

自動制御研究連絡委員会報告
「基幹工学としての自動制御－その将来像と教育のあり方－」

平成6年7月15日
日本学術会議
自動制御研究連絡委員会

この報告は、第15期日本学術会議自動制御研究連絡委員会の審議結果を取りまとめて発表するものである。

委員長 須田 信英（大阪大学基礎工学部教授）
幹事 北森 俊行（東京大学名誉教授・法政大学工学部教授）
古田 勝久（東京工業大学情報理工学研究科教授）
委員 花房 秀郎（日本学術会議第5部会員、立命館大学理工学部教授）
有本 卓（東京大学工学部教授）
荒木 光彦（京都大学工学部教授）
岩田 一明（大阪大学工学部教授）
梅田 富雄（筑波大学経営・政策科学研究科教授）
大松 繁（徳島大学工学部教授）
木村 英紀（大阪大学基礎工学部教授）
背戸 一登（日本大学理工学部教授）
西川 禎一（京都大学工学部教授）
吉川 恒夫（京都大学工学部教授）

市川 惇信（元日本学術会議第5部会員）

要 旨

制御工学は、人間を単純労働から解放し、生産の効率を高めるだけでなく、品質の向上・省資源・省エネルギーにも有効であり、さらに経済的に希望の品種を必要な量だけ作る柔軟な多品種少量生産を可能にした。また、機器・装置を人間にとって扱い易いものにするばかりか、生活環境を快適にすることに貢献してきた。

本研究連絡委員会は、制御工学が工学全般はもとより、農学・医学・環境・社会・経済等にも関わる普遍性を持った学問であるとの認識に立ち、人間と技術、環境と技術の調和を図る上で、大きな役割を果たす基幹的工学であると位置付けて、次の提言を行う。

1. 制御工学をすべての工学の基幹と位置付ける。これは、制御工学が目的を与えられたときに、それを達成する筋道を与えるための、工学を知の体系として構築する基幹的学問であることを意味する。この制御工学を、工学のみならず、薬学、農学を含むすべての学科の専門基礎科目として教育を行う。その教育モデルの一つを付録に提案した。
2. 制御の中核を成す、制御理論と技術を積極的に発展させるためにシステム制御を専門とする学科を発展させ、教官の養成を含め基礎教育としての制御教育を充実させる、さらに国内外の幾つかの大学院の共同指導による学位取得を可能にするための財政的な処置を行い、先端的制御の研究を推進する。
3. 国内外の多数の大学・企業の制御に限らず広い分野の研究者が共同研究を積極的に行う場を提供する制御工学研究機構を設置する。この研究機構は文部省の組織であり、社会人の再教育によるレベルアップ等の生涯教育、ポストドクトラルフェローの受け入れ、大学間、あるいは企業との共同研究等に対し、各大学と協力し柔軟に対応するものである。

1 はじめに

本研究連絡委員会は制御工学が普遍的であり、しかも先端的科学技術の成否にも関わる制御の重要性を改めて認識するとともに、様々な分野に分散して発展してきている制御工学の中核となる体系を明確にすることが急務の一つであると考えに至った。そして制御の共通的な本質を抽出し、人間の制御機能を代行させる方法やメカニズムを産み出す工学、動的な特性を人為的に改善することにより対象システムをあるがままよりは人間にとって都合がよいシステム、人間と調和したシステムになるようにする工学として制御工学を位置付けた。設計を目的とする学問としての工学を知の体系として確立するためには、従来の数学・物理学のように自然現象を解析する学問としての科学に続く、基幹として制御技術を考えなければならないことを再認識した。

日本工業教育協会が平成2年4月に出した「新しい時代に対応したカリキュラム並びに教育法に関する調査研究報告書」の中でも図1に示すように企業の技術者が工学教育で重要な科目として制御工学を挙げている。

最近、各分野で制御技術が必要となるにつれ、制御関連の講座を新設の各学科に分散することにより、制御技術の浸透が図られてきたが、制御理論・技術を産み出す学科そのものが解消する傾向があり専門分野の一層の発展について憂慮される。

制御工学のさらなる発展を促進するために要旨で述べた提言を行うことにした。

2 制御工学の特質

歴史的、縦割りの工学諸分野の流れの中で別々に発展してきた技術が、共通の原理に基づいていることに気付き、分野の壁を超えて横断的、共通的な工学として発展し、より高度の技術をより広い工学の諸分野にもたらすことは自然の成り行きであるとともに、工学全体としても望むべきことである。制御工学はそのような横断的工学の一つである。

制御の技術は、蒸気機関を人間が意のままに操作するための技術として生まれた。これにより、繊維産業・鉄道・船の動力として使えるようになり、制御技術は産業革命における蒸気を操る、言わばアラジンの魔法のランプの役割をした。また、電力を普遍的なエネルギーとして使用することができるように負荷による電圧・周波数を変動させないための基礎技術になっていることも周知のとおりである。さらに、飛行機という新しい交通手段が20世紀に生まれたとき、ジャイロスコープと組み合わせられることにより、安定な飛行が可能になった。レーダの

受発信器を、一定速度で回転させる技術を与え、その実用化に重要な役割を果たし、その後の飛行機の実用化に貢献した。この技術は人の助けなく高精度な部品の互換性を可能にした製品を作ることを可能にし、オートメーション実現の基礎技術として認識されてきた。蒸気機関の安定性の検証から始まり、遠距離通信を可能にするための増幅器が望ましい特性を持つためのフィードバック回路の安定性解析の理論の成果が制御理論という普遍的な学問分野の確立に貢献した。さらにカルマンらによる制御理論の近代化は、工学の基礎理論としてシステム制御を位置付け、回路理論等多くの学問分野で使われる基礎工学の役割を演ずるようになっていく。

実用面では、高精度の機能を果たす機械を作るために、コンピュータと機械を結び付ける基礎技術として脚光を浴び、自動化、機械化を志向するそれぞれの応用分野で発展してきた。その過程で人々を労働から解放し、しかもより良い製品やサービスを提供してきた。このように、制御技術は、いろいろの技術を結び付け、新しいものを生むための触媒になってきたばかりでなく、フォレストラーによる飛行機のトレーニングシミュレータ開発からSAGEに使われた実用的な最初のコンピュータ(Whirl wind)が広い意味の制御技術者達によって開発されたように新しい機械を産み出す触媒の役割を果たしている。日本のコンピュータの開発にも多くの制御技術者が貢献した。このように新しい機械を産み出す過程で制御技術者の果たしてきた役割は大きい。制御そのものも、最近に至っては先端的科学技術の推進が叫ばれるようになり、その推進のために極めて高度の制御技術が要求されるようになってきた。一般にシステムの効果的な運用の仕方を計画し、実行するためには制御は不可欠である。自動的、非自動に限らず、およそ対象に働きかける場面にはあまねく制御が働いている。特に多くの要素を有機的に結び付け新しい製品を産み出す技術の一つとしての制御技術の有効性は、最近の多くの分野において制御技術者の活躍の場が存在することからも結論付けられる。

3 制御工学の役割と貢献

制御工学は「システムを我々が望むとおりに働かせるために、システムの特性を改善し、操作・運用の仕方を設計し、自動的に稼働させるように実現するための工学」ということができる。

対象とするシステムは操作でき、我々のために働いてくれるものならば何でもよい。システムを、どのように操作したらどのように働くかという、操作と応答、特にそのダイナミックな関係のレベルでシステムをとらえる。したがって、機械

・装置・設備・工場・組織などを運用して、有用な製品やサービス、成果などを産み出しているシステムを対象とすることができる。また、人工のシステムのみならず、社会システムや生体システムを対象とすることもでき、そのスケールは、原子、分子のような超微細スケールから、操作の方法がある限り、大規模、複雑なシステムにまで及んでいると考えることができる。

システムの特性を改善し、操作・運用の仕方を設計することによって、例えば暴走する核反応を安定に利用できるように、あるいは列車を磁気で浮かせて摩擦を無くして走らせるように、システムを自然にあるがままよりは我々にとって都合のよい、操作しやすいシステムにすることができる。また、人間の能力を超えるような、高精度、高速、持続的、多数の要因を配慮・協調させた運用が可能になる。

自動的に稼働させることによって、人間を単純労働や苛酷なあるいは危険な条件下での作業から解放し、人間にとってよりよい労働環境を提供していくことができる。

このようなことから、制御工学は次のような諸局面で産業ひいては人類社会に貢献しようとするものである：

- ・自動化、省力化、無人化、柔軟化、多様化、知能化
- ・省資源、省エネルギー、生産性向上
- ・耐故障性向上、信頼性向上、安全性向上
- ・運転の質の向上による製品の品質、性能の向上
- ・制御を前提とした高度なシステムの実現、先端技術の発展への貢献
- ・運転の質の向上に関わる、人間と整合の取れた(human-friendly)システム
- ・情報化社会、グローバルゼーション
- ・高齢化社会、福祉社会における医療機器の自動化、介護ロボットの開発
- ・医用信号処理、医用画像処理など、人間と密着した局面での、人工知能などを取り込んだ人間的で、気の利くシステムの実現

などである。

実際に制御工学・技術が、新しい技術の展開や先端的技術のブレークスルーに貢献した例を多く探すことができるが、その応用分野での具体例を図2に示す。

4 制御の方法

制御系の基本となるフィードバックは、対象システムの特性が不確定であるときにも、システムを安定にする有効な手段である。そのため、対象システムの状態が外乱で乱されても元の望ましい状態に復帰、維持することができる。対象システムの状態を別の望ましい状態に、速やかに移動させることができる。重い対

象を軽々と動かすこともできるし、吹けば飛ぶような繊細な対象を優しく扱うこともできる。不安定な対象を安定にすることもできる。例えば化学反応装置の温度と圧力、乗物のローリングとヨーイングのように、2つ以上の物理量が干渉している場合にその干渉を無くすこともでき、よりうまく協調させることもできる。非線型フィードバック制御を用いることにより非線形特性を線形化することもでき、線形特性を望みの非線形特性にすることもできる。対象システムの特性や作業環境の変動に対して強いシステムにすることもでき、フレキシブルに適應できるシステムにすることもできる。

このように、制御によって、対象システムを意のままに操作したり、対象システムの特性を望ましい特性に改変したり、対象システムの特性や環境の変動に対処できるシステムにすることができる。このような性能の向上、特性改善を可能にするのが制御工学の目的である。それは次のようにして可能になる。

対象システムに物理的、化学的、生物学的な処理を中心とする生産システムがある。そこでは原料や副原料、燃料、材料や部品、動力、熱エネルギー、電気エネルギー、その他、一般に物質やエネルギーを加工、処理して、製品を生産している。このような処理システムは一般に因果律の支配下であり、物質やエネルギーを供給して原料から製品が作られる。そのような対象システムにおいて、制御は製品の望ましい質、量と出荷時刻を計画して、それが実現されるように物質やエネルギーの供給量と供給時刻を計算し、命令を発し、加工、処理を進行せしめる。この望ましい結果を先に考えて、それをもたらす原因である操作の仕方を決定することは因果の逆の計算であって、因果律のなせるがままに任せていたのでは決してできないことである。人間の代行としての制御の本質、人間の“インテリジェント”な機能の本質はこの因果の逆を計算するところにある。換言すれば予測機能であり、正確な予測によってねらい通りのシステム運用が実行されるのである。

予測計算を可能にするのは対象システムの操作と応答の関係に関する知識、すなわち対象システムの因果関係を表わすモデルである。このモデルから、望ましい応答をもたらす操作の加え方が解かれる。本質的に、因果の逆をたどる計算は、物理的過程から離れて、因果律に支配されない論理演算に基づく情報処理装置（デジタル演算装置）によって可能である。

操作の仕方が求まれば、それに従って、物質やエネルギー供給源から対象システムへの原料、副原料やエネルギーの供給の流れを操作する。この供給を微細に操作できればそれだけ微細な対象の制御ができる。また物質やエネルギーの大規模な供給源を用意できればそれだけ大規模なシステムも制御できることになる。

このように、因果の逆を解き、それに従って必要な量の物質とエネルギーの流れを操作するのが制御の方法の骨格である。したがって制御工学は情報処理の世界での計画と物理的世界での実稼働との協調という明快な方法によって実現される工学的活動である。

このような制御工学の方法は物理的過程のみならず、例えば画像などのように必ずしも因果的ではない情報的対象の処理にも適用することができる。さらに、人間のように、因果律から独立に予測し、行動する要素が含まれる社会システムなどを対象とする制御にも拡張ができる。

このような制御の方法に適応や学習の方法を追加することによって、対象システムのモデルの自動構築、システム活用条件の変化への適応、制御システムの設計自体の自動化など、高次の自動化も可能になる。以上の制御の方法を図3に示す。

5 制御工学の体系

制御工学は、機器、機械、装置、システム、組織などを制御の対象として、前項に明らかにした能力（インテリジェンス）を備えた制御系を構成し、より高性能、効率的に働かせるための工学であるが、具体的には次のような内容から構成されている。

- ・対象システムのモデリング： 対象システムの特性の数式表現、パラメータ値の決定
- ・制御システムの設計： 制御システムの仕様の決定、制御アルゴリズム、プログラミング、補償要素・制御装置の選定、設計、製作
- ・制御システム構成要素の設計： センサ、アクチュエータの選定、設計、製作
- ・制御システムの評価： 制御システムの特性の解析、評価
- ・制御システムの実装、調整： 特性の調整、特に自動操業のための実装
- ・制御システムの実運転
- ・制御の援用を前提とした機器、機械、装置の設計、製作
- ・適応、学習方法の設計： 制御システムの活用環境条件の変化への対応、制御システムの設計の自動化、など高次の自動化

これらを具体的に実行するためには、幾つかの中核となる理論と、さらにそれに援用される理論がある。まず、計測、通信、演算、操作に関わる理論、工学が重要である。計測工学、特に対象システムの状態を乱さずに、必要な速度、必要

な精度で必要なシステムの状態物理量を計測する方法、手段を与える計測が不可欠である。通信工学は特にロケットや人工衛星のように遠隔地にある対象システムを制御する場合、あるいは多数分散した対象システムを情報交換しながら制御する場合などに、高速に、大量のデータを、少ない情報損失で通信することに援用される。演算工学は誤差やノイズに強い計算法、大量データの高速計算法、知識処理などのアルゴリズム実現に欠かせない。操作機構は制御装置からの命令で対象システムに物質やエネルギーを供給する機構で、バルブ、モーター、ロボットの手などが考えられるが、本質的には種々の増幅機能を具備した機構である。力学的、流体力学的、電氣的、熱学的、光学的、化学的など、制御装置からの命令のキャリアーや物質、エネルギーの形態に応じて種々の操作機構を開発することが必要である。

対象システムのモデルを使わねばならない点からは、対象システムの挙動を記述する方程式をたてることと状態を知るために計測することが必要であり、対象システムの物理学、化学、生物学、工学、さらに個別応用分野特有の理論が必要になる。

また、これらを横断的に支えるシステム工学、情報工学などが強力な武器になる。

制御工学の誕生と成長に貢献した学問分野と、制御工学が発展に寄与した事例を図4に示す。

6 制御工学の教育、研究の今後

日本は先進諸外国に比べて、横断的学問分野に対応する学科を作ることには進歩的であるように見えるが、制御工学科は2大学にすぎず、制御システム工学科、機械制御工学科のように制御の2字が入っている学科まで広げても9大学にすぎない。しかし、制御関係の講座は機械工学、精密機械工学、電気工学、電子工学、応用数学、応用物理、システム、情報、航空、船舶、化学工業関係の学科に広く散在している。さらには、農学、生物学、医学、環境関係にも広がりつつある。このことは制御工学の教育が応用分野に密着していた方がやりやすいとの認識によるものと考えられるが、この体制では分野ごとにやや封鎖的になり、新しい理論や方法の浸透に遅れが見られる。一方これまで各学科に制御の分散していた米国で、カリフォルニア工科大学に見られるように「Department of Dynamics and Control」のような野心的な学科が作られていることは興味深い。

日本の状況は、制御工学の教育に関与している全国の教官400余名が制御工

学教官協議会を構成し、毎年1回制御工学教育研究集会を開催し、制御工学の教育の在り方について討議、検討を行っているが、教育に関するこの種の討議は人材が実際に働く研究分野や産業界からの意見を積極的に採り入れて、健全な将来展望をしていく必要がある。制御工学のいろいろな分野の研究者が一堂に集まっている大学は皆無であり、制御を広い見地から研究する大学院生にとって、一つの大学での研究教育では十分ではない。そのために大学院生が国内・国外の他大学で教育指導を受けられるシステムを作る必要がある。また、研究者にとっても他分野・他大学の研究者との共同研究を推進することのできる環境を作ることが期待される。

研究面では、理論的研究と実システムへの応用を通して多方面に貢献してきた。実業界においても、日本電気計測器工業会が平成3年に行ったアンケート調査における結果(表1)が示すように先端制御方式を採用することに意欲的である。しかし理論と実際との間にギャップが無いとは言い切れないところが少なくない。非線形な対象システムの問題には十分な対応ができていないし、また稼働中に特性が大きく変化するシステムにも十分な自信をもって対処できる状況にはない。そのようなシステム、しかも大規模、複雑なシステムを、人間にとっても適切に制御していくのは至難の課題であり、人間の機能の代行以上に、人間を超えたインテリジェンスをもち、フレキシブルに対応するしなやかさ、しかも信頼できる広いクラスのシステムに有効であるというロバスト性を備えた制御システムを構築できる制御工学に向けて、研究を進めていかなければならない。それは単なるイメージとしてではなく、方法を基礎から論理的に組み立てていく健全な制御工学でなければならない。

しかも制御工学も工学の一つであるから人間に奉仕するものでなければならない。人間を代行し、人間を超えるのは良いとしても、人間を押し潰してしまっただけは本末転倒である。人類の発展に調和した、あるいは人間と整合性の良いシステムはいかなるものか、望ましいシステムについての概念やフィロソフィーを確立して、研究の方向を見定めていかなければならない。

人間に大いに関わる工学であり、しかも応用分野が多方面に拡大されていく現状と将来を考えると、理論と応用の両面から強力な求心力と牽引力を持った中核として、企業の研究者の生涯教育や、ポストドクトラルフェローの受皿となり、国内・国外の研究者の共同研究を支援することを目的とした制御工学研究機構の存在が必要な時期にきている。多分野の応用までをこの中で研究していくか、その組織に関しては大いに検討を要するから、その構想については直ちに検討を始めるべきである。

教育の面でも今後、応用の範囲がますます広がるにつれて、一様には扱えない応用分野の特質もあるはずであり、その意味で各分野毎に制御工学教育を深めていくことが望まれるが、そのように広がればそれだけ、制御工学を工学の基幹の一つとして広く教育していかなければならなくなる。したがって、研究所や産業界で活躍する人材に加えて、制御工学を専門とする学科もバランスよく増やし、人材を育成していかなければならない。

7 国内、国外の研究活動の場

国内的には、大学、国立の研究所、民間企業に研究者、技術者が広く分布している。研究者の一部は幾つかの大学の工学部にある制御工学科に集っているが、多くは数理工学、情報工学、応用物理学、電気、電子工学、機械、精密機械工学、航空・宇宙工学、化学工学、材料工学、土木、建築、生物工学、農学系、医学系、環境系などの学科に分散している。このように分散している研究者は制御を一つの大きな柱として掲げている計測自動制御学会、システム制御情報学会の他、日本ロボット学会、電気学会、日本機械学会、自動車技術会、日本鉄鋼協会あるいはそれらの連合である自動制御連合講演会、あるいはそれぞれ個別の分野の学会を研究発表、討論の場として、制御工学の発展に貢献している。ちなみにこの自動制御連合講演会は本研連が始めたもので、既に30年を超えて活動している。国際的には、本研連が国内委員会(NMO)を担当している国際自動制御連盟(IFAC)には、48ヶ国が加盟し、その総会が1960年から3年おきに開催され、1981年には京都で開催された。また数多くの分野ごとのシンポジウムがあって、日本からも多くの研究者、技術者が参加している。その他に米国の制御関係の学会の共催になる米国制御会議(ACC)の他、電気電子工学会(IEEE・米国)のシステム制御ソサイティ主催のCDC、米国計測学会(ISA)、米国機械学会(ASME)、計算機シミュレーション学会(SCS)、米国航空宇宙学会(AIAA)、米国化学工学会(AICE)、その他のシンポジウムなどへの参加が増加している。アジア地区の制御工学研究者からなるAsian Control Conferenceも1994年には開催される。

研究の場もこのように国際的になってきており大学院教育も単なる一大学での教育ではなく、国内の他大学はもとより国際的な連帯の下に教育することが望まれる。教官の専門の先端的研究を教育できることにより研究に反映できるばかりか、学生にとってもより先端の研究に触れられる。

上記の事柄を含め、海外の研究者が日本に来る場合の共同研究の手配、ポストドクトラルフェローの受け入れ等の責任を持つ各分野における制御工学の教育・

研究のセンターとなる制御工学研究機構の設置が望まれる。

制御工学研究機構は3講座程度の専任部門と同程度の客員部門から成る文部省組織の研究機構として提案したい。

8 まとめ

制御工学は理論的發展と広範囲の多様な現実問題への応用を重ねながら、常にその時々限界を突破する手段として、多方面に貢献してきた。それがまた基礎となり、背景として、コアとなる制御工学の概念、本質が固まり、方法論を中心に体系化が行われてきた。

各種援用理論や技術の發展とともに制御工学の概念、方法論は工学の対象システムに限らず、社会、経済、環境システムに対しても応用されるようになりつつあるが、また生体、生物とも密接に関連するなど、広範囲の他分野の学問体系との交流を通して制御工学への期待が強まり、重要性が高まっている。

このような制御工学の概念、方法論をすべての工学の専門分野の基礎工学と位置付け、教育を行うことは、今後の学際的な学問を研究・発展させる研究者・技術者にとって有効と考えられる。

しかし、制御自身に対する要求、解決すべき問題の難しさも同様に高まっているのであり、今後ますます研究を推進する体制を作るとともに、企業の研究者のための生涯教育の在り方についても検討を重ねなければならないと考えられる。

〔参考文献〕

- (1)示村、「自動制御とは何か」コロナ社、1990
- (2)K. C. Redmond, T. M. Smith, 'Whirl Wind-The History of a Pioneer Computer', 1980, Digital Press
- (3)日本工業教育協会「新しい時代に対応したカリキュラム並びに教育法に関する調査研究報告書」平成2年4月
- (4)日本機械工業連合会、日本電気計測器工業会、「先端制御技術における実用化と標準化動向調査研究報告書」平成4年3月

<付録>工学の基幹教育としての「フィードバック理論」の提案

1. 提案の主旨

「フィードバック」という言葉の意味を分かりやすく表現すれば「結果を見ながら行動を決める判断様式」とであると言える。フィードバックは自動制御のための基本的な技術として広く使われており、対象物の位置や速度を希望通りに変化させたり、温度や水位を一定値に保ったりするのに重要な役割を果たしている。また、フィードバックによってどのような現象が生じるかという点に関しては、「自動制御工学」と呼ばれる分野で研究が積み重ねられ、かなりの広がりや深さを持った理論体系が出来上がっている。このように、「フィードバック」は自動制御という工学的な目的の下で利用され理論化されてきたものである。しかし、少し視点を変えてみると、一般教育という立場からも2つの側面でフィードバックの重要性が浮かび上がってくる。

第1の側面としては、フィードバックというメカニズムが自然界の中に広く存在して、その調和を保持する上で重要な役割を果たしているという事実が挙げられる。例えば、動物の体温や血液中の成分濃度などを一定に保つためにフィードバック機構が働いていること（ホメオステイタスという用語で代表される現象を指す）が分かっている。また、生態系の状態推移を決定する一つの要因である「捕食」という現象も一種のフィードバック機構と理解できる。このような事実を考慮すれば、「フィードバック理論」は工学的なシステムを解析したり設計したりするだけではなく、自然界におけるいろいろなシステムについての理解を深め、よりよく運用して行く上での重要な手段を提供し得るものであるといえる。

第2の側面として、現在では自動制御システムが日常生活から科学技術上の測定・操作に至るまで広く使われている点が挙げられる。身近なところではクーラーや洗濯機などにもフィードバック制御機構が組み込まれるようになっているし、また専門化された問題についていえば、各種の計測器、加熱炉や反応炉、物品の操作機構などには必ずといってよいほどフィードバック制御が使われている。これらの機器や装置を、それぞれの専門分野の目的に合わせて十分使いこなすためには、フィードバック制御のメカニズムを理論面から理解しておくことが重要である。

ここで提案する講義は、自動制御工学を専門としない分野の人がフィードバック理論をマスターできるように、基礎的な事項からフィードバックの本質に関わる題材までを一貫して講述しようというものである。

2. 対象とする学生

自動制御工学及びそれに密接に関連する数学・物理等を必ずしも専門としない理系の学生、例えば化学系、生物系、医学系、農学系、薬学系の学生を対象とする。

3. 講義の概要と前提とする知識

前項のように、数学・物理を必ずしも専門としない学生を主たる対象と考えるので、前提知識としては高校レベルの数学・物理のみを想定する。一方、講義内容としては、フィードバックの概念を理解するのみならず、フィードバック理論を各自の専門分野の諸目的に合わせて利用できるようになることを目標とする。以上の条件を満たすために、必要とされる数学的手段を講義の中で説明しながら、段階的に議論を深めていく。ただし、数学的内容については、厳密な証明を行ったり理論体系を講義したりすることは避け、各々の手段の使い方とその結果の物理的な意味を中心に説明する。

4. 講義の時間数と達成レベル

「フィードバック理論Ⅰ」、「同Ⅱ」、「同Ⅲ」、「同Ⅳ」を準備する。各講義は週1コマ（1時間30分）を半年（12週）継続する。「Ⅰ」、「Ⅱ」を基礎コースとして位置付け、この段階でフィードバックシステムに関するある程度の定量的取り扱いが可能となるよう講義を組み立てる。「Ⅲ」はセミ・アドバンストコースで、自動制御工学の特徴的な手段である周波数応答法について少し詳しく講義する。「Ⅳ」は理論的話題が好きな人のためのアドバンストコースで、安定有理行列の作る環上の理論など、なるべく最新の成果を取り入れながら講義する。一般の学生は「Ⅰ」、「Ⅱ」を、興味のある学生は「Ⅲ」までを受講することが望ましい。「Ⅳ」は特に希望が強い場合に開講する。「Ⅲ」、「Ⅳ」は数学・物理系の学生にとっても有意義な内容と考えられる。

5. 教科内容

5.1 フィードバック理論Ⅰ

まず、具体的な例を使ってフィードバックの概念を説明する。続いて、対象とするシステムが（一般的な意味で）慣性を持っている場合にフィードバックの結果がどのように成り得るかを示唆した後、慣性を持つシステムを解析する手段としての微分方程式、特に線形定係数の常微分方程式について講述する。具体的に

は1次及び2次の方程式の解を詳しく調べ、慣性のあるシステムの動き方を数式の上で明らかにする。また、3次以上のシステムの定性的特徴、一般的な解析法などを説明した後、シミュレータを使ってその性質を具体的に提示する。条件を整えばシミュレータの使い方についても説明する。用いる具体例としては受講者になじみの深いものを選定するのが望ましいが、一般的受講者を想定する場合には、部屋の温度制御、物体の位置の制御といった身近かな問題を扱う。

5.2 フィードバック理論Ⅱ

講義Ⅰで取り上げた例について、非常に単純な比例型のフィードバックを適用するとどのような現象が生じるかを、微分方程式に関する知識に基づいて説明する。続いて、“定常的な誤差”と積分性のフィードバックの働き（記憶）の関連、及び“動作の速さ”と微分性のフィードバックの働き（予測）との関連について講述する。以上の内容と並行して“外乱”、“雑音”、“モデル誤差”、“飽和”といった、フィードバックシステムを取り巻く現実世界に存在する諸要因について議論を深め、これらがフィードバックの効果とどのように関わっているかをなるべく定量的に説明する。

5.3 フィードバック理論Ⅲ

正弦波を加え続けたときのシステムの応答、すなわち周波数応答の概念を説明したあと、ベクトル軌跡、ボード線図、ナイキストの安定条件などを演習を交えながら講述する。さらに、積分性のフィードバック、微分性のフィードバックが周波数応答という立場からどのように理解できるかを説明する。

5.4 フィードバック理論Ⅳ

上述の周波数応答とフィードバックシステムとの関わり合いをさらに詳しく調べる。まず、周波数応答という立場から見たとき“外乱”、“モデル誤差”、“雑音”などがどのような特徴を持っているかを調べる。次に、システムの安定化に関する理論体系に触れた後、上記の要因とフィードバックシステムの動作との関連を明らかにする。

各講義の想定内容は次の通りである。（すべてスカラーシステム）

- ・フィードバック理論Ⅰ.

- （線形定係数の常微分方程式の解法）

フィードバックの概念の説明、起こりうる振動現象の感覚的例示（物を動かす例？） --- 微分方程式で扱うことの必要性を説明する。

微分方程式の解の例（exp, sin, cos）--- 一般的解法への導入部とする。

複素数の説明（ $\exp = \cos + j\sin$ 等も天下りで）。

ラプラス変換を使った微分方程式の解法（なるべく機械的に）。

1次系、2次系の過渡応答の詳細。

3次以上のシステムの過渡応答の例と一般形。

・フィードバック理論Ⅱ

（フィードバックシステムの解析）

ゲインフィードバックの解析（ステップ目標値、ステップ外乱に対する過渡応答を中心とした1次系、2次系、3次系の解析）

定常偏差と積分補償、

速応性の限界を定める要因としてのモデル誤差と飽和特性、より正確な知識（高次モデル）があって大きな入力が見える場合の速応性の改善の可能性

無駄時間のあるシステムに対するフィードバックの例

・フィードバック理論Ⅲ

（周波数応答法の基礎）

周波数応答の定義と表示法（ベクトル軌跡、ボード線図、ゲイン位相線図）

ナイキストの安定条件

周波数応答から見た定常偏差と速応性

無駄時間要素の周波数応答

・フィードバック理論Ⅳ

（この講義は高度のレベルのものとなる。）

感度関数・相補感度関数といった話

安定化補償器のクラス

H_∞ 問題の定式化と設計例

図1 企業技術者が大学教育で重要と考える科目

(日本工業教育協会「新しい時代に対応したカリキュラム並びに教育法に関する調査研究報告書」p 123)

図2 制御工学と応用分野との関係

図3 制御系の構成

図4 制御工学の位置づけ

表1 新しい制御方式の応用が期待される分野

(日本機械工業連合会, 日本電気計測器工業会「先端制御技術における実用化と標準化動向調査研究報告書」P 92)

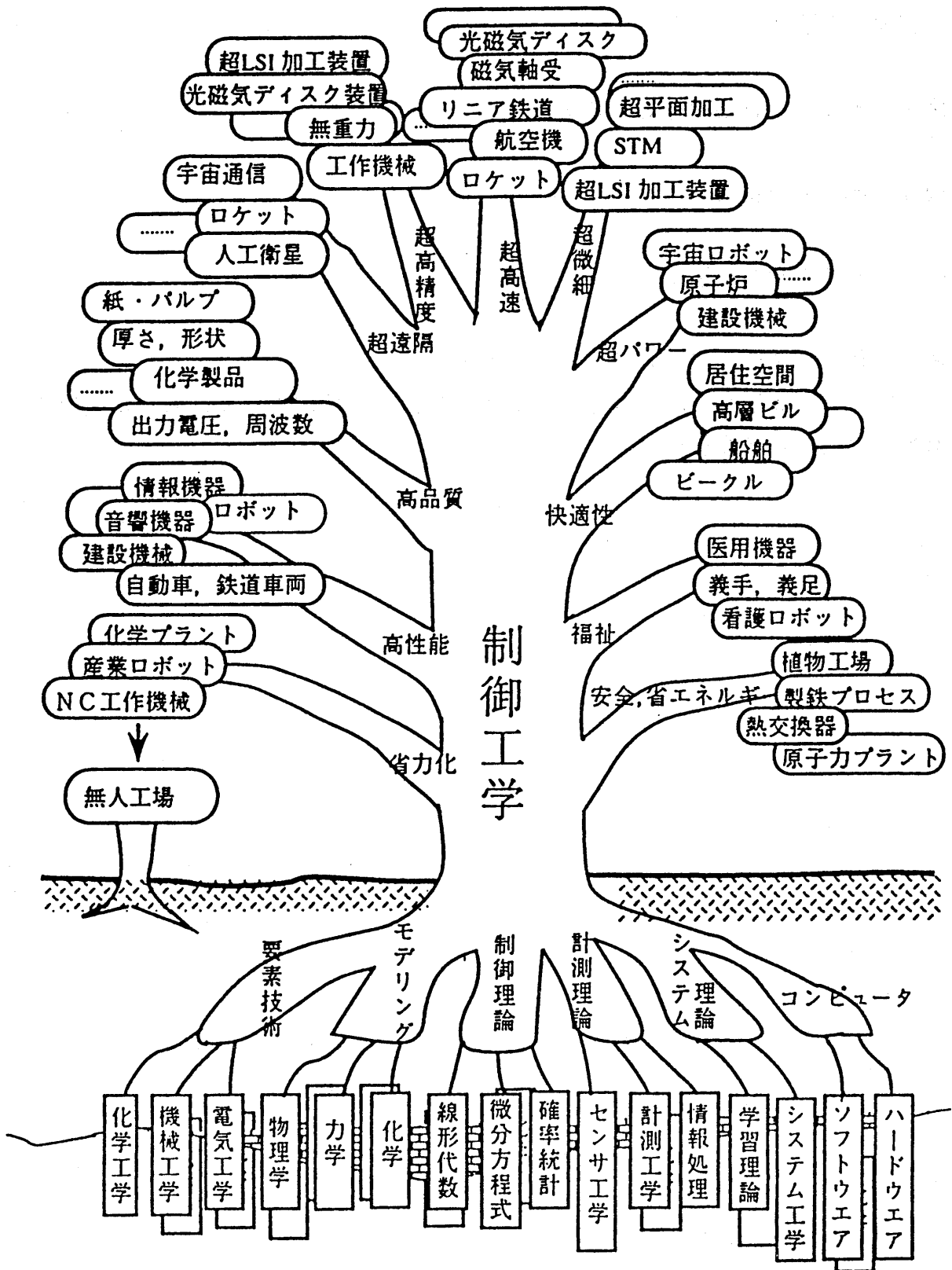


図4 制御工学の位置づけ

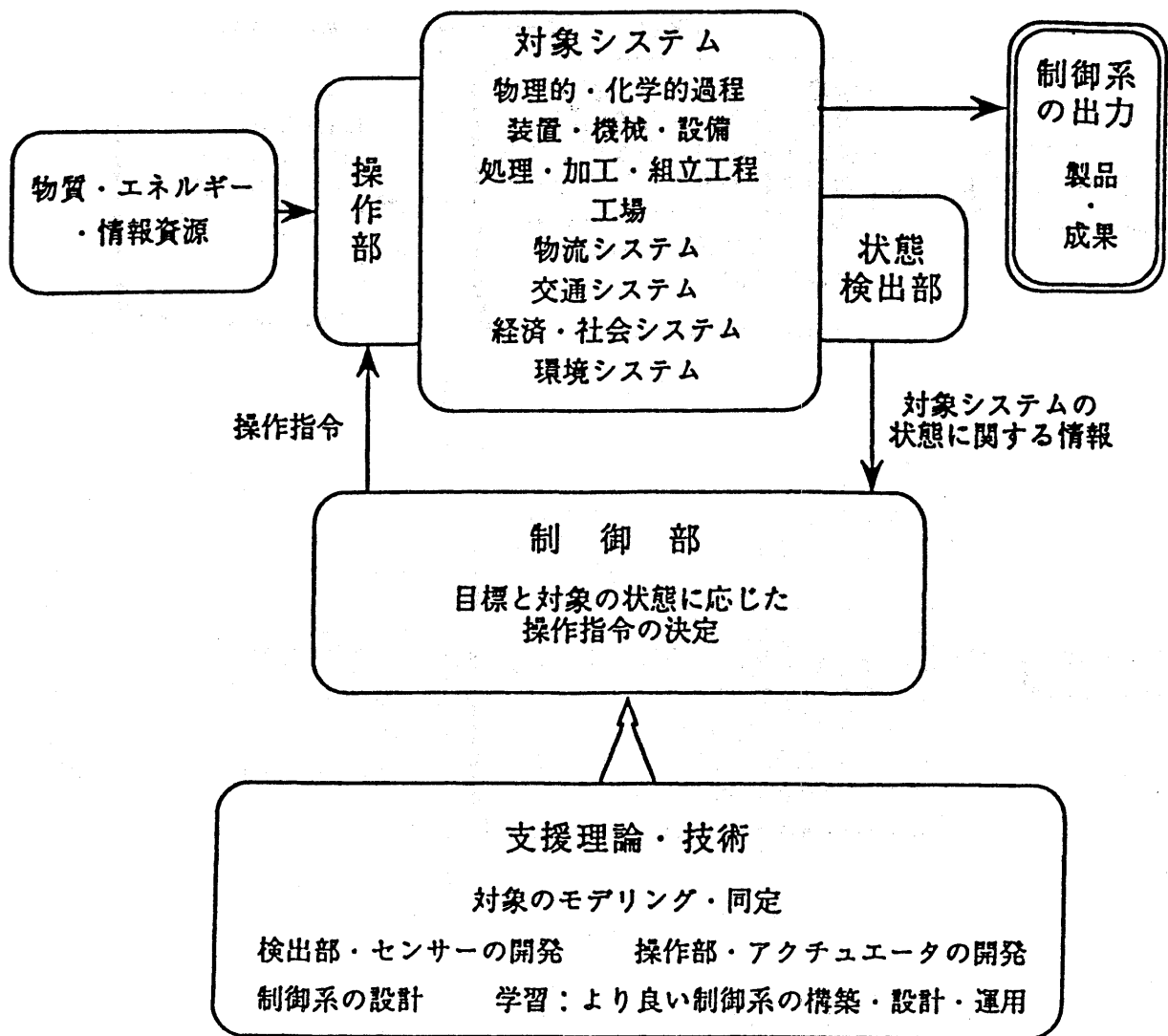


図3 制御系の構成

制御工学と応用分野との関係

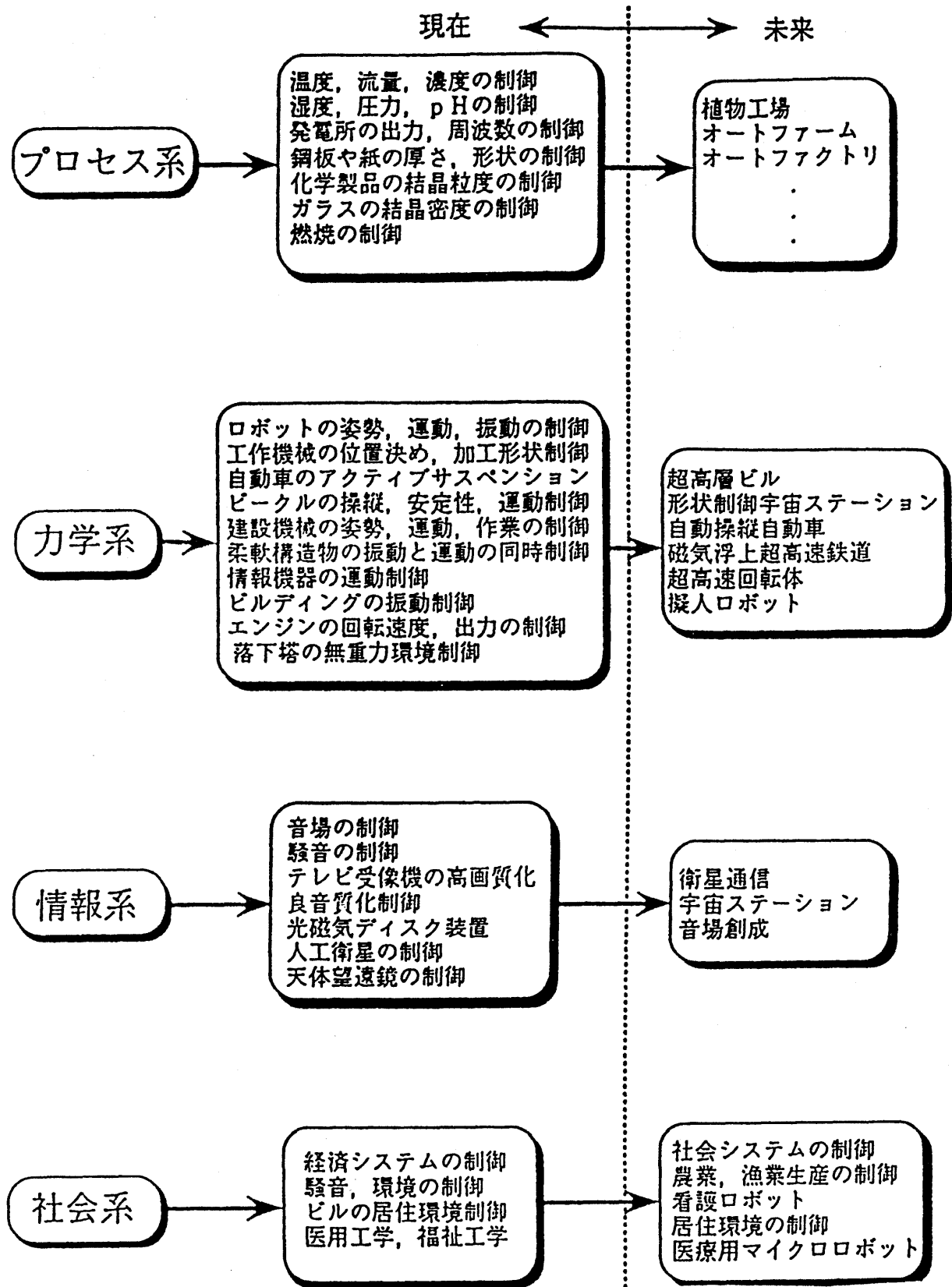


図2 制御工学と応用分野との関係