

テーマ「職業能力開発の実践」

副題 実機とシミュレーションを連携したフィードバック制御に係る
教材の作成及びその教育訓練効果に関する検討

所属組織 独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構
執筆者 茂木 望（北海道職業能力開発大学校）

第1章 序論

1.1 研究の背景

近年、コンピュータ技術の進歩により、様々な分野でコンピュータによる電子制御が一般的になっている。そのため、産業界においても制御工学の重要性はますます高くなっており、制御の知識を有する人材の育成が急務となっている。制御技術は、エアコン、冷蔵庫、全自動洗濯機などの家庭用電気製品から、自動車、建設機械、化学プラント、ロボット、航空機、宇宙船など機械工学、航空工学から宇宙工学にいたるまで、幅広い分野で重要な役割を担っており。そのため、制御教育の充実を目指した研究が高等教育機関（高専、大学、社会人など）だけでなく、初等中等教育機関においても行われており、多くの事例が報告されるとともに関連書籍も出版されている^[1-10]。

現在、シミュレーション技術は産業界のものづくりの現場に普及しており、産業分野や企業規模によって差はあるものの、これを用いて製品の設計・開発を行うことが標準的な手法として広まっている。しかし、このシミュレーション技術をあまり活用できていない企業もある。その理由としては、対応できる人材不足やシミュレーションをうまく活用する戦略、ノウハウがないといったものが多く挙げられている。

このような中、北海道職業能力開発大学校（以下、北海道能開大）では、専門課程電気エネルギー制御科（以下、専門電気）において制御工学や自動制御といった主に学科を実施し、応用課程生産電気システム技術科（以下、応用電気）では、コンピュータ応用実習、電子装置設計製作実習、パワーエレクトロニクス実習、電動車両走行システム設計製作実習、電動応用装置設計製作課題実習や開発課題等の実技において各種シミュレーションソフトウェアを活用して設計を行っているところである。しかし、ものづくりとシミュレーションの連携が十分にできているとは言い難く、特に、シミュレーションやその解析データと学生の思考をうまく繋げたものづくりへの活用、すなわち、シミュレーションを効果的に活用するために必要となる解析結果の妥当性を判断する力や創造力がいまだ不十分である。それらの能力を向上させるためには、単に学生のテクニカルスキルを向上させるだけでなく、後述する「応用課程で養成する能力」^[11]の向上が必要であり、それにより「理解するための解析」から「活用するための解析」へ導き、知識・技術を実務に適用させる能力の向上を図る必要がある。

「応用課程で養成する能力」

職業能力開発大学校応用課程（以下、応用課程）は、ものづくりを基盤とした現場密着型の訓練による独自の教育訓練システムを導入し、工業技術を理解するだけでなく、活用や実践できる能力を習得させ、また、従来の技術はもとより新たな技術を自ら習得できる能力を持たせ、次代を担う高度で多様な職業能力を有し、企業の発展に貢献できる職業人を養成することを目的としており、この目的を達成するために応用課程では以下の能力を養成する。

- (1) 専門的知識及び工学的理論体系を実務に適用する能力
- (2) 品質，コスト及び納期をバランス良く調和させることのできる能力
- (3) 独自性を持って創意工夫できる能力と構想力
- (4) 技能・技術の複合に対応することのできる能力
- (5) 職業人に必要な基礎能力(5S など)
- (6) ヒューマンスキル・コンセプチュアルスキル

対人関係能力であるヒューマンスキルと概念化能力であるコンセプチュアルスキルには、①課題発見・分析能力，②計画推進力，③組織力が属す。

また，それぞれの構成能力として，①課題発見・分析能力には「課題発見力」，「調査・分析力」，「課題解決提案力」，②計画推進力には「マネジメント力」，「実践力」，「リーダーシップ力」，③組織力には「チームワーク力」，「コミュニケーション力」，「プレゼンテーション力」により構成されている。これら，ヒューマンスキル・コンセプチュアルスキルについて，図 1.1 に構成能力を示す。

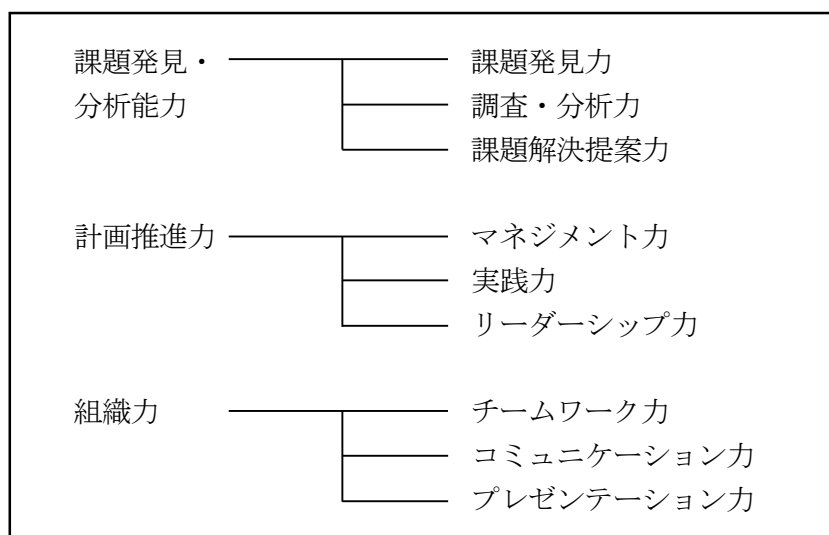


図 1.1 ヒューマンスキル・コンセプチュアルスキル構成能力

1.2 研究の目的

本研究の目的は，フィードバック制御系を対象としたものづくりの過程において，シミュレーション技術の活用を図りながら関連する知識・技術を高めるとともに，応用課程で養成する能力を向上させることである。

第2章 北海道職業能力開発大学校における自動制御教育の現状と問題点

2.1 専門電気と応用電気における自動制御教育の現状

北海道能開大における自動制御に関連する教育は、主に図 2.1 に示す流れである。

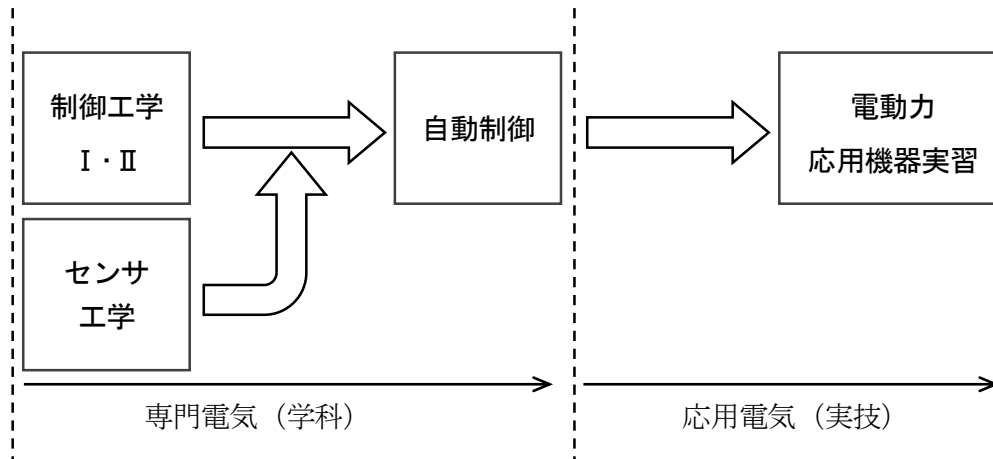


図 2.1 自動制御に関連する科目

なお、学科は講義のみではなく、図 2.2 に示すシミュレーションソフトウェアによる演習を実施して制御理論に対する理解が深まるようにしている。

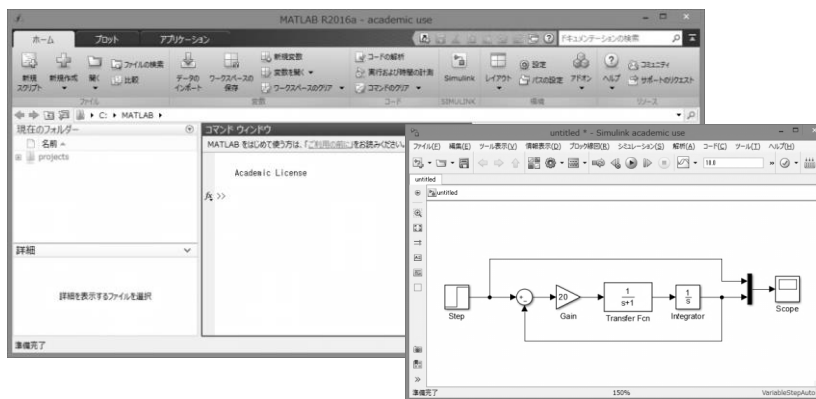


図 2.2 シミュレーションソフトウェア (MATLAB/Simulink)

また、制御工学 I・II、自動制御、電動力応用機器実習の詳細については、図 2.3 に示すシラバスのようになっており、専門電気では座学とシミュレーションソフトウェアを用いながら制御理論の学習を行い、それを踏まえて応用電気では、実際の機器に理論を適用させたモータ制御システム的设计やその評価方法及びモデルベースデザインについて学習することとしており、教材として市販の倒立 2 輪ロボットや電動カートを応用電気に整備している。

授業科目の訓練目標					
課程	区分	科目	授業科目の目標	No	授業科目のポイント
専門課程	系基礎学科	制御工学Ⅰ	<p>定量制御の基礎となるフィードバック制御システムの諸特性を解析するため、システムの伝達関数表現法や過渡応答について理解するとともに、そのシミュレーション技術について学習します。</p>	①	シーケンス制御とはどのような制御か知っている。
				②	フィードバック制御の基本構成について知っている。
				③	ラプラス変換について知っている。
				④	ブロック線図によるシステムの表現方法を知っている。
				⑤	伝達関数を知っている。
				⑥	ブロック線図の等価変換について知っている。
				⑦	インパルス応答について知っている。
		⑧		ステップ応答について知っている。	
		⑨		過渡応答シミュレーションについて知っている。	
		制御工学Ⅱ		①	周波数応答について知っている。
				②	ベクトル軌跡(ナイキスト軌跡)について知っている。
				③	ボード線図について知っている。
				④	フィードバック制御系の安定判別について知っている。
				⑤	サーボ制御系について知っている。
	⑥		プロセス制御系について知っている。		
	⑦		周波数応答のシミュレーションについて知っている。		
	系専攻学科	自動制御	<p>「制御工学Ⅰ」、「制御工学Ⅱ」で学んだ内容を基に、DCモータの速度制御を例にとり、実際の自動制御への適用方法について学習します。</p>	①	DCモータの構造について知っている。
				②	DCモータのトルク発生原理について知っている。
				③	DCモータの速度とトルクの関係について知っている。
				④	DCモータの速度制御について知っている。
				⑤	無負荷特性と負荷特性について知っている。
				⑥	DCモータの動特性について知っている。
				⑦	機械系から電気系への等価変換について知っている。
				⑧	モータの伝達関数について知っている。
	応用課程	専攻実技	<p>パワーエレクトロニクスの応用分野として、電動車両走行システムを実習課題とし、制御対象のモデリング手順やフィードバック制御系の設計手順を実習することにより、電動応用システムの構築手法を習得します。</p>	①	電気自動車のシステム設計事例を理解できる。
				②	駆動用モータの構成と基本特性および制御手法を理解できる。
				③	モデルベース開発とその必要性について理解できる。
④				シミュレーションによる実行可能な仕様書について理解できる。	
⑤				制御システムの設計手順を理解できる。	
⑥				モデルベース開発の確認ができる。	
⑦				システムモデリングができる。	
⑧				制御対象に対する制御系設計ができる。	
⑨				電動車両用モータ制御とその評価ができる。	
⑩				自動車業界のモデルベース開発事例を知っている。	

図 2.3 自動制御関連科目のシラバス (訓練目標)

2.2 現行科目における問題点

専門電気では、自動制御以外に電子回路工学や電気機器学、センサ工学等多くの電気・電子分野を網羅してカリキュラムが編成されている。しかし、それぞれの技術要素は単独で習得することが多く、それらを組み合わせて活用する授業はほとんどない状態である。そのため、学生も各要素をそれぞれ繋がりのないものとして捉え、各科目を分けて考えることが多くなっている。結果として、たとえば電気機器学で学習している直流モータを自動制御の制御対象とした場合、モータの等価回路までは既知の内容であるにも関わらず、まったく初めてのことに感じてしまい、これまでに培った知識や技術を活かすことができなくなってしまっている。また、制御工学においては少なからず数式を扱うが、その理解に時間がかかり、実際の制御対象への適用まで学習を進めることが難しいのが現状である。こうした中、応用電気ではフィードバック制御を理論だけでなく実際に装置に適用して学習ができるような実習教材として、倒立2輪ロボットや電動カートを整備し体感的な理解の向上を目指したところである。

しかし、これらの実習教材は実験用に使用する制御装置などは事前に組み立てられていることから、相対的にマイコンのプログラムを書き換えてパラメータを変更するような作業が多くなっており、装置を動かすことはできても、何をしているかがよく理解できないなどの意見も聞かれる。

そこで、これを解決できるようにハードウェアと理論の対応について理解を目指すことになるが、これらの教材は筐体の姿勢制御やインバータ駆動、エネルギー回生装置等の機能も含まれているためモデルが複雑になっており、考慮しなければならない要素が多く、専門電気の修了者がこれらの教材ですぐに理論と実機の関連を正確に理解することは困難となっている。

2.3 学生の理解不足の原因の本質

制御工学に対する理解が不足している原因としては、その学習がラプラス変換や伝達関数の理解から始まることにより、制御工学が数学のような抽象的な学問のように感じられ、興味を持ちにくいというものがある^[11]。また、制御装置に使用されているマイコンを事前に扱ったことがない場合、プログラミングに関する技術の習得が必要であり、負担が大きいといったものが報告されている^[12]。

第3章 北海道職業能力開発大学校における自動制御教育の改善提案

3.1 学生に習得させる制御の概念

本研究で扱うフィードバック制御は、目標値と制御値の偏差を検出して、自動制御を行う方式であり、現時点での要素値を検出するための時間が必要になるため、制御には遅れが生じ、偏差が検出されるまで制御系は全く動作しないという特徴がある。また、扱う情報は連続性を持っており、制御の回路構成は閉ループとなる。なお、フィードバック制御の例としては、比例動作 (P 動作)、積分動作 (I 動作)、微分動作 (D 動作) の3種類があ

り、比例動作は単独で使用されるが、積分動作と微分動作は比例動作に組み合わせて使用することになる。

3.2 学生に制御の本質を理解させるための要点

学生は数学や計算力に自信がないことが多く、さらには高等学校において微分・積分を履修していないケースが増えている。そのため、自動制御教育においても、いきなり数学的な面からアプローチをしてしまうと、とたんに興味をなくしてしまいがちである。そのため、自動制御教育においては、関連する身近な現象から興味を引き出すことが大切である。

そこで、たとえば手のひらに棒を立てるという動作を提示し、棒を立てるために必要不可欠な要素として、まず“棒”が必要であり、これが「制御対象」であり、これを立たせることが「目的」であることを確認する。さらに、棒の状態を知るための“目”「センサ」や棒をどのように動かせばよいのかを判断する“頭”「制御器」、そして、その判断にしたがい棒を動かすための“手”「アクチュエータ」が必要になるといったように、制御の目的が何であって、それを達成させるためには何が必要であるのかということを実際に理解させることが重要である。

3.3 自動制御教育の改善方針

学生に自動制御の本質を理解させるためには、本質とは関係のない要素を省き、必要最小限の要素で学習を行うことが近道であると考えられる。しかし、整備済み教材は、倒立の姿勢制御やマイコンプログラミングといった付随する要素があり、自動制御の本質がぼやけてしまっている。そこで、本研究では自動制御の本質を理解しやすいように、必要最小限の要素のみで構成された自動制御学習教材の提案を行うこととする。

3.4 教材に求められる事項

本研究で開発する教材の要件としては、前述の改善方針を基にして以下のように定めた。

- ① 実物の挙動を計測器なしで直接観測できること
- ② シミュレーションで挙動を予想し、実験で確認できること
- ③ 改善設計をシミュレータ上でパラメータ調整により行い、実機で検証できること

第4章 実機とシミュレーション連携させたフィードバック制御の教育

4.1 開発する教材の概要と特長

開発する教材は、制御対象の動作を確認する際にシミュレーションによる動作予想と実機による動作確認を明確に区別できるようにするため、実機における現象の確認において、図 4.1 に示すように計測器を使わなくても実機を目で見るだけで直感的にフィードバック制御を体感できる角度制御の実験ができる教材とする。また、制御設計・シミュレーションと実機を一つ一つ対応させることにより、学生が各種信号の流れや各構成部品の役割を理解しやすくなるようにする。

なお、このことにより、シミュレーションモデルと実機が一致することになり、実機を動作させる前にシミュレーションのパラメータ調整によって実機の挙動を事前に確認し、最適なパラメータを求めることができるようになることから、ものづくりを効率的に行うことができるようになる。

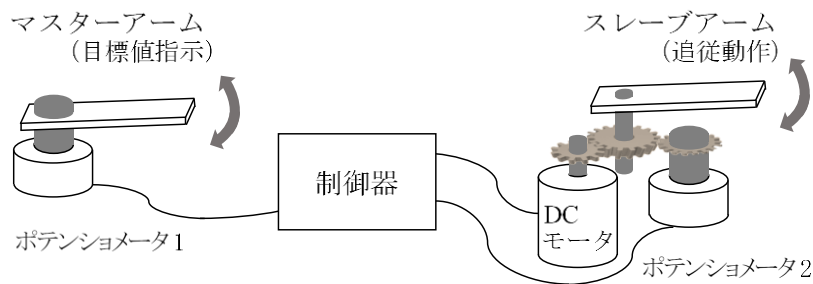


図 4.1 サーボ機構（角度制御）の実習装置

また、前述の現状を踏まえ教材は、専門電気で習得した知識・技術を複合的に活用できるものとする、具体的には、制御回路には電子回路工学で学んだアナログ演算回路、制御対象としては電気機器学で習得した直流モータに関する知識の活用ができるものとし、さらに学生の創意工夫により装置の改善を求めるものとする。

4.2 開発した実習教材

角度制御システムのブロック図は制御理論に基づき、図 4.2 のように表すことができる

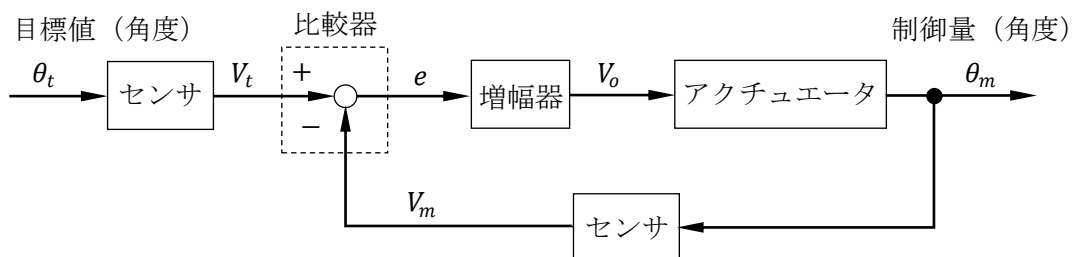


図 4.2 角度制御システムの概要

本研究では、アクチュエータには、学生が原理を履修済みで製作も手軽に行うことができる小型 DC ブラシモータを用いることとし、そのブロック線図を図 4.3 のように導出した。なお、図 4.3 において V : 印加電圧, θ : 回転角度, K_M : ゲイン定数, T_M : 機械的定数である。

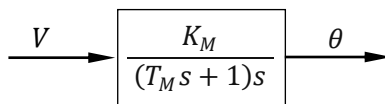


図 4.3 直流モータのブロック線図 (回転角度)

さらに、図 4.2 と図 4.3 から図 4.4 に示すブロック線図を導出できる。ここで、 K_{PT} : 角度センサの比例係数, A_V : 増幅器の増幅率である。

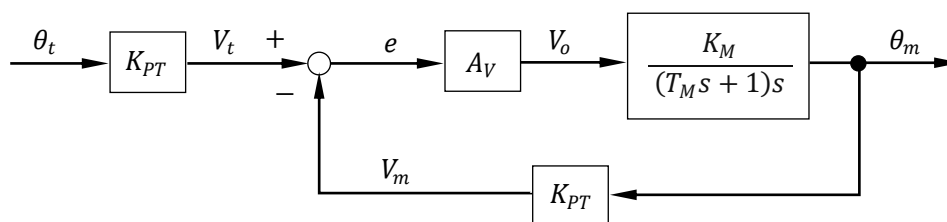


図 4.4 角度制御システムのブロック線図

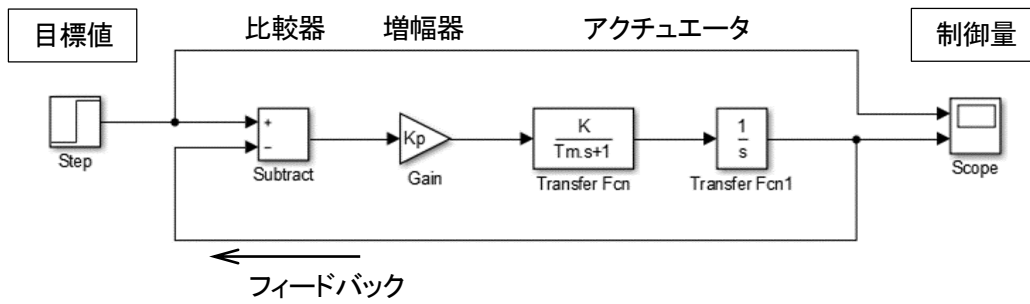
なお、シミュレーションモデルの作成は、MATLAB/Simulink を用いることにより、学生がプログラミングのような言語を意識することなく、CAD の感覚で行うことが可能である。

実機の製作においては、制御対象である角度の変化は連続した現象であることから、制御理論との同一性を重視し、角度センサとフィードバックコントローラにはそれぞれアナログ素子であるポテンシオメータとオペアンプを用いることとして、回路を設計した。

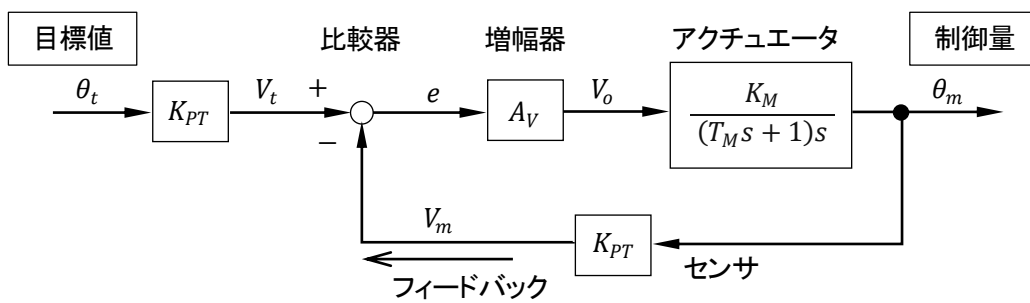
以上の制御設計とシミュレーション及び実機の回路との対応をまとめたものを図 4.5 に示す。

図 4.5 に示す実機の回路では、目標値の角度を R_{PT1} (ポテンシオメータ) により電圧信号に変換して検出するとともに、モータの回転角度を R_{PT2} により電圧信号に変換して検出する。それらの電圧信号をオペアンプの減算回路によって比較し、目標値と制御量が一致しない場合は、その差をオペアンプの反転増幅回路により増幅して直流モータを駆動させている。

シミュレーション



制御設計



実機の回路

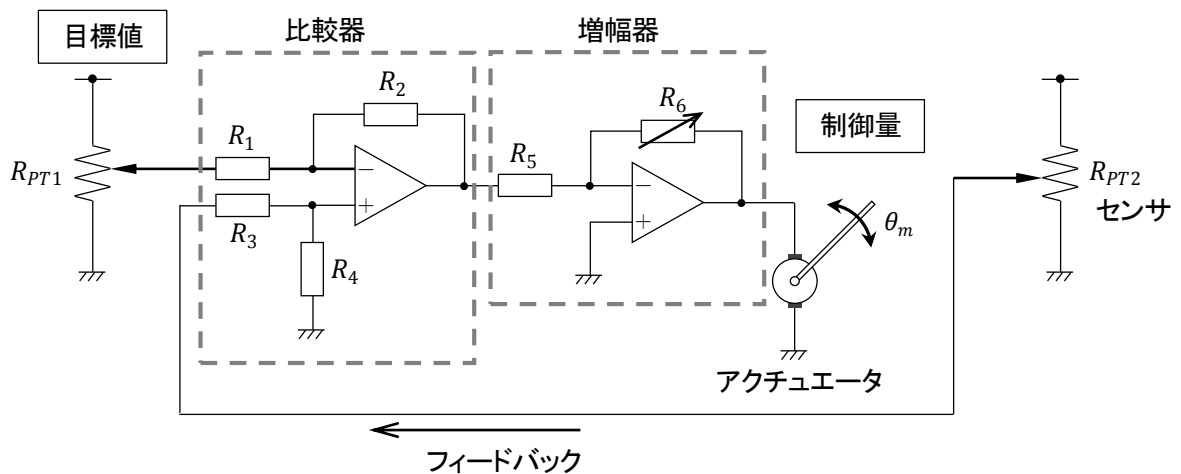


図 4.5 制御設計とシミュレーション及び実機の回路との対応

実機の製作において、比較器や増幅器については、回路の修正が容易に行えるようにブレッドボードを用いた。また、アクチュエータについては、選定したモータ単体では、回転速度が速すぎることや角度センサの取り付けが難しいことから、模型用のギヤボックスを組み合わせて用いた。

4.3 テキストの作成

実習を行うにあたり必要な知識は、専門電気のカリキュラムにおいてほぼ網羅されている。しかし、その習得度合いは学生によってさまざまであることや限られた時間で実習を実施するためには、効率よく復習や確認をすることができる資料が必要であると考え、文献^[14-16]を参考にしてフィードバック制御の理解に必要な技術を中心に図 4.6 に示すように 10 章からなるテキストを作成した。

第 1 章 制御工学	第 6 章 直流モータとブロック線図
1-1 ブロック線図と伝達関数	6-1 直流モータの基礎式
1-2 ラプラス変換	6-2 直流モータの伝達関数
1-3 制御システムの特性評価	6-3 直流モータのブロック線図
1-4 ボード線図の描き方	
第 2 章 センサ	第 7 章 角度制御システム
2-1 センサの役割	7-1 角度制御システムの各構成要素
2-2 タコジェネレータ	7-2 角度制御システムのブロック線図とアナログ制御による回路図
2-3 ポテンシオメータ	
2-4 ロータリエンコーダ	第 8 章 制御対象のパラメータ同定
第 3 章 制御回路	8-1 シミュレーションを活用した設計の流れ
3-1 オペアンプの原理	8-2 フィードバック制御による角度制御システムの安定化
3-2 電圧増幅回路	8-3 2次遅れシステムの特性に着目したパラメータ同定
3-3 加算回路	8-4 ステップ応答実験
3-4 差動増幅回路・減算回路	8-5 パラメータの導出
3-5 微分回路	8-6 検証実験
3-6 積分回路	
第 4 章 電流増幅回路	第 9 章 制御システムの安定性評価
4-1 電流増幅	9-1 フィードバック制御と負帰還
4-2 トランジスタの動作	9-2 応答の遅れと安定性
4-3 直流モータの駆動回路	9-3 ボード線図による安定判別
第 5 章 アクチュエータ	9-4 安定性改善の目安
5-1 アクチュエータの役割と種類	9-5 ゲイン補償
5-2 モータの分類	9-6 遅れ補償
5-3 直流モータの原理	9-7 進み補償
	第 10 章 制御システムの特性改善
	10-1 定常偏差の解消
	10-2 応答速度の改善
	10-3 PID 補償器のパラメータ調整

図 4.6 作成したテキストの構成

4.4 実習の構成

実習は実際の開発を想定してグループで行い、順を追って問題を解決しながら課題に取り組むこととした。流れとしては、図 4.7 に示すように、はじめに学生自身が実機製作を行うことにより、フィードバック制御を実現するために必要となる要素を確認させる。さらに実機を動作させることにより、角度制御の現象を目でみて体験することにより、フィードバック制御に対する興味の喚起を行う。

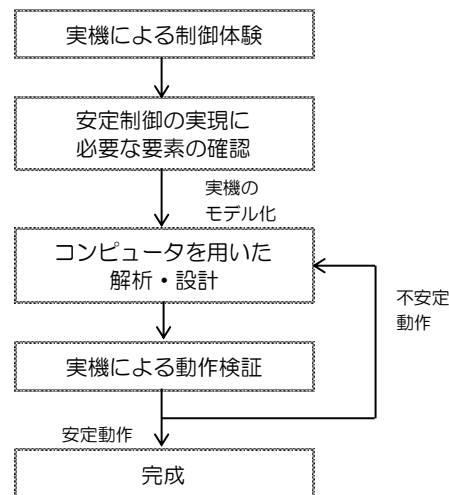


図 4.7 実習の構成

次に、角度制御を行う上で必要となる制御理論の確認を行った後、MATLAB/Simulink を用いてシミュレーションモデルを作成する。なお、モデルの決定に必要な各パラメータは、実機で使用した部品について、公表されている仕様書から調べる方法や、単体の特性試験を実施して行う方法が考えられる。たとえば、コントローラの増幅器は、オペアンプの反転増幅回路を使用していることから、その抵抗値の比により増幅率を計算で求めることができる。しかし、アクチュエータは模型用のため詳細な仕様が開示されておらず、また、ギヤボックスを学生自身が組み立てることによる装置のばらつきも考えられる。そこで、アクチュエータについては、実機に対してステップ応答実験を行い、その結果を用いるとともに、角度制御系が2次遅れになることを利用して必要なパラメータを求める。

続いて、課題発見や分析能力を高めるため、実機を動作させた際に生じるオペアンプ出力の飽和やギヤのバックラッシュといった現象についても、学生に考えさせる。さらに、安定制御を行う方法として、古典制御であるPID制御をモデルに組み込むことを検討させる。その際、学生はそのパラメータ調整をシミュレーション上で行い、実機の挙動を予想してから、実機による検証を行うことで、設計におけるシミュレーション活用の有用性を体感できるようにする。そして、これらを繰り返しながら、フィードバック制御の理解を深めるとともに、問題の発見とその解決方法の習得を目指す。以上、開発した教材のまとめを図 4.8 に示す。

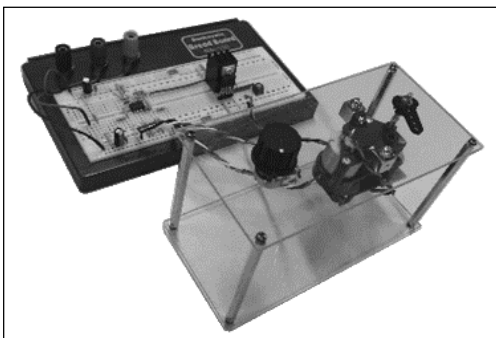
実機とシミュレーションを連携した フィードバック制御に係る教材

背景

- ・ものづくりとシミュレーションの連携が十分にできていない
- ・とくにシミュレーション結果の妥当性を判断する力や創造力が不十分である

実機

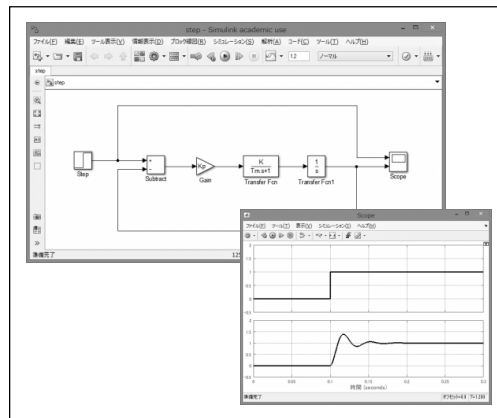
実機の製作



- ◎ 計測器なしで直接 挙動を見る
 - *ゲインをあげたとき
 - 行き過ぎなどの振動的応答
 - *ゲインを下げたとき
 - 目標手前で止まる偏差残留
- ◎ パラメータ同定
 - *角度制御が2次遅れ系になることに着目して、パラメータを求める
- ◎ 結果確認
 - *シミュレーションモデルにあわせて実機を変更し、動作結果の確認をする

シミュレーション

シミュレーションモデルの作成



- ◎ 実機パラメータによるシミュレーション実行
 - *実機とモデル出力を比較し、差が大きいとき
 - モデルの見直し
- ◎ 特性改善 (PID 制御)
 - *モデルを変更し、パラメータを調整する

特長

- ・角度制御により、実機の挙動を直接みることができるため、理解しやすい
- ・実機に基づいたモデル作成で、シミュレーション結果をものづくりに活かせる

図 4.8 開発した教材のまとめ

第5章 教育訓練への適用及び効果評価

5.1 実習の実施と結果

2016年12月12日～16日において、応用電気1年生14名に対して作成した教材を用いて授業を実施した。

実習では最初に角度制御装置のデモンストレーションを行い、課題の目的と内容について説明するとともに、授業前アンケートを実施した。その後、課題に取り組む上で必要となる前提知識について、専門電気において履修済みの事項も含めて、反復学習による理解度の向上や復習を兼ねて、作成したテキストを用いて説明を行った。

続いて、3～4名のグループに分かれ、グループごとに使用する部品のデータ収集や角度制御装置の製作及びシミュレーションを行うためのブロック線図の作成を行わせた。図5.1は、教材の組み立て調整を行っている際の実習風景である。

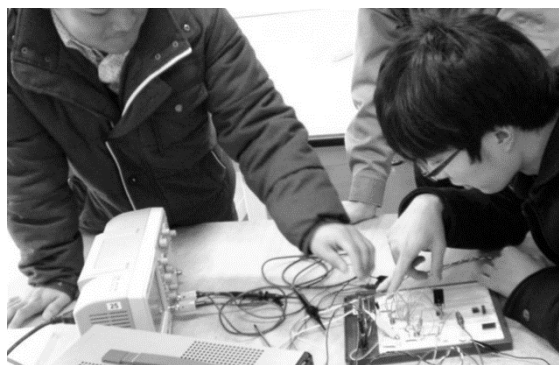


図5.1 実習風景

続いて、実機をコンピュータシミュレーションで解析するために必要となるパラメータについて説明を行った。なお、実機で使用する部品の各種パラメータが事前に分かっているならば、その値を使うことも可能であるが、本教材では模型用のモータやギヤボックスを使用したため、シミュレーションを行う上で必要となるパラメータは、実験により取得することとした。その際、目標値としてステップ波形を入力したときのモータ単体の応答を観測するのではなく、角度制御系は2次遅れ要素となることを利用して、ギヤボックスや角度センサを含めた角度制御装置全体での応答を観測してパラメータ同定を実施した。

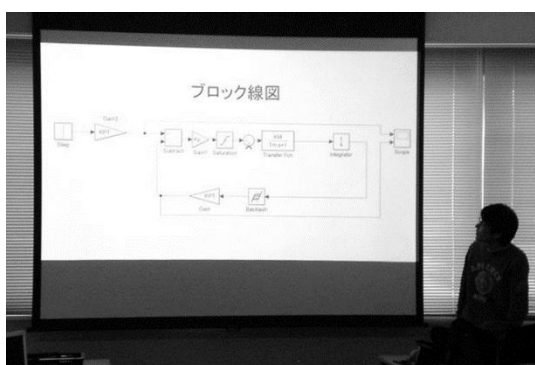
制御システムの性能を向上させる方法としてPID（比例・積分・微分）制御の説明を行った。PID制御は、産業界の様々な分野で利用されており、そのシェアは90%以上と言われている。その理由としては、PID制御はシンプルな構成でありながら多くの制御対象に適用が可能ということが挙げられることから、本研究では、これを用いた。

その後、シミュレーションモデルにパラメータを設定し、実機と同様の解析を行わせるとともに、制御量に定常偏差があることを指摘し、PI制御の適用を促しながら、定常偏差を解消するための方法を検討させた。また、PI制御における各パラメータの調整はジューグラー・ニコルスの限界感度法を用いることとし、事前にシミュレーションモデルによる実験を行い適切なパラメータを求めてから、実機にそれを適用させることで、シミュレーションを用いた設計の利点を体感させるようにした。

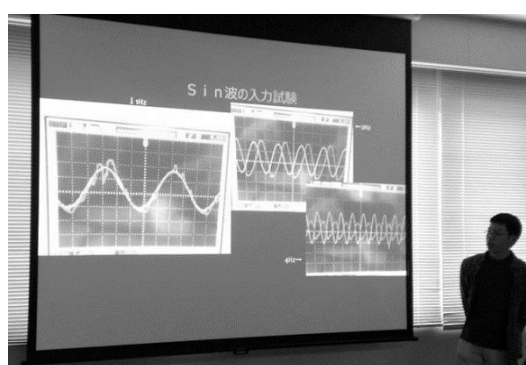
最後に、取得したパラメータを用いてシミュレーションを実施した際に、実機の応答とのずれが生じている場合、その原因について考察するように指示を行ったが、実習時間も限られているためヒントを与えながら原因を究明させ、それに基づきシミュレーションモデルの変更を行わせた。

また、以上の実習内容については、応用課程で養成する能力の一つであるプレゼンテーション力の向上を図るため、各グループで工夫したことを中心にプレゼンテーション資料の作成を行わせ、発表会を実施した。図 5.2 にその実施風景を示す。

図 5.2 (a) は、作成したシミュレーションモデルについて、(b) は、実機の周波数応答に関する発表である。



(a) 作成したシミュレーションモデル



(b) 実機の周波数応答

図 5.2 プレゼンテーションの実施風景

5.2 教育訓練の効果

教材の教育訓練効果を検証するため、実習を実施した応用電気 1 年生 14 名に対して、実習前後にアンケート調査及び確認テストを実施した。

教材に含まれる技術要素を表 5.1 に示す 8 項目に分け、それぞれの項目について実習前後で学生の興味や理解度がどのように変化したか、調査を行った。

表 5.1 興味及び理解についての調査項目と内容

項 目	内 容
制御工学	フィードバック制御の考え方
センサ	センサの原理・使用方法
制御回路	アナログ電子回路の設計・製作
制御素子	トランジスタやオペアンプの動作原理
アクチュエータ	小型直流モータの活用
サーボ機構	角度制御の方法
シミュレーション	MATLABによる解析
システムの安定性評価	製作物に対する評価

① フィードバック制御に対する興味の変化

興味の変化については、図 5.3 に示す 5 段階の尺度によりアンケート調査を行った。

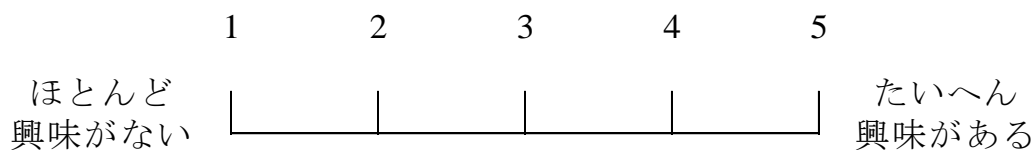


図 5.3 興味度の尺度

調査結果を表 5.2 及び図 5.4 に示す。値は学生 14 人の平均である。

表 5.2 学生の興味変化

項目	実習前	実習後	向上幅
制御工学	2.79	3.71	0.93
センサ	2.79	3.43	0.64
制御回路(電子回路)	2.79	3.86	1.07
制御素子(電子部品)	2.86	3.71	0.86
アクチュエータ(モータ)	2.79	3.57	0.79
サーボ機構(角度制御)	2.57	3.50	0.93
シミュレーション (MATLAB)	2.86	3.79	0.93
システムの安定性評価	2.07	3.29	1.21

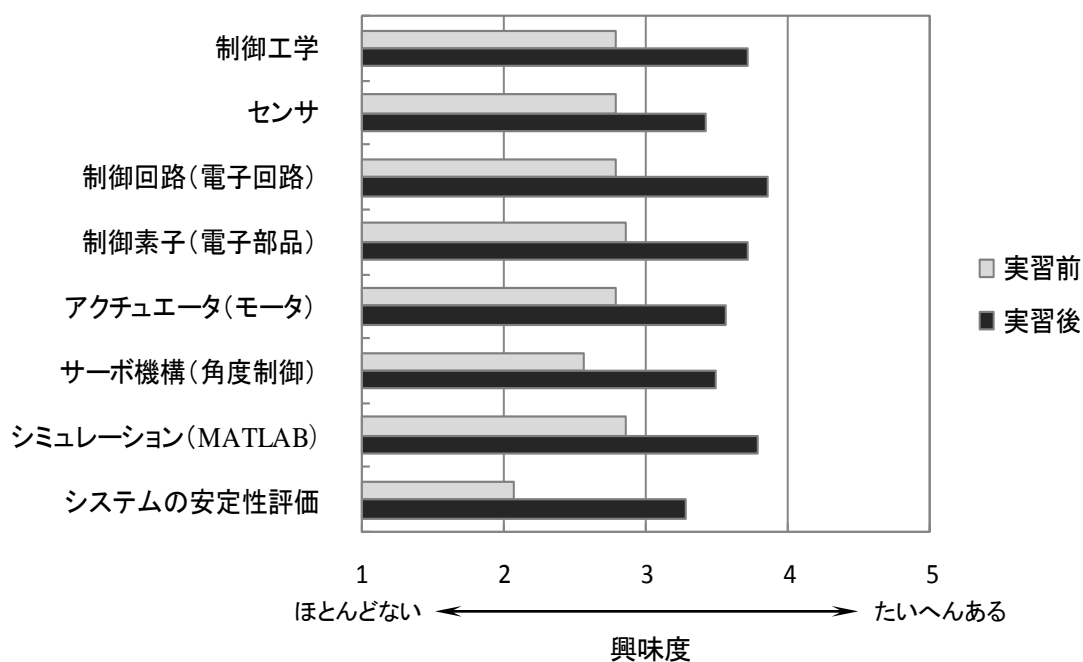


図 5.4 学生の興味変化

② フィードバック制御に対する理解の変化

自動制御に関連する知識の理解度を判断するためにテストを実施した。問題は正誤形式で作成し、教材の効果が分かるように実習の前後で同一とした。実施結果を表 5.3 及び図 5.5 に示す。なお、テスト実施の際、実習前のテスト終了後においては、解答・解説は行わず問題用紙も回収することで、実習後のテストに影響が出にくいようにした。また、偶然による正解を防ぐため、わからない問いには回答しないように指示を出して実施した。

表 5.3 小テスト実施結果

項目	正答率(%)		向上幅
	実習前	実習後	
制御工学	42.9	82.9	40.0
センサ	7.1	57.1	50.0
制御回路(電子回路)	42.9	88.6	45.7
制御素子(電子部品)	50.0	88.6	38.6
アクチュエータ(モータ)	78.6	100.0	21.4
サーボ機構(角度制御)	18.6	82.9	64.3
シミュレーション (MATLAB)	25.7	78.6	52.9
システムの安定性評価	18.6	61.4	42.9

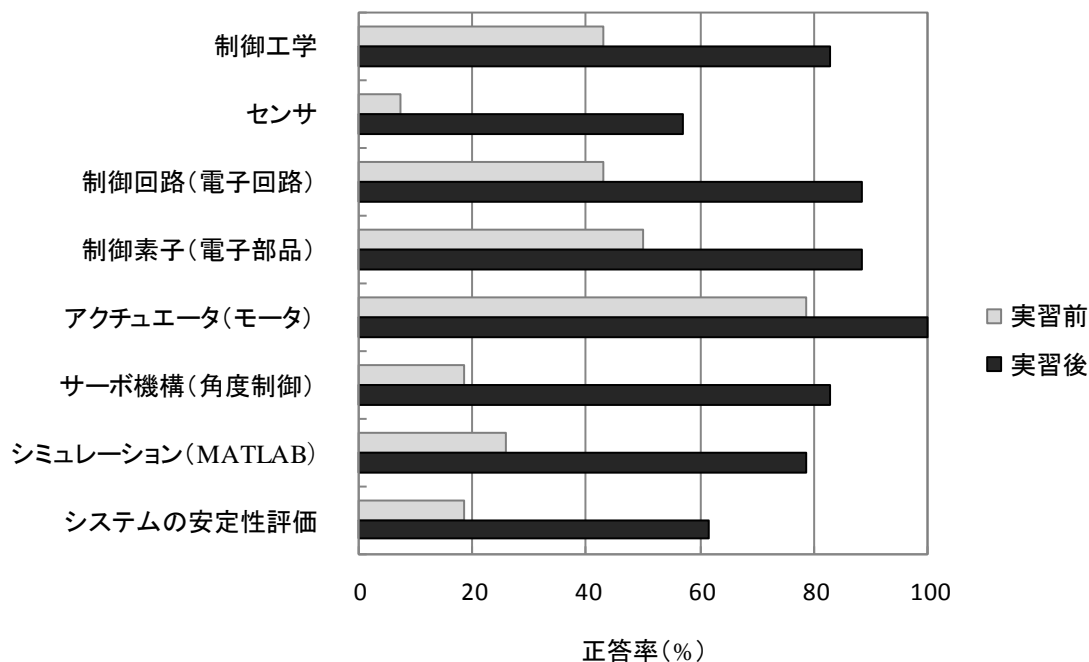


図 5.5 小テスト実施結果

③ ヒューマンスキル/コンセプチュアルスキルの変化

「能力別質問シート」^[17]に基づき 9 項目に分類したヒューマンスキル・コンセプチュアルスキルの変化について、学生の自己評価を実施した。それぞれの能力要素の自己評価結果を表 5.4 及び図 5.6 に示す。

表 5.4 ヒューマンスキル・コンセプチュアルスキルの自己評価

項目	実習前	実習後	向上幅
課題発見・分析力	1.87	2.49	0.62
課題発見力	2.00	2.50	0.50
調査・分析力	1.96	2.54	0.57
課題解決提案力	1.64	2.43	0.79
計画推進力	2.17	2.58	0.41
マネジメント力	1.99	2.33	0.35
実践力	2.24	2.76	0.52
リーダーシップ力	2.29	2.64	0.36
組織力	2.11	2.52	0.42
チームワーク力	1.76	2.33	0.57
コミュニケーション・調整力	2.37	2.69	0.32
プレゼンテーション力	2.19	2.55	0.36

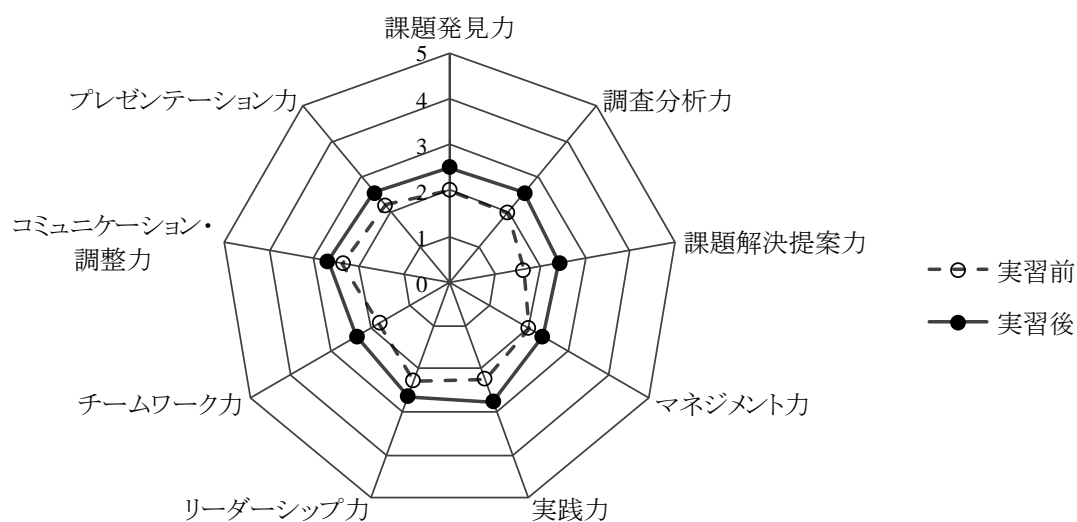


図 5.6 ヒューマンスキル・コンセプチュアルスキルの自己評価

5.3 提案手法の評価

① フィードバック制御に対する興味の向上

表 5.2 及び図 5.4 より，制御回路，サーボ機構（角度制御），そして安定性の評価方法について，学生の興味が高くなっていることが分かった。

② フィードバック制御に対する理解度の向上

テストは正誤式としたことから不適切な回答による調査の信頼性低下や，同じ問題を繰り返し行うことによる回答者の暗記による影響がでるのではないかと考えた．そこで，学生には予めテストは教材による教育訓練効果の測定が目的であり，学生自身の成績には直接反映させないこととし，分からない問いには適当に答えることがないように指示を行って実施しており，一定の信頼性はあると考えている．このような中で，実習後の試験において，すべての項目において理解度が向上しており，特にこれまで学習をほとんどしていないサーボ機構やシミュレーションソフトウェアの実機への活用及びシステムの安定性評価について，高い理解度向上が確認できた。

② ヒューマンスキル/コンセプチュアルスキルの向上

調査は学生の自己評価であり，客観的にスキルの向上を判断したものではないが，ヒューマンスキル/コンセプチュアルスキルの各項目において，学生自身がその能力の向上を実感している

5.4 考察

① フィードバック制御に対する興味について

制御回路について，学生の興味が高くなっている理由としては，専門電気におけるオペアンプを用いた実習では特性測定の実験が多く，習得した知識が実際に何に活用できるのか実感が湧きにくかったことに対して，本研究では，オペアンプを具体的に制御器として活用しており，実際の装置の中で必要であることが明確であったためと考えられる。

サーボ機構については，角度制御が視覚的に分かりやすいこと，また，安定性の評価方法については，これまであまり触れることがなかったために実習前はどのようなことか分からずに興味が低かったが，実際に経験することで興味がわいたものと推察される。

② フィードバック制御に対する理解について

実習前のテスト結果において，センサに関する問いの正答率が極めて低くなっている．出題内容としては，モータの回転速度や回転角度を検出するためにタコジェネレータやポテンショメータ等の知識を問うものであったが，これらを混同して覚えている学生が多かった．このことから，指導員が日常的に学生はこれぐらい当然，覚えているだろうといった先入観からあまり繰り返し説明をしない項目の中に，あまり理解されていない事項が埋もれている場合があるということが考えられる。

③ ヒューマンスキル/コンセプチュアルスキルの変化について

本研究で調査対象とした学生 14 人全体の傾向として、ヒューマンスキル/コンセプチュアルスキルの全項目において能力の向上がみられた。向上幅が 0.5 以上あったのは、課題発見力、調査分析力、課題解決提案力、チームワーク力及びコミュニケーション・調整力の 5 つであり、その中でも特に課題解決提案力の向上幅が 0.7 と高い水準に達した。これは、実習の中で制御目標を達成させるために、うまくいかない原因を突き止め、それを改善する方法を考えるという作業を行わせたためであると考えられる。

なお、学生ごとの能力の平均値について、実習前後の差が統計的に有意であるか確かめるために、有意水準 5% で両側検定の t 検定を実施した。その結果は、 $t(13)=5.24$, $p<0.05$ であり、実習前後の平均値の差は有意であることが確認できた。

第 6 章 結論

6.1 本研究のまとめ

本研究では自動制御教育の現状と問題点を調査し、その問題を改善するため、学生が現象を直感的に理解するとともに容易に制御効果を体験できる教材を開発した。さらに、開発した教材を用いた授業実践により、数学に偏りがちな制御工学について、学生の興味や理解度を高めるとともに、学生がこれまでに習得してきた知識・技術を有機的に結び付けて活用させることが確認できた。

また、教材の一つ一つの構成要素について理論と実物を対応させて理解しながら、実習を進めていくことで、課題がうまくいかない際の問題をみつけやすくなったことから、課題発見力や問題解決力といった応用課程で養成する能力の向上も図ることができた。

6.2 今後の課題と展望

今回得られた教材によって得られた教育訓練効果をフィードバックし、より使いやすい教材開発に活かしていきたいと考える。

〈参考文献〉

- [1] 小笠原悟司, 藤田英明, 小松原均“学生実験用サーボ機構実験装置の開発とその実施”, 平成 13 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会論文集, pp.289-290, 2001
- [3] 佐々木清吾, “電子制御システムの構築を通じた普通教育と職業教育;—防衛大学校における卒業研究指導—”, 平成 24 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.489-493, Sept. 2012
- [4] 逸見知弘, “学生向けの実学的な制御工学実験の試み”, 平成 25 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.138-141, Sept. 2013
- [5] 堤博貴, “ロボット製作を題材とした講義・実習の連携によるものづくり教育の実践”, 平成 25 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.147-151, Sept. 2013
- [6] 中本昌由, 山本透, “モデルベース型制御系設計能力の育成を目指した制御実験に関する取り組み”, pp.55-60, 2013
- [7] 本田昭, 長崎 仁典, “図解とシミュレーションで学ぶサーボ制御技術入門, 日刊工業新聞社, 2004
- [8] 小林一行, “図解ロボット技術入門シリーズ ロボットモデリング —MATLAB によるシミュレーションと開発—”, オーム社, 2007
- [9] 熊谷英樹, 大石潔, “MATLAB と実験でわかるはじめての自動制御”, 日刊工業新聞社, 2008
- [10] 三田宇洋, “MATLAB/Simulink によるモデルベースデザイン入門”, オーム社, 2013
- [11] 雇用・能力開発機構 大学校部, “応用課程の考え方”, 2009
- [12] 日本機械学会, “JSME テキストシリーズ 制御工学”, 序文, 2002
- [13] 大塚弘文, 葉山清輝, “授業内演習のための自動制御実験装置の開発”, 熊本高等専門学校 研究紀要 第 5 号, pp.108-111, 2013
- [14] 高橋良彦, “ロボティクス入門”, 裳華房, 2004
- [15] 高橋宏治, “制御工学ノート”, 昭晃堂, 2012
- [16] 川田昌克, “MATLAB/Simulink と実機で学ぶ制御工学—PID 制御から現代制御まで—”, TechShare, 2013
- [17] 職業能力開発総合大学校 能力開発研究センター, “応用課程モデル教材の開発と訓練効果の研究」『調査研究資料』No.120”, 2007

〈謝辞〉

本研究を実施及び論文をまとめるにあたり，職業能力開発総合大学校 高橋宏治教授をはじめ，古井英則准教授，佐藤崇志助教には丁寧かつ熱心なご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。応用課程の現場で御指導をしていただいた北海道職業能力開発大学校 生産電気システム技術科 佐藤一晃教授をはじめ生産電気システム技術科の先生方，電気エネルギー制御科の先生方には多大なご協力を賜りました。感謝申し上げます。

最後に論文をまとめる機会を与えていただいた研修において，研修の取りまとめ及びご指導いただいた職業能力開発総合大学校及び北海道職業能力開発大学校の皆様にご感謝いたします。