

電気工学分野における制御技術の動向

東京大学工学部電気工学科助教授 堀 洋一

1. まえがき

与えられた題目は恐ろしく広大な範囲をカバーするものであり、到底筆者の力のおよぶところではない。そこで、電気学会において筆者の関係する分野での動向を紹介し、日頃感じている電気工学分野の制御技術の特徴を述べることにする。

2. 電気学会の調査研究活動

電気学会は、A, B, C, Dという4部門に分かれている。活動の内容は、会誌・論文誌の発行、全国大会の開催、規格の制定、教科書の発行、通信教育など多岐にわたっている。

他の学会にはあまりない特徴は、部門の運営委員会がもつ10程度ずつの技術委員会と、その傘下に設けられる数個～十数個の（主として）調査専門委員会と呼んでいる専門委員会の活動にある。

調査専門委員会は、委員長、幹事ほか10～20人程度の専門家によって構成される。委員会は、通常1～2カ月に1回程度、1回あたり3時間以上にわたって開催される。委員相互や外部講師へのヒアリング調査、文献紹介や見学などの調査、委員が分担して行う実験やデータ集めなどの作業、技術委員会名でほぼ定期的に行われる研究会やシンポジウムの世話をを行うのである。

通常2～3年の設置期間が終了すると、技術報告とよぶ報告書または単行本を出版して解散する。解散してから1年程度以内に、報告書を用いて一般向け講習会を行う。

多少の語弊を覚悟で言えば、調査専門委員会は技術サロンである。とにかく出席して議論に加わることに意義がある。委員会後の懇親会を通じて人の輪もひろがる。

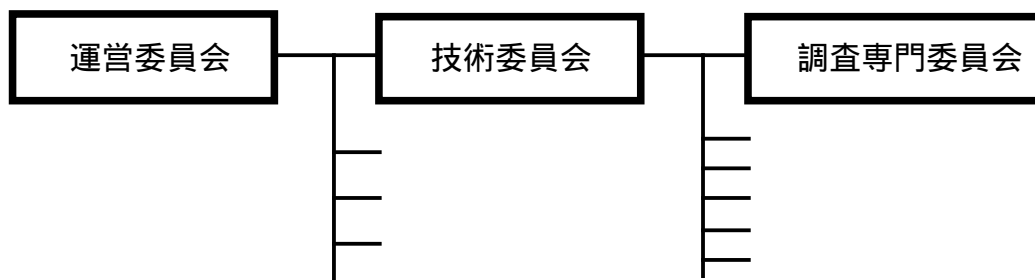


図1 電気学会の研究調査会組織

どのような専門委員会を設置するかは技術委員会において真剣に審議される。従ってその設置状況を見れば、そのとき重要であると判断された技術分野を知ることができる。

平成6年6月現在、活動している専門委員会は4部門合わせて計173もある。^[1]これはかなりの数であり、このような活動がわずかな予算で（手弁当という言い方をするが）連続と続けられていることは驚くべきことである。

ここではその中から「制御」に関連のありそうな専門委員会をひろってみよう。番号を記したのが技術委員会名で、傘下の専門委員会名には網かけを施した。

A部門（基礎・材料・共通部門）

1. 教育・研究
2. 電気物理

- 3 . 放電
- 4 . 光応用・視覚
- 5 . 計測
先端複合計測システム
- 6 . 誘電・絶縁材料
- 7 . 金属・セラミックス
- 8 . マグネティクス
- 9 . 電気技術史

B部門（電力・エネルギー部門）

- 1 . 静止器
- 2 . 開閉保護
- 3 . 新・省エネルギー
- 4 . 原子力
次世代原子力システム制御技術
- 5 . 電線・ケーブル
- 6 . 電力
配電設備劣化診断・予知技術
交直連系系統の相互作用
- 7 . 高電圧
- 8 . 超電導応用電力機器
超電導発電機の動特性

C部門（電子・情報・システム部門）

- 1 . 電子材料
- 2 . 電子デバイス
- 3 . 光・量子デバイス
- 4 . 電子回路
- 5 . システム・制御
インテリジェントプランニング
社会支援形ロボット基礎技術
ファジィ制御の社会システム応用
- 6 . 情報処理
- 7 . 通信
- 8 . 情報認識
インテリジェントセンサシステム
- 9 . 医用・生体工学

D部門（産業応用部門）

- 1 . 交通・電気鉄道
電気鉄道における省エネルギー技術
- 2 . 金属産業
金属産業分野におけるACドライブ技術
鉄鋼プロセスにおけるオープン化・ダウンサイジングに伴う
- 3 . 一般産業
制御システムの信頼性/保全性技術
逆問題としてとらえた産業プロセス異常予測
- 4 . 回転機
回転機の高精度シミュレーション技術
- 5 . 半導体電力変換
交流電動機駆動方式の技術分類・用語整理
電気自動車用パワーエレクトロニクス

- 電動機駆動システムのインテリジェント化
- 6 . 産業電力電気応用
 - セルレベルにおける統合運営管理
- 7 . 生産設備管理
 - 生産設備の自動化とヒューマンファクター
- 8 . 産業計測制御
 - モーションコントロールの高性能デジタル化
 - 制御システムの信頼性評価と高信頼化
 - 先端制御理論の応用
 - ファジー制御と知的融合技術の産業応用
 - 制御用アクチュエータの駆動システム
 - 産業におけるアドバンスト適応・学習システム
- 9 . 産業システム情報化
 - 産業システムにおけるシナジェティック技術
 - 産業システムにおけるニューロ・ファジィ融合技術
- 10 . リニアドライブ
 - リニアモータ駆動型人工心臓
 - 超電導リニアドライブ応用技術
 - リニアモータ制御技術
- 11 . 道路交通
 - 道路交通自動化システム
- 12 . 公共施設

これを見ると，B部門（電力・エネルギー部門）には電力機器や系統制御に関する調査委員会があり，C部門（電子・情報・システム部門）にはシステム・制御技術委員会に制御関係の調査委員会が設置されていることがわかる．しかし，圧倒的な数を誇るのはD部門（産業応用部門）であり，その名も産業計測制御技術委員会（現委員長は，千葉大学電気電子工学科 美多 勉 教授）を中心として多くの制御技術に関する調査委員会をかかえていることがわかる．

この他に，平成5年度中に解散した計66の調査専門委員会のうち，「制御」に関係のあるものは以下のとおりである．いずれもD部門に所属したものである．

プロセス産業における新制御技術，負荷適応機能を有する電動機制御系，
 制御システムの高信頼化手法， 制御用ソフトウェアとネットワーク，
 ロバスト制御の産業応用， アドバンスト・ファジー制御の産業応用

3 . 電気工学分野における制御技術の特徴

さて，これらの調査委員会のカバーするものが電気工学分野における制御技術であると乱暴に解釈すると，その特徴は何であろうか．思いつく項目をあげてみよう．

(1) 完全に応用指向である

必ずものが先にある．現場で長く使われてきたものに発言力がある．新しい制御理論への興味は大きいだが，実際に応用する際の技術に重きがおかれる．例えば，外乱オブザーバを使いこなすにも，有限なセンサ精度，低いプロセッサ能力などの問題があり，何より微分演算へのアレルギーを克服するのは至難の技である．

(2) フィードバック制御の役割は意外に小さい

制御理論の多くはフィードバック制御であるが，実際には，フィードフォワード（開

ループ)だけで制御されているものが大変多い。フィードフォワードの精度を高めるために多くの努力が費やされる。(たとえば強制振子車両)

(3) 故障診断や高信頼化技術, 計画や運用が重要な制御である

電気学会は外から見ると電力学会と言われる。たしかにB部門の力は大きい。電力においても制御は重要な技術であるが, 故障診断や運用手法に重点がある。これも広い意味での制御である。産業応用部門でもこの傾向が大きい。

(4) 制御のとらえかたがさまざまである

半導体電力変換(技), リニアドライブ(技)などの, ハードウェアにしっかり基礎をおき特化された制御技術と, 産業システム情報化(技)のように, スケジューリングやソフトコンピューティングの視点から分野を横断的に見ていこうとするものが混在する。

(5) フィードバックとフィードフォワードが共存する

電気屋は多分フィードバック指向である。結果を見て原因に戻るのが好きである。ブラックボックスの考え方が好きである。フィードバックアンプがまさにそうである。

筆者の主張するロボット制御には明らかに電気屋の嗜好がある。電気屋にとって, ロボットモーションは単なる外乱であり, 関節での外乱抑圧が自然である。機械屋にとって, 関節アクチュエータは単なるトルク発生器であり, 逆動力学を解いて必要な関節トルクを求めるのが自然である(図2)。しかし, 求めた関節トルクを信じてロボットを動かしても, 思いどおりにいくと信じる電気屋はいない。

電気分野の制御には, フィードフォワード制御とフィードバック制御がうまく共存するものが多い。さらにこの両者の分担比はまちまちである。電力の制御, 交通の制御, パワーエレクトロニクス, モータの制御などを考えれば明らかである。どのような理由で最適分担比が決まるのかを明らかにすれば大論文になるであろう。

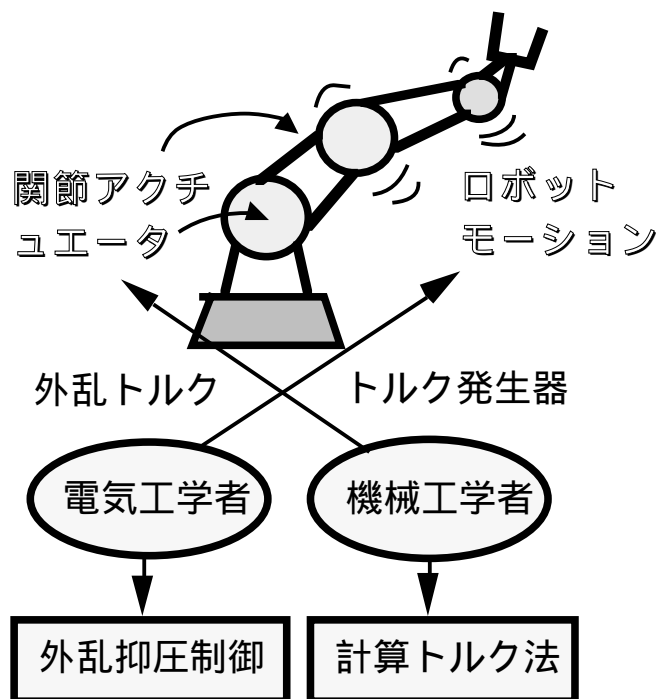


図2 電気屋の目, 機械屋の目

4 . Example 1 : 最近のモータ制御の話題

ここでは, 電気工学分野における制御技術の典型例として, 電気学会が比較的優位にあると考えられるモータ制御に関する最近の話題を述べた筆者らの解説^[2]から引用する。ベクトル制御は交流モータ制御の核であり, 本質的に非線形な系をいわば厳密に線形

化する手法である。今日、ACドライブと呼ばれるモータ制御技術として花開き、各方面で大幅な性能向上をもたらしている。

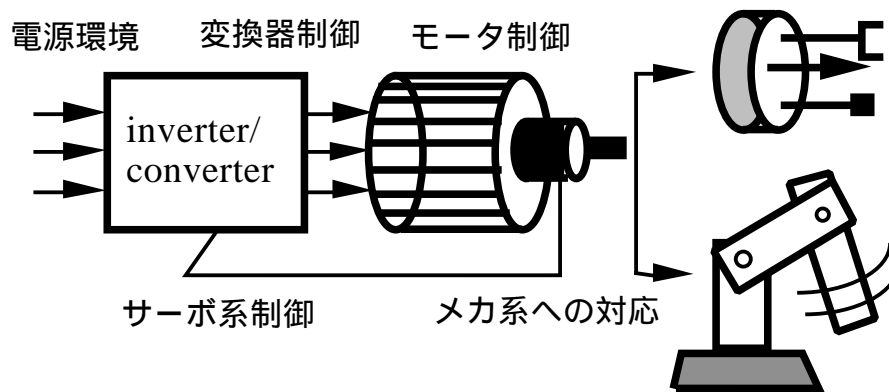


図3 モータ制御システム^[2]

しかし、モータ制御の技術はいま大きく変わりつつある。電流制御をされた電圧形インバータによる交流可変速制御技術が完成し、高機能プロセッサの普及、新しい制御理論の実用化等が有機的な結合をみせている。モータ制御は伝統的な動力源としての位置付けから、ある種の知的能力を有するアクチュエータシステムとして、機能の向上と自在性に一層の深みを持つに至っている。^[2]

図3はモータ制御システムを模式的に示したものである。同解説では下記の諸点に関する最新技術について概説している。章立ては以下のとおりである。

1. 電源環境改善に対する新しい試み
 - ・電源センサレス三相PWMコンバータ
 - ・アクティブコンバータ体型インテリジェントインバータ
2. 高速スイッチング素子による変換器の進歩
3. 交流モータ制御の新しい技術
 - ・定数同定法と応用
(原理は適応同定でも、現実にはさまざまな工夫がなされている。)
 - ・速度センサレス制御
(パワエレ回路を知らないと難しい面がある。現在のホットトピック。)
4. サーボ系設計の新しい技術
 - ・外乱抑圧制御
(外乱オブザーバがかなり広く使われだした。提案後、10~15年を要した。)
 - ・制御系のオートチューニング
(最近ではオートチューニングがないとサーボドライバは売れない。)
 - ・瞬時速度検出
(エンコーダの精度が低くてもロバスト制御を行うにはどうすればよいか。)
 - ・慣性モーメントの同定
(適応同定理論が比較的すなおに使える。ステップバイステップの同定も良。)
5. 機械系への適応
(この項目は次章で多少詳しく述べる。)

各項目を詳細に説明する余裕はないが、電源環境から電力変換器、機械系にいたる広い範囲でどのようなことが話題になっているかをおよそ知ることができるだろう。プロセス制御などに比べると、メカトロ系は制御対象がよくわかる面があり、最新の制御理論を導入していい効果が期待できる好運な分野でもある。

5 . Example 2 : 軸ねじれ系の制御

ベクトル制御では，電磁気学的なトルク発生メカニズムの解明と制御に主眼があり，その目論みは成功した．しかし最近では，モータだけではなく，負荷となる機械系を考慮して制御系を設計する必要が生じている．

振動制御がその好例である．鉄鋼の圧延機駆動系（図4）は，モータの交流機器化によって速度制御系の帯域が広がった結果，モータとロールを結ぶシャフトの軸ねじれ振動が大きな問題となっている．

同種の問題は，ステッパなどの精密位置決め装置，ロボットアーム，高層ビル，宇宙ステーション，エレベータ・鉄道車両・航空機などの乗り心地改善，自動車のアクティブサスペンション，アクティブパンタグラフ，電力系統・・・と非常に多くの分野に共通する．振動の抑制は，広い工学分野において将来必ず重要になる．

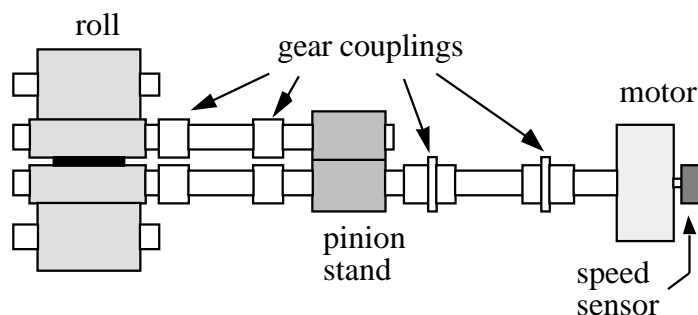


図4 圧延機駆動系

ハード上の制約からロール側にはセンサを取り付けることができない．モータ速度のみを観測し，モータトルクを制御して，負荷速度を振動なく速度指令に追従させること，外乱トルクの影響をできるだけ小さくすることが目的となる．

この問題に対していままでに提案されている手法を並べてみる．

- 1 . PI速度制御器：軸が無限に固いとした系に対して設計したPI速度制御器をそのまま用いる．速度応答は振動的で外乱の影響も大きい．
- 2 . 速度微分フィードバック：振動抑制の基本は加速度のフィードバックである．適当に調節すれば，かなり良好な振動抑制効果がある．
- 3 . モデル追従制御：SFC (Simulator Following Control) が代表．振動のない規範モデルの出力と実速度の差にゲインをかけてトルク指令に加算する．SFCは全くのオプションで現場で効果を調整できる点が特長である．
- 4 . 外乱オブザーバ：外乱オブザーバをそのまま適用すると振動を増幅する．推定外乱にゲインを介してフィードバックする共振比制御，オブザーバの極を工夫する遅い外乱オブザーバなどおもしろい手法がある．
- 5 . 状態フィードバック：状態・外乱オブザーバによる状態フィードバックによって極を安定化．SFLAC (State Feedback and Load Acceleration Control) や，二つのオブザーバを用いた高次振動モード抑制法が効果的である．
- 6 . H 制御と μ シンセシス：H 制御はモデル化誤差を積極的に扱い，2次以上の高次モードをモデル化誤差として抑圧する． μ シンセシスはパラメータ変動をより精密に表現する．通常のH 制御から出発して2~3回のDK-iterationで結果を得る．制御器の次数は非常に大きくなるので低次元化が必要である．

このように簡単な微分フィードバックから最近のH 制御にいたるまで，ひとつおりの制御法が出そろっている．制御理論の歴史を見るようである．

しかし，どのような制御器でも，速度指令とモータ速度にもとづいてモータトルクを

作る点は同じである．PID制御のみでもうまく設計すれば良好な応答を示す（図5）．微分項の大きさがモータとローラの慣性比の簡単な関数となる．慣性比が小さいと加速度の正帰還が効果的となる．図5は慣性比0.2でモータ側が大きいケースである．外乱トルクが印加された $t=0.5$ でモータトルクがいったん大きく引いている．この場合，振動抑制と外乱抑圧はあい矛盾する制御要求となるのである．

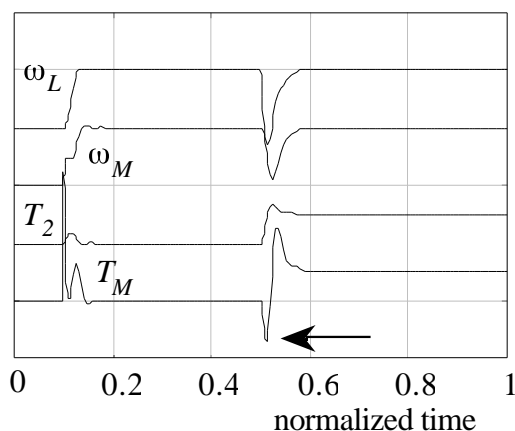


図5 PID制御のみによる2慣性制御の結果

いい制御系はだいたい同じような応答を示す．しかしできあがった制御器を見ただけではわからない．設計者の思想が大切である．やみくもに難しい理論を導入する前に，次のような条件を押えておく必要がある．

- ・ 設計法が明快である
- ・ 現場の調整がやさしい
- ・ 制御器の次数が高くない
- ・ バックラッシュやトルクリミットに強い

さらに，

- ・ n 慣性系のコントローラは $n-1$ 慣性系のコントローラ + という構造である
- ・ 制御対象の特性を生かし無理をしない
- ・ 適応的手法との相性がよい

を付け加えよう．これらはとりもなおさず，わかりやすい制御器を作ることに通じる．

現在，与えられた系に対して最も優れた性能をもつのは，よく調整されたH 制御や μ シンセシスである．たしかに良い性能は得られるが，設計には熟練を要し，誰でもが短時間で設計できるとは限らない．このような点ではPID制御のような慣れ親しんだ設計法に一日の長がある．

5．あとがき

以上，自分のまわりの限られた範囲で，電気工学分野の制御について私見を述べた．おそらく他分野と同様，電気工学分野の制御技術は応用指向である．

しっかりしたベースをもった先達は自分の問題のエッセンスを昇華し，制御理論として一般化した．この順番が逆になると意外な落とし穴があると思っている．

[1] 電気学会：平成5年度研究調査会事業報告，平成6年6月

[2] 松井信行・堀洋一：モータコントロールの新しい技術，電気学会論文誌，Vol.113-D，No.10，pp.1122-1137，1993.10