

## 先端的制御理論の成果を組込みソフトウェアで実現するプロジェクト

数理情報システム工学科 汐月哲夫

### 1. 緒言

本プロジェクトの目的は、近年めざましい発展を見せていく数多くの制御理論の成果を「ものづくり」に適用するにあたり、その実装技術を教育的かつ効率的に行う方法論を確立することである。その手段として、近年話題になっている組込みソフトウェア（組込みシステム）をとりあげ、具体的な教材開発やカリキュラム構成の検討を行う。

### 2. 制御理論と制御技術

制御理論や技術はものづくりの現場において重要な要素のひとつであり、工科系のほとんどの大学、高専、専門学校のカリキュラムに組込まれている。しかし、システムの振舞という抽象的概念を対象としているため、電気・機械など物理的対象を持つ分野に比べて内容の理解や現場への応用が困難であるという問題がある。その解決策のひとつとして、古くから制御系解析・設計用 FDG の研究が行われ、その成果として近年では便利なツールが産業界で大いに活用されている。しかし、ブラックボックス化された便利なツールは知的かつ創造的な設計技術者の育成や設計精度の高度化にはかえって問題があるという指摘もある。このような横断的分野の宿命的とも言える問題を解決するためのツールにはどのような要素が必要であるか考える。

制御工学の第一段階として一般に取り上げられる古典制御理論では、信号をそのラプラス変換で、システムを伝達関数で表現し、設計問題を次のように記述するのが一般的である。

**問題：** <制御対象> $x \rightarrow v, / \rightarrow v, #$ をそれぞれ入力、出力とする制御対象が伝達関数 $S \rightarrow v, #$ でモデル化されている。<制御目的>このシステムの出力 $| \rightarrow v, #$ を別途与えられる目標軌道 $u \rightarrow v, #$ にできるだけ近づけるために入力 $x \rightarrow v, #$ を決定する。<制御器の構造>偏差 $h \rightarrow v, # \rightarrow v, 0 | \rightarrow v, #$ を入力とし、 $x \rightarrow v, #$ を出力とするフィードバック制御器 $F \rightarrow v, #$ を考える。<設計問題> 上記の制御対象と制御器からなる閉ループシステムが安定となり、 $u \rightarrow v, #$ から $| \rightarrow v, #$ の特性が望ましいものとなるように $F \rightarrow v, #$ を決定せよ。（EJ5 参照）

この問題設定を詳細化・変形・条件付加など多様化することにより様々な問題を設定しその設計手法の組

み合わせを考えることができる。そして、これを体系化したものが制御系設計理論であると考えることもできる。例えば、SIG 制御は#F → v, #を特定の構造に条件付した問題、ロバスト制御は S → v, #に不確定性を考慮した問題、Kblq 併制御は「望ましい振舞い」を Kblq 併ノルムで定量化した問題のように翻訳することができる。そして、テキストには問題設定の由来、解決のアイデア、設計の方法論、有効性の根拠などが数学的手法やシミュレーションや実験例で解説されている<sup>+1</sup>。

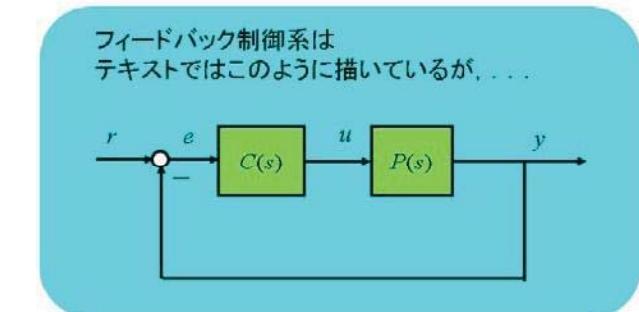


Fig.2. フィードバック制御の問題設定

ものづくりの観点からこの問題を考えるとき、F → v, #を求めるという制御系設計と同様に、求めた F → v, #を実際の装置として実現する実装プロセスや運用・評価プロセスは非常に重要である。本来一体であるはずのこの設計と実装・評価は現実の研究・開発・製造においては分断されているという事実があり、その弊害については昔から指摘されている。理論に精通した設計担当者の多くは実装担当者が先端的理論を修得し積極的にものづくりに反映してくれることを期待しているが、実装担当者はリスクの少ない従来法の継続に偏りがちなのである。現代制御理論やロバスト制御理論などの誕生から 40 年以上も経過しているにも関わらず、いまだに現場の制御器の 90 % 以上は従来型の SIG 制御であるという現実はこの保守的ものづくり指向と無関係ではない。

このような観点から本プロジェクトでは制御理論と設計論を包括的に体感できるツールの開発に焦点を置く。

### 3. 開発装置の機能と構成

制御とはシステムの振舞いに着目したモデリング・解析・設計の理論と方法論の体系であると言えるが、これは工学のみならず生理学、経済学、経営工学などシステムの概念が用いられるあらゆる分野に応用可能である。制御理論の導入として**フィードバック制御**と**安定論**を取り上げているテキストは多い。歴史的発明として M.I. *Stewart* が蒸気機関に適用したガバナを紹介し、電磁気学で有名な M.F. *Faraday* が数学的手法でその安定性を解析した事実はよく知られている。以後、このような理論と技術の相互補完的な議論の中でこれらが体系化され今日に至っている。このような理論と技術の相互連携の成功体験をさせることができることが第一歩であると考える<sup>5)</sup>。

このような主旨から、フィードバックや安定性の概念の体感装置として、倒立振子、ガバナなどが教育・研修用教材としてすでに市販され現場で活用されている。本プロジェクトでは今後の多彩な展開を想定して制御対象としては非常に簡単な DC サーボモータを用いた回転型円盤を採用した。これに回転角センサを付加しパソコンを用いて回転角度や回転速度を制御するシステム構成を提案する。図 1# は製作した実験装置の概観であるが、表 2, 3, 4 に示す機能を持った機器やソフトウェアから構成されている。

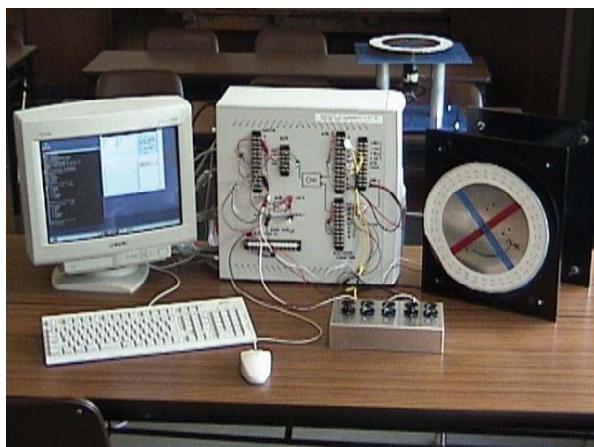


Fig.1. 実験装置の概観

Table 1. 回転円盤装置の構成

構成要素	用途
回転円盤	慣性・摩擦負荷
DC サーボモータ	電流・トルク変換
ロータリエンコーダ	回転速度・パルス変換

PWMアンプ	電圧・電流変換
--------	---------

Table 2. 実験装置のハードウェア構成

構成要素	用途
GRVZ #F#	パソコン機能
D/A 変換器	バイナリ・電圧変換
G/D 変換器	電圧・バイナリ変換
カウンタボード	パルス・バイナリ変換
ネットワークカード	通信、ファイル共有
ボリューム調整器	パラメータ調整

Table 3. 実験装置のソフトウェア構成

構成要素	用途
Olqx{#nhuqhd#11-#	基本OS
Ylqh#15#	Olqx{ 利用環境
UW0lqx{#14#	リアルタイム RV
JQ X #hyhars#	プログラム開発環境
[OZ lgrz #	JXL 環境
Vdp ed	ファイル共有

Wdedn#1#にあるように、本装置は F 言語によるプログラム開発環境が備えられていると同時に、ハードリアルタイムでのプログラム実行環境も備えているため、試行錯誤が連続する設計・開発や研究・研修の現場では非常に有効である。

Wdedn#7#はこの装置に対して本プロジェクトで追加した機能である。表中のハードリアルタイム機能とはデータの処理に時間制約があるプロセスのことで、フィードバック制御、フィードフォワード制御、タイマ駆動によるシーケンス制御などが該当する。これに対して、ノンリアルタイム制御とは、時間制約を課さない制御規則で、ペトリネットやシーケンス制御、スケジューリングなど事象駆動型システムにもとづく制御器の実装に使用する。また、近年の話題になっているネットワーク化制御の実験にも対応できる機能を持っている<sup>6)</sup>。

Table 4. 追加機能

(II はインタフェース、○は実装済)

機能	用途	
デバイスドライバ	ハード・ソフト整合	○
プロセス間通信	オペレータ操作機能	○
ボリューム I/F	パラメータ調整	○
JXL#I#	JXL 環境	○

P DWODE の I#	制御系設計との連携	○
ハードリアルタイム制御	各種制御理論実装	○
WFS LS#通信	ネットワーク化制御実装	○
ノンリアルタイム制御	事象駆動型制御理論実装	

#### 4. 実習・研修での使用例

SIG 制御とは制御則を比例・Pursruwlrqdo、積分・Iqwhjudo、微分・Dliuhqwidloの和で定義し、各要素の強弱を調整することにより閉ループシステムの望ましい振舞いを実現するフィードバック制御器である。この強弱パラメータの決定方法については制御対象の簡易なモデリングと組み合わせた系統的な方法もあるが（限界感度法、] Ibjduh# 1fkrov 法など）、試行錯誤で望ましい値を探索する場合も多い。また、SIG の各要素が現在値の修正、過去の履歴の利用、未来の予測に対応しているという直感的な捉え方もでき、ソフト的パラメータとシステムの振舞いとを体感するには格好の題材である。

Ibjduh# はこの強弱パラメータを手元のボリュームでリアルタイムに変更できる仕組みにした装置を使って実習をしている様子である。各パラメータと振舞いの関係や、円盤を触れることによるフィードバックの強弱の体感（力触覚）、不適切な設定による不安定現象など、簡易な実験装置であるがフィードバック制御の体感装置としての基本機能は備えている。



Fig.3. PID 実験装置による実習風景：パラメータを変化させながらフィードバック制御を体感する

本システムの基本 RV には JQX プロジェクトに基づき無償配布されている#0lqx{#および#UW00lqx{#を用いている。優れた JX\_L 環境である#[oz\_lggrz #] や

XQL[ #の各種標準ツールを利用しながら、なおかつハードリアルタイムプログラミングとその実行がひとつのシステムで可能な構成になっている。すなわち、制御システムの設計のみならず実装、実験、データ収集などの実時間計測制御作業、データ解析、実行、評価などのデータ処理作業、レポート作成や文献調査などのデスクワークをこの設備だけで完結することも可能である。（Ibjduh# 参照）

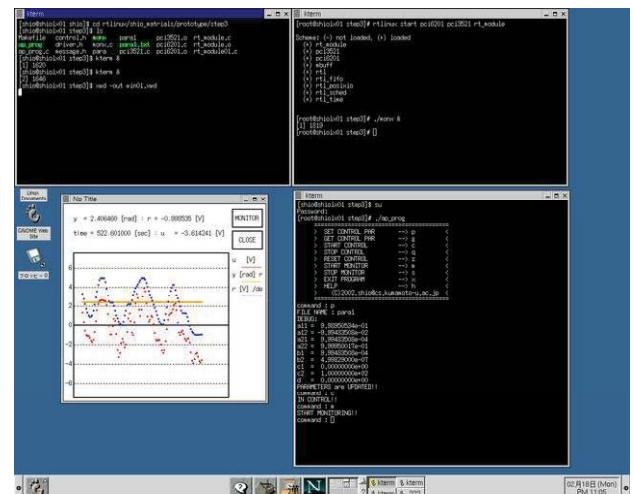


Fig.4 UNIX の豊富なツールを活用しながら、実時間計測制御実験が可能である

#### 5. システムの拡張性

現在実装している機能は Wdedh7# の追加機能のなかで SIG 制御とその周辺機能のみであるが、目的に応じて様々な拡張可能である。例えば、ネットワーク上に P DWODE サーバがあれば、ファイル共有機能を用いて設計と実験の連携が可能である。また、XQL[ のマルチプロセス機能と連携した適応制御も可能である。計算機工学や情報科学の成果と制御技術や理論の融合・連携はサンプル値制御、ハイブリッド制御、ネットワーク化制御など、まだ議論が始まったばかりで研究の余地はたくさんある。その研究プラットフォームとしても格好の機器構成である。

#### 6. 関連ツール

本プロジェクトで開発したシステムと密接に関連するツールについて紹介する。

Ibjduh# は K ; マイコン（ルネサス社製）を用いた実習教材（Dgzbq 社製）のひとつである。実際の組込みシステム開発では、一般的な RV 環境（開発システム）

で開発したソフトウェアを省電力小型化されたマイコン（ターゲット）にダウンロードして実行するというクロス開発環境が実際の姿である。そのため、本プロジェクトで開発した一体型のシステムとは異なる実装や設計ノウハウ・経験の蓄積が必要になってくる。例えば、ターゲットのハードウェアといえども段階によって変化する（バージョンがある）。従って、その変化に応じてソフトウェアも対応できなければならぬ。ハード・ソフトと分離できるほど分業は進んでいないのが現状であり、むしろ両者を包括的に理解でき問題解決能力を持った技術者が切望されている。その意味で、本プロジェクトでの開発システムとクロス開発環境の連携は重要なテーマである。



Fig. 5. マイコンを用いた組込みシステム実習教材  
(株 Adwin 社製)

Mdyd# ssdw#は実時間アニメーション、JXLを介した対話機能、ネットワーク通信など豊富な機能が標準で装備されたオブジェクト指向プログラミング言語であり、現在はその開発環境が無償で提供されている。Ij19#はこのMdyd# ssdw#を用いた制御理論学習のための#h0hduqlqj#教材の例であるが、制御パラメータを設定したり、制御中に外乱を加えるなど対話的な操作が可能である。また、図のようなアニメーション標記のほか、時間軸上のグラフや位相平面上の軌道など豊富なグラフィック機能は抽象的な動的システムの特徴を簡便に可視化してくれる。特に、双方向性を持つ点はビデオ放映のような一方向性の教材とは異なる教育的効果があると考えられる。ビデオ教材、対話的h0hduqlqj教材、本プロジェクトの実験システム等を有機的に結合して実習プログラムを構成することにより、先端技術を自由自在に使いこなす技術者の育成も

可能ではないかと考える。

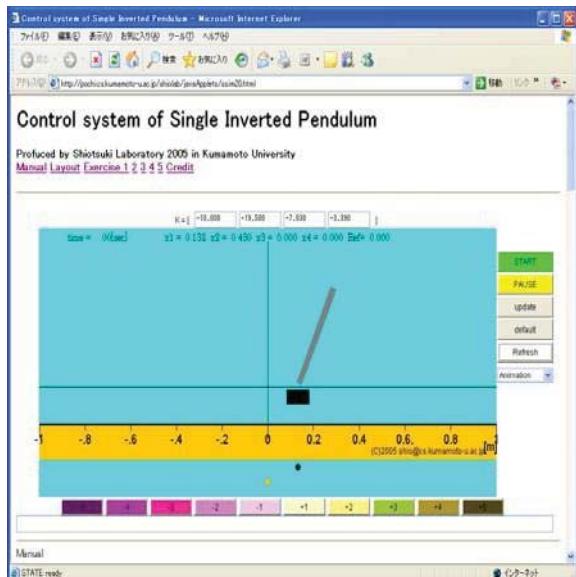


Fig.6. Java Applet を用いた e-Learning システムの例<sup>(5)</sup>

## 7. 結言

ジェットコースターでエネルギー保存則、湯船でアルキメデスの原理、りんごを使って万有引力 $\gamma$ といったレベルで最先端の制御理論を身近に体感できる教材やカリキュラムの開発を試みた。現時点では学部の学生実験の1テーマとして採用する程度の内容でしかないが、内容の充実にむけて検討を進める次第である。

## 参考文献

- 1) Z koldp # VDhylqh# Hg1# F rqwrd# V | whp # Ixqgd# hqwdv# FUF # uhwv# 333#
- 2) EhqqhwV著、古田、山北監訳：制御工学の歴史、コロナ社
- 3) 汐月：情報通信ネットワークと制御理論の融合の可能性、計測と制御、#76+9, #798#9; #5337,
- 4) Dwurp # N 1# K djjxqg# 1# S LG # F rqwrdhuv# Wkhru# hvljq# dqg# Nxqlqj# g# VD / <<2#
- 5) kws=2srflifvnxp dp rwr0kdfhs2k1rode
- 6) Olqx{= kws=2z z z 1olqx{ 1ru2
- 7) UW0lqx{ iuhh kws=2z z z 1wolqx{ iuhh1frp 2
- 8) Mdyd= kws=2mddydxq1frp 2
- 9) vdp ed= kws=2z z z 1vdp ed1jus2
- 10) J Q X = kws=2z z z 1jgxruj2
- 11) UHQHVDV= kws=2ndsdq1uhghvdv1frp 2
- 12) 株) Dgz lq# kws=2z z z 1dgz lq1frp 2#