

# ロボスト制御におけるアクティブラーニングを目的とした 遠隔実験環境の開発

○竹部 啓輔（長岡工業高等専門学校），佐藤 拓史（長岡工業高等専門学校），  
小林 泰秀（長岡技術科学大学）

## Development of Remote Experimental System for Active Learning in Robust Control

○ Keisuke TAKEBE (NIT, Nagaoka College), Hiroshi SATOH (NIT, Nagaoka College),  
and Yasuhide KOBAYASHI (Nagaoka Univ. of Tech.)

Abstract : We have developed an active learning environment for robust control system experiment. Using this system, students can execute an active noise control experiment via network, remotely. Uploading parameter files of a controller to the web page of this system, this system executes an experiment, automatically. About 1 minute later, a hyperlink to the result data will be displayed on the web page.

### 1. 緒言

制御理論の理解には、実機を対象として制御系の設計を行い、実機に適用し、その結果を元に再設計を行い実験を繰り返す、アクティブラーニングが効果的である。

このような実験を多くの学生に体験させるには、機材を複数用意するのが望ましいが、導入コストや、設置場所等の制約から、十分な数の機材をそろえるのは難しい場合が多い。また、実験を繰り返し行うためには、実験室をいつでも使用可能とするような対応が必要になるが、これも実際に行うのは難しい。

これらの問題を軽減する手段として、ネットワークを利用することが考えられる。ネットワークを介して実験が可能となれば、授業時間など特定の時間に同時に実験を行わなくともよくなるため、複数の機材を用意する必要がなくなるとともに、授業時間外であっても実験可能となる。

こうした遠隔実験環境がこれまでも報告されている [1, 2, 3]。これらの遠隔実験環境では、制御器自体の構造は固定で、制御器のゲインを変更することにより応答改善等を行うものとなっている。

これに対し、ロボスト制御器の設計においては、ノミナルモデルと実際の制御対象とのモデル化誤差の設定や、重み関数の設定によって制御器の次数に変化が生じてしまうため、制御器の構造に依存しない遠隔実験環境が必要となる。長岡技術科学大学では、「制御工学特論」の講義において、ロボスト制御の実験装置を用いて、制御系の設計・動作実験を行っているが、これまでは学生が設計した補償器のデータを教員が受け取り、制御実験を行った結果を学生が Web ページからダウンロードし、結果の評価を行うなど、教員の手間が多かったり、学生が実験結果を得られる

までに長いタイムラグがあったりと問題があった。

そこで、本研究ではこの講義で扱う能動騒音制御実験装置を対象として、ネットワークを介した遠隔制御実験環境を開発した。平成 27 年度の講義では、学生自身がいつでも繰り返し実験を行えるこの遠隔実験環境を利用して、アクティブラーニングによる学習が行われた [5]。

以下本稿では、本研究で構築した遠隔実験環境について述べる。

### 2. 実験装置（能動騒音制御系）

本研究で遠隔実験環境の開発対象とした実験装置の概要を Fig.1 および Table.1 に示す。

ダクトは直径約 5cm、長さ約 1.8m の塩ビ管製で、右側にファン騒音を模擬するための制御音源用スピーカ

Table. 1: Experimental instruments

Loudspeakers	AURA SOUND NSW2-326-8A (2inch, 15W)
Power amplifier	TOSHIBA TA8213K
Low pass filter	500Hz 4th order Butterworth
Pressure sensors	NAGANO KEIKI KP15
A/D, D/A converters	CONTEC AD12-16(PCI) CONTEC DA12-4(PCI) (12bit, $\pm 5V$ , $10\mu\text{sec}$ )
Oscilloscope	Tektronix TDS 2014B
DC pow. supply	TEXIO PA18-12B
PC	Dell Dimension 1100
OS	Linux kernel 2.4.22 / Real Time Linux 3.2-pre3

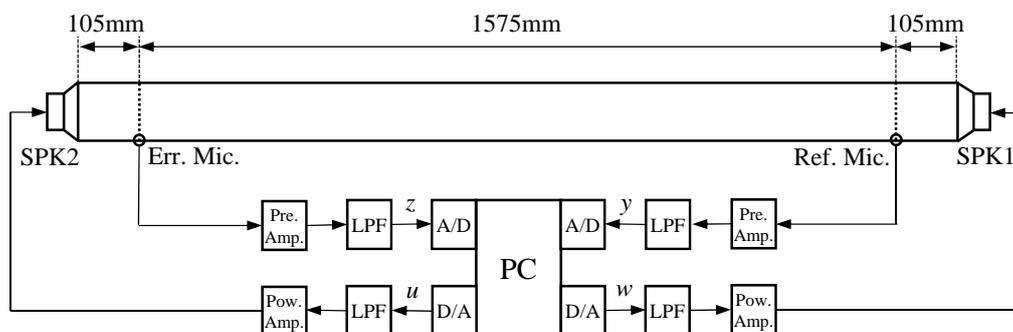


Fig. 1: Block diagram of experimental apparatus

(SPK1), 反対側に騒音を打ち消す制御音を生成するための制御音源用スピーカ (SPK2) が設置されている。

ファン騒音に対する現実の能動騒音制御系では、ダクトの一端は換気グリルなどの開口部であり、そこから放射される騒音を抑制するために、制御音源はダクトの中間にダクトの軸方向に対して垂直に設置される [4]。しかし本実験装置では、夜間の使用も想定して、開口部を設けず、制御音源でダクト端面を閉じる構成とした。スピーカとマイクを左右対称に設置することにより、周波数応答も対称となり、初学者にとって把握しやすい制御対象になることが期待できる。

本装置の制御目的は、エラーマイク (Err. Mic.) の出力信号  $z$  の振幅ができるだけ小さくなるように、リファレンスマイク (Ref. Mic.) の出力信号  $y$  を用いて適切な制御入力  $u$  を生成し、制御音源 SPK2 を駆動することである。

これらは、A/D 変換器、D/A 変換器、ローパスフィルタ (LPF)、パワーアンプ (Pow. Amp.), プリアンプ (Pre. Amp.) を介してパソコンに接続され、スピーカを任意の信号  $w, u$  で駆動し、マイクの出力  $z, y$  を計測できる。なお、本実験装置では、大振幅の圧力変動を取り扱うことを念頭に圧力センサをマイクの代わりに用いている。

### 3. 従来の実験システムと課題

#### 3.1 これまでの実験手順

これまでの実験手順は以下の通りであった。

- (1) [学生] 与えられた制御対象の周波数応答実験結果に基づいて補償器の設計を行う。
- (2) [学生] 設計した補償器のデータ (次数および状態空間実現のデータファイル) をメールに添付して教員に送付する。
- (3) [教員] 受け取った補償器のデータを、Web ページにアップロードするとともに、実験サーバの所定のディレクトリにコピーする。

- (4) [教員] 実験プログラムを実行して実験を行う。
- (5) [教員] 制御実験結果 (result.dat) を Web ページにアップロードする。
- (6) [学生] 制御実験結果をダウンロードする。
- (7) [学生] 制御実験結果の評価を行い、重み関数を変更するなど補償器の再設計を行う。

複数回の実験を行う場合、手順 7 で補償器の再設計を行った後、手順 2 からを繰り返す。

#### 3.2 問題点

前節のように、これまでは実験を行う手順は自動化されておらず、教員が手作業で行っていた。そのため、補償器が提出されてから実際に実験が行われるまでの時間は不定であり、学生がどの程度の時間で結果を得られるかの保証は無く、待ち時間は長かった。

さらに、教員の手作業の負担が大きいということも、大きな問題であった。

### 4. 遠隔実験システム

本研究では、前節にあげた問題点を解消・軽減するため、学生がいつでもネットワークを介してロボスタ制御の実験を行うことができる遠隔実験システムを開発することにした。

開発には、Web サーバ側のスクリプト言語の PHP を、実験サーバ側の実験自動実行には perl を用いた。どちらのスクリプト言語も標準で Linux 等のシステムで使用できるものである。

遠隔実験システムの概略を、Fig.2 に示す。

Web サーバと実験サーバはローカルネットワークで接続され、実験サーバのディスク装置を NFS により Web サーバが共有している。学生が、Web サーバに制御器のデータをアップロードすると実験サーバで自動的に実験が行われ、その結果が Web サーバに掲載される。

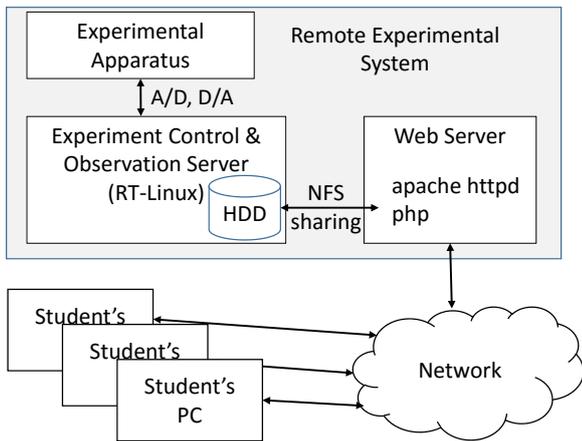


Fig. 2: Overview of remote experimental system

### 4.1 実験サーバでの実験の自動実行

実験サーバには、Webサーバで学生がアップロードした実験用のデータが制御器毎に別々のフォルダに保存されている。

実験サーバでは、自動実験スクリプト (run\_hinf.pl) を動作させておく。これは、スクリプト言語 perl で記述したもので、Fig.3 に示すような流れでデータが保存されたフォルダを巡回して、出力データが無いフォルダにある制御器のデータを用いて、個別の実験を自動実行する C プログラム (hinf\_app) を起動する。

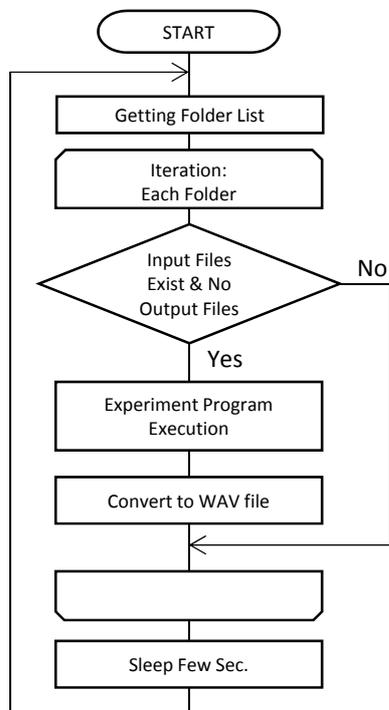


Fig. 3: Flowchart of auto experiment execution

Webサーバを介してアップロードされた制御器のデータ (controller.dat, controller\_order.dat) を hinf\_app が読み取り、能動騒音制御の実験を実行し、実験結果を result.dat として保存する。

なお、実験を行う期間だけ動作させるため、実験自動実行スクリプトを起動用・停止用のシェルスクリプトを別途作成した。ファイルベースのシステムのため、停電時などにシステムを一時停止する際には、停止用シェルスクリプトを実行するだけで対応できる。

### 4.2 Web ページの構成

学生が制御器データをアップロードする Web ページの構成は、Fig.4 のようになっている。

ページ上部に、ファイルアップロード用のログインフォームと実験装置の Web カメラ画像を表示し、続いて、履修者毎に、提出された 3 ファイル：制御器のデータ (controller.dat)、制御器の次数ファイル (controller\_order.dat)、検証用の MATLAB ファイル (controller.mat) と、実験結果のデータ (result.dat)、result.dat を WAV 形式に変換した音声ファイル (result\_z.wav) の一覧が表示される。制御器のデータそれぞれに、提出日時、実験実行日時が表示される。

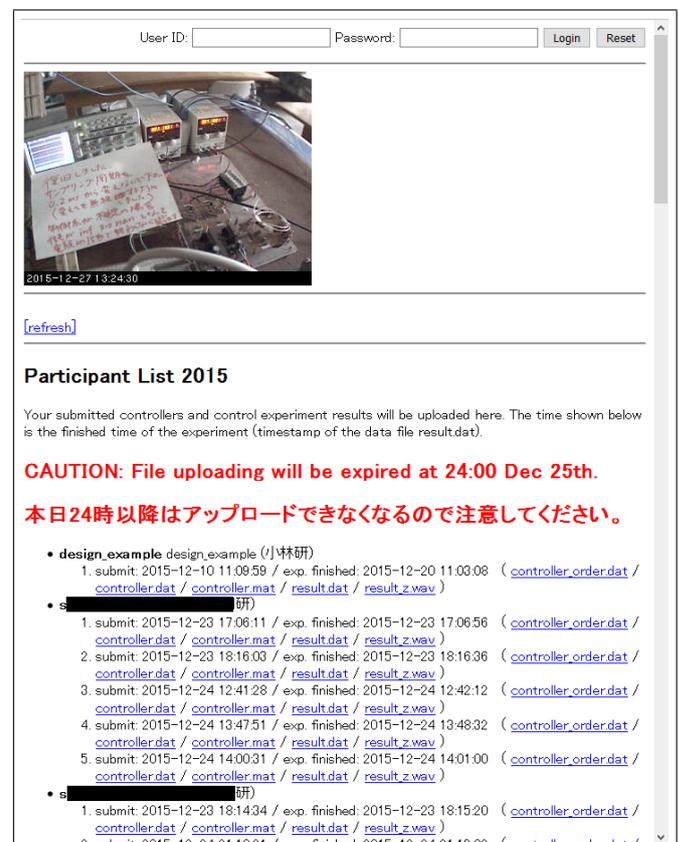


Fig. 4: Web-page of remote experimental system

Fig. 5: File upload form

本ページにファイルをアップロードできるユーザを限定し、それぞれのユーザがアップロードしたファイルを区別するため、ユーザ ID とパスワードを付与している（ここでは、簡易的な認証の仕組みを実装し、他の認証システムとの連携については今後対応することとした）。

履修者は、教員からユーザ ID と設定されているパスワードを受け取り、その ID とパスワードを用いて、本ページ上部の入力フォームからログインすると、Fig.5 のようなファイルアップロード用のフォームが表示される。

このページから履修者が設計した制御器のファイルをアップロードすると、ファイルの内容の簡単なチェックを行う。具体的には、controlling\_order.dat は次数の数値 ( $n$  とする) を 1 つだけ含むかどうか、controlling\_order.dat はその次数に整合する数  $((n+1)^2$  個) の数値を含むかどうか等をチェックし、問題なければファイルを保存し、それによって実験サーバが自動的に実験を実行する。実験結果は、このページを再読み込みすることで、一覧に加えられる。

### 4.3 遠隔実験システムを用いた実験の流れ

本システムを用いることで、実験手順は以下のようになった。

- (1) [教員] 履修者のユーザ ID とパスワードのデータを作成し、履修者に通知する。
- (2) [学生] 与えられた制御対象の周波数応答実験結果に基づいて補償器の設計を行う。

- (3) [学生] 設計した補償器のデータを遠隔実験 Web ページにログインしてアップロードする。
- (4) [学生] 実験結果をダウンロードする。
- (5) [学生] 制御実験結果の評価を行い、補償器の再設計を行う。

実験が自動的に行われるようになったことにより、教員が行うのは、授業の開始段階で、履修者のユーザ ID とパスワードのリストを作成し、各利用者に通知するという作業のみとなった。

1 回の実験時間はおよそ 15 秒であり、結果の WAV ファイルへの変換時間も含めて 1 分程度であった。学生がデータを提出してから結果を得られるまでの時間は最短で 1 分程度となった。複数のデータが同時に提出された場合でも、順次実験が行われるため、数分後には結果を得ることができる。

## 5. 結言

ロボ制御の学習を、実機を用いた実験を繰り返し行うことで進めていくアクティブラーニングを可能とするため、ネットワークを利用した遠隔実験環境を構築した。これまで問題となっていた、学生が補償器データを提出してから実験結果を得るまでの時間が、実験自動化によって 1 分程度となり、実験結果をもとに補償器の再設計を行い再実験するというサイクルがスムーズに行えるようになったといえる。さらに、実験の自動化によって、教員の手間が大幅に削減された。

今後は、ID 発行の手順の自動化や、サンプリング周期など変更可能な実験パラメータを増やすといった改良を行って行きたい。

## 参考文献

- [1] H. H. Hahn, M. W. Spong, “Remote Laboratories for Control Education”, *Proceedings of 39th IEEE Conference on Decision and Control*, pp.895–900, 2000.
- [2] A. Chevalier, M. Bura, C. Copot, C. Ionecu, R. D. Keyser, “Development and student evaluation of an Internet-based Control Engineering Laboratory”, *IFAC-PaperOnLine*, Vol.48, No.29, pp.1–6, 2015.
- [3] 入部正継, 嘉渡寛, 藤野和彦, 佐倉俊祐, 中川範晃, 中川友紀子, 衣笠哲也, 徳田献一, “理想的な力学モデルを実現する制御工学の学習教材”, ロボティクスメカトロニクス講演会 2016 講演論文集, p.2P1-16b2, 2016.
- [4] 小林泰秀, 藤岡久也, “サンプル値  $H_\infty$  制御に基づく一次元ダクト系の消音制御”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.71, No.710, pp.2953–2960, 2005.
- [5] 佐藤拓史, 竹部啓輔, 小林泰秀, “ロボ制御におけるアクティブラーニングを目的とした遠隔実験環境の効果”, 第 17 回 SICE システムインテグレーション部門講演会, 2016(発表予定).