

外乱応答指定 2 自由度 IPD 制御系の設計

南山大学数理情報学部数理科学科 高見 勲

1. 緒言

制御系には基本的に次の 2 つの機能が要求される。一つは外乱抑止機能であり、外乱が印加された際、プラントを安定させ、その影響を抑える。二つ目は目標値追従機能であり、目標値が変動しても、制御量を目標値に一致させることである。これら 2 つの機能を実現するため、2 つの独立した補償器を備える制御系を 2 自由度制御系と呼ぶ。特にプロセス制御では、外乱抑制機能が重要であり、その応答特性を希望のものにすることが要求される場合が多い。

現在、世の中で実用されている制御系の大半は PID 制御系である。本報では外乱応答指定機能を持たせた 2 自由度 PID 制御系の設計法について述べ、さらにその考え方を PID の拡張である IPD 制御に拡張する。

2. PID 制御系

制御理論は、1960 年頃出現した現代制御理論、1980 年頃からのロバスト制御理論など、古典制御理論を超えた新しい制御理論が得られているが、未だに多く PID が用いられている。この理由は、PID の優れた特徴に加え、PID 制御の改良によりさらに使いやすく、制御性能の良い方式が開発されているからである。

2.1 PID 制御系の特長

プラント、機械装置など産業界における制御ループの 90% 以上は PID 制御方式が使用されている。その主な理由は以下の点である。要するに、他に種々の制御方式の提案があるが PID を捨ててまで採用しなくてはならない理由がなく、PID で十分である、あるいは PID を基本として多少のモディファイを施せば目的を満足できるから利用度が高いといえる。

- 1) 制御系が単純である：比例ゲイン、積分時間、微分時間の 3 種のパラメータの値を決めるだけで良い。
- 2) 現場調節が容易である：上記 3 種のパラメータの物理的な意味が分かっており、振動的なら比例ゲインを小さくし、目標値になかなか近づかないなら、積分時間を小さくする、振動を抑えて安定性を増すには微分時間を大きくするなど、現場での対応が直ちに取れる。
- 3) 十分な制御性能：比例ゲイン、積分時間、微分時間の 3 種のパラメータを与えることでゲイン補償と位相補償が適切に行えるので、他の複雑な制御方式を採用しなくてもほぼ同等の制御性能が得られる。

- 4) 実装が容易：制御系が単純であるため、制御装置としての実装が容易である。現在はマイクロプロセッサを用いたデジタル制御がほとんどであるが、演算量が少ない。これにより演算時間が短く、制御性の低下を防ぐことが出来る。
- 5) 実用性が高い：操作量飽和対応（リセットwindアップ防止）、手動/自動のバンプレス切り替えが容易で実用上の問題がない。
- 6) 信頼性が高い：実績があり枯れた技術である。このため信頼性が高く、安心して利用することが出来る。
- 7) ラフなモデルでよい：H 制御はプラントの特性変動を考慮しているというが、所詮モデル化できる範囲は限定されており、ノミナルプラントは設定できても（これは設計者が勝手に設定できる）、変動量を正確に求めることは出来ない。あるいは求めようとすると相当の時間とコストが掛かり現実的ではない場合が多い。

2.2 PID 制御系の構造

PID 制御系には各種の構造がある。以下に代表的な構造を示す。

- 1) 古典的 PID：制御偏差（目標値 - 制御量）に比例，積分，微分演算を施し操作量を決める。基本的に PID を含むフィードバック制御系は以下の特性を保有している [3]
 - (1) システムの安定性を改善することが出来る
 - (2) 外乱の影響を抑制することが出来る
 - (3) 目標値から出力までの伝達関数を望ましい特性に出来る
 - (4) プラントの開ループ伝達関数の持つ不確かさ（特性パラメータの変動やモデル化の誤差など）に対して、システムの（閉ループ伝達関数の）ロバスト性を改善できる（変動を抑える低感度な性質を保有している）
- 2) 微分先行型 PID (IP-D)：微分は直接制御量に施し，比例，積分演算を制御偏差に施す。これにより，目標値のステップ変化時の微分による不必要な操作量の変動（set-point kick）を抑えられる。このことはループの安定性及び外乱抑制には影響を及ぼさない [1] [2]
- 3) I-PD：積分のみ制御偏差に作用させ，比例と，微分は制御量に作用させる。目標値変化に対する操作量変化をさらに緩和させる。 [21] [25] [10]
- 4) 部分モデルマッチング：制御対象に制御系を加えたシステム全体の伝達関数を希望の伝達関数に一致させる考えの一種で，伝達関数中高次の項は無視して，次数の低い項のみを一致させる [26] [30] [39] この考えはモデルマッチングすなわち閉ループ系を希望の特性にするために制御器パラメータを決定する方法を PID に適用したものである。モデルマッチングでは極配置により希望の特性を実現する方法が取られる。 [6]
- 5) 2 自由度 PID：目標値追従と外乱抑制の両方の制御性を向上させるもので，外乱抑制制御のためのフィードバックループの調整を行なった後，目標値追従性を向上させるためのフィードフォワード制御ループを追加する [47]。

- 6) 適応 PID 制御：モデル規範型適応制御において、絶えずモデル動特性を実現するように PID のパラメータをリアルタイムで変化させる。都市ごみ焼却プラントに適用[35]
- 7) 非線形スタティクス補償 PID：非線形動特性を非線形スタティクス + 線形ダイナミクスに分離し、非線形スタティクスは逆関数で打ち消し、残りの線形ダイナミクスに対し、PID を適用する [34]
- 8) フィードフォワード併用 PID：既知（測定可能）の外乱に対しては、その影響を打ち消す操作量を求めることが出来るので、これを直接制御対象に印加し（フィードフォワード制御）未知の要因に備えてフィードバック制御（これを PID）で行う。目標値と外乱に対し希望の応答特性（この実現が困難な場合は妥当な応答特性）となるようにフィードフォワードループの目標値、外乱に対する伝達関数を決める。目標値を PID のフィードバックで補償した後、外乱をフィードフォワードで打ち消す制御系となる [2]
- 9) 内部モデル制御（IMC; Internal Model Control）: 制御系の中に内部モデルを持ち、プラントの制御量（実測値）とモデルの出力の誤差をフィードバックして PID 演算を施しフィードバック系を構成する方法が考えられている。2 自由度制御と類似であるが、PID はフィードバック制御にのみ用いる点で 2 自由度制御の限定した適用である [2]

2.3 PID 制御系の調整法

PID 制御系の代表的な方法として以下の方法が挙げられる。

- 1) 経験則に基づく方法：Zeigler-Nichols の調整法は最もポピュラーな調整法で、ステップ応答法と、限界感度法がある。他に Chien-Hrones-Reswick の方法などがある。[1] [2]
- 2) 極配置（モデルマッチング）: システム全体の伝達特性が希望する応答特性となるように、システムの極を指定し、これを実現するように PID パラメータを決定する。この一種として、擬似極配置法がある。これは次数が高次（4 次以上）になると、希望する極を完全に実現する PID パラメータ存在しない可能性がある。そこで系の極が希望する極に最も近くなるような PID パラメータを設定する[45] さらに、Zeigler-Nichols のステップ応答法でも限界感度法でも、PID 制御系の伝達関数が $C(s)=K(s+a)^2/s$ となることに着目して、 K と a を極配置から求める[6] あるいは、目標値変化の応答のオーバーシュート量、制定時間を要求仕様として与え、これを満足するような K, a を求めるうえで、MATLAB による数値計算を活用する。 K と a の範囲を指定してその範囲内で K, a の組み合わせに対してシミュレーションを行ない仕様を満足する K, a の組み合わせを求める。
- 3) H 法による PID：PID の 3 種のパラメータで作る 3 次元空間（PI なら 2 次元空間）において、3 種のパラメータが H 法による仕様を満足する許容部分空間を求めることで、PID のロバスト性を保証する [12] [14]
- 4) 非線型ゲイン PID：制御対象の動特性が変化する場合、ループのゲインが一致す

るよう、比例ゲインを特性変化に応じて変化させる。

5) ファジィ, ニューロ、GA による PID のパラメータチューニング [16]

3. 外乱応答指定 PID

化学プラントや発電プラントなど大規模システムから冷熱機器等の中小システムまで、いわゆるプロセス制御においては、対象を 1 次遅れと無駄時間近似するモデリングの方法は最もポピュラーな方法である。本報告では、下式で表される 1 次遅れと無駄時間でモデル化される系に対し、外乱が印加された時の系の応答を希望する応答とするための PID 制御系のチューニング方法について述べるものである。

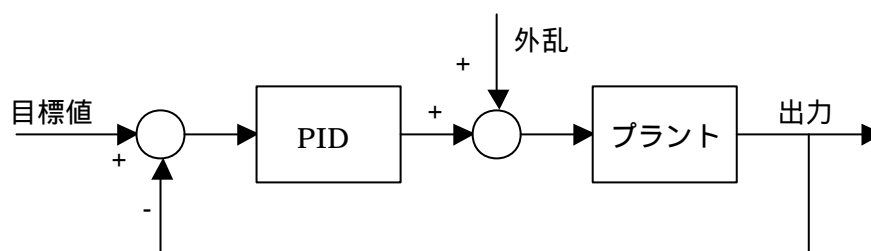
プラントの伝達関数 $G(s)$ は以下のように与えられる。

$$G(s) = \frac{K}{1 + Ts} e^{-Ls} \quad (1)$$

ここで、 K はプラントのゲイン、 T は時定数、 L は無駄時間である。

3.1 外乱応答指定 PID の考え方

1 次遅れ無駄時間系に対し PID 制御を施すと、下図のような系となる。



ここで、外乱とは閉ループの外からプラントに印加される予期せぬ力や信号を総称するもので、ここではプラントの入力側に印加されるものとして取り扱う。例えば GHP では、負荷であるコンプレッサの台数切り替えに伴う負荷トルクの変動が一つの外乱となる。

外乱 d から出力 y への伝達関数 $G_d(s)$ は、PID の伝達関数を $K(s)$ 、プラントの伝達関数を $G(s)$ とするとき、以下のように与えられる。

$$G_d(s) = \frac{G(s)}{1 + K(s)G(s)} \quad (2)$$

ロボットのようなサーボ制御では、目標値が絶えず変化し、これに出力を追従させることが主目的である。一方、プロセス制御においては、目標値を絶えず変化させることはなく、一定の出力を維持することに力点が置かれる。よって、プロセス制御においては、外乱抑制に関する制御仕様を決めてこれを満足する制御系を構成することになる。

制御系に課せられる課題は、外乱が印加された場合、これを速やかに抑制し、出力の変動を抑えることである。しかしながら、出力変動を0にすることは物理的に不可能であり、許容できる応答に抑えればよいということが制御仕様となる。よって、制御の課題は以下のようにまとめることができる。

【課題】「外乱から出力への伝達関数 $G_d(s)$ が希望する伝達関数 $G_m(s)$ となるように、PID 制御系のパラメータをチューニングする。」

3.2 外乱応答指定 PI 制御

課題を解く上で、先ず PID 制御器を比例と積分だけの PI 制御器とする。世の中では、PI 制御が多く適用されている。その理由は微分項 (D 項) は将来を予測した制御が可能となり制御性向上が期待できるが、ノイズなどの変動に弱く、PI だけで許容できる制御性が得られるなら、PI を採用する。比例項 (P 項) は制御の基本であり、また積分項 (I 項) は外乱があっても出力を目標値に一致させる機能があり、ともにプロセス制御では外すことはできない。

以下のように定式化できる。PI 制御器の伝達関数は以下のように与えられる。

$$K(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right) \quad (3)$$

(1),(3)を(2)に代入すれば、外乱応答伝達関数 $G_d(s)$ は以下のように与えられる。

$$G_d(s) = \frac{\frac{K}{1+Ts} e^{-Ls}}{1 + \frac{K}{1+Ts} e^{-Ls} K_C \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right)} \quad (4)$$

ここで、無駄時間 e^{-Ls} は非線形関数であるので、これを以下のように線形近似する。

$$e^{-Ls} \cong \frac{1}{1+Ls} \quad (5)$$

これにより、外乱応答伝達関数 $G_d(s)$ は以下のように近似できる。

$$G_d(s) = \frac{\frac{T_I}{K_C} s}{\frac{T_I T L}{K K_C} s^3 + \frac{T+L}{K K_C} T_I s^2 + \left(1 + \frac{1}{K K_C}\right) T_I s + 1} \quad (5)$$

これに対して、希望する外乱応答伝達関数 $G_m(s)$ を以下のように与える[]。希望の応答は、クリティカルダンピング2次標準系に無駄時間を加えた次の形で与える。

$$G_m(s) = \frac{ds}{(1+ts)^2(1+Ls)} \quad (6)$$

と は目標とする応答を決定するパラメータである。

ここで、 を L の関数として与え、無駄時間 L の値によらずステップ外乱に対して同じ

ピークを持つように t を調節する。すなわち、外乱応答伝達関数 $G_m(s)$ を次のように与える。

$$G_m(s) = \frac{d\{1 + (\frac{e}{2} - 1)\frac{L}{t}\}s}{(1 + ts)^2(1 + Ls)} \quad (7)$$

ここで $L=0$ の場合に、外乱として $D(s) = d/s$ のステップ入力に加わったとすると、出力 y は、

$$y(t) = L^{-1}\left\{\frac{dd}{(1 + ts)^2}\right\} = \frac{dd}{t^2} te^{-\frac{1}{t}t} \quad (8)$$

このピーク値 y_{peak} は (8) を微分して、 $t = t$ の時の y の値として以下のようになる。

$$y_{peak} = \frac{dd}{te} \quad (9)$$

ここで、

$$h = y_{peak} / d \quad (10)$$

とすれば、以下の関係が得られる。

$$d = hte \quad (11)$$

この h は外乱に対する出力の振幅比であり、この値が設計パラメータとなる。

問題はこれらより t, K_C, T_I を求めることである。ここでは部分モデルマッチングの考え方を導入する。(5) と (7) を比較し、分母の次数が低いほうから s の係数を一致させると、以下の関係式が得られる。

$$t^2 + 2tL = \frac{T + L}{KK_C} T_I \quad (12)$$

$$2t + L = (1 + \frac{1}{KK_C}) T_I \quad (13)$$

$$d\{1 + (\frac{e}{2} - 1)\frac{L}{t}\} = \frac{T_I}{K_C} \quad (14)$$

(12),(13),(14)をまず t について解くと下式となる。

$$t = \frac{-2Lb + eh + \sqrt{(2Lb - eh)^2 + 4abLeh}}{2b} \quad (15)$$

ここで、

$$a = \frac{e}{2} - 1 \quad (16)$$

$$b = \frac{K}{T + L} \quad (17)$$

である。さらに、(17)から得られる t を t_0 として、これを用いて、(12),(13)より

$$T_I = 2t_0 + L - g \frac{1}{K} \quad (14)$$

ここで、

$$g = (t^2 + 2tL) \frac{K}{T+L} \quad (15)$$

さらに、

$$K_C = \frac{T_I}{g} \quad (16)$$

として解が得られる。

3.3 外乱応答指定 PID 制御

次に、PID 制御器に対する外乱応答指定のパラメータチューニング方法を示す。PID と同様にして、外乱から出力への伝達関数が希望する伝達関数に一致し、しかもステップ外乱と出力のピークの比が指定した値になるよう、比例ゲイン、積分時間、微分時間及び希望応答の時定数を決定する。

PID 制御器の伝達関数 $K(s)$ は下式で与えられる。

$$K(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (17)$$

この時、外乱から出力までの伝達関数 $G_d(s)$ は次のようになる。

$$G_d(s) = \frac{\frac{T_I}{K_C} s}{\frac{T_I T L}{K K_C} s^3 + \frac{T_I (T + L + K K_C T_D)}{K K_C} s^2 + \frac{T_I (1 + K K_C)}{K K_C} + 1} \quad (18)$$

(18)が(7)と一致するためには、以下の等式が成り立つ必要がある。

$$\frac{T_I T L}{K K_C} = t^2 L \quad (19)$$

$$\frac{T_I (T + L + K K_C T_D)}{K K_C} = t^2 + 2tL \quad (20)$$

$$\frac{T_I (1 + K K_C)}{K K_C} = 2t + L \quad (21)$$

$$d \left\{ 1 + \left(\frac{e}{2} - 1 \right) \frac{L}{t} \right\} = \frac{T_I}{K_C} \quad (22)$$

これらの式を解くと、

$$t = \frac{eh + \sqrt{(eh)^2 + \frac{4KaeHL}{T}}}{2\frac{K}{T}} \quad (23)$$

$$T_I = 2t + L - \frac{t^2}{T} \quad (24)$$

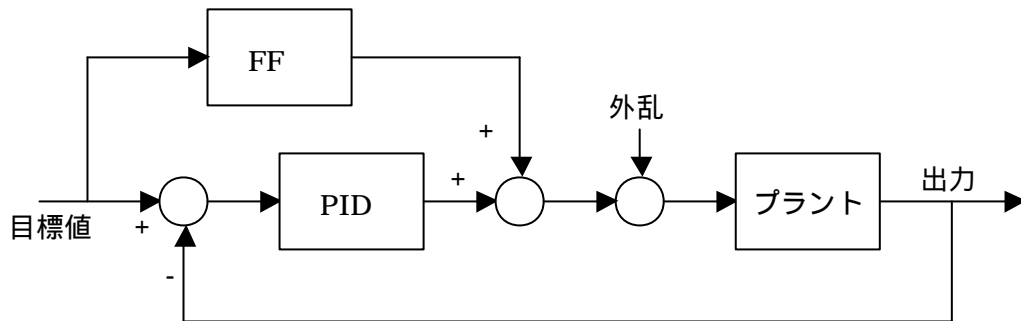
$$K_C = \frac{TT_I}{Kt^2} = \frac{T}{Kt^2} \left(2t + L - \frac{t^2}{T} \right) \quad (25)$$

$$T_D = \frac{t^2 + 2tL}{2t + L - \frac{t^2}{T}} - \frac{T + L}{KK_C} \quad (26)$$

が得られる。

3.4 外乱応答指定 2 自由度 PID 制御

次に、2 自由度制御系を構築する。一般にプロセス制御系では、外乱抑制と目標値追従の 2 つの機能が要求される。先ず外乱抑制に関して上記の方法により希望の応答を実現する PID フィードバック制御系を構成し、次に目標値追従性を希望の応答にするようフィードフォワード制御系を設計する。システムの構成は下図のようになる。



この図で、FF のブロックが、目標値追従特性を実現するためのフィードフォワード制御器である。FF の伝達関数を $C(s)$ とすると、目標値から出力への伝達関数 $G_r(s)$ は次のように与えられる。

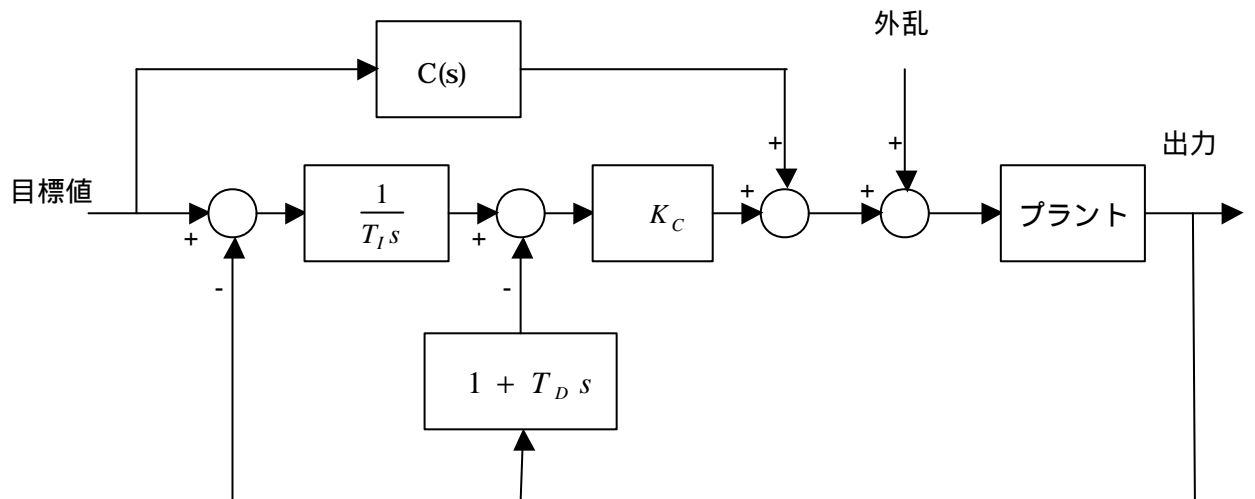
$$G_r(s) = \left(\frac{K(s)}{1 + K(s)G(s)} + C(s) \right) G(s) \quad (27)$$

これが、希望する伝達関数 $G_M(s)$ となるように $C(s)$ を求めると次式となる。

$$C(s) = \frac{G_M(s)}{G(s)} - \frac{1 + K(s)G(s)}{K(s)} \quad (28)$$

3.5 外乱応答指定2自由度IPD

ここでは、目標値追従と外乱抑制の機能を持ち、それぞれ希望の応答特性を実現する2自由度制御系の構造をとる。さらにセットポイントキック現象を防止するため、目標値と実測値との偏差は積分操作のみに入力し、比例と微分操作は実測値のみの入力とする。ブロック線図を描くと下図となる。



制御系設計は、まず外乱応答を希望する応答にするための K , T_I , T_D を設定し、その後、目標値応答を希望の応答になるよう、フィードフォワード補償回路 $C(s)$ を決定する。

外乱応答は、PIDの場合と同じとなるから、先に設定した K_C, T_I, T_D となる。フィードフォワード補償回路 $C(s)$ を以下のように決定する。

目標値 r から出力 y への伝達関数は以下のように与えられる。

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)\{C(s) + \frac{K_c}{T_I s}\}}{1 + G(s)K(s)} \quad (29)$$

ただし、 $G(s), K(s)$ はプラントと制御器の伝達関数であり、

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{1 + Ts} \quad (30)$$

$$K(s) = K_c(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s) \quad (31)$$

ここで、 $e^{-Ls} \cong \frac{1}{1 + Ls}$ と近似すると、プラントの伝達関数 $G(s)$ は次のようになる。

$$G(s) = \frac{K}{(1 + Ts)(1 + Ls)} \quad (32)$$

これより、目標値から出力までの伝達関数は次式で近似できる。

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\frac{K}{(1 + Ts)(1 + Ls)}\{C(s) + \frac{K_c}{T_I s}\}}{1 + \frac{K}{(1 + Ts)(1 + Ls)}K_c(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s)} \quad (33)$$

$$= \frac{KT_I s C(s) + KK_c}{T_I T L s^3 + (T + L + KK_c T_D) T_I s^2 + (1 + KK_c) T_I s + KK_c} \quad (34)$$

ここで、制御量 y が目標値 r のステップ変動に対してオフセットなしで追従するためには下式を満足する必要がある。

$$KT_I sC(s) + KK_C = KK_C$$

これより、目標値のステップ変化追従のためのフィードフォワード補償器 $C(s)$ は

$$C(s) = 0$$

となる。

また、制御量 y が目標値 r のランプ状変動に対してオフセットなしで追従するためには下式を満足する必要がある。

$$KT_I sC(s) + KK_C = (1 + KK_C)T_I s + KK_C$$

これより、目標値のランプ状変動に追従するためのフィードフォワード補償器 $C(s)$ は

$$C(s) = \frac{1 + KK_C}{K}$$

となる。

さらに、制御量 y が目標値 r の加速度状変動に対してオフセットなしで追従するためには下式を満足する必要がある。

$$KT_I sC(s) + KK_C = T_i(T + L + KK_C T_D)s^2 + (1 + KK_C)T_i s + KK_C$$

これより、目標値の加速度状変動に追従するためのフィードフォワード補償器 $C(s)$ は

$$C(s) = \frac{1}{K} \{(T + L + KK_C T_D)s + (1 + KK_C)\}$$

となる。

4. ガスヒートポンプへの適用

GHP 制御では、制御系に PID 制御を適用することが望ましい。その理由は以下の通りである。

- (ア) 既に開発された GHP に PID 制御が採用されている。PID で特に不都合は無く、しかるべき制御が得られる可能性が高い。また制御装置のソフトウェアを変更する必要が無い。
- (イ) システム及び機器の仕様変更にも柔軟に対応できる。システムの動特性の変化を制御系の構造を変更することなく、パラメータの変更だけで対応できる。
- (ウ) 現場調節が容易である。制御性の低下、トラブル発生時の対応が容易である。

4.1 ガスヒートポンプの動特性モデル

GHP の動特性モデルはエンジンにおける燃焼、エンジンの回転に関する基礎式に基づいてモデリングすることが基本であるが、ここでは、時間とコストを勘案し、制御系を構築することのみを目的として、入出力の関係から、即ち内部のモデル化は行わず、対象をブラックボックスとして捉え、その伝達関数を同定することにより求めることとする。

GHP のモデルは、無駄時間を含む 1 次遅れ系として下記の伝達特性で近似できる。

$$P(s) = \frac{K}{1+Ts} e^{-Ls} \quad (35)$$

4.2 ガスヒートポンプ制御系設計

3章で述べた外乱応答指定2自由度IPD制御を4.1で示したガスヒートポンプの動特性モデルに適用して、制御系を設計する。

表4.1には、を変えたときのIPDのパラメータの設定値を示す。また、表4.2には、目標値入力を変えたときのフィードフォワード補償器の伝達関数を示す。

=5.25とした時の外乱応答(8.1step外乱)と目標値応答(50rpm)を図4.1と図4.2に示す。これより良好な制御が行われていることが分かる。

表 4.1 IPD 制御系パラメータ設定値

	K _c	T _i	T _D
	(step/rpm)	(sec)	(sec)
0.2	4.34	0.257	0.0575
0.5	1.61	0.349	0.0854
1	0.748	0.476	0.103

表 4.2 フィードフォワード補償器

目標値入力パターン	C(s)
ステップ	0
ランプ	1.72
加速度	0.197s+1.72

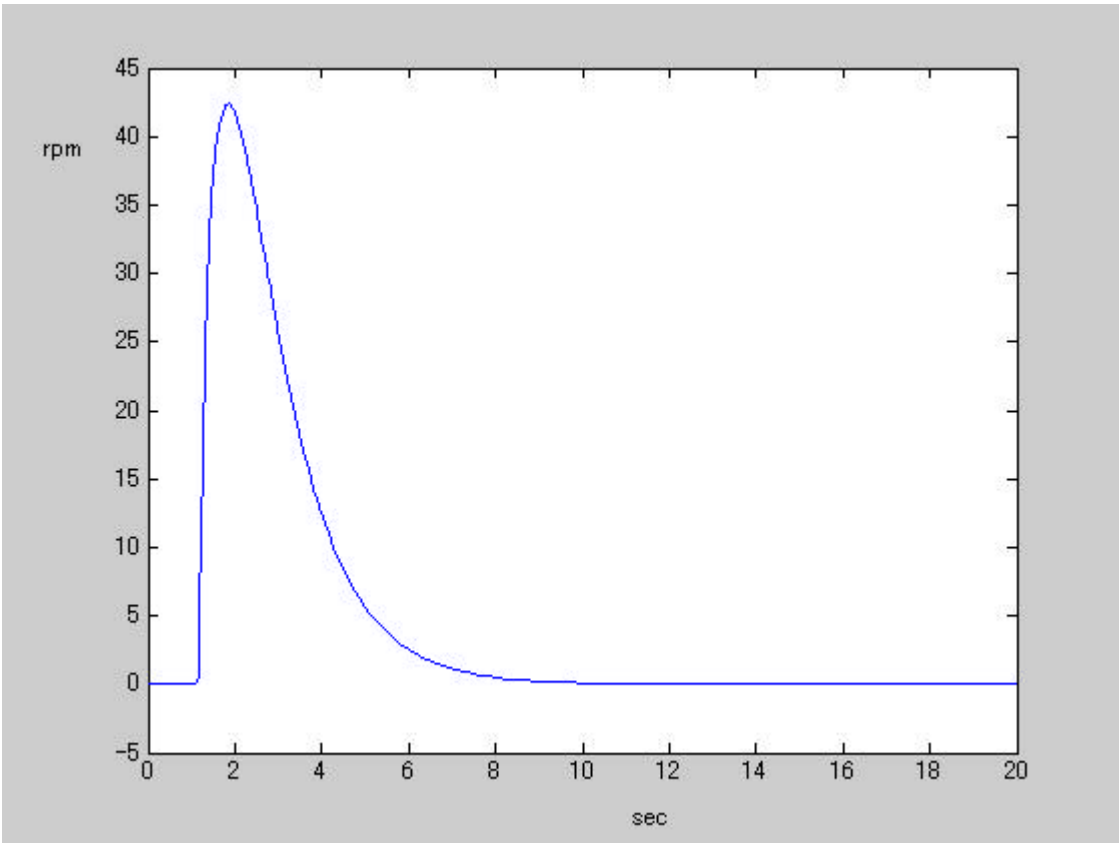


图 4.1 外乱应答 (外乱 8.1step)

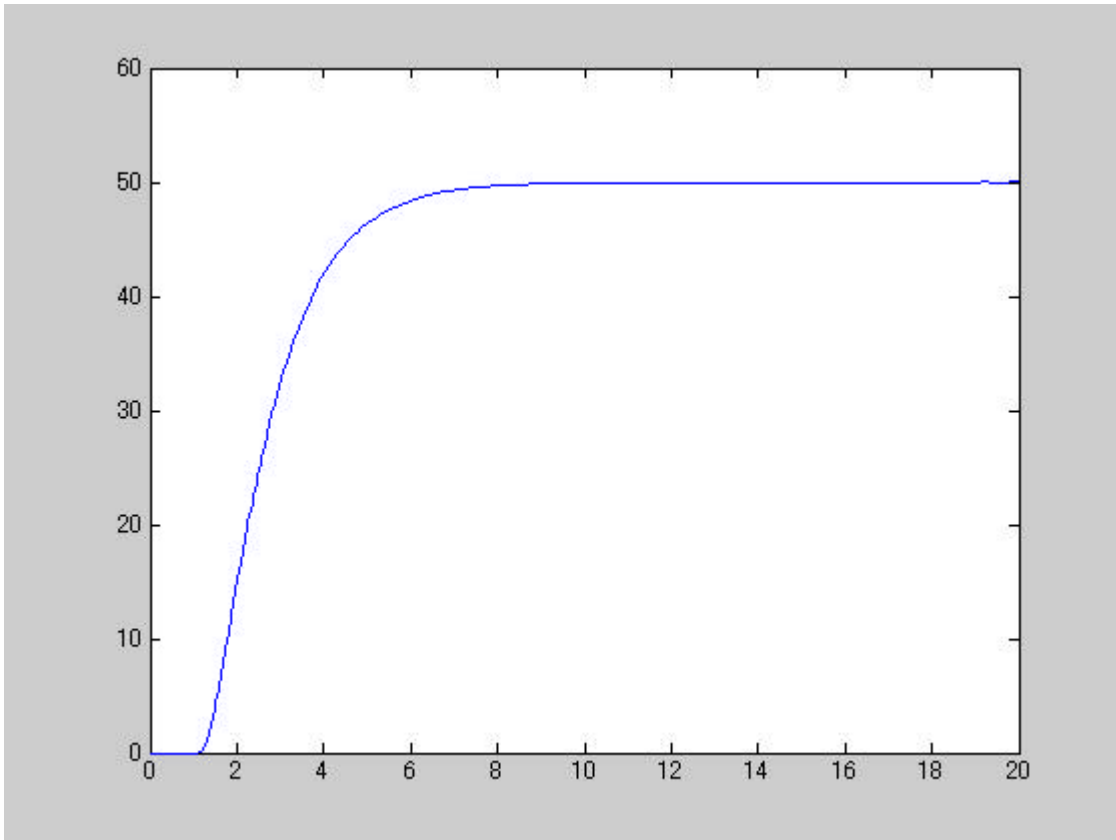


図 4.2 目標値応答 (目標値 50rpm ステップ上昇)

5. 結言

本文では、PID 制御系的一种である IPD 制御系に対し、外乱応答を希望の応答にし、さらに目標値追従機能を持たせた 2 自由度制御系とすることにより、優れた制御性能を有するとともに、現場対応が容易な制御系を実現する手法を示し、ガスヒートポンプへの適用を図り、その有効性を示した。

謝辞

この研究は、南山大学パツヘ研究奨励金 (Pache Research Study) -A の助成を受けて行った。

参考文献

- [1] 須田信英ほか：PID 制御、朝倉書店、1992
- [2] 橋本伊織ほか：プロセス制御工学、朝倉書店、2002
- [3] 片山徹：フィードバック制御の基礎、朝倉書店、1987
- [4] 山本重彦ほか：PID の基礎と応用、朝倉書店、1997
- [5] 大松ほか：セルフチューニングコントロール、コロナ社、1996

- [6] K.Ogata, "Modern Control Engineering, Forth Edition", Prentice Hall, 2002
- [7] K.J. strom, T.Hagglund "PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, 2nd Edition", Instrument Society of America
- [8] 原川哲美他：PID 制御を用いた高性能圧延機駆動技術の開発、計測自動制御学会論文集、Vol.34, No.7, 666/667, 1998
- [9] 松井義弘ほか：PID 制御器を用いた三慣性ベンチマーク問題の解法、計測自動制御学会論文集、Vol.35, No.2, 238/243, 1999
- [10] 小河守正ほか：操作量制約を考慮した I-PD コントローラのロバスト調整方法、計測自動制御学会論文集、Vol.34, No.7, 674/681, 1998
- [11] 西野都ほか：スミス補償型ロバスト PI 制御を用いた圧延プロセスの板厚制御、システム制御情報学会論文誌、Vol.15, No.11, 577/585, 2002
- [12] 佐伯正美ほか：ロバスト感度最小化に対する PID 制御器のパラメータ空間設計、計測自動制御学会論文集、Vol.32, No.12, 1612/1619, 1996
- [13] 古谷栄光ほか：開ループ周波数応答のオンライン同定と 2 自由度 PID 制御系の自動調整法、システム制御情報学会論文誌、Vol.11, No.1, 41/49, 1998
- [14] 佐伯正美ほか：H 制御問題に対する PID 制御器のパラメータ空間設計法、システム制御情報学会論文誌、Vol.11, No.1, 35/40, 1998
- [15] 河辺徹ほか：行列不等式表現を用いた 2 自由度ロバスト PID コントローラの設計、システム制御情報学会論文誌、Vol.11, No.1, 19/25, 1998
- [16] 山本透ほか：遺伝的アルゴリズムを用いた PID 制御器の一設計、計測自動制御学会論文集、Vol.35, No.4, 531/537, 1999
- [17] 佐藤和也ほか：適応的なパラメータ調整機構をもつ PI 制御法、計測自動制御学会論文集、Vol.34, No.11, 1632/1638, 1998
- [18] 太田有三ほか：複数のロバスト仕様をみたす PID 制御器の設計、システム制御情報学会論文誌、Vol.11, No.1, 26/34, 1998
- [19] 宮元慎一：H ループシェーピング法と LMI 最適化に基づいた PID 制御器の設計、計測自動制御学会論文集、Vol.34, No.7, 653/659, 1998
- [20] 山本透：PID 制御系設計の高度化と知能化、システム / 制御 / 情報、Vol.44, No.9, 483/491, 2000
- [21] 北森俊行：PID 制御システムの設計論、計測と制御、Vol.19, No.4, 382/391, 1980
- [22] 山本透ほか：ニューラルネットワークを併用したセルフチューニング PID 制御系の一設計、計測自動制御学会論文集、Vol.34, No.7, 682/688, 1998
- [23] 青山武郎ほか：倒立振子のモデル化と安定化のためのニューロ PD 制御、システム制御情報学会論文誌、Vol.11, No.1, 10/18, 1998
- [24] 須田信英：PID 制御則について、システム / 制御 / 情報、Vol.42, No.1, 2/6, 1998
- [26] 北森俊行：I-PD 制御方式の原理と設計法、システム / 制御 / 情報、

Vol.42,No.1,7/17,1998

[27] 荒木光彦ほか：2自由度PID制御装置、システム／制御／情報、Vol.42,No.1,18/25,1998

[28] 佐伯正美：H_∞制御問題のPID制御系設計法、システム／制御／情報、Vol.42,No.1,26/34,1998

[29] 重政隆：セルフチューニングPID制御の動向、システム／制御／情報、Vol.42,No.1,35/40,1998

[30] むだ時間を含む1次遅れ系に対するPID制御器の部分モデルマッチング法に基づいた設計法、システム制御情報学会論文誌、Vol.13,No.1,46/52,2000

[31] 田口秀文ほか：外乱入力点を考慮した2自由度PID調節計の調整法について、計測自動制御学会論文集、Vol.38,No.5,441/446,2002

[32] 衣川了ほか：化学プロセス制御における外乱応答指定によるPI制御調整法、システム制御情報学会論文誌、Vol.14,No.12,561/573,2001

[34] 中村政俊ほか：非線形スタティクス補償型PID制御：化学重合反応プロセスの制御、計測自動制御学会論文集、Vol.35,No.3,363/369,1999

[35] 熊本博光ほか：1次および2次遅れ系のPID自動調整則、計測自動制御学会論文集、Vol.33,No.5,344/351,1997

[36] 荒木光彦ほか：PID制御の歴史、計測と制御、Vo.36,No.9,643/647,1997

[37] 富田芳生：PID調節計のハードウェア、計測と制御、Vo.36,No.11,800/807,1997

[38] 曾禰寛純：DCSによるアドバンス制御、計測と制御、Vo.37,No.2,129/138,1998

[39] 北森俊行ほか：PID制御方式の原理・実用化と設計法、計測と制御、Vo.37,No.3,201/208,1998

[40] 藤原敏勝ほか：PID制御のエンジニアリング、計測と制御、Vo.37,No.5,362/368,1998

[41] 重政隆：セルフチューニングPID制御方式：動向と事例、計測と制御、Vo.37,No.6,423/431,1998

[42] 佐伯正美：現代制御理論とPID制御のかかわり合い、計測と制御、Vo.37,No.8,578/585,1998

[43] 笠原雅人ほか：特性変動をともなう空調システムへのPID制御の適用：計測自動制御学会論文集、Vol.36,No.5,431/437,2000

[44] 藤井憲三ほか：常圧蒸留装置のワンスポットチューニングPID制御、計測自動制御学会論文集、Vol.38,No.3,270/276,2002

[45] 志水清孝ほか：擬似極配置法によるPIDコントローラ調整法、計測自動制御学会論文集、Vol.38,No.8,686/693,2002

[46] 佐伯正美：2ディスク型混合感度問題の最適PID制御器の設計法、システム制御情報学会論文誌、Vol.7,No.12,520/527,1994

[47] 岡村義英ほか：2自由度制御理論を用いた押し出し機の世界速度制御、計測自動制御学会論文集、Vol.35,No.7,686/693,1999