

アドバンスト制御技術の開発とその応用

Developments of Advanced Control Techniques and Their Applications

エレクトロニクス事業部 前川 明 寛*¹ 宮元 慎一*²
広江 隆 治*³

ロバスト制御や非干渉制御などのアドバンスト制御は、学界では活発に議論されている。しかし、数学的条件の厳しさ等の理由により、直ちに実装置へ適用できないことが多い。本報では、アドバンスト制御理論を実際の製品に適用するための理論的な工夫及びその適用結果を2例述べる。第1の例は、 H_∞ 制御のモータ位置制御への応用で、外乱トルクに対してオフセットが残らない制御系が得られた。第2の例は、非干渉制御の応用例として抽気復水タービンに適用したもので、本来、相互干渉を有する抽気圧力と発電量を独立に制御でき、発電量の変動に対して圧力変動の少ない蒸気を工場に供給できるようになった。

Advanced control, such as robust control or decoupling control, have been established in the sense of system theory. However, we sometimes feel difficulty to put them into real use, since they often require too much strict mathematical conditions for real systems. In this paper, we describe two cases of our efforts to improve the system theory for application to real systems and its results. In the case of position control of electric motor, we used H-inf theory and we could obtain a controller which completely compensated the position offset against the disturbance torque. In the case of turbine control, we applied our new decoupling control theory to a power generating turbine for a chemical plant. The operational result showed remarkable difference from the conventional control.

1. ま え が き

最適制御や H_∞ 制御等のアドバンスト制御は、学界で活発に議論されている。しかし、数学的条件の厳しさ等の理由により、直ちに実装置へ適用できないことが多い。本報では適切な理論的工夫によりアドバンスト制御を実機に適用し、成果を得た事例を2例報告する。まず2章では、 H_∞ 制御を、サーボ系などの積分特性を有する制御対象に適用する際の制御系設計手法を提案し、モータ制御に適用した成果を述べる。3章では、制御対象の特性変動に強く外乱の影響を受け難いという特長を有する最適制御手法を活用した非干渉制御器の設計手法を提案し、抽気復水タービンへ適用した成果について述べる。

2. H_∞ 制 御

H_∞ 制御は制御対象に不確かさがある場合や制御対象が変動する場合の制御方式として脚光を浴びている。 H_∞ 制御の特徴は、周波数領域で設計が行え、直感的に理解しやすいことである。

ただし、現実の問題への適用を考えた際、Glover-Doyleの解の制約条件⁽¹⁾がその障害となることがしばしばある。ここでは、 H_∞ 制御の代表的な設計法である混合感度問題を適用する際の問題点を述べ、その解決法を示すとともにその設計例を示す。

2.1 混合感度問題

混合感度問題では、制御系閉ループの感度と相補感度を周波数重み付きで評価し、その H_∞ ノルムの最小化を図る。

$$\|W_1(s)S(s) \quad W_2(s)T(s)\|_\infty < 1 \quad (1)$$

ここに、

$S(s)$: 感度

$T(s)$: 相補感度

$W_1(s), W_2(s)$: 周波数重み

s : ラプラス演算子

感度は目標値から偏差までの伝達関数であり、相補感度は目標

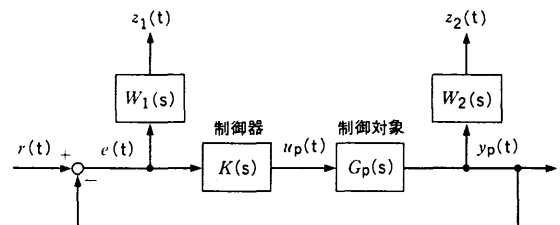


図1 混合感度問題ブロック線図 H_∞ 制御系設計で最も代表的な混合感度問題を示す。
Block diagram of mixed sensitivity problem

値から出力までの伝達関数である。ブロック線図を図1に示す。目標値 r から制御量 z までの伝達関数が式(1)の左辺になる。

式(1)の左辺の伝達関数を実現するために次の一般化プラントを導入する。式(2)において、 $x(t)$: 状態変数、 $w(t)$: 外部入力、 $u(t)$: 制御入力、 $z(t)$: 制御量、 $y(t)$: 観測量である。また $\dot{\cdot}$ は時間微分を示す。

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \\ z(t) &= C_1 x(t) + D_{11} w(t) + D_{12} u(t) \\ y(t) &= C_2 x(t) + D_{21} w(t) \end{aligned} \quad (2)$$

例えば次のように係数行列を選ぶと式(1)の左辺の状態空間表現を得る。

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} A_w - B_w C_p \\ 0 & A_p \end{bmatrix} & B_1 &= \begin{bmatrix} B_w \\ 0 \end{bmatrix} & B_2 &= \begin{bmatrix} 0 \\ B_p \end{bmatrix} \\ C_1 &= \begin{bmatrix} C_w - D_w C_p \\ 0 & C_i \end{bmatrix} & D_{11} &= \begin{bmatrix} D_w \\ 0 \end{bmatrix} & D_{12} &= \begin{bmatrix} 0 \\ D_i \end{bmatrix} \\ C_2 &= [0 \quad -C_p] & D_{21} &= I & D_{22} &= 0 \end{aligned}$$

ただし、

$(A_p, B_p, C_p, 0)$: 制御対象 $G_p(s)$ の状態空間表現

(A_w, B_w, C_w, D_w) : $W_1(s)$ の状態空間表現

(A_p, B_p, C_i, D_i) : $W_2(s)G_p(s)$ の状態空間表現

*1 開発・製造部制御システム二課 工博

*2 開発・製造部制御システム一課 (現ケンブリッジ大学留学中)

*3 開発・製造部制御システム二課 (現ミシガン大学留学中)

2.2 問題点

サーボ系を設計する際に問題となるのは以下の3点である。

- (1) サーボ系を設計するには A_w の固有値を安定限界に選ぶ必要がある (例えば一型の制御系を設計するには, A_w の固有値を原点に選ぶ必要がある)。
- (2) 制御対象が原点に極を持つ場合は, Glover-Doyle の制約条件を満足しなくなる。
- (3) 制御対象の極と制御器の零点で極零相殺し入力に入る外乱応答が悪くなる。

(1)に関しては, 虚軸から少し左半平面にずらして設計し後で戻す方法や, 最初から制御器に積分特性が入ることを考慮し積分特性をループの中に入れて設計する方法があるのでさほど大きな問題とはならない。

(2)に関しては(1)と同様, 極を左半平面にずらして設計し後で戻す方法があるが, 制御器が積分特性を持たなくなるのでトルク外乱などのステップ外乱に対してはオフセットが残る。

(3)は混合感度問題ではなく, 4 Block 問題などに設定を変えれば回避できるが, 目標値応答より外乱応答を重視した設計になることや, 重みの選び方が難しくなるなどの問題がある。

2.3 部分状態フィードバック制御による設計

ここでは, (2), (3)の問題を部分状態フィードバックで解決する方法を提案する。

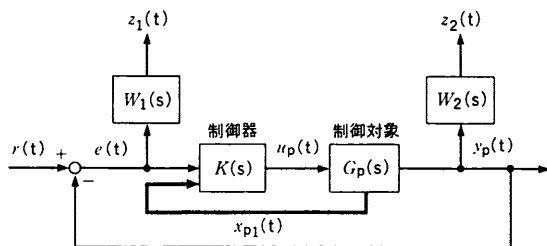


図2 部分状態フィードバックブロック線図 図1と比べて, 制御対象から制御器へのフィードバックが追加されている。
Block diagram of partial state feedback

部分状態フィードバック制御系のブロック図を図2に記す。出力以外に測定できる状態量をフィードバックしているが, 評価関数は出力フィードバックと同様, 目標値から偏差までの伝達関数と出力までの伝達関数としている。この場合の一般化プラントは, $A, B_1, B_2, C_1, D_{11}, D_{12}$ は出力フィードバックと同じで, C_2, D_{21} のみが異なり, 次のようになる。

$$C_2 = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & [I \ 0] \\ 0 & -C_p \end{bmatrix}$$

$$D_{21} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I \end{bmatrix}$$

この問題は D_{21} が行フルランクでないので標準的な Glover-Doyle の解法では解けないが, 文献(2)のような方法により解くことができる。その際, 制御器の次数も下げることができる。

提案する制御方式の特徴は, 積分器の前後の状態が利用可能であれば積分特性を持った制御対象にもそのまま適用できること⁽³⁾, また, 極零相殺するモードの数を減らすことができること⁽⁴⁾であり, 前述の問題点(2)(3)を解決した。

2.4 モータ制御への適用

以上の設計をモータ制御に適用した例を示す。サーボモータの動特性は機械系の運動方程式, 電気系の回路方程式に逆起電力を考慮した以下の式により決まる。

機械系の運動方程式:

$$J_M \frac{d^2\theta}{dt^2} + D_M \frac{d\theta}{dt} = K_T i + T_d \quad (3)$$

電気系の回路方程式:

$$R_a i + L_a \frac{di}{dt} + K_E \frac{d\theta}{dt} = E \quad (4)$$

ただし,

θ : 回転子回転角 K_T : トルク定数

i : 電機子電流 K_E : 逆起電力定数

E : 電機子電圧 R_a : 電機子抵抗

T_d : トルク外乱 L_a : 電機子インダクタンス

とする。ただし, J_M は負荷も含めた慣性モーメントとし, モータ単体の慣性モーメントの10倍とした。また, D_M は0とした。操作量 E から制御量 θ までの伝達関数は次のようになる。

$$\theta = \frac{1}{s} \frac{K_T}{(J_M s + D_M)(L_a s + R_a) + K_T K_E} E \quad (5)$$

この制御対象に対して次の2通りの設計を行った。

[ケース1]

混合感度問題に基づき, 部分状態フィードバック制御系を設計した。部分状態として θ と $\omega (= d\theta/dt)$ を加えた。

[ケース2]

混合感度問題に基づき, 出力フィードバック制御系を設計した。重みはケース1と同じとした。ただし, 出力フィードバック制御では, 周波数重みと制御対象の積分器をそのまま取扱えないので, 一次遅れ $1/(s+0.0001)$ に置換えて設計した。

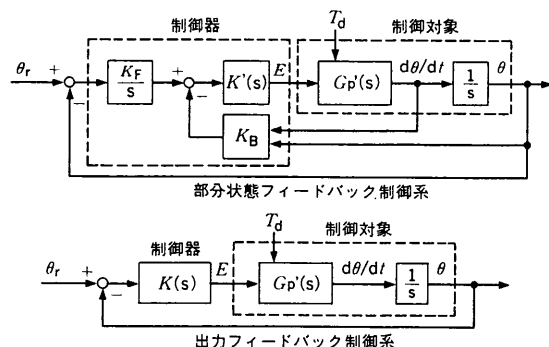


図3 制御系ブロック図 ケース1は, 角度及び角速度の内部ループを持つ。ケース2は単に角度のみフィードバックする。
Feedback control system

ケース1, 2の制御系のブロック図を図3に示す。ケース2の出力フィードバック制御に対して, ケース1は内部ループを含んでいる。得られた制御系の目標値及びトルク外乱に対するステップ応答を図4に示す。

トルク外乱が変わらない場合, 同じ重みで設計しているため, 部分状態フィードバック制御と出力フィードバック制御の目標値応答は全く同じになる。一方, トルク外乱が加わると異なった応答となる。出力フィードバック制御では, 制御器に積分特性が入っていないので, ステップ状の外乱に対してオフセットが残る。これに対して部分状態フィードバック制御では, 制御器に積分特

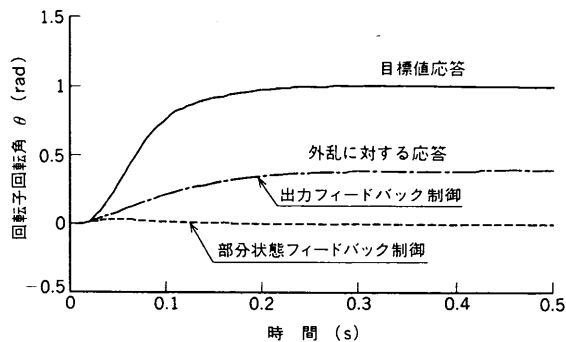


図4 シミュレーション結果（ステップ応答） 目標値応答はケース1, 2とも等しいが、ケース1の方が外乱の影響を受けにくいことを示す。
 Simulation result (Step response)

性が入っているため、外乱に対するオフセットを零にすることができる。

3. 抽気復水タービンの非干渉制御⁽⁵⁾

抽気復水タービンは発電と同時に、タービンの途中の段落から所定の温度・圧力を持った蒸気を抽出して、プロセスヒーティングに利用することができるので、化学・製紙等の中低圧の蒸気を必要とする工場の自家発電に広く使われている。

筆者らは、最適制御理論に基づいた非干渉制御装置を抽水復水タービンに適用し良好な制御成績を得ることができたので報告する。

3.1 制 御 对 象

図5に制御対象と制御装置の概要を示す。制御量は発電量と第1抽気圧力及び第2抽気圧力の三つである。この工場内の第1抽

気の消費量はバッチプロセスの起動・停止に伴い間欠的に変動し、
 制御量の変動を誘起する。抽気圧力の変動は製品の品質にかかわ
 るため、制御系には抽気の消費量が変動しても抽気圧力をできる
 だけ一定に維持することが要求される。

一般に、工場内では抽気を使用目的に合わせて減圧させている。このため、熱効率の観点からは、抽気圧力をできるだけ目的の圧力に近い、低い設定にすることが望まれる。しかし一方で、工場を安定して操業するには絶対に必要な下限値を超えて下げることにはできない。従来は、抽気圧力が変動しても、下限値に達しないように、熱効率を犠牲にしながら抽気圧力を高めに設定していた。

したがって、抽気圧力の変動をできるだけ小さく抑えることにより、熱効率の改善が可能になる。

3.2 制 御 系

従来の制御方法の基本的な考え方は、相互干渉を有する3入力3出力となる2段抽気復水タービンを3個の独立した1変数系に分割し、PI制御器を設計していた。これに対し、筆者らは、これを多変数系として取扱い、抽気圧力の変動を抑制する制御器を設計した。2段抽気復水タービンのように設定値(目標値)が一定で運転される対象では、設定値への追従特性よりもむしろ外乱の影響の受けにくさの方が重要となる。H_∞制御では、外乱の影響を直接考慮した非干渉制御器の設計は行えない。一方、最適制御では、この設計は可能となるが、希望する制御性能を得るためには、試行錯誤を繰返さなければならなかった。

筆者らは、このような最適制御の設計に関する問題を解決した実用的な設計法を開発した。この方法は相互干渉を抑制し、希望の入力応答波形を実現する最適制御器を、試行錯誤することなく設計することができる。この方法を ZED 法と名付けた。

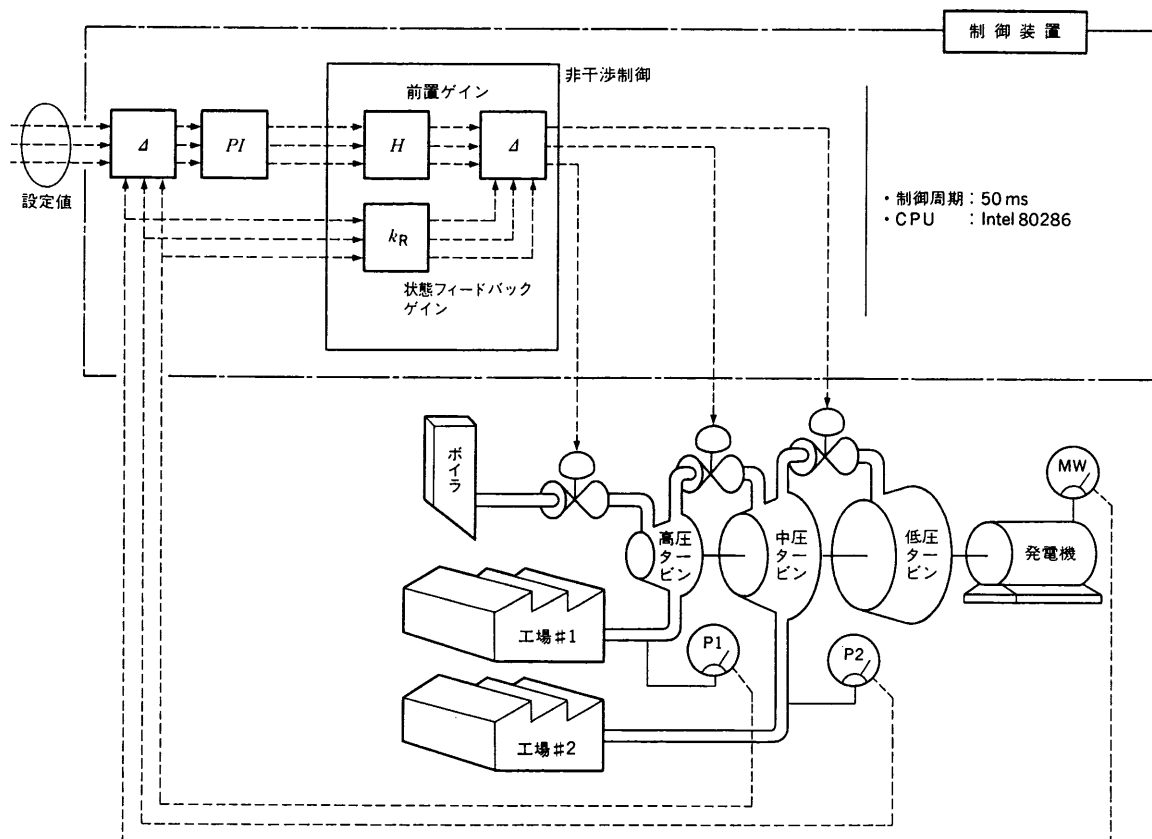


図5 抽気復水タービン制御システム構成 自家発電と併せ抽気も工場で利用するシステム及び制御装置の構成を示す。
Control system structure of independent power generating turbine

3.3 最適制御理論による非干渉制御器設計法

図5に示すように、本方法ではPI制御器と非干渉制御器を独立させた。この構成を採用すれば、積分補償の有無にかかわらず、同一の非干渉制御器を使用できる。

一般的な、可制御・可観測な最小位相推移系の線形定数システム

$$y(s) = C(sI - A)^{-1}Bu(s) \quad (6)$$

を対象として、本応用で用いた非干渉制御器の設計手順を示す。

ここに、 m 次元の $y(s)$ は制御量、 $u(s)$ は m 次元の操作量である。

[設計手順]

Step 1: 希望する入力ステップ応答特性を表す、安定な対角伝達関数行列 $W(s)$ を選定する。 $W(s)$ を用いて、仮想的な制御量 $y_w(s)$ を次式で定義する。

$$y_w(s) = W(s)^{-1}C(sI - A)^{-1}Bu(s) \quad (7)$$

ただし、 $W(s)$ は $u(s)$ から $y_w(s)$ への伝達関数行列の相対次数がすべて1となり、かつ適当な行列 C_w を用いて $u(s)$ から $y_w(s)$ への伝達関数行列を

$$C_w(sI - A)^{-1}B = W(s)^{-1}C(sI - A)^{-1}B \quad (8)$$

と表すことができるよう選定しなければならない。

Step 2: 正のスカラー ρ を適当に定め次の評価関数 J で最適フィードバックゲイン K を求める。

$$J = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [y_w(j\omega)^T y_w(j\omega) + \rho u(j\omega)^T (B^T C_w^T C_w B) u(j\omega)] d\omega \quad (9)$$

Step 3: 前置ゲイン行列 H を次式で求め、図5のように構成する。

$$H = [C(-A + BK)^{-1}B]^{-1} \quad (10)$$

Step 4: 閉ループ特性をステップ応答等で調べ、希望特性が得られるまで ρ を小さくし、Step 2 と Step 3 を繰り返す。

この手順で求められる制御則は全状態フィードバックである。しかし、本応用の場合には出力以外に掛かるゲインは小さかったので、状態フィードバックゲインを出力フィードバックゲインで近似した。非干渉制御器により相互干渉が取除かれているので、目標値追従用のPI制御器は単ループのみに着目して設計すればよい。現場においても通常の単ループ制御と同じ要領でPI制御器のパラメータを調節することができる。

3.4 実機適用結果

図6は、従来の制御方法による抽気圧力の1日の変動の履歴である。第1抽気の消費量の変動に伴い、第1抽気の圧力が変動している。本プラントでは、第2抽気の消費量はほぼ一定であったにもかかわらず第2抽気の圧力 $P\#2$ にも変動が現れた。これは主に、第1抽気の制御ループからの干渉によるものと考えられる。

これに対し、図7は本非干渉制御器による抽気圧力の変動の履歴である。工場の操業状態はほぼ同様であるため、抽気消費量の変動も図6とほぼ同様であると考えられるが、抽気圧力の変動は従来制御に比べ大幅に減少している。第2抽気圧力の変動は極めて小さく、ペンレコーダからは読取ることができなかった。

図6と図7を比較すると、抽気圧力の変動が従来と比べ約1/4と大幅に減少し、かつ第1抽気から第2抽気への干渉が消滅しているので、狙い通りの制御性能を得ることができたと考える。さらに、従来、抽気圧力の変動を見込んで、高めに設定されてい

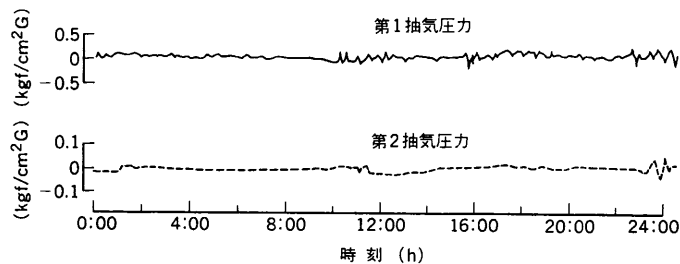


図6 従来制御装置による抽気圧力の変動 第1抽気の消費量の変動に伴い、第1抽気圧力に変動が起り、さらにその変動が第2抽気圧力にも影響を及ぼしている。

Pressure control result by conventional controller

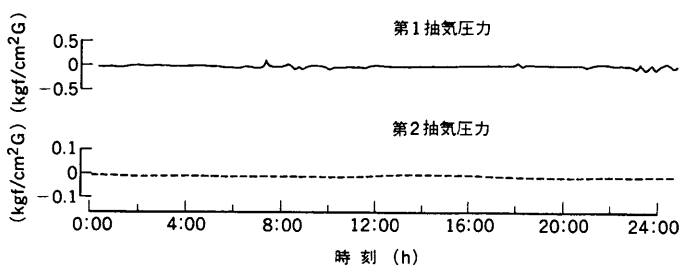


図7 新制御装置による抽気圧力の変動 非干渉制御器により抽気圧力の変動が従来制御に比べ大幅に減少している。

Pressure control result by advanced controller

た抽気圧力の設定値が本制御方法を適用することにより、抽気圧力を従来よりも低く設定することが可能となり、効率が改善され経済的な効果も得ることができた。

4. おわりに

以上、アドバンスト制御の実用化の事例を示した。母機のハードウェアは同一でもソフトウェア、すなわち制御アルゴリズムの改善により母機の性能を更に上げることができた。これらアドバンスト制御は、高性能化、運転経費削減、付加価値の向上等のお客様のニーズに対して、今後ますます重要になるものと思われる。

最後に、非干渉制御の適用に当たり、多大な御協力をいただきました。三菱化成(株)に深く感謝致します。

参考文献

- (1) Glover, K. and Doyle, J. C., State-Space Formulae for All Stabilizing Controllers that Satisfy an H_∞ Norm Bound and Relations to Risk Sensitivity, Systems and Control Letters, No.11 (1988) p.167
- (2) 章, 細江, 部分状態フィードバックによる H_∞ 制御問題, 計測自動制御学会論文集 Vol.29 No.2 (1993-2) p.169
- (3) 宮元, 有永, 積分特性を有する制御対象に対する H_∞ 制御の設計, 計測自動制御学会論文集 Vol.30 No.10 (1994-10) p. 1165
- (4) Miyamoto, S. and Arinaga, S., Relationship between Availability of States and Pole/Zero Cancellations in H_∞ -Control, IEEE Trans. on Auto Contr. AC-39-2 (1993-2) p.379
- (5) Hiroe Takaharu, Morimoto Toshimitsu, Inoue Shinichi, and Takamatsu Hitoshi, A New method for selecting weighting matrices of LQ regulators and its application to industrial turbine, Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control (1993-12)