ロバスト制御におけるアクティブラーニングを目的とした 遠隔実験環境の効果

佐藤 拓史*・竹部 啓輔*・小林 泰秀**

Effectiveness of Remote Experimental System for Active Learning in Robust Control

Hiroshi SATOH*, Keisuke TAKEBE* and Yasuhide KOBAYASHI**

This paper deals with the effectiveness of the remote experimental system for active learning in robust control. It is usually difficult to understand control theory so as to design and implement control systems only by following general theoretical development without practical system examples; however, it is difficult to introduce practical systems in lectures. In order to solve the problem, we have developed a remote experimental system which can be used over the Internet providing an active learning environment for students who learn robust control theory even outside lecture hours. The developed remote experimental system automatically carries out the experiment when parameter files of designed controllers are uploaded via the Web page, then the control experimental results are posted on the same Web page in about one minute. The developed system was introduced in a lecture, 'Advanced Automation', in 2015 and 2016, and used for the control experiment of robust active noise control of duct. By analyzing the usage of the remote experimental system such as the number of designed controllers and the frequency of executions, and comparing the results with the final reports submitted by students, we confirmed that the number of active students who work well with the design problem was increased by introducing the remote experimental system compared with the previous situation before the introduction of the system. Similar results were obtained from the questionnaire results.

Key Words: remote experimental system, active learning, robust control

1. はじめに

制御工学は本来、実際に制御される制御対象があり、その制御対象に制御系を構成することで応答性が改善したり、性能向上が目に見えて確認できるという点で、学んでいる内容がどのように役立っているのかなどは理解しやすいはずである。しかし、その制御理論を学ぼうとすると制御対象を伝達関数や状態方程式で抽象化し、一般的な理論展開をされることによって制御系設計の理解が乏しくなる欠点がある^{1), 2)}。

教員はそれらの欠点を補うために、講義の導入部分で実際の制御系の事例を紹介したり、説明の過程で具体例や数値例を

示して理解を促す努力をしているのが実状である。その一方で、具体的対象に対して制御系の設計や実習を行なうさまざまな取り組みが行なわれている^{3), 4)}。これらの事例では、10人規模のグループや少人数の講義であるので具体的な対象を扱わせることが可能であるが、一般的な講義では受講生も多く、全員またはグループに実験装置を与えて制御系設計など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なわれている^{5)~7)}。ネットワークを介した実験が行な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向かなくとも実験が行なえるため、受講生が進んで学習・理解することへの期待がもてる。

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などを行なうことしかできない。ロバ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るため、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

* 長岡工業高等専門学校電子制御工学科
長岡市西片貝町 888 番地

** 長岡技術科学大学大学院工学研究科機械創造工学専攻
長岡市上富岡町 1603-1

* Department of Electronic Control Engineering, National Institute of Technology, Nagaoka College, 888 Nishikatakai-machi, Nagaoka

** Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Nagaoka University of Technology, 1603-1 Kamitomioka-machi, Nagaoka

(Received March 23, 2017)

(Revised March 22, 2018)

Fig. 1 Block diagram of experimental apparatus

実験装置をベースにネットワークを介した遠隔制御実験環境を開発した⁸⁾。この遠隔実験環境の開発では、受講生が講義時間外でも進んで制御実験を行なえ、アクティブラーニングの要素をもつものを意識した。

本稿では、文献8)の遠隔実験環境をロバスト制御の講義に導入し、実際に受講生からロバスト制御器の設計・制御実験を行なってもらい、遠隔実験環境を導入する前との比較を行なうことで、どれくらい受講生が有機的に制御器設計を行なえたかを報告する。

2. 開発した遠隔実験環境

2.1 アクティブラーニングとは

アクティブラーニングとは、文部科学省の中央教育審議会によれば

教員による一方的な講義形式の教育とは異なり、学修者の能動的な学修への参加を取り入れた教授・学習法の総称。学修者が能動的に学修することによって、認知的、倫理的、社会的能力、教養、知識、経験を含めた汎用的能力の育成を図る。発見学習、問題解決学習、体験学習、調査学習などが含まれるが、教室内でのグループ・ディスカッション、ディベート、グループ・ワークなども有効なアクティブ・ラーニングの方法である。

とされている⁹⁾。ロバスト制御の理解においては、どれだけ具体的な対象に対して制御系の設計や制御実験を行なえるかが重要であると考えており、そのためには受講生が積極的に制御器の設計・制御実験を行なえる環境を提供する必要がある。この仕組みはアクティブラーニングそのものであり、制御工学の理解のためには必要不可欠な要素であると考えられる。

2.2 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 PC に RT-Linux を組み込み、それを制御装置とした能動騒音制御系である。能動騒音制御系は実モデルが無限次元の特性をもち、実モデルとノミナルモデルに大きなモデル化誤差が存在するシステムである。ロバスト制御の応用では、この実モデルとノミナルモデルの誤差が問題になることが多く、理論と応用のギャップを理解させるためには適したシステム

Table 1 Experimental instruments

Loudspeakers	AURA SOUND NSW2-326-8A (2 [in], 15 [W])
Power amplifier	TOSHIBA TA8213K
Low pass filter	500 Hz 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

であると考えた。

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騒音源用スピーカ (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装置である 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。

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

Fig. 2 Overview of remote experimental system

ことである。

2.3 遠隔実験システムに要求される仕様

アクティブラーニングを目的とした遠隔実験システムに能動騒音制御系を拡張するために、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なえること。
- (2) 制御器をアップロードすると自動で制御実験が行なえること。
- (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 など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なわれ、その結果が Web サーバに掲載されるようにした。

2.4 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ごと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、実験結果がな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。Err. Mic. の出力信号などが実験結果 result.dat に保存される。また、実験結果を

Fig. 3 Flowchart of auto experiment execution

音声としても確認できるよう、WAV ファイル (result.z.wav) に変換も行なっている。

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、自動実行されていない既存の実験システムで能動騒音制御実験を行な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、順次実験が行なわれるため、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。

2.5 Web ページの構成

アクティブラーニングのためには、受講生自ら進んで取り組む必要がある。そこで、制御実験の Web サーバには受講生全員の実績を掲載し、ほかの受講生の実験状況を確認できるものとした。これは、ほかの受講生の実験状況を知ることが刺激となって、受講生がより一層、制御器の設計・制御実験を進んで行なうことを期待して構成した。公開するデータは、ほかの学生のデータを流用して制御器を設計するような不正を行なえないようにするために、制御器の状態空間モデルデータや制御実験結果だけとし、一般化プラントをどう設定して制御器設計を行なったかを知ることにはできないようにした。

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、受講生ごとに、提出された 3 ファイル：制御器のデータ (controller.dat)、制御器の

Fig. 4 Web-page of remote experimental system

Fig. 5 File upload form

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), Err. Mic. 出力を 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

易的な認証の仕組みを実装し, ほか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。

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なう。具体的には, controller_order.dat は次数の数値 (n とする) を一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などをチェックし, 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なうのは, 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. 制御工学特論への導入

3.1 制御工学特論の概要

制御工学特論は長岡技術科学大学大学院の機械創造工学専攻で開設されている科目であり, 著者の 1 人が加わった平成 21 年度からは

ロバスト制御理論 (実際には $\mathcal{H}^\infty$ 制御) を現実の制御系設計にツールとして利用できるようになる

ことを目的に, MATLAB の hinfsvyn をどう使えばいいか? を主目的として構成してある。科目の大まかなスケジュールを Table 2 に示す。平成 21 年度から 12 週目~14 週目に実際の実験装置に対して具体的な制御系設計を行ない, 制御実験結果を得ることでより理解を深めてもらうように構成している。受講生には, ロバスト安定化のための重み関数やノミナルモデルの次数などが変更可能であると伝え, できるだけ良い性能を出すことだけを課し, この制御系設計についてまとめたものを最終的なレポート課題として受講生に取り組んでもらう。受講生にはこの遠隔制御実験を通じて得られた知見を最終レポートにまとめて提出させ, 達成した最終的な制御実験の結果のみでなく, 制御器設計の過程も合わせて評価を行なっている。

Table 2 Schedule of advanced automation

Lecture 1~ 3	Review of Classical control and Modern control theory (Exercises of MATLAB/Simulink)
Lecture 4~ 5	Relationship of LQR and $\mathcal{H}^\infty$
Lecture 6~ 8	Basic of $\mathcal{H}^\infty$: Mixed sensitivity problem
Lecture 9~11	Robust performance problem
Lecture 12~14	Control system design using the experimental system (Report)
Lecture 15	Summary

3.2 ロバスト制御器の設計実習

ロバスト制御器の設計実習では、受講生 1 人 1 人がその試行錯誤を通じてロバスト制御の基本、すなわちモデル化誤差の見積りを大きく（小さく）すると制御性能が悪化（向上）すること、ただし小さくしすぎると不安定になる（発振する）こと、ノミナルモデルの次数を大きく設定すればモデル化誤差自体が小さくなること、などを実験することを期待している。そのために、受講生には設計用のサンプルファイル（MATLAB の m-file）をあらかじめ提示し、その内容を自由に変更することでロバスト制御器の設計を行なわせる。提示するサンプルファイルでは、ノミナルモデルを周波数応答実験結果から部分空間同定法を用いて 24 次のモデルに近似している。重み関数は通常、モデル化誤差をすべて覆いかつ、良い性能が得られるようにできるだけタイトに選ばれるが、サンプルファイルでは重み関数もあえて性能を抑えるために、定数重み $W(s) = 0.01$ としている。この設定での加法的摂動モデルのモデル化誤差 Δ と重み関数 $W(s)$ のゲイン特性を Fig. 6 に示す。Fig. 6 の実線がモデル化誤差のゲイン特性、破線が重み関数 $W(s)$ のゲイン特性である。上記の重み関数で設計した制御器を用いた閉ループゲインの予測結果を Fig. 7 に示す。定数重み $W(s) = 0.01$ とした場合でも、1 次～3 次モードのピークが低減できていることを示すことで、受講生が比較的高いモチベーションを維持しながらレポート課題に取り組むことが期待できる。受講生が行なう制御器の設計回数には制約はなく、ノミナルモデルの次数も自由に設定でき、ロバスト安定化のための重みができるだけ小さく済むような試行錯誤は無制限に行なうことができる。モデル化誤差は近似の次数を上げれば小さくなること、モデル化誤差が小さくなれば重み関数も小さくできるので、制御性能の向上が期待できることは口頭で説明している。さらに、制御実験の回数に制約（最大 5 回）を設けることで、何も考えずに重みだけを修正して実験を繰り返すような消極的な考えを予防している。このような制約を設けることで PDCA サイクルを意識させ、受講生のアクティブラーニングに結びつくように設定した。

ロバスト制御器を設計する制御対象は平成 26 年度は弾性体で接続された 2 慣性ロータの一方をモータで駆動し、もう一方のロータ速度を制御する「モータの速度制御」とし、平成 27 年度、平成 28 年度は、ダクト上流側からの騒音を下流側で抑制する「能動騒音制御」に変更して実施した。

制御実験は平成 26 年度までは受講生が設計した制御器を担当教員へメールで送付し、担当教員が空き時間を使って制御実験を行ない、その結果をフィードバックするという形式であった。これでは実験結果が出るまでにタイムラグが生じ、実験結果を考慮して制御器を再設計するようなシステムではなかった。平成 27 年度、平成 28 年度は文献 8) で開発した遠隔実験環境を導入することで、制御器のアップロードを行なうと、制御実験、実験結果のフィードバックまでが自動的に行なわれるので、受講生が積極的に制御器の設計・制御実験を行なうことを期待した。

Fig. 6 Additive uncertainty Δ and weight W for example

Fig. 7 Closed-loop gain for example

3.3 制御器設計実習の状況分析

平成 26 年度（遠隔実験環境の導入前）と平成 27 年度、平成 28 年度（遠隔実験環境の導入後）の受講生に対し、

- (1) どれぐらいロバスト制御器を設計したのか？
- (2) 複数の制御器を設計した受講生がつぎの制御器をどのタイミングでアップロードしたのか？
- (3) 制御器をどの時間帯にアップロードしたのか？

について調査した。これらの項目を設定したのは、積極的な学生ほど制御器の設計回数は多くなり（(1) に対応）、より良い性能を出すためには制御結果を熟慮して再設計をする必要があるため、つぎの制御器をアップロードするまで時間がかかる（(2) に対応）。また、実験結果がすぐに得られるシステムであるので、時間帯を問わず空き時間を利用した実験を行なう（(3) に対応）ことを想定してである。それらをまとめたものを Table 3 に示す。(1) は制御器の設計数に該当する受講生の人数をカウントしたものであり、(2) は複数の制御器を設計した受講生がつぎの制御器をアップロードするまでの間隔をカウントしたものである。そのため、その総数は受講生が設計した制御器の総数から受講生の人数が少ない。(3) はそれぞれの制御器がアップロードされた時間帯をカウントしたものである。

平成 26 年度では、受講生のおよそ 70% が制御器設計を 1 回または 2 回までしか行なっていなかったが、平成 27 年度では、90% を超える受講生が、平成 28 年度ではすべての受講生が制御器設計を 3 回以上行なっている。平均すると、平成 26 年度では受講生 1 人当たり 2.2 制御器、平成 27 年度では

Table 3 Comparison of controller design

	H26	H27	H28
Numbers of designed	(18 persons)	(21 persons)	(18 persons)
1	9 (50.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)
2	4 (22.2%)	2 (9.5%)	0 (0.0%)
3	0 (0.0%)	8 (38.1%)	2 (11.1%)
4	2 (11.1%)	3 (14.3%)	1 (5.6%)
5	3 (16.7%)	8 (38.1%)	15 (83.3%)
Average	2.2 controllers	3.8 controllers	4.7 controllers

Upload interval	(22 controllers)	(59 controllers)	(67 controllers)
0～ 5 min	14 (63.6%)	22 (37.3%)	13 (19.4%)
5～10 min	0 (0.0%)	10 (16.9%)	15 (22.4%)
10～30 min	0 (0.0%)	12 (20.3%)	21 (31.3%)
30～60 min	1 (4.5%)	3 (5.1%)	2 (3.0%)
60 min～	7 (31.8%)	12 (20.3%)	16 (23.9%)

Upload interval	(18 persons)	(21 persons)	(18 persons)
Over 10 min	3 (16.7%)	7 (33.3%)	7 (38.9%)

Upload time zone	(40 controllers)	(80 controllers)	(85 controllers)
9:00～13:00	4 (10.0%)	25 (31.3%)	16 (18.8%)
13:00～17:00	16 (40.0%)	17 (21.3%)	34 (40.0%)
17:00～21:00	14 (35.0%)	11 (13.8%)	9 (10.6%)
21:00～ 3:00	1 (2.5%)	27 (33.8%)	23 (27.1%)
3:00～ 9:00	5 (12.5%)	0 (0.0%)	3 (3.5%)

3.8 制御器、平成 28 年度では 4.7 制御器の設計を行っており、平成 26 年度の 1.7 倍、2.1 倍となっている。これは、平成 26 年度までは、設計した制御器を担当教員へメール添付で送付し、制御実験を担当教員が行ない結果をフィードバックしていたために、実験結果が得られるまでにタイムラグが生ずることやメールで送信しなければならないという手間が原因で制御器の設計回数が 2 回以下に集中した結果であったと考えられる。一方、平成 27 年度以降では、Web 環境より自分で制御器をアップロードする方法に変更したことにより、受講生の手間が低減したことが制御器設計回数の向上につながったのではないかと考えられる。特に、平成 28 年度では 80%を超える受講生が制御器設計を 5 回行っており、Web 環境により容易に制御実験が行なえることの効果ではないかと考えられる。

制御器のアップロード間隔については、平成 26 年度ではおよそ 60%の受講生が 5 分以内（実際には複数の制御器をメールで同時に送付）であったが、平成 27 年度では 5 分以内のアップロードが 40%弱まで、平成 28 年度では 20%弱まで低減した。しかし、10 分以内のアップロードは 40%を超えているので、実験結果を得てから制御器の再設計を行なっているかどうかは微妙な状況である。ただし、平成 27 年度以降では、自動的に実験が行なわれその結果が Web 上に掲載される形となり、実験結果を得るまでのタイムラグがなくなった（制御器をアップロードすると数分で実験が終了する）ので、平成 27 年度では 20%の受講生が、平成 28 年度では 30%の受講生が 10 分～30 分の間に制御器を再アップロードしている結果を得た。当初の目的であった「受講生が進んで学習・

理解する」アクティブラーニングの効果が得られたのではないかと考えられる。

本来、制御器設計においては実験結果を考察・検討し、必要あらば再設計することを期待するものである。受講生個人に焦点を当てると、平成 26 年度では、受講生 18 名に対して 3 名 (16.7%) が 10 分以上の間隔で制御器のアップロードを行っており、平成 27 年度では、受講生 21 名に対して 7 名 (33.3%) が、平成 28 年度では、受講生 18 名に対して 7 名 (38.9%) が 10 分以上の間隔で制御器のアップロードを行っていた。提出されたレポートを評価すると、制御器のアップロード間隔が 10 分以上であった学生は、性能改善のためのアプローチを何かしら考えて行なっていることが示されており、制御器の設計個数も数多く設計していた。一概に遠隔実験環境の導入成果とはいえないが、この実験環境がアクティブラーニングに役立っていると考えられる。しかし、制御器のアップロード間隔が 10 分以内であっても、よく考えて制御器の設計をしている（実験条件を揃えるために意図的に短時間で行なった）ことがレポートで示されている場合もあり、アップロード間隔が短いからといって消極的であるということにはならない。ただし、アップロード間隔が短く、制御器の設計数も少ない学生は、設計アプローチが不十分であり、アクティブラーニングに役立てられていなかった。

制御器をアップロードした時間帯を 9:00～13:00（日中の主に午前中）、13:00～17:00（日中の午後）、17:00～21:00（夕方～夜）、21:00～3:00（夜～深夜）、3:00～9:00（深夜～朝）に区分すると、平成 26 年度では日中の午後～夜の時間帯（13:00～21:00）に 75%も集中しているが、平成 27 年度ではその時間

帯が35.1%に半減し、日中の午前中に31.3%、夜～深夜の時間帯に33.8%と大幅に増えている。また、平成28年度では、日中の午後～夜の時間帯が50.6%、日中の午前中が18.8%、夜～深夜の時間帯が30.6%であり、日中の午前中の減少分が午後～夜の時間帯の増加となったが、夜～深夜の時間帯は30%台で推移している。遠隔実験環境を導入したことで、「いつでも制御実験が行なえる」という安心感からか、平成27年度以降では研究活動と課題を行なう時間帯を区別して行なうことになったのではないかと考えられる。

また、受講生個人に焦点を当てると、講義中(13:00～14:30)に制御器をアップロードした受講生は、平成26年度では1名もいなかったが(講義が終わった直後にアップロードした受講生は4名)、平成27年度、平成28年度ではそれぞれ3名の受講生が講義中に制御器をアップロードし、さらに制御器の再設計・アップロードを行っていた。これは、導入した遠隔実験環境により実験結果がタイムラグなしに得られ、再実験が容易に行なえる環境を提供できたことによる効果である(平成26年度では、講義中に制御器をアップロードしても担当教員が講義で拘束されているため制御実験が行なえない)。

4. アンケート

4.1 アンケート項目の検討

文献8)で開発した遠隔実験環境の有効性の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なうこととした。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
- 考えて回答させるようにする

これらの点を考慮して、質問項目は6項目とし、4件法の選択肢とその選んだ理由を回答させた。日本人は「どちらでもない」という選択肢を選びやすい傾向があることから、「どちらでもない」を設定しないことにした。また、すべての質問項目について、選択肢に該当しない受講生を考慮して、自由記述の項目を設定した。各質問項目の選んだ理由については、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、ポジティブな回答例には必ずネガティブな回答例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。

本研究では、アンケート結果のうち、開発した遠隔実験環境がアクティブラーニングに役立ったのかを確認する質問項目として以下の3項目(Q1, Q2, Q3)を抜粋した。そのほかの項目(Q4, Q5, Q6)の詳細については文献13)を参照されたい。

Q1 今回の授業でロバスト制御の使い方を理解できましたか？

- (a) まったく理解できなかった
- (b) 理解できなかった
- (c) 理解できた
- (d) よく理解できた
- (e) その他(・もともと理解していた・自由記述)

Q2 ロバスト制御の使い方を理解するために制御実験は必要でしたか？

- (a) まったく必要なかった
- (b) 必要なかった
- (c) 必要だった
- (d) とても必要だった

【その理由】(複数回答可)

- 時間がもったいない(ほかに割くべき)
- 時間をかけて学べて良い
- 実験装置の仕様などに興味がある
- 実験装置の仕様などに興味が無い
- 何をやっているかわからなかった
- 実際の問題にどう応用すればよいかわかった
- 自由記述

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？

- (a) まったく必要なかった
- (b) 必要なかった
- (c) 必要だった
- (d) 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
- ウェブ環境のほうがコントローラの送信がしやすい
- 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よい
- 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

4.2 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名から回答を得(回答率85.7%)、平成28年度は受講生18名中17名から回答を得た(回答率94.4%)。その結果をFig.8に示す。

開発した遠隔実験環境を講義に導入し、受講生が進んで学習・理解することに役立ったかについて、質問項目2と3について着目する。質問項目2では、平成28年度に「必要なかった」という否定的な回答が12%ほどあるが、平成27年度ではゼロであり、全体として90%ほどの受講生が「必要だった」、「とても必要だった」と回答していることは満足する結果を得た。質問項目3に至っては全員が「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非常に満

Fig. 8 Questionnaire results

足する結果を得た。

質問項目 2 の理由に関しては、「時間をかけて学べて良い」(回答数 5 (H27), 5 (H28)), 「実際の問題にどう応用すれば良いかわかった」(回答数 8 (H27), 5 (H28)) とアクティブラーニングにつながる結果を得た。一方、「何をやっているかわからなかった」という回答が 5 件あったが、このうち 3 名の学生は質問項目 2 で「必要だった」に回答しており、「実際の問題にどう応用すれば良いかわかった」にも回答していることから、はじめは何をやっているかわからなかったが、制御実験を通してどう応用すればよいかを理解できたと推測できる。ただし、2 名の学生は質問項目 2 で「必要なかった」に回答しており、今後、どのようにして制御実験でロバスト制御の使い方を理解させていくのかの検討が必要であると思われる。

質問項目 3 の理由に関しては、「ウェブ環境のほうがコントローラの送信がしやすい」(回答数 9 (H27), 6 (H28)), 「すぐに実験結果が得られるので良い」(回答数 12 (H27), 10 (H28)), 「wav ファイルで実験結果を体験できてよい」(回答数 7 (H27), 2 (H28)), 「いつでも好きな時間に実験できてよい」(回答数 8 (H27), 9 (H28)) と当初の目的であった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。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。

5. おわりに

本稿では受講生が進んで学習・理解するアクティブラーニングを目的として開発した遠隔実験環境を平成 27 年度と平成 28 年度の長岡技術科学大学大学院機械創造工学専攻の科目「制御工学特論」に導入し、実際の制御器設計の個数や制御実験データを導入前の平成 26 年度の結果と比較した。

その結果、遠隔実験環境を導入した平成 27 年度では制御器の設計個数が 1 人当たり 3.8 制御器、平成 28 年度で 4.7 制御器と平成 26 年度の 1.7 倍、2.1 倍に伸び、より多くの受講生が複数の制御器設計・制御実験を行なうことにつながった。実験結果もタイムラグなくすぐに得られるので、実験結果を踏まえて制御器を再設計する受講生の割合も向上した。制御器のアップロード間隔やアップロード時間帯にも変化が生じ、遠隔実験環境の導入前と比べて受講生自体が進んで学習している傾向が得られた。制御器のアップロード間隔が 10 分以上であった学生は、性能改善のためのアプローチを何かしら考えて行なっていることがレポートに示されており、制御器の設計個数も数多く設計していた。しかし、制御器のアップロード間隔が 10 分以内であっても、よく考えて制御器の設計をしていることがレポートで示されている場合もあり、アップロード間隔が短いからといって消極的であるということに

はならない。また、アンケート結果より開発した遠隔実験環境の必要性や有効性を確認することができ、受講生が進んで学習していた裏付けを得ることができた。

今後と同様に遠隔実験環境を用いた制御実験を行なうことで、受講生のアクティブラーニングに役立っているのかの検証を続け、より有効なシステムに反映させていきたい。

参 考 文 献

- 1) 浅井, 平田: 制御教育を考える—体験の必要性と教材開発, 計測と制御, **54**-3, 147/151 (2015)
- 2) 藤田政之: 制御教育のこれから, 計測と制御, **41**-1, 78/81 (2002)
- 3) 中浦, 三平: 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実験—, 計測と制御, **46**-9, 705/708 (2007)
- 4) 大塚, 葉山: 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, 586/587 (2014)
- 5) H.H. Hahn and M.W. Spong: Remote Laboratories for Control Education, Proceedings of 39th IEEE Conference on Decision and Control, 895/900 (2000)
- 6) A. Chevalier, M. Bura, C. Copot, C. Ionescu and R.D. Keyser: Development and student evaluation of an Internet-based Control Engineering Laboratory, IFAC-PaperOnLine, **48**-29, 1/6 (2015)
- 7) 入部, 嘉戸, 藤野, 佐倉, 中川, 中川, 衣笠, 徳田: 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, 佐藤, 小林: ロバ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, 第 17 回 SICE システムインテグレーション部門講演会講演論文集, 2937/2942 (2016)
- 9) 文部科学省中央教育審議会: 新たな未来を築くための大学教育の質的転換に向けて—生涯学び続け, 主体的に考える力を育成する大学へ— (答申) 用語集, 37 (2012)
- 10) 小林, 藤岡: サンプル値 $\mathcal{H}_\infty$ 制御に基づく次元ダクト系の消音制御, 日本機械学会論文集 (C 編), **71**-710, 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, 東京図書 (2011)
- 12) 石村, 石村: 卒論・修論のためのアンケート調査と統計処理, 東京図書 (2014)
- 13) 佐藤, 竹部, 小林: ロバ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効果, 第 17 回 SICE システムインテグレーション部門講演会講演論文集, 2933/2936 (2016)

[著 者 紹 介]

佐 藤 拓 史 (正会員)

1996 年長岡技術科学大学大学院創造設計工学専攻修了。同年 (株) プリヂストン入社。99 年長岡工業高等専門学校電子制御工学科助手。2006 年長岡技術科学大学機械系助手を経て, 2009 年長岡工業高等専門学校電子制御工学科准教授, 現在に至る。ロバスト制御の機械システムへの応用に関する研究に従事。博士 (工学), 日本機械学会の会員。

竹 部 啓 輔

1998 年豊橋技術科学大学工学部工学研究科博士後期課程電子・情報工学専攻単位取得満期退学。同年同大学情報処理センター助手。2000 年長岡工業高等専門学校機械工学科助手。2003 年同電子制御工学科助手, 2007 年同准教授, 現在に至る。学習・教育支援システムの研究に従事。博士 (工学), 電子情報通信学会の会員。

小 林 泰 秀 (正会員)

1995 年東京工業大学大学院理工学研究科制御工学専攻修士課程修了。同年長岡技術科学大学助手。2002 年博士 (工学) 取得 (東京工業大学)。2007 年同准教授となり現在に至る。実システムのロバスト制御に関する研究に従事。システム制御情報学会, 日本機械学会, 日本音響学会の会員。