

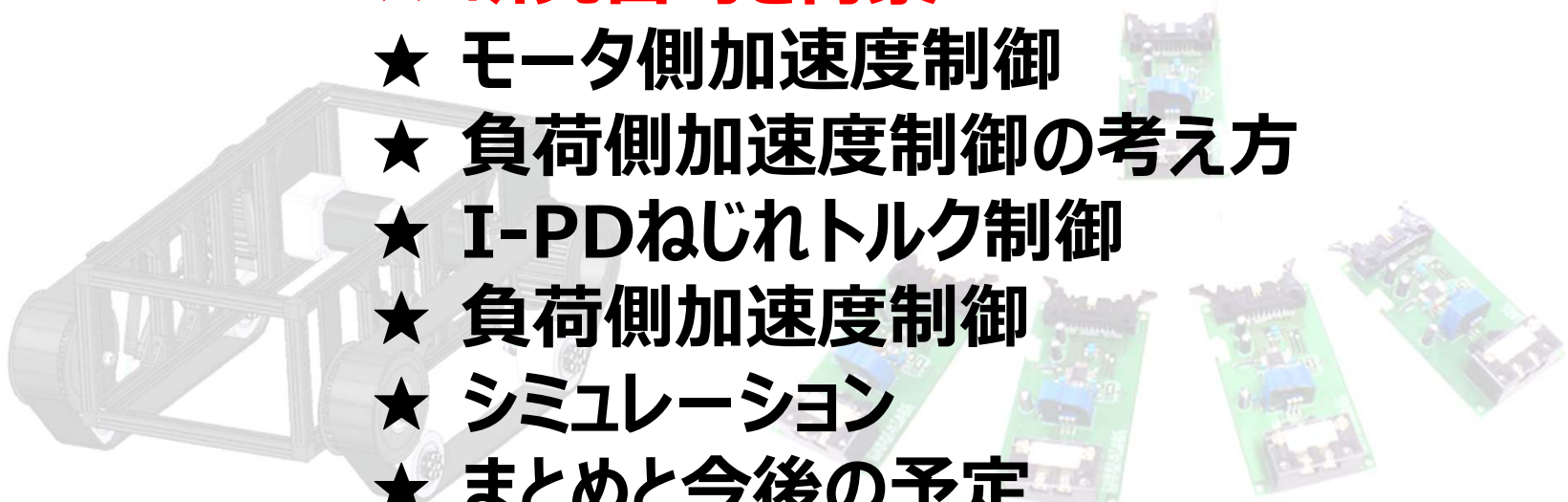


トルクサーボのための 2慣性共振系の負荷側加速度制御

長岡技術科学大学 電気電子情報工学専攻
助教 横倉 勇希



研究目的と背景

- ★ **研究目的と背景**
 - ★ **モータ側加速度制御**
 - ★ **負荷側加速度制御の考え方**
 - ★ **I-PDねじれトルク制御**
 - ★ **負荷側加速度制御**
 - ★ **シミュレーション**
 - ★ **まとめと今後の予定**
- 

研究目的と背景

様々な分野において、
未だに人間に頼っている作業が多く残されている。

<例>



熟練を要する工程



エンジンの組付



パソコンの組立

等々...

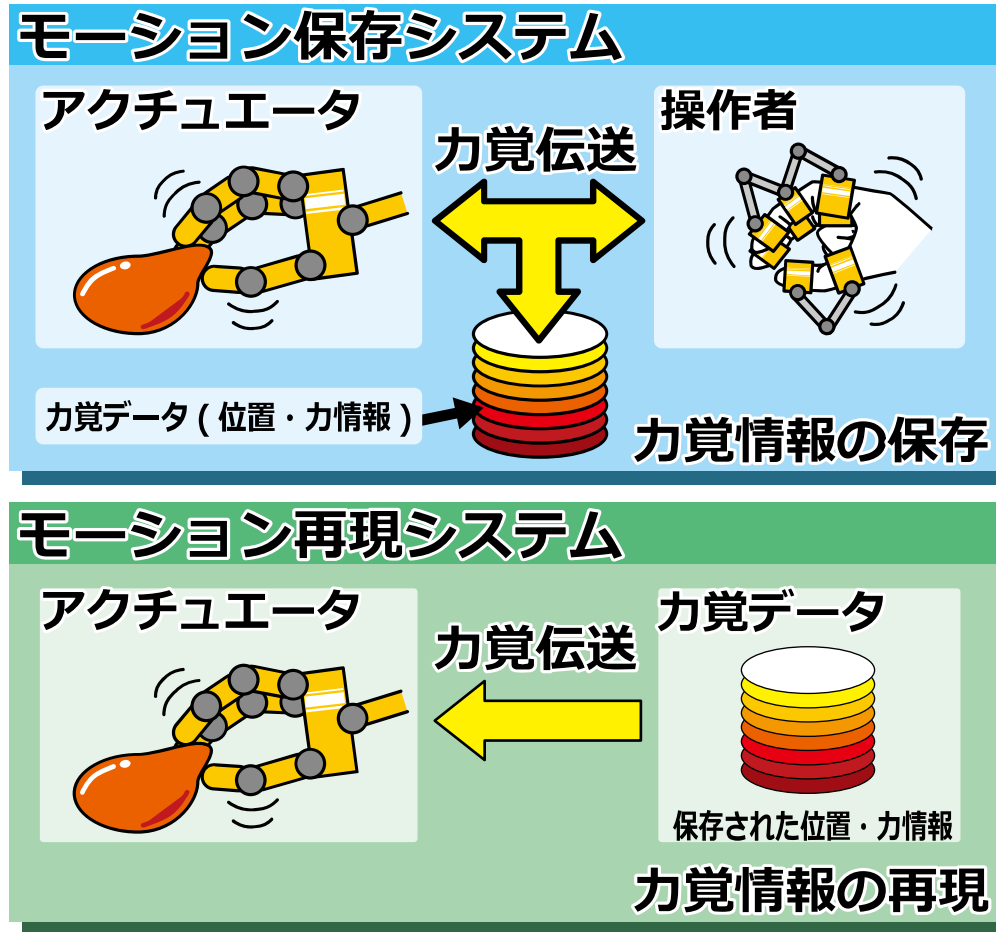
これらをすべて完全に自動化したい。

そのためには、

**接触動作を含む人間の動作を
模擬する必要がある。**

研究目的と背景

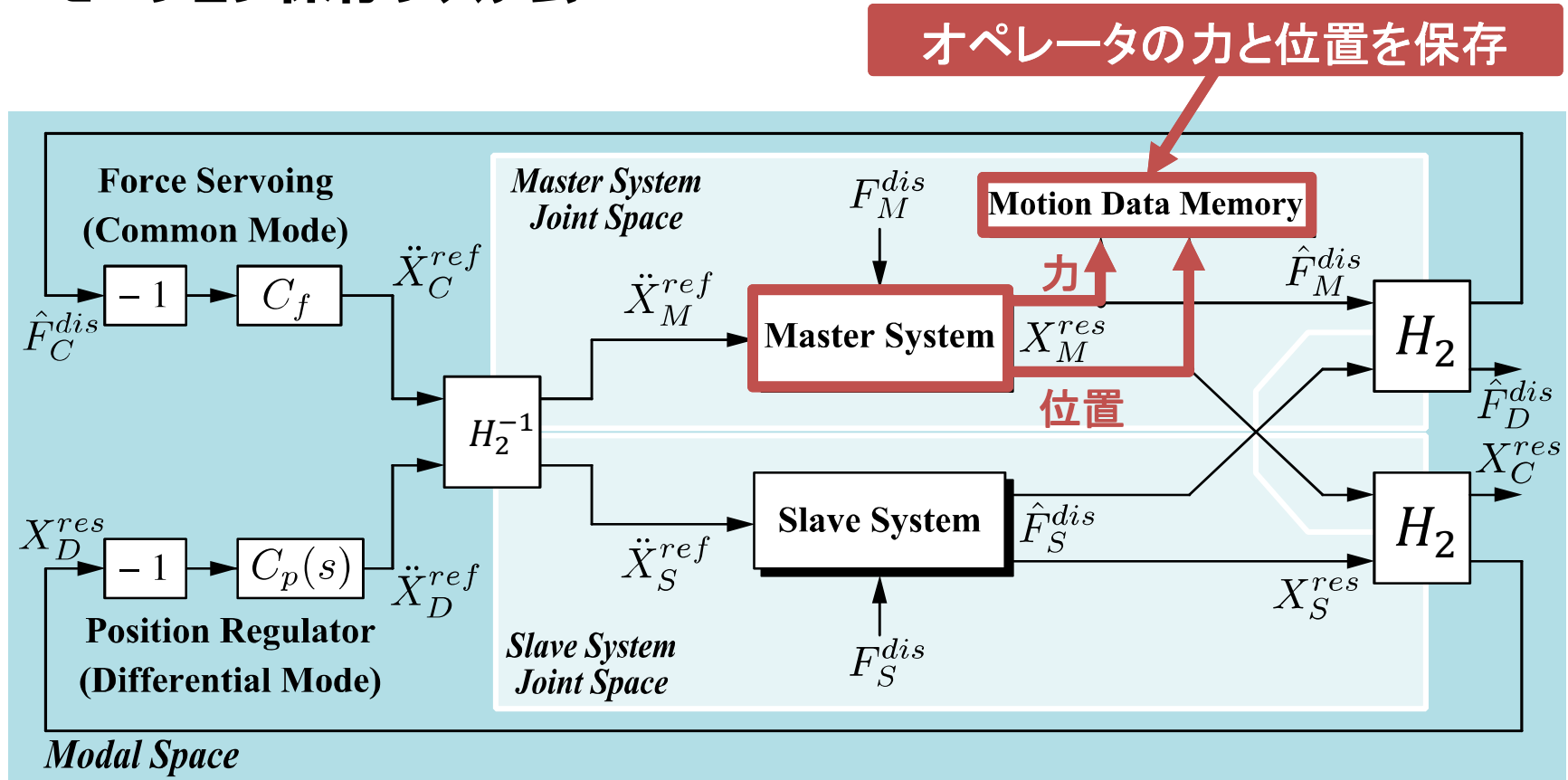
■ モーションコピーシステム



操作者の動作を時間と空間を超えて再現できる

研究目的と背景

■ モーション保存システム



アダマール行列
(座標変換行列)

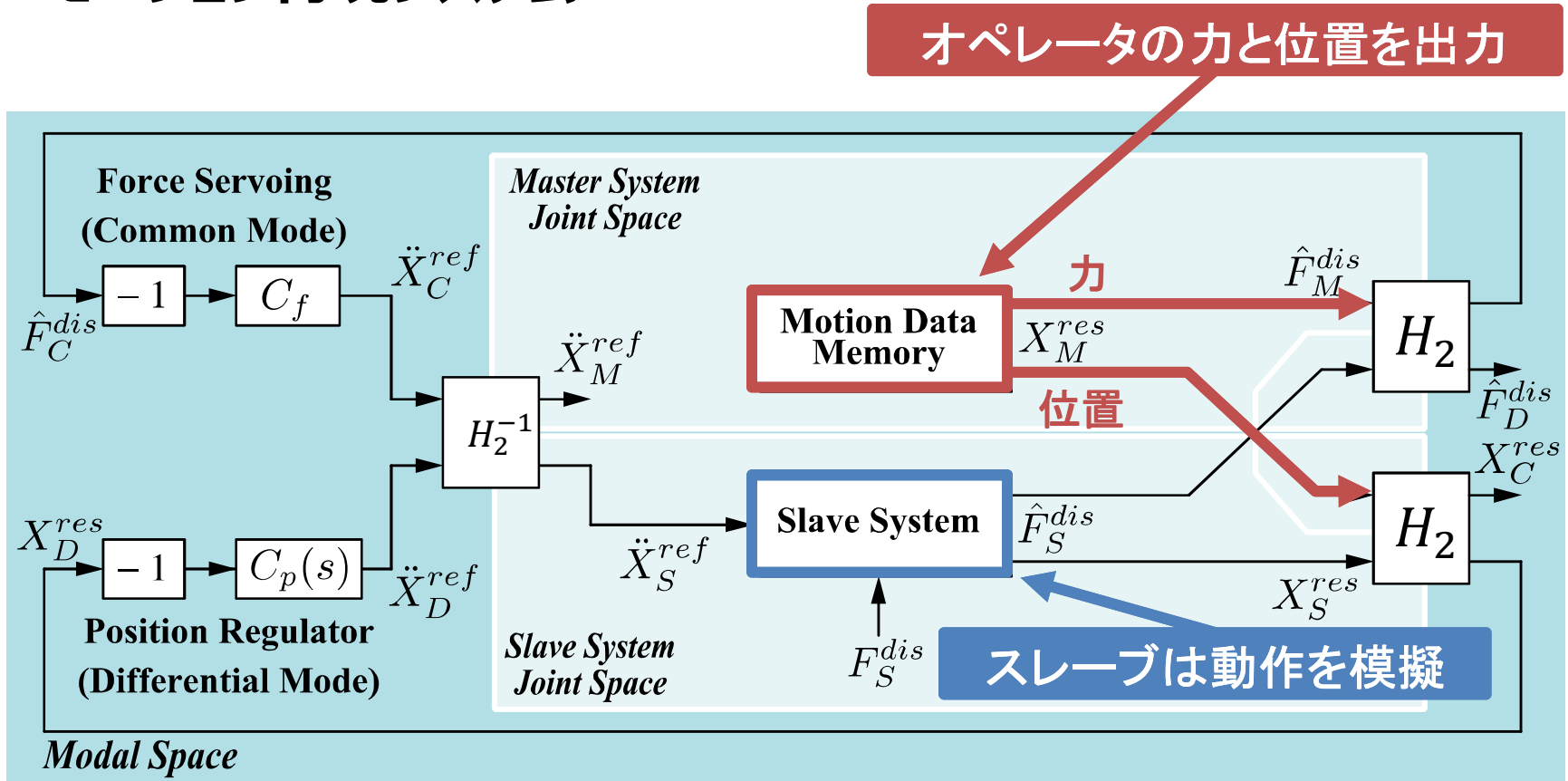
$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

C_f ; 力制御器

$C_p(s)$; 位置制御器

研究目的と背景

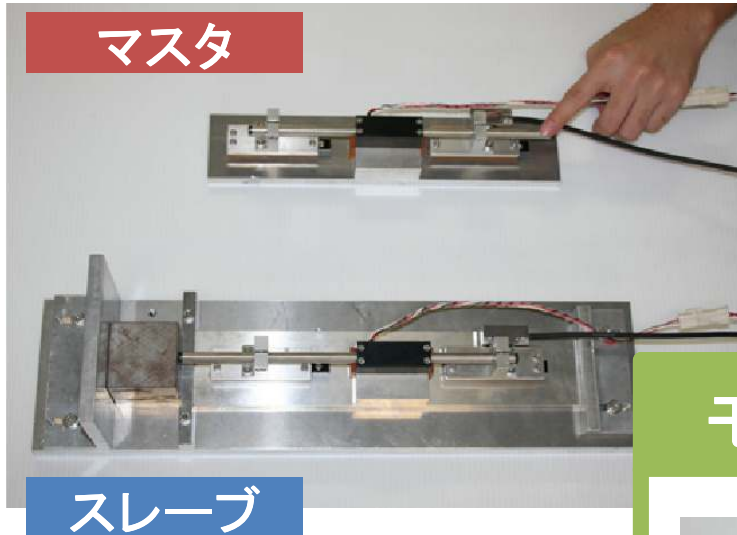
■ モーション再現システム



保存された「力情報」と「位置情報」に従って、
オペレータの動作を模擬する

研究目的と背景

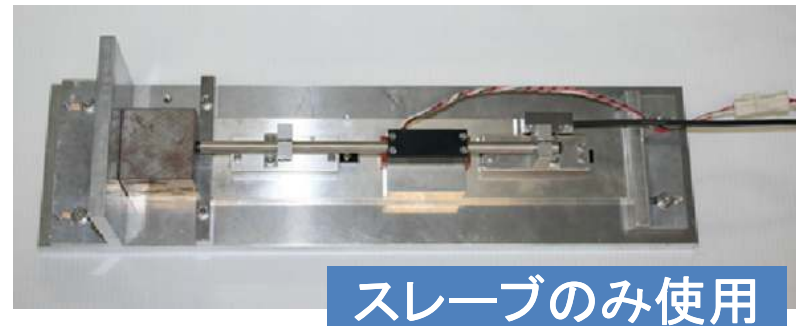
モーション保存システム



■ 保存フェーズ

- 「力応答」と「位置応答」を制御コンピュータのメインメモリもしくは、ハードディスク等々に保存する

モーション再現システム



■ 再現フェーズ

- 保存された「力情報」と「位置情報」に従ってモータを制御し再現する



MSS Soft



MLS Soft



MSS Rigid



MLS Rigid

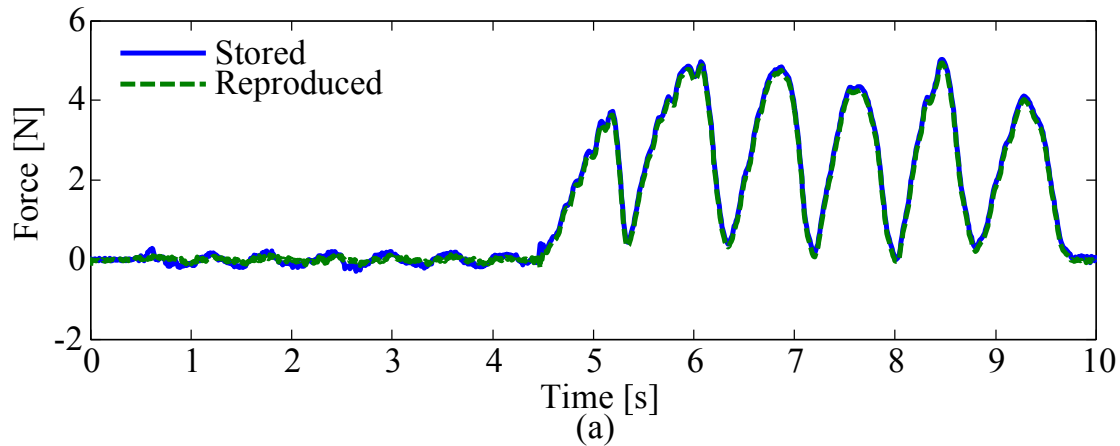


比較動画

研究目的と背景

■ モーションコピーシステムの実験結果

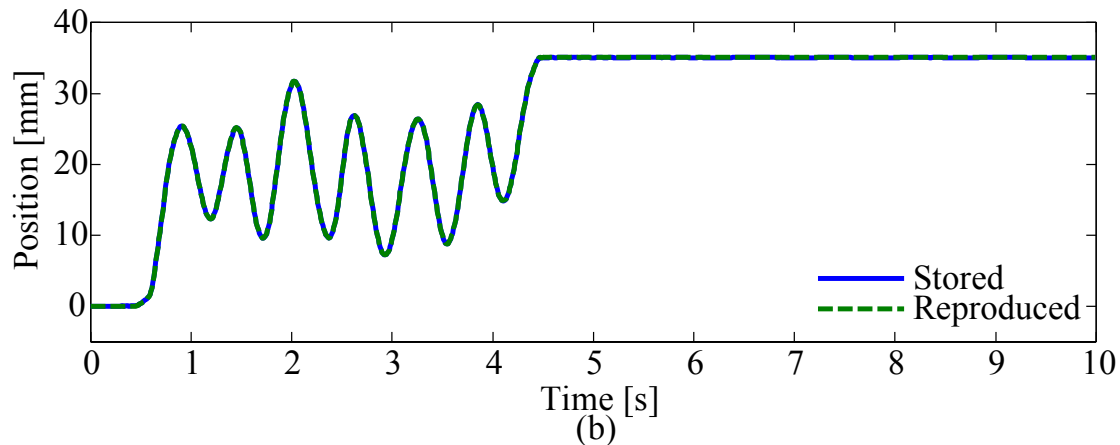
力応答



青色実線
= 保存時

緑色破線
= 再現時

位置応答



「位置」と「力」の双方を同時に再現できる

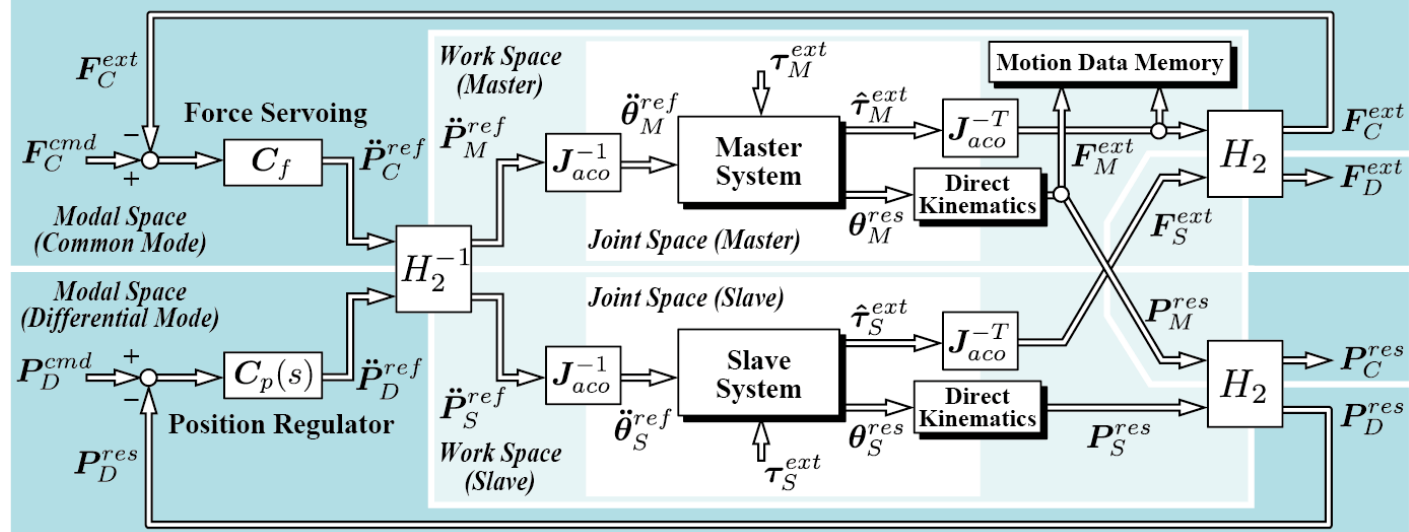
(単純なモーションキャプチャと位置制御の組み合わせでは不可能!)

研究目的と背景

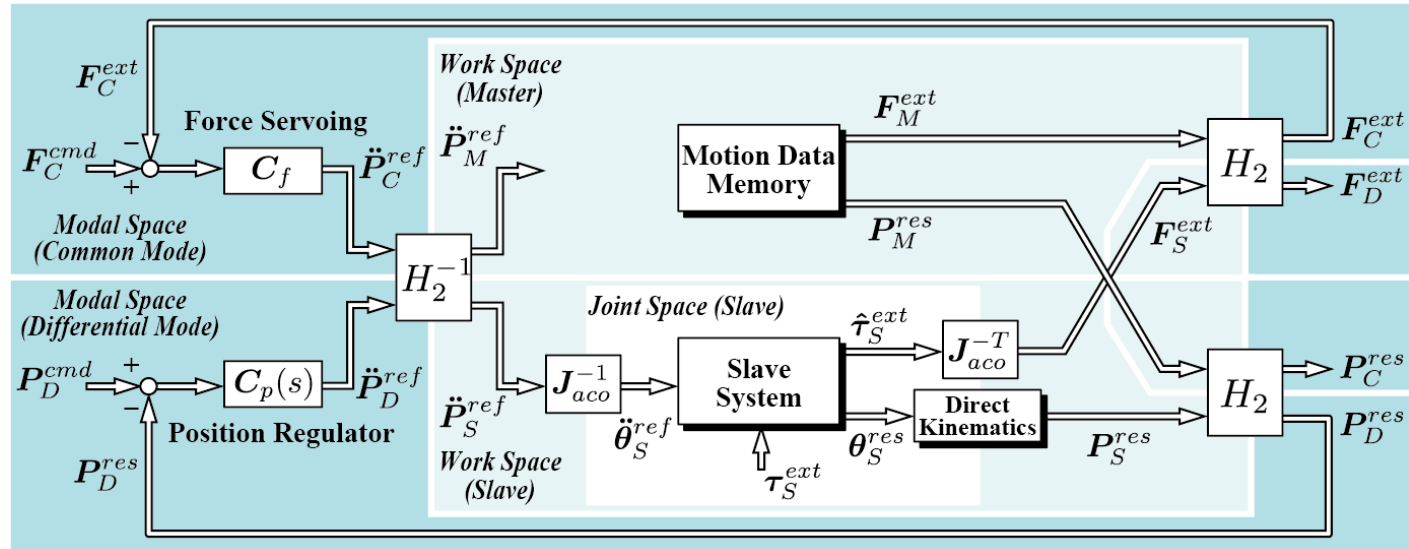
■ 作業空間モーショコピーシステム



モーション
保存
システム



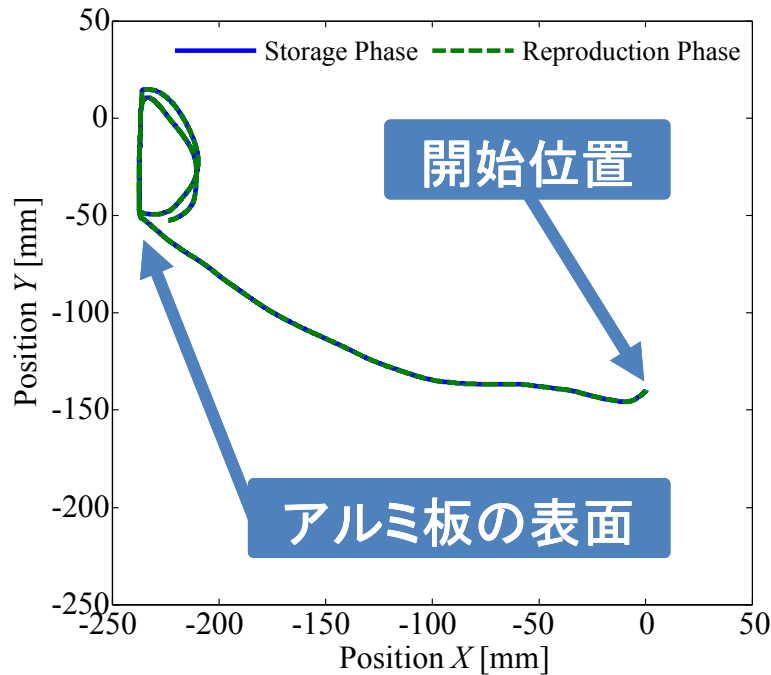
モーション
再現
システム



研究目的と背景

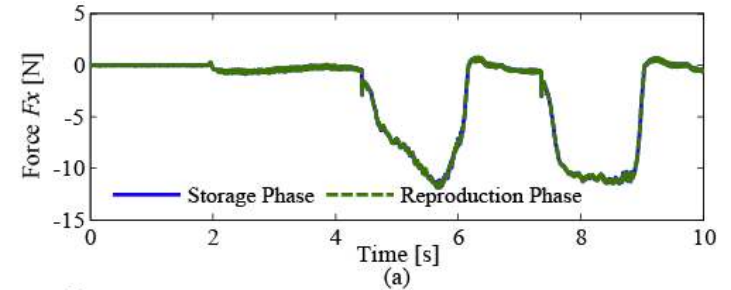
■ 実験結果

エンドエフェクタの軌跡

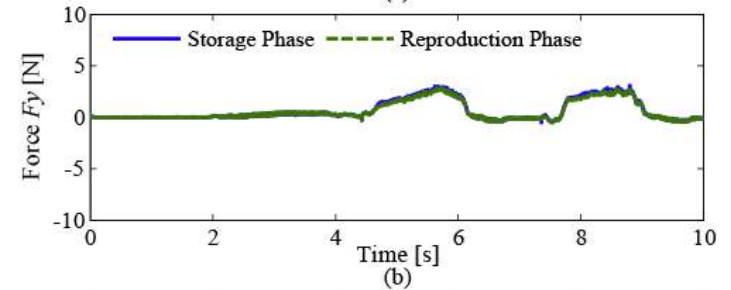


青 = 保存時 緑 = 再現時

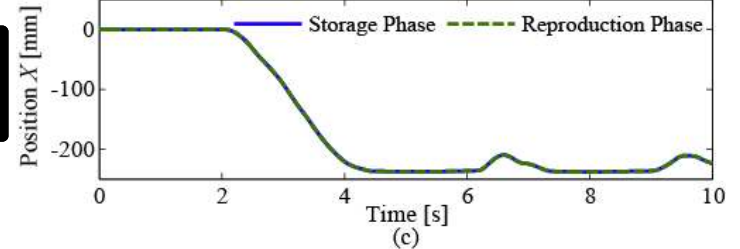
X方向 力応答



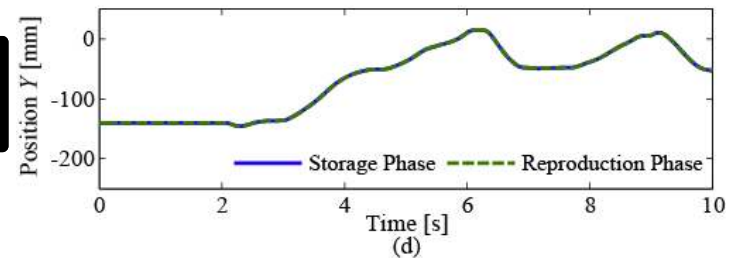
Y方向 力応答



X方向 位置応答



Y方向 位置応答



多軸の場合でも「位置」と「力」の双方を再現

研究目的と背景

モーションコピーシステムの応用先

■ 産業分野

- 熟練者の動作模擬
- 組立作業の自動化



■ 医療分野

- 外科手術の術者の模擬



■ 原子力分野

- 高線量領域での作業模擬



■ 建設土木分野

- オペレータの動作を模擬する建設機械



■ 娯楽・生活分野

- 指圧・マッサージ機器
- プロのシェフを模擬する調理ロボット

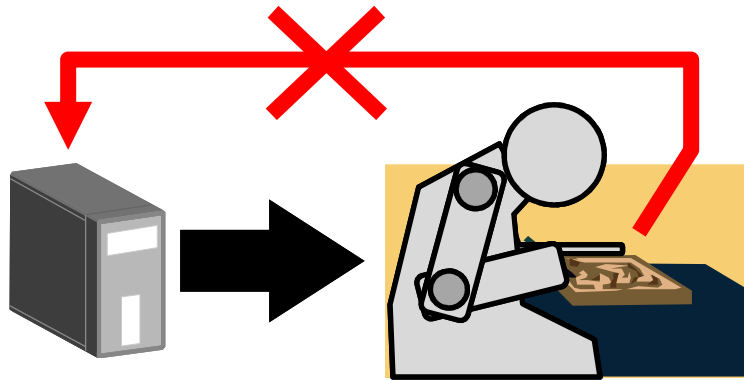


■ その他

- 人間の力加減が重要となる作業

モーションコピーシステムの2つの致命的な問題点

■ 環境適応性がない



フィードバックループがない！

ロボット周囲の状況が変わると、
途端に動作再現ができなくなる

物体の位置や種類に合わせて、
モーションデータを変更する手法
については、幾つか提案されている。

■ 多自由度動作を”まともに”扱えない

減速機が使用できない！

今まではダイレクトドライブモータ
の使用によってこの問題を回避していた。

➤ 減速機を使用すると、バックドライバビリティが悪化

→ **ねじれトルクセンサの使用により解決**

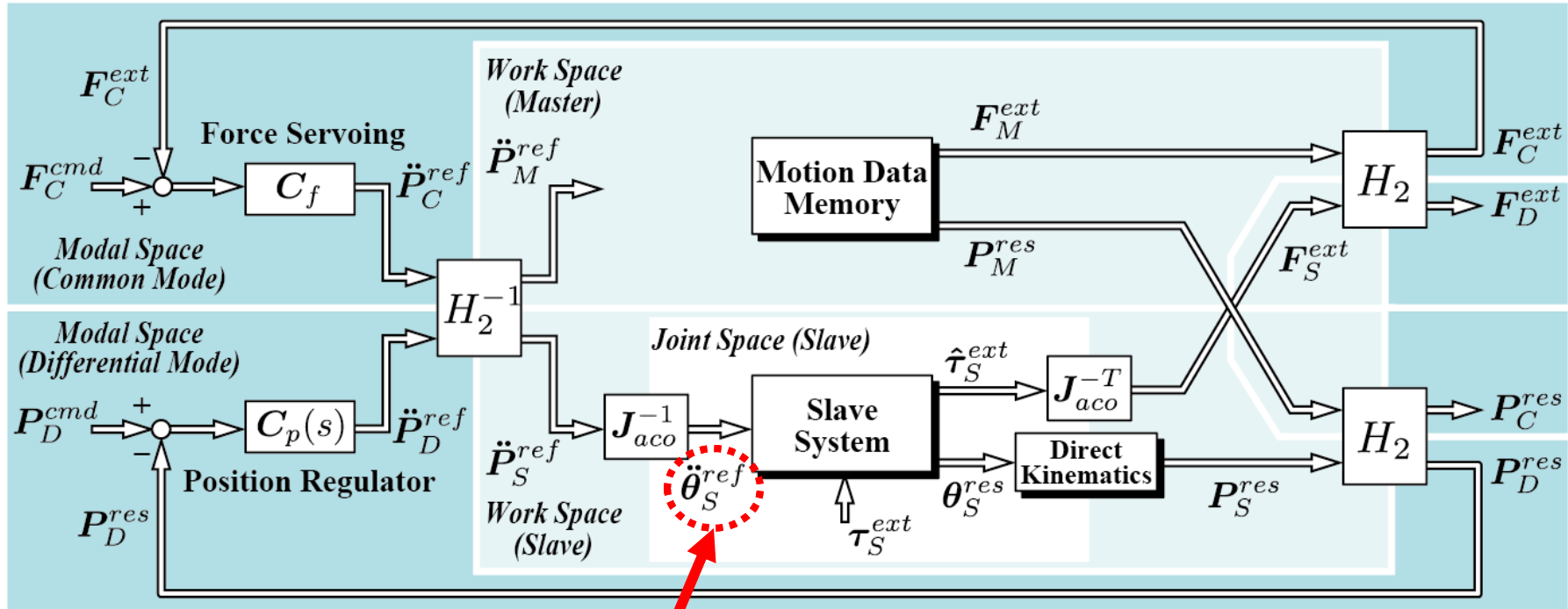
➤ 減速機を使用すると、2 慣性共振系の振動が発生

→ **負荷側加速度制御により解決**

今回は負荷側加速度制御について焦点を当てる。

研究目的と背景

■ 負荷側加速度制御を実装する理由



「バイラテラル制御」や「モーションコピーシステム」は
加速度指令をモータ制御系に与える。

「**負荷側**加速度制御」ができれば、
 減速機をつかっても、外側の制御系はそのままでよい。

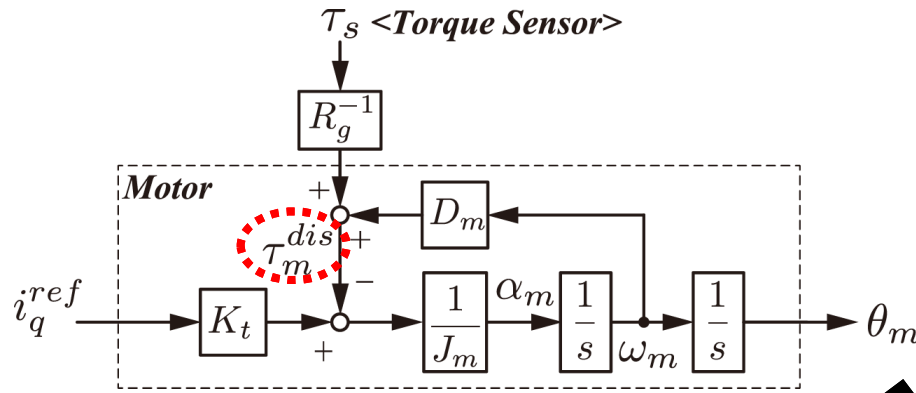


モータ側加速度制御

- ★ 研究目的と背景
- ★ **モータ側加速度制御**
- ★ 負荷側加速度制御の考え方
- ★ I-PDねじれトルク制御
- ★ 負荷側加速度制御
- ★ シミュレーション
- ★ まとめと今後の予定

モータ側加速度制御

■ モータシステム



★ 観測対象の状態方程式

$$\dot{x}_m = A_m x_m + b_m u_m$$

$$y_m = c_m x_m$$

$$x_m = \begin{bmatrix} \omega_m & \tau_m^{dis} & \dot{\tau}_m^{dis} \end{bmatrix}^T$$

$$u_m = i_q^{ref}, \quad y_m = \omega_m$$

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & -J_m^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad b_m = \begin{bmatrix} K_t J_m^{-1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$c_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

■ 1次外乱オブザーバ

$$\dot{\hat{x}}_m = A_d \hat{x}_m + B_d u_d$$

$$y_d = c_d \hat{x}_m$$

$$u_d = \begin{bmatrix} i_q^{ref} & \omega_m \end{bmatrix}^T, \quad y_d = \hat{\tau}_m^{dis}$$

$$A_d = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + k_3 & J_{mn}^{-1} & 0 \\ J_{mn}(k_1 k_2 + k_2 k_3 + k_3 k_1) & 0 & 1 \\ -J_{mn} k_1 k_2 k_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_d = \begin{bmatrix} K_{tn} J_{mn}^{-1} & -(k_1 + k_2 + k_3) \\ 0 & -J_{mn}(k_1 k_2 + k_2 k_3 + k_3 k_1) \\ 0 & J_{mn} k_1 k_2 k_3 \end{bmatrix}$$

$$c_d = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

★ 入出力伝達関数ベクトル

$$\ell_d(s) = c_d (sI - A_d)^{-1} B_d$$

$$= \frac{g_d^2 (3s + g_d)}{(s + g_d)^3} \begin{bmatrix} K_{tn} & -J_{mn} s^2 \end{bmatrix}$$

$$k_1 = k_2 = k_3 = -g_d$$

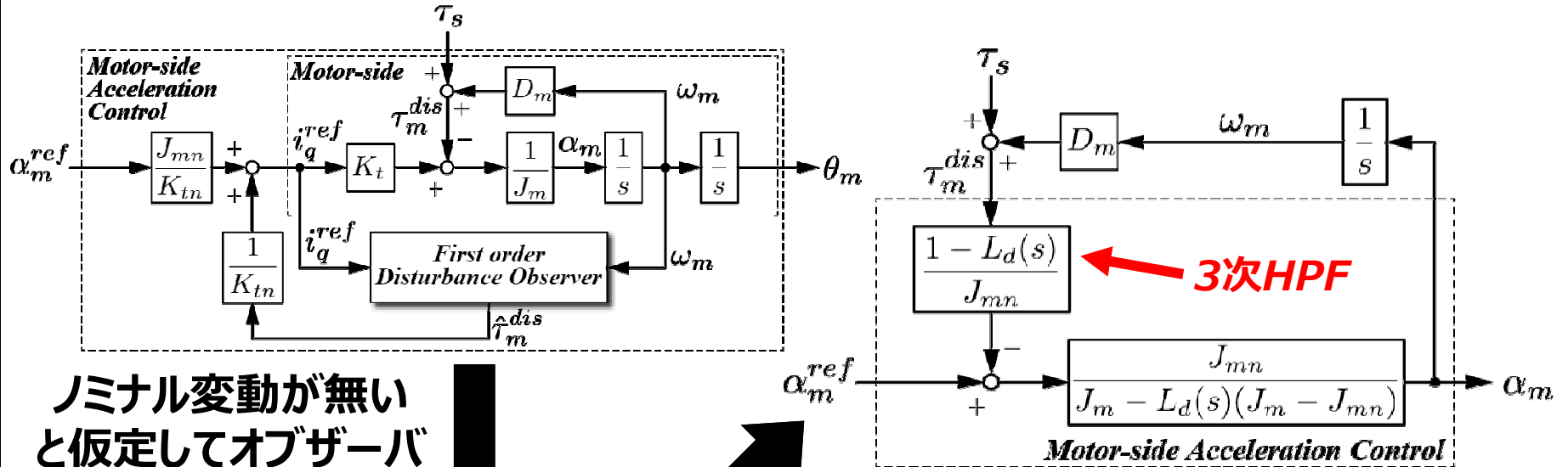
★ 推定値伝達関数 (ノミナル変動無しの場合)

$$L_d(s) = \frac{\hat{\tau}_m^{dis}(s)}{\tau_m^{dis}(s)} = \frac{3g_d^2 s + g_d^3}{s^3 + 3g_d s^2 + 3g_d^2 s + g_d^3}$$

3次LPF

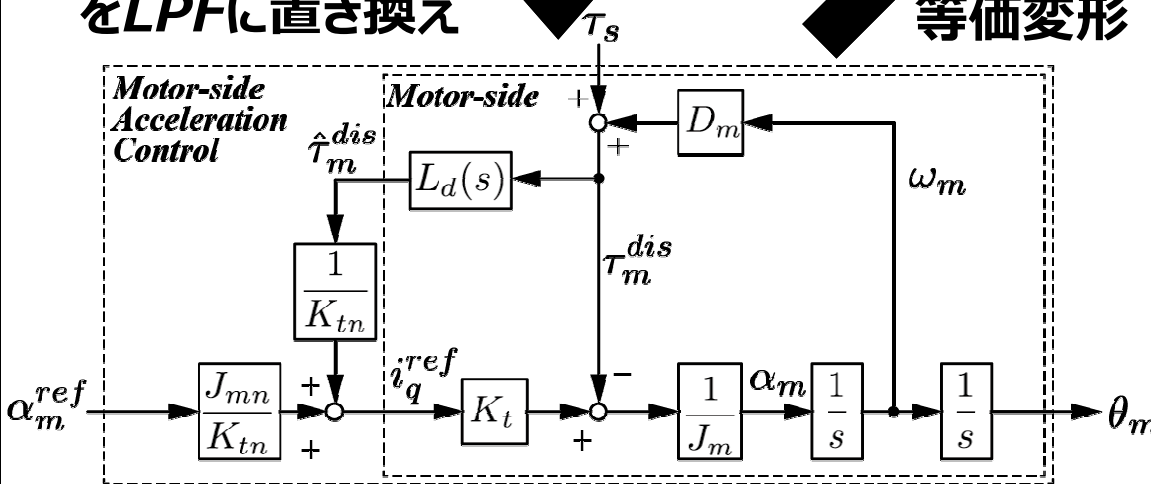
モータ側加速度制御

■ 加速度制御のおさらい



ノミナル変動が無い
と仮定してオブザーバ
をLPFに置き換え

等価変形



$L_d(s) \rightarrow 1$ であれば,
 $J_{mn} \neq J_m$ であっても,

$$\underline{\alpha_m = \alpha_m^{ref}}$$

追従する！

モータ側加速度制御

- 2慣性共振系に適用したらどうなるか？（課題）

従来法

★ 時間応答（外乱オブザーバの帯域が無限の場合）

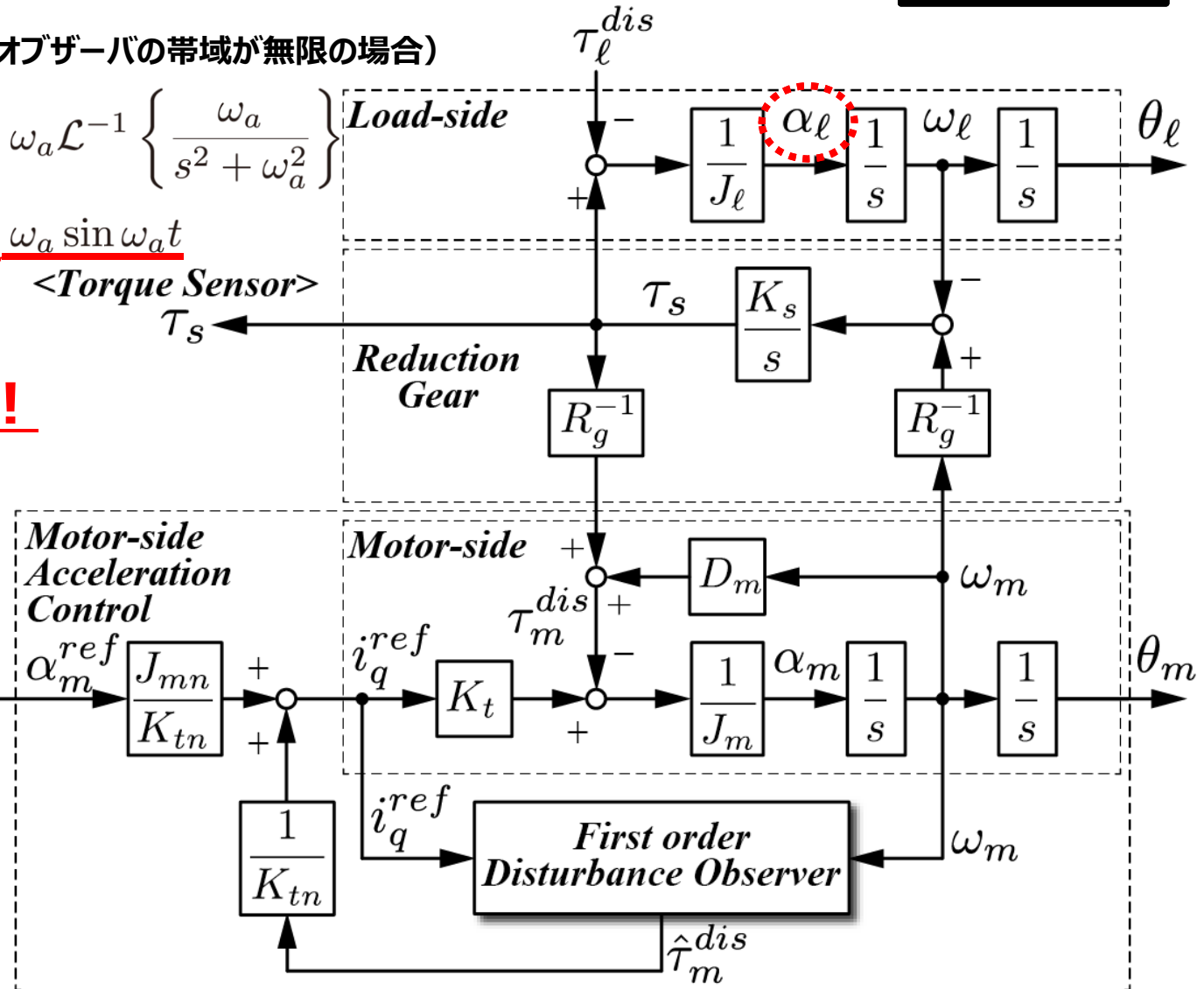
$$\mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{\alpha_\ell(s)}{\tilde{\alpha}_m^{ref}(s)} \right\} = \omega_a \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{\omega_a}{s^2 + \omega_a^2} \right\}$$

$$= \omega_a \sin \omega_a t$$

<Torque Sensor>
 τ_s

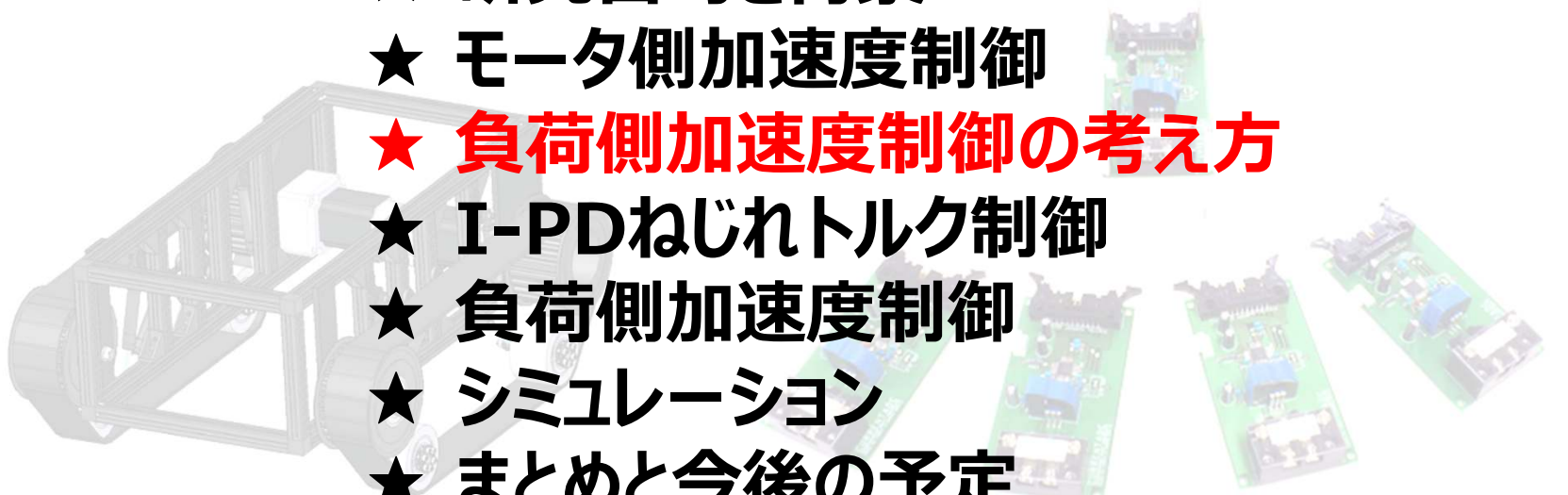
振動が起きる！

負荷側換算用



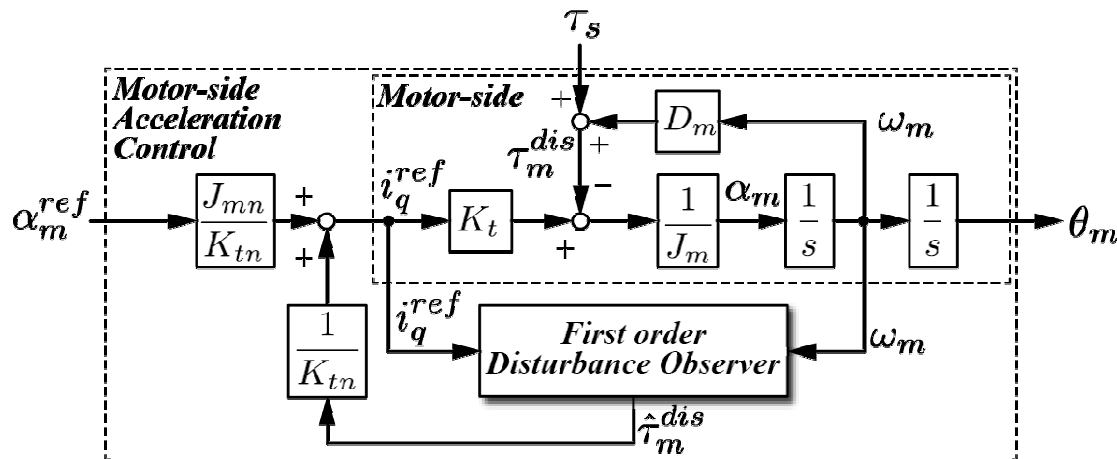


負荷側加速度制御の考え方

- ★ 研究目的と背景
 - ★ モータ側加速度制御
 - ★ **負荷側加速度制御の考え方**
 - ★ I-PDねじれトルク制御
 - ★ 負荷側加速度制御
 - ★ シミュレーション
 - ★ まとめと今後の予定
- 

負荷側加速度制御の考え方

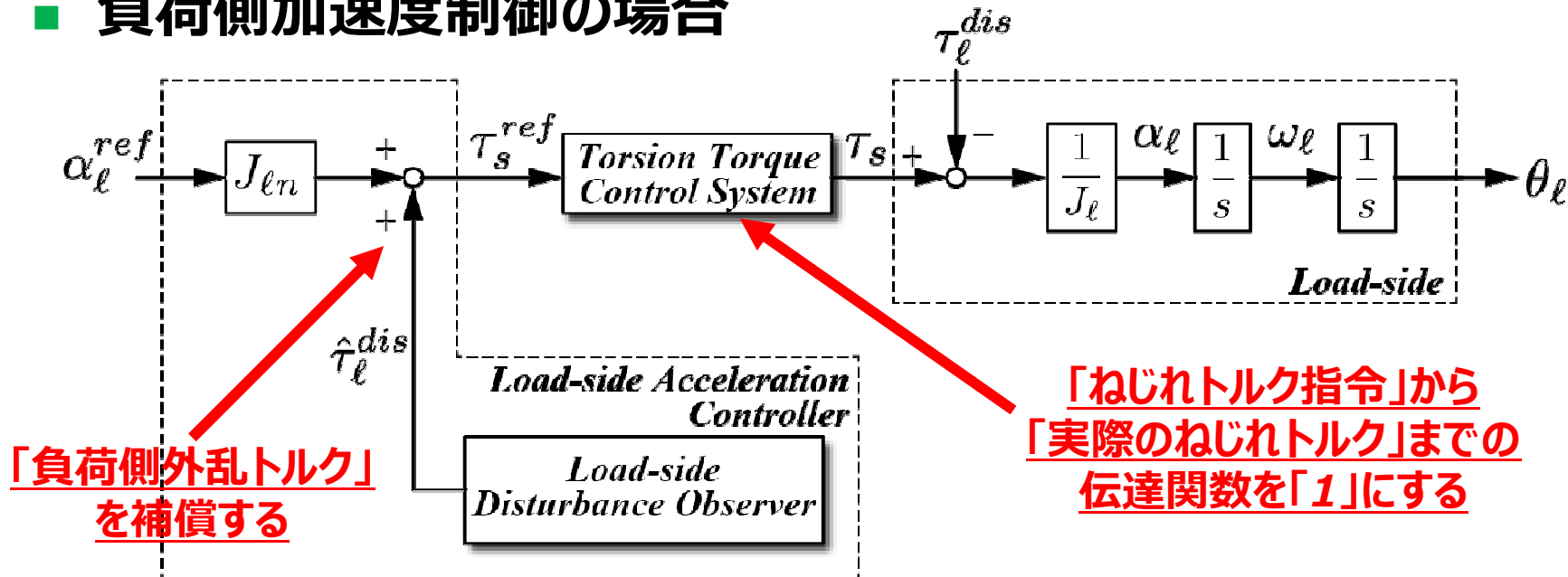
■ モータ側加速度制御の場合



モータ側加速度制御
はこれでできる。

これと同じ形を負荷側
で作れないだろうか？

■ 負荷側加速度制御の場合



「負荷側外乱トルク」
を補償する

「ねじれトルク指令」から
「実際のねじれトルク」までの
伝達関数を「1」にする



I-PDねじれトルク制御

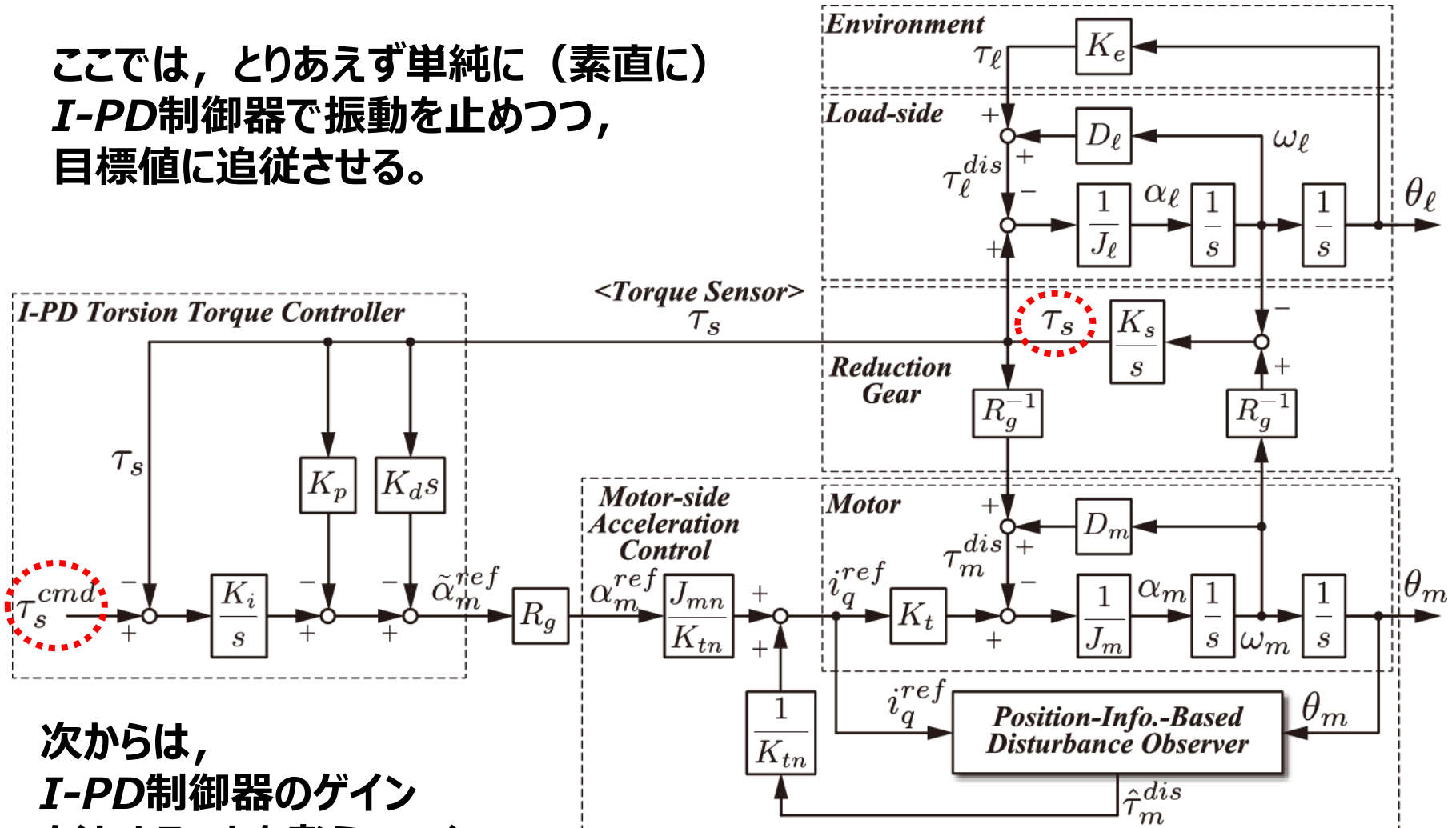
「ねじれトルク指令」から「実際のねじれトルク」までの
伝達関数を「1」にする

- ★ 研究目的と背景
- ★ モータ側加速度制御
- ★ 負荷側加速度制御の考え方
- ★ **I-PDねじれトルク制御**
- ★ 負荷側加速度制御
- ★ シミュレーション
- ★ まとめと今後の予定

I-PDねじれトルク制御

■ 全体のブロック図

ここでは、とりあえず単純に（素直に）
I-PD制御器で振動を止めつつ、
目標値に追従させる。

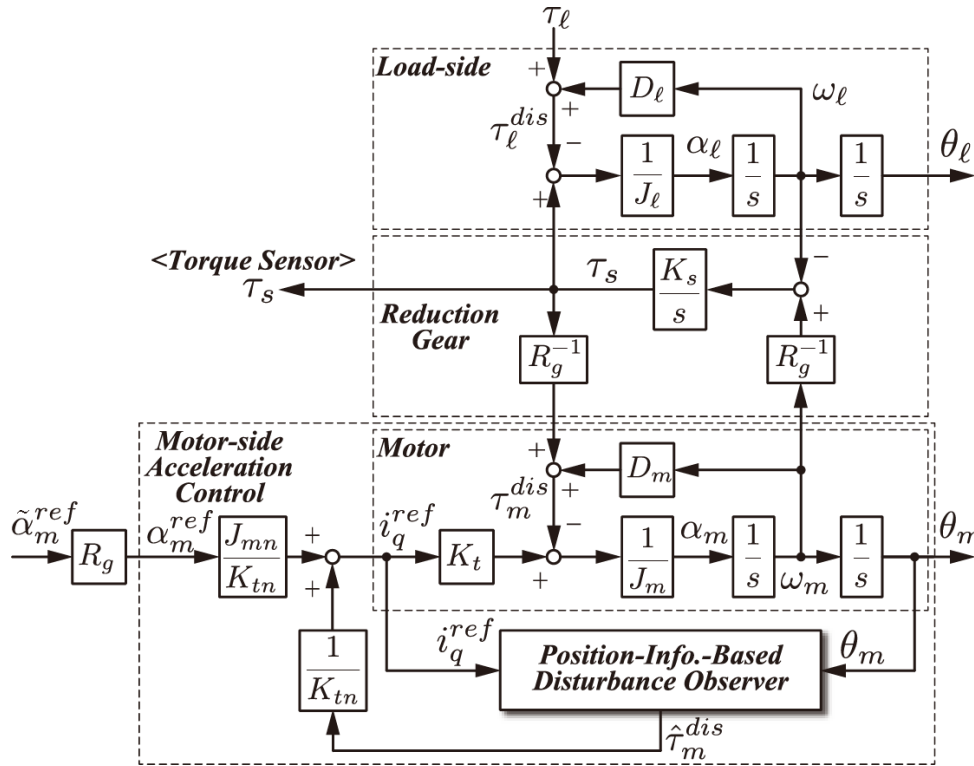


次からは、
I-PD制御器のゲイン
を決めることを考えていく。

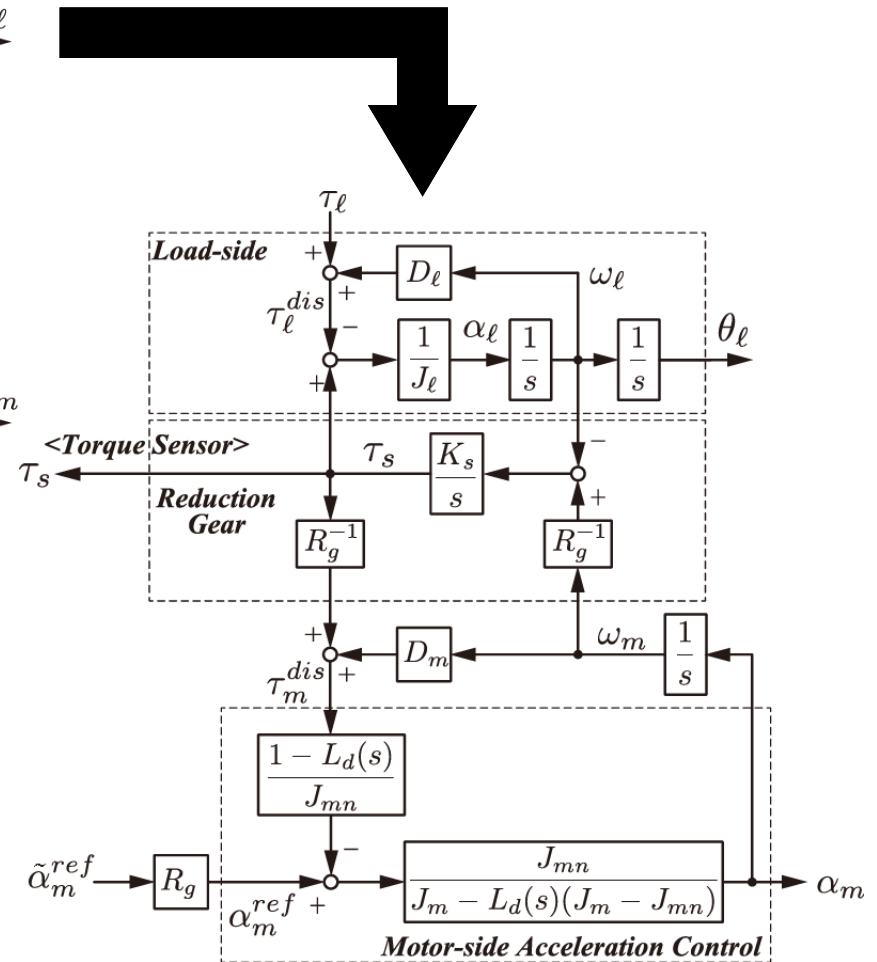
I-PDねじれトルク制御

■ ゲイン計算のための簡単化

ちょっと複雑で面倒なので簡単化



等価変換



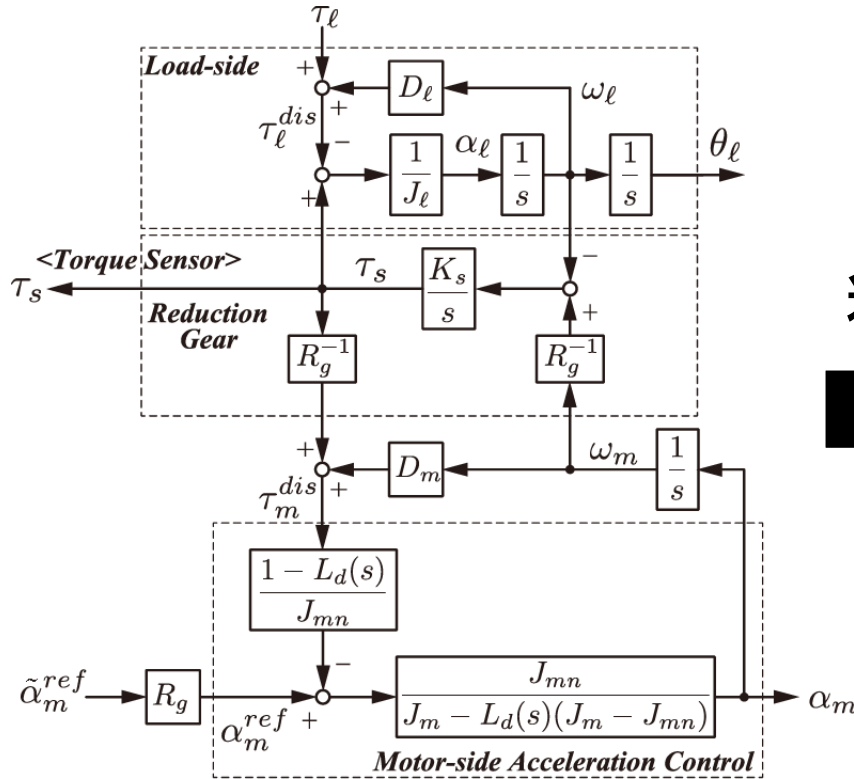
★ 真値から外乱推定値までの伝達関数

$$L_d(s) = \frac{\hat{\tau}_m^{dis}(s)}{\tau_m^{dis}(s)} = \frac{k_1}{s^2 + k_2s + k_1}$$

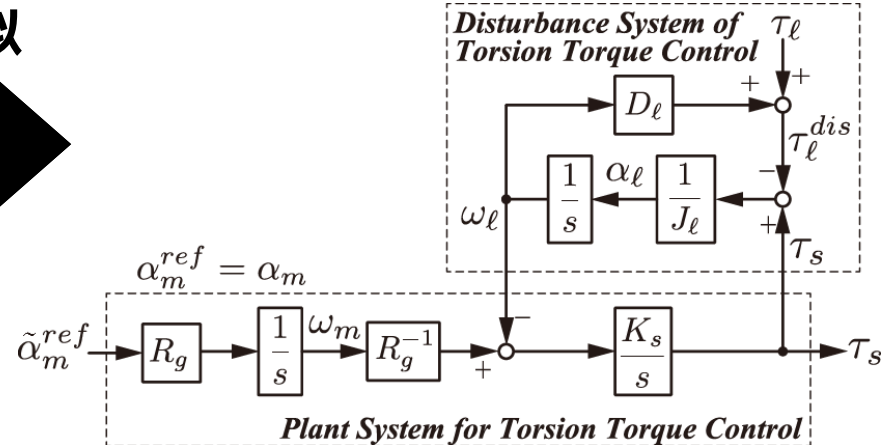
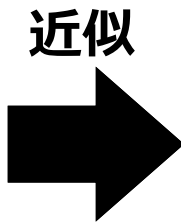
$$k_1 = g_d^2 \quad k_2 = \frac{g_d}{Q_d}$$

I-PDねじれトルク制御

■ ゲイン計算のための簡単化



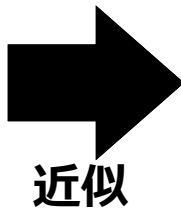
簡単化されたモータ側加速度制御系



★ 真値から外乱推定値までの伝達関数

$$L_d(s) = \frac{\hat{\tau}_m^{dis}(s)}{\tau_m^{dis}(s)} = \frac{k_1}{s^2 + k_2s + k_1}$$

$$k_1 = g_d^2 \quad k_2 = \frac{g_d}{Q_d}$$

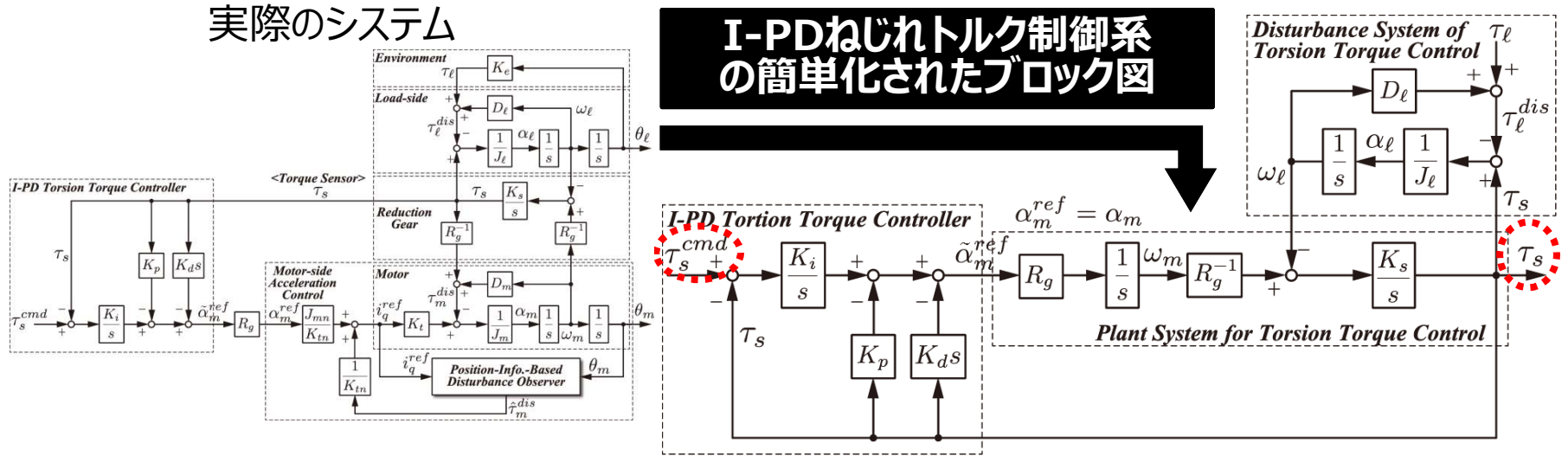


外乱オブザーバは理想的な動作をすると仮定

$$g_d \rightarrow \infty \Leftrightarrow L_d(s) \rightarrow 1$$

I-PDねじれトルク制御

■ ゲイン計算のための簡単化



■ I-PDねじれトルク制御系の伝達関数

$$T(s) = \frac{\tau_s(s)}{\tau_s^{cmd}(s)} = \frac{K_s K_i s + \frac{K_s}{J_l} K_i D_l}{s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$$

極の数 = 4
ゲインの数 = 3

↓
決まらない

$$a_3 = \frac{D_l}{J_l} + K_s K_d$$

$$a_2 = \frac{K_s}{J_l} + \frac{K_s}{J_l} K_d D_l + K_s K_p$$

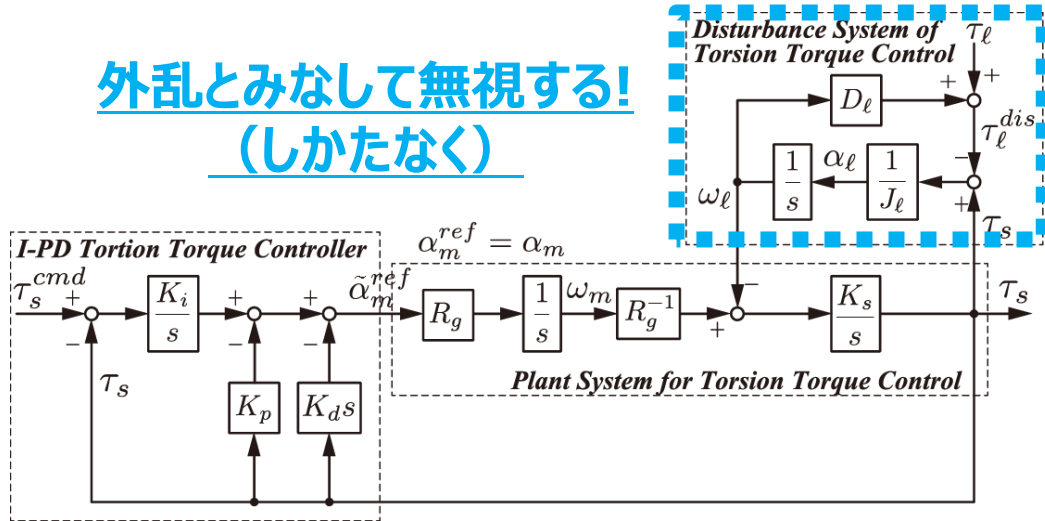
$$a_1 = K_s K_i + \frac{K_s}{J_l} K_p D_l$$

$$a_0 = \frac{K_s}{J_l} K_i D_l$$

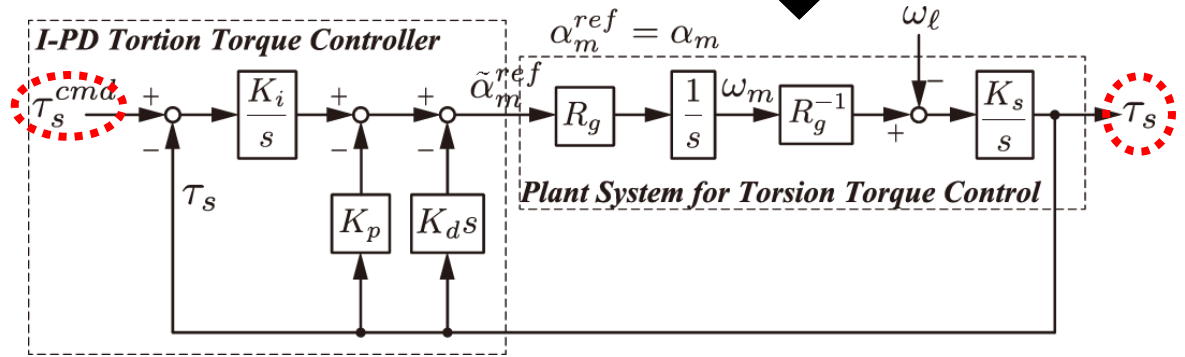
I-PDねじれトルク制御

■ ゲイン計算のための簡単化

外乱とみなして無視する!
(しかたなく)



**I-PDねじれトルク制御系の
簡単化されたブロック図**



■ 指令値伝達関数

$$T'(s) = \frac{\tau_s(s)}{\tau_s^{cmd}(s)}$$

$$= \frac{K_s K_i}{s^3 + K_s K_d s^2 + K_s K_p s + K_s K_i}$$

極の数 = 3
ゲインの数 = 3

これで決定できる

I-PDねじれトルク制御

■ I-PD制御器のゲイン計算

➤ 欲しい伝達関数

$$T''(s) = \frac{K_s K_i}{(s - p_1)(s - p_2)(s - p_3)}$$

あとはただの係数比較による
極配置法をやるだけ。

(すごい素直な多項式)

➤ 実際の伝達関数

$$T'(s) = \frac{\tau_s(s)}{\tau_s^{cmd}(s)} = \frac{K_s K_i}{s^3 + K_s K_d s^2 + K_s K_p s + K_s K_i}$$

➤ I-PD制御器のゲイン

$$K_i = -\frac{p_1 p_2 p_3}{K_{sn}}$$

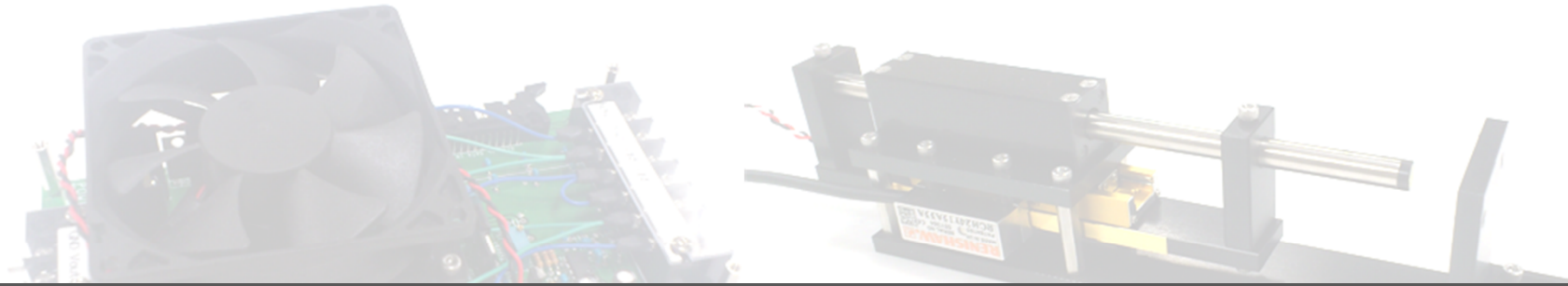
$$K_p = \frac{p_1 p_2 + p_2 p_3 + p_3 p_1}{K_{sn}}$$

$$K_d = -\frac{p_1 + p_2 + p_3}{K_{sn}}$$

ねじれトルク最終値

$$\lim_{s \rightarrow 0} sT(s) \frac{1}{s} = \frac{\frac{K_s}{J_\ell} K_i D_\ell}{a_0} = 1$$

安定で、極を左に持っていければ、
「ねじれトルク指令値」から
「ねじれトルク応答値」までの伝達関数は
「1」に近づく



負荷側加速度制御

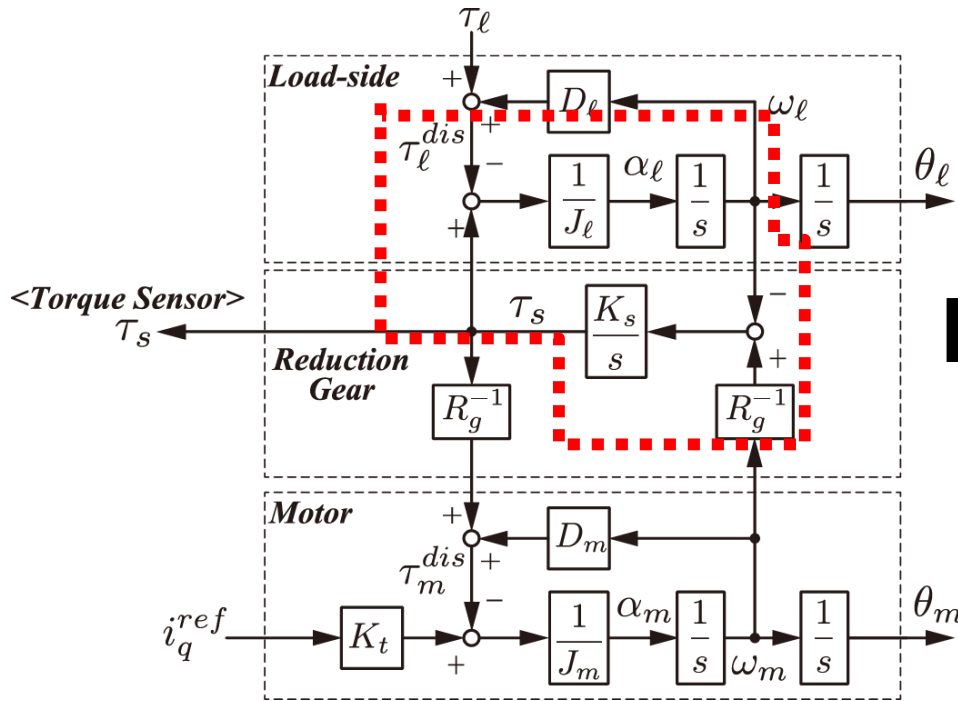
「負荷側外乱トルク」を補償する

- ★ 研究目的と背景
- ★ モータ側加速度制御
- ★ 負荷側加速度制御の考え方
- ★ I-PDねじれトルク制御
- ★ **負荷側加速度制御**
- ★ シミュレーション
- ★ まとめと今後の予定

負荷側加速度制御

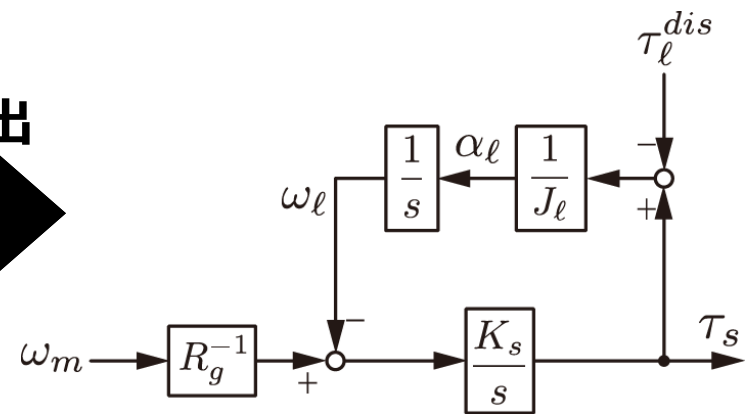
■ 負荷側外乱オブザーバ

➤ 2慣性共振系（モータ，減速機，負荷側システム）



観測対象

抽出



状態方程式を導出

$$A_l = \begin{bmatrix} 0 & -K_s & 0 \\ J_l^{-1} & 0 & -J_l^{-1} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$b_l = [K_s R_g^{-1} \quad 0 \quad 0]^T$$

$$c_l = [1 \quad 0 \quad 0]$$

$$\dot{x}_l = A_l x_l + b_l u_l$$

$$y_l = c_l x_l$$

$$x_l = [\tau_s \quad \omega_l \quad \tau_l^{dis}]^T$$

$$u_l = \omega_m, \quad y_l = \tau_s$$

負荷側加速度制御

■ 負荷側外乱オブザーバ

➤ オブザーバの導出

$$A_\ell = \begin{bmatrix} 0 & -K_s & 0 \\ J_\ell^{-1} & 0 & -J_\ell^{-1} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$b_\ell = [K_s R_g^{-1} \quad 0 \quad 0]^T$$

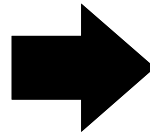
$$c_\ell = [1 \quad 0 \quad 0]$$

$$\dot{x}_\ell = A_\ell x_\ell + b_\ell u_\ell$$

$$y_\ell = c_\ell x_\ell$$

$$x_\ell = [\tau_s \quad \omega_\ell \quad \hat{\tau}_\ell^{dis}]^T$$

$$u_\ell = \omega_m, \quad y_\ell = \tau_s$$



負荷側外乱オブザーバ

全状態(Full Order)状態オブザーバ

$$\dot{\hat{x}}_\ell = A_{dl} \hat{x}_\ell + B_{dl} u_{dl}$$

$$y_{dl} = c_{dl} \hat{x}_\ell$$

$$u_{dl} = [\omega_m \quad \tau_s]^T$$

$$y_{dl} = \hat{\tau}_\ell^{dis}$$

$$A_{dl} = \begin{bmatrix} \ell_1 + \ell_2 + \ell_3 & -K_{sn} & 0 \\ (\ell_1 \ell_2 + \ell_2 \ell_3 + \ell_3 \ell_1) K_{sn}^{-1} & 0 & -J_{\ell n}^{-1} \\ \ell_1 \ell_2 \ell_3 J_{\ell n} K_{sn}^{-1} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{dl} = \begin{bmatrix} K_{sn} R_g^{-1} & -(\ell_1 + \ell_2 + \ell_3) \\ 0 & J_{\ell n}^{-1} - (\ell_1 \ell_2 + \ell_2 \ell_3 + \ell_3 \ell_1) K_{sn}^{-1} \\ 0 & -\ell_1 \ell_2 \ell_3 J_{\ell n} K_{sn}^{-1} \end{bmatrix}$$

$$c_{dl} = [0 \quad 0 \quad 1]$$

「モータ速度」と「ねじれトルク」から推定

➤ 伝達関数ベクトルと、真値から推定値までの伝達関数

$$l_{dl}(s) = c_{dl} (sI - A_{dl})^{-1} B_{dl} = \begin{bmatrix} \hat{\tau}_\ell^{dis}(s) \\ \omega_m(s) \end{bmatrix} = \frac{-\ell_1 \ell_2 \ell_3}{(s - \ell_1)(s - \ell_2)(s - \ell_3)} \begin{bmatrix} -\frac{J_{\ell n}}{R_g} s & \frac{J_{\ell n}}{K_{sn}} s^2 + 1 \end{bmatrix}$$

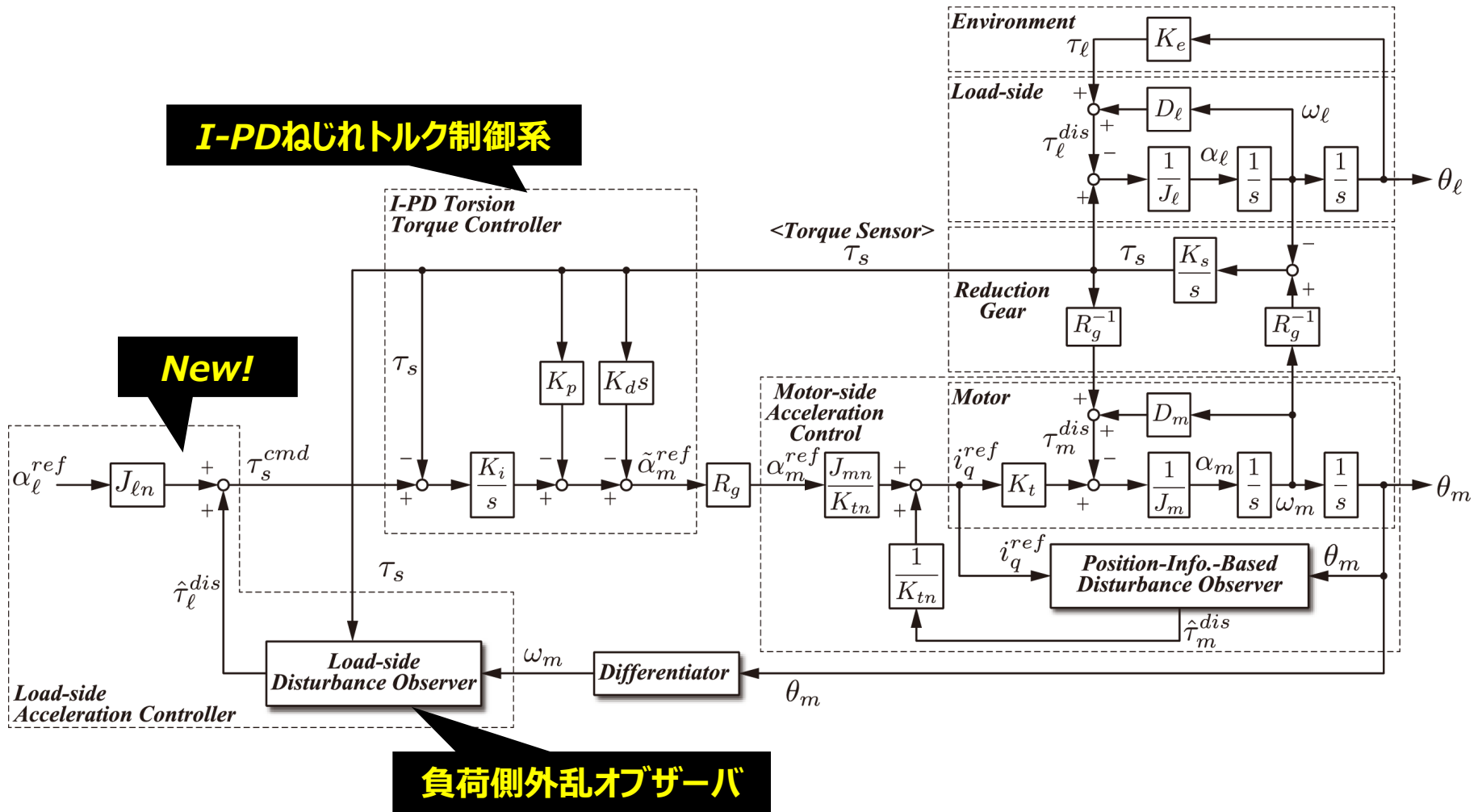
$$\hat{\tau}_\ell^{dis} = \frac{-\ell_1 \ell_2 \ell_3}{(s - \ell_1)(s - \ell_2)(s - \ell_3)} \tau_\ell^{dis} \quad (J_{\ell n} = J_\ell)$$

3次遅れで推定

負荷側加速度制御

- I-PDねじれトルク制御系をマイナーループとする
負荷側加速度制御系

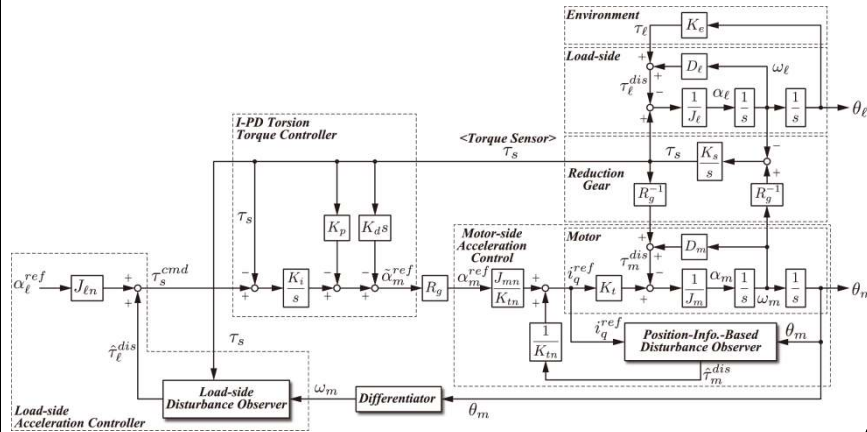
提案法



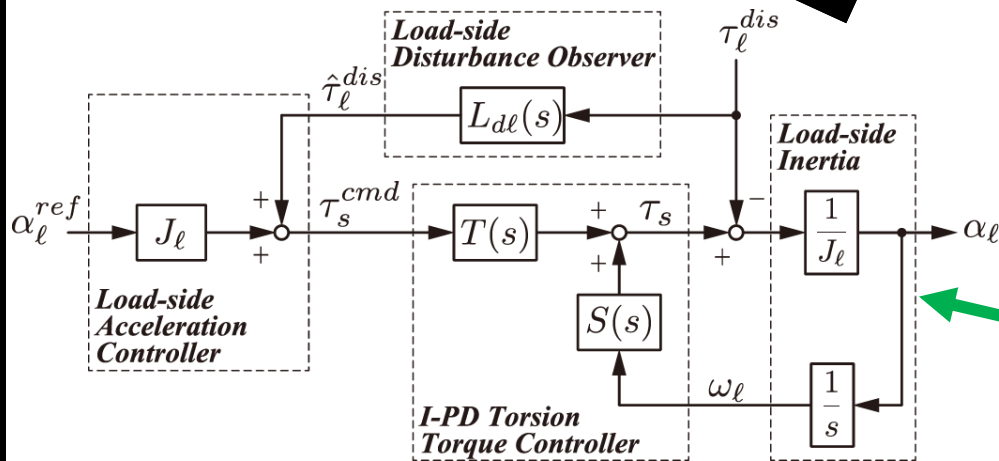
負荷側加速度制御

■ 負荷側加速度制御系

➤ 加速度指令値に加速度応答値が収束するかどうか？



等価変換
($J_{ln} = J_l$)



$$\alpha_l = \frac{s}{J_l s + S(s)} \left\{ \alpha_l^{ref} J_l T(s) + (L_{dl}(s) T(s) - 1) \tau_l^{dis} \right\}$$

$$T(s) \rightarrow 1$$

$$S(s) \rightarrow 0$$

$$\alpha_l = \frac{1}{J_l} \left\{ \alpha_l^{ref} J_l + (L_{dl}(s) - 1) \tau_l^{dis} \right\}$$

$$L_{dl}(s) \rightarrow 1$$

$$\alpha_l = \alpha_l^{ref}$$

収束する!

モータ側加速度制御と
同じような形になる

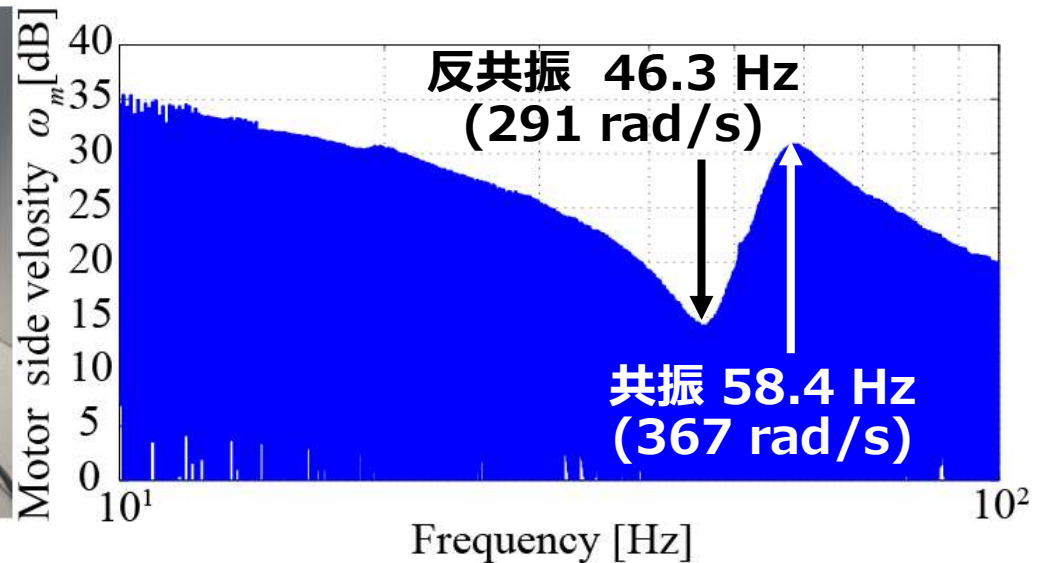
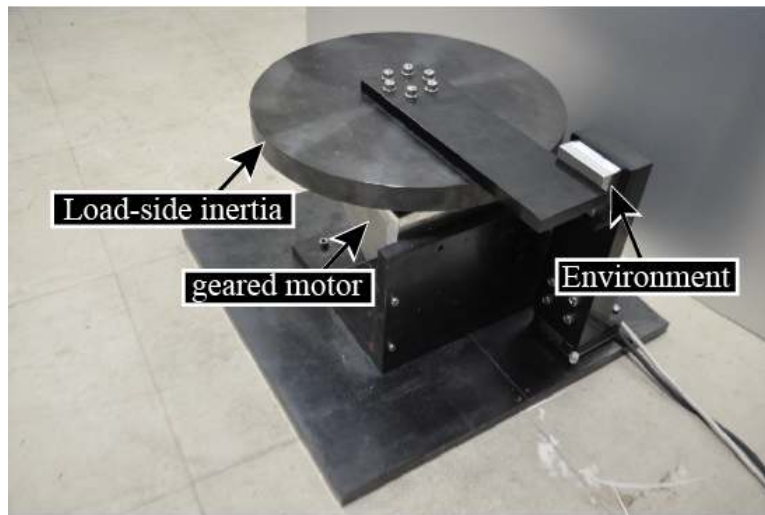
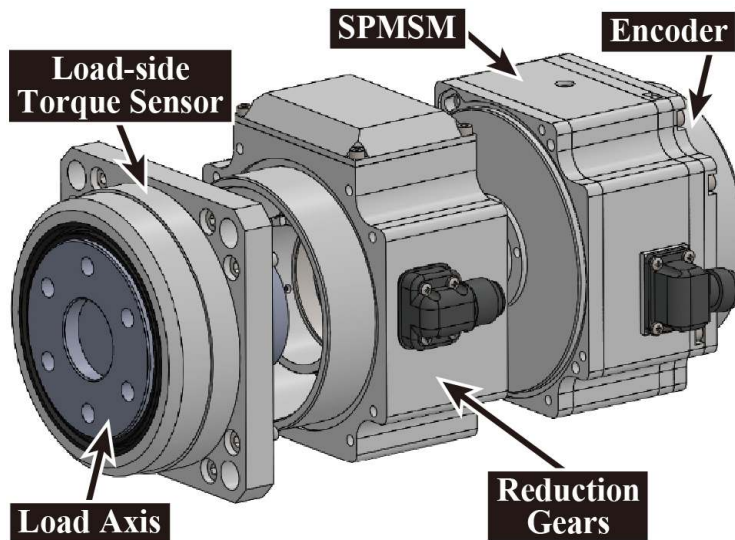


シミュレーション

- ★ 研究目的と背景
- ★ モータ側加速度制御
- ★ 負荷側加速度制御の考え方
- ★ I-PDねじれトルク制御
- ★ 負荷側加速度制御
- ★ シミュレーション
- ★ まとめと今後の予定

シミュレーション

予備実験



シミュレーション

■ プラントパラメータ

Parameters		
Torque constant	K_t	0.490 Nm/A
Inertia in motor-side	J_m	1.40×10^{-4} kgm ²
Inertia in load-side	J_ℓ	0.207 kgm ²
Viscosity friction in motor-side	D_m	0 Nms/rad
Viscosity friction in load-side	D_ℓ	0 Nms/rad
Stiffness between motor-side and load-side	K_s	443 Nm/rad
Gear Ratio	R_g	50.0
Anti-resonance frequency	ω_a	46.3 Hz (291 rad/s)
Resonance frequency	ω_r	58.4 Hz (367 rad/s)

■ コントローラパラメータ

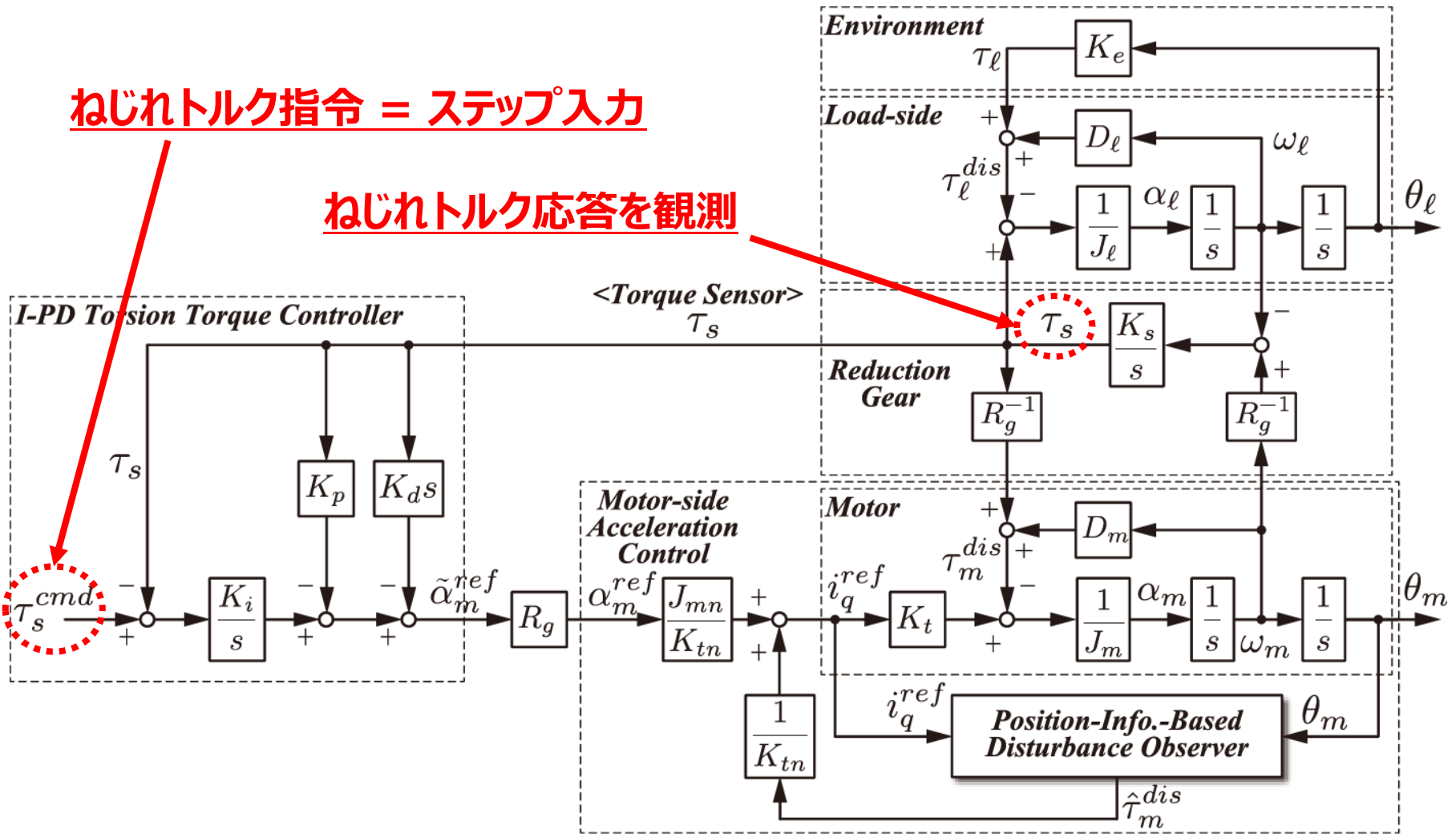
Parameters		
Bandwidth of pseudo differentiator	g_{pd}	6280 rad/s
Bandwidth of disturbance observer	g_d	300 rad/s
Quality factor of disturbance observer	Q_d	0.5
Bandwidth of load-side disturbance observer	$g_{d\ell}$	300 rad/s
Poles of load-side disturbance observer	ℓ_1, ℓ_2, ℓ_3	$-g_{d\ell}$
1st pole of I-PD torque controller	p_1	330 rad/s
2nd pole of I-PD torque controller	p_2	300 rad/s
3rd pole of I-PD torque controller	p_3	270 rad/s

シミュレーション

I-PDねじれトルク制御

ねじれトルク指令 = ステップ入力

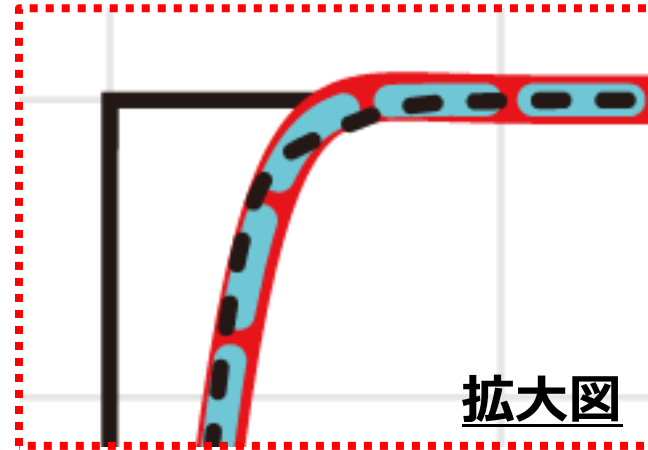
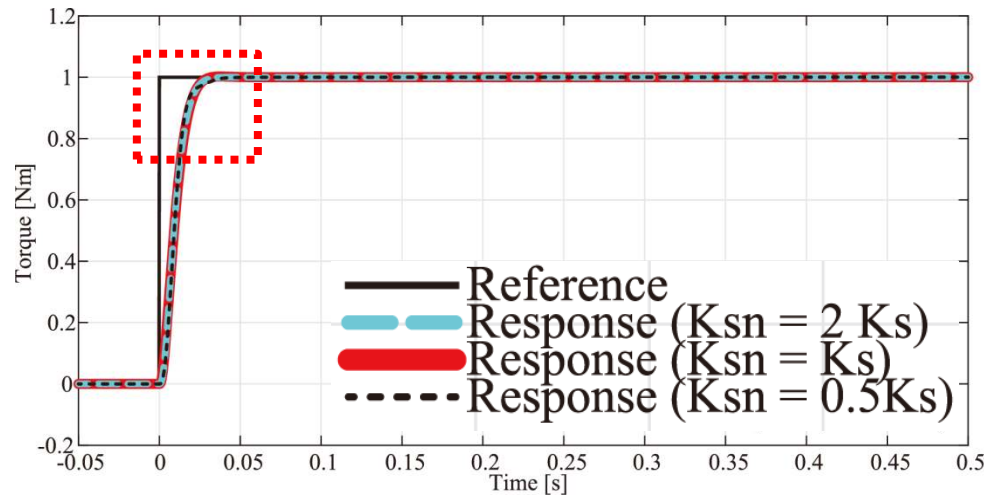
ねじれトルク応答を観測



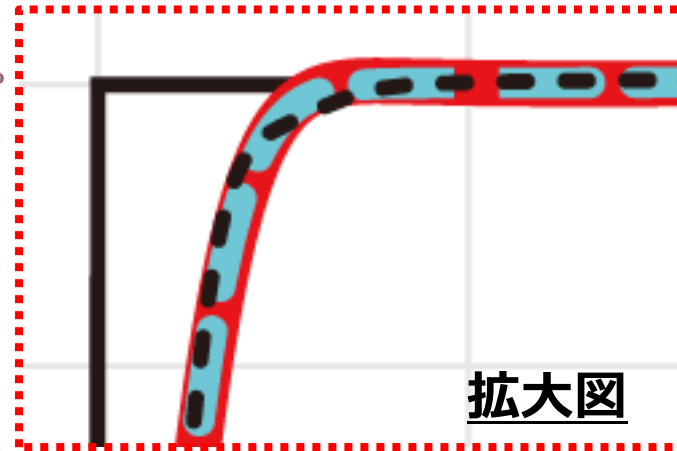
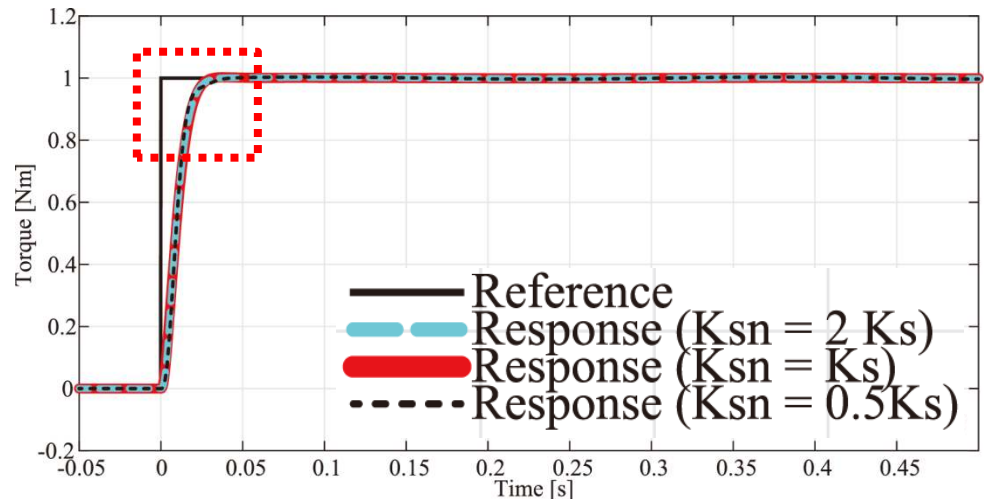
シミュレーション

I-PDねじれトルク制御

➤ 環境剛性 $K_e = 1 \text{ Nm/rad}$



➤ 環境剛性 $K_e = 100 \text{ Nm/rad}$



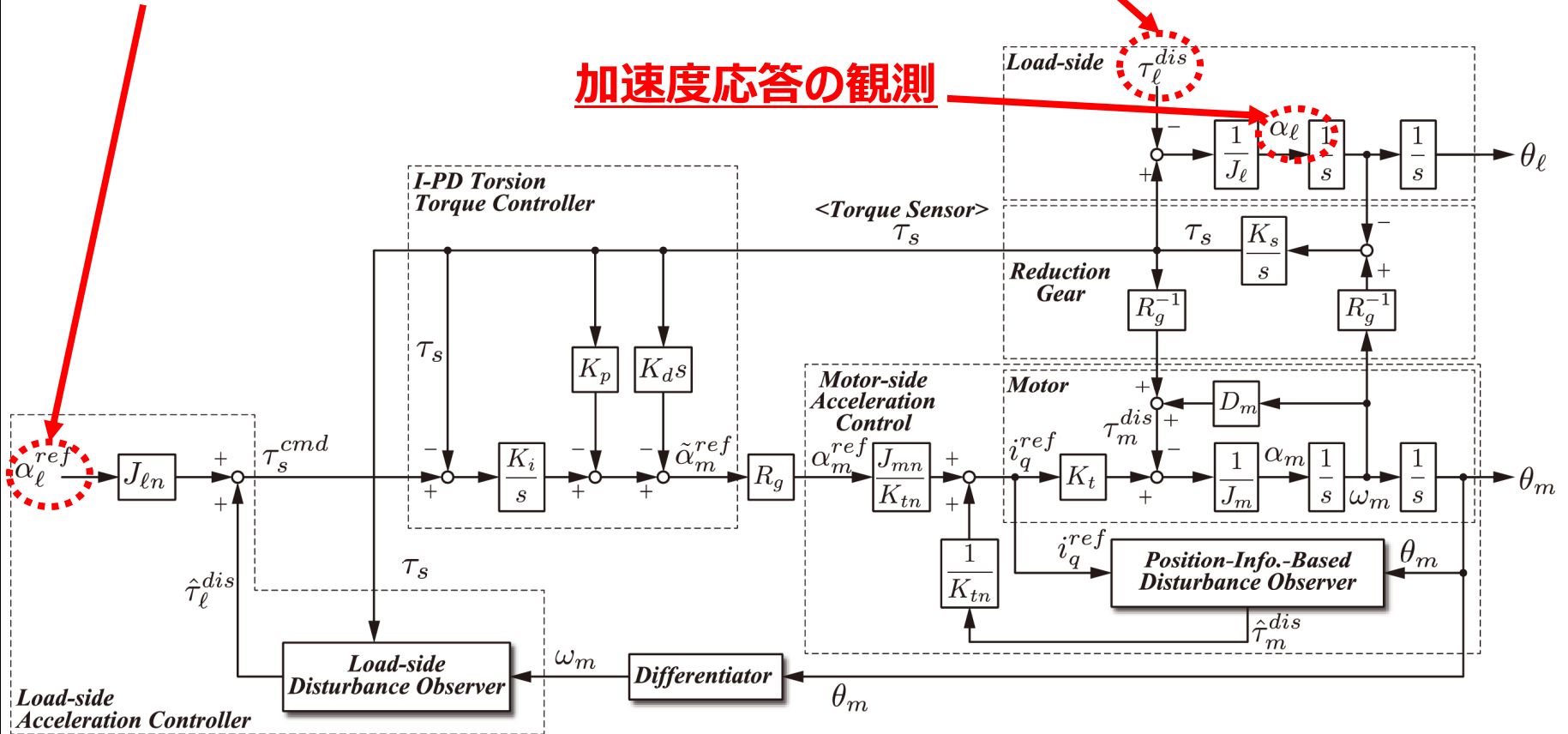
シミュレーション

■ 負荷側加速度制御

加速度指令 = ステップ入力

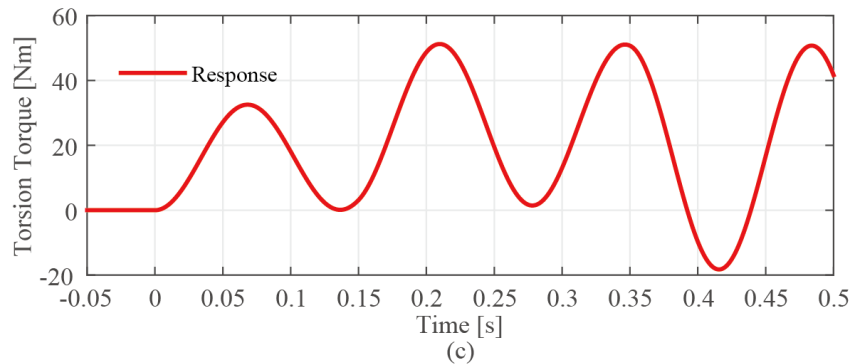
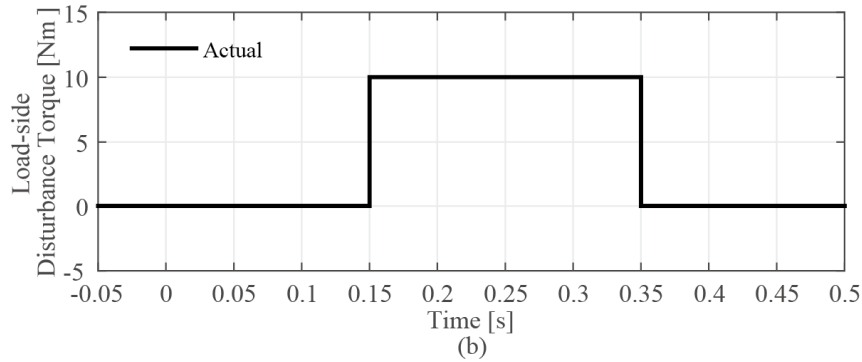
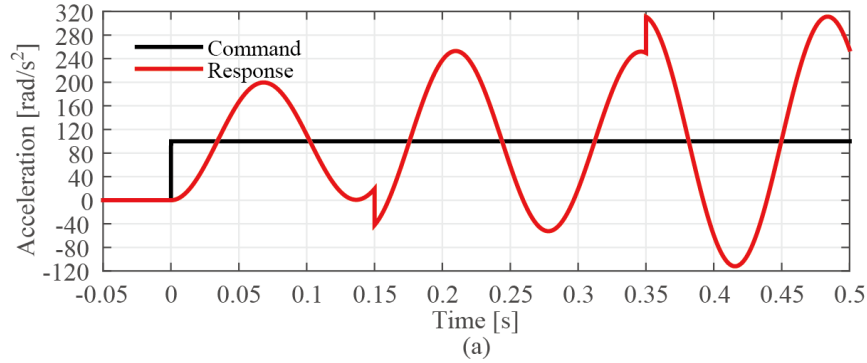
負荷側外乱 = ステップ入力

加速度応答の観測

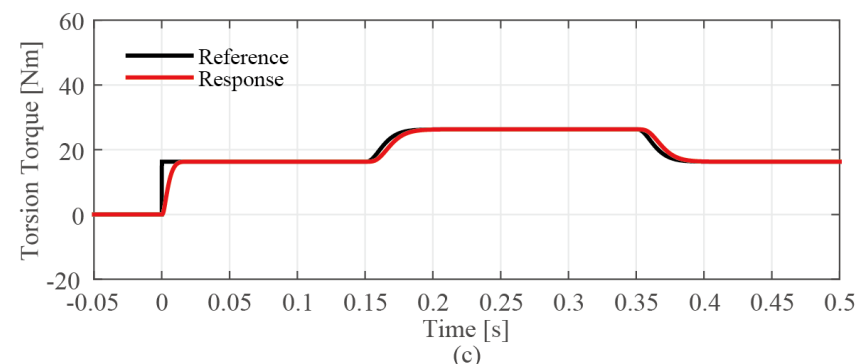
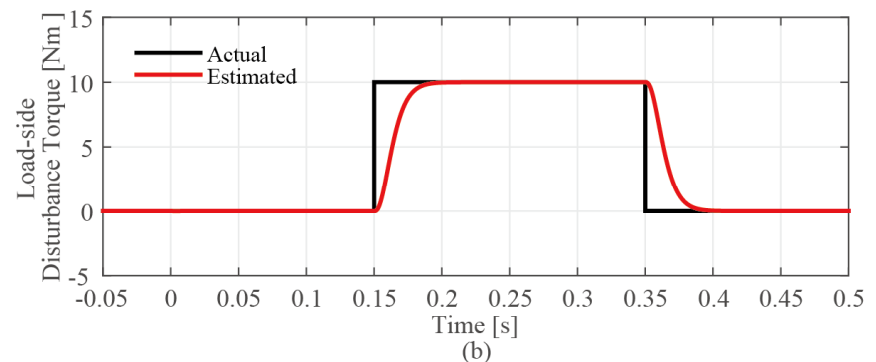
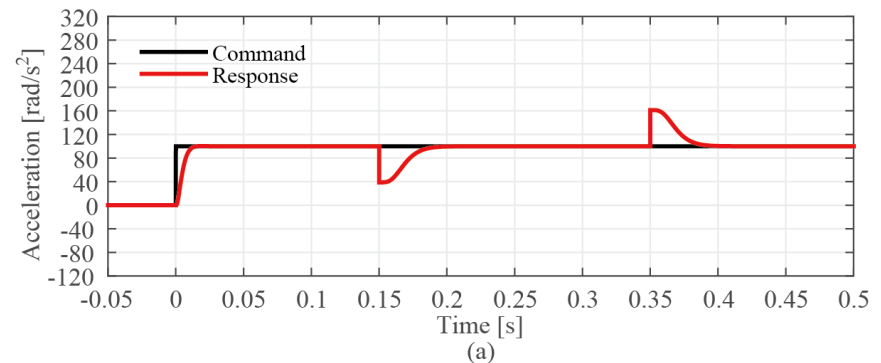


シミュレーション

モータ側加速度制御 (従来法)



負荷側加速度制御 (提案法)



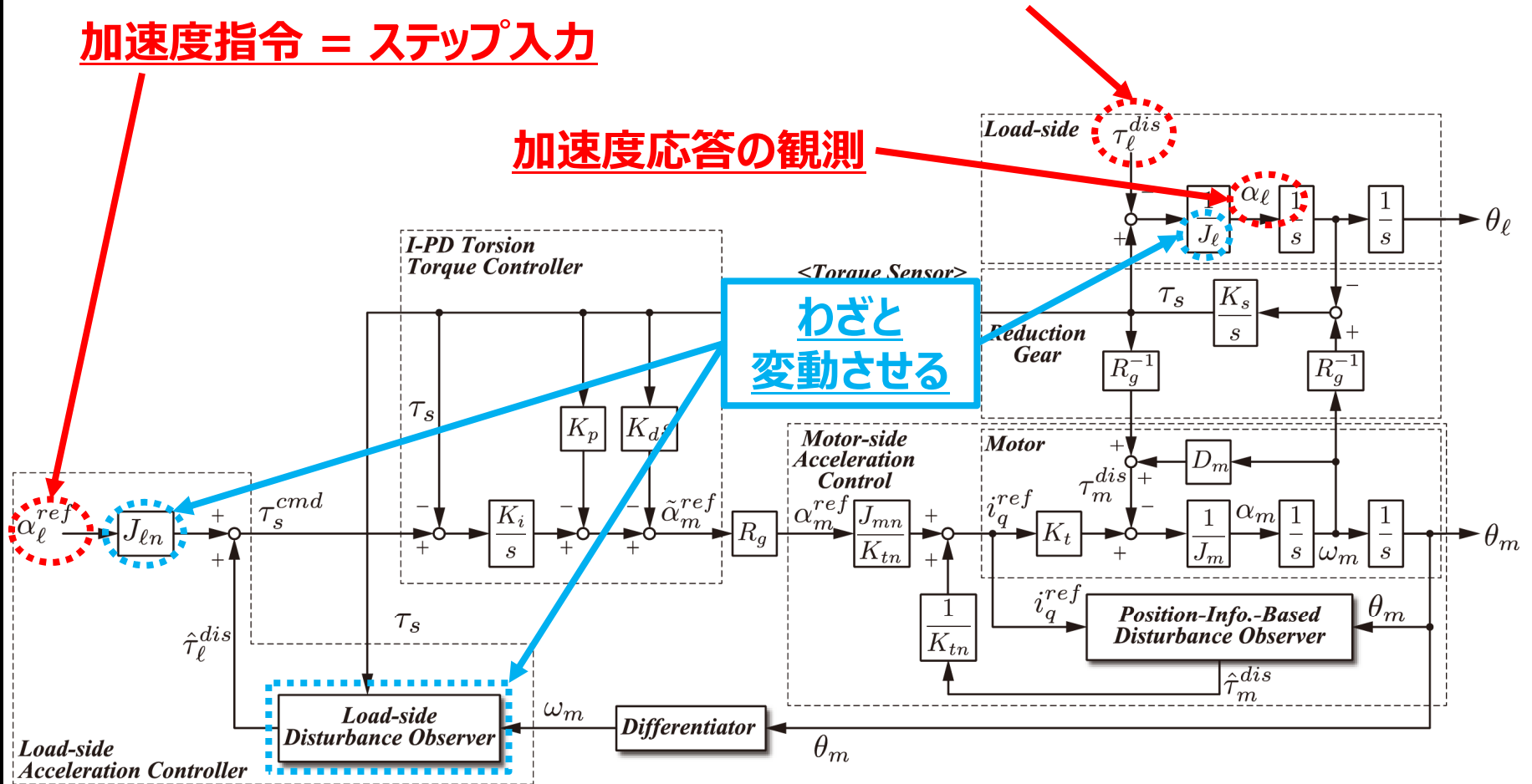
シミュレーション

■ 負荷側加速度制御（慣性モーメントの変動）

加速度指令 = ステップ入力

負荷側外乱 = ステップ入力

加速度応答の観測

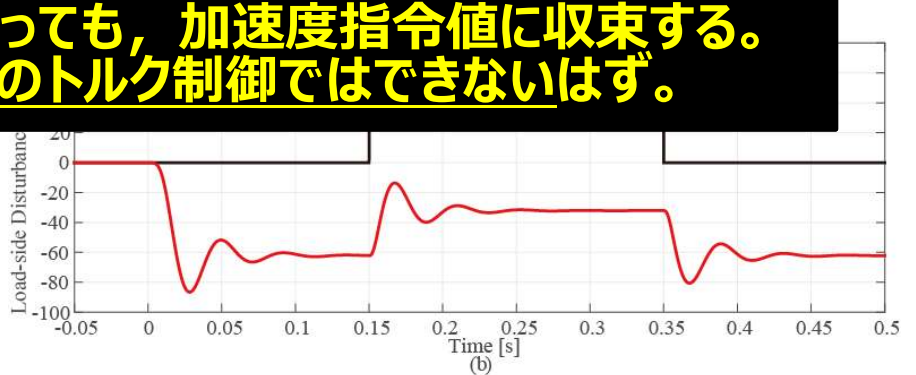
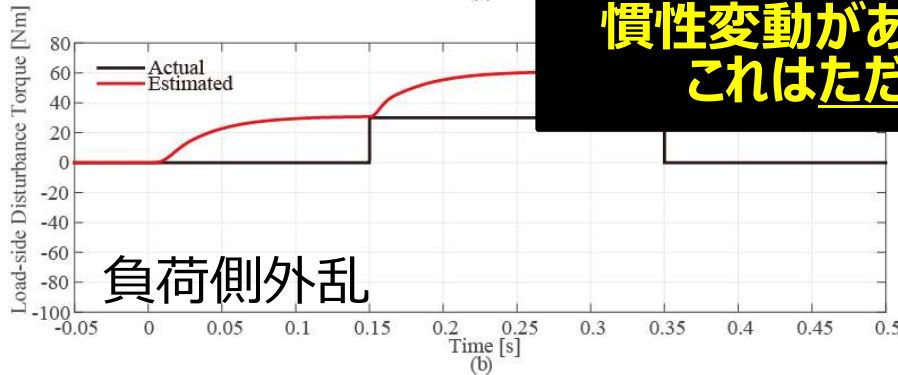
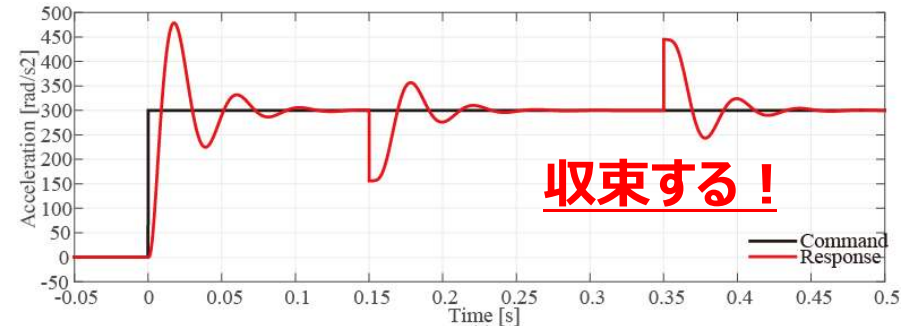
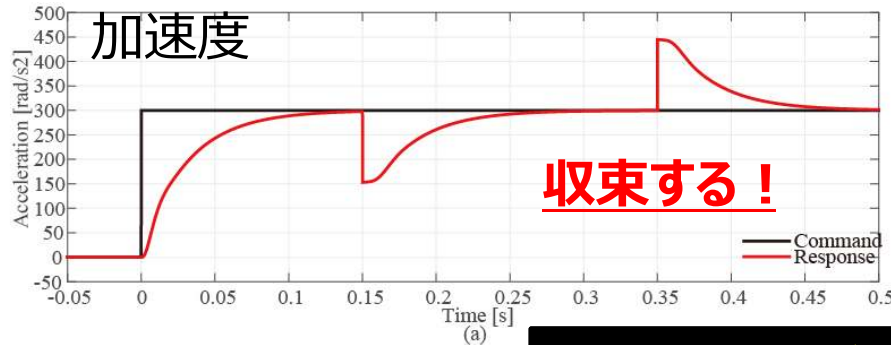


シミュレーション

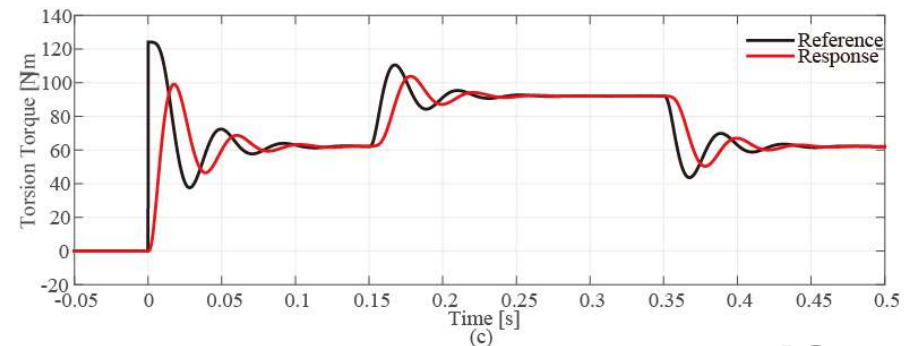
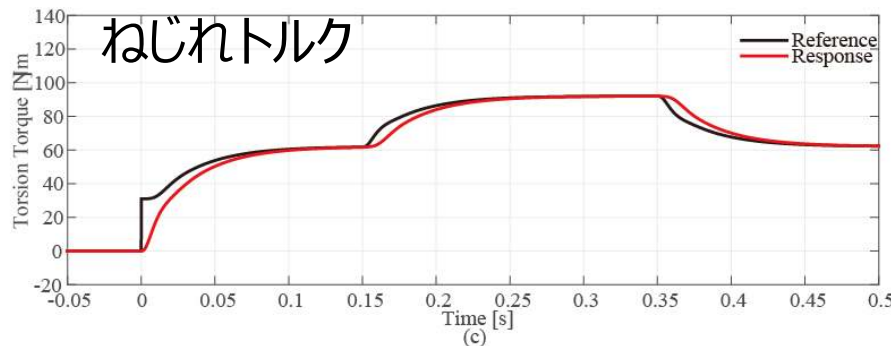
■ 負荷側加速度制御（慣性モーメントの変動）

$J_n = 0.5 J$

$J_n = 2 J$



慣性変動があっても、加速度指令値に収束する。
これはただのトルク制御ではできないはず。

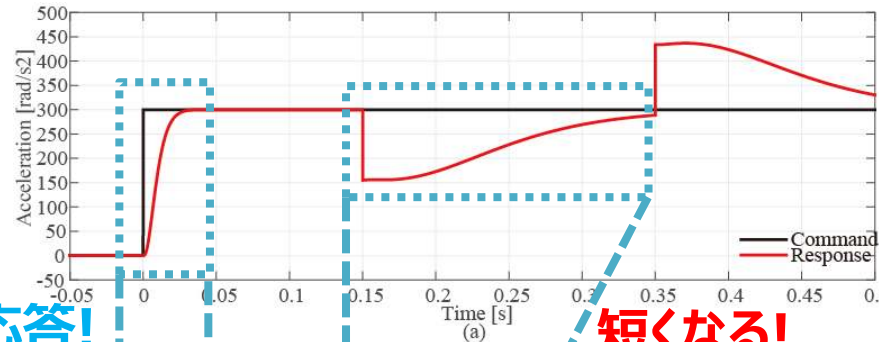


シミュレーション

■ 2自由度制御ができるかどうかの確認

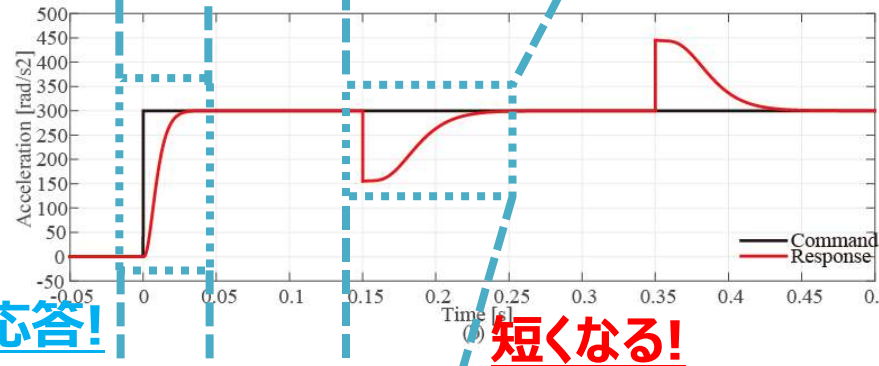
(目標値応答と外乱抑圧応答の確認)

負荷側外乱
オブザーバの帯域
 $gdl = -30 \text{ rad/s}$



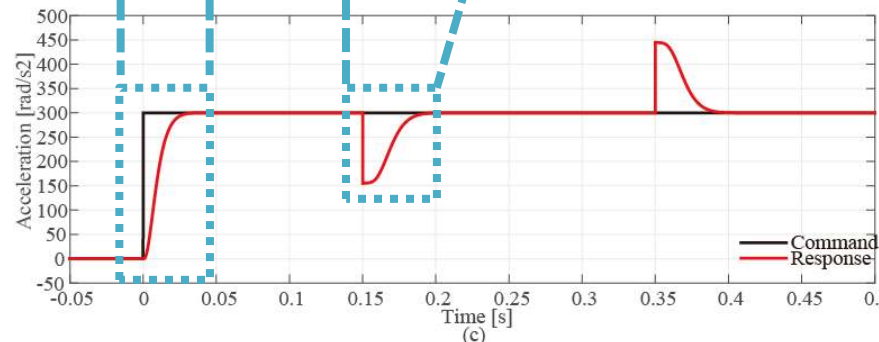
加速度指令と
加速度応答

負荷側外乱
オブザーバの帯域
 $gdl = -100 \text{ rad/s}$



加速度指令と
加速度応答

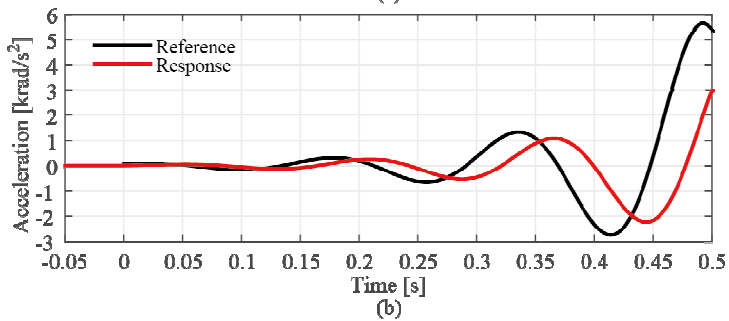
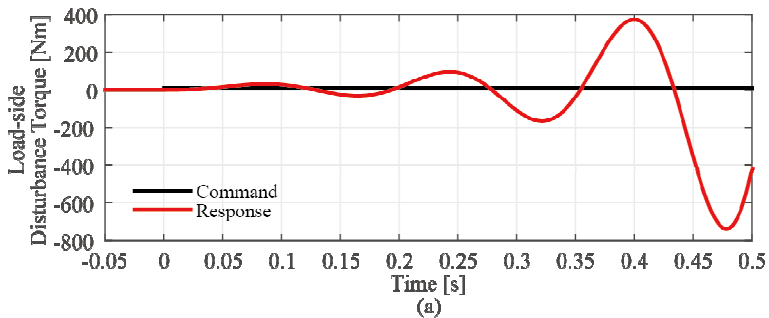
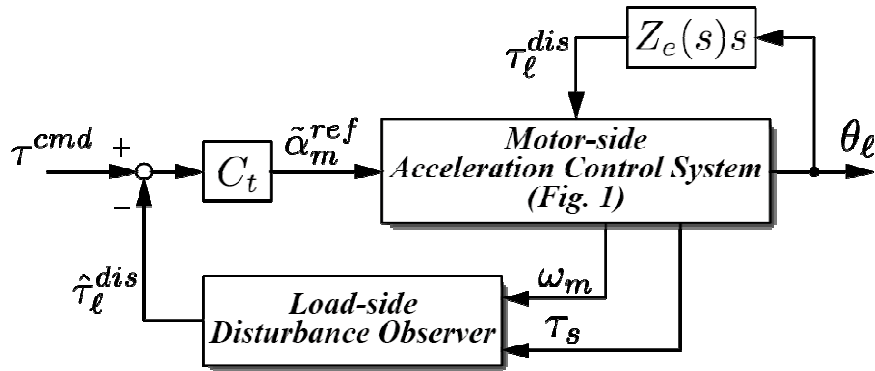
負荷側外乱
オブザーバの帯域
 $gdl = -300 \text{ rad/s}$



加速度指令と
加速度応答

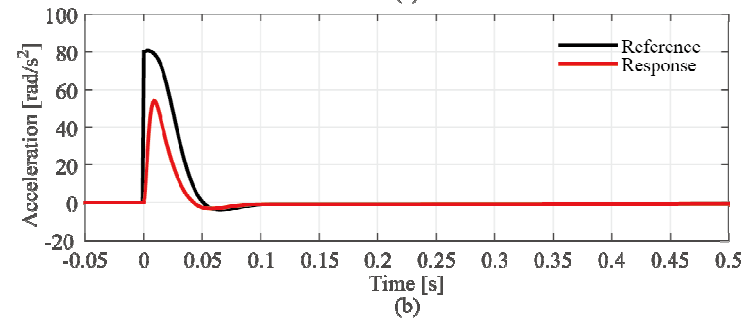
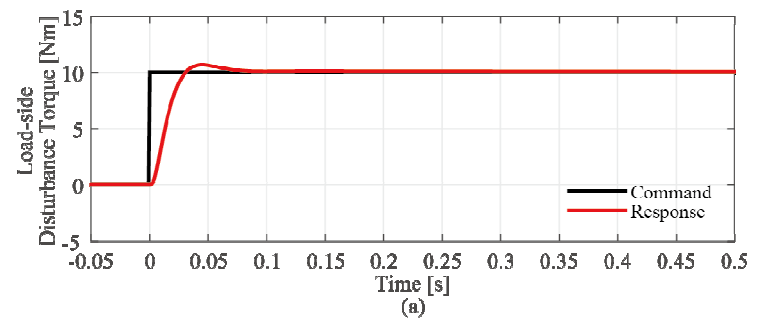
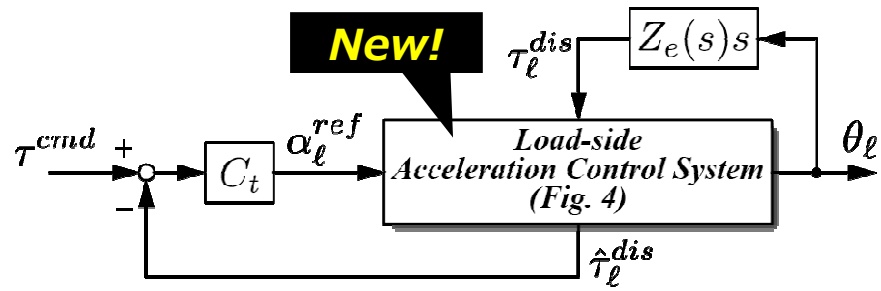
シミュレーション

従来法を使ったトルクサーボ



振動が発生する！

提案法を使ったトルクサーボ



振動なし！

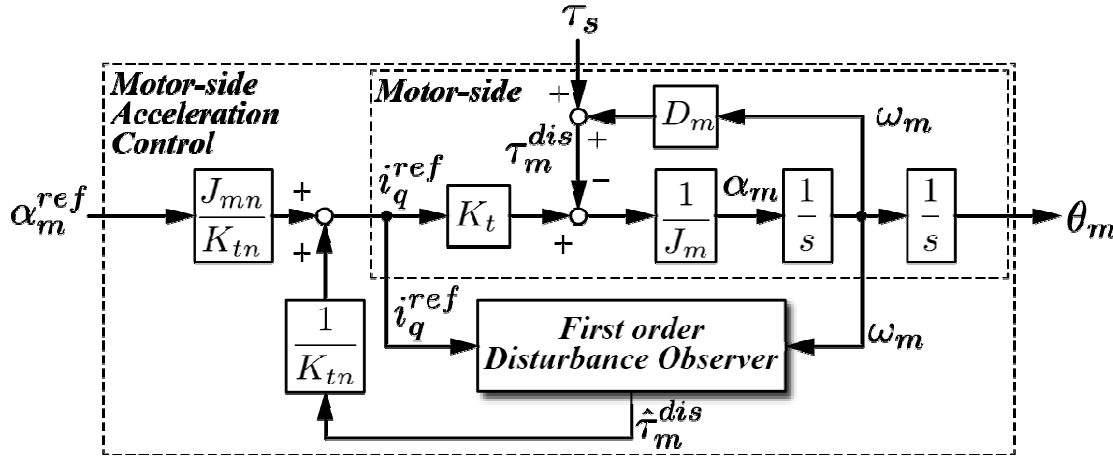


まとめと今後の予定

- ★ 研究目的と背景
- ★ モータ側加速度制御
- ★ 負荷側加速度制御の考え方
- ★ I-PDねじれトルク制御
- ★ 負荷側加速度制御
- ★ シミュレーション
- ★ **まとめと今後の予定**

まとめと今後の予定

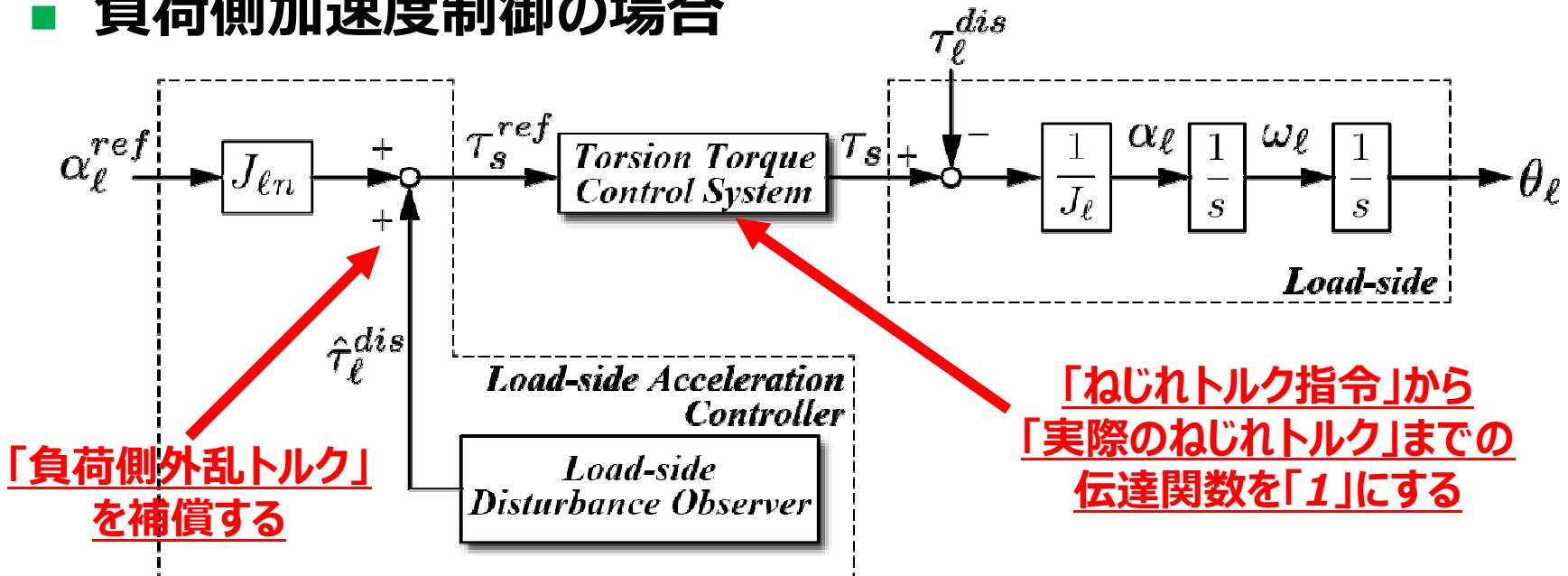
■ モータ側加速度制御の場合



モータ側加速度制御
はこれでできる。

これと同じ形を負荷側
で作れないだろうか？

■ 負荷側加速度制御の場合



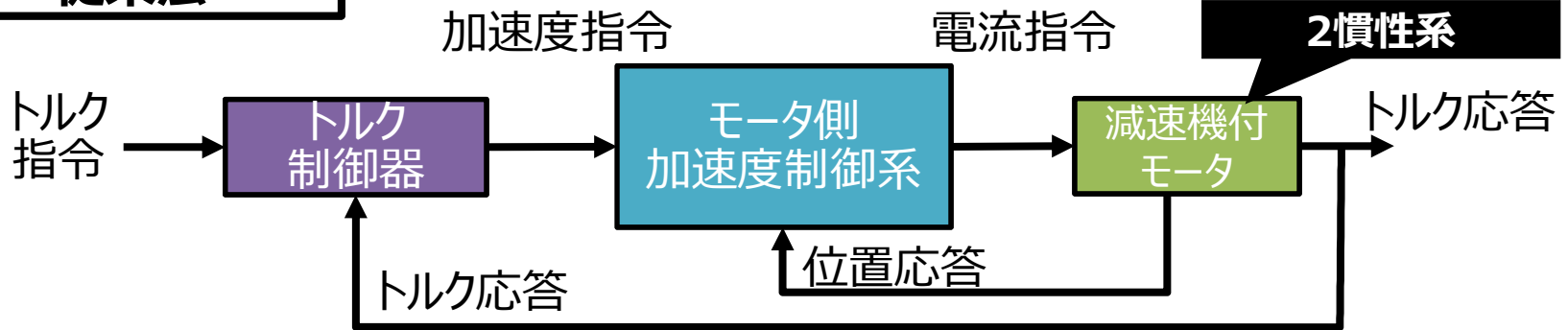
「負荷側外乱トルク」
を補償する

「ねじれトルク指令」から
「実際のねじれトルク」までの
伝達関数を「1」にする

まとめと今後の予定

■ モータ側加速度制御に基づく負荷側トルク制御

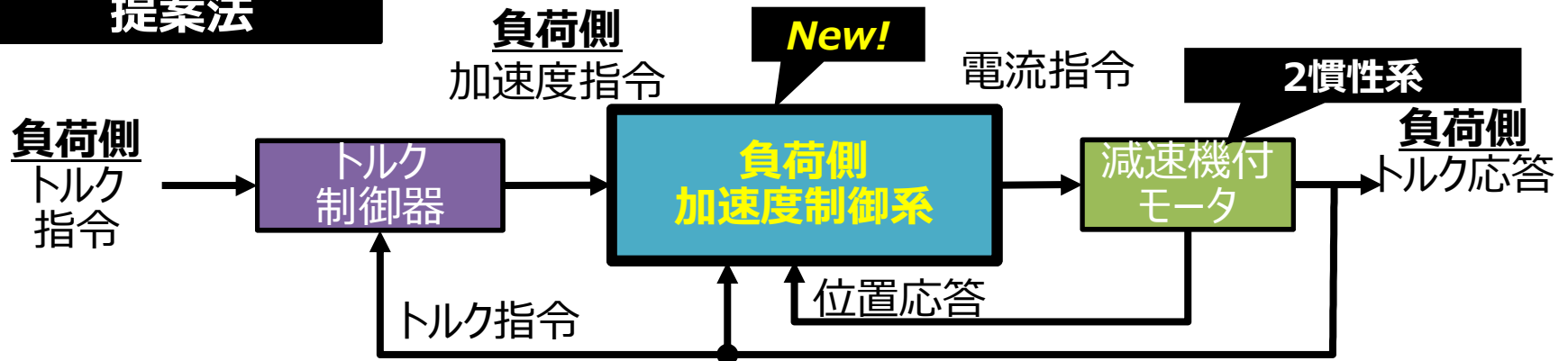
従来法



振動が発生する！

■ 負荷側加速度制御に基づく負荷側トルク制御

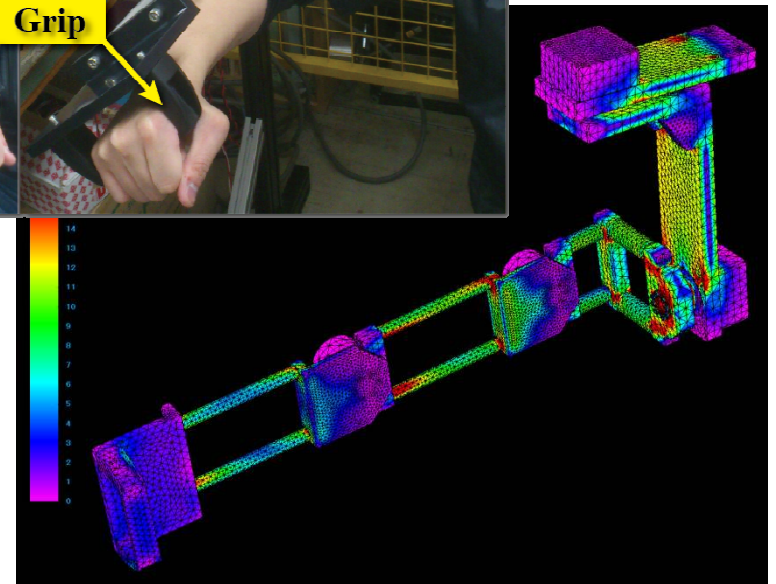
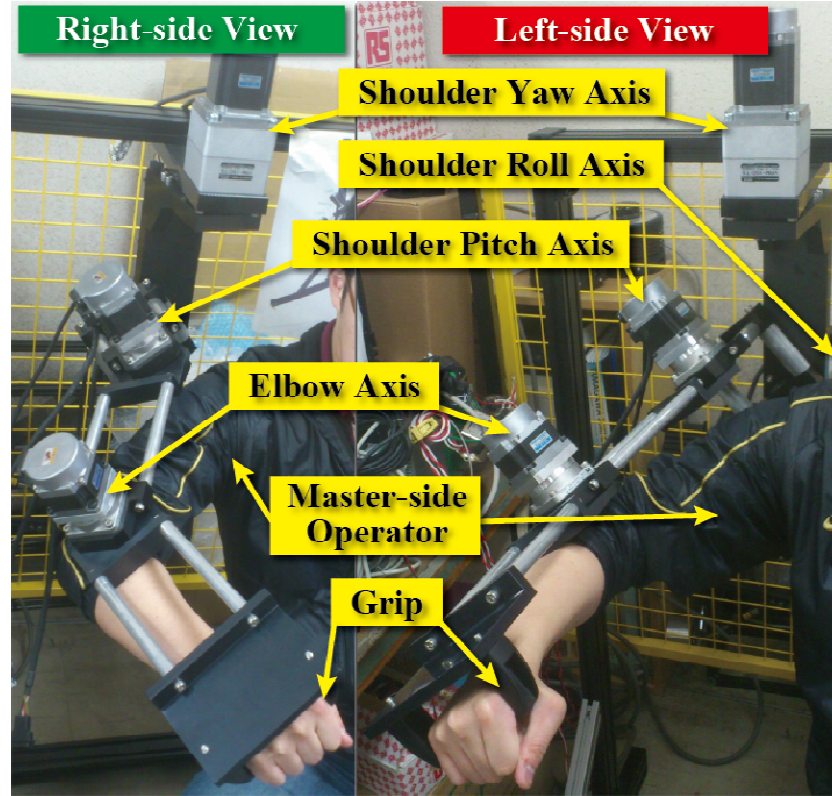
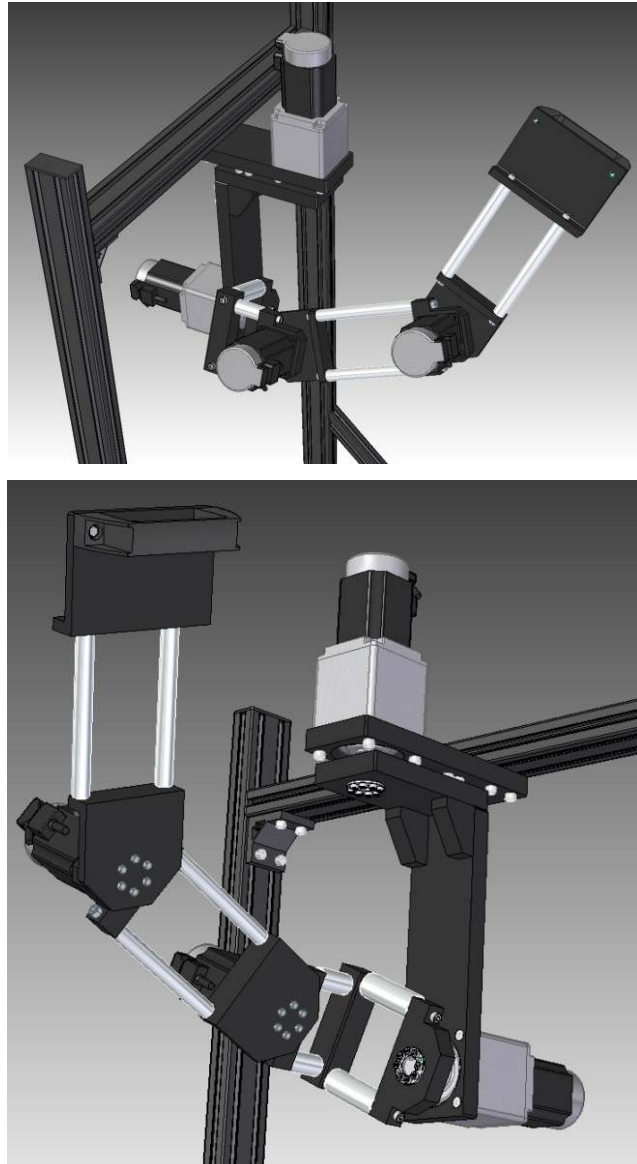
提案法

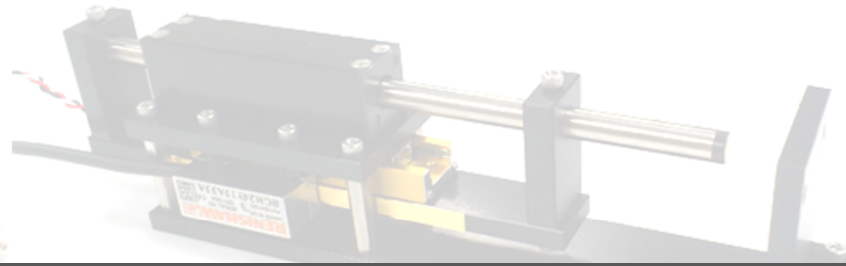
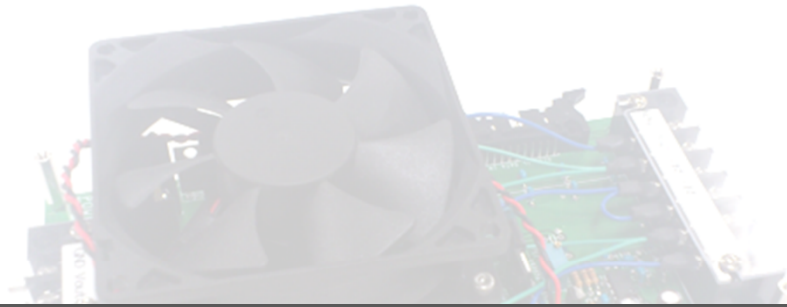


振動が抑制できる！

まとめと今後の予定

■ アーム装着型外骨格ロボットへの応用





APPENDIX

