

ロバスト制御を対象とした遠隔実験環境の構築

Development of Remote Experimental System for Robust Control

○正 佐藤拓史 (長岡高専) 竹部啓輔 (長岡高専)
正 小林泰秀 (長岡技科大)

Hiroshi SATOH, NIT, Nagaoka College, h-satoh@nagaoka-ct.ac.jp
Keisuke TAKEBE, NIT, Nagaoka College
Yasuhide KOBAYASHI, Nagaoka University of Technology

This paper deals with the development of the remote experimental system for robust control. 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. The developed system was introduced in a lecture, 'advanced automation', in 2015 and 2016, and was evaluated by a questionnaire. This paper reports details of proposed experimental system and the effectiveness of proposed experimental system on the basis of the questionnaire results.

Key Words: Remote Experimental System, Robust Control, Active Learning

1 はじめに

制御理論は一般性を保ちつつ理論展開することによって、さまざまな制御対象に対して効率的に制御系を構築できるという利点がある一方、制御理論を学び始めた学生に対してはその理論展開が抽象的で、制御系設計の理解が乏しいという欠点がある [1, 2].

制御工学を教える側の教員はこれらの欠点を補うために、説明の過程で具体例や数値例を示すことで理解を促す工夫をしている。実際に具体的対象に対して制御系を設計することができれば制御器の違いによる性能等の違いを得ることができ、制御理論がどのように関係しているかの理解が深まると考えられる。具体的対象を用いた講義や実験も行われているが [3, 4], 10 人規模のグループや少人数の講義に対してであり、一般的な講義では受講生も多いため、具体的対象を用いた制御系設計等を体験させることはコスト的にも物理的にも困難である。

これらの問題点を解決する一つの方法として、ネットワークを介した遠隔実験環境を提供する試みも行われている [5, 6, 7]. ネットワークを介した実験が行えることで複数の実験装置を用意することが不要となり、コスト的な面で優位性が生じる。また、わざわざ実験設備のある場所に出向かなくとも実験が行えるため、講義等の時間外でも受講生が進んで学習・理解することへの期待が持てる。

しかし、文献 [5]~[7] の遠隔実験環境では、制御器自体の構造は変更することはできず、制御器のゲインを変更することで応答改善等を行うことしかできない。ロバスト制御の場合には、実際の制御対象をノミナルモデルとしてどこまで表現するのか、制御仕様の設定や重み関数の設定によって得られる制御器の次数に変化が生じてしまうので、制御器の構造に依存しない遠隔実験環境が必要になる。

そこで、われわれは、既存の能動騒音制御実験装置をネットワークを介した遠隔制御実験システムに再構築し [8], ロバスト制御の講義に導入した [9]. 本稿では、開発した遠隔実験システムの詳細を報告するとともに、ロバスト制御の講義に導入した際に受講生から得たアンケート結果から、開発した遠隔実験システムの有効性について報告する。

2 遠隔実験システムの開発

2.1 従来の実験システム

遠隔実験環境の開発対象とした実験装置は Fig.1 に示す RT-Linux を制御器とした能動騒音制御系である。

ダクトは直径約 5 [cm], 長さ約 1.8 [m] 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 (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。これらのスピーカは制御器である PC に内蔵した D/A 変換器, ローパスフィルタ (LPF), パワーアンプ (Pow. Amp.) を介して任意の信号 w, u で駆動される。エラーマイク (Err. Mic.) とリファレンスマイク (Ref. Mic.) はダクトの端から約 10 [cm] の位置に設置され, プリアンプ (Pre. Amp.), ローパスフィルタ (LPF), A/D 変換器を介して PC で計測される。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。Table 1 に実験装置の詳細を示す。

Table 1 Experimental instruments

Loudspeakers	AURA SOUND NSW2-326-8A (2 [in], 15 [W])
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) (12 [bit], ± 5 [V], 10 [μ 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

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 [10]. 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てある。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、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、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。

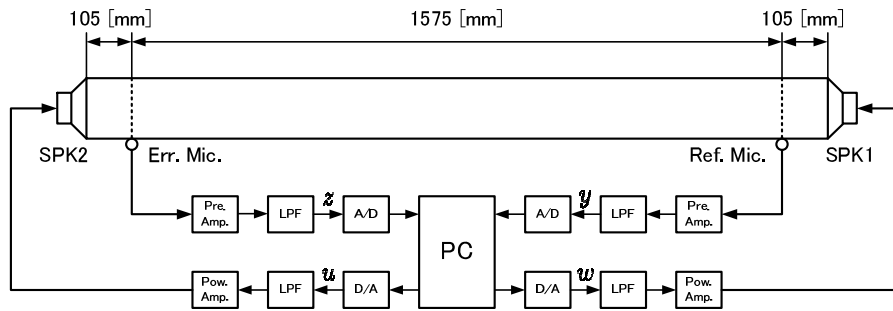


Fig.1 Block diagram of experimental apparatus

2.2 遠隔実験システムに要求する仕様

能動騒音制御系をネットワークを介した遠隔実験システムに拡張するために、以下に示す仕様を満たすように開発した。

1. 設計した制御器はネットワークを介してアップロードが行えること。
2. 制御器をアップロードすると自動で制御実験が行えること。
3. 実験結果はできるだけ早く受け取ることができること。

これらの仕様を満たすために、既存の実験システムが RT-Linux をベースにしていることから Fig.2 に示すように別途 Web サーバを立ち上げ、Web サーバと実験サーバをローカルネットワークで接続し、実験サーバのディスク装置を NFS により Web サーバが共有する構成とした。

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。

このような構成とすることで、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ようにした。

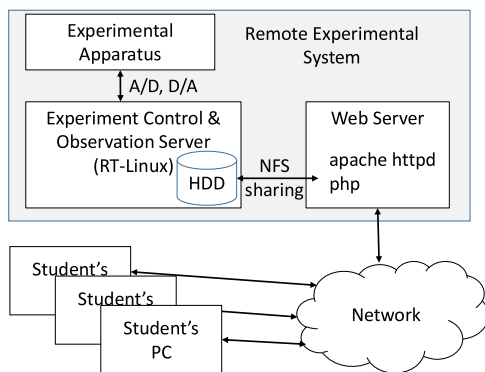


Fig.2 Overview of remote experimental system

2.3 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を制御器毎の別々のフォルダに保存する。

実験サーバでは、スクリプト言語 perl で記述した自動実験スクリプト (run_hinf.pl) を動作させておき、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、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) を起動させるものである。

hinf_app は 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) を読み取り、能動騒音制御の実験を実行する。実験結果は Err. Mic. の出力信号を result.dat として保存する。また、実験結果を音声としても確認できるように、WAV ファイル (result.z.wav) に変換も行っている。

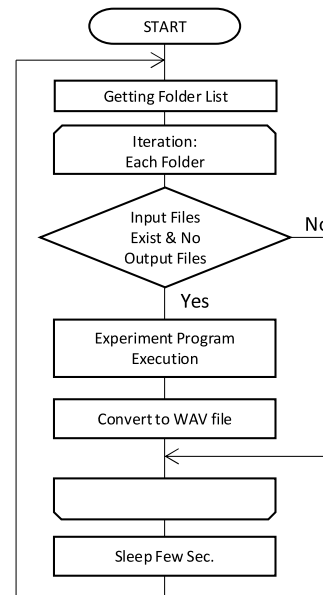


Fig.3 Flowchart of auto experiment execution

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 分程度である。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 分程度であり、既存の能動騒音制御実験を行う場合と同程度である。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。

なお、このシステムはファイルベースのシステムのため、停電時などではシステムを一時停止・再起動させる必要がある。そこで、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として別途作成し、一時停止させる場合には、停止用シェルスクリプトを実行するだけで対応できるようにした。

2.4 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、受講生毎に、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ようにした。

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



Fig.4 Web-page of remote experimental system

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)。

受講生は、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。



Fig.5 File upload form

このページから受講生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、controller_order.dat は次数の数値 (n とする) を 1 つだけ含むかどうか、controller.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。

このシステムで教員が行うのは、講義の開始段階で、受講生のユーザ 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である。

3 アンケート

3.1 アンケート項目の検討

開発した遠隔実験環境の有効性確認と今後の改善点を抽出する目的で、平成 27 年度と平成 28 年度の受講生に対してアンケートを行った。アンケート項目の設定に関しては、文献 [11], [12] を参考に以下の点に注意して設定した。

- 質問項目が多くならないようにする
- できるだけあいまいな表現にしない
- 「どちらでもない」という選択肢は日本人は選びやすい

これらの点を考慮して、質問項目は 6 項目とし、選択肢には「どちらでもない」を設定しないことにした。また、すべての項目に選択肢に該当しない学生を考慮して、自由記述の項目を設定した。各質問項目の理由を回答してもらった部分については、記述式では受講生が理由を書いてくれず十分な結果が得られないと判断し、ありそうな回答例を列記することで受講生からの回答率を上げる工夫をした。また、ポジティブな記述には必ずネガティブな記述を対にして列記することで、システムの評価が公平になるようにした。質問項目のうち、遠隔実験環境に関する項目は以下の 2 項目を設定した。その他のアンケート項目の詳細については文献 [9] を参照されたい。

Q3 ロバスト制御の使い方を理解するためにウェブ環境は必要でしたか?

- まったく必要なかった
- 必要なかった
- 必要だった
- とても必要だった

【その理由】(複数回答可)

- コントローラの送付はメール添付で十分
- ウェブ環境の方がコントローラの送信がし易い
- 実験結果が得られるまでの待ち時間が長い
- すぐに実験結果が得られるので良い
- wav ファイルは不要
- wav ファイルで実験結果を体験できてよい
- 24 時間実験できる環境は不要
- いつでも好きな時間に実験できてよい
- 自由記述

Q6 より理解しやすくしたり理解を深めるために、今回の制御実験・ウェブ環境に加えたら良いと思う機能はありますか?

- エラーセンサ出力をフィードバックするコントローラ的设计
- 外乱入力をフィードフォワードするコントローラ的设计
- サンプリング周期を変更する
- 適応制御実験
- 外乱入力として正弦波などを指定する
- PID 制御など単純なコントローラ的设计
- 自由記述

3.2 アンケート結果

アンケートは講義の 15 週目に受講生に対してアンケート用紙を配布し、提出してもらった形式としたため、平成 27 年度は受講生 21 名中 18 名 (回答率 85.7%)、平成 28 年度は受講生 18 名中 17 名 (回答率 94.4%) から回答を得た (全体の回答率 89.7%)。遠隔実験環境に関する質問項目 3 の結果を Fig. 6 に、その理由を Table 2 に示す。

平成 27 年度、平成 28 年度とも「まったく必要なかった」や「必要なかった」という否定的な解答はなく、全員が「必要だった」、「とても必要だった」のどちらかに回答していることは満足する結果を得た。その理由に関しては、「ウェブ環境の方がコントローラの送信がし易い」(回答数 15(42.9%))、「すぐに実験結果が得られるので良い」(回答数 22(62.9%))、「wav ファイルで実験結果を体験できてよい」(回答数 9(25.7%))、「いつでも好きな時間に実験できてよい」(回答数 17(48.6%)) と開発した遠隔実験環境の有効性を確かめる結果を得た。特に、自由記述において、「実験回数を増やしてほしい」という前向きな意見や「自分の好きな時間に課題ができるのでスケジュール管理が楽」という意見も得ることができたことは非常に有意義な効果をもたらしたと思われる。

Table 2 Reasons for Question 3

Reason	H27	H28	Total
e-mail was enough to submit controllers	1		1(2.9%)
web-based environment was easier to submit controllers	9	6	15(42.9%)
too long to wait for downloading experimental results			
experimental results were download immediately after controller submission	12	10	22(62.9%)
wav-file is not necessary			
wav-file is good to feel experimental result	7	2	9(25.7%)
24-hour operating environment is not necessary	1		1(2.9%)
it was good to do experiment any time	8	9	17(48.6%)

Table 3 Ideas of additional functionality

	H27	H28	Total
feedback controller design using error sensor's output	3		3(8.6%)
feedforward controller design using disturbance input as known signal	3	2	5(14.3%)
specifying sampling period	1	4	5(14.3%)
adaptive control	2	4	6(17.1%)
specifying sinusoidal signal as disturbance input	2	2	4(11.4%)
simple controller design such as PID controller	9	6	15(42.9%)

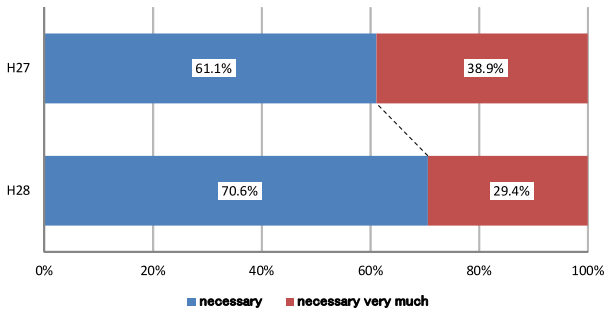


Fig. 6 Questionnaire result

る。しかし、その一方で、「コントローラの送付はメール添付で十分」、「24 時間実験できる環境は不要」という回答がそれぞれ 1 件ずつあり、開発した遠隔実験環境のメリットが伝わる工夫や運用方法の改善が必要であると思われる。

質問項目 6 の遠隔実験環境に追加してもらいたい機能に関しては Table 3 のようにそれぞれの項目で希望があるが、中でも「PID 制御など単純なコントローラ的设计」を希望する回答が 15 名 (42.9%) と半数近くあり、これまでに学んだであろう制御則を試してみたいと思ってもらえたことは予想に反して肯定的な結果であった。実際、「単純なコントローラとの比較を実験を通して体験できたら良い」と記述してくれた学生がいたことはうれしい限りである。

今後は、ロボスタ制御だけでなく、単純な制御則での実験が行えるような改善を図りたいと考えている。

4 結言

実機を用いた実験を繰り返し行うことでロボスタ制御の理解を促すことを目的に、ネットワークを利用した遠隔実験環境を構築した。以前のシステムでの運用では、手動の作業が多く実験結果を提示するまでに多くの時間がかかっていたが、設計した制御器を Web サーバにアップロードすると、自動的に制御実験を行い、その結果を Web サーバ上に掲載するシステムを構築したことにより、制御器をアップロードしてから実験結果を得るまで 1 分程度で行えるようになった。

講義の終わりに実施したアンケート結果より、構築した遠隔実験環境は非常に有効であったと思われる。特に開発のために設定した仕様は、半数以上の学生から高評価を得たことは満足する結果を得た。

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や別の制御対象に対する遠隔実験環境を構築し、学外の学生や一般の人にも公開したいと考えている。

参考文献

- [1] 浅井徹, 平田光男, “制御教育を考える — 体験の必要性和教材開発”, 計測と制御, Vol.54, No.3, pp.147-151, 2015.
- [2] 藤田政之, “制御教育のこれから”, 計測と制御, Vol.41, No.1, pp.78-81, 2002.
- [3] 中浦茂樹, 三平満司, “学生のやる気を引き出す制御実験 — MATLAB と LabVIEW を併用した倒立振り子実験 —”, 計測と制御, Vol.46, No.9, pp.705-708, 2007.
- [4] 大塚弘文, 葉山清輝, “授業内演習のためのボール&ビーム実験装置開発”, 第 57 回自動制御連合講演会 講演論文集, pp.586-587, 2014.
- [5] H. H. Hahn, M. W. Spong, “Remote Laboratories for Control Education”, *Proceedings of 39th IEEE Conference on Decision and Control*, pp.895-900, 2000.
- [6] A. Chevalier, M. Bura, C. Copot, C. Ionescu, R. D. Keyser, “Development and student evaluation of an Internet-based Control Engineering Laboratory”, *IFAC-PaperOnLine*, Vol.48, No.29 pp.1-6, 2015.
- [7] 入部正継, 嘉戸寛, 藤野和彦, 佐倉俊佑, 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表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, 2P1-16b2, 2016.
- [8] 竹部啓輔, 佐藤拓史, 小林泰秀, “ロボスタ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”, 第 17 回 SICE システムインテグレーション部門講演会, pp.2937-2942, 2016.
- [9] 佐藤拓史, 竹部啓輔, 小林泰秀, “ロボスタ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, pp.2933-2936, 2016.
- [10] 小林泰秀, 藤岡久也, “サンプル値 H_∞ 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.
- [11] 朝野熙彦, “アンケート調査入門 — 失敗しない顧客情報の読み方・まとめ方”, 東京都書, 2011
- [12] 石村光資郎, 石村友二郎, “卒論・修論のためのアンケート調査と統計処理”, 東京都書, 2014