

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

Effectiveness of Remote Experimental System for Active Learning in Robust Control

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

Abstract : 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. The developed system was introduced in a lecture, 'advanced automation', in 2015, and was evaluated by a questionnaire. This paper reports the effectiveness of proposed experimental system on the basis of the questionnaire results as well as usage monitoring of the system. It is concluded that students in the lecture worked more actively compared with the same lecture in 2014 which has no remote experimental system.

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いという欠点がある [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うさまざまな取り組みが行われている [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、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環境に開発した [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え、アクティブラーニングの要素を持つものを意識した。

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・制御実験を行ってもらい、遠隔実験環境を導入した前年との比較を行うことで、どれくらい受講生が有機的に制御器設計を行えたかを報告する。

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、社会的な能力、教養、知識、経験を含めた汎用的な

力の育成を図る。発見学習、問題解決学習、体験学習、調査学習等が含まれるが、教室内のグループ・ディスカッション、ディベート、グループ・ワーク等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 遠隔実験環境の概要

ロバスト制御の理解において、制御対象は実モデルとノミナルモデルにモデル化誤差が存在する方が適している。そこで、実モデルが無次元の特性を持つ能動騒音制御を制御対象とした。Fig. 1 に開発した遠隔実験環境の概略図を示す。

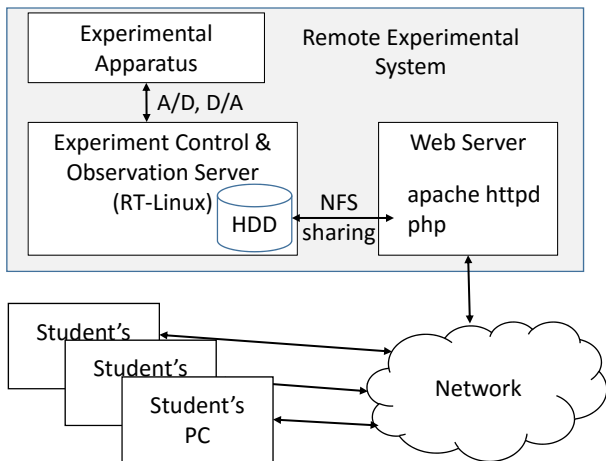


Fig. 1: Overview of remote experimental system

実験サーバは RT-Linux 環境に A/D, D/A ボードを介して制御対象と接続されている。アクティブラーニングを目的としているので、学生自身が進んで制御実験を行えることが重要である。そこで、Web サーバと実験サーバをローカルネットワークで接続することで実験サーバのディスク装置を NFS により Web サーバに共有させる。このような構成とすることで、受講生が自ら設計した制御器を Web 環境よりアップロードすると自動的に制御実験を行い、その実験結果を Web 上に掲載する環境が構成できた。また、制御性能の効果を体験できるように、エラーマイクの音声 wav ファイルとして提供するものとした。

制御実験の Web 上には受講生全員の実績を掲載し、他の受講生の実験状況を確認できるものとした。これは、他の受講生の実験状況を知ることによって、より一層、制御器の設計・制御実験を期待するものとした。

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、著者の一人が加わった平成 21 年度からは

ロバスト制御理論 (実際には H^∞ 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 `hinfscn` 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 1 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。

Table 1: Schedule

1 週目 ~ 3 週目	古典制御と現代制御理論の復習 (Matlab/Simulink の演習をしながら)
4 週目 ~ 5 週目	LQR と H^∞ 制御の関係
6 週目 ~ 8 週目	H^∞ 制御の基本：混合感度問題
9 週目 ~ 11 週目	ロバスト性能問題
12 週目 ~ 14 週目	実験装置を使った制御系設計 (レポート課題)
15 週目	まとめ

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。制御対象を変更しているのは、前年度の情報が伝達され制御系設計の理解の妨げになることを懸念したからである。

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・制御実験を行うことを期待した。

3.2 ロバスト制御器の設計実習

平成 26 年度 (遠隔実験環境の導入前) と平成 27 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次の制御器をどのタイミングでアップロードしたか？
- (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。それらをまとめたものを Table 2 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次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分少ない。(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。Table 2 の結果を年度ごとの割合でグラフ化したものを Fig. 2 に示す。

Table 2: Comparison of controller design

	H26 年度 (18 人受講)	H27 年度 (21 人受講)
設計数		
1	9 (50.0%)	0 (0.0%)
2	4 (22.2%)	2 (9.5%)
3	0 (0.0%)	8 (38.1%)
4	2 (11.1%)	3 (14.3%)
5	3 (16.7%)	8 (38.1%)
平均	2.3 制御器	3.8 制御器

アップロード間隔	(22 制御器)	(59 制御器)
5 分以内	14 (63.6%)	22 (37.3%)
5 分 ~ 10 分	0 (0.0%)	10 (16.9%)
10 分 ~ 30 分	0 (0.0%)	12 (20.3%)
30 分 ~ 60 分	1 (4.5%)	3 (5.1%)
1 時間以上	7 (31.8%)	12 (20.3%)

アップロード間隔	(18 人受講)	(21 人受講)
10 分以上	3 (16.7%)	7 (33.3%)

アップロード時間	(40 制御器)	(80 制御器)
9:00 ~ 13:00	4 (10.0%)	25 (31.3%)
13:00 ~ 17:00	16 (40.0%)	17 (21.3%)
17:00 ~ 21:00	14 (35.0%)	11 (13.8%)
21:00 ~ 3:00	1 (2.5%)	27 (33.8%)
3:00 ~ 9:00	5 (12.5%)	0 (0.0%)

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 回までしか行っていなかったが、平成 27 年度では、90% を超える受講生が制御器設計を 3 回以上行っている。平均すると、平成 26 年度では受講生 1 人当

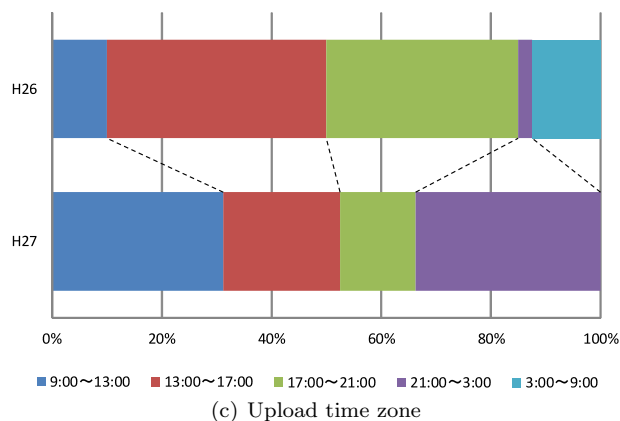
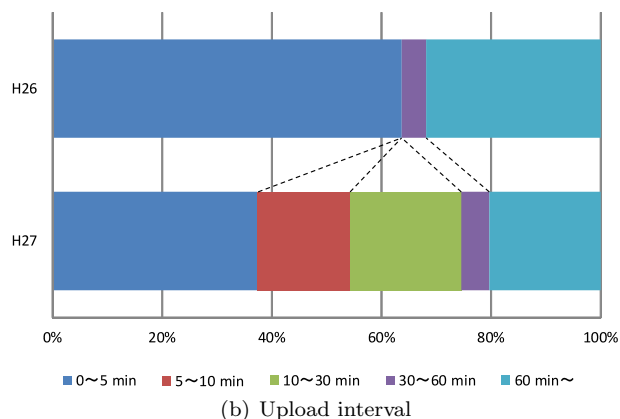
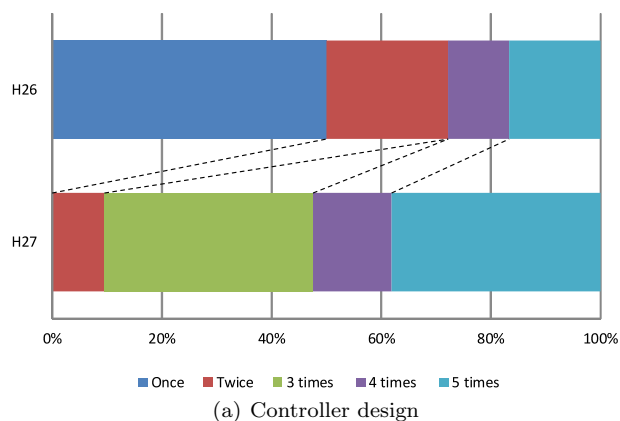


Fig. 2: Comparison of the control experiment

たり 2.3 制御器、平成 27 年度では 3.8 制御器の設計を行っており、1.6 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制御器の設計回数が 2 回以下に集中しているものと思われる。一方、平成 27 年度では、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と思われる。

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% 弱まで低減した。しかし、10 分以内のアップロードは 50% 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 年度では、自動的に実験が行われその結果が 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無くなった (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、20% 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思われる。

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 人に対して 3 人 (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 人に対して 7 人 (33.3%) 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。一概に遠隔実験装置の導入成果とは言えないが、制御器のアップロード間隔が 10 分以上の受講生数が倍増していることはアクティブラーニングに役立っていると思われる。

制御器をアップロードした時間帯を 9:00 ~ 13:00(日中の午前中), 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。受講生は大学院生であるので、13:00 ~ 21:00 は研究活動が本格化する時間帯である。遠隔実験環境の導入したことで、「いつでも制御実験が行える」という安心感からか、平成 27 年度では研究活動と課題を行う時間帯を区別して行うことにつながったのではないかと思われる。

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 年度では一人もいなかったが (講義が終わった直後にアップロードした受講生は 4 人), 平成 27 年度では 3 人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、再実験が容易に行える環境を提供できたことによる効果であると考えられる (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確認と今後の改善点を抽出する目的で、平成 27 年度の受講生に対してアンケートを行うこととした。アンケート項目の設定に関しては、文献 [10], [11] 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う部分については、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とともに、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、受講生からの回答率を上げる工夫をした。

Q1 今回の授業でロボ制御の使い方を理解できましたか？

1. まったく理解できなかった
2. 理解できなかった
3. 理解できた
4. よく理解できた
5. 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？

1. まったく必要なかった
2. 必要なかった
3. 必要だった
4. 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 (他に割くべき)
- ・ 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ない
- ・ 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良いかわかった
- ・ 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？

1. まったく必要なかった
2. 必要なかった
3. 必要だった
4. 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

Q4 ロバスト制御の使い方を理解するために Matlab/Simulink の数値例は必要でしたか？

1. まったく必要なかった
2. 必要なかった
3. 必要だった
4. 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(他に割くべき)
- ・ 時間をかけて学べて良い
- ・ 問題設定が人工的過ぎた
- ・ 不確かさを持つモデルをどう構成すれば良いかわかった
- ・ 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良いかわかった
- ・ 自由記述

Q5 実験装置の制御対象として、能動騒音制御は適切でしたか？

1. まったく不適當だった
2. 不適當だった
3. 適當だった
4. とても適當だった

【その理由】(複数回答可)

- ・ 難し過ぎた
- ・ 簡単すぎた
- ・ 丁度良い難易度だった
- ・ 興味が持てなかった
- ・ 設定が人工的過ぎた
- ・ 現実的な設定だった
- ・ モータ制御など、別の制御対象がよかった
- ・ 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良いかわかった
- ・ 自由記述

Q6 より理解しやす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

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、受講生 21 名中 18 名から回答を得た(回答率 85.7%)。その結果を Fig. 3 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 と 3 とも「まったく必要なかった」、「必要なかった」という否定的な回答はゼロであり、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。

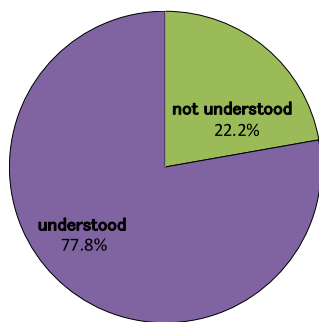
質問項目 2 の理由に関しては、「時間をかけて学べて良い」(回答数 5)、「実際の問題にどう応用すれば良いかわかった」(回答数 8)とアクティブラーニングにつながる結果を得た一方、「何をやっているかわからなかった」という回答も 1 件あり、今後、どのようにして制御実験でロバスト制御の使い方を理解させていくのかの検討が必要であると思われる。

質問項目 3 の理由に関しては、「ウェブ環境の方がコントローラの送信がしやすい」(回答数 9)、「すぐに実験結果が得られるので良い」(回答数 12)、「wav ファイルで実験結果を体験できてよい」(回答数 7)、「いつでも好きな時間に実験できてよい」(回答数 8)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 件づつあり、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。

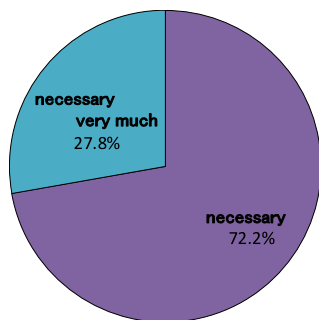
5. おわりに

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。

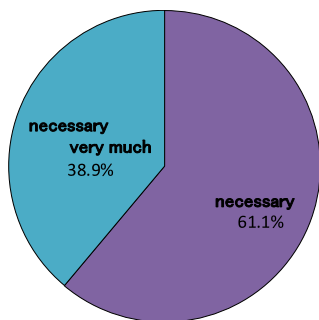
その結果、遠隔実験環境を導入した平成 27 年度の方が、制御器の設計個数が 1 人当たり 3.8 制御器と平成 26 年度の 1.6 倍に伸び、より多くの受講生が複数個の制御器設計・制御実験を行うことにつながった。実験結果もタイムラグなくすぐに得られるので、実験結果を踏まえて制御器を再設計する受講生の割合も向上した。制御器のアップロード間隔やアップロード時間にも変化が生じ、遠隔実験環境の導入前と比べて受講生自体が進んで学習している傾



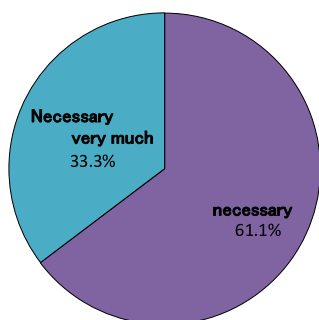
(a) Question 1



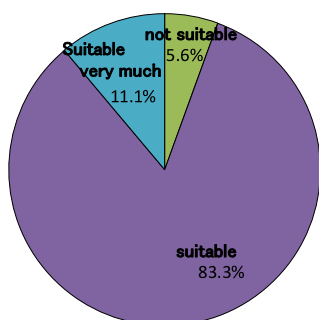
(b) Question 2



(c) Question 3



(d) Question 4



(e) Question 5

Fig. 3: Questionnaire results

向が得られた。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。

今年度も同様に遠隔実験環境を用いた制御実験を行い、平成 27 年度と同様な傾向を示すのか、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] 浅井徹, 平田光男, “制御教育を考える — 体験の必要性と教材開発”, 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] 竹部啓補, 佐藤拓史, 小林泰秀, “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, 2016 (発表予定)
- [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”, pp.37, 2012
- [10] 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
- [11] 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