

Keio University  
1888  
CREATING GLOBAL FUTURE

第1回「実践！ロボット教育・研究フォーラム」(主催 ZMP)

## e-nuvo WHEEL を用いた制御教育

2009.07.22(水) 11:50 ~ 12:20 機械産業記念事業財団 (TEPIA)

慶應義塾大学  
理工学部 物理情報工学科

足立 修一

adachi@appi.keio.ac.jp  
http://arx.appi.keio.ac.jp/

Adachi Lab.  
MODEL-BASED CONTROL

### 制御理論の流れ

- **古典制御 (PID制御)** (~1960)
  - 周波数領域における設計法
  - 制御エンジニアの直観
  - 試行錯誤
- **現代制御 (状態空間法)** (1960~)
  - 時間領域における設計法
  - 最適制御
  - 数学的な解法のため、コンピュータのプログラミングには向いているが、制御エンジニアの直観が使いにくい
- **ロバスト制御 ( $H^\infty$ 制御)** (1980~)
  - 周波数領域における直観と時間領域における計算法
  - モデルの不確かさを考慮した現実的な問題設定
  - 数学的には難解だが、CADが完備
- **モデル予測制御** (1990~)
  - 時間領域における設計法
  - 制約を考慮した最適制御
  - 現実的な問題設定

MBC (Model-Base Control)

Adachi Lab.

### ZMPとの出会い

- 2006年慶大で研究室を立ち上げるにあたって、制御工学の教育・研究用の実験装置を探していた。
- 機械学会 関東支部大会(東洋大, 2006.3)で e-nuvo WHEEL に出会う
  - ◆ 制御工学の応用例の一つとしてのロボット
  - ◆ 研究室配属に向けた足立研究室の宣伝
- 従来の倒立振子に代わる新しい実験装置がほしかった
- ZMPの技術者から e-nuvo WHEEL 開発の相談を受け、制御工学の面からアドバイス
- 「現代制御理論による倒立二輪ロボットの制御実験」をようやく執筆

Adachi Lab.

### 制御のためのモデリングの重要性

- **モデリング**
  - 対象とするシステムのふるまいを特徴づけるモデルを構築すること
  - 複雑な物理、化学、社会現象を**モデル(model)**という単純化された数学的表現に変換 (モデルの原義: mode(小さな尺度) ⇒ modern)
  - ヨーロッパで誕生した近代科学の基礎
- **モデルとは、対象の本質的な部分に焦点を当て特定の形式で表現したもの ⇒ モデリング ≒ 近似 ⇒ プラモデルの例**
- **Model-Based OOO**
  - Model-Based Development (MBD)
  - Model-Based Control (MBC)
- ほとんどの制御理論は**モデルベースアプローチ**
  - **現代制御**(状態空間法) (1960~)
  - **ロバスト制御** (1980~)
  - **モデル予測制御** (1990~)

Adachi Lab.

### システム制御工学

制御に関わる分野や対象は限定されたものでない。  
「動き」(ダイナミクス) があるものにはすべて関連している。

システム制御理論は横断的で概念指向的な学問  
自然科学に基礎をもたない「純粋工学理論」

ダイナミクスがあるものに対して、制御は適用できる!

#### ダイナミクス (dynamics)

- **ダイナミクス**: 機械では...「動力学」、電気では...「動特性」
- 数学的には、動きが微分方程式によって記述される。
- 制御工学ではダイナミクスをもつシステム(ダイナミカルシステム)が対象

Adachi Lab.

### 慶應義塾大学 物理情報工学科の制御関連科目

- 2年春:「物理情報数学A」(必修)・・・複素関数論、フーリエ解析
- 2年春:「物理情報数学B」(必修)・・・線形代数、ラプラス変換、z変換
- 3年春:「**制御工学**」(必修)・・・古典制御から現代制御の初歩
  - 受講生120名程度・・・とても多い!(少人数教育からは程遠い)
  - 授業ではMATLABは使用していない。
- 3年春:物理情報工学実験1・・・サーボ系の実験
- 3年秋:「**モデリングと制御**」(選択)・・・システム同定
- 3年秋:物理情報工学実験2・・・**倒立振子の実験**
  - 実験に予算とマンパワーをかけている
  - すべての教員が1テーマを担当
  - 学生は、2人一組で実験
- 大学院:「**モデルベース制御理論**」
  - ・・・モデル予測制御とカルマンフィルタ

Adachi Lab.

## 制御工学教育

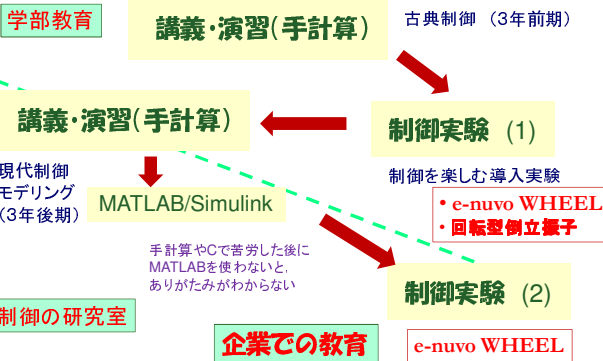
- 学生の制御に対するイメージ
  - 制御工学は数式ばかりで難しい!?
  - なんの役に立つのかわからない?
- 制御工学は、さまざまな制御対象に対して一般的に成り立つ理論展開を行うので、議論が抽象的
  - ⇒ **抽象的な考え方が苦手な学生が多い**
  - その代わりに、ロボットのように具体的に目に見えて動くようなものには興味をもつ
  - 高校生には、機械系は人気があり、電気系は人気がない
- **抽象的な制御理論と、具体的な制御実験をバランスよく、教育することが重要（もちろん、演習も必要）**

**講義、演習、実験は三位一体**

## 足立研究室における e-nuvo WHEEL の活用

- 足立研導入教育 慶大では3年生の12月に研究室配属決定
  - 春休みから教育を行うことが可能だが、足立研では3月下旬から洋書輪講を開始
  - 導入実験
    - MATLAB/Simulink
    - **e-nuvo WHEEL, e-nuvo WALK**
    - SICE DD Arm
  - 技術報告書作成訓練
    - LaTeX
  - 5月に新4年生の発表会
- 卒論テーマとして
  - 外乱オブザーバを用いた制御
  - 新しいテーマを4年生と検討中
    - dSPACE(有線) → 無線
    - ビジュアルフィードバック

## 制御工学教育



## 古くて新しいカルマンフィルタ

- 1960年に提案されたカルマンフィルタは、1960年代米国で行われたアポロ計画で採用され、広く知られるようになった。
  - 対象の観測データに基づいて、状態を推定
  - カルマンフィルタは、究極のモデルベースアプローチ
  - モデリング技術の発展により、高精度なモデリングが可能になってきた
  - ハードセンサ ⇒ ソフトセンサ (状態推定器)
  - さまざまな産業分野にカルマンフィルタが適用
- Kalman Filter (KF) ... 線形, ガウシアン
  - Extended Kalman Filter (EKF) ... 非線形, ガウシアン
  - Unscented Kalman Filter (UKF) ... 非線形, ガウシアン
  - Particle Filter ... 非線形, 非ガウシアン (モンテカルロ法)
  - Ensemble Kalman Filter (EnKF) ... データ同化

## 企業における制御教育

- 理工系卒業生であれば、(おそらく)古典制御までの最低限の知識はあるだろう。
  - しかし、すべての大学で現代制御まで学部で講義しているわけではない。
  - 大学院における授業は、教員の専門分野に依存することが多く、残念ながら大学院では系統的な制御工学は行われていない。
  - 大学卒業後、何年もたつと、大学で習ったことはほとんど忘れていく。
    - ⇒ **実験を交えた制御工学教育の必要性**
- 
- 大企業では、大学教員を講師に迎えた制御セミナーを開講しているところもある。
  - それができない場合には、社内の制御専門家による自前のセミナーの開催が効果的(人に教えることによって、理解が深まる)
  - SICE(計測自動制御学会)制御部門の制御セミナー(現代制御, ロバスト制御, システム同定など)も充実

## まとめ

- 制御教育における制御実験の重要性について述べた。
  - 制御工学とモデリングについて簡単にまとめた。
  - 足立研における e-nuvo WHEEL の活用例を紹介した。
- 
- 不況のときこそ『制御』の出番だと思う。  
企業の制御開発・研究者のご活躍を期待します。