

機械工学実験1 制御工学 2014年度版 r9

を基に配布可能部分を抽出した資料

実験の授業の内容は
本資料と相違がある
場合もあるので留意してください。

機械工学科
機械制御システム研究室
加藤恵輔

1

本日の進め方

本日の実験にあたって

- 時間は3~5限一杯掛かります。
 - 作業や実験ごとに時間を決めて確保しています。
 - じっくり落ち着いて取り組んで下さい。
- 授業では未だ扱っていない内容について実験を行います。
 - 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**にしていきたいと思います。
 - **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。

2

考察の着眼点

実験時	持ち帰り
<ul style="list-style-type: none"> • 実験条件の影響 • 設定した変数(パラメータ)の影響・効果 • 予想した結果との比較(予測するシミュレーションを行った場合) • 実験方法間の違いの比較 • 結果についての妥当性(失敗や芳しくないことも含めて) • 実験環境や装置の状態について(直接測定していなかったが観察できたことなど) 	<ul style="list-style-type: none"> • 結果等を正確に整理しグラフ等を作成 • 結果や実験全体を振り返って理解 • 文献等を調査して関連する情報(手法、理論、知見)を獲得し、実験結果を再評価 • 実験を通して理解した知見に基づき応用 • 今後につながるであろう展望を思索し、実験を通しての目的と問題点を再評価

3

本日の実験のステップ

1. 制御とは何か? [課題1]
 - 制御の必要性と制御の概念
2. 制御対象を知る [課題2~4]
 - 制御対象の特性を知ることから始まる
3. 制御系を作る [課題5~6]
 - 思い通りに制御するための仕組み
4. 制御系の設計・改善 [課題7~8]
 - 本当に思い通りに制御するための調整

• まとめ [課題9~10]

4

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。

5

人間や道具によるタスクの実行

- 体力(動力)
 - 人間の筋力を動力源として利用
- 技能
 - 人間の手の器用さ、道具の特性を把握し、これらを利用して作業
- 知能
 - 人間による認識、判別、計画、判断、実行、調整

人間の望む機能を実現できることが最終目標

6

装置の手動操作の世界

- 専門職らしい?
- 知能と技能が必要?
- 設置時、点検時、非常時など

7

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

8

制御の考え方(具体例)

勉強や仕事に集中してよい成果を出したい
豊かで健康で幸せな生活をしたい

部屋の中で快適に過ごしたい

身体に負担がかからないのは00℃~00℃
熱帯しているのは00時から00時
一ヶ月のコストは0000円以下に抑えたい

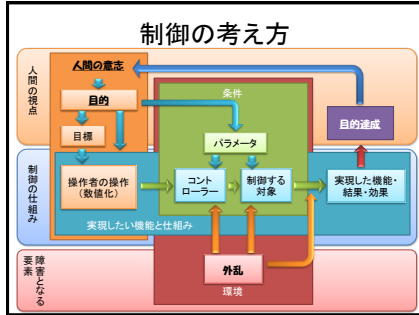
室温を決定できる装置を利用
体感温度を決定できる装置を利用
室外との不要な熱の出入りを抑える装置を利用

ヒートポンプを用い室内の熱を屋外に移動
空気の動き(風速、風向)を決める
熱交換器を利用して室内の温度を維持

室温を測定
室温分布を測定、推測
ヒートポンプの動作を調整
ファンの動作を調整

これらの類義語
様式、方法、技法、方式など

9

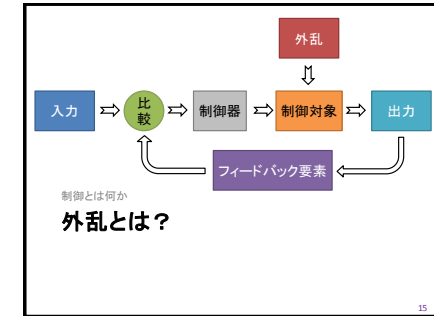
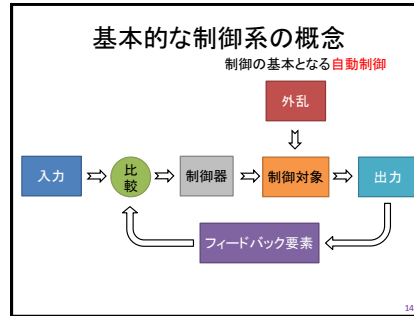
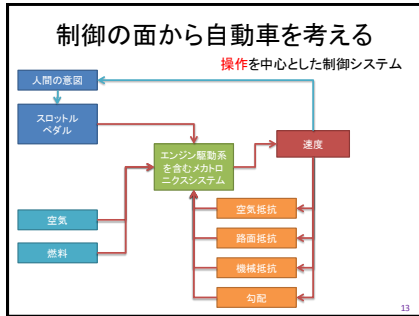


制御のいろいろ

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	制御系	制御系	制御系
例 (乗り物)			

制御のいろいろ

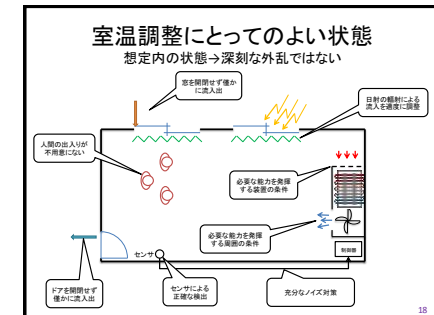
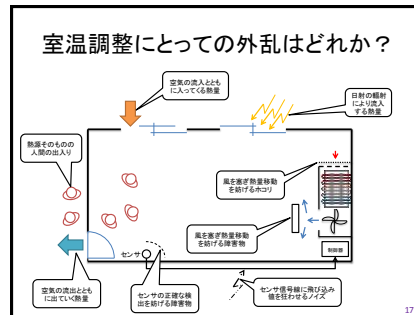
制御法	(遠隔)操作	自動制御	自律制御
役割	機能拡大	支援	代行
目的決定 (意志)	操作者	操作者	操作者
目標設定 (行動原理)	操作者	操作者	制御系
判断	操作者	制御系	制御系
動作	制御系	制御系	制御系
例 (乗り物以外)			



外乱とは？

外乱の影響	原因	起きる問題
入力	<ul style="list-style-type: none"> 入力信号へのノイズ飛来 入力装置の特性劣化(センサなど) 	<ul style="list-style-type: none"> 指令値が変動し応答誤差 特性変化や故障
制御対象	<ul style="list-style-type: none"> 制御対象へのノイズ飛来 制御対象の時系列の特性変化 	<ul style="list-style-type: none"> 特性変化による応答変化 特性変化不明による結果未保証
出力	<ul style="list-style-type: none"> 負荷変動による出力値への影響 動作環境の変化 	<ul style="list-style-type: none"> 通常起きる問題 この影響の軽減が制御の主な目的
フィードバック要素	<ul style="list-style-type: none"> センサへのノイズ飛来 センサの時系列の特性変化 	<ul style="list-style-type: none"> センサ特性が変化し故障 把握できる仕込みがないと応答は大きな誤差を発生し、大変危険

・ 想定した対象の応答を阻害するのが外乱
 ・ 外乱の影響を抑制するのが制御の重要な役割
 ・ しかしながら、外乱の影響は深刻、想定外の結果を引き起こす



保つ制御, 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充して狙いの変化

19

ここで課題1

※制御器は考えなくて構いません。

外乱

入力 ⇒ 比較 ⇒ 制御対象 ⇒ 出力

フィードバック要素

- 正しい答えを書く必要はありません。
- 周囲の人々と討論しながら考えてみましょう。
- 2例以上挙げることも良いと思います。
- 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。
- 分量はレポート用紙半分～1枚くらい?
- 鉛筆書きで充分です。
- 授業中の分はペン入れの必要ありません。

書くといふもの
制御の目的, 何をしたいか
制御の効果, どのようにするか
制御の手段, 上記の各要素

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2～4に関係します。

21

制御モデル

解が3つあっては制御できない

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

1. 微分方程式
 - 運動方程式など
 - 時間変化の関係を表す
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

※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

22

制御モデルの決め方

方法1

- 実際に動作, 計測してパラメータの値を得る

方法2

- 選択した対象の既存の制御モデルに当てはめ
- 仕様書の値を用い,
- 足りない分を実測してパラメータの値を得る

利用できる知見を的確に選択する発想も工学的に重要

23

ラプラス変換

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

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. 初期値に注意しておけば, 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に解ける
2. 式の形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

24

(参考)ラプラス変換表

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

25

一次遅れの応答

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

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

- 入力が出た後
 - 初めは素早く応答
 - 時間が経つにつれて徐々に目標値に漸近
 - 十分に時間が経つにつれて目標値に漸近

26

二次遅れの応答

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

ラプラス変換した伝達関数

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

ここが2次であり, 遅れて応答するから2次遅れ

- 入力が出た後
 - 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)
 - 十分に時間が経つにつれて目標値に漸近

27

(DCブラシ付き)モータのコントロール

実物に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	ロボットアームの関節角	回転角センサ(ポテンシオメータ、ロータリーエンコーダ、レゾルバ)
角速度	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	素早い制御	トルクセンサ
角加速度	飛行機、ヒューマノイドの姿勢制御	外付けのジャイロ
ジャーク	自律ヘリコプタの軌道制御、姿勢制御	演算によって算出

28

(参考)ヘリコプタの自律飛行制御

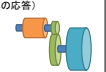
1990年頃の常識：高速なコンピュータでもヘリコプタの完全な姿勢制御・自律制御は極めて困難

センサ性能向上 マイコンレベルで自立安定制御	画像処理での位置決め制御 スマートフォンのコマンドですら制御可能	制御則の研究 自律制御とアクロバット飛行可能な運動制御(ジャーク)
---------------------------	-------------------------------------	--------------------------------------

29

ブラシ付きDCモータの特性を決める要素

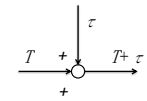
電機子の電気特性 ・抵抗RとインダクタンスLの特性を持つ ・電圧Eが掛かったとき電流はすぐに上昇しない(一次遅れの応答)	磁気回路の特性 ・磁気回路の性能(精度、磁力、コギング)により単位電流あたりの発生トルクが決まる。(即座に応答する。比例)
モータの機械特性 ・イナーシャ(ロータ、ギア、負荷回転体)、軸性抵抗(軸受各部、空気)から構成 ・電機子トルクを受けたとき回転数は徐々に上昇(一次遅れの応答)	逆起電力 ・コイルの巻数や極数、磁気回路により単位角速度あたりの発生電圧E _G が決まる。(即座に発生する。比例) ・電圧E _G は電圧Eを下げ(差)



30

外乱の加わり方

- 想定外の外部の要因により制御の平衡状態を乱す要素
- 初期の状態から制御系の特性(定数)が変わること



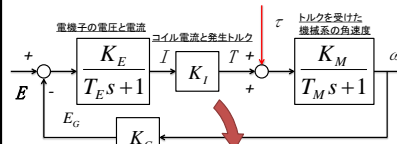
狙い通りの制御ができず、欲しい機能が実現できない

31

モータ特性まとめ

電圧に対する回転数の応答

回転数ではなくトルクに対しての外乱



電機子の電圧と電流、コイル電流と発生トルク、トルクを受けた機械系の角速度

逆起電力による印加電圧の抑制

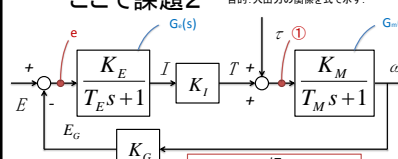
各要素の特性をラプラス変換 → ブロック線図にまとめて表記 代数演算可能

例) $T = K_I I$ 入力に伝達関数をかけたものが出力

32

ここで課題2

目的：入出力の関係を表す。



連立する方程式

- $e = E - E_G$
- $\textcircled{1} = T + \tau$
- $E_G = K_G \omega$
- $T = K_I G_e(s) e$
- $\omega = G_m(s) \textcircled{1}$

以下の変数を用いる $K_G, E, G_e(s), K_I, \tau, G_m(s), \omega$

中間式を以下のように置き、以下の式を求める。

$\omega = ? E + ? \tau$

余裕があれば、中間式を代入。

33

モータ伝達関数

$$\omega(s) = \frac{G_e(s)K_I G_m(s)}{1 + G_e(s)K_I K_G} E + \frac{G_m(s)}{1 + G_e(s)K_I K_G} \tau$$

$$G_e(s) = \frac{K_E}{T_E s + 1}$$

$$G_m(s) = \frac{K_M}{T_M s + 1}$$

伝達関数を代入すると

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

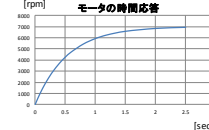
実は2次遅れ系

34

モータの実例を考える

モータのスペックから算出したパラメータ

KE	3.15	A/V
KI	0.0301	Nm/A
KM	4270	rad/s/Nm
KG	0.0302	V/(rad/s)
TE	0.000259	sec
TM	0.00467	sec



2次遅れ(振動系と同じ)としてのパラメータ

ωn	3.64	rad/s
ξ	1.23	1
K1	30.8	rad/s/V
K2	321	rad/s/Nm

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？

35

モータの実例を考える

モータの伝達関数

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

電気回路の応答は充分速い(時定数が小さい) $T_E \rightarrow 0$

$T_E = 0.259[\text{msec}]$

$T_M = 4.67[\text{msec}]$

$$\omega(s) = \frac{K_E K_I K_M}{1 + K_E K_I K_M K_G} E + \frac{K_M}{1 + K_E K_I K_M K_G} \frac{1}{T_M s + 1} \tau$$

36

モータの実例を考える

参考:モータの伝達関数(実例)

$$\omega(s) = \frac{0.259 \times 10^{-3} \times 4.67 \times 10^{-3} s^2 + (0.259 \times 10^{-3} + 4.67 \times 10^{-3}) s + 1 + 0.240 \times 29.5 \times 10^{-3} \times 40.8 \times 10^{-3} \times 3.46 \times 10^{-3} E}{0.259 \times 10^{-3} s^2 + 4.93 \times 10^{-3} s + 1 + 1}$$

$$\omega(s) = \frac{289}{4.67 \times 10^{-3} s^2 + 4.93 \times 10^{-3} s + 1} E + \frac{40.8 \times 10^3}{4.67 \times 10^{-3} s^2 + 4.93 \times 10^{-3} s + 1} \tau$$

$$\omega(s) = \frac{145 [rpm/V]}{2.34 \times 10^{-3} s + 1} E [V] + \frac{20.4 \times 10^3 [rpm/Nm]}{2.34 \times 10^{-3} s + 1} \tau [Nm]$$

振動系でも大きいと1次遅れの応答と酷似

10V掛けると最終的に外乱なしで1450rpm
最大トルクの10%の外乱(17.0mNm)があると、280rpm位回転が落ちる(20%落ち)

モータのモデリング精度

やたらと精密な動力学・制御モデルを作ってしまうと... 目的を良く考えよう

近い値(10年前) 電気特性、動力学特性、摩擦などの非線形要素を細かく設定した上で、歩行ロボット動かすシミュレータ
Pentium4 / 500MHzシングルコア(しかもなかった)クラスで単純な歩行動作10秒のシミュレーションに5~6時間かかる

Core i7: 3.5GHz Quad core(8thread)なら15分位で計算できるかも?

電気回路の特性は極めて早い応答、逆起電力もきんだモデルとして考えても、少しの誤差はない

モータに加える電圧を入力とし、モータ回転数ωを出力として、単なる一次遅れのモデルだと考えても良い

突如時間で動力学シミュレーションを行いながら、その結果と指令値(軌道計画)と現在の観測値(応答)を比較しながら制御すると高度な制御を行うことができる

目的を考える、演算精度と演算速度のバランスを考える必要がある

課題2で折角モータの伝達関数を算出したのですが...

要求仕様

- 誤差の要求は厳しくない(数%あっても問題ない)
- 実時間で制御を行う必要性

↓

- 制御モデルは簡潔であることが必要
- 課題2の制御モデルより更に簡潔なモデルを利用

- 一度、精密なモデルを作る
- 目的に立ち戻り、何を重視するのか考え直す
- 工学的に有効な考え方

モデルを簡素化したときに忘れてはいけないこと

- 簡素化した理由
 - 実際のモータの応答が1次遅れ
 - 電気回路の時定数が十分に小さい性質
- ゲイン係数Kの中身
 - 中身が変わった訳ではない
 - 係数ごとに単位(単位なしは[1])を併せて確認

$$K = K_v K_t K_m$$

$$[rpm/V] = [A/V][Nm/A][rpm/Nm]$$

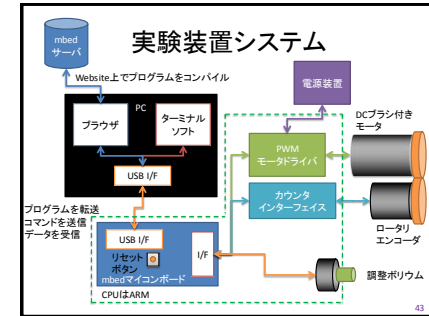
一次遅れの系のパラメータ

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

ラプラス変換した伝達関数

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

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

$$E \xrightarrow{\frac{K}{Ts+1}} \omega$$


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

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

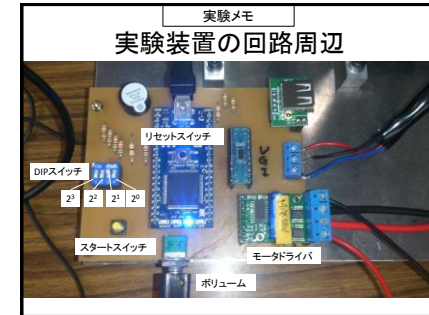
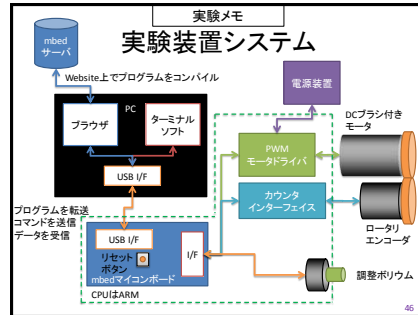
T: 時定数 $(1 - (1/e)) \approx 63.2\%$ になるまでの時間

K: ゲイン係数

4~5T: 整定時間

Kは出力(回転数)と入力(電圧)の比
K[mNm/s]/E[V]でもよいが結果は変わらない

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



課題3と4について

モータ	駆動電圧	出力	起動トルク
タヤマモータ	7.2 V	63.2 W	196 mNm
マブチモータ	24 V	137W	388 mNm
シチズンモータ	12 V	14.6 W	118 mNm
マクソンモータ	48 V(30V, 24V)	150W	2560 mNm

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

- 無駄時間は求める必要はありません。(僅少で難しい)
- 係数Kについては回転数/モータ電源電圧
- 時定数Tは応答が63.2%に達した時間から求めてください。
- 求めたTとKを理論式に代入し、最適な求め方で実験結果とKの値でグラフを作成してください。入力は上記電圧値。
- 説明と考察は必ず書いてください。(参考)

事実: 現象そのもの。実験結果そのもの
観察: 努めて客観的立場からの現象・状態の記録
考察: 客観的事実(実験値)を元に論理的に得た知見(ほぼ事実を説明)
推論: 客観的事実(実験値)と自らの知見から導出される結論や新たな情報
予測: 従来の知見を基に考え得る未知の事象への解釈(考察を伴うことで妥当性向上)
推測: 従来の知見を基に考え得る未知の事象への解釈(考察を伴うことで妥当性向上)
解釈・想像: 自らの知見による主観に基づく考え(実験時の状態など未測定的事象)
感想: 主観による意見。情緒的な表現。事実そのものにはほとんど言及していない。

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5~6に關係。

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
2. 電圧と回転数の関係は分かった
3. 応答は $y(t) = K(1 - e^{-\frac{t}{T}})u(t)$ で間違いない

制御は完璧ではないか？
でもそんなことはない。
何故か？

外乱の影響を受けることが目に見えている。

$$o(s) = \frac{K_p K_u K_m}{1 + K_p K_u K_m K_D s} E + \frac{K_u}{1 + K_p K_u K_m K_D s} r$$

オープンループ制御系

指令値 → 制御対象 → 応答

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. 外乱の影響が僅少か、深刻でない判断可能な場合

応答に一貫性・再現性がある

オープンループ制御系で起こる問題

指令値 + 外乱 → 制御対象 → 応答 + 外乱

- 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

制御対象の素の特性を利用する方法
必ずしも完全ではない制御法

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

指令値 → (+) → 制御量 (Kp) → 制御対象 → 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-出力 → 偏差を制御量として修正に利用

ここで課題5

レポートにはもとの伝達関数と比べてどのように変化したか示しておくこと

直接に実験します。

ヒント 連立させる式

$$W_{ref} = \frac{1}{K} W_{ref}$$

$$e = V_{ref} - FB$$

$$V_p = K_p e$$

$$FB = \frac{1}{K} W$$

求める式の形

$$W = ??? \frac{W_{ref}}{K} + ??? \frac{V_{ref}}{K_p K_u}$$

または $K = K_p K_u K_m$ を利用して

$$W = ??? \frac{W_{ref}}{K} + ??? \frac{V_{ref}}{K_p K_u} = ??? W_{ref} + ??? V_{ref}$$

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	$\frac{T}{2}$
Chien, Hrones and Reswick	$0.3(0.7)T$
Cohen and Coon	$\frac{T}{2} + \frac{1}{3TR}$

比例ゲイン	
Kp	減少
減少	短
増加	長
行過定量	小
整定時間	大
	要調整

1: 時定数 (t = (1/n) * 63.2% になるまでの時間)
 n: ゲイン係数
 n+1: 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

$$G(s) = \frac{K_p K_u}{1 + K_p K_u K_m K_D s} = \frac{K_p K_u}{1 + K_p K_u K_m K_D s + 1}$$

ここで実験2・1

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

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7~8に関係.

57

実験2.1を通しての疑問
思い通り応答にならなかった？

58

1次遅れ系に比例フィードバック制御を掛けた式を見てみよう

$$W(s) = \frac{\frac{K_p K}{1+K_p} \frac{W_{ref}}{K} + \frac{1}{1+K_p} \frac{K}{Ts+1} \frac{I_{dist}}{K_p K}}{\frac{1}{1+K_p} \frac{K}{Ts+1} + \frac{1}{1+K_p} \frac{K}{Ts+1} \frac{1}{K_p K}}$$

ここで $K = K_p K K_p$ を利用して

$$W(s) = \frac{\frac{K_p}{1+K_p} W_{ref} + \frac{1}{1+K_p} \frac{K}{Ts+1} I_{dist}}{\frac{1}{1+K_p} \frac{K}{Ts+1} + \frac{1}{1+K_p} \frac{K}{Ts+1}}$$

K_p の値によって指令値と外乱に対する感度を変えることができそう
 K_p の値によって元の時定数より時定数を短くできそう
 K_p の値によって収束時の応答が変化しそう
 外乱は機械系の特性に依存しそう

59

外乱を無視して
 比例フィードバック系を考えてみよう

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

組 10Vで1000rpmのモータの場合 $K=1000(\text{rpm/V})$ となる

K_p を上げると応答が速くなる時定数が1/5(元の5倍速く収束)の実システムが本当に実現できるだろうか？
 やるとしたら、一時的に10倍位のゲイン(電圧)をかけることになる。

K_p を下げると現実的な時定数(90%でちょっと遅い)になるが、応答が1/5に下がった実システムが果たして役立つだろうか？

単純な比例フィードバックだけではダメな気がしないだろうか？

60

単純比例フィードバック制御の問題

- 定常偏差(ズレ)が生じる。

これがあるので制御器、制御対象の感度(ゲイン)が低いと偏差が増える

フィードバックを掛けない
 $\omega(t) = K_p K (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \omega_{ref}$

フィードバックを掛けた
 $\omega(t) = \frac{K_p}{1+K_p} K (2\gamma) \omega_{ref}$

- 外乱あるいはモデル化していない要素の影響が大きくて、欲しい応答にならない。

フィードバックの仕組みを用いても必ずしも欲しい応答特性であるとは限らない

61

比例フィードバック制御した時の応答

10Vで1000rpmのモータの場合 $K=1000(\text{rpm/V})$ となる

K_p を変化させたときのフィードバック制御系の応答: 入力5V

大きな定常偏差が発生

時定数は大きく改善される

K_p の値	0.1	0.5	1	5	30
K'	90.9	33.3	50.0	63.3	90.9
T'	0.909	0.667	0.500	0.333	0.0909

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

62

定常偏差を見越した修正

$\frac{1}{K}$, $\frac{1+K_p}{K_p}$, $\frac{K}{Ts+1}$, $\frac{1}{K}$, V_p

$K_p=1.0$ ではゲインが半分になるのでその分を修正して倍にしておく
 ステップ入力時、 V_p では大きなゲイン(電圧)となる

比例ゲインと修正係数

$K_p=1.0$ の値	0.0001	0.0005	0.001	0.005	0.01
制御器ゲイン	54.9	14.9	9.93	5.96	5.46
補正比	11.0	3.00	2.00	1.20	1.10
V_p	0.909	0.667	0.500	0.167	0.0909

制御器ゲインを大きくすると通常の入力で、応答特性改善

フィードバックの効果は薄い もともとの入力は5V

63

入力値で定常応答の調整を試みる

定常偏差を見越した入力を加えたときのフィードバック制御系の応答

1次遅れ	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46
1次遅れ	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46
1次遅れ	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46
1次遅れ	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46
1次遅れ	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46

制御器ゲインを大きくすると通常の入力で、応答特性改善

フィードバックの効果は薄い もともとの入力は5V

64

フィードバックにおける偏差

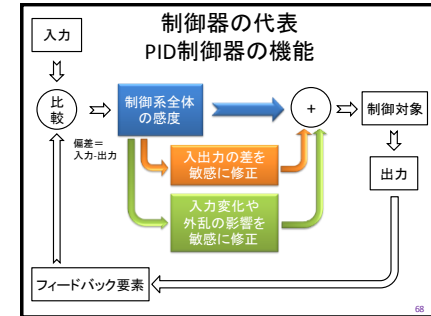
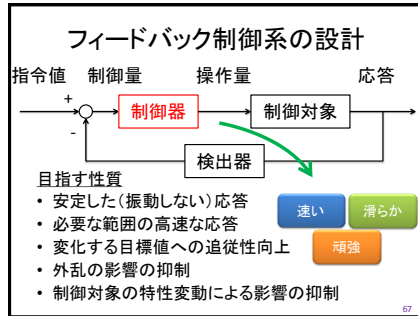
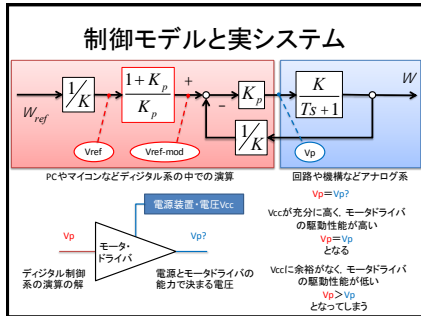
K_p を変化させたときの現在の出力と偏差の関係
 定常偏差を見越した入力を加えたときの出力と偏差の関係

10V用のモータに高電圧を掛けることができるのだろうか？

電源装置やモータドライバの能力を超える供給はできない

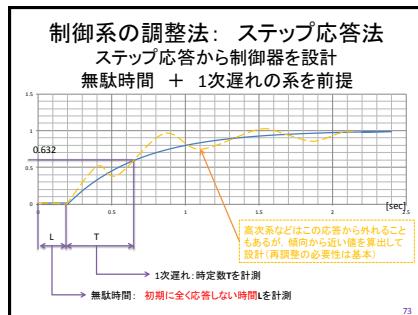
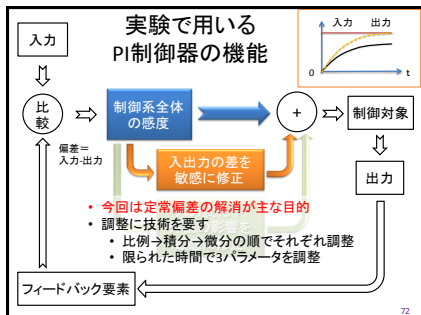
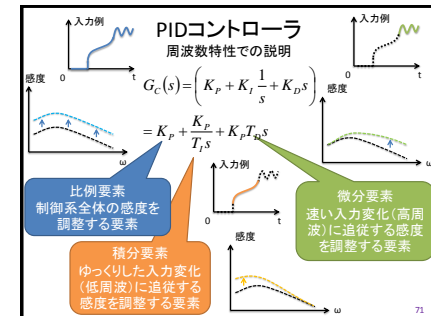
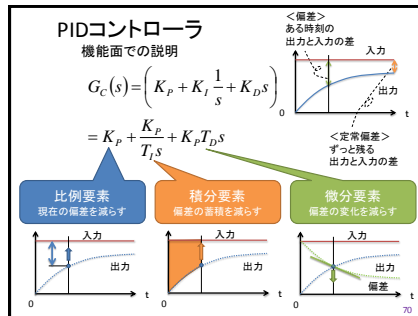
5Vであれば、係数をかけることで5000rpmとなり、目標回転数を維持しようとする

65



PID各要素について言い換えると

	比例(P)要素	積分(I)要素	微分(D)要素
名前の由来	偏差に比例	偏差の積分に比例	偏差の微分に比例
修正対象	現在の偏差	偏差の蓄積(過去)	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偏差 外乱の影響	指令値の変化(偏差の変化) 外乱の影響
敏感な周波数特性	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	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
扱いにくい点は?	定常偏差解消せず	行き過ぎが激性 収束に時間がかかる 変化に対して限界	定常偏差解消せず 高速外乱(ノイズ)の影響大



本日の実験では

ステップ応答法を基に試行錯誤して調整する

PI制御を掛けると2次遅れの応答となる

制御器	比例ゲインKp	積分時間Ti	微分時間Td
P	1/(RL)	T/L	-
PI	0.9/(RL)	0.9T/L	3.3L
PID	1.2/(RL)	1.2T/L	2L

制御器	比例ゲインKp	積分時間Ti	微分時間Td
行き過ぎなし	P 0.3/(RL)	0.3T/L	-
	PI 0.35/(RL)	0.35T/L	1.2T
	PID 0.6/(RL)	0.6T/L	T
行き過ぎ20%	P 0.7/(RL)	0.7T/L	-
	PI 0.6/(RL)	0.6T/L	T
	PID 0.95/(RL)	0.95T/L	1.35T

制御器	比例ゲインKp	積分時間Ti	微分時間Td
P	1/(RL) + 1/(3TR)	-	-
PD	5/(4RL) + 1/(6TR)	-	(6L - 2(L+2T))/(12 + 3(L/T))
PI	9/(10RL) + 1/(12TR)	(3L + 3(L+2T))/(9 + 20(L/T))	-
PID	4/(3RL) + 1/(4TR)	(3L + 6(L+2T))/(13 + 8(L/T))	4L/(11 + 2(L/T))

PI制御を掛けると2次遅れの応答となるのは何故か？

$$\omega(s) = \frac{\left(K_p + \frac{K_p}{T_I s} \right) \frac{K}{Ts+1} \omega_{ref}(s)}{1 + \left(K_p + \frac{K_p}{T_I s} \right) \frac{K}{Ts+1} \frac{1}{K}} = \frac{K_p K}{T} \frac{Ts+1}{Ts+1} \frac{\omega_{ref}(s)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$= \frac{KT_p \omega_n^2 s + K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \frac{\omega_{ref}(s)}{K} = \frac{T_p \omega_n^2 s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \omega_{ref}(s)$$

75

PI制御による応答

指令値を大きく0refのステップ入力とすると

$$W(s) = \frac{T_I W_n^2 s + W_n^2}{s^2 + 2\zeta W_n s + W_n^2} \frac{W_{ref}}{s}$$

$$W_n = \sqrt{\frac{K_p}{T_I} \frac{1}{T}}$$

$$Z = \frac{1 + K_p T}{2} \sqrt{\frac{1}{K_p} \frac{1}{T}}$$

2次遅れのインパルス応答 2次遅れのステップ応答

76

行き過ぎ(オーバーシュート)

- 基本は一次遅れの応答の範囲
- 目標値を超えて一旦20%程度行き過ぎる応答も選択可能

※この範囲に収まるように本日の実験では調整

77

制御器の調整は簡単ではない

自身で計測してから設計したパラメータ通りの調整をしても上手くないことが普通に起こることを体験して欲しい。

- PI制御では 過剰減衰は改善 定常偏差が残る
- PD制御では 定常偏差解消 行き過ぎが発生

78

ここで実験2・2

課題7 制御器の設計
課題8 外乱へのロバスト性または単純フィードバックとの比較

79

PI制御実験メモ1/3

L	T	比例ゲイン		積分時間	
		Kp	Ti	減少	増大
長	短	増大	減少	増大	減少
短	長	減少	増大	減少	増大
増大	増大	増大	増大	増大	増大
減少	減少	減少	減少	減少	減少

手法	比例ゲインKp	積分時間Ti
Ziegler and Nichols	0.9T	3.33L
Chien,rones and Reswick	0.35(0.6)T	1.2(1.0)Tまたは0.6(0.7)T
Cohen and Coon	0.9 / RL + 127R	307L + 3L^2 / 9T + 20L

78文字は20%オーバーシュートを許容
Kp, Kとして調整する際、過剰する。

80

PI制御実験メモ2/3

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

- 目標値を超えて一旦20%程度行き過ぎる応答も選択可能
- 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

81

PI制御実験メモ3/3 制御器の各要素の働き

要素	小さくすると	大きくすると
比例要素	Kpを小さく 特性変化 ・定常偏差が大きくなる ・応答が遅やかになる ・系の安定性が向上	Kpを大きく ・定常偏差が小さくなる ・応答が速くなる ・系の安定性が減少
積分要素	Tiを長く 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	Tiを短く ・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

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

82

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

83

実験を通しての疑問

今日の実験では何をやったのか？

84

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・1: 比例フィードバック制御の問題点を理解する	課題6
6 実験2・2: PI制御で制御特性を改善する	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

85

実験を通しての疑問

モータの種類と使い分けはどうするのか？

86

モータの価値

Performance (Specification)	Additional Value
<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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)

低スベックでも, 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

87

高性能モータと汎用モータのスペック

効率が違う
感度が違う
極数が違い滑らかさが違う
保証されているスペックの値が違う
だから値段が違う

88

高性能モータと汎用モータのスペック

(知っておこう)

- 値段が安くても品質が悪いとは言いきれない
- 違うのは性能
- 家電・情報機器の小型モータは単価¥5~¥10

安いハイパス類は全数検査できないから信頼性を上げておく必要あり

89

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)
高速度	動的に正確に動く
極低速時の滑らかな回転	低摩擦軸受 角 精度よく動く
高いエネルギー効率	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

90

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？

91

モータの制御器の調整の意義

目的

- モータ特性と負荷特性のマッチング

手段

- 元々のモータの特性を変換して目的を実現するのが制御器の役割

効果

- 時定数を調整(追従性)
- 出力特性を調整

	高性能モータに対して	汎用モータに対して
高すぎる出力を抑える	-	-
高すぎる速度応性を抑える	-	-
弱い出力に対し摩擦等の外乱の影響を抑える	-	-

目的(使い道)に応じた特性のモータを選定した上で制御をかけるのが効果的なメカトロニクス系の設計法

制御とは抑制して開する(思い通りに動かす)という意味通り

- 素の対象に仕組みを用いて思い通りの特性にはできる
- それ以上のことができるわけではない

92

理論を考える理由

パラメータ調整(チューニング)だけでも仕事をした気になる。(理由は実験により手間がかかるから)	制御理論を知っておけば、制御系をデザインできるので、欲しい特性を得るのが簡単になる。 <ul style="list-style-type: none"> パラメータの計算 シミュレーションでの予想
理論や計算式の解き方(使い方を覚えることだけを目的としてしまうのはもったいない)	理論と手法の効果を考えることが重要 <ul style="list-style-type: none"> 理論の背景 計算式の構造と性質 パラメータの影響 不具合、問題が見える 問題を的確に説明できる

6. レポート課題

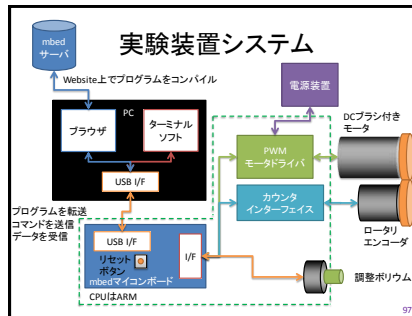
レポート体裁と締切について

- 自分の言葉で即座にレポート化し、必要な情報の十分な記載が大事と考えている。
- とは言い、体裁を整えた方が損をしない。
 - 書類の雛型、締め切り、不文律的な常識が重視されるが多々あり、印象が格段に異なる。
- 体裁・内容は次のスライドに示す。
- 締め切りは来週の実験前。
- 提出日は忘れずに書くこと。

レポートの作成

No	項目	必要	内容・備考
1	実験の目的	要	自分で見出した目的・意義を書いて下さい テキストの文章を写す必要はありません。
2	方法原理	一	資料・課題に含まれています
3	装置・器具	要	次スライドを基に説明付きで書いて下さい
4	実験結果	一	課題に含まれています
5	課題・考察	要	課題1~10Iに相当します
6	結論	要	結論と全体を通して理解した事を自分の言葉で書いて下さい(半ページ位)
7	参考文献	要	課題1~10Iに関して必要なものを記して下さい「文献名、著者、出版社または学会、出版年、ページ」あるいはURLなど
8	その他	要	意見、要望、提案、希望などを書くことが望ましい

実験装置システム



レポート作成にあたって

- 授業中の作成箇所
 - 手書きのままでも構いません。
 - （ペン入れは必要ありません。）
- 応答グラフ
 - PCIによる出力、方眼紙への手書きは問いません。
 - 必要な応答が示されていることが重要です。
- 持ち帰って作成した部分(特に①, ⑥, ⑦)
 - ペンによる手書きとして下さい。
- 自身の理解とその説明を特に重視します。
 - 上記は当実験の決まり(実験中理解、すぐ反映を重視)
 - 他の実験課題は担当の研究室の指示を理解して下さい。

「参考文献」の書き方

単行本(教科書)の場合
 (1) 著者名: 書名, 始めのページ/終わりのページ, 発行所(発行年).
 例
 (1) 江原伸郎, 他. 動的システムの解析と制御, pp10-15, コロナ社(1991).

論文の場合
 (2) 著者名: 論文題目, 雑誌名, 巻(号), 始めのページ/終わりのページ(発行年).
 例
 (2) 加藤恵輔, 広瀬茂男, 形状補償型マスタースレーブアームの提案と基礎実験. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 5, pp.752-757, 2000.

URLの場合
 (3) webサイト管理人(著者), 参照したページ, サイト名.(分かれれば発行年), URL
 例
 (3) 浅井 徹, フィードバック制御 VS フィードフォワード制御 . はじめての制御工学. http://www.watt.mech.eng.osaka-u.ac.jp/~tasa/control/control_p3.html

手動計測 と 自動計測

特徴	特徴
特徴 - 現象を観察しながら計測 利点 - 現象を判断、考察しながら計測 - 計測結果に応じ追加パラメータの計測や計測法の変更も可能 - 計測そのものに技能を要する場合に有効 欠点 - 計測に集中、専念する必要 - 計測ミスが発生するリスク - 計測条件変動の可能性(再現性)	特徴 - 現象を計測する装置を利用 利点 - 現象そのものをじっくり観察可能 - 確実な計測データを得られる - 計測条件が確実に管理可能 欠点 - 他の作業を行うこともでき、計測対象外の現象を見落とす可能性 - 計測法や実験そのものの是非に関する判断が遅れる可能性 - 計測対象や計測法の変更が容易ではない

現象そのものについて調べながら、試行錯誤的に入念な観測する場合に適す。素早い計測で試行・検討するにも良い。

設定条件を細く変化させながら網羅的に検討する場合に適す。計測通りの精度の良い計測にも良い。

グラフは何故描くか？

自動計測の場合、誰もがデータを共有できる。(データを持っていけば誰でもグラフが描ける)

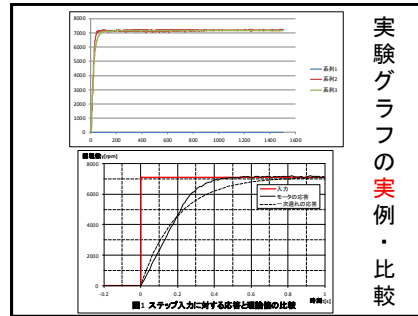
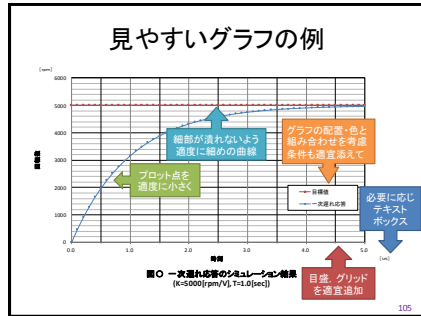
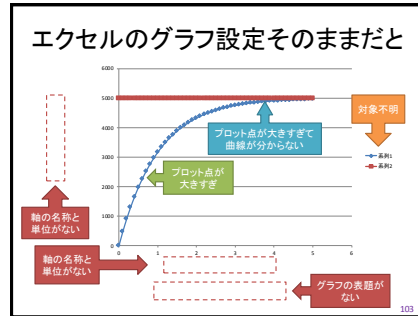
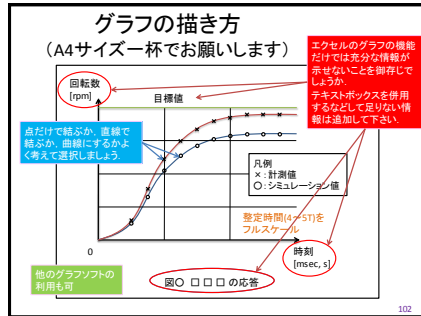
グラフを描く以上、

- 現象が正確に反映されている
- 伝えるべき付帯情報が添えられている

だけではなく、

- 考察するにあたって何を伝えたいか
- 読み手にどのように理解してほしいか

といった**意思**を理解されるようにしたいため。



考察の着眼点

実験時

- 実験条件の影響
- 設定した変数(パラメータ)の影響・効果
- 予想した結果との比較(予測するシミュレーションを行った場合)
- 実験方法間の違いの比較
- 結果についての妥当性(失敗や芳しくないことも含めて)
- 実験環境や装置の状態について(直接測定していなかったが観察できたことなど)

持ち帰り

- 結果等を正確に整理しグラフ等を作成
- 結果や実験全体を振り返って理解
- 文献等を調査して関連する情報(手法、理論、知見)を獲得し、実験結果を再評価
- 実験を通して理解した知見に基づき応用
- 今後につながるであろう展望を思索し、実験を通しての目的と問題点を再評価

客観的なレポート作成: 考察

主観を入れてはいけないのか?

客観性は求められるが、主観なしで考察はできない

- 事実に基づく自身の理解
- 理解したことに対する判断
- 俯瞰的推論
- 実験で得た知見の今後の応用法
- 実験そのものの課題

について、現象そのものなのか、自身の見識が含まれているのかを明確に示し、見出しや章立てなどで工夫して客観性の度合いが分かるように書くことよ。

・ 感想: 主観による意見、情緒的な表現。事実そのものにはほとんど言及していない。

例) 成功はたまたま運がよかったのだろう。

考察の記述例

設定した変性
 $K_p=○○, K_i=○○$ を以下の式〜から算出した。
 式)〜
 この時の条件は△である。

実験前の問題 実験の目的 実験の手段

直前の実験時に $K_p=○○$ にしたところ、応答が△であったため、これを△のように改善する必要があると判断したため、上記のような条件を選定した。

実験結果・観察

計測したデータと基とした事実
観察した事実
実験結果の差異
事実の確認
事実からの明らかな知見
知見から導かれる推論と根拠
観察からの推論と根拠
実験で得た事実、知見から導かれる予測

・ □は参考文献、*は参考文献