

ゼロから学ぶPID制御（アドバンストPIDと応用コース）

第4回 むだ時間補償制御（その1）： スミスむだ時間補償制御

1. フィードバック制御とむだ時間

第4.1図(a)に示す通常のフィードバック制御系において、制御対象特性が1次遅れのみ（むだ時間 $L_p = 0$ ）の時には、制御は非常に容易である。しかし、制御対象特性をむだ時間 L と1次遅れ（時定数 T ）で表現すると L/T 比が大きくなればなるほど、制御は難しくなっていく。

これはフィードバック制御の基本が操作した出力の妥当性を、その操作出力に対する応答結果の制御偏差を用いて判断し、さらに次の操作出力を決定することにあるからだ。そのため、むだ時間が大きい制御対象に対して連続的にPID制御を行うと、操作出力の結果を確認できないうちに、次々に操作出力を更新することになり、フィードバック制御の基本から離反していくことになる。この結果、制御対象の L/T が大きくなればなるほど、オーバーシュート量が大きくなり、制御性が劣化していつてしまう。

2. スミス法の基本的考え方

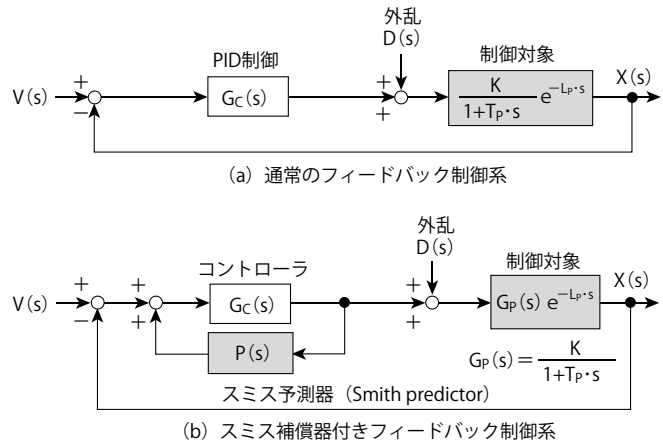
制御対象の L/T が大きい場合に、制御対象モデルを用いて見かけ上の制御対象の特性を変えて、むだ時間を制御ループの外側に出して、1次遅れ系として制御しようとする考え方で、提唱者O.J.M.Smithの名前をとってスミス法とも呼ばれている。

3. スミス法の基本構成

第4.1図(a)に通常のフィードバック制御系の構成を示し、第4.1図(b)にスミス法のフィードバック制御系の基本構成を示す。スミス法ではコントローラ $G_C(s)$ に対して、 $P(s)$ を介して正帰還（positive feedback）する機能を付加した構成となっている。 $P(s)$ をスミス予測器（Smith predictor）と呼んでいる。

4. スミス予測器の選定

結局、スミスむだ時間補償制御では第4.1図(b)の構成として、スミス予測器 $P(s)$ をどのように選定したら、むだ時間を制御ループの外側に追い出すことができるかがポイントになる。ここで、第4.1図(a)の応



第4.1図 通常のフィードバック制御系とスミスむだ時間補償制御系の比較

答式を求めると、(4.1)式となる。

$$X(s) = \frac{G_C(s)G_p(s)e^{-L_p s}}{1 + G_C(s)G_p(s)e^{-L_p s}} V(s) + \frac{G_p(s)e^{-L_p s}}{1 + G_C(s)G_p(s)e^{-L_p s}} D(s) \quad \dots(4.1)$$

この通常のフィードバック制御系の特性方程式は(4.1)式から、(4.2)式となる。

$$1 + G_C(s)G_p(s)e^{-L_p s} = 0 \quad \dots(4.2)$$

このように特性方程式にむだ時間が含まれていると、制御性能が劣化するばかりでなく、制御性の設計も難しくなる。そこで、この特性方程式からむだ時間を除去することを考えなければならない。この方法を考え出したのが、O.J.M.Smithであった。次に第4.1図(b)の応答式を求めると、(4.3)式となる。

$$X(s) = \frac{G_C(s)G_p(s)e^{-L_p s}}{1 + G_C(s)\{G_p(s)e^{-L_p s} - P(s)\}} V(s) + \frac{\{1 - G_C(s)P(s)\}G_p(s)e^{-L_p s}}{1 + G_C(s)\{G_p(s)e^{-L_p s} - P(s)\}} D(s) \quad \dots(4.3)$$

(4.3) 式の分母において、(4.4) 式に示す関係を持たせると、具体的なスミス予測器 $P(s)$ は (4.5) 式となり、(4.3) 式の特徴方程式は (4.6) 式となって、特性方程式からむだ時間を除去でき、制御性能も改善できる。これをスミス補償 (Smith compensation) という。

$$\{G_P(s)e^{-L_P s} - P(s)\} = G_P(s) \quad \dots(4.4)$$

$$P(s) = G_P(s) \{e^{-L_P s} - 1\} \quad \dots(4.5)$$

$$1 + G_C(s)G_P(s) = 0 \quad \dots(4.6)$$

(4.4) 式の関係をも (4.3) 式に代入すると、スミスむだ時間補償制御系の応答式 $X(s)$ は (4.7) 式となる。

$$X(s) = \frac{G_C(s)G_P(s)}{1 + G_C(s)G_P(s)} V(s)e^{-L_P s} + \frac{\{1 - G_C(s)P(s)\}G_P(s)e^{-L_P s}}{1 + G_C(s)G_P(s)} D(s) \quad \dots(4.7)$$

この (4.7) 式から目標値変化のみに対する等価制御系の構成を第 4.2 図に示す。むだ時間を制御系の外に追い出し、むだ時間を除いた 1 次遅れの制御対象 $G_P(s)$ をコントローラ $G_C(s)$ でフィードバック制御しているのと等価となっている。この結果、良好な制御性が期待でき、それを実現するコントローラ $G_C(s)$ の設計も簡単になっている。

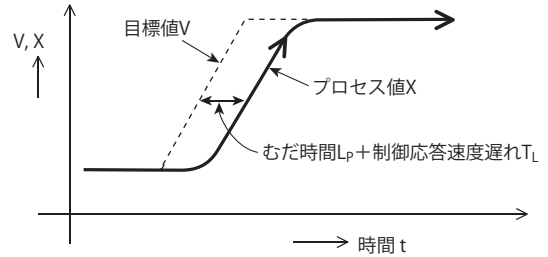


第 4.2 図 スミスむだ時間補償制御系を等価変換した系 (目標値変化に対してのみ)

5. スミス法の特徴

この (4.7) 式から、次のようなスミス法についての特徴が読み取れる。

- ① 目標値変化に対しては、むだ時間を制御ループの外側に追い出すことができ、見かけ上 1 次遅れの制御対象 $G_P(s)$ を制御すれば良いことになる。
- ② フィードバック制御系の特性方程式からむだ時間を除去して、コントローラの設計や制御系の安定判別が簡単になっている。
- ③ (4.7) 式からわかるように、外乱に対する制御は目標値に対する関係のようなスッキリした関係は成立せず、複雑なまま放置されている。



第 4.3 図 目標値のランプ変化に対する制御応答

6. 制御応答例

第 4.3 図に目標値をランプ状に変化させた場合の制御応答例を示す。プロセス値 X は目標値 V から (むだ時間 L_P + 制御応答速度遅れ T_L) だけ遅れた応答となっている。デジタル制御の場合には、制御周期を Δt とすると、この応答遅れの大きさは $(L_P + T_L) \sim (L_P + T_L + \Delta t)$ の間にある。

7. おわりに

以上述べたスミスむだ時間補償制御はむだ時間が大きく、外乱や制御対象特性変化の小さい系、たとえば、槽や釜などの温度プログラム制御などにすぐれた効果を発揮する。外乱や制御対象特性変化が大きい場合には、その影響をシミュレーションで確認してから、適用することを推奨する。

原料移送コンベアの手速、鋼板の通板速度や原料流量の多少によって、移送に伴うむだ時間が変化する場合には、移送時間からむだ時間を計算し制御対象モデルのむだ時間を自動的に変更する「スミス可変むだ時間補償制御」にしなければならない。

<参考文献>

- (1) 広井：『デジタル計装制御システムの基礎と応用』、工業技術社 (1992)
- (2) 広井：「プロセス制御を解剖する：第 32 回 スミスむだ時間補償制御」計装, Vol.44, No.2 (2001.2)