

## むだ時間を含む遠隔制御に関する研究

### Study on Telecontrol with Time Delay.

○吉澤慶則\*, 渡部慶二\*, 村松鋭一\*, 有我祐一\*, 遠藤茂\*\*

○ Yoshinori Yoshizawa\*, Keiji Watanabe\*, Eichi Muramatsu\*, Yuichi Ariga\*, Shigeru Endo\*\*

\*山形大学大学院理工学研究科, \*\*山形大学工学部

\*Yamagata University \*\*Yamagata University

キーワード: スミス法 (Smith Method), むだ時間 (Time Delay), 遠隔操作 (Teleoperation),  
内部モデル制御 (Internal Model Control)

連絡先: 〒992-0037 米沢市城南 4-3-16 山形大学 工学部 応用生命システム工学科 渡部研究室  
吉澤慶則, E-mail: hanger1220@msn.com

#### 1. はじめに

近年、災害現場でのレスキューロボットや医療現場での外科手術ロボットなどで遠隔操作システムが注目されている。しかし遠隔操作システムは通信時間の遅れなどのむだ時間が生じる可能性がある。このむだ時間がフィードバックループ内にあると制御入力の効果がすぐ出力に現れないため制御入力の修正に必要な情報が十分得られず、また、過去の操作の結果が繰り返して影響する場合は過去の制御入力の効果を正確に評価できず、目標入力への追従特性、外乱除去特性の劣化や、安定性が損なわれてしまう。このような入力にむだ時間がある場合の制御法の一つにスミス法がある。スミス法は、むだ時間制御に関する諸特性が内蔵されており、むだ時間系の基本的な制御である。

本稿ではスミス法を用いてむだ時間を含む遠隔操作システムを構築し、また追従動作の実現や外乱についての補償を行う。

#### 2. スミス法と内部モデル制御

##### 2.1. スミス法

入力あるいは出力にむだ時間をもつ漸近安定

なシステム  $G(s)e^{-sL}$  に対し、Fig.1 のような制御を行うのがスミス法である。 $Gc(s)$  は安定化補償器であり、その周りの局所フィードバック要素  $G(s) - G(s)e^{-sL}$  はむだ時間補償要素である。Fig.1 の系はブロック線図の等価変換で Fig.2 の系となる。実際には Fig.1 ではなく Fig.2 の系を構成する。

Fig.2 の系の目標入力  $r$  から制御出力  $y$  までの伝達関数は

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{Gc(s)G(s)}{1 + Gc(s)G(s)} e^{-sL} \quad (1)$$

である。特性方程式

$$1 + Gc(s)G(s) = 0 \quad (2)$$

にはむだ時間  $e^{-sL}$  が含まれないので、むだ時間のない  $G(s)$  に対する設計法がそのまま適用できる<sup>1)</sup>。

この式(2) から等価制御系の構成を Fig.3 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  $G(s)$  をコントローラ  $Gc(s)$  でフィードバック制御しているものと等価となっている。

次に例を挙げてスミス法を説明する。Fig.4の場合とFig.2の場合を考える。どちらの場合も  $G_c = 1$ ,  $L = 1$ ,  $d = 0$  とし、また  $G(s)$  は

$$G(s) = \frac{120}{s^2 + 160s} \quad (3)$$

とする。Fig.2の場合ステップ応答（点線）とFig.4の場合のステップ応答（破線）とむだ時間をもたない場合（ $L = 0$ ）のステップ応答（実線）をFig.5に示す。Fig.5より、スミス法はむだ時間を考慮した制御をしていることがわかる。

## 2.2 内部モデル制御 (Internal Model Control, IMC)

内部モデルの出力を積極的に利用する制御方法を内部モデル制御という。内部モデルが制御対象と一致すれば、両者の出力を相殺させて所望の伝達特性を持たせてしまおう、というのが基本的な発想である。IMC制御の構造は Fig.6 のようなブロック線図で表される。

IMC制御とスミス法はどちらも出力をモデルで予測し、その予測値をフィードバックに用いている。Fig.2 のスミス法は Fig.7 と等価変換できる。Fig.7 はIMC制御と同じように内部にモデルを持ち、IMC構造になっていることがわかる<sup>2)</sup>。

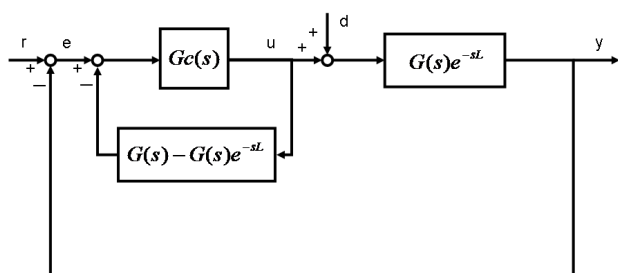


Fig.1 Smith Method

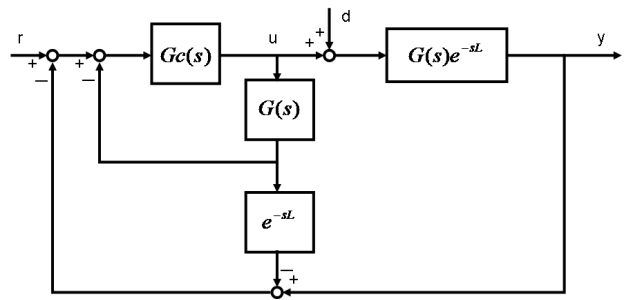


Fig.2 Actual System of Smith Method

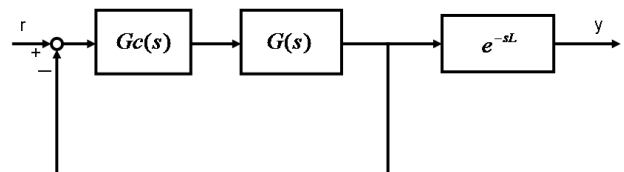


Fig.3 Equivalent Transformed System

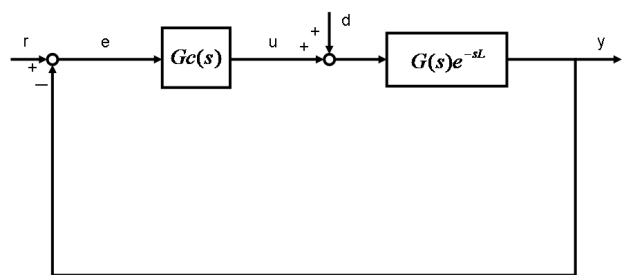


Fig.4 System with Time Delay

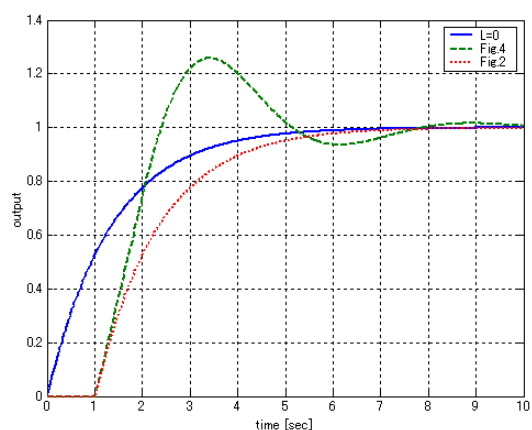


Fig.5 Step Response

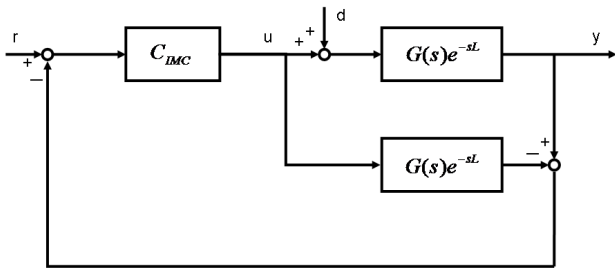


Fig.6 Internal Model Control

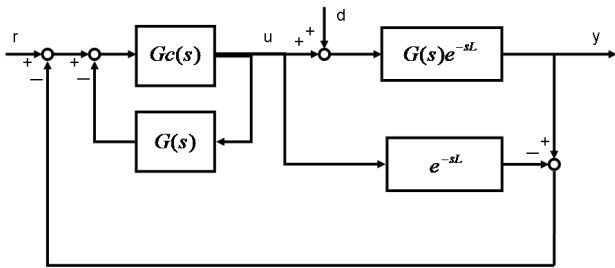


Fig.7 Smith Method of Internal Model Type

### 3. 外乱補償

#### 3.1. 外乱補償器

スミス法は目標入力に対してよい応答を与えることができるが、応答式  $y(s)$  が

$$y(s) = \frac{Gc(s)G(s)}{1 + Gc(s)G(s)} r(s)e^{-sL} + \frac{[1 - Gc(s)\{G(s) - G(s)e^{-sL}\}]}{1 + Gc(s)\{G(s) - G(s)e^{-sL}\}} G(s)e^{-sL} d(s) \quad (4)$$

となり、 $G(s)$  が制御されない場合、外乱に対する過渡応答は必ずしもよくない。特に、制御対象が虚軸の近くに極をもっていると外乱の影響が長時間出力に残る。そこで入出力伝達特性を変えずに、外乱に対する過渡特性を改善するために、Fig.8 の系を考える。この  $M(s)$  は外乱に対する過渡特性を改善するための補償器である。目標入力  $r$  から出力  $y$  までの伝達関数は

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{Gc(s)G(s)e^{-sL}}{1 + Gc(s)G(s)} \quad (5)$$

であり、外乱補償器  $M(s)$  の影響を受けない。一方、外乱  $d$  から出力  $y$  までの伝達関数は

$$\frac{y(s)}{d(s)} = \frac{G(s)e^{-sL}}{1 + Gc(s)G(s)} + \frac{Gc(s)G(s)e^{-sL}}{1 + Gc(s)G(s)} \{G(s) - M(s)G(s)e^{-sL}\} \quad (6)$$

となる。 $\{G(s) - G(s)e^{-sL}\}$  の部分に外乱補償器  $M(s)$  が入り

$$\{G(s) - M(s)G(s)e^{-sL}\} = \{1 - M(s)e^{-sL}\}G(s) \quad (7)$$

となる。これより過渡応答を任意に調整することができる。

#### 3.2. 外乱補償器の設計

制御対象  $G(s)$  が

$$G(s) = \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{s + a_i} \quad (8)$$

で与えられたとする。ただし、 $a_i$  は相異なる正の実数で、 $b_i \neq 0$  である。外乱補償器を

$$M(s) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i}{s + \alpha_i} \quad (9)$$

とおく。 $\alpha_i$  を、 $a_j (j=1, \dots, n)$  以外の任意の正の実数に選び、 $\beta_i (i=1, \dots, n)$

$$\beta_0 + \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i}{\alpha_i - a_j} = e^{-a_j L} (j=1, \dots, n) \quad (10)$$

$$\beta_0 + \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i}{\alpha_i} = 1 \quad (11)$$

を満たすように決める。式(10),(11) をまとめると

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{\alpha_1 - a_1} & \dots & \frac{1}{\alpha_n - a_1} \\ 1 & \frac{1}{\alpha_1 - a_n} & \dots & \frac{1}{\alpha_n - a_n} \\ 1 & \frac{1}{\alpha_1} & \dots & \frac{1}{\alpha_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-a_1 L} \\ e^{-a_n L} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

が得られる。式(12) を満たす  $\beta_i$  を求め外乱補償器  $M(s)$  を構成する。

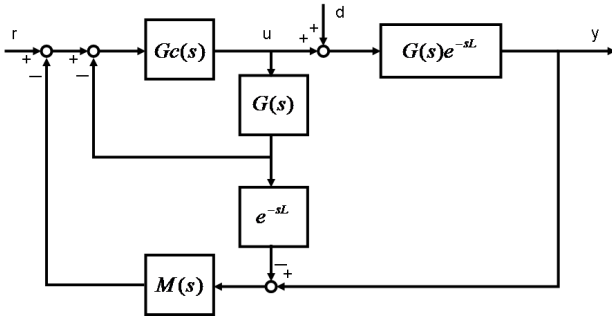


Fig.8 Disturbance Compensation Type Smith Method

#### 4. 遠隔操作システム

制御対象の全体の構成を Fig.9 に示す。本システムは、操作者が操作を行う台車(マスター)、遠隔操作される台車(スレーブ)、制御用パソコンで構成されており、操作者がマスターを操作することで、スレーブが追従動作するシステムとなっている。

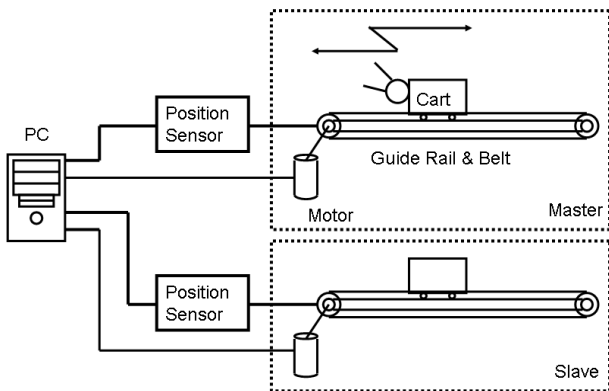


Fig.9 Teleoperation System

#### 5. 制御系

本システムのブロック線図を Fig.10 に示す。この中で制御系は PID 制御器と外乱補償器との2つの要素によって構成されており、 $G_m(s)$  はマスターの制御対象、 $G_s(s)$  はスレーブの制御対象、 $M(s)$  は外乱補償器を表す。なお PID 制御器は Fig.11 のように構成した<sup>3)</sup>。

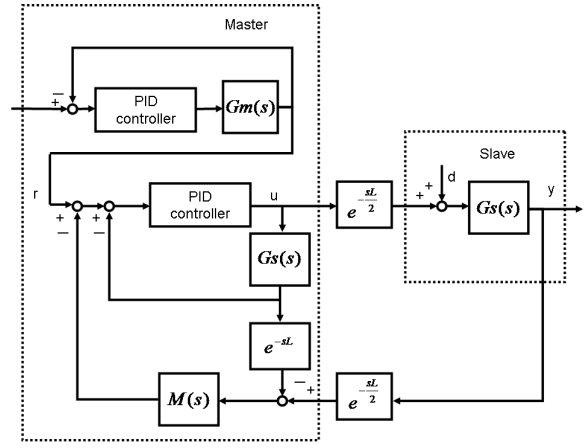


Fig.10 Block Diagram

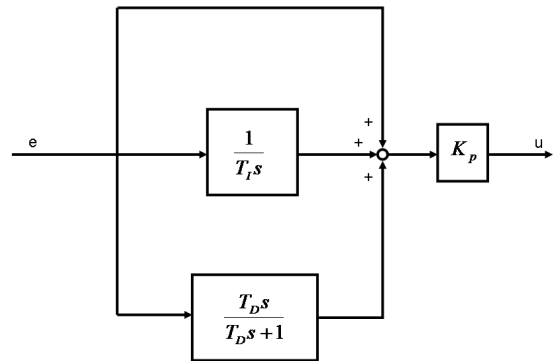


Fig.11 PID Controller

#### 6. シミュレーション

マスター、スレーブの伝達関数は次のように表されるとする。

$$G_m(s) = \frac{120}{s^2 + 160s} \quad (13)$$

$$G_s(s) = \frac{120}{s^2 + 160s} \quad (14)$$

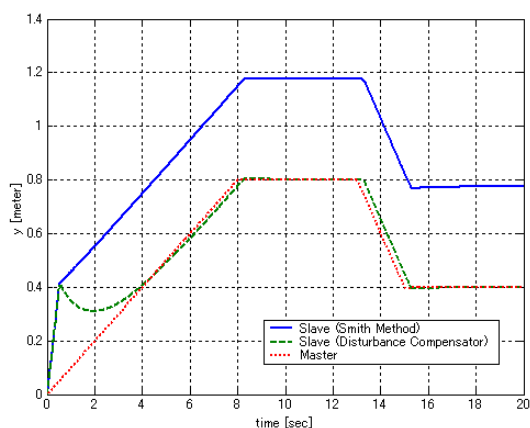
制御系設計として PID 制御器は  $K_p = 34$ ,  $T_I = 0.5$ ,  $T_D = 2$  とし、外乱補償器は

$$M(s) = 1.35 - \frac{0.245}{s + 0.7} \quad (15)$$

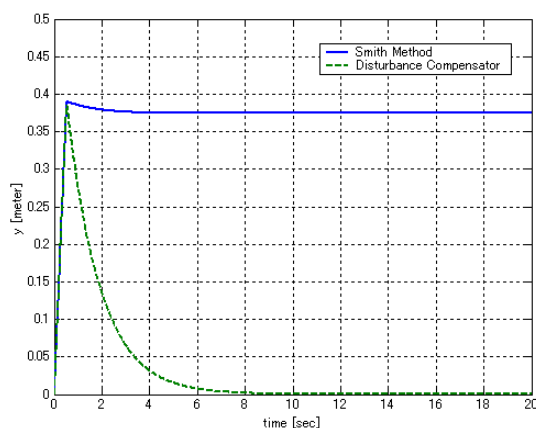
とする。また、外乱はステップ外乱とし、時間遅れは  $L = 0.5$  [sec] (マスターからスレーブへ

の送信は 0.25 [sec] )としてシミュレーションを行った。Fig.12(a) にはマスターの時間応答(点線)、スミス法のみでのスレーブの時間応答(実線)、外乱補償器を設計した場合のスレーブの時間応答(破線)を示す。そして Fig.12(b) にはスミス法のみでのスレーブの外乱応答(実線)と、外乱補償器を設計した場合のスレーブの外乱応答(破線)をそれぞれ示す。

これより、スミス法のみでは長時間外乱の影響がみられるが、外乱補償器を用いることで外乱の影響を抑えることができている。また、スレーブがマスターの追従動作をしていることが分かる。



(a) Time Response



(b) Response to Disturbance (Slave)

Fig.12 Simulation Result

## 7. おわりに

本稿では、スミス法を用いて遠隔操作システムの制御に適用した。また外乱補償器を設計しシミュレーションで検証した結果、外乱を抑えこむことができた。

しかし  $G(s)$  が不安定な場合、不安定な不可制御成分があり、どのような小さな外乱があっても出力は発散してしまう。そのためスミス法では制御対象を漸近安定なものに限定しているので注意が必要である。

今後は制御対象とそのモデルのパラメータやむだ時間の mismatch が存在する場合のロバスト安定化制御、また実験装置を完成させ実証実験を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 渡部慶二: むだ時間システムの制御, コロナ社, (1993)
- 2) 阿部直人, 児島晃: むだ時間・分布定数系の制御, コロナ社, (2007)
- 3) 須田信英: PID 制御, 朝倉書店, (1997)