

# 精密位置決め・送り系制御の紹介

## Introduction to precise positioning and feeding system control



FL08-14-2  
Hiroshi Morioka



## 紹介

本発表で紹介する内容



「精密位置決め・送り系設計のための制御工学」  
松原 厚 [著]

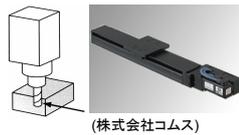
森北出版株式会社  
2008/ 9/ 1 発行



## 紹介

### 位置決め制御

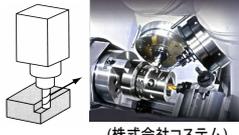
- ある目標点に物体を移動し停止する運動
- 位置決め時間と位置決め精度が問題になる



(株式会社コムス)

### 送り制御

- 物体を指令経路に沿って移動させる運動
- 指令経路と運動軌跡の差が問題になる



(株式会社コステム)

### 精密な位置決め、送り制御を行うのは容易ではない

- ナノスケールの目標値
- 制御対象のもつ固有振動モード
- さまざまな種類の外乱

...

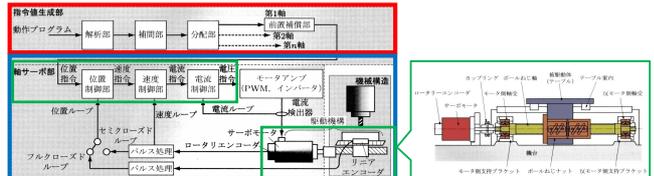
本発表では、「ボールねじ駆動機構」による位置決め、送り制御を扱う

3



## 紹介 (ボールねじ駆動機構)

### ■制御系の構成



#### □指令値生成部

- 動作プログラムから、軸サーボへの指令値を生成
- 軸サーボ部の前置処理や位置補正など、複雑な処理を行う

#### □軸サーボ部

- 位置指令を入力としてモータの動作制御を行う
- 位置制御、速度制御、電流制御の3重のループをカスケード接続している

#### □今回扱う範囲

- ボールねじ駆動機構のモデル化
- 軸サーボ部の電流、速度、位置制御部

4



## アウトライン

### ■ボールねじ駆動機構のモデル化

- ボールねじ駆動機構のパラメータ
- 1~4慣性モデル化
- 各モデルの周波数応答
- 極零位置と周波数応答の変化

### ■軸サーボ系

### ■電流制御系

### ■速度制御系

### ■位置制御系

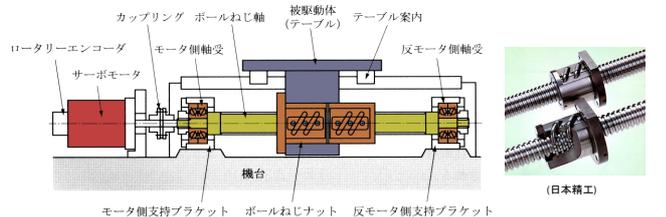
### ■フィードフォワード制御

### ■まとめ

5



## ボールねじ駆動機構



### ボールねじ

- 回転運動を直線運動に変換する
- ねじ軸とナット間でボールが転がり運動をするため、回転トルクから直動力へ高い効率で変換できる(95%前後)

- 回転運動から直線運動への変換式

$$x_n = R\theta_b (R = l_p/2\pi)$$

$$F_n = \eta T_n / R$$

$x_n$  : 直線移動量  
 $l_p$  : リード(1回転あたり移動量)  
 $\theta_b$  : 回転角度  
 $F_n$  : 直動力  
 $\eta$  : 効率(=1)  
 $T_n$  : 回転トルク

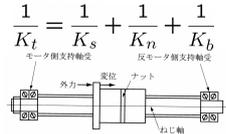
6

## ボールねじ駆動機構のパラメータ

Tokyo Institute of Technology

### 軸方向剛性

ボールねじ駆動機構の軸方向剛性は、外力に対するナットの変位で定義される。

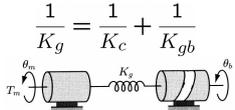


$$\frac{1}{K_t} = \frac{1}{K_s} + \frac{1}{K_n} + \frac{1}{K_b}$$

$K_t [N/m]$  : 駆動機構の軸方向剛性  
 $K_s [N/m]$  : ねじ軸の軸方向剛性  
 $K_n [N/m]$  : ナットの軸方向剛性  
 $K_b [N/m]$  : 支持軸受けの軸方向剛性

### ねじり剛性

ねじり剛性は、外力に対する軸のねじりで定義され、ねじり振動に影響を与える



$$\frac{1}{K_g} = \frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_{gb}}$$

$K_g [N \cdot m/rad]$  : 軸ねじり剛性  
 $K_c [N \cdot m/rad]$  : カップリングのねじり剛性  
 $K_{gb} [N \cdot m/rad]$  : ボールねじ軸のねじり剛性

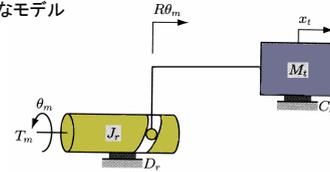
Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory

## 1慣性モデル

Tokyo Institute of Technology

### ■最も簡単なモデル



$T_m$	モータトルク	$C_t$	直動案内の粘性摩擦係数
$\theta_m$	モータ回転角度	$K_{bs}$	ねじ軸と支持軸受けの軸方向剛性
$\theta_b$	ボールねじ回転角度	$K_n$	ナットの軸方向剛性
$x_t$	被駆動体位置	$K_t$	駆動機構の軸方向剛性 $\frac{1}{K_t} = \frac{1}{K_n} + \frac{1}{K_{bs}}$
$x_b$	ボールねじ位置	$K_g$	軸ねじり剛性
$J_b$	ボールねじ側の慣性モーメント	$J_r$	回転系の慣性モーメント ( $J_r = J_m + J_b$ )
$J_m$	モータ側の慣性モーメント	$D_r$	回転系の粘性摩擦係数 ( $D_r = D_m + D_b$ )
$M_b$	ボールねじの質量	$D_m$	モータ軸の粘性摩擦係数
$M_t$	被駆動体質量	$D_b$	ねじ軸の粘性摩擦係数
$D_b$	ねじ軸の粘性摩擦係数	$D_o$	総粘性減衰係数 ( $D_o = D_r + R^2 C_t$ )
$D_m$	モータ軸の粘性摩擦係数		

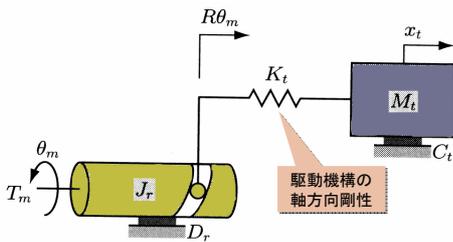
Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory

## 2慣性モデル

Tokyo Institute of Technology

■1慣性モデルにおいて、ボールねじと被駆動体とのあいだの振動 (軸方向剛性) を考えると2慣性モデルになる



●  $K_t$  が十分大きい場合は、 $x_t = R\theta_m$  となり送り機構は1慣性系で近似できる。

9

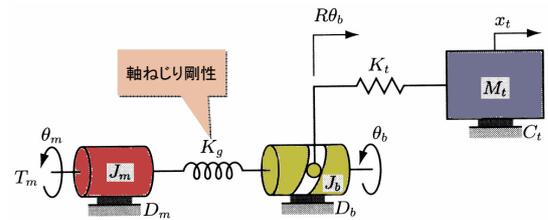
Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory

## 3慣性モデル

Tokyo Institute of Technology

■2慣性モデルにおいて、モータとボールねじとの間のねじれを考えると3慣性モデルとなる



● ボールねじのねじり振動の共振周波数は軸方向振動の共振周波数に比べて大きいことが多い。ねじり振動を無視する場合は、2慣性モデルが用いられる。

10

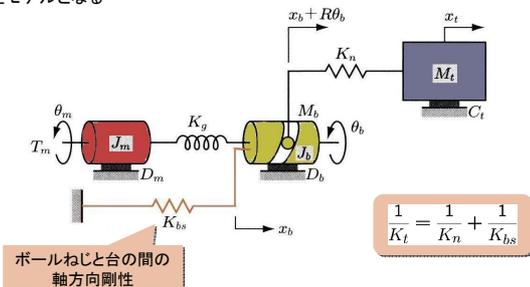
Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory

## 4慣性モデル

Tokyo Institute of Technology

■3慣性モデルにおいて、ボールねじの軸方向振動を考えたモデルは、4慣性モデルとなる



ボールねじと台の間の軸方向剛性

$$\frac{1}{K_t} = \frac{1}{K_n} + \frac{1}{K_{bs}}$$

● ボールねじの質量  $M_b$  が被駆動体質量  $M_t$  と比べて十分に小さい場合、4慣性モデルは3慣性モデルで近似できる。(ただし、 $M_b$  は  $M_t$  に含む)

11

Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory

## 各モデルの運動方程式 (1)

Tokyo Institute of Technology

### 1慣性モデル運動方程式

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f \quad x = \theta_m \quad f = T_m$$

$$M = J_a \quad C = D_a \quad K = 0$$

### 2慣性モデル運動方程式

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f \quad x = \begin{bmatrix} \theta_m \\ x_t \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} T_m \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} J_r & 0 \\ 0 & M_t \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} D_r & 0 \\ 0 & C_t \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} R^2 K_t & -R K_t \\ -R K_t & K_t \end{bmatrix}$$

12

Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory

## 各モデルの運動方程式 (2)

Tokyo Institute of Technology

### 3慣性モデル運動方程式

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f \quad x = \begin{bmatrix} \theta_m \\ \theta_b \\ x_t \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} T_m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} J_m & 0 & 0 \\ 0 & J_b & 0 \\ 0 & 0 & M_t \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} D_m & 0 & 0 \\ 0 & D_b & 0 \\ 0 & 0 & C_t \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} K_g & -K_g & 0 \\ -K_g & R^2 K_t + K_g & -R K_t \\ 0 & -R K_t & K_t \end{bmatrix}$$

### 4慣性モデル運動方程式

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f \quad x = \begin{bmatrix} \theta_m \\ \theta_b \\ x_b \\ x_t \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} T_m \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} J_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_t \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} D_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_t \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} K_g & -K_g & 0 & 0 \\ -K_g & R^2 K_n + K_g & 0 & 0 \\ 0 & R K_n & K_n + K_{bs} & -R K_n \\ 0 & -R K_n & -K_n & K_n \end{bmatrix}$$

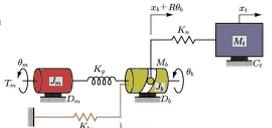
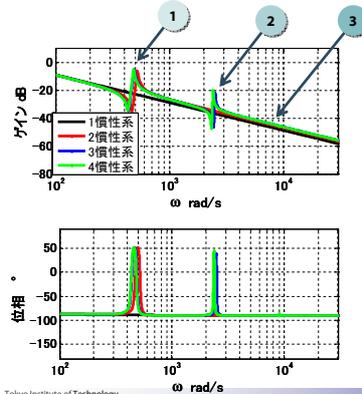
Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory

## 各モデルの周波数応答 (1. モータ角速度)

Tokyo Institute of Technology

### ■モータトルクからモータ角速度への周波数応答



1. 被駆動体の軸方向振動
  2. ボールねじのねじり振動
  3. ボールねじの軸方向振動
- (極零相殺を起こしている)

14

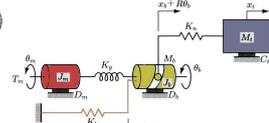
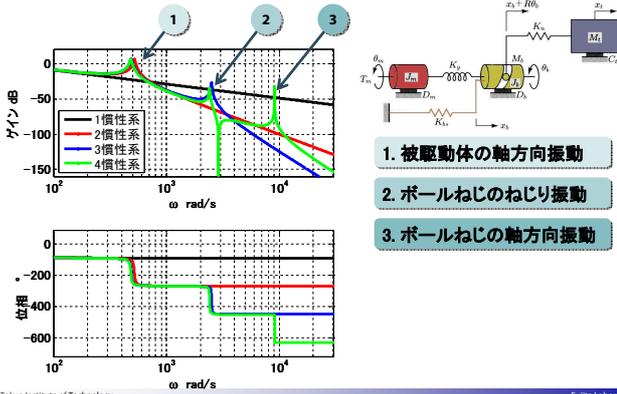
Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory

## 各モデルの周波数応答 (2. 被駆動体速度)

Tokyo Institute of Technology

### ■モータトルクから被駆動体速度への周波数応答



1. 被駆動体の軸方向振動
2. ボールねじのねじり振動
3. ボールねじの軸方向振動

15

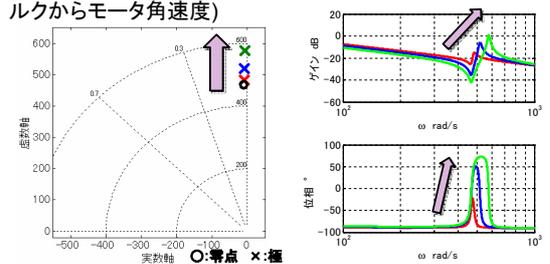
Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory

## 極零位置と周波数応答の変化(1)

Tokyo Institute of Technology

### ■極の虚軸方向への移動に対する、周波数応答の変化(モータトルクからモータ角速度)



極を虚軸方向に原点から離す (例:lpを大きくする) → 共振周波数 **大**  
共振ピーク値 **大**

16

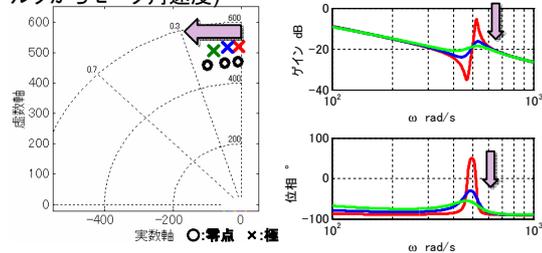
Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory

## 極零位置と周波数応答の変化(2)

Tokyo Institute of Technology

### ■極の実軸方向への移動に対する、周波数応答の変化(モータトルクからモータ角速度)



極を実軸方向に原点から離す (例:Ctを大きくする) → 共振周波数 **同じ**  
共振ピーク値 **小**

17

Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory

## アウトライン

Tokyo Institute of Technology

### ■ボールねじ駆動機構のモデル化

#### ■軸サーボ系

- モデルの簡略化
- カスケード型制御系

#### ■電流制御系

#### ■速度制御系

#### ■位置制御系

#### ■フィードフォワード制御

#### ■まとめ

18

Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory

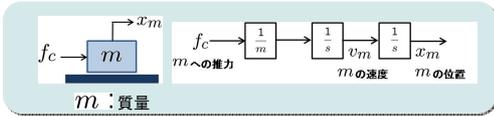


## 軸サーボ系

Tokyo Institute of Technology

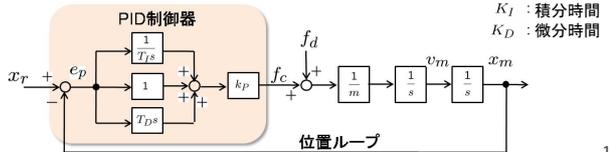
### ■物体の位置を制御する

以下では簡単のため、下図のようなモデルを考える



### ■制御器の設計例

位置決め制御器の例として、PID制御器を考える



19

Tokyo Institute of Technology

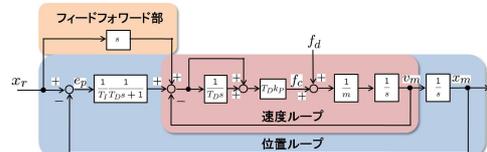
Fujita Laboratory



## ブロック線図の等価変換

Tokyo Institute of Technology

### ■前のPID制御系を、カスケード型表現に等価変換する。



多重ループ構成の制御方式を、**カスケード型制御系**といい、位置決め・送り装置の制御系の主流を占めている。

### ロカスケード型制御系の利点

- ・マイナーループの応答を高めることで、制御系全体の性能を向上できる
- ・各ループで異なった制御周期を使うので、制御装置の資源を有効に使える
- ・各ループは簡単なフィードバック制御系であるので解析がしやすい

### ロカスケード型制御系の欠点

- ・制御系全体をある型にはめているので、最適性を追求するのは難しい
- ・制御対象が複雑になると、制御パラメータの調整が難しくなる

20

Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory



## アウトライン

Tokyo Institute of Technology

### ■ボールねじ駆動機構のモデル化

### ■軸サーボ系

### ■電流制御系

- モータの特性
- 電流制御器の例

### ■速度制御系

### ■位置制御系

### ■フィードフォワード制御

### ■まとめ

21

Tokyo Institute of Technology

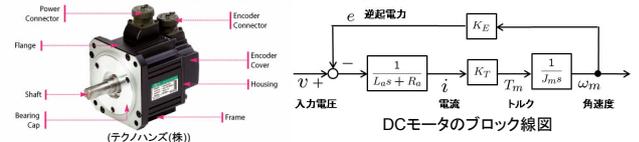
Fujita Laboratory



## 電流制御系 (モータの特性)

Tokyo Institute of Technology

■ボールねじ駆動系の入力にはモータトルクであるが、モータトルクを得るためにはモータに、トルクに比例した電流を流す必要がある。



- モータを電力的に高効率で駆動するため、入力電圧には一般的にリニア電圧ではなくPWM(Pulse Width Modulation)が用いられる。
  - 構造上、ノイズが発生しやすく、不確かさも大きい。
- $L_a$ : 電気インダクタンス  
 $R_a$ : 電気抵抗  
 $J_m$ : モータ慣性モーメント  
 $K_T$ : トルク定数  
 $K_E$ : 誘起電圧定数

⇒ 電流制御系を、ボールねじ駆動機構のモデルに含むのは困難

⇒ **電流制御系はボールねじ駆動機構とは別のループで制御し、電流制御部の伝達関数は1か1次遅れとして扱う**

22

Tokyo Institute of Technology

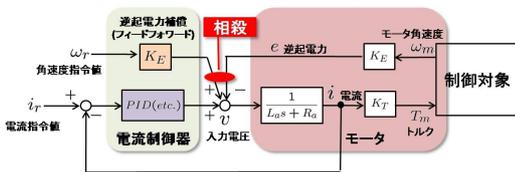
Fujita Laboratory



## 電流制御系 (電流制御器の例)

Tokyo Institute of Technology

■電流制御器として、以下のようなものが挙げられる



- 外乱の影響を抑えて、電流制御系の応答性を向上するためにPID制御などを用いる。
- 角速度指令に誘起電圧定数を乗じた値を加えることで、モータの逆起電力を抑制する。(フィードフォワード)

### □設計指標

- 電流制御部のゲイン交差周波数**は、速度制御部のゲイン交差周波数や機械系の固有振動数に比べて**十分に高くする**必要がある。
- 理論的にはゲイン交差周波数はいくらでも大きくできるが、PWMの特性や電流ループの時間遅れにより、**ハイゲイン化による広帯域化には限界がある**。

23

Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory



## アウトライン

Tokyo Institute of Technology

### ■ボールねじ駆動機構のモデル化

### ■軸サーボ系

### ■電流制御系

### ■速度制御系

- PI制御とI-P制御
- PI制御とI-P制御の極配置
- PI制御とI-P制御の応答

### ■位置制御系

### ■フィードフォワード制御

### ■まとめ

24

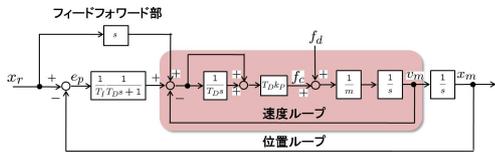
Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory



## 速度制御

Tokyo Institute of Technology



### ■速度制御系の設計指標

- 目標値に対する応答性
- 外乱に対する定常偏差

P動作とI動作をあわせた制御器が必要。  
以下の2つが用いられる。

PI制御器

I-P制御器

25

Tokyo Institute of Technology

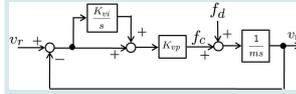
Fujita Laboratory



## 速度制御 (PI制御とI-P制御)

Tokyo Institute of Technology

### ■PI 制御器



- 1つのフィードバックループをもつ。
- 速度偏差から制御力を発生する。

- 指令値から応答への閉ループ伝達関数

$$G_{vr}^{PI} = \frac{\omega_{vc}(s + K_{vi})}{s^2 + \omega_{vc}s + \omega_{vc}K_{vi}}$$

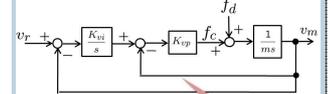
$v_r$  : 速度指令  $f_d$  : 制御力  $K_{vi}$  : 積分ゲイン  $\omega_{vc}$  :  $K_{vp}/m$   
 $v_m$  : 速度応答  $f_d$  : 外乱  $K_{vp}$  : 比例ゲイン

26

Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory

### ■I-P 制御器



- 2つのフィードバックループをもつ。
- ループAは速度偏差から制御力を発生する。
- ループBは速度を直接フィードバックする。
- 指令値から応答への閉ループ伝達関数

$$G_{vr}^{I-P} = \frac{\omega_{vc}K_{vi}}{s^2 + \omega_{vc}s + \omega_{vc}K_{vi}}$$

Tokyo Institute of Technology

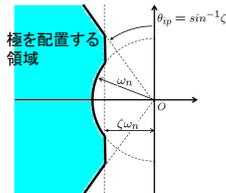
Fujita Laboratory



## 望ましい極配置

Tokyo Institute of Technology

- 立ち上がり時間、オーバーシュートや振動、静定時間は減衰比  $\zeta$  と固有角周波数  $\omega_n$  によりデザインできる。



- 立ち上がり時間への制約: 固有角周波数  $\omega_n$  をある値以上にする  
 > 原点からの距離をある値以上にする
- オーバーシュートや振動への制約: 減衰比  $\zeta$  をある値以上にする  
 > 虚数軸からの方向角  $\theta_{ip}$  をある値以上にする
- 静定時間への制約:  $\zeta\omega_n$  をある値以上にする  
 > 実数部をある値以上にする

✓零点も応答に影響するので、実際の議論はさらに複雑になる

27

Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory

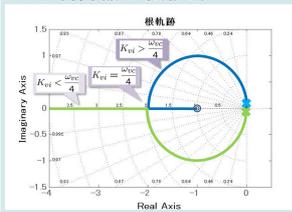


## 速度制御 (PI と I-P の根軌跡)

Tokyo Institute of Technology

- $K_{vi}$  のゲインを増加させて、根軌跡を描く ( $\omega_{vc}$  は固定)

### ■PI 制御器の根軌跡

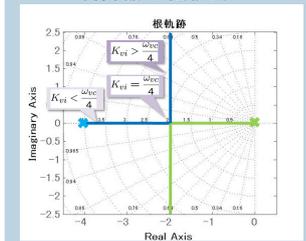


- $K_{vi} > \frac{\omega_{vc}}{4}$  から振動的になる
- 零点を持つため、応答にはオーバーシュートが生じる

Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory

### ■I-P 制御器の根軌跡



- $K_{vi} > \frac{\omega_{vc}}{4}$  から振動的になる
- 零点を持たないため、応答は単純な2次系

Tokyo Institute of Technology

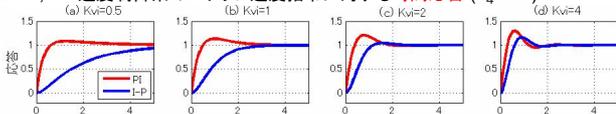
Fujita Laboratory



## 速度制御 (PI と I-P の応答の違い)

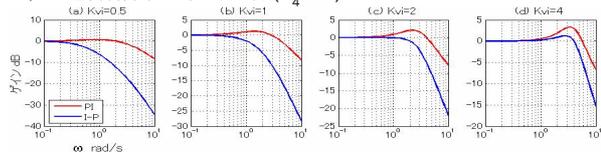
Tokyo Institute of Technology

- PI, I-P 速度制御系のステップ速度指令に対する時間応答 ( $\frac{\omega_{vc}}{4} = 1$ )



- PI は速度応答が速く、オーバーシュートが大きい
- I-P は速度応答が遅く、オーバーシュートが小さい
- どちらも、 $K_{vi} = \omega_{vc}/4 = 1$ あたりから振動が現れた

- PI, I-P 速度制御系の周波数応答 ( $\frac{\omega_{vc}}{4} = 1$ )



- PI制御系はI-P制御系に比べて帯域幅が広く、共振ピークも大きい

29

Tokyo Institute of Technology

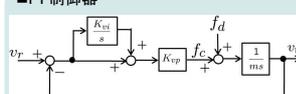
Fujita Laboratory



## 速度制御 (PI と I-P の選び方)

Tokyo Institute of Technology

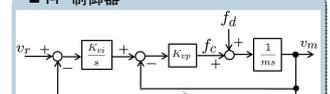
### ■PI 制御器



- 1つのフィードバックループをもつ。
- 速度偏差から制御力を発生する。

速度指令に対する応答を速くしたい場合はPI制御

### ■I-P 制御器



- 2つのフィードバックループをもつ。
- ループAは速度偏差から制御力を発生する。
- ループBは速度を直接フィードバックする。

速度指令に対するオーバーシュートを抑えつつ外乱抑制を行いたい場合はI-P制御

Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory



## アウトライン

Tokyo Institute of Technology

- ボールねじ駆動機構のモデル化
- 軸サーボ系
- 電流制御系
- 速度制御系
- 位置制御系
  - P-PI 制御と P-I-P 制御
  - P-PI 制御と P-I-P 制御の極配置
  - P-PI 制御と P-I-P 制御の応答
- フィードフォワード制御
- まとめ

31

Tokyo Institute of Technology

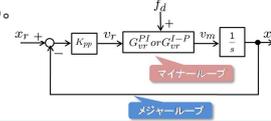
Fujita Laboratory



## 位置制御系

Tokyo Institute of Technology

- 前で述べた速度制御系をマイナーループとして、下図のような位置制御系を構成する。



$x_r$  : 位置指令  
 $x_m$  : 位置  
 $v_r$  : 速度指令  
 $v_m$  : 速度  
 $f_d$  : 速度制御系に加わる外乱  
 $K_{pp}$  : 位置比例ゲイン

- 速度制御系に  $G_{vr}^{PI}$  を用いた場合の閉ループ伝達関数 (位置P-速度PI制御)

$$G_{xr}^{PI} = \frac{\omega_{vc}(s + K_{vi})K_{pp}}{s^3 + \omega_{vc}s^2 + \omega_{vc}(K_{pp} + K_{vi})s + \omega_{vc}K_{vi}K_{pp}}$$

$$G_{xd}^{PI} = \frac{1}{m} \cdot \frac{s}{s^3 + \omega_{vc}s^2 + \omega_{vc}(K_{pp} + K_{vi})s + \omega_{vc}K_{vi}K_{pp}}$$

- 速度制御系に  $G_{vr}^{I-P}$  を用いた場合の閉ループ伝達関数 (位置P-速度I-P制御)

$$G_{xr}^{I-P} = \frac{\omega_{vc}K_{vi}K_{pp}}{s^3 + \omega_{vc}s^2 + \omega_{vc}K_{vi}s + \omega_{vc}K_{vi}K_{pp}}$$

$$G_{xd}^{I-P} = \frac{1}{m} \cdot \frac{s}{s^3 + \omega_{vc}s^2 + \omega_{vc}K_{vi}s + \omega_{vc}K_{vi}K_{pp}}$$

- ➡ P-I-P制御系の場合は零点がないため、時間応答を予想しやすい

32

Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory



## 位置制御系 (P-I-P極配置)

Tokyo Institute of Technology

- P-I-P制御系で応答性がよいとされる極配置には、主に以下の2つがある。

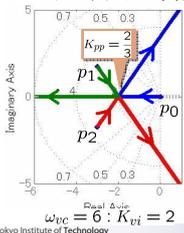
- 3重極
- 振動極と実軸上の極が垂直に並ぶ

### A) 3重極の場合

P-I-P位置制御系の伝達関数が、3重極をもつ伝達関数に変形できると仮定

$$G_{xr}^{I-P} = \frac{\omega_{vc}K_{vi}K_{pp}}{s^3 + \omega_{vc}s^2 + \omega_{vc}K_{vi}s + \omega_{vc}K_{vi}K_{pp}} = \frac{(\gamma\omega_{vc})^3}{(s + \gamma\omega_{vc})^3}$$

これは、以下の条件のときに可能である。



$$\gamma = 1/3$$

$$K_{pp} : \omega_{vc} : K_{vi} = \frac{1}{9} : 1 : \frac{1}{3} = 1 : 9 : 3$$

左図では、 $K_{pp}$  の増加とともに振動極  $p_1, p_2$  と原点極  $p_0$  は3重極となり、その後2つの極が減衰の低い領域から不安定領域へと移動している。

- ➡ 3重極のとき、最も震動が少ない

33

Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory



## 位置制御系 (P-I-P極配置)

Tokyo Institute of Technology

- B) 振動極と実軸上の極が垂直に並ぶ場合

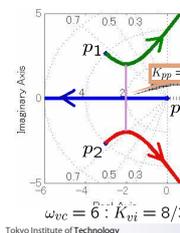
3次系の一般形

$$G = \frac{pr\omega_n^2}{(s + pr)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)}$$

について、ステップ応答がオーバーシュートを起こさない条件は  $pr \leq \zeta\omega_n$

これを踏まえて、低周波で追従性がよく、広域ではゲインが低くなるパラメータとして  $\zeta = 1/\sqrt{2}, \omega_n = \sqrt{2}pr$  と設定する方法が提案されている。

これは、以下の条件のときに可能である。



$$K_{pp} : \omega_{vc} : K_{vi} = \frac{1}{6} : 1 : \frac{4}{9} = 1 : 6 : \frac{8}{3}$$

左図では、 $K_{pp}$  の増加とともに極  $p_0, p_1, p_2$  が垂直に並ぶ状態を経て、不安定領域に向かう。

- ➡ 震動が少ない

34

Tokyo Institute of Technology

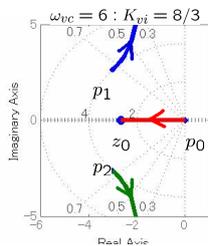
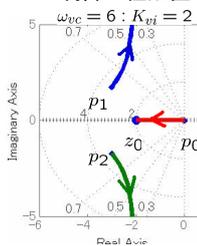
Fujita Laboratory



## 位置制御系 (P-PI極配置)

Tokyo Institute of Technology

- P-PI 制御の極配置



$\omega_{vc}, K_{vi}$  を固定し、 $K_{pp}$  を増加させる

- $p_1, p_2$  は振動極としてスタートし、減衰比が低い領域に移動する。
- $p_0$  は  $z_0$  とダイポールになるまでは、遅い極として振動極  $p_1, p_2$  のオーバーシュートを抑制する。

P-PI 制御系は「特徴がない制御系」ともいわれるが、現場での調整の容易さという特徴を持っている。

35

Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory



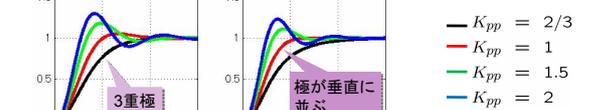
## 位置制御系 (ステップ応答)

Tokyo Institute of Technology

- P-I-P 制御系のステップ応答

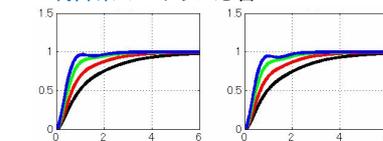
$\omega_{vc} = 6 : K_{vi} = 2$

$\omega_{vc} = 6 : K_{vi} = 8/3$



- $K_{pp}$  が大きくなると、指令応答が速くなるが、オーバーシュートが顕著になる
- 3重極の条件と極が縦に並ぶ条件ではスムーズな応答になる

- P-PI 制御系のステップ応答



- 指令応答は速いが、スムーズな応答ではない

36

Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory



## アウトライン

Tokyo Institute of Technology

- ボールねじ駆動機構のモデル化
- 軸サーボ系
- 電流制御系
- 速度制御系
- 位置制御系
- フィードフォワード制御
- まとめ

37

Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory



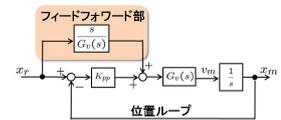
## フィードフォワード制御

Tokyo Institute of Technology

■フィードフォワードを用いると、位置ループの遅れを回復することができる。

### ●速度制御系へダイレクトフォワード

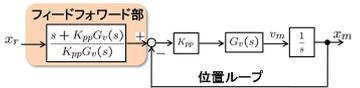
速度制御系  $G_v(s)$  に直接、速度指令  $v_{rf}$  を与える方法



⇕ 等価変換

### ●前置補償(逆伝達関数)としてフィードフォワード

位置制御系の逆伝達関数としてフィードフォワードする方法



どちらも位置制御系の応答は  $x_m(s) = x_r(s)$  となる

ただし、フィードフォワード部が安定でプロパーでなければコントローラとして実装できない。

38

Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory



## フィードフォワード制御 (設計例)

Tokyo Institute of Technology

### ■フィードフォワード制御器の設計ポイント

- 速度制御系の伝達関数  $G_v(s)$  の特性をどの程度考慮するか

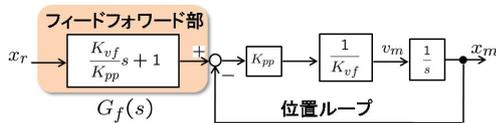
例) 速度制御系の伝達関数を定数と考える方法

$$G_v(s) = 1/K_{vf}$$

とすると、フィードフォワード制御器の伝達関数は

$$G_f(s) = \frac{K_{vff}}{K_{pp}}s + 1$$

となる。この制御器は微分器をもち、速度フィードフォワード制御器とよばれる



39

Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory



## アウトライン

Tokyo Institute of Technology

- ボールねじ駆動機構のモデル化
- 軸サーボ系
- 電流制御系
- 速度制御系
- 位置制御系
- フィードフォワード制御
- まとめ

40

Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory



## まとめ

Tokyo Institute of Technology

### ■本発表のまとめ

- 精密位置決め、送り系の例としてボールねじ駆動機構を扱った
- ボールねじ駆動機構のモデル化を行った
- 簡略化したモデルを使って、電流制御、速度制御、位置制御の基本を学んだ

### ■今後の活動

- ボールねじ駆動機構における軸サーボ系の構成
- 指令値生成部の設計
- 共振、外乱に対応できるコントローラの設計

41

Tokyo Institute of Technology

Fujita Laboratory