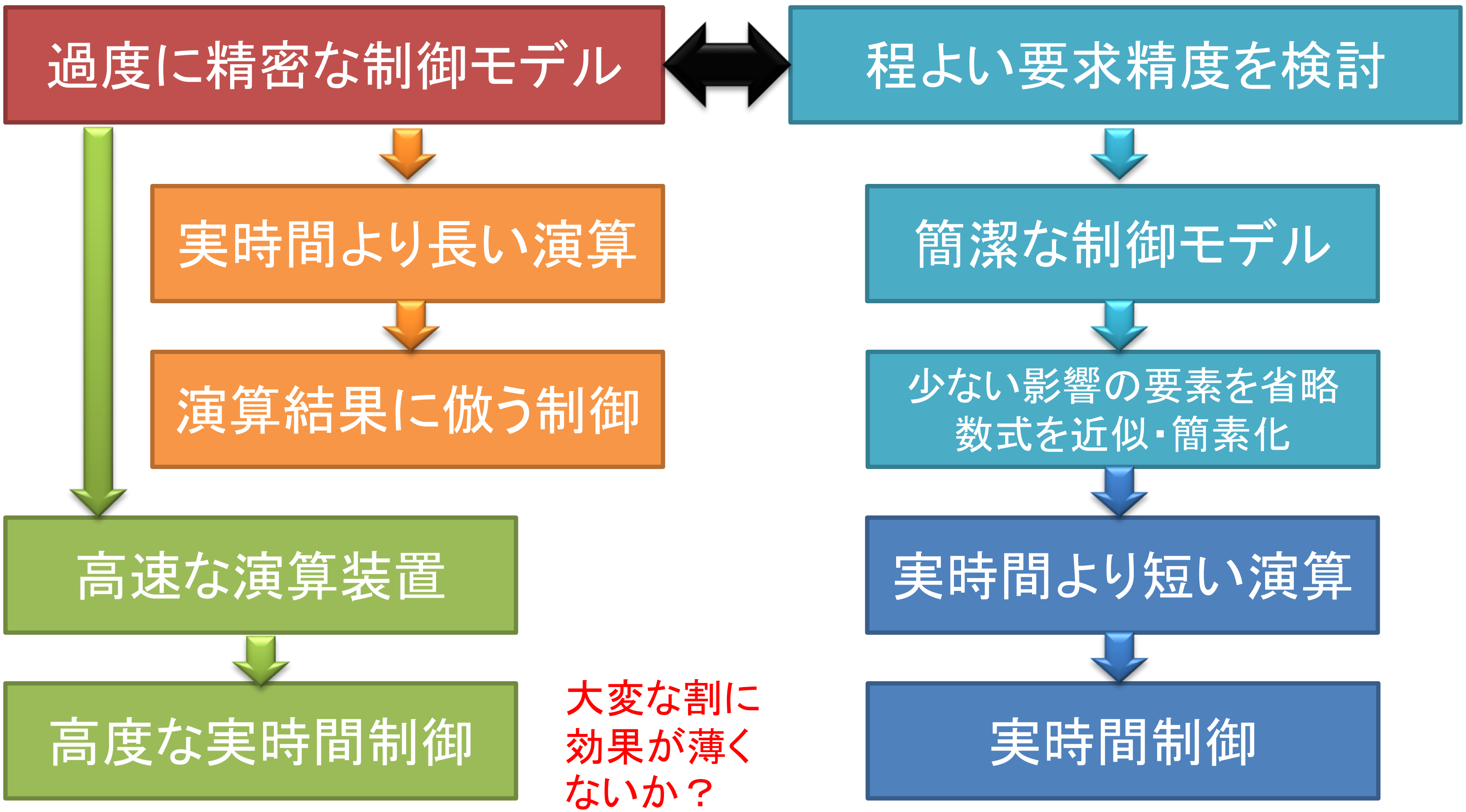


$$\omega(s) = \frac{\dfrac{1}{K_G}}{\dfrac{RJ}{K_T K_G}s+1}E + \frac{\dfrac{R}{K_T K_G}}{\dfrac{RJ}{K_T K_G}s+1}\tau$$

1次遅れのモデル
にまとめられる

Eとτに対する応答
の感度が異なる

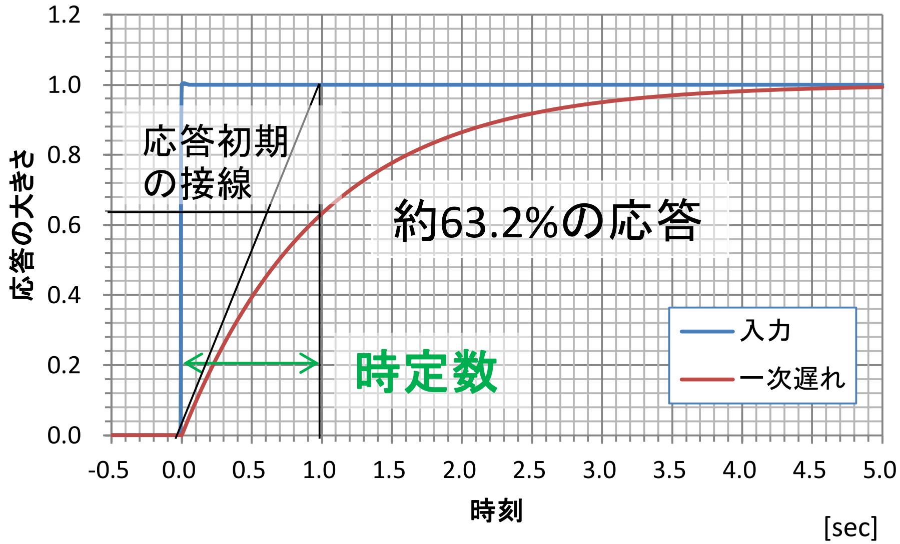
モータのモデリング精度



制御の利用目的を考えよう

演算精度と演算速度のバランスを考えよう

一次遅れの系のパラメータ

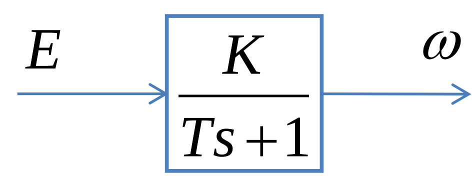


$$y(t) = K\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)u(t)$$

ラプラス変換した伝達関数

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1}$$

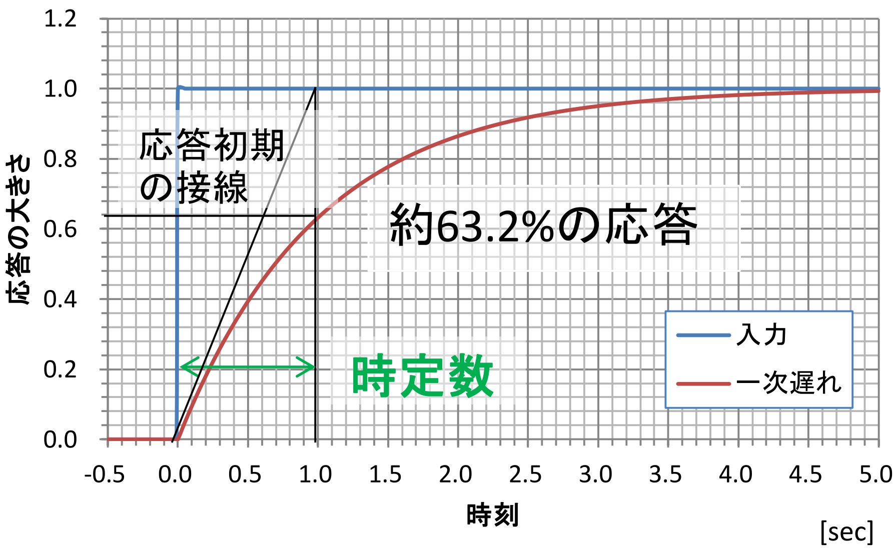
- T: 時定数（1-（1/e）≒63.2%になるまでの時間）
- K: ゲイン係数
- 4～5T: 整定時間



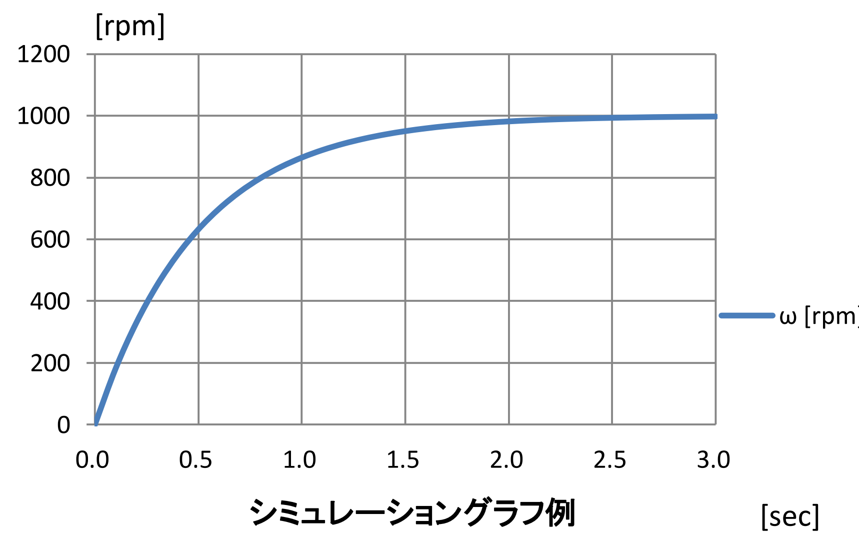
ここで実験1　モータの「素」の特性を知る

課題3～4

モータのそのもの特性を測定→パラメータを同定→制御モデルを決定



$$y(t) = K(1 - e^{-\frac{t}{T}})u(t)$$



T：時定数（1-（1/e）≒63.2%になるまでの時間）

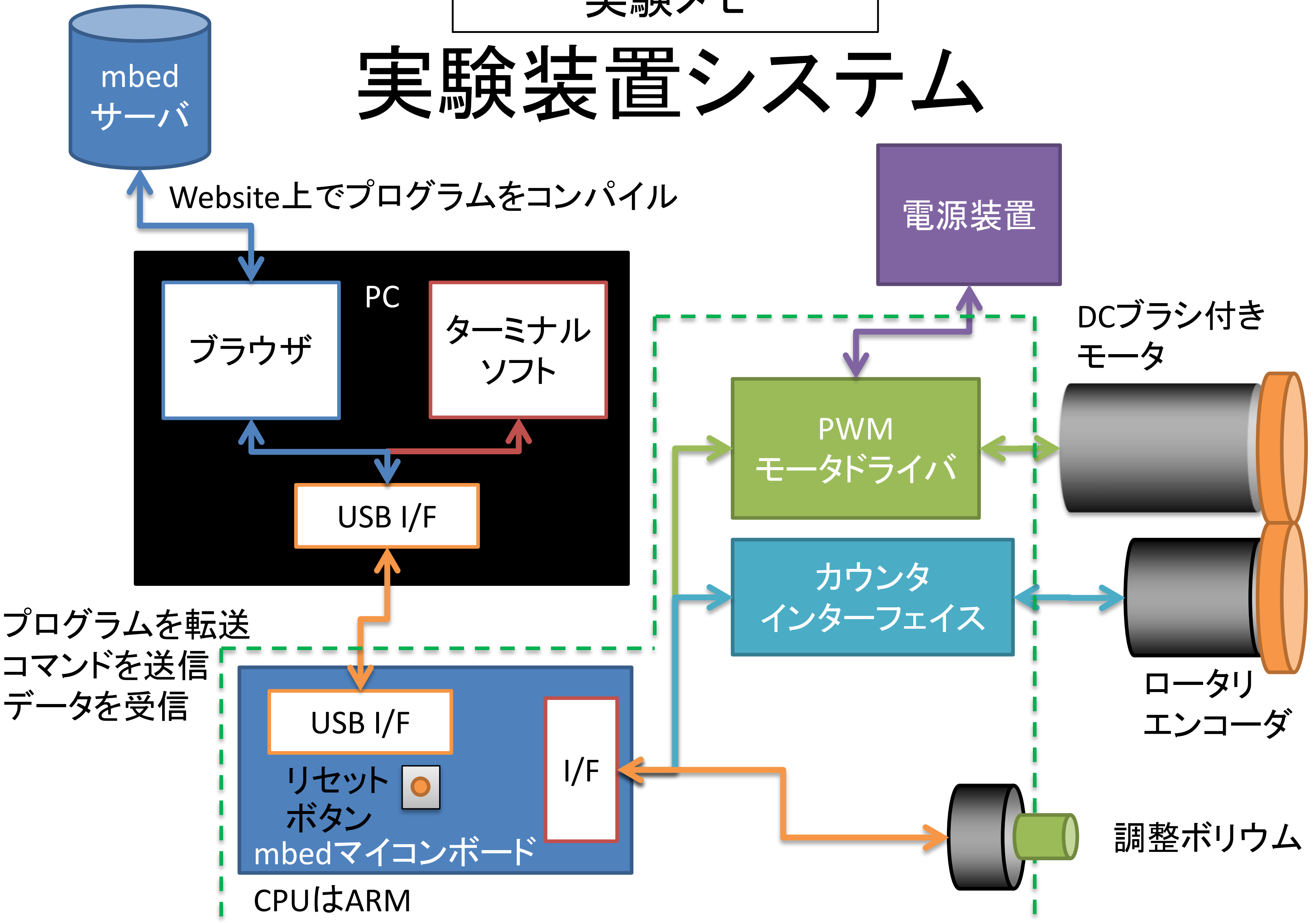
K：ゲイン係数=1に実験プログラム内で調整

4～5T：整定時間

実際の応答と求めたパラメータを上記の式に代入したグラフを比較してみよう

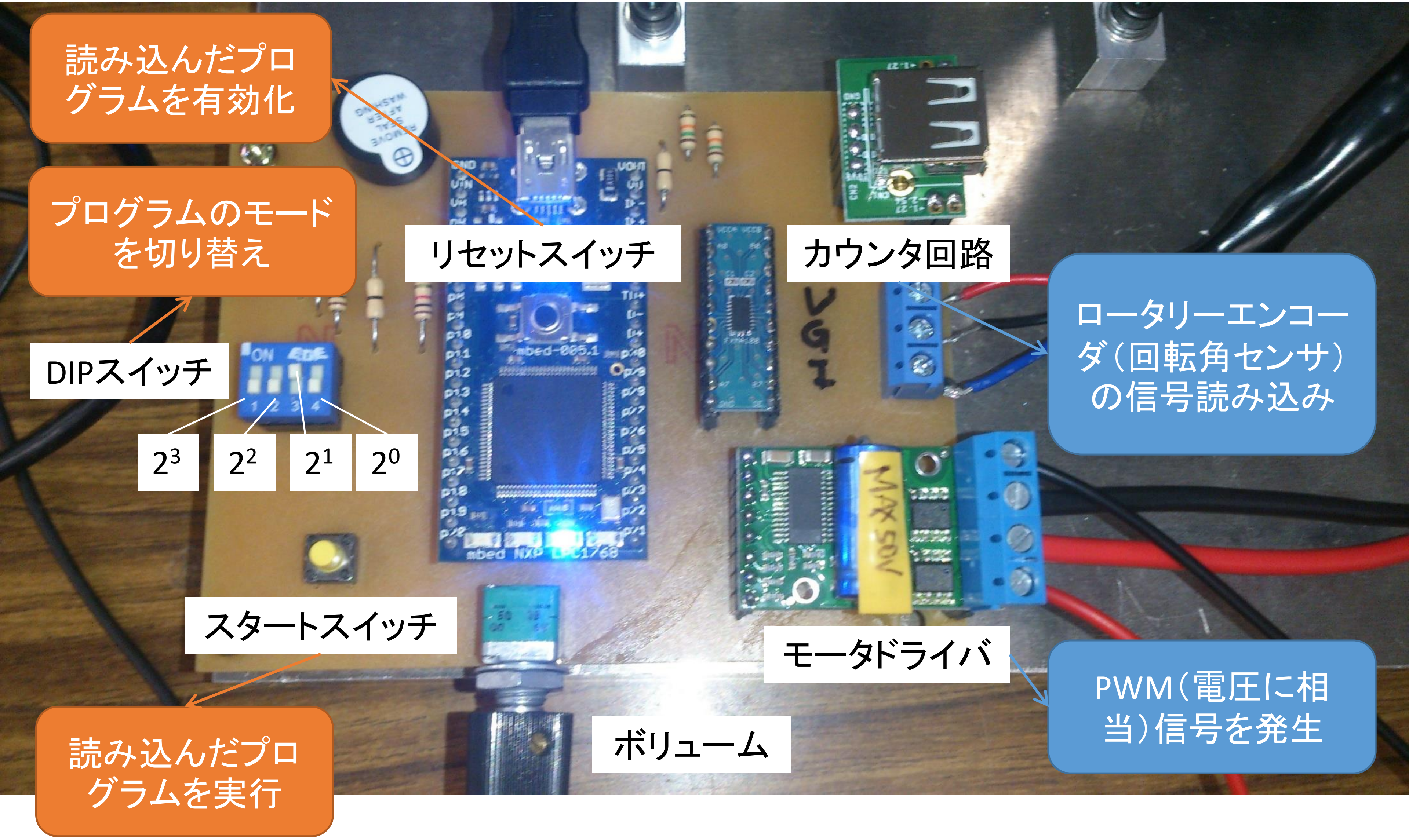
実験メモ

実験装置システム



実験メモ

実験装置の回路周辺と働き



注意事項

- 実験データが非常に多い

→毎回タイトルをつけ，USBメモリに保存すること

（後で他のモータとの比較，考察があります）

・外乱は最高回転数に達してから（≒3s）ボタンを2s以上，2回程度行って下さい

・各モータによって与える電圧が異なりますので，確認してから実験を始めて下さい

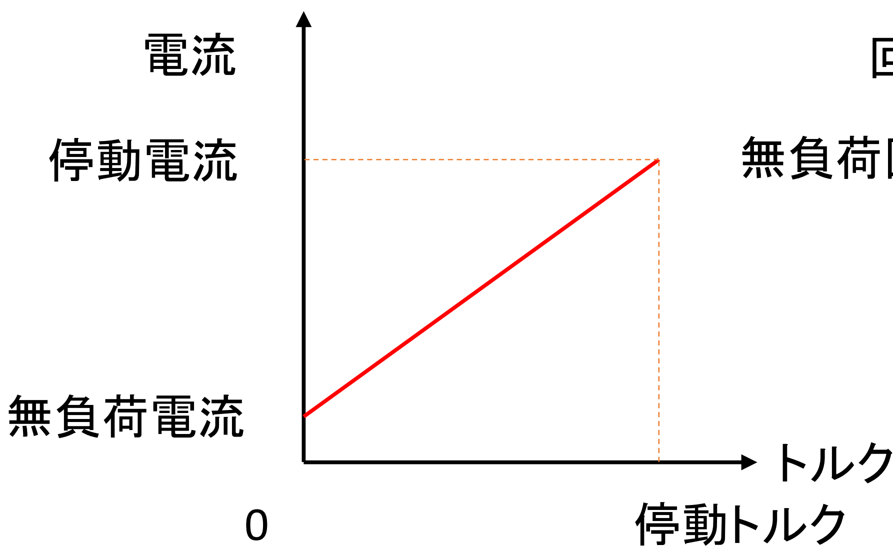
・DIPスイッチは実験１では2，実験2では3を使用

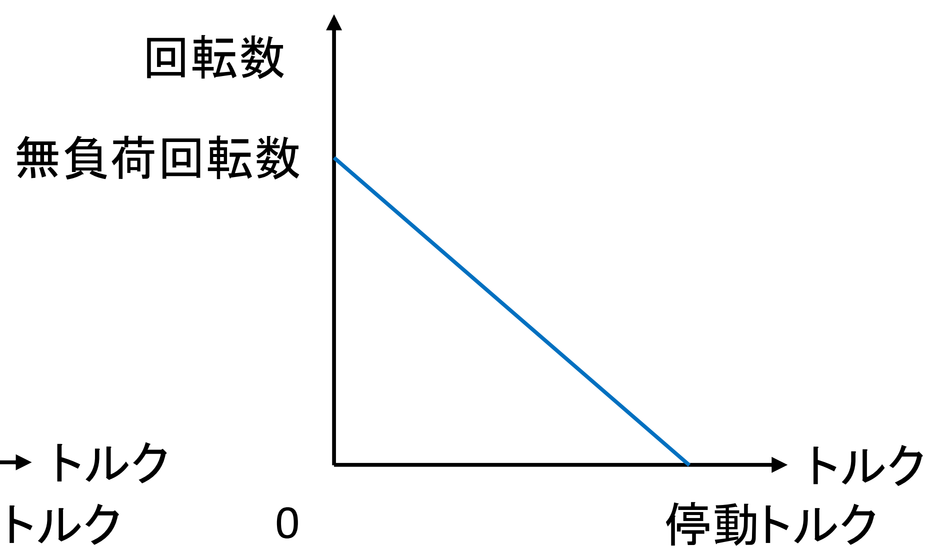
機械工学実験1
制御対象の特性解析と制御系設計

実験レポートに貼付する
実験データに関する
アドバイス

モータのスペック

実験機のモータ			RS-540SH		RS-755VC (3765)		C-326401		RE40	
メーカ			タミヤ（マブチ）		マブチ		シチズン		マクソン	
停動（起動）	mNm	A	196	70.0	388	13.7	118	8.40	2560	42.4
無負荷	rpm	A	23400	2.40	7408	0.439	7400	0.140	7590	0.0686
最大効率時（定格）	W	1	63.2	0.72	137	0.66	14.6	0.72	150	0.91
	rpm	A	19740	13.0	6050	10.4	5850	1.85	7000	3.17
	mNm		30.6		130		24.5		187	
駆動電圧	V		7.2		24		12		48	
重量	g		160		336		260		480	
価格	円		1,000		3,000		20,000		40,000	



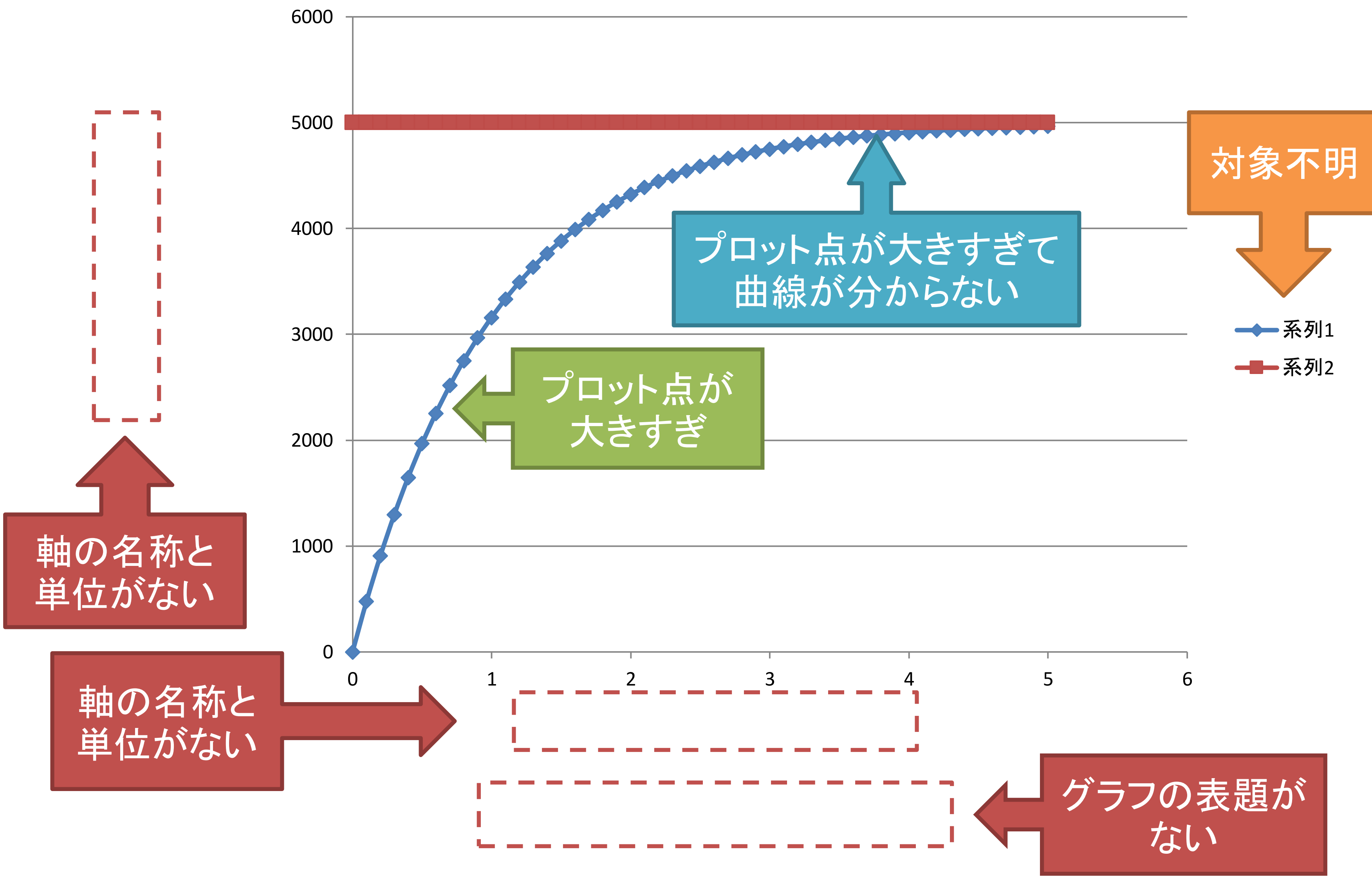


手動計測　と　自動計測

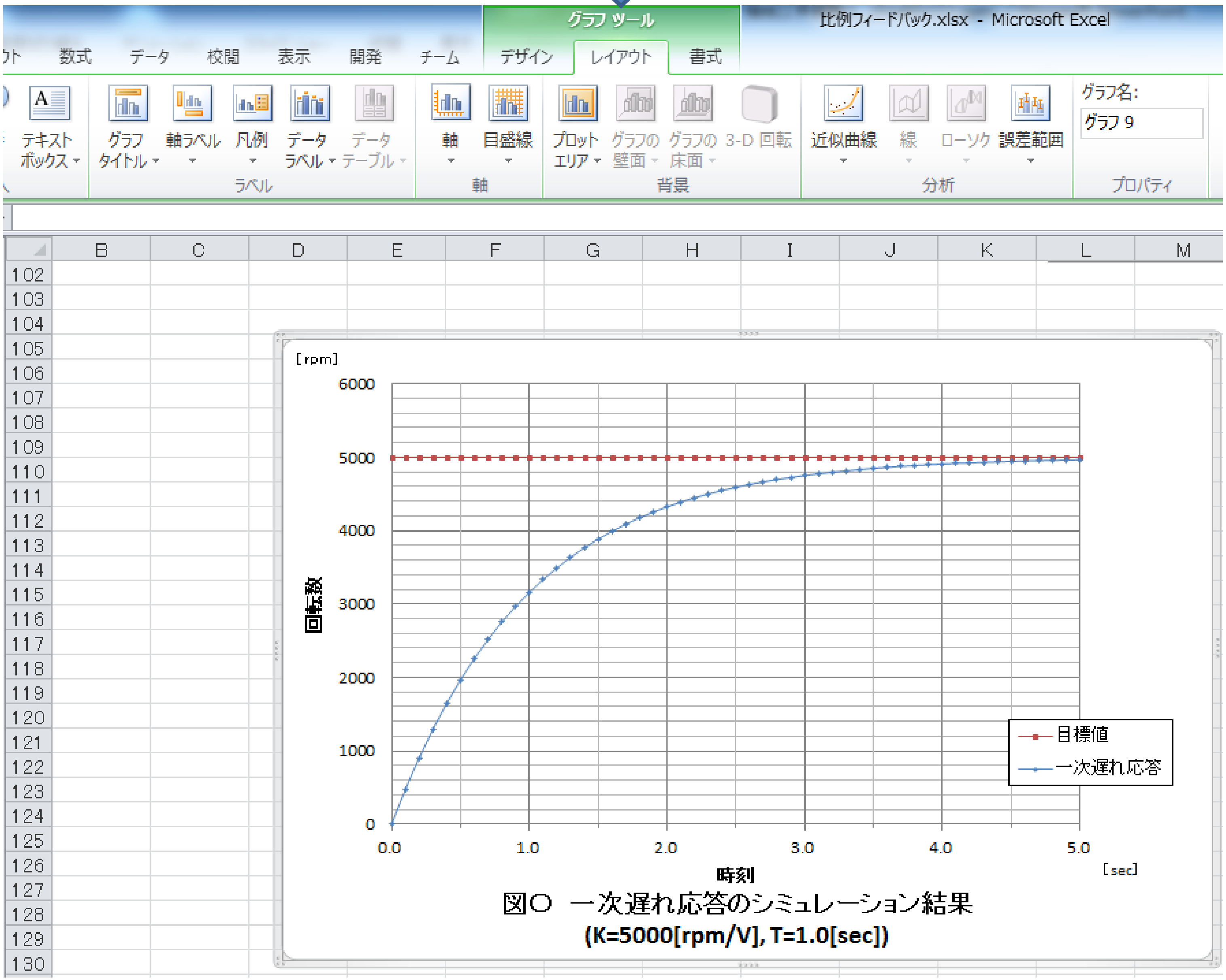
手動計測	自動計測
速い現象では計測不可能	速い現象でも計測可能
現象を計測しながら計測条件の調整可能	予め計測方法・条件を決めておく必要
原理が分かりやすく試行的な素早い計測に適す	計測方法・条件の妥当性を確認すべき
繰り返し再現性の維持のために丁寧な操作が必要	繰り返しの再現性に優れる

良い悪いではなく，性質が異なることを理解して計測

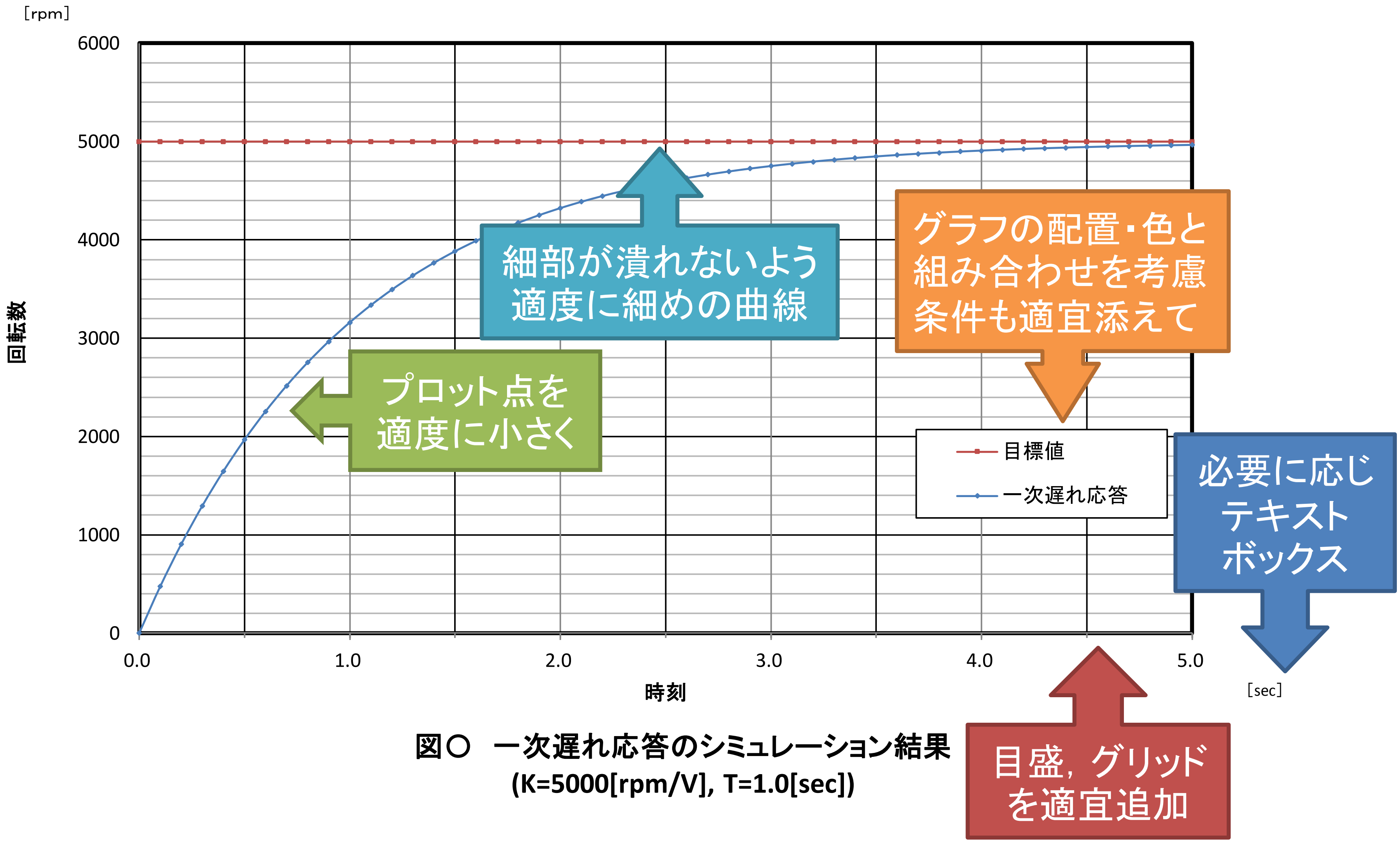
エクセルのグラフ設定そのままだと



Excelのグラフ機能のタブを見てみよう



見やすいグラフの例



図〇　一次遅れ応答のシミュレーション結果
(K=5000[rpm/V], T=1.0[sec])

1．制御とは何か

2．制御対象を知る

3．制御系を作る

4．制御系の設計・改善

課題4，実験2，課題6に関係．

モータを電圧だけで制御できる？

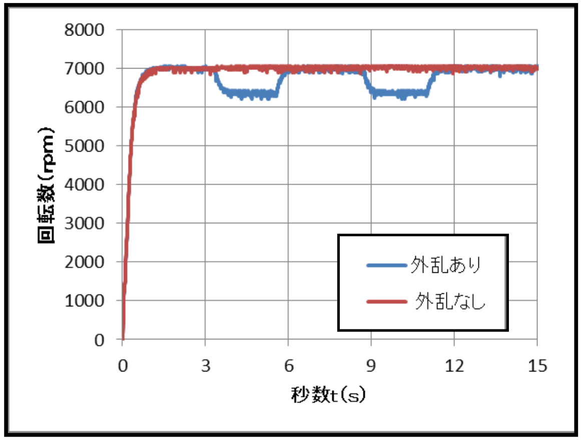
1. 1次遅れの応答であることは分かっている
   – 応答は $y(t) = K(1 - e^{-\frac{t}{T}})u(t)$ で間違いない
2. 電圧と回転数の関係は分かった

これで制御は完璧ではないか？

外乱の影響を受けても対処できない．

何故か？

数式から外乱の影響を受けることが目に見えている．



$$\omega(s) = \frac{\frac{1}{K_G}}{\frac{RJ}{K_T K_G}s + 1}E + \boxed{\frac{\frac{R}{K_T K_G}}{\frac{RJ}{K_T K_G}s + 1}\tau}$$

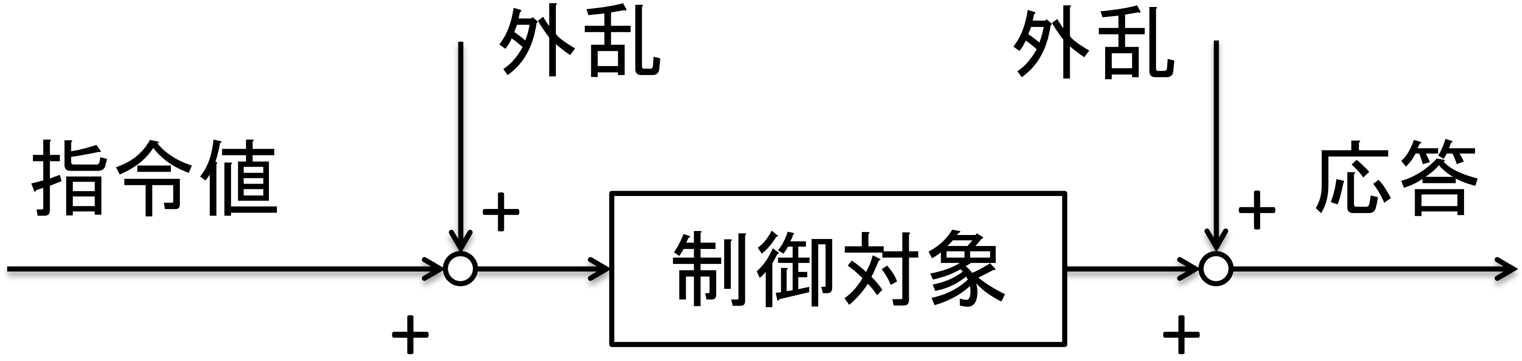
オープンループ制御系

利用できる条件

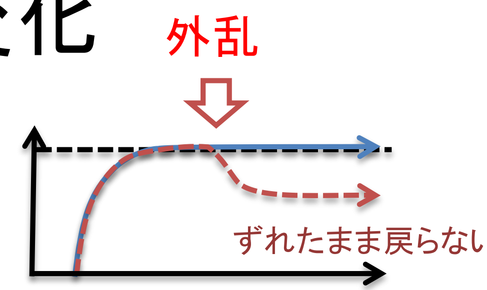
1. 入力（指令値）に対する出力（応答）の関係が一意に決まる
2. 制御対象の特性が変わらない
3. 外乱の影響がないと判断可能な場合

応答に一意性・再現性がある

オープンループ制御系で起こる問題



- 外乱が加わってしまうと応答が変化
- 影響を取り除く手段がない



外乱の影響がない

外乱の影響があっても問題ない

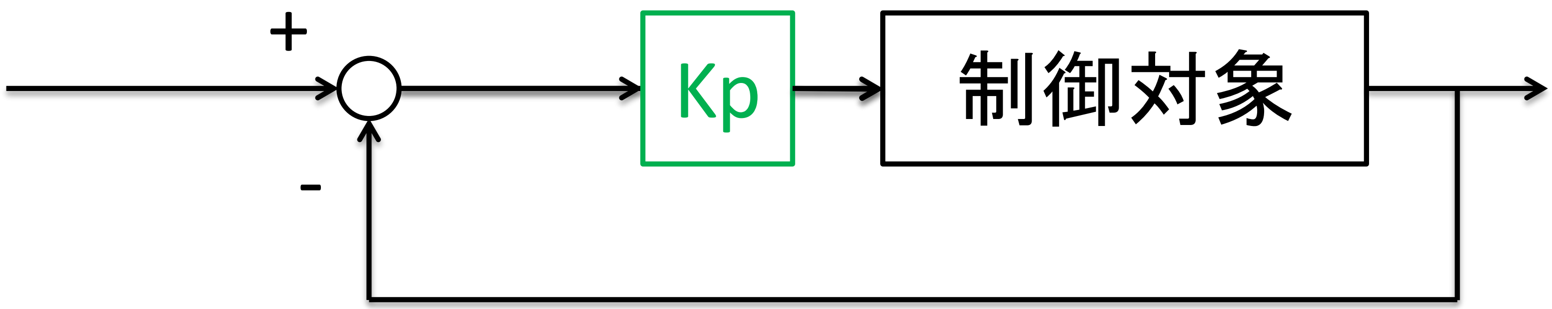
と判断して利用

オープンループ制御系でうまくいかないなら，

制御の仕組みを作りましょう

単純フィードバック制御系
（比例フィードバック制御系）

指令値　制御量　応答



- 外乱の影響で応答が変わる場合
  - 応答（出力）と指令値（入力）を比較
  - 入力ー出力→**偏差**を制御量として**修正**に利用

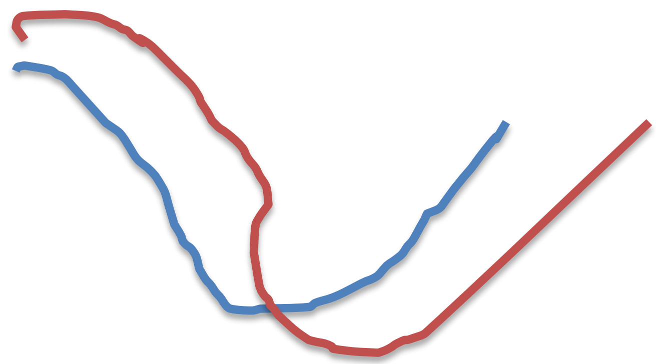
⇩

フィードバックの機能

何を計れば制御できるのだろうか？

温度？

磁気？



トルク？

角速度？

電圧？

電流？

（参考）モータの実例を考える

$$\omega(s) \approx \frac{1}{K_G}\frac{1}{T_m s + 1}E + \frac{R}{K_T}\frac{1}{K_G}\frac{1}{T_m s + 1}\tau$$

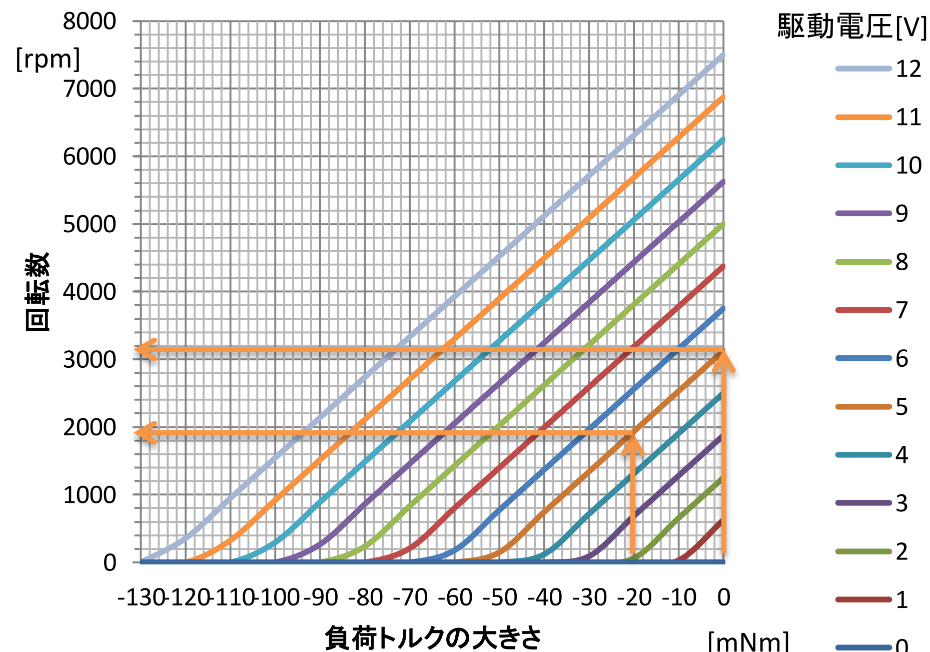
		具体例	単位
L	電機子インダクタンス	0.120	mH
R	電機子抵抗	1.40	Ω
J	慣性モーメント	0.0000291	Kg㎡
KI	トルク定数	14.7	mNm/A
KG	誘起電圧定数	1.60	V/1000rpm
Tm	機械的時定数	17.0	msec

$$\omega(t) \approx \frac{1}{K_G}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}}\right)E + \frac{R}{K_I}\frac{1}{K_G}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}}\right)\tau$$

$$= 625\left(1 - e^{-\frac{t}{0.017}}\right)E + 59.5\left(1 - e^{-\frac{t}{0.017}}\right)\tau$$

[rpm/V]　[V]　[rpm/mNm]　[mNm]

	具体例	単位
最大トルク	117.6	mNm
最大駆動電圧	12	V
無負荷最大回転数	7400	rpm



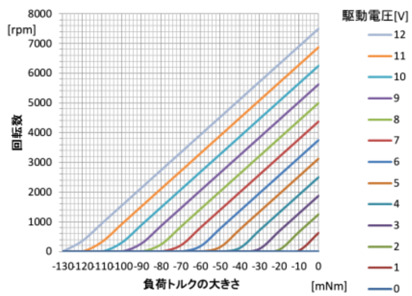
5V駆動時，最大トルクの15%の負荷で回転数は40%落ちることが分かる

駆動電圧と負荷トルク計測で回転数を制御できる？

制御のアイディア

1） トルク計測で制御

トルク検出法
- 電流センサ
- 磁気センサ
- トルクセンサ



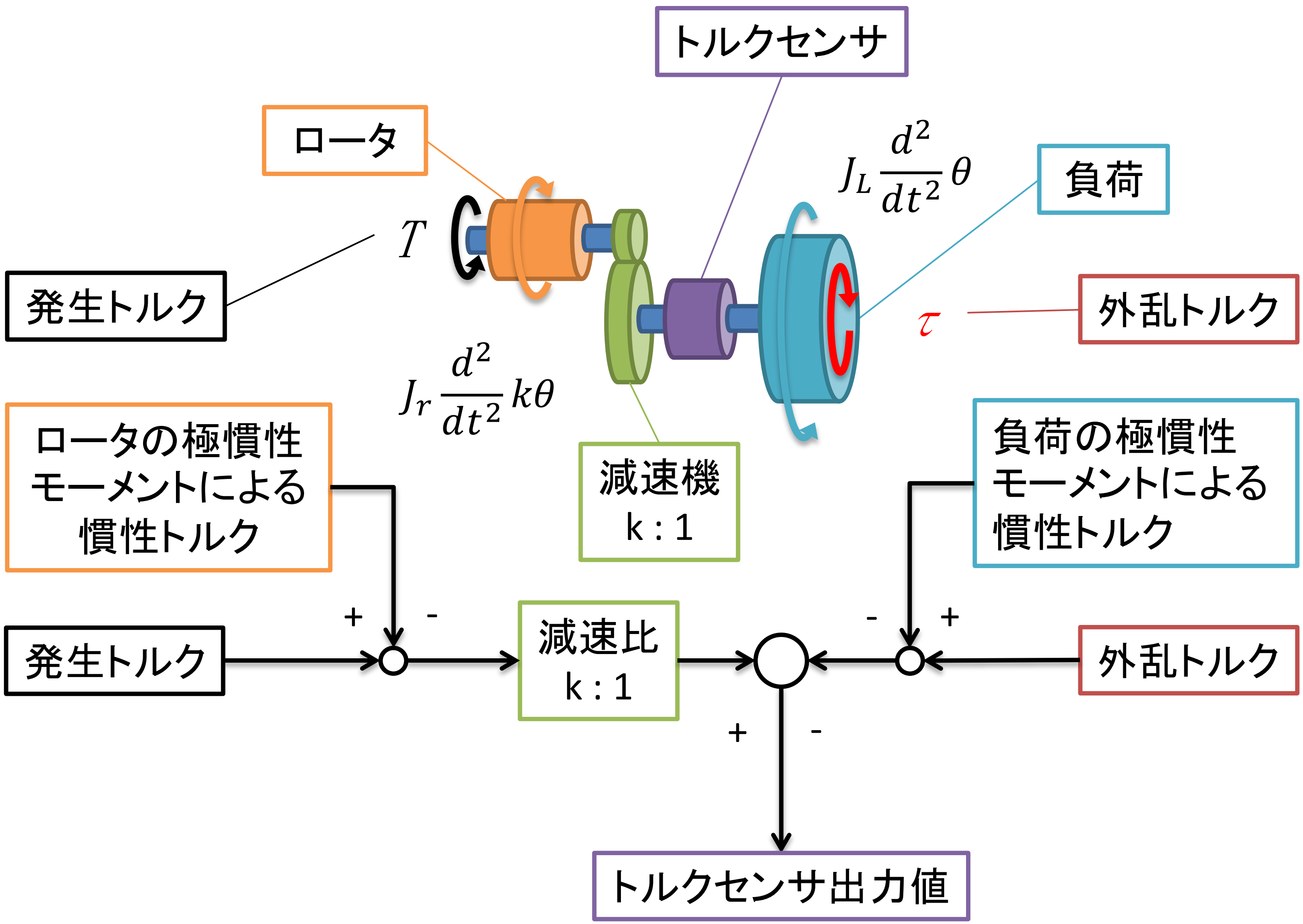
角速度の制御法
① 電圧調整で無負荷回転数（目標回転数）を決定
② トルク検出により外乱トルクの影響を除去

2） 角速度計測で制御

角速度検出法
- 角速度センサ
- 磁気センサ（角度）

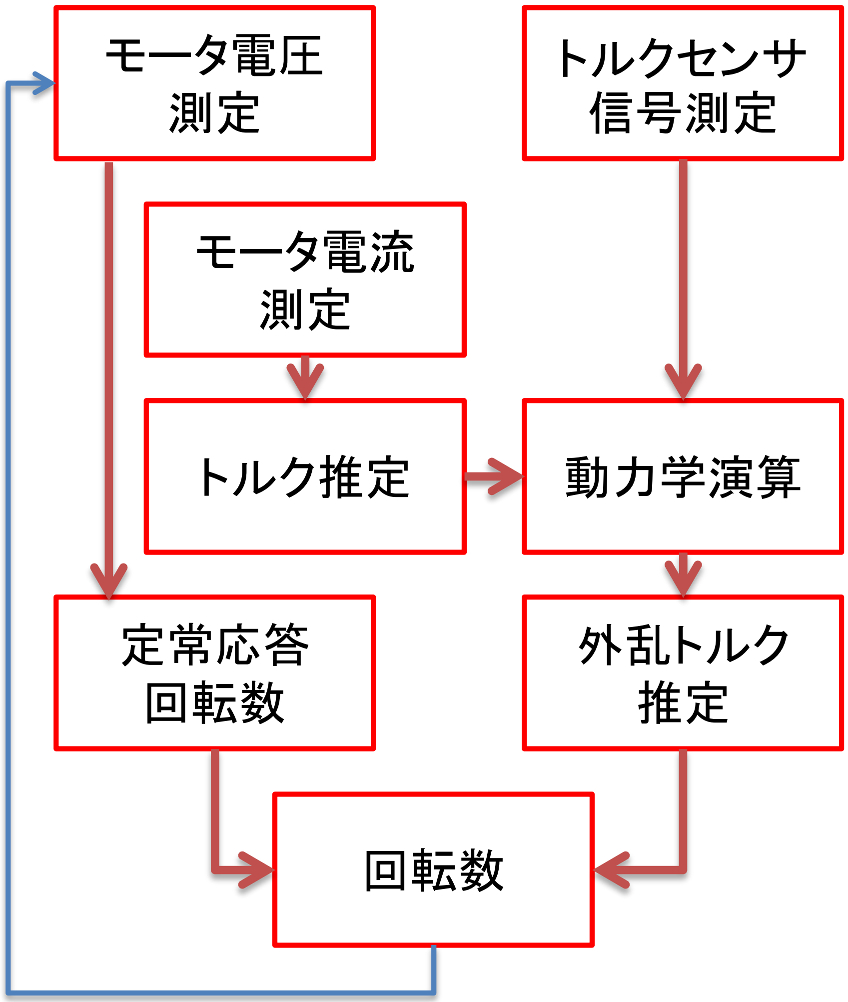
角速度の制御法
① 電圧調整で無負荷回転数（目標回転数）を決定
② 回転数検出により外乱の影響を除去

トルクセンサは何を計っているのか？

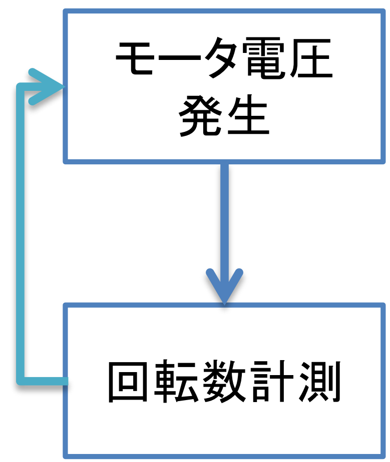


制御のアイディア

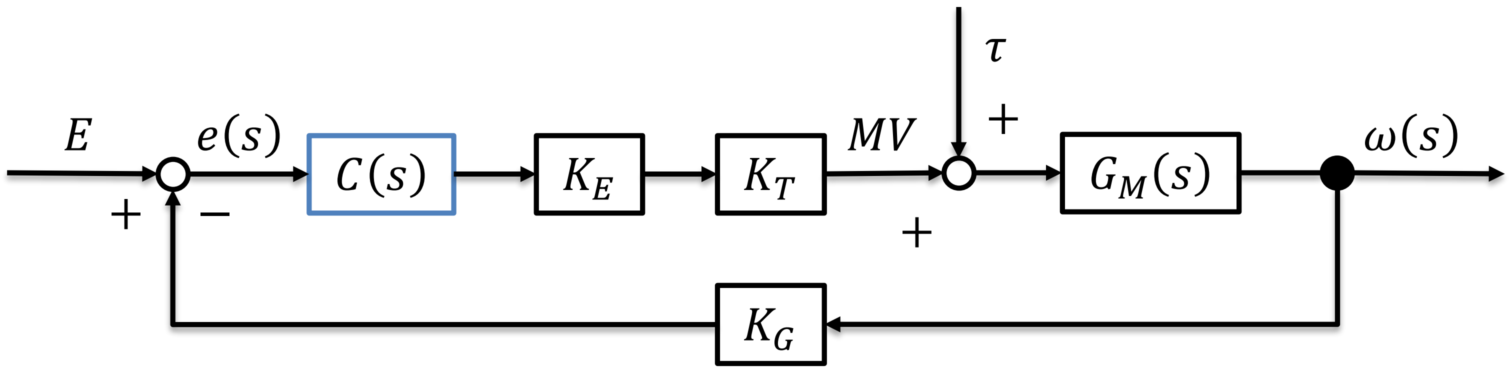
1） トルク計測で制御



2） 角速度計測で制御



課題4　モータとコントローラ



$$\begin{cases} \omega(s) = G_M(s)(MV + \tau) \\ MV = C(s)K_E K_T e(s) \\ e(s) = E - K_G\omega(s) \end{cases}$$

課題2より

$$K_E = \frac{1}{R} \qquad G_M(s) = \frac{1}{Js}$$

比例フィードバックコントローラは，

$$C(s) = K_p$$

これらより伝達関数は，

$$\omega(s) = \frac{\frac{K_P}{K_P+1}\frac{1}{K_G}}{\frac{1}{K_P+1}\frac{RJ}{K_T K_G}s + 1}E + \frac{\frac{K_P}{K_P+1}\frac{R}{K_T K_G}}{\frac{1}{K_P+1}\frac{RJ}{K_T K_G}s + 1}\tau$$

ここで以下のように定義すると，

$$\frac{RJ}{K_T K_G} = T_m$$ モータの機械的時定数

$$\boxed{\omega(s) = \frac{\frac{K_P}{K_P+1}\frac{1}{K_G}}{\frac{1}{K_P+1}T_m s + 1}E + \frac{\frac{K_P}{K_P+1}\frac{R}{K_T K_G}}{\frac{1}{K_P+1}T_m s + 1}\tau}$$

Step1

以下の数式を比較してみよう

$$\omega(s)=\frac{1}{T_m s+1}\frac{1}{K_G}E(s)+\frac{1}{T_m s+1}\frac{R}{K_T K_G}\tau(s)$$

モータ単体の式

$$\omega(s)=\frac{\frac{K_P}{K_P+1}}{\frac{1}{K_P+1}T_m s+1}\frac{1}{K_G}E(s)+\frac{\frac{1}{K_P+1}}{\frac{1}{K_P+1}T_m s+1}\frac{R}{K_T K_G}\tau(s)$$

比例フィードバックを掛けたモータの式

課題4に記入

Step2

最終値の定理を用いて定常値を計算し，気付いたことは？

$$\omega(s)=\lim_{s\to 0}s\frac{1}{T_m s+1}\frac{1}{K_G}\frac{E}{s}+\lim_{s\to 0}s\frac{1}{T_m s+1}\frac{R}{K_T K_G}\frac{\tau}{s}$$

$$\omega(s)=\lim_{s\to 0}s\frac{\frac{K_P}{K_P+1}}{\frac{1}{K_P+1}T_m s+1}\frac{1}{K_G}\frac{E}{s}+\lim_{s\to 0}s\frac{\frac{1}{K_P+1}}{\frac{1}{K_P+1}T_m s+1}\frac{R}{K_T K_G}\frac{\tau}{s}$$

課題4に記入

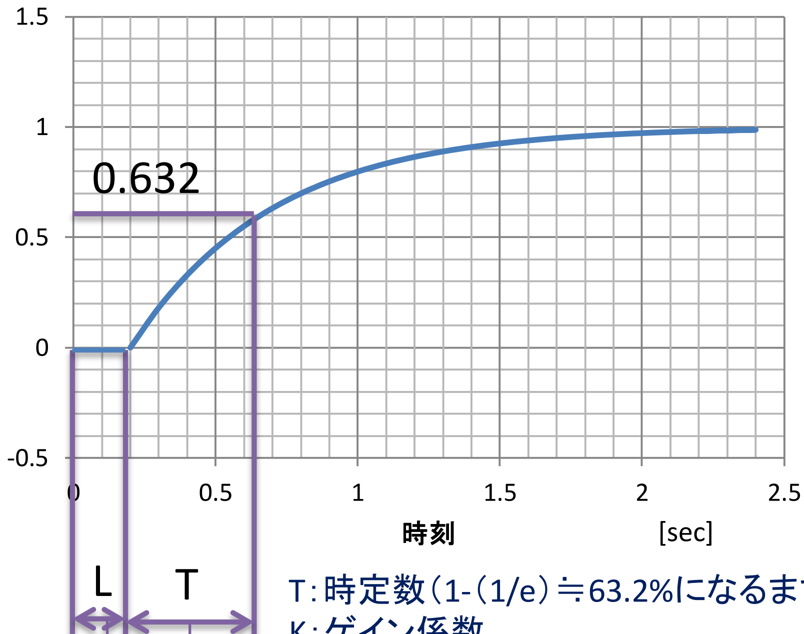
Step3

比例ゲインを9としたとき，時定数とゲインはどのように変化するか？

ここで実験２

課題６　フィードバック制御系の理解とゲイン（感度）の調整

制御系感度調整実験メモ



$$y(t) = ?(1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

手法	比例ゲインKp
Ziegler and Nichols	$\frac{T}{L}$
Chien, Hrones and Reswick	$\frac{0.3(0.7)T}{L}$
Cohen and Coon	$\frac{T}{L} + \frac{1}{3TR}$

T:時定数(1-(1/e)≒63.2%になるまでの時間)
K:ゲイン係数
4〜5T:整定時間

1次遅れ:時定数Tを計測

無駄時間: 初期に全く応答しない時間Lを計測

	比例ゲイン	
	Kp	
	減少	増加
立上がり時間	長	短
行過ぎ量	小	大
整定時間	要調整	

$$G(s) = \frac{\frac{K_p K}{Ts+1}}{1 + \frac{K_p K}{Ts+1}\frac{1}{K}} = \frac{\frac{K_p K}{1+K_p}}{\frac{T}{1+K_p}s + 1}$$

実験2　比例フィードバック制御の実験

- 課題6:Kpの値を求める（無駄時間と時定数）
- Kpの値を10倍，1/10倍時の実験データも
- １つのグラフに３つのデータを載せること
- 外乱は応答が目標値に近い＆振動少ないkpで行って，外乱あり，なし2つのデータを1つのグラフにまとめる

実験2　比例フィードバック制御の実験

- 課題6:比例フィードバック制御時の外乱

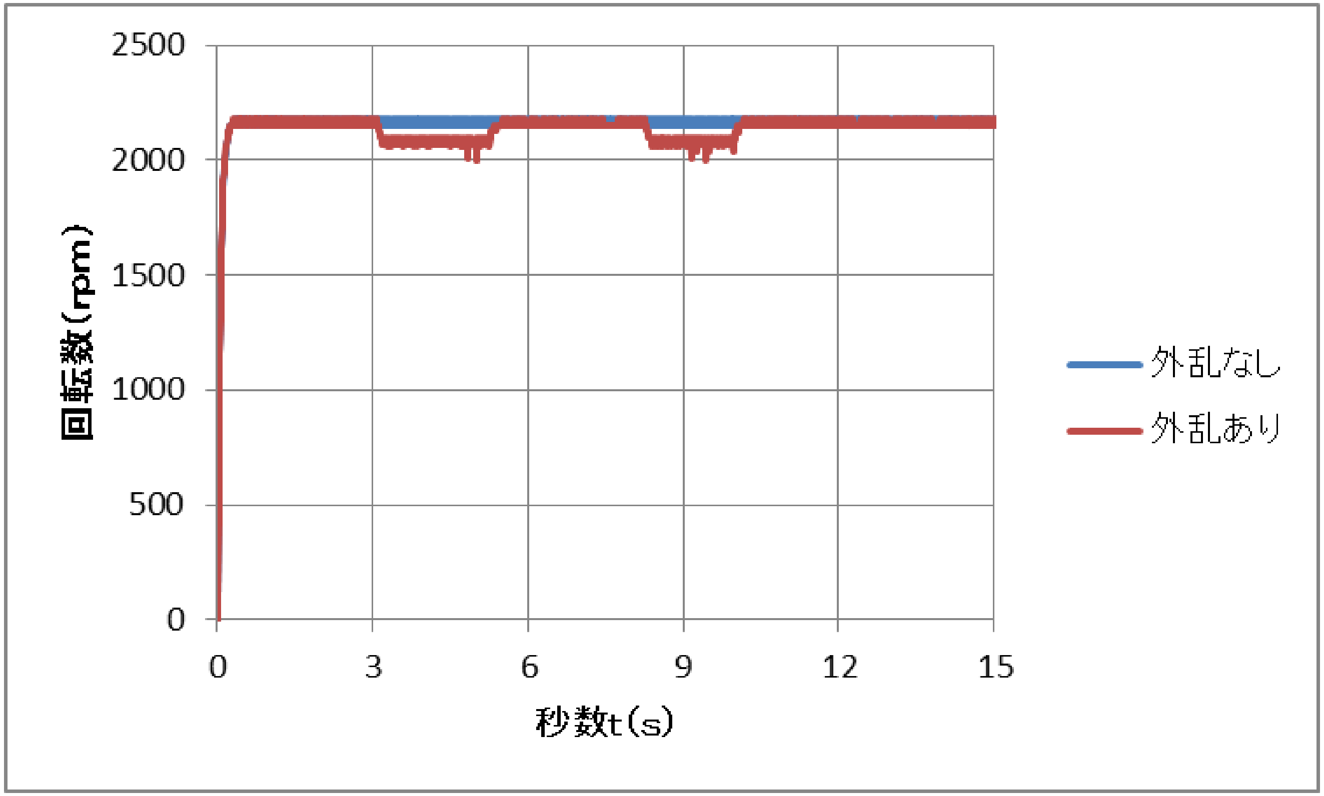


Fig.4 比例フィードバック制御時の外乱の影響

1．制御とは何か
2．制御対象を知る
3．制御系を作る
4．制御系の設計・改善

実験3，課題7～8に関係．

実験2を通しての疑問

思い通り応答にならなかった？

目標値に
達してない

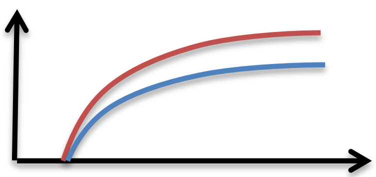
変な音が
した

外乱に
負けたまま

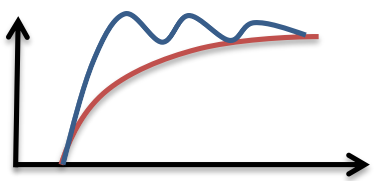
実験2では

思った通りの応答にならなかった

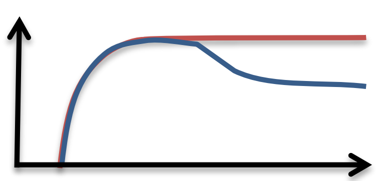
入力(目標)値に応答が達しない.



Kpの値によって挙動が乱れる

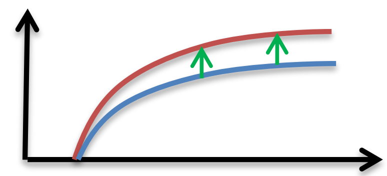


負荷に外乱が加わると
応答がずれたままついてこない

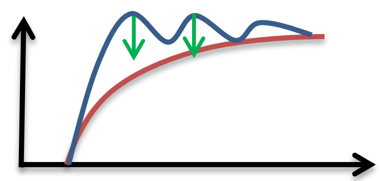


どのようにしたいのか？

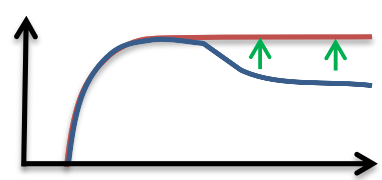
定常偏差をなくしたい



滑らかな挙動にしたい



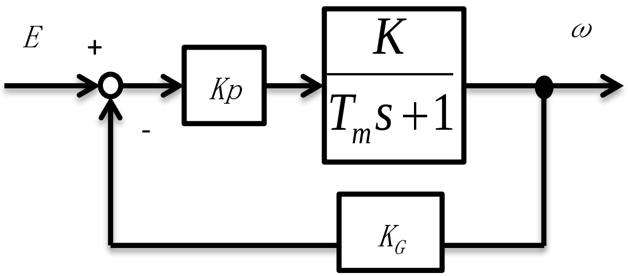
外乱が加わっても回復させたい
外乱がなくなったらすぐに回復させたい



課題4より

比例フィードバック制御の問題

- 定常偏差（ズレ）が生じる.



フィードバックを掛けない元の式

$$\omega(s)=\frac{1}{T_m s+1}\frac{1}{K_G}E(s)+\frac{1}{T_m s+1}\frac{R}{K_T K_G}\tau(s)$$

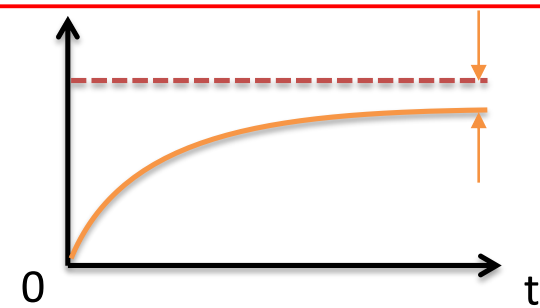
比例フィードバックを掛けた式

$$\omega(s)=\frac{\frac{K_P}{K_P+1}}{\frac{1}{K_P+1}T_m s+1}\frac{1}{K_G}E(s)+\frac{\frac{1}{K_P+1}}{\frac{1}{K_P+1}T_m s+1}\frac{R}{K_T K_G}\tau(s)$$

制御器のゲインが高いと見かけ上の時定数が小さくなり，速く応答

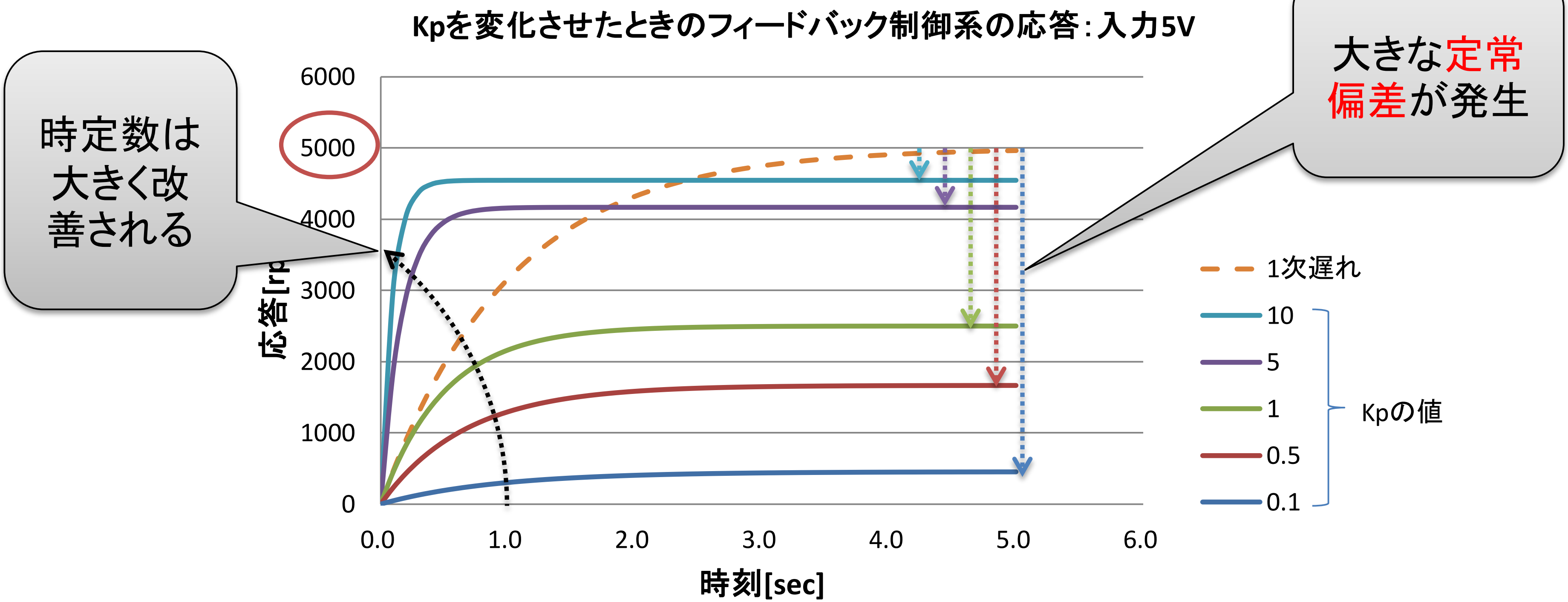
制御器のゲインが低いと定常偏差が増えて誤差発生

制御器のゲインが高いと外乱の影響が小さくなる



比例フィードバック制御した時の応答

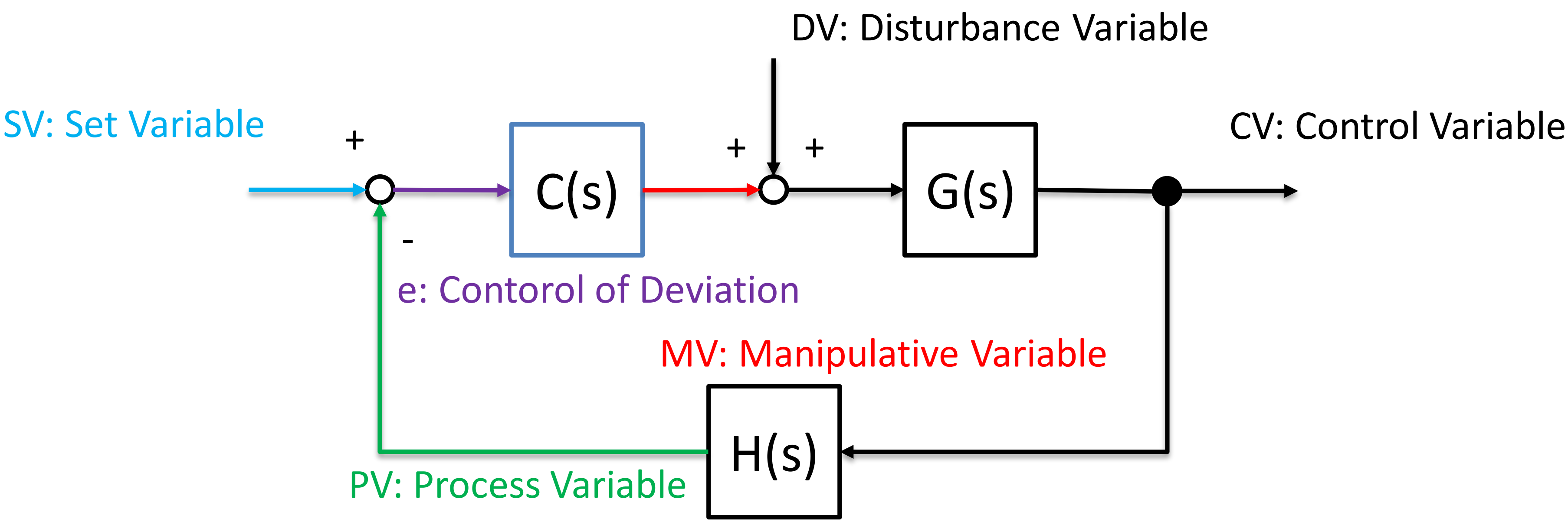
例
10Vで10000rpmのモータの場合K=1000[rpm/V]となる



期待したい応答
K=1000[rpm/V], T=1.0[sec]のモータで入力u=5[V]ではオープンループ制御で時定数1[sec], 定常応答5000[rpm]となるがこれより改善された応答

Kp	0.1	0.5	1	5	10
K'	90.9	333	500	833	909
T'	0.909	0.667	0.500	0.167	0.0909

設定値と測定値と操作量の関係



$$MV = C(s)(SV - PV)$$

考えてみよう

$SV = 10[V], C(s) = 100, \mathrm{PV} = 0[V]$ ⇨ $MV = 100(10 - 0) = 1000[V]$

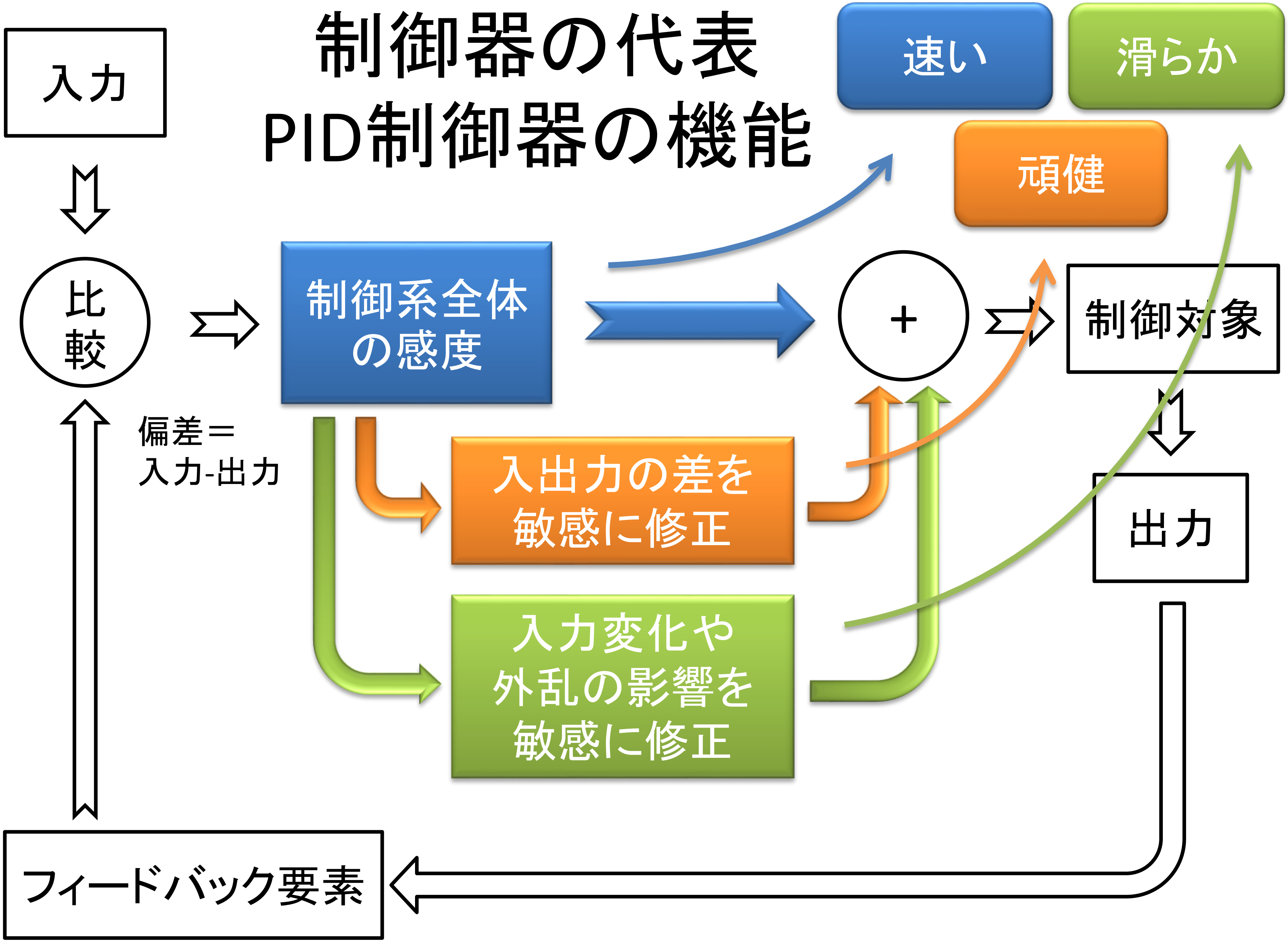
比例ゲイン100であれば，10V定格のモータに対して起動時1000V掛かる

⇨ 比例ゲインを上げるだけで解決できるのだろうか？

比例ゲインKpを調整するだけでは不充分

制御器を工夫する

制御器の代表
PID制御器の機能



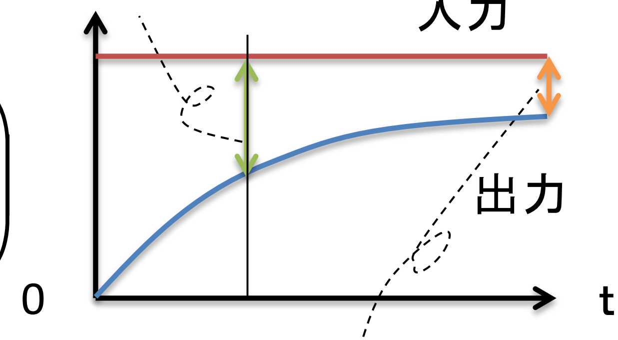
PIDコントローラ

機能の説明

$$G_C(s) = \left(K_P + K_I \frac{1}{s} + K_D s \right)$$

$$= K_P + \frac{K_P}{T_I s} + K_P T_D s$$

＜偏差＞
ある時刻の
出力と入力の差

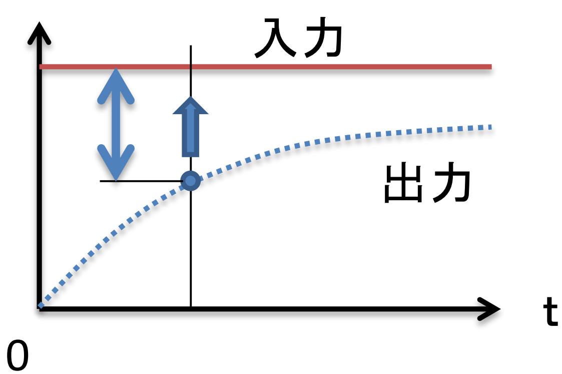


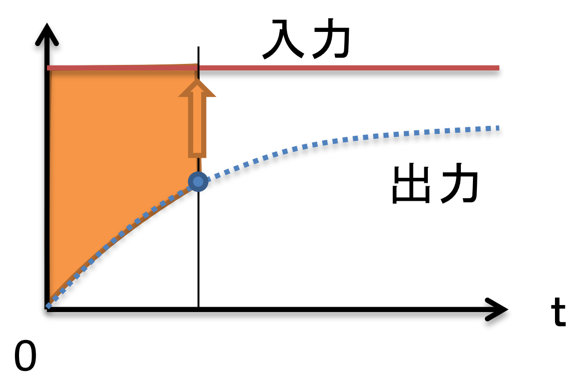
＜定常偏差＞
ずっと残る
出力と入力の差

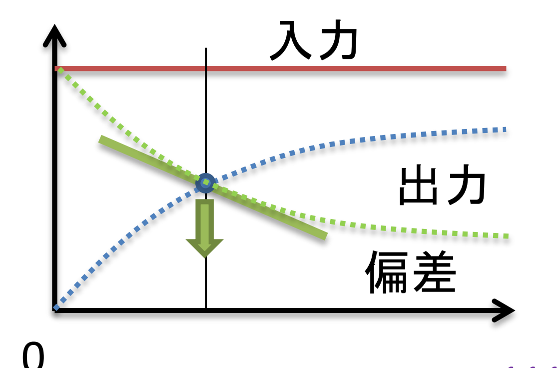
比例要素
現在の偏差を減らす

積分要素
偏差の蓄積を減らす

微分要素
偏差の変化を減らす







PID各要素の機能

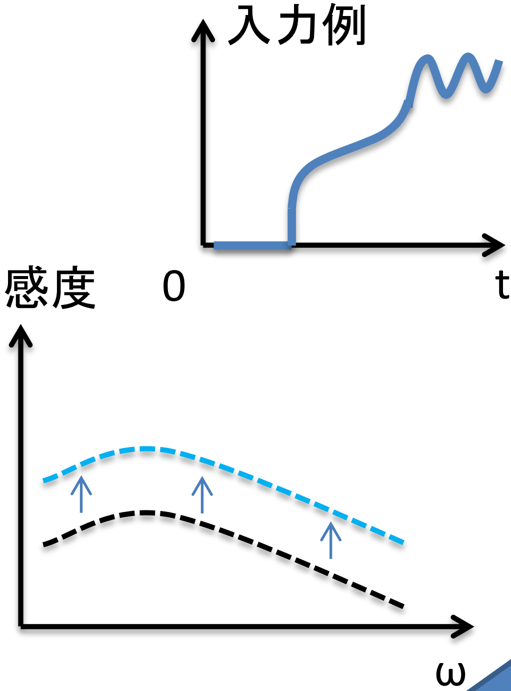
	比例(P)要素	積分(I)要素	微分(D)要素
名前の由来 修正対象	偏差に比例 現在の偏差	偏差の積分に比例 偏差の蓄積(過去)	偏差の微分に比例 偏差の変化(未来)
機能は？	基本的な感度	偏差をなくす	指令値に追従
何に敏感か？	• 偏差そのもの • 外乱の影響	• 残っている偏差 • 実モデルと制御モデルの誤差 • 外乱の影響	• 指令値の変化(偏差の変化) • 外乱の影響
敏感な帯域	全帯域	低周波帯域	高周波帯域
働きを強めると？	• 高速な応答 • 偏差の減少 • 安定性減少	• 定常偏差解消 • 行き過ぎの増加 • 安定性減少(振動が収まらない)	• 高速な追従性 • 滑らかな収束(偏差の変化を抑制) • 行き過ぎの抑制 • 安定性減少(急な変化に敏感すぎる)
扱いにくい点は？	• 定常偏差解消せず	• 行き過ぎが発生 • 収束に時間が掛かる • 変化追従に対して限界	• 定常偏差解消せず • 高速な外乱(ノイズ)の影響大

PIDコントローラ

周波数特性の説明

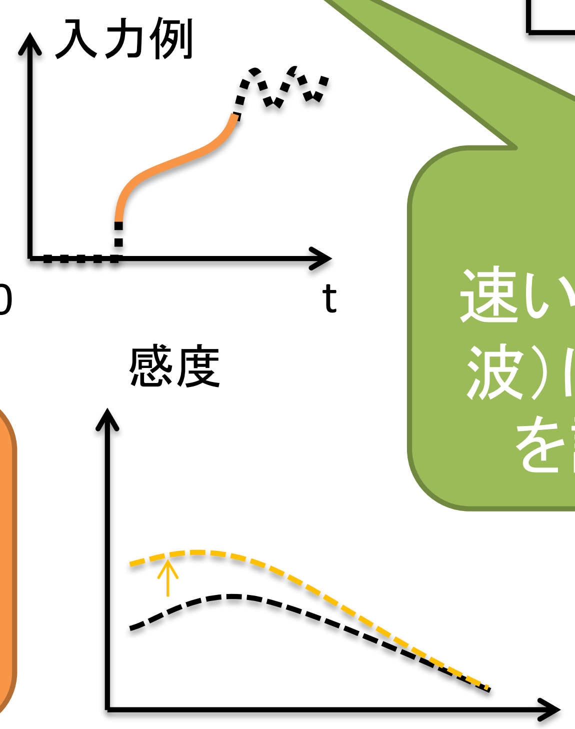
$$G_C(s) = \left(K_P + K_I \frac{1}{s} + K_D s \right)$$

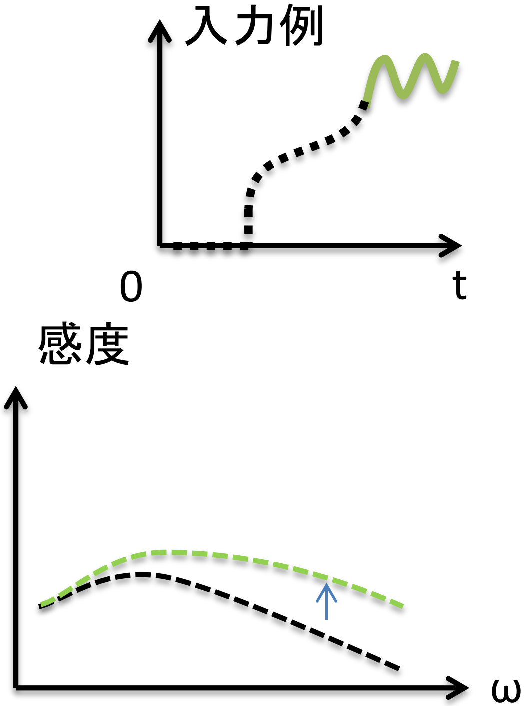
$$= K_P + \frac{K_P}{T_I s} + K_P T_D s$$



比例要素
制御系全体の感度を
調整する要素

積分要素
ゆっくりした入力変化
（低周波）に追従する
感度を調整する要素





微分要素
速い入力変化（高周
波）に追従する感度
を調整する要素

何を優先したいか？

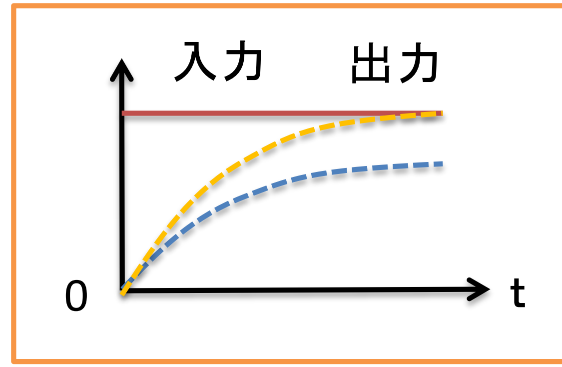
ねらい	比例要素	（比例＋）積分要素	（比例＋）微分要素
目標値通りに回転 定常偏差なしの応答	△近付けること は可能	◎一致するまで 作用	×関与せず
高速応答はそれなり でよい	△ゲイン抑え目 で充分	×遅くなる	○速くなる
滑らかな応答 振動的ではない応答	△ゲインを上げ 過ぎない	△少々効果あり， 調整難しい	○効果あり，調 整が難しい
外乱の影響を抑制	△少なくできる	◎なくなるまで作 用	○変化に対して 効果

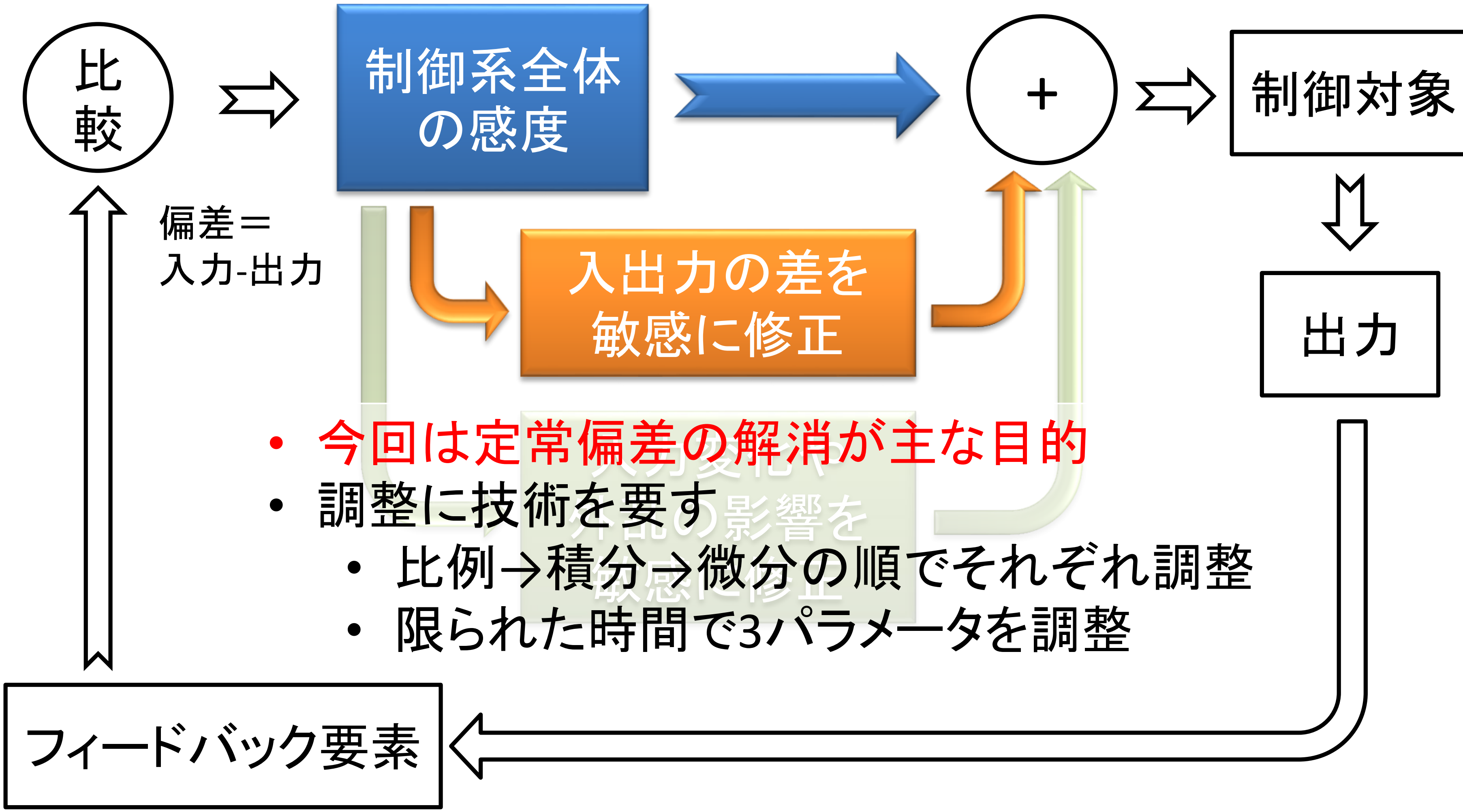
<u>ゲインを上げ過ぎない</u>ようにすれば程々に調整可能

<u>外乱の影響をなくす効果</u>に期待

ねらいからあまり効果が期待されない

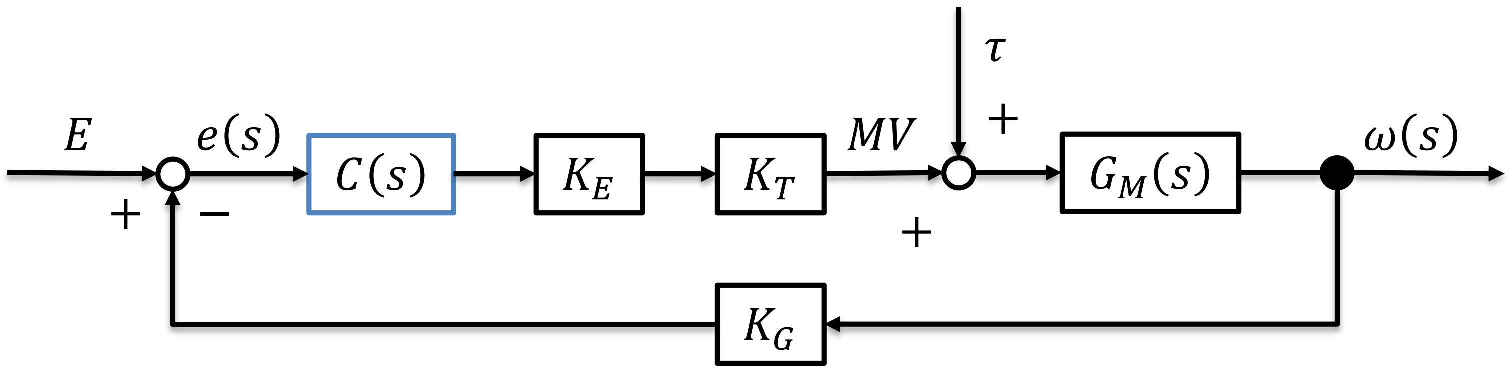
実験で用いるPI制御器の機能





- 今回は定常偏差の解消が主な目的
- 調整に技術を要す
    - 比例→積分→微分の順でそれぞれ調整
    - 限られた時間で3パラメータを調整

課題6　モータとPIコントローラ



$$
\begin{cases}
\omega(s) = G_M(s)(MV + \tau) \\
MV = C(s)K_E K_T e(s) \\
e(s) = E - K_G\omega(s)
\end{cases}
$$

課題2より

$$
K_E = \frac{1}{R} \qquad G_M(s) = \frac{1}{Js}
$$

比例フィードバックコントローラは,

$$
C(s) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)
$$

これらより伝達関数は,

$$
\omega(s) = \frac{\dfrac{K_P}{T_m}s + \dfrac{K_P}{T_i T_m}}{s^2 + \dfrac{K_P + 1}{T_m}s + \dfrac{K_P}{T_i T_m}}\frac{1}{K_G}E(s) + \frac{\dfrac{1}{T_m}s}{s^2 + \dfrac{K_P + 1}{T_m}s + \dfrac{K_P}{T_i T_m}}\frac{R}{K_T K_G}\tau(s)
$$

Step1　以下の数式を比較してみよう

$$\omega(s)=\frac{\frac{K_P}{K_P+1}}{\frac{1}{K_P+1}T_m s+1}\frac{1}{K_G}E(s)+\frac{\frac{1}{K_P+1}}{\frac{1}{K_P+1}T_m s+1}\frac{R}{K_T K_G}\tau(s)$$

P制御を掛けたモータの式

$$\omega(s)=\frac{\frac{K_P}{T_m}s+\frac{K_P}{T_i T_m}}{s^2+\frac{K_P+1}{T_m}s+\frac{K_P}{T_i T_m}}\frac{1}{K_G}E(s)+\frac{\frac{1}{T_m}s}{s^2+\frac{K_P+1}{T_m}s+\frac{K_P}{T_i T_m}}\frac{R}{K_T K_G}\tau(s)$$

PI制御を掛けたモータの式

課題6に記入

Step2　最終値の定理を用いて定常値を計算し，気付いたことは？

$$\omega(s)=\lim_{s\to 0}s\frac{\frac{K_P}{K_P+1}}{\frac{1}{K_P+1}T_m s+1}\frac{1}{K_G}\frac{E}{s}+\lim_{s\to 0}s\frac{\frac{1}{K_P+1}}{\frac{1}{K_P+1}T_m s+1}\frac{R}{K_T K_G}\frac{\tau}{s}$$

$$\omega(s)=\lim_{s\to 0}s\frac{\frac{K_P}{T_m}s+\frac{K_P}{T_i T_m}}{s^2+\frac{K_P+1}{T_m}s+\frac{K_P}{T_i T_m}}\frac{1}{K_G}\frac{E}{s}+\lim_{s\to 0}s\frac{\frac{1}{T_m}s}{s^2+\frac{K_P+1}{T_m}s+\frac{K_P}{T_i T_m}}\frac{R}{K_T K_G}\frac{\tau}{s}$$

課題6に記入

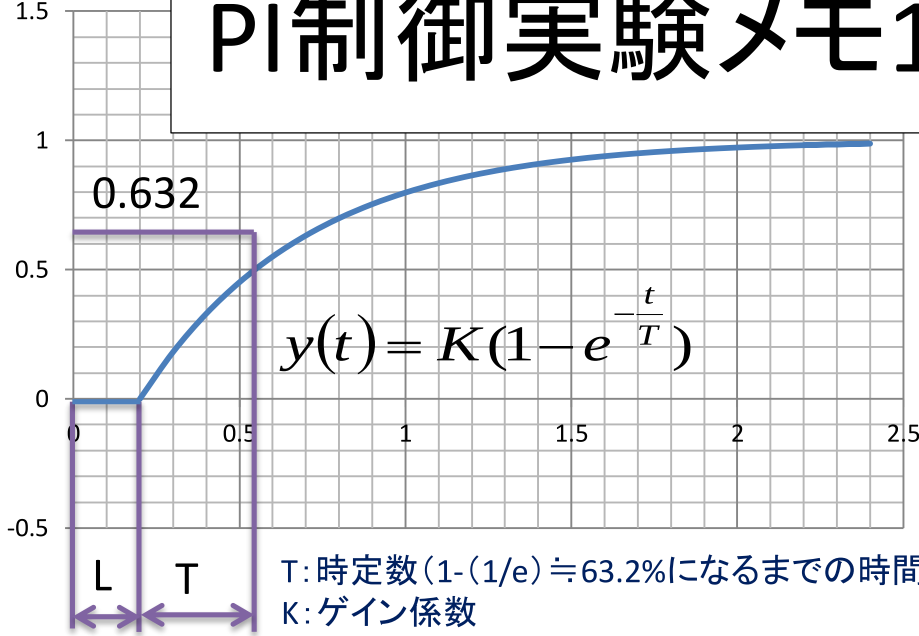
Step3
比例ゲインを9としたとき，時定数とゲイン，あるいはζとωnはどのように変化するか？

ここで実験3

課題7

外乱へのロバスト性，比例フィードバックとの比較

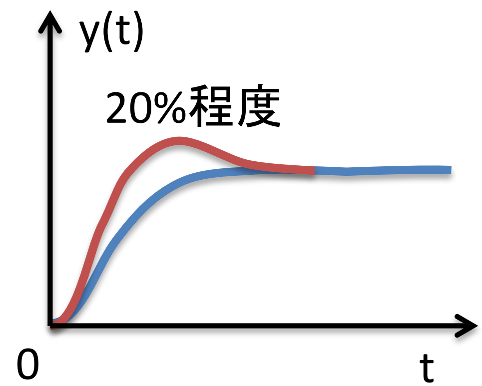
PI制御実験メモ1/3



T:時定数(1-(1/e)≒63.2%になるまでの時間)
K:ゲイン係数
4～5T:整定時間

	比例ゲイン Kp		積分時間 Ti	
	減少	増加	増大	減少
立上がり時間	長	短	やや長	やや短
行過ぎ量	小	大	小	大
整定時間	要調整		要調整	

手法	比例ゲインKp	積分時間TI
Ziegler and Nichols	$\frac{0.9T}{L}$	$3.33L$
Chien, Hrones and Reswick	$\frac{0.35(0.6)T}{L}$	$1.2(1.0)T$または$\frac{0.35(0.6)}{0.6(0.7)}T$
Cohen and Coon	$\frac{0.9}{RL}+\frac{1}{12TR}$	$\frac{30TL+3L^2}{9T+20L}$



緑文字は20%オーバーシュートを許容

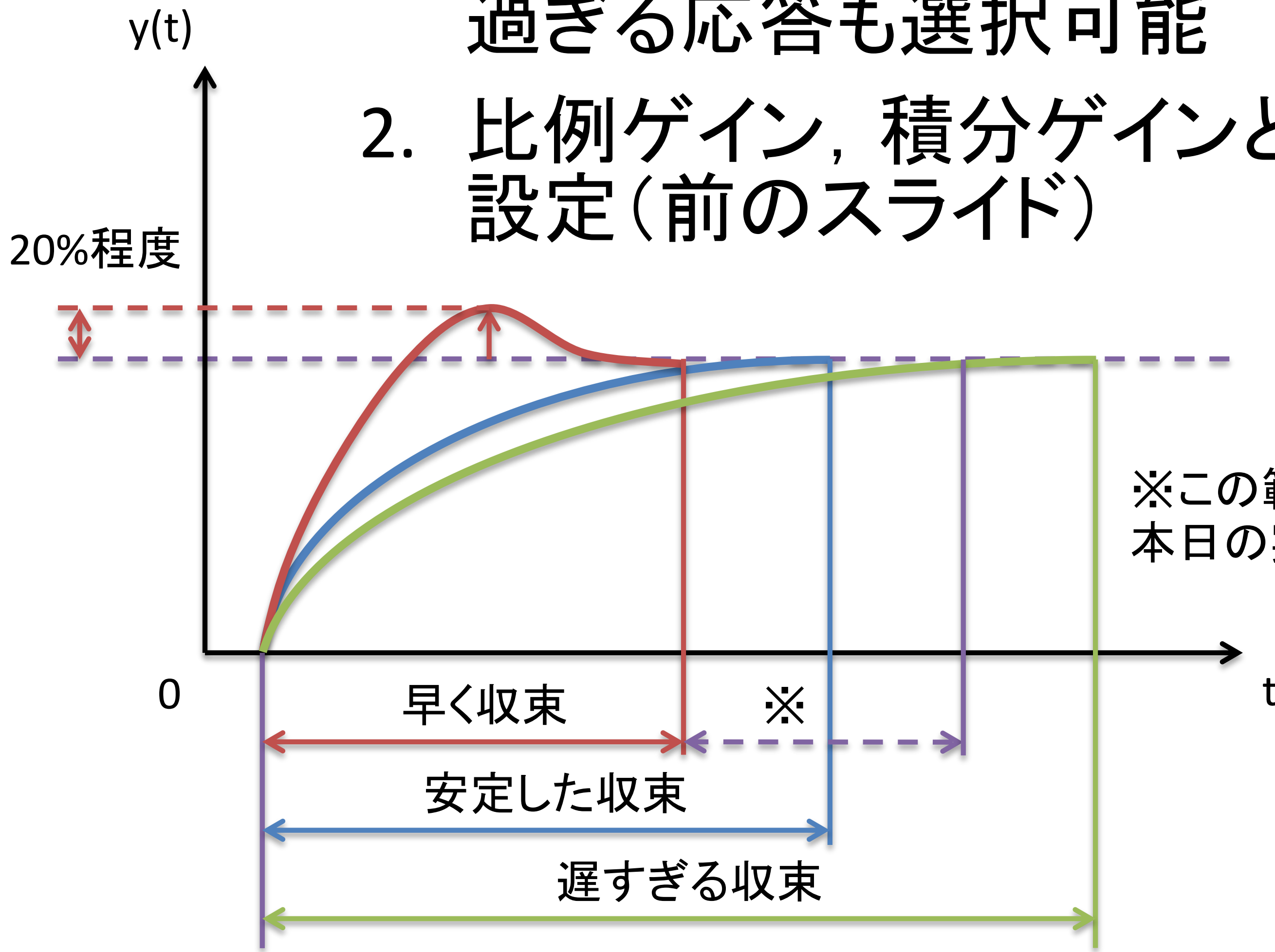
$$G_c(s)=K_p\left(1+\frac{1}{T_I s}\right)=K_p+\frac{K_p}{T_I s}=K_p+\frac{K_I}{s}$$

Kp, KIとして調整する際，連動する．

PI制御により1次遅れの特性の制御対象の応答が2次遅れに変化している点にも注目

PI制御実験メモ2/3

1. 目標値を超えて一旦20%程度行き過ぎる応答も選択可能
2. 比例ゲイン，積分ゲインとも高目に設定（前のスライド）



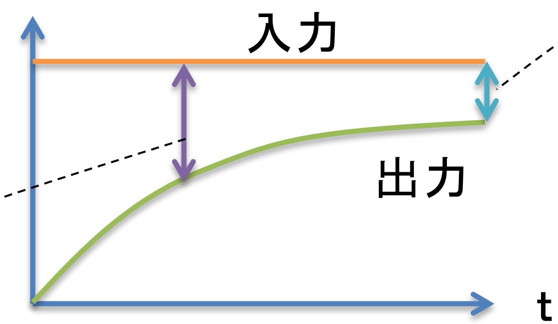
※この範囲に収まるように，本日の実験で調整してみよう

PI制御実験メモ3/3

制御器の各要素の働き

PID各要素		小さくすると	大きくすると
比例要素	パラメータ	Kpを小さく	Kpを大きく
	特性変化	• 定常偏差が大きくなる • 応答が緩やかになる • 系の安定性が向上	• 定常偏差が小さくなる • 応答が素早くなる • 系の安定性が減少
積分要素	パラメータ	Tiを長く	Tiを短く
	特性変化	• 定常偏差解消が遅くなる • 行き過ぎ量が少なくなる • 系の安定性が向上	• 定常偏差解消が速くなる • 行き過ぎ量が大きくなる • 系の安定性が減少

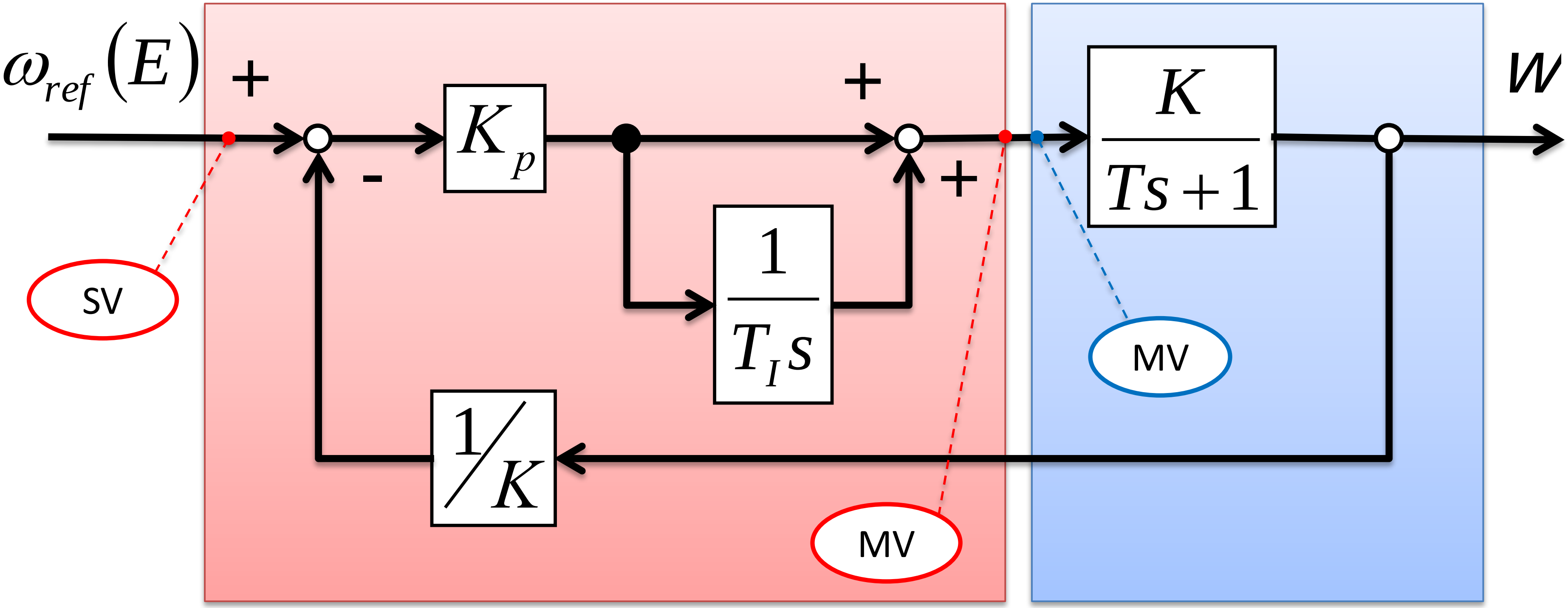
$$G_C(s) = K_P + \frac{K_P}{T_I s}$$



＜定常偏差＞
ずっと残る
出力と入力の差

＜偏差＞
ある時刻の
出力と入力の差

Kp, Tiを調整してもあまり変わらない？



PCやマイコンなどディジタル系の中での演算　回路や機構などアナログ系

MV＝MV?

K_p を上げ，T_I を調整すると
MVは大きくなる

MVは電圧として，
装置はその分を供給できるか？

制御モデルと実システムの不一致

小容量電源

大出力モータ

目標値 → 高いゲイン

操作量

電圧（電流）

大容量電源

制御ゲインを上げても
ハードウェアが制限となって
モータ出力のゲインは上がらない

小出力モータ

目標値 → 高いゲイン

操作量

電圧（電流）

制御ゲインを上げ
てもモータの仕様
が適合できず，条
件によって焼損

課題7

- ３つのモータの特性比較

ステップ応答時（外乱あり）のモータ回転数を他の２つの班からもらうこと

１つのモータ最大回転数を基準とした正規化を必ず行うこと

モータの価値

Performance (Specification)

- 重量（体積）に対して出力（トルク）が大きい
- 少ない電流で大きなトルクを発生（トルク感度が高い）
- 慣性モーメントが小さく，角加速度が大きい
- 加えた電力に対して大きな出力となり効率が良い

低スペックでも，メインテナンスフリーかつ全数検査できない組み込み用の低価格品にこそ求められる性質

Additional Value

- 回転ムラ（コギングトルク）がなく，滑らかに回る
- 低電圧から滑らかに起動できる
- 短時間における強大な（最大）出力
- 長時間に渡り，充分な（定格）出力を維持できる
- （想定外の）過負荷，過熱に対して堅牢
- 長期間に渡り性能を維持する信頼性（品質）

良いモータを使う意義

付加価値	決定要素
強力なトルク	大電流に耐える太い巻線（コイル）
	精度の良いコイル巻き付け（コアレス構造）
	精度の良い磁気回路（マグネット形状・材質）
高速応答	低[illegible]）
	低[illegible]
極低速時の滑らかな回転	低摩擦軸受
	角[illegible]路
	低[illegible]
高いエネルギ効率	精度の良い磁気回路
	低イナーシャ
	低摩擦軸受
耐久性・信頼性	各部材質，加工精度，組み立て精度

動的に正確に動く

精度よく動く

良いモータを理論から考える

$$\omega(s) = \frac{\frac{1}{K_G}}{T_E T_m s^2 + \left(T_{m+}\frac{Lb}{K_I K_G}\right)s + \frac{Rb}{K_I K_G} + 1}E + \frac{\boxed{\frac{Ls+R}{K_I}}\frac{1}{K_G}}{T_E T_m s^2 + \left(T_{m+}\frac{Lb}{K_I K_G}\right)s + \frac{Rb}{K_I K_G} + 1}\tau$$

$\frac{Ls+R}{K_I}$ について考えてみよう

これが小さいほど

⇩

外乱トルクτに対する感度が下がる

⇩

外乱に強い

- インダクタンスLは概して小さい
- 電機子抵抗Rが小さいほど良い
  - 良質な巻線
  - 良質な接点
- トルク定数K_Iが大きい程良い
  - 強力な磁気回路
  - 高精度な磁気回路

５．実験後のまとめ・解説

本日の実験全体の理解と
課題9課題10のために

実験を通しての疑問

今日の実験では何をやったのか？

本日の振り返り

	実験・作業	対応する課題
1	制御を考える，議論する	課題1
2	モータの伝達関数（モデル）を作る	課題2
3	実験1：　制御対象の特性を知る	課題3～4
4	比例フィードバック制御の伝達関数を求める	課題5
5	実験2：　比例フィードバック制御の問題点を理解	課題6
6	実験3：　PI制御で制御特性を改善	課題7～8

➡

- 制御工学1
- 制御工学2の前半

の内容を含んでいる

実験を通しての疑問

制御とは何をするのか？
制御理論の価値とは何か？

理論を考える理由

	理論	調整
構想時	制御系の機能のデザイン 仕様検討	
設計時	パラメータ・条件の計算 シミュレーションで予測	計測・パラメータ同定
設置・ 運用時	制御系の妥当性確認	理論値と実動作の相違解消 パラメータ合わせ込み
不具合 発生時	原因の推測 現象の解明	実動作計測

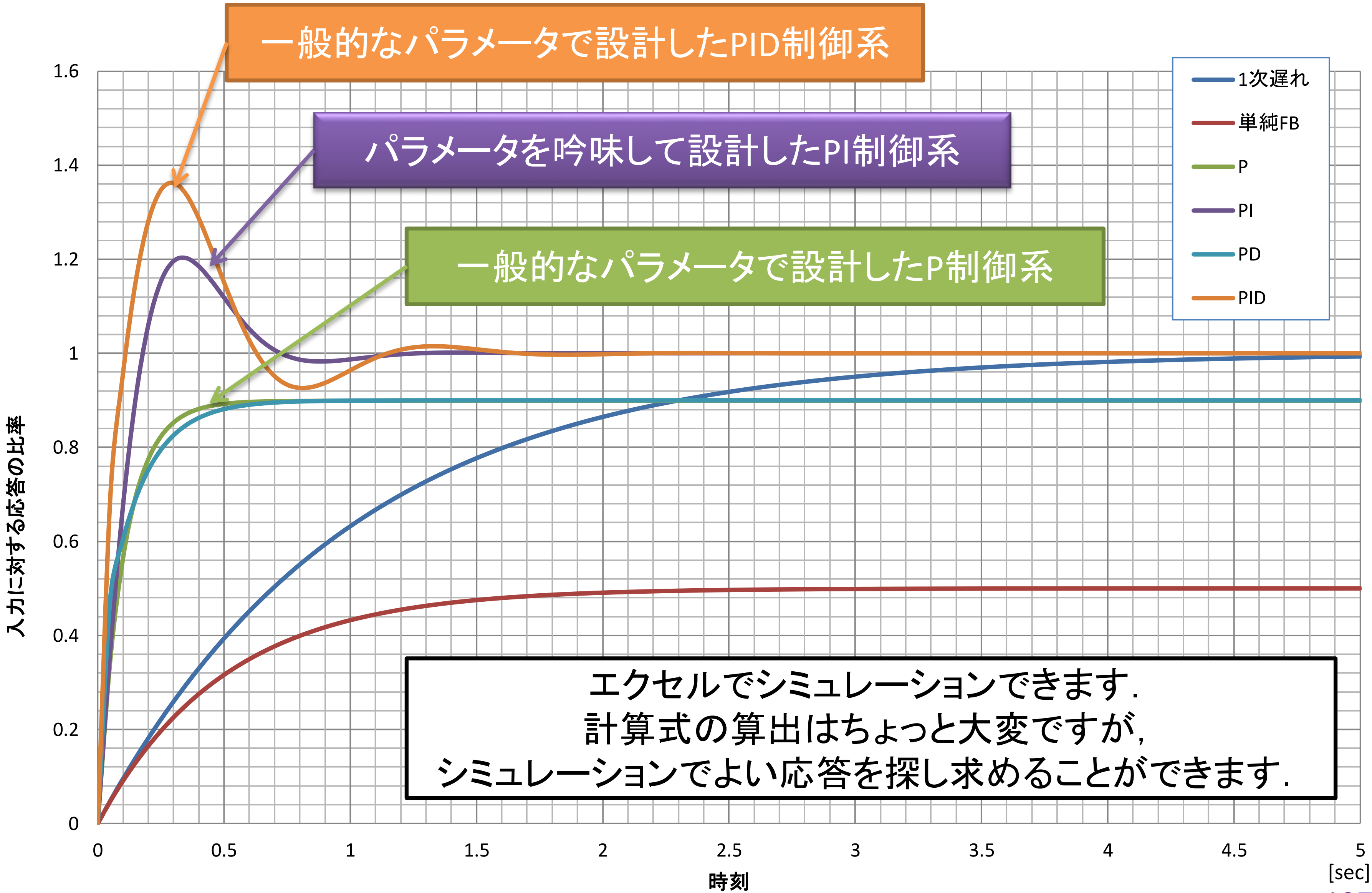
パラメータ調整(チューニング)で仕事した気になれる(理由は手間がかかるから)

→ 理論通りの応答になるとは限らない

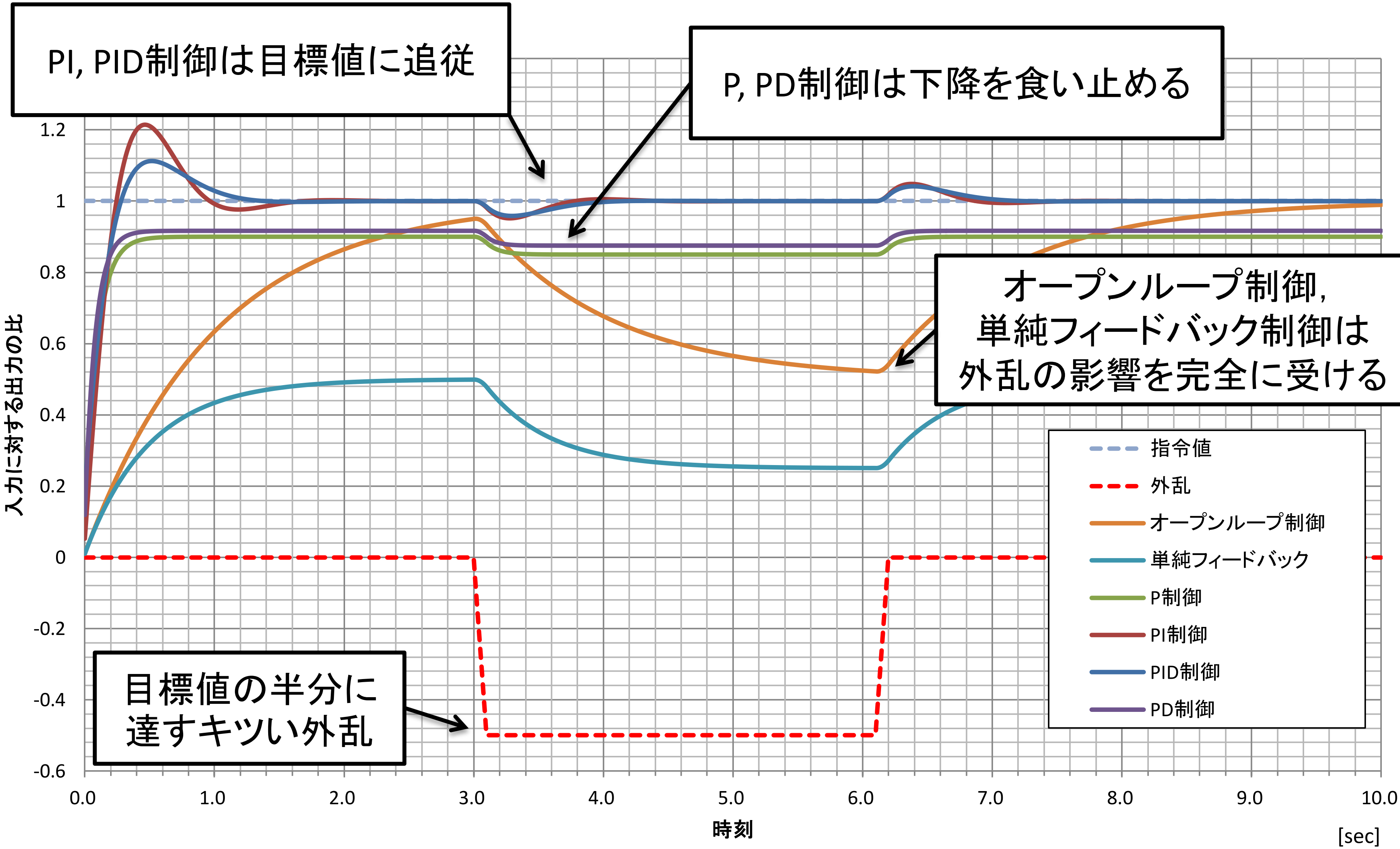
→ パラメータ調整(チューニング)は必要

これでは不充分で非効率

PI制御でもしっかり調整すると



制御の極意！外乱に対する応答



外乱に対する各制御方式の応答の比較