

油圧アクチュエータのモーションコントロール

埼玉大学
境野 翔

自己紹介

- 2011年3月慶應義塾大学大学院
後期博士課程修了
指導教員：大西公平教授
- 2011年4月より埼玉大学工学部電気電子システム工学科助教
- 研究テーマ：
油圧アクチュエータ、機能的電気刺激、
電動二輪車

序論

極限環境下で作業を行う遠隔操作システムの検討*

(災害現場, 宇宙, 海底, 原子力施設etc.)

- 安全に接触を行う, 細かな作業を行う場合
視・聴覚情報(画像・音声)に加えて,
力覚情報の知覚が必要**



電動ロボットと油圧ロボットに
(マスタ) (スレーブ)

位置・力覚を再現できる
バイラテラル制御を適用

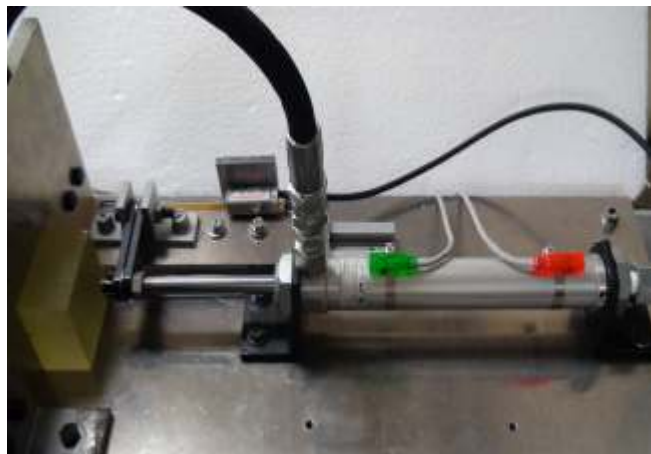


T-53援竜の公開訓練の様子
(上:遠隔操縦機, 下:T-53援竜)
北九州市戸畑区の戸畑消防署より

* 石井啓範「建設機械の遠隔操作と双腕作業機」ロボット学会誌, Vol. 30, No. 6, pp. 582-584 (2012)

** 2015年10月現在、力覚呈示機能を有する遠隔操作ロボットシステムの操作性評価(仮想空間を用いた操作システムに対する力覚提示機能の有用性)日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 42, No. 3, pp. 53-59 (2011)

各の構成

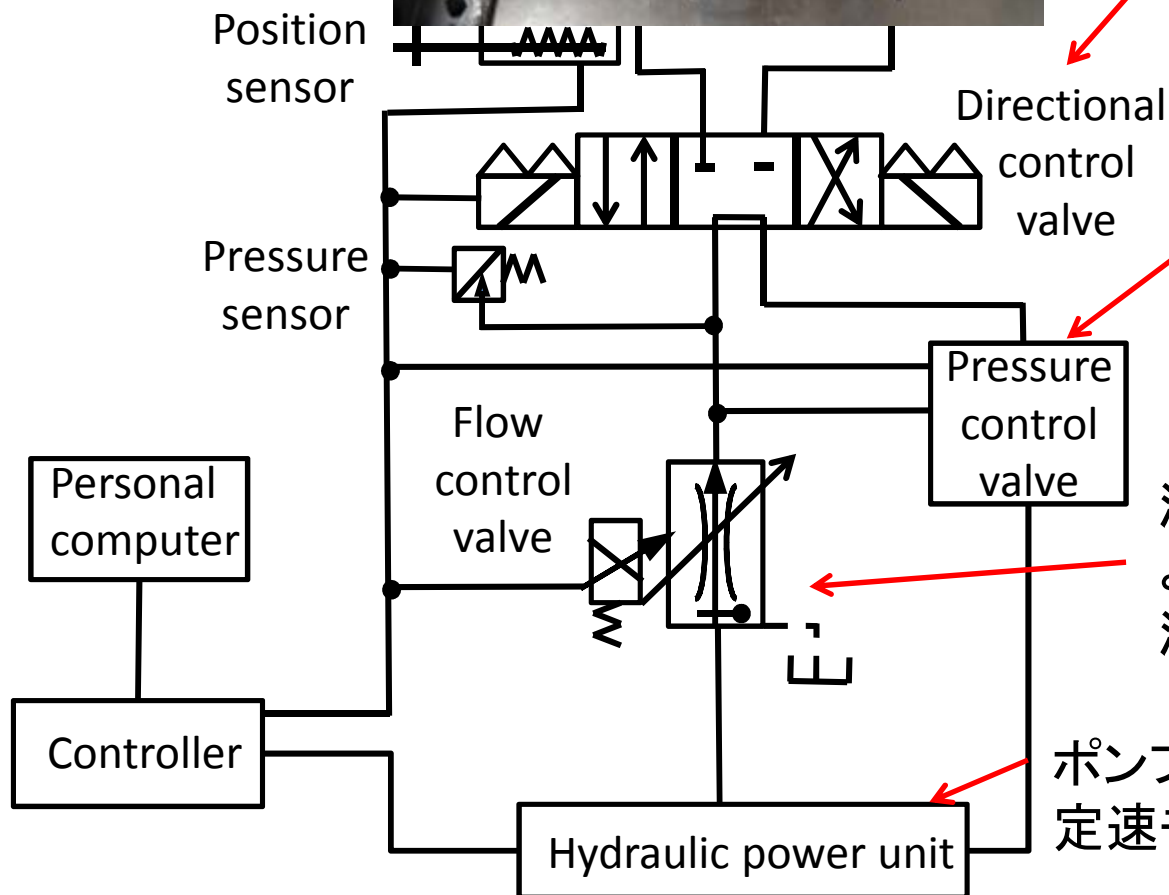


方向切換弁が特に遅い
切り替えに200ms近くかかることも

圧力制御弁は圧力変化に1s
以上かかるのであくまで一定値に
固定するために使用する

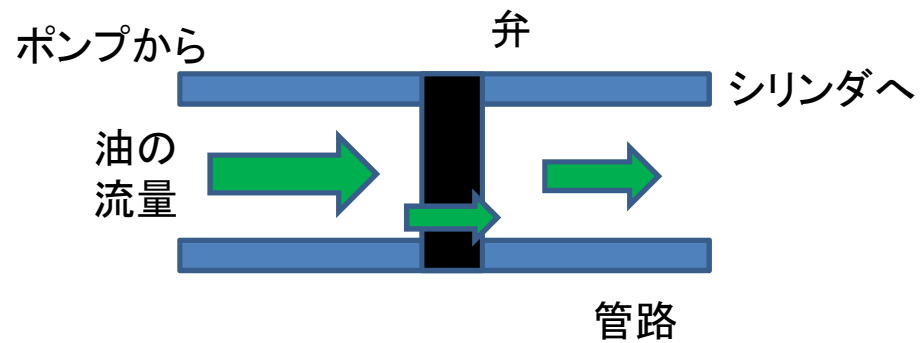
流量制御弁はピンキリ
よく使われる比例制御弁だと
流量0%to100%に40msほどかかる

ポンプは電気モータで駆動
定速モータ



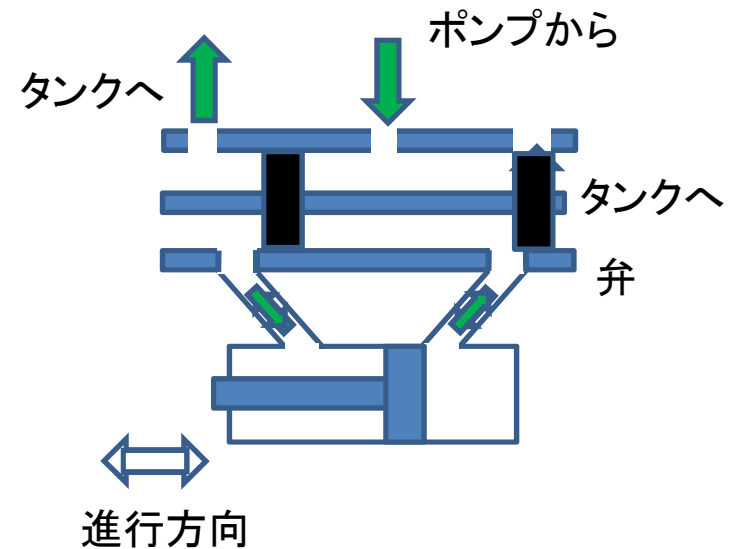
油圧制御弁

■流量制御弁



- ・流量制御弁と方向切替弁を使用
- ・切替弁の周期 200ms
- ・流量(速度)を制御

■方向切替弁



サーボ弁

- ・弁1つで流量,方向を制御
- ・ステップ応答 2ms



サーボ弁

■制御入力

高精度,高価

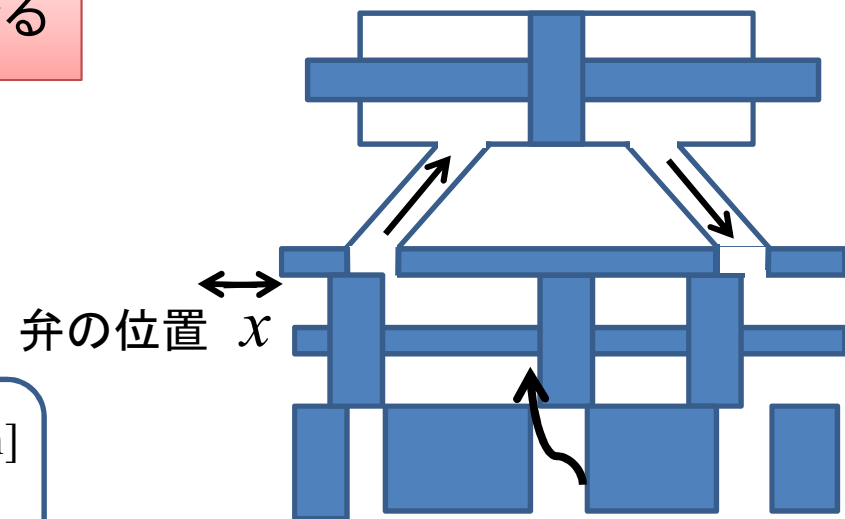
圧力を制御できる

弁の位置を制御し流量を制御

$$q = k_q x - k_p p$$

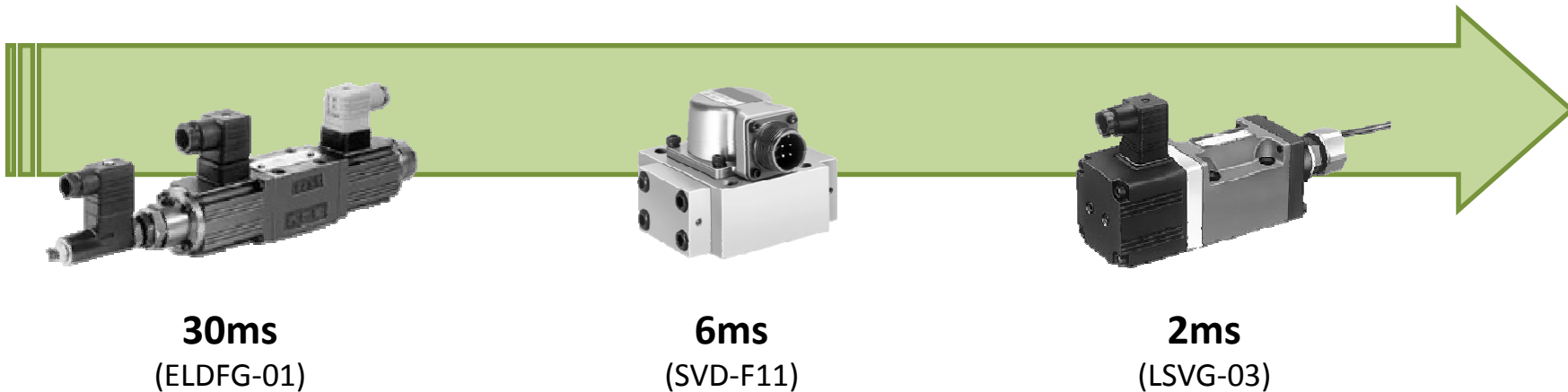
k_q, k_p : 係数 p : 圧力差 [rev/min]

q : 流量 [L/min]



サーボ弁

■ 各制御弁のステップ応答比較 (0⇔100%) [4]



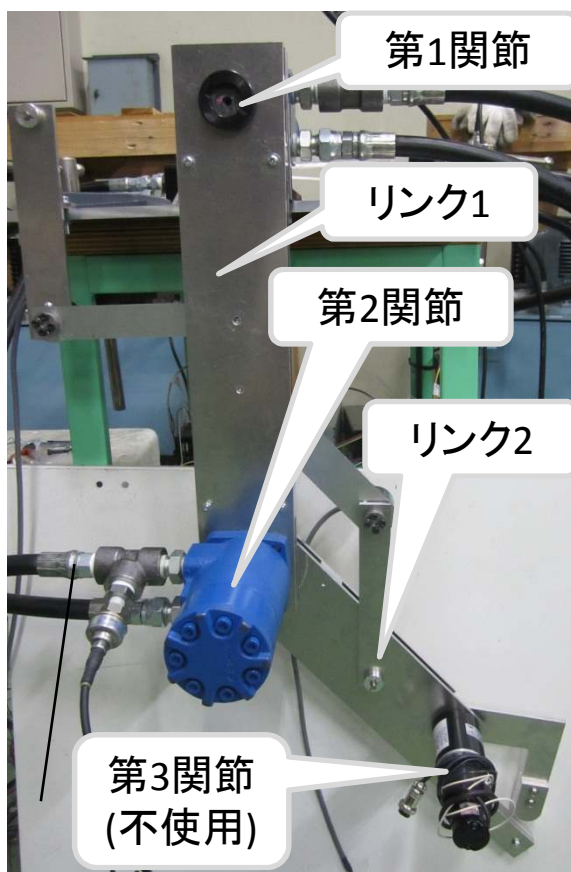
高い応答性を有する制御弁により力制御を実現

実験装置

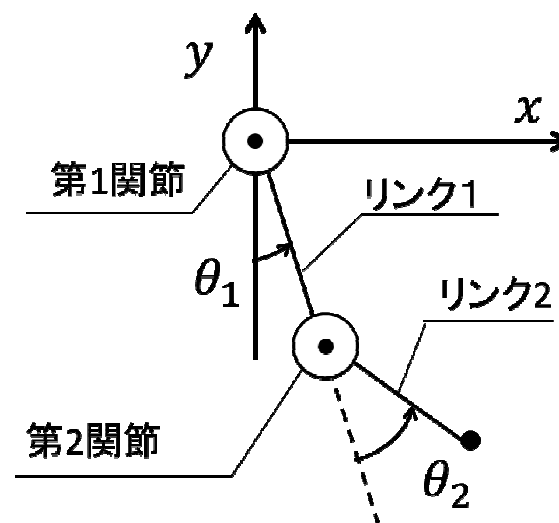
マスタ
(電気モータ)



スレーブ
(油圧モータ)



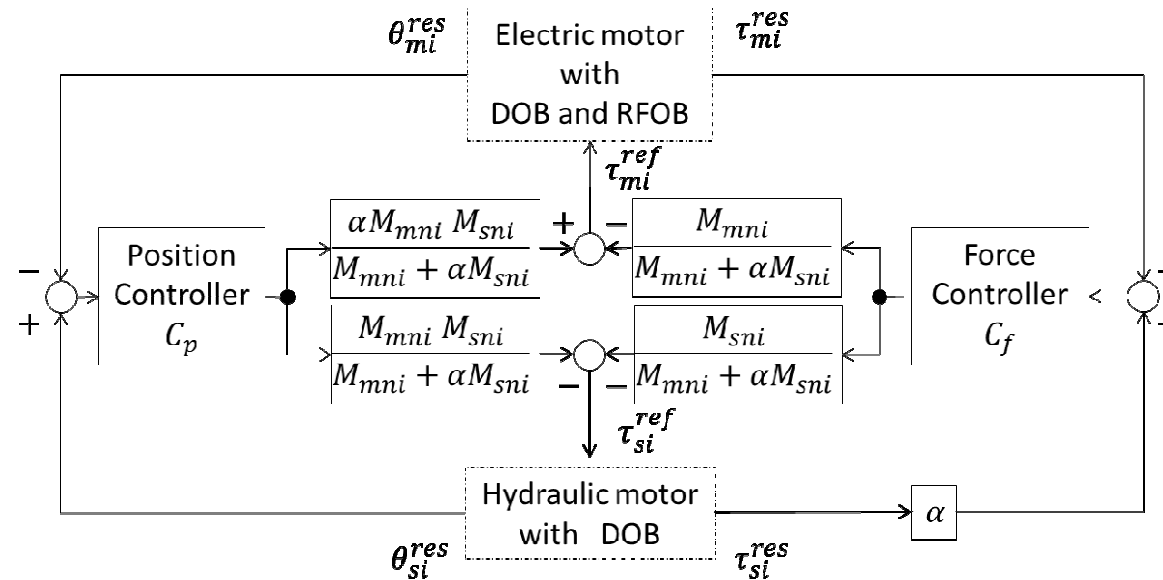
モデル



制御系設計

■ 4ch型バイラテラル制御のブロック線図

- 各関節のモータごと, 関節空間で制御
- マスタとスレーブの慣性モーメントの大小を考慮^[5]

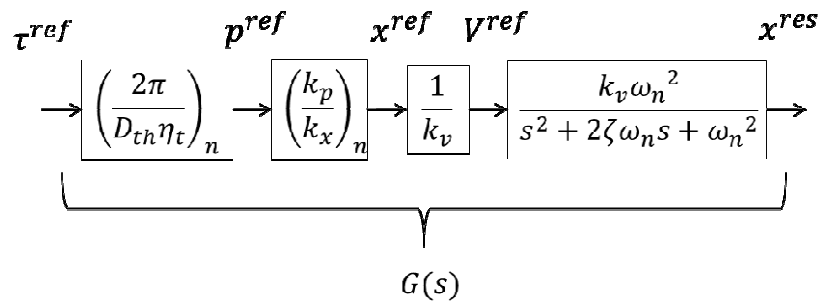


θ : 角度 τ : トルク M : 慣性モーメント α : スケーリングゲイン
 n : ノミナル値 m : マスタ s : スレーブ i : 関節

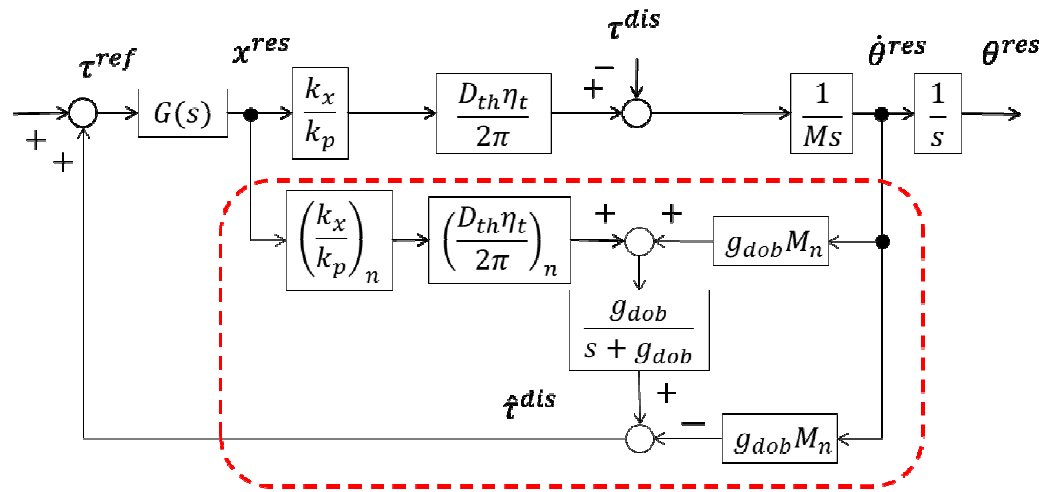
[5] S. Sakai, T. Sato, and K. Ohnishi: "Oblique coordinate control for advanced motion control applied to micro-macro bilateral control," *IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 'Malaga* pp. 14-17 (2009)

制御系設計

■ 制御弁まで



■ 角度まで



Disturbance Observer

2015年10月19日

主な関係式

① 圧力-トルク

$$\tau = \frac{D_{th}\eta_t}{2\pi} p$$

$$q = k_x x - k_p p$$

② 流量特性

$$\Leftrightarrow x = \frac{k_p}{k_x} p - \frac{1}{k_x} q$$

③ 電圧-制御弁

$$x = \frac{k_v \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} V \approx k_v V$$

- p : 圧力差
- τ : トルク
- D_{th} : 押しのけ容量
- η_t : トルク効率
- x : 弁の開度
- q : 流量
- k_x : 開度-圧力係数
- k_p : 圧力-トルク係数
- V : 電圧
- ω_n : 固有角周波数
- ζ : 減衰係数

反力推定

■ マスタ(電気モータ側)

反力推定オブザーバ(RFOB)_[6]を使用

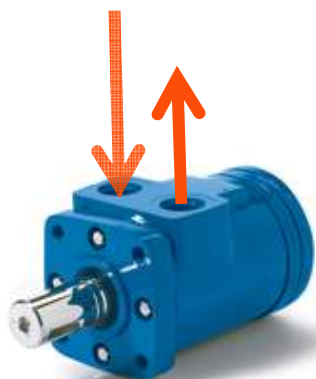
■ スレーブ(油圧モータ側)

圧力差からトルクを算出し, 重力分を減算

$$\tau^{res} = \frac{D_{th}\eta_t}{2\pi} p^{res}$$

(p^{res} は圧力センサにより測定)

p : 圧力差
 τ : トルク
 D_{th} : 押しのけ容量
 η_t : トルク効率



イートン株式会社HPより

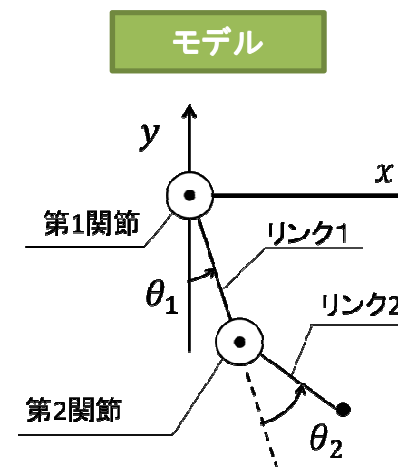
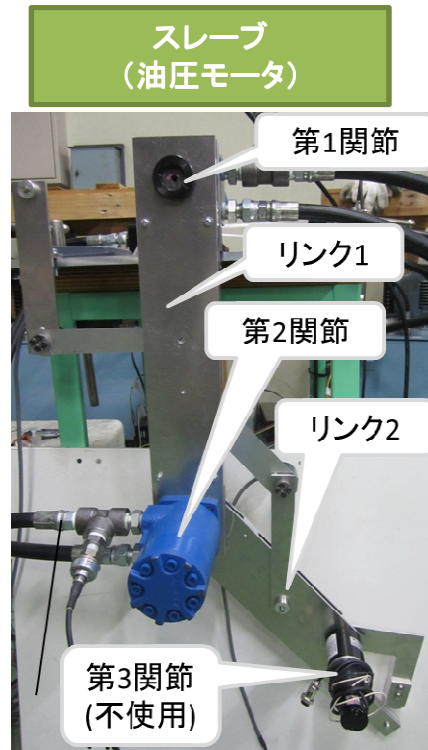
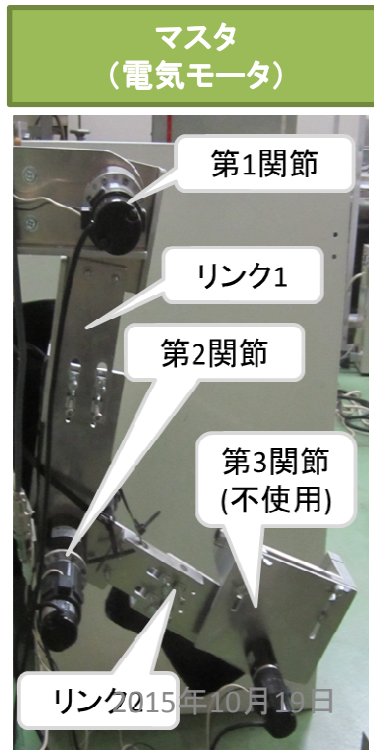
$$\tau^{res} = \tau^{env} + \tau^{dis} - \hat{\tau}^{dis}$$

$\left\{ \begin{array}{l} \tau^{env} \quad \dots \text{環境からの反カトルク} \\ \tau^{dis} \quad \dots \text{摩擦やパラメータ変動, 重力により生じるトルク} \\ \hat{\tau}^{dis} \quad \dots \text{同定した重カトルク} \end{array} \right.$

実験設定

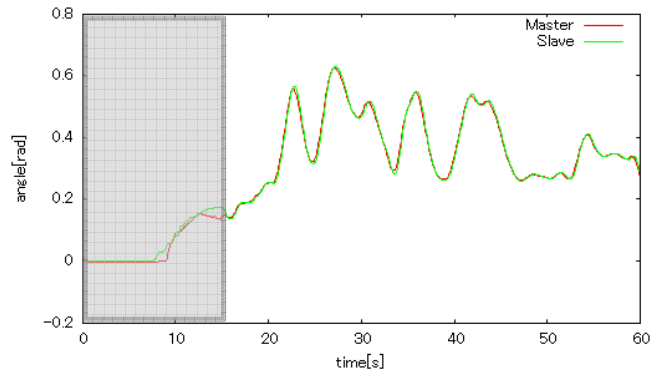
- 第3関節は不使用
- 右図のパラメータを使用
- 自由動作と物体操作の2種類
(5kgの物体)

| | | |
|------------|--|-------|
| M_{m1} | Nominal inertia of link1 of Master [kgm ²] | 0.86 |
| M_{m2} | Nominal inertia of link2 of Master [kgm ²] | 0.29 |
| M_{s1} | Nominal inertia of link1 of Slave [kgm ²] | 3.7 |
| M_{s2} | Nominal inertia of link2 of Slave [kgm ²] | 0.80 |
| g_{dob} | Cut-off frequency of DOB [rad/s] | 20.0 |
| g_{rfob} | Cut-off frequency of RFOB [rad/s] | 20.0 |
| g_{pd} | Pseudo-derivative gain [rad/s] | 20.0 |
| K_p | Position feedback gain [1/s ²] | 100.0 |
| K_v | Velocity feedback gain [1/s] | 20.0 |
| K_f | Force feedback gain | 1.0 |
| k_x | Flow gain [m ² /s] | 0.467 |
| k_p | Pressure gain [m ⁴ /kg] | 0.347 |
| k_v | Voltage-spool conversion gain [mm/V] | 0.2 |
| α | Scaling gain | 0.5 |

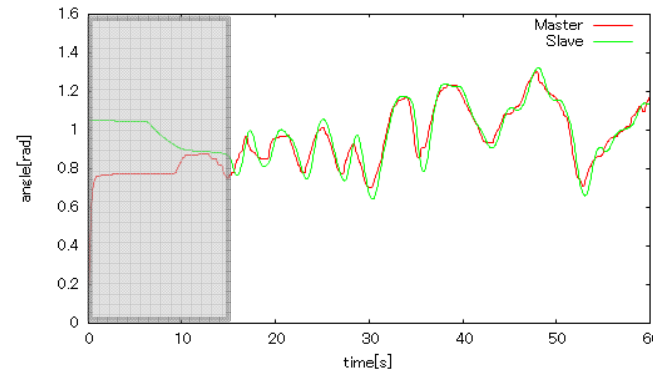


実験結果

■ 自由動作 (スケーリングゲイン0.5)

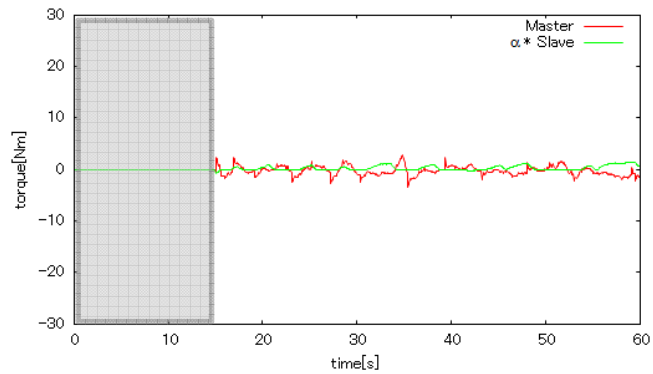
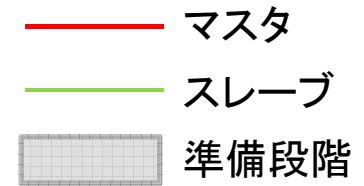


(a)第1関節

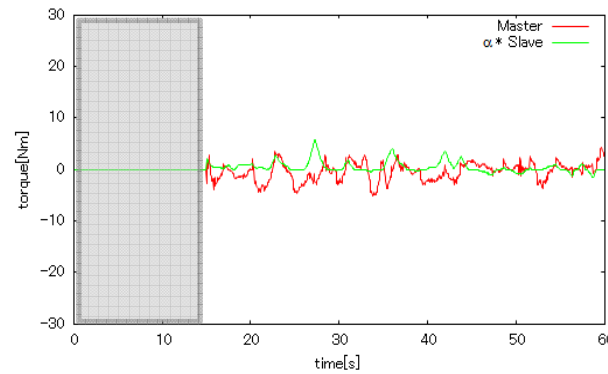


(b)第2関節

位置応答



(a)第1関節

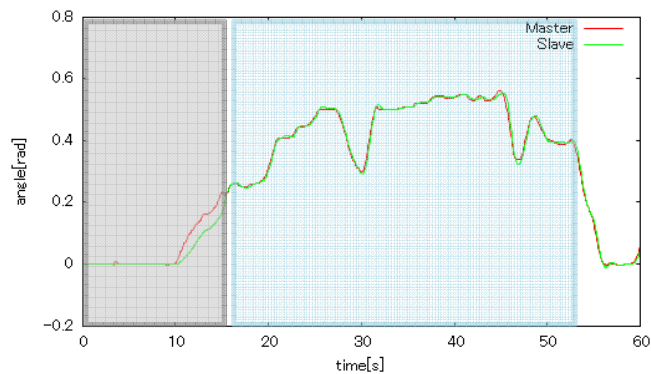


(b)第2関節

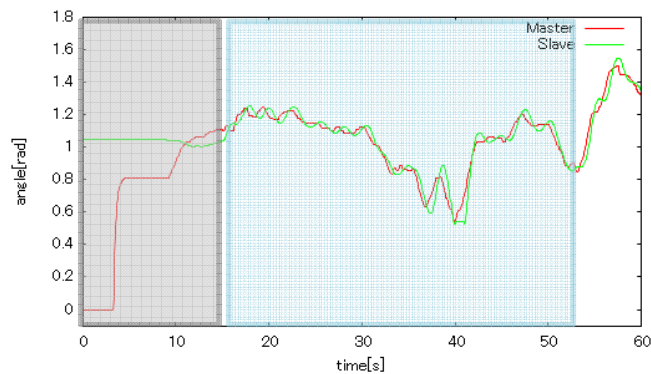
力応答

実験結果

■ 物体操作 (スケーリングゲイン 0.5, 5kg物体)

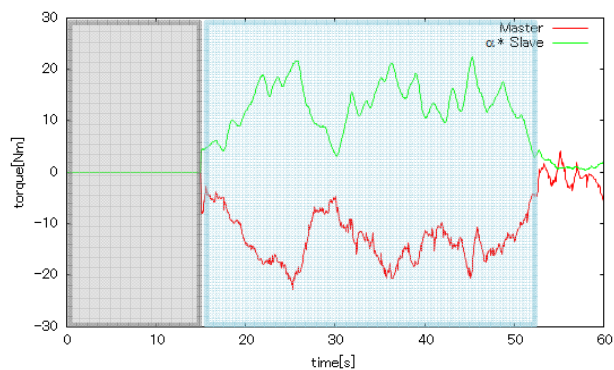
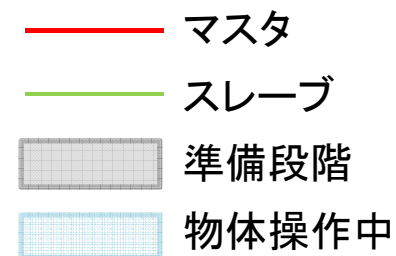


(a)第1関節

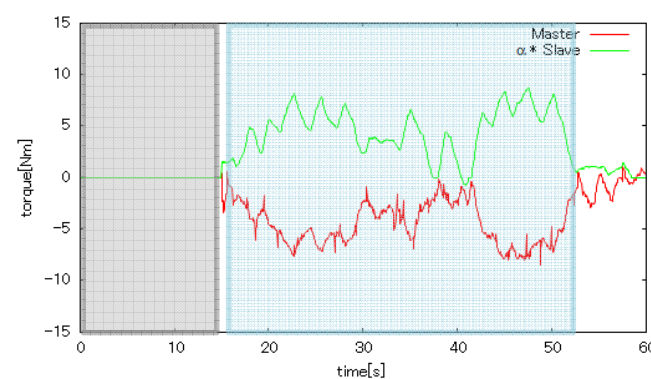


(b)第2関節

位置応答



(a)第1関節



(b)第2関節

力応答

まとめ

- 重力方向動作のためにロボットアーム製作を行い、スケーリングゲインと慣性モーメントの違いを考慮した4ch型バイラテラル制御を実装した。
- 実験結果より、スケーリングゲインの導入した状態で、バイラテラル制御の目標である位置の同期、及び、作用反作用の法則の成立を確認した。

油圧の詳細なモデル

■ 3次系になる

$$q^{res} = \frac{D}{2\pi} s\theta_2^{res} + C_{tp}p^{res} + C_b s p^{res}.$$

流量 断面積 油のリーク 油の圧縮
 × 角速度

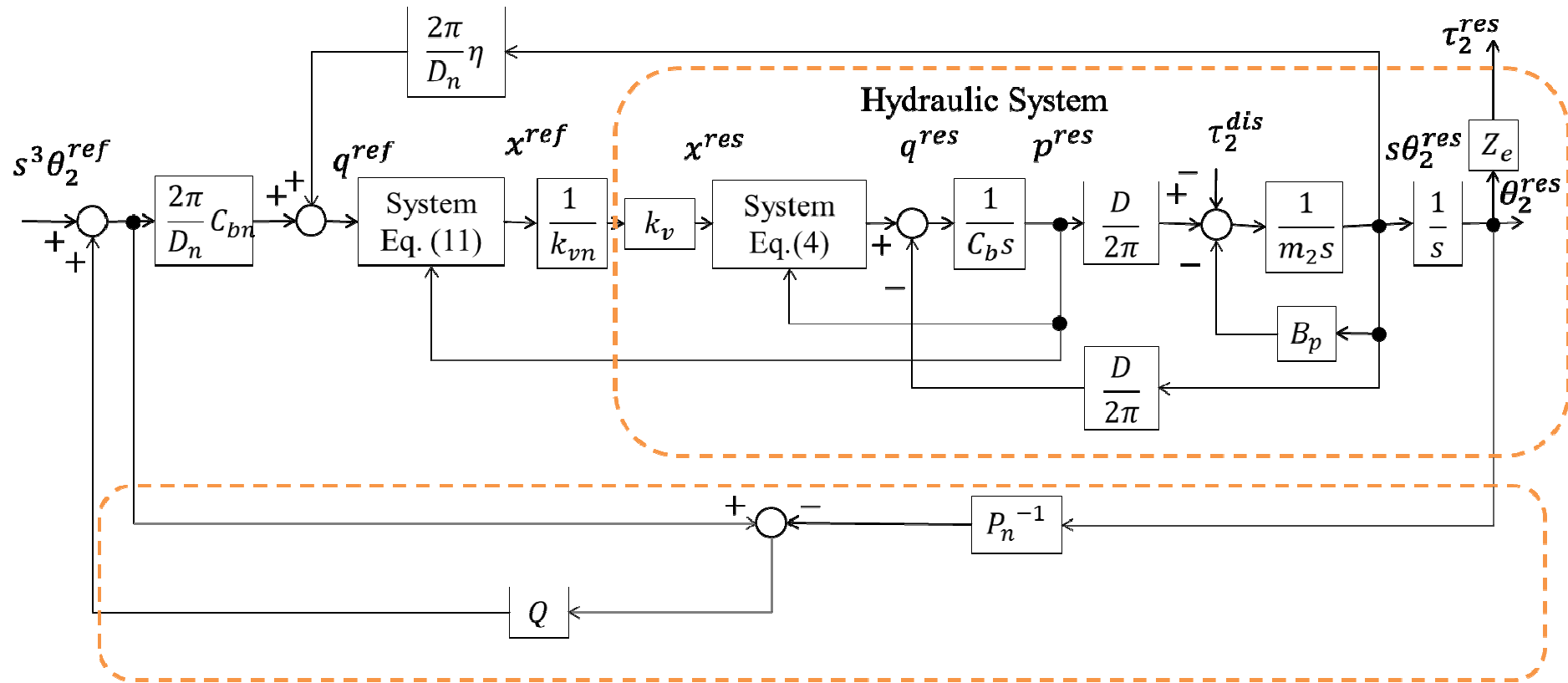
$$s^3\theta_2^{res} = \frac{D}{2\pi} \frac{1}{m_2 C_b} q^{res} + \frac{B_p}{m_2^2} \tau_2^{dis} - \frac{D}{2\pi} \frac{B_p}{m_2^2} p^{res} \\ - \left(\left(\frac{D}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{m_2 C_b} - \left(\frac{B_p}{m_2} \right)^2 \right) s\theta_2^{res}.$$

油圧の制御系

■ 3次系の油圧制御系(外乱オブザーバ)

$$q^{res} = K_{sv} x^{res} \sqrt{P_s - \frac{x^{res}}{|x^{res}|} p^{res}} \quad (4)$$

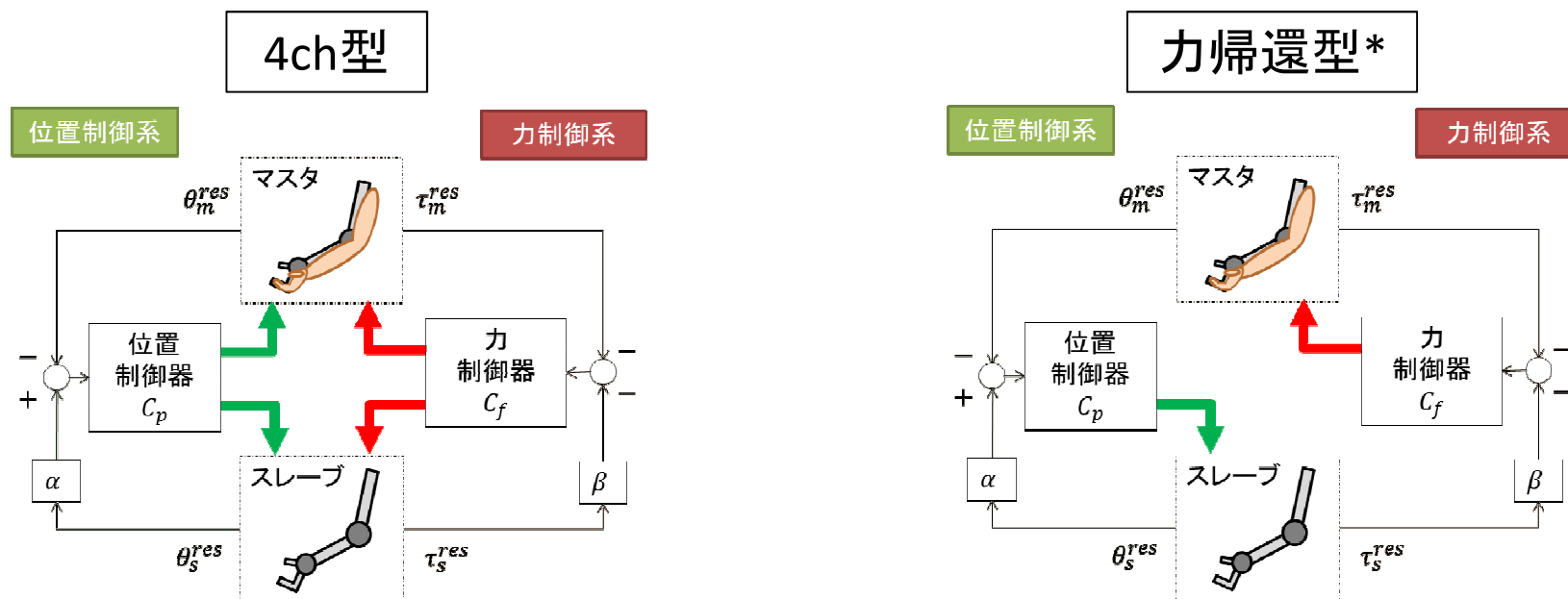
$$x^{ref} = \frac{q^{ref}}{K_{svn} \sqrt{P_s - \frac{x^{res}}{|x^{res}|} p^{res}}} \quad (11)$$



Disturbance Observer

バイラテラル制御系の種類

■ 操作者に力覚呈示可能なバイラテラル制御の手法



電気アクチュエータ間のバイラテラル制御との相違点
油圧アクチュエータ(スレーブ)が3次遅れ系でモデル化*

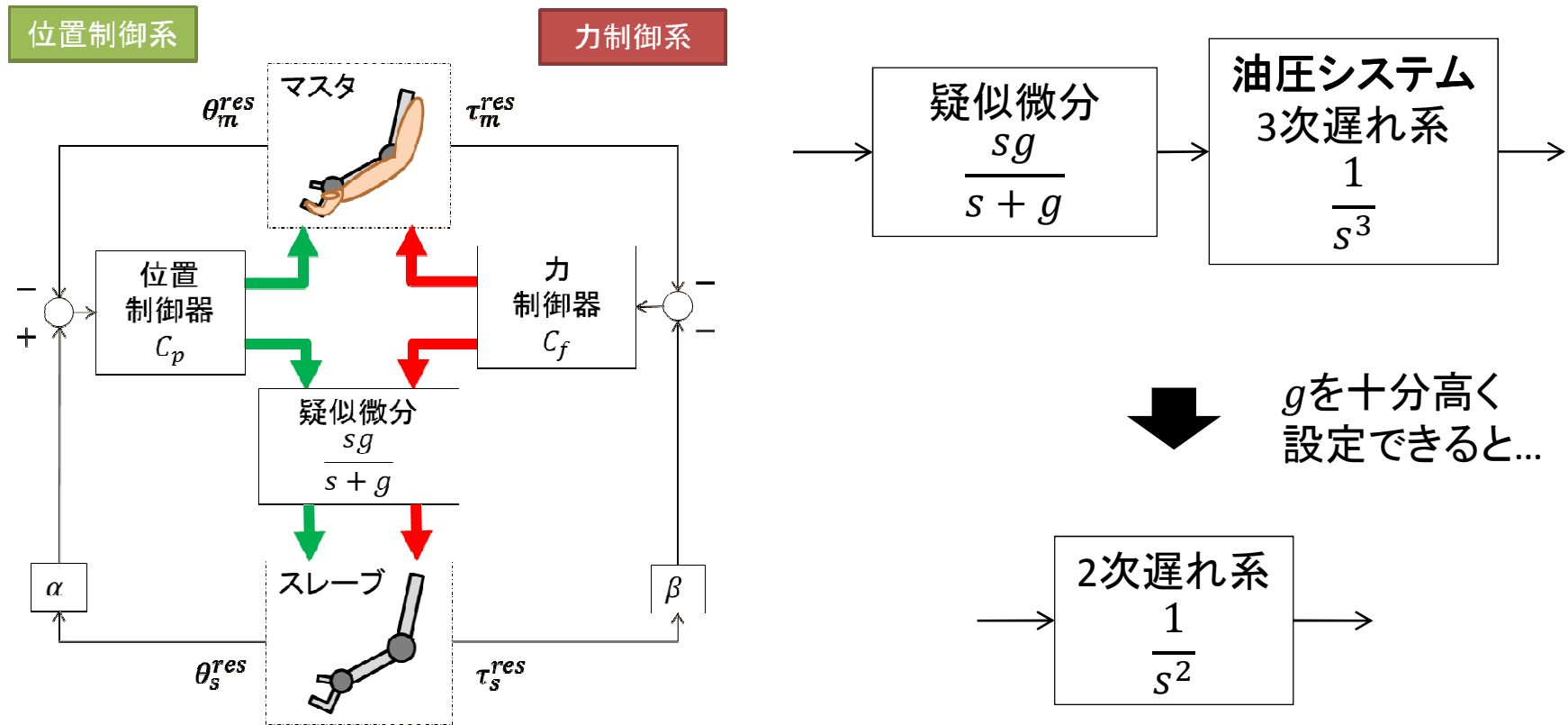
* G. Mingde etc... : "Force Feedback Model of Electro-hydraulic Servo Tele-Operation Robot Based on Velocity Control," in *Proceedings of 2008 IEEE Conference on Robotics, Automation, and Mechatronics*, pp. 912-915 (2008)

** I. Lee, T. Kim, and S. Choi: "Hydraulic Servo System Using a Feedback Linearization Controller and Disturbance Observer - Sensitivity of System Parameters -," in *Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power*, pp. 1-10 (2008)

提案手法

■ 電気-油圧アクチュエータ用に拡張した4ch型バイラテラル制御系

→ 疑似微分により3次遅れ系を2次遅れ系に近似



実験

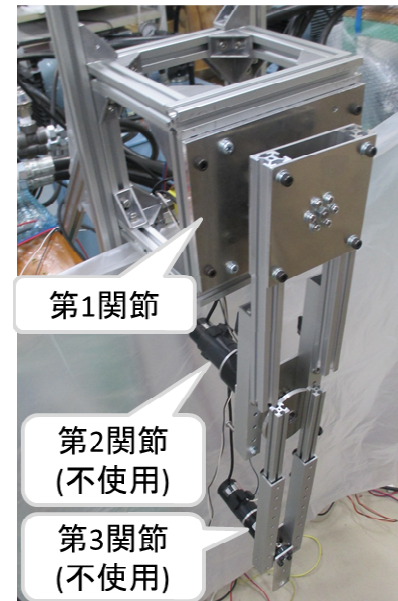
実験概要

- マスタ, スレーブを1自由度マニピュレータとして使用
- 自由動作と接触動作を検証
- 極配置による考察

実験パラメータ

| | | |
|----------|---------------------------------|-------|
| m_M | マスタの慣性モーメント[kgm ²] | 0.447 |
| m_S | スレーブの慣性モーメント[kgm ²] | 0.20 |
| K_p | 位置フィードバックゲイン(提案) | 900 |
| K_v | 速度フィードバックゲイン(提案) | 60 |
| K_f | カフィードバックゲイン(提案) | 1.447 |
| K_p | 位置フィードバックゲイン(従来) | 27000 |
| K_v | 速度フィードバックゲイン(従来) | 2700 |
| K_a | 加速度フィードバックゲイン(従来) | 90 |
| K_f | カフィードバックゲイン(従来) | 1.0 |
| g | カットオフ周波数[rad/s] | 60.0 |
| α | 位置のスケーリングゲイン | 1.0 |
| β | 力のスケーリングゲイン | 1.0 |
| K_h | 人の弾性[N/m] | 500 |
| D_h | 人の粘性[Ns/m] | 200 |
| K_e | タイヤの弾性[kN/m] | 100 |
| D_e | タイヤの粘性[kNs/m] | 20 |

2015年10月19日



マスタ
(電気モータ)



スレーブ
(油圧モータ)

実験結果

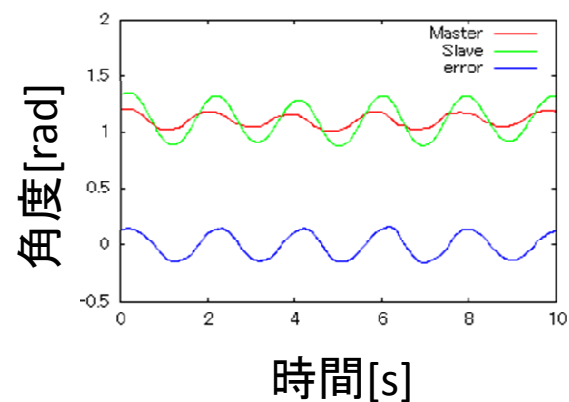
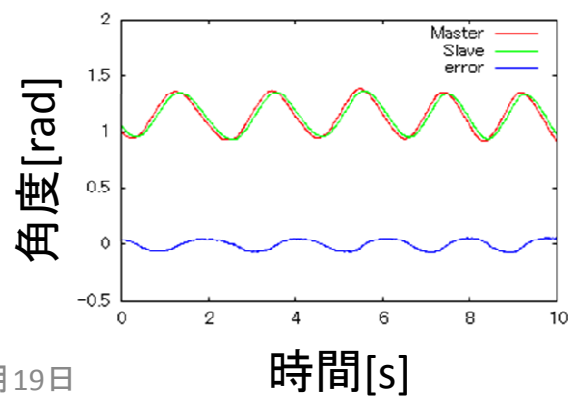
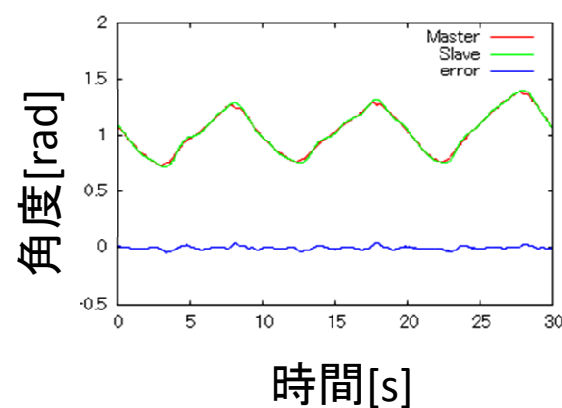
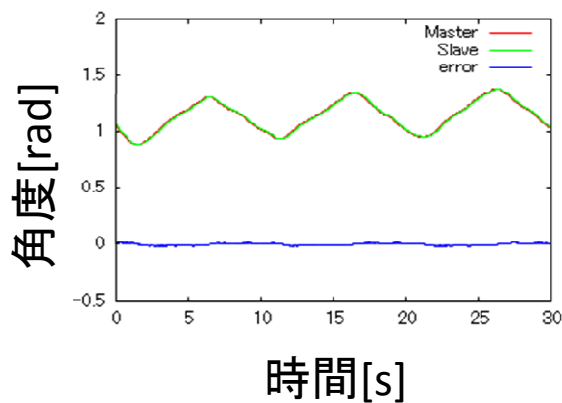
① 0.1Hz(上)と0.5Hz(下)の自由動作

— マスタ
— スレーブ
— 誤差

提案手法

4ch型

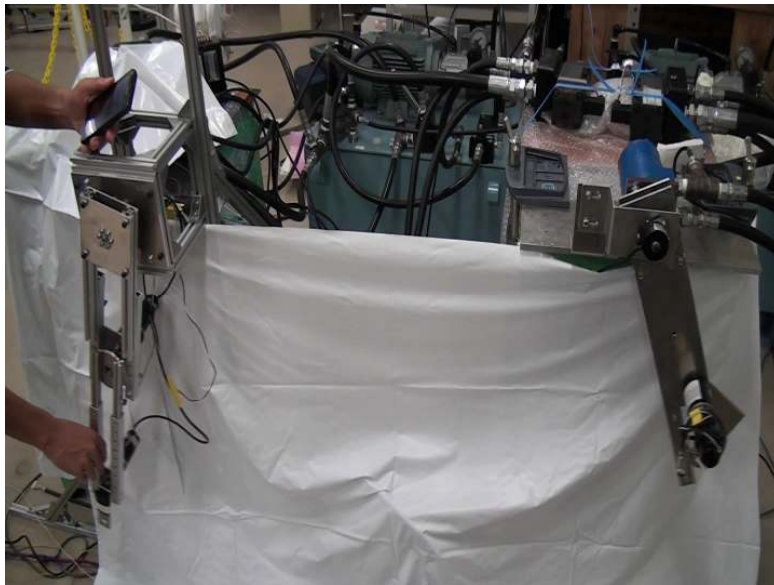
位置
応答



実験結果

② 0.5Hzの自由動作

提案手法



4ch型



実験結果

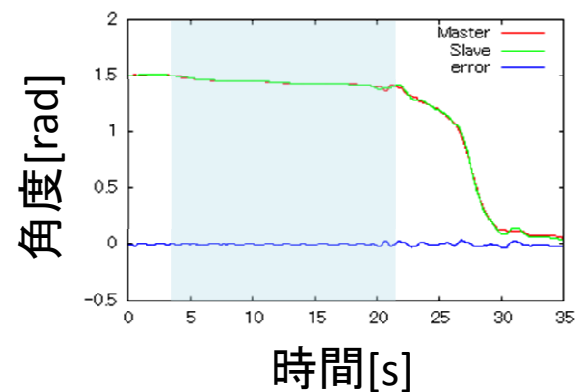
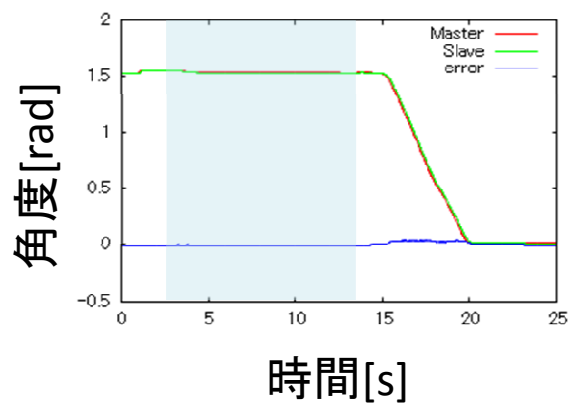
③ 接触動作(5kg吊下げ)

— マスタ
— スレーブ
— 誤差

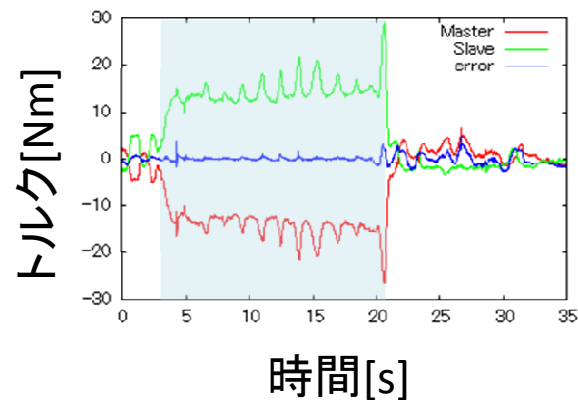
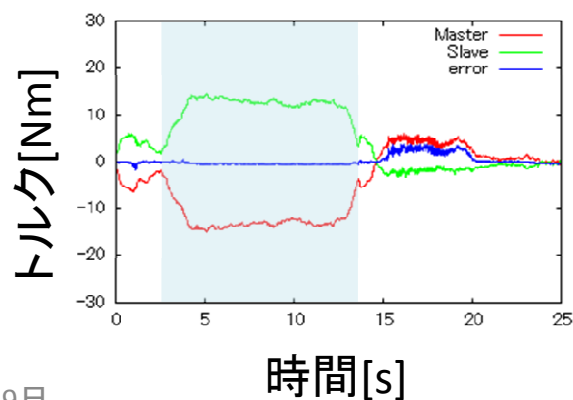
提案手法

4ch型

位置
応答



力
応答



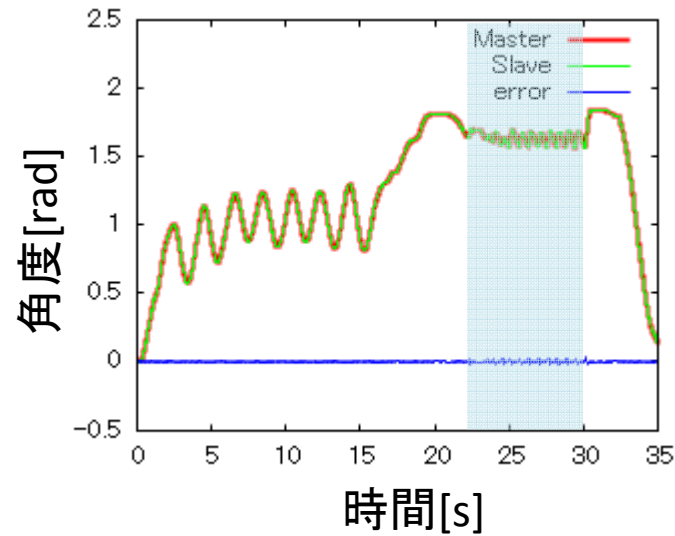
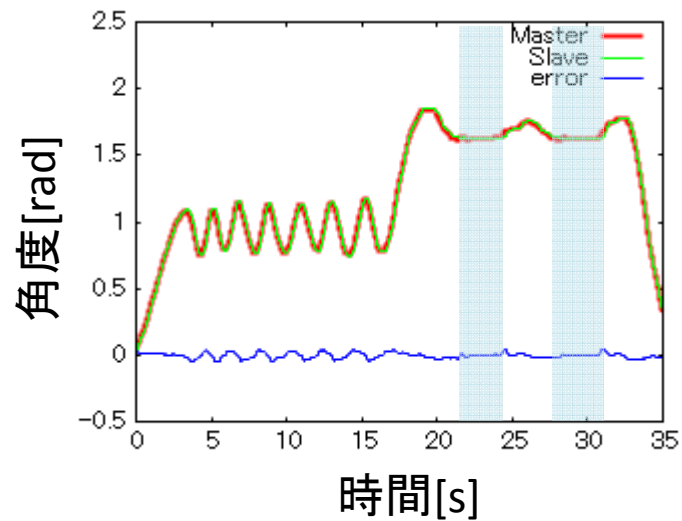
実験結果

提案手法

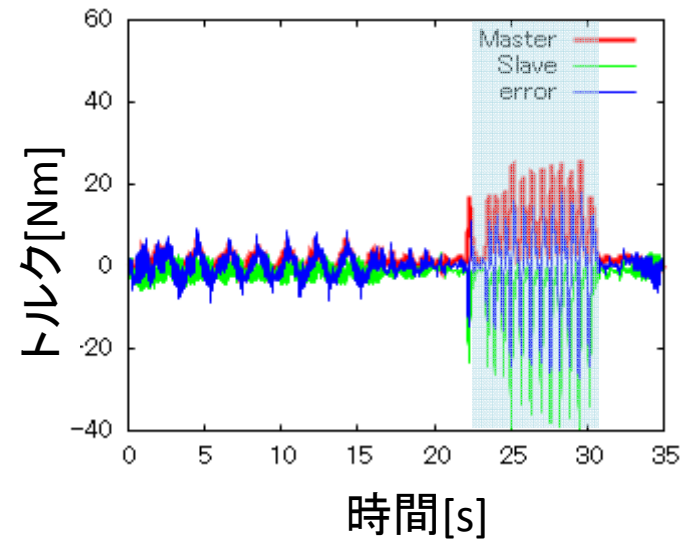
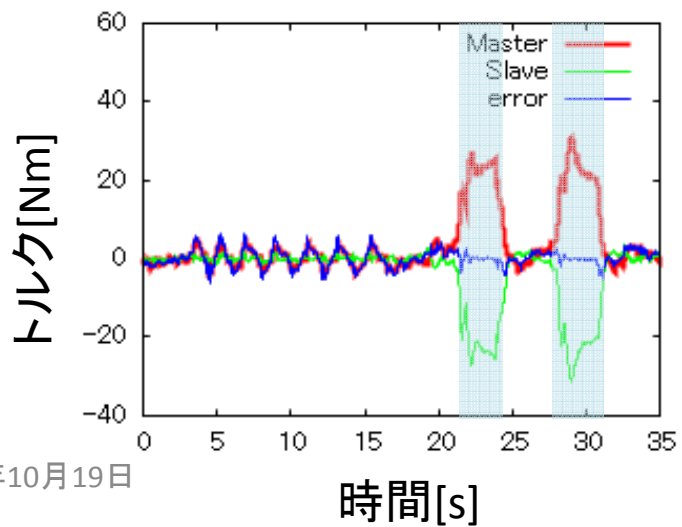
従来手法(力帰還型)

— マスタ
— スレーブ
— 誤差

位置
応答

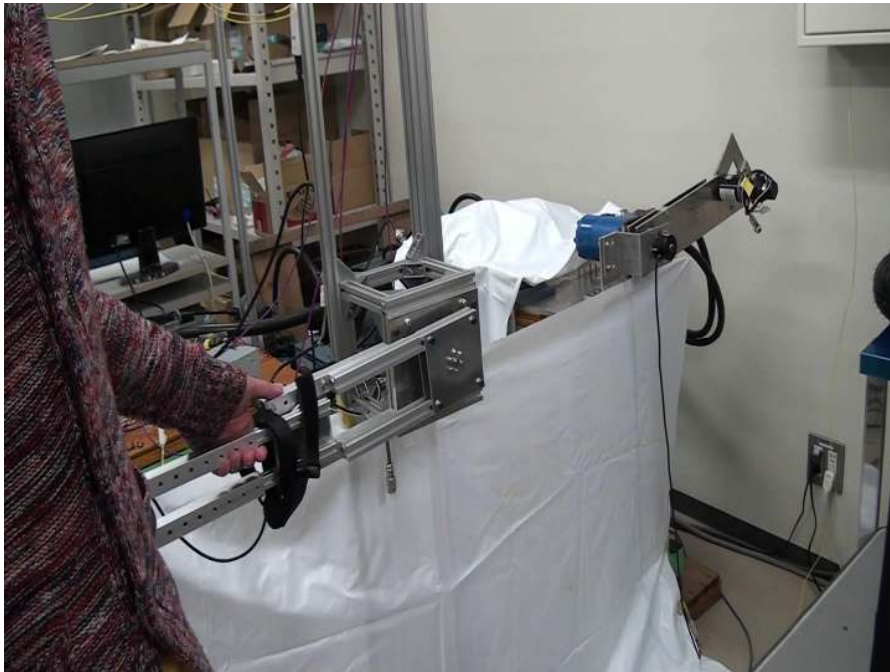


力
応答

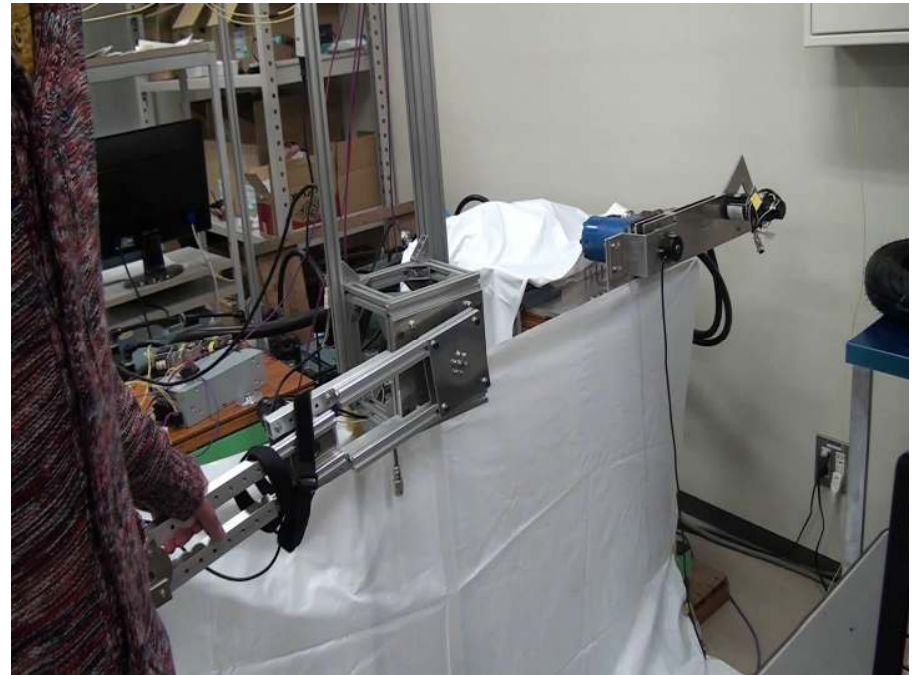


実験結果

提案手法



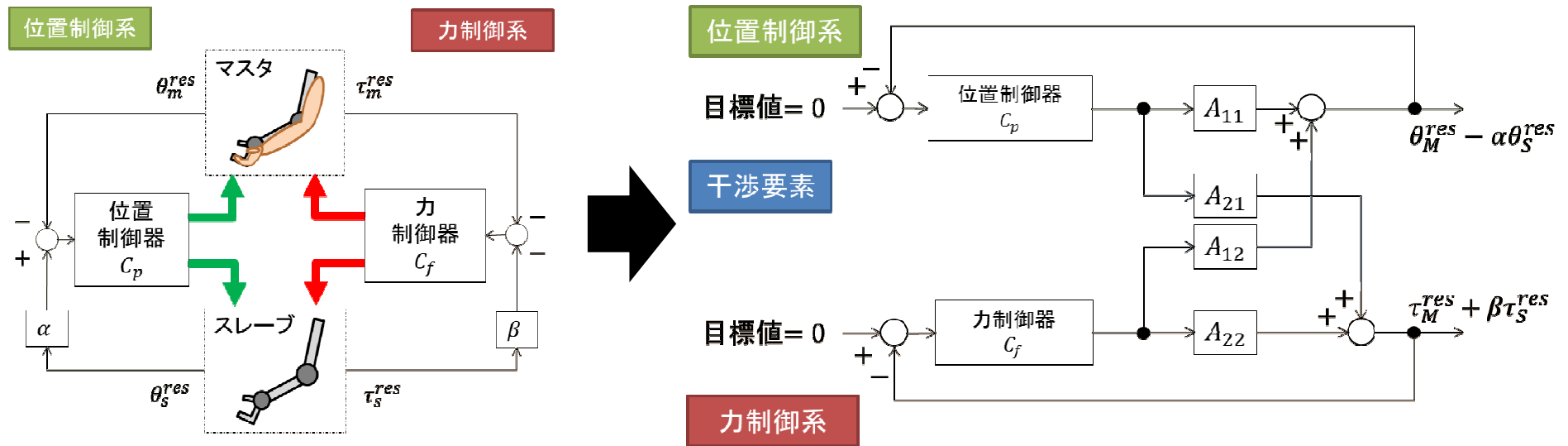
従来手法(力帰還型)



入出力関係

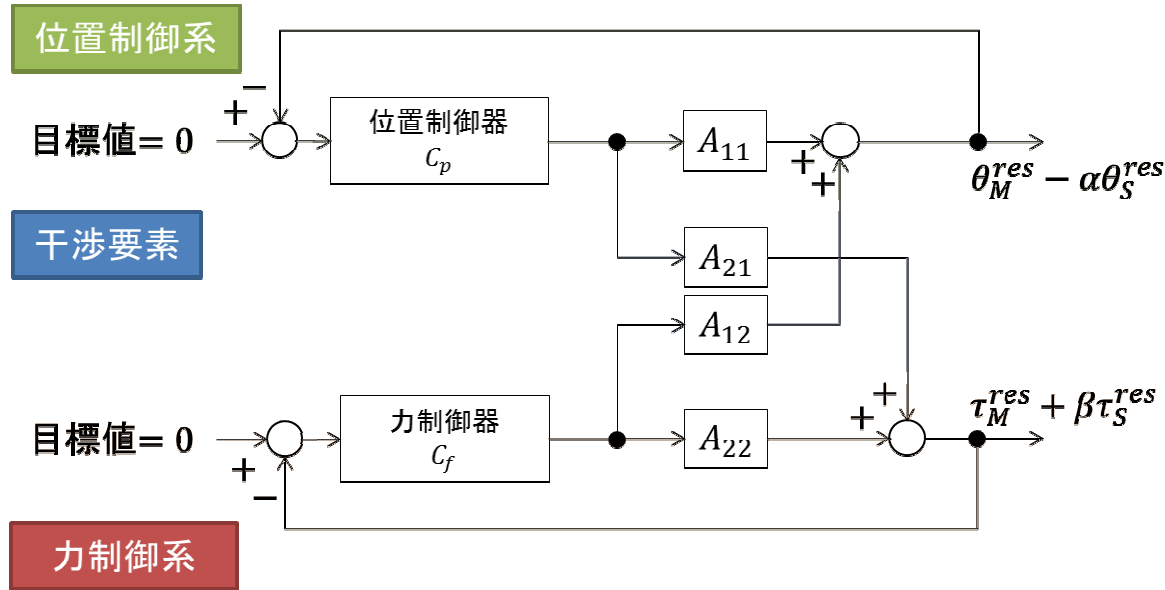
■ フィードバック制御系へ変換

境野らの座標変換によるバイラテラル制御系の設計法*を参考



* S. Sakaino, T. Sato, and K. Ohnishi: "Multi-DOF Micro-Macro Bilateral Controller Using Oblique Coordinate Control," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 7, No. 3, pp. 446-454 (2011)

提案手法と従来手法の比較



既知パラメータ

α : 位置のスケールゲイン
 β : 力のスケールゲイン
 m : 慣性モーメント
 g : 疑似微分のカットオフ周波数

未知パラメータ

Z_h : 人のインピーダンス
 Z_e : 環境のインピーダンス

提案手法

$$\begin{cases} A_{12} = \frac{1}{s^2} \frac{\alpha}{\alpha m_M + \beta m_S} \left(1 - \frac{g}{s+g} \right) \\ A_{21} = \frac{1}{s^2} \frac{\beta}{\alpha m_M + \beta m_S} \left(m_S Z_h - m_M Z_e \frac{g}{s+g} \right) \end{cases}$$

g が十分高いと A_{12} が0になる

従来手法(力帰還型)

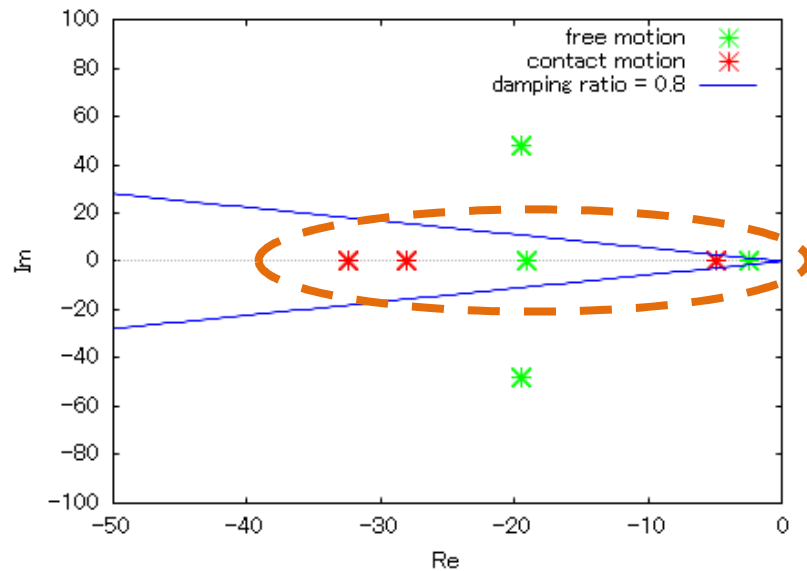
$$\begin{cases} A'_{12} = \frac{1}{m_M s^2} \\ A'_{21} = -\frac{\beta Z_e}{s^3} \end{cases}$$

自由動作時に A'_{21} が0になる

極配置

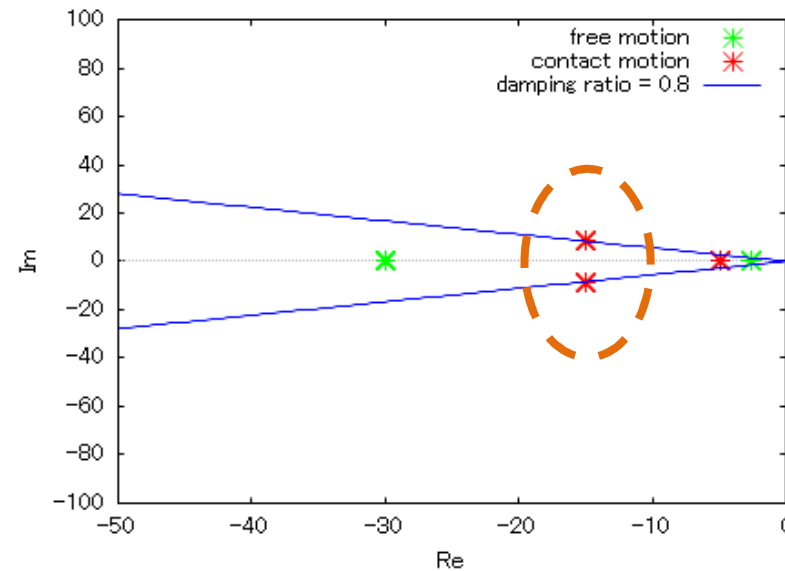
- * 自由動作
- * 接触動作
- 減衰比0.8

提案手法



- 接触動作時に減衰比1以上の極

従来手法(力帰還型)



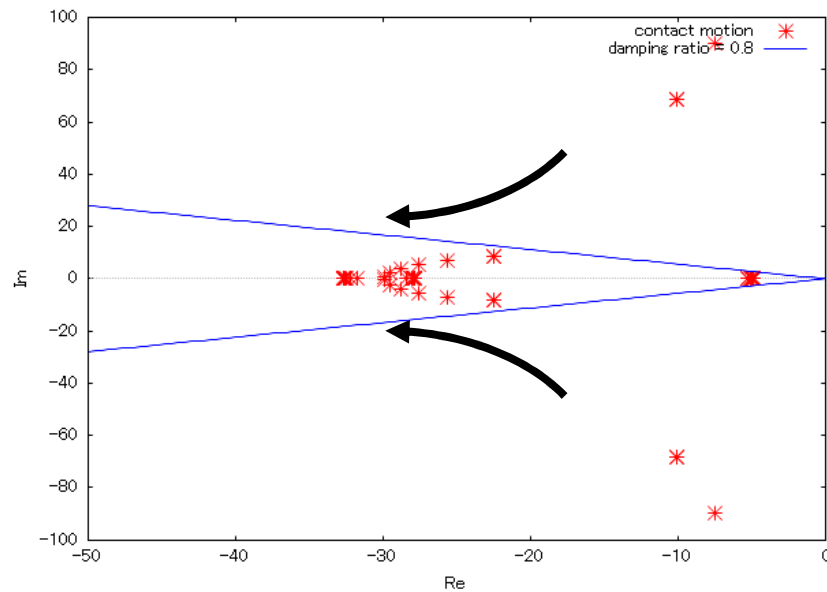
- 接触動作時に減衰比1未満の極
→オーバーシュートにより
接触非接触を繰り返す動作が起こる

極配置

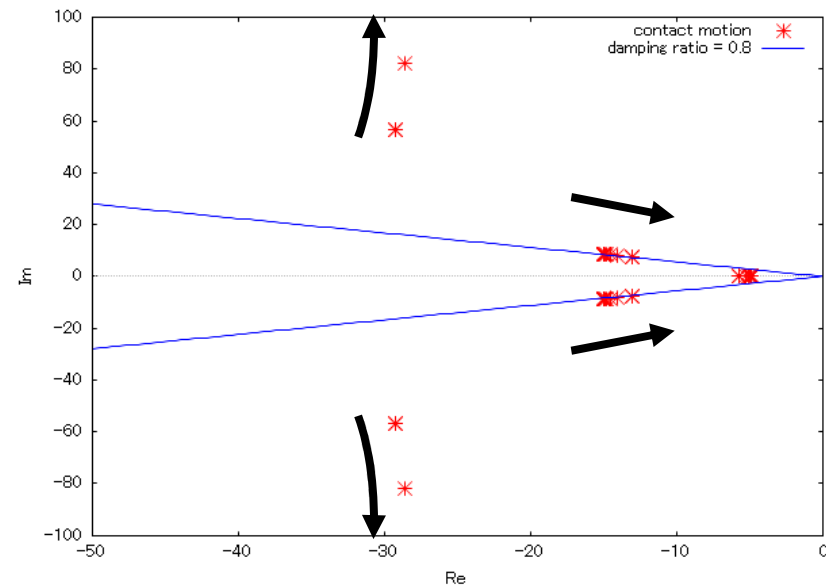
■ 接触動作時の極配置(力制御ゲインを0.002~500)

* 接触動作
— 減衰比0.8

提案手法



従来手法(力帰還型)

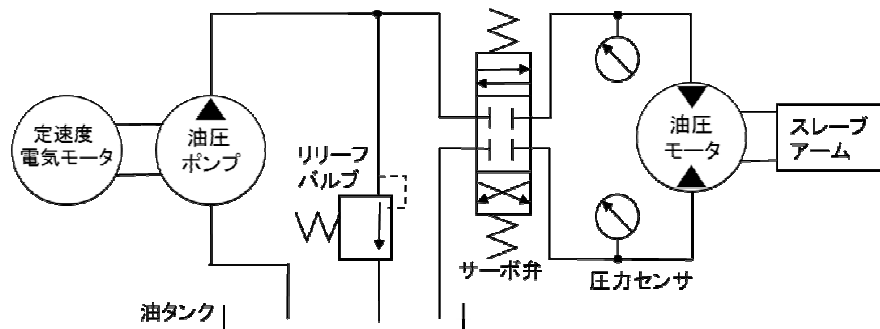


先行研究

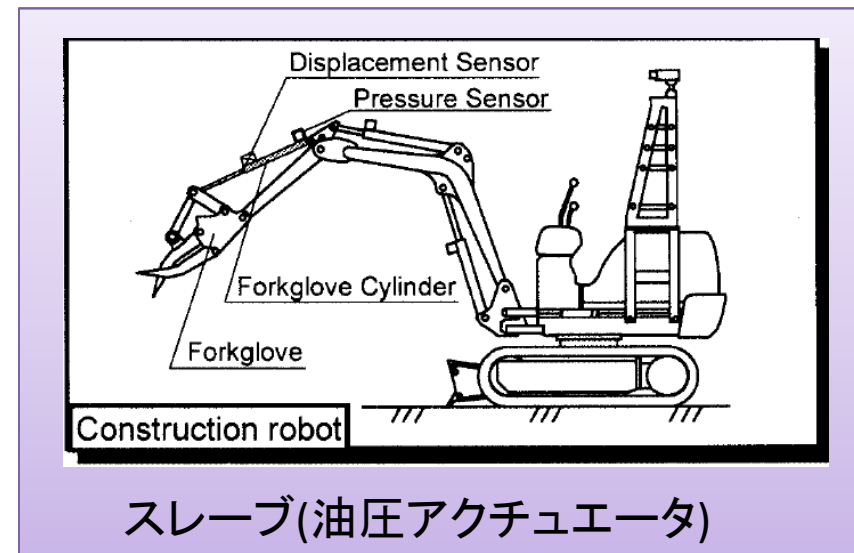
電気-油圧アクチュエータ間のバイラテラル制御

サーボ弁を用いた油圧開回路

問題点 : バックドライバビリティが低い



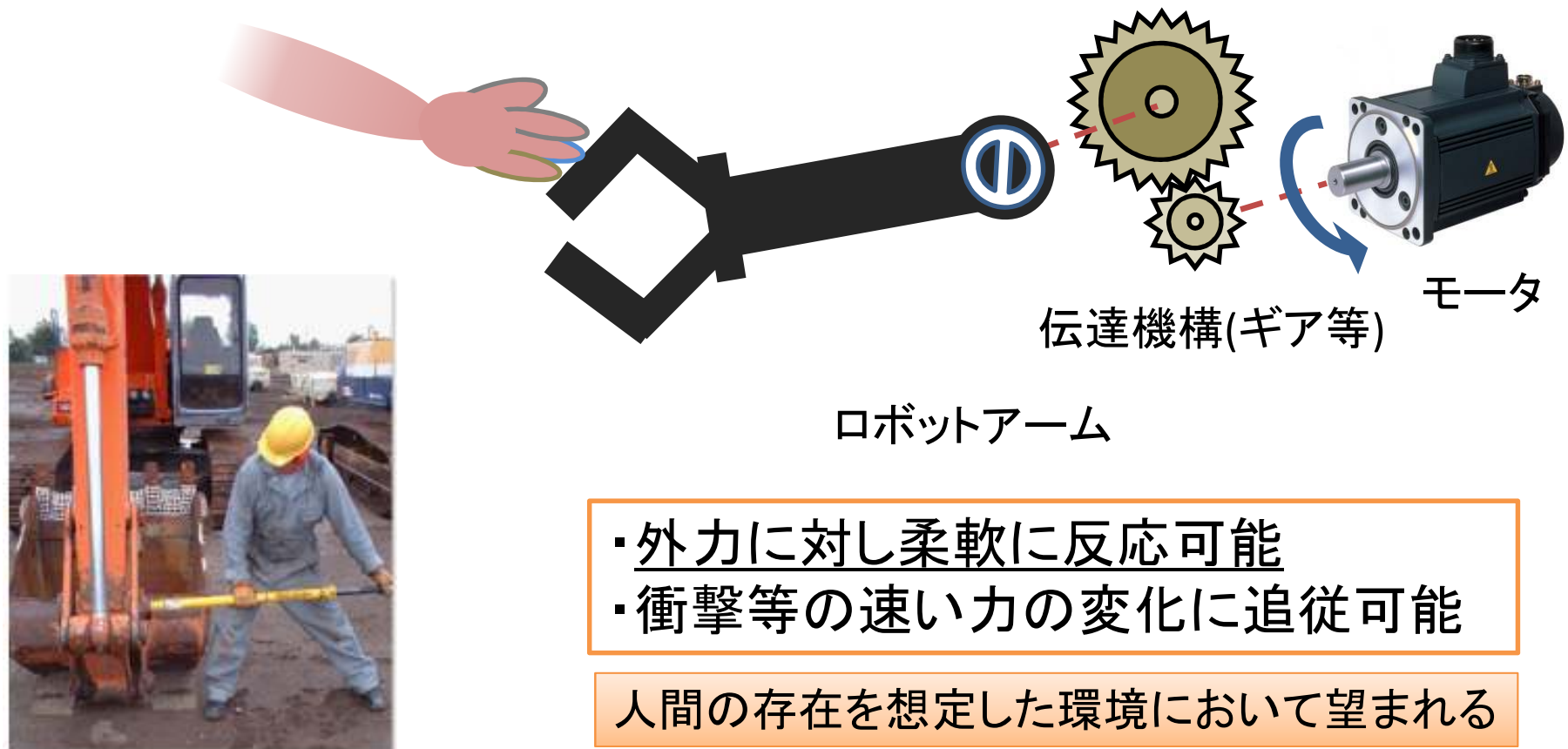
開回路構成の油圧システム



スレーブ(油圧アクチュエータ)

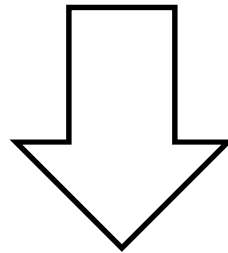
ロボットのバックドライバビリティ

ロボットアームに外力を加え、モータの出力軸を回転させる
バックドライブの行いやすさ^[3]



研究目的

災害現場での作業や, 建築作業の効率を高めるロボット



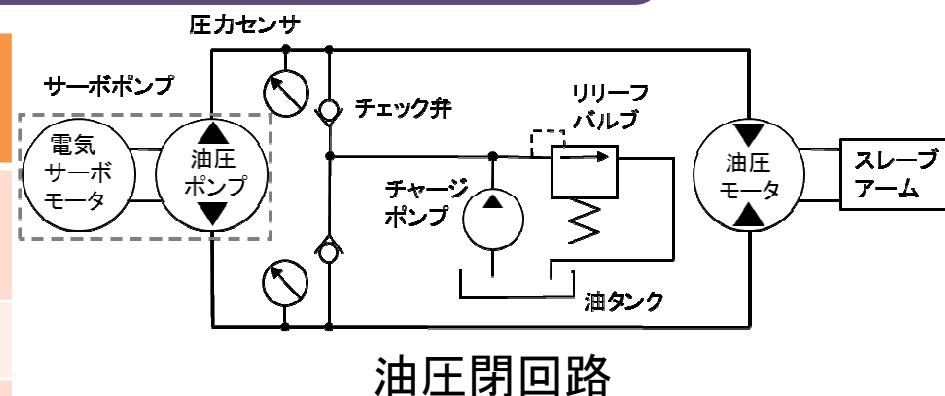
バックドライバビリティを備えた油圧駆動スレーブロボットと電気駆動マスタロボット間のバイラテラル制御を実現

本研究内容

高バックドライバビリティを実現可能な油圧システム

サーボポンプを用いた油圧閉回路^[4]

| | 油圧閉回路 (本研究) | 油圧開回路 (先行研究) |
|-------------|----------------|-----------------|
| バックドライバビリティ | ○高 | ×低 |
| 効率 | ○高 | ×低 |
| 油タンク | ○小 | ×大 |



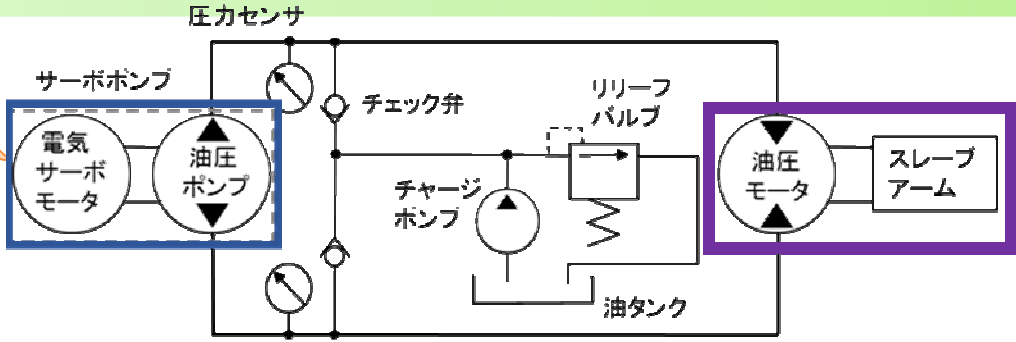
バイラテラル制御における実装例は少なく、バックドライバビリティの観点から十分な議論はされていない

- 油圧閉回路を用いた1リンクスレーブロボットを開発し、バイラテラル制御を実現する。
- スレーブロボットのバックドライバビリティを確認する。

[4]神永 拓(東京大学):油圧動力伝達を用いたロボットの新たなアクチュエータ 2007

実験装置

サーボポンプで作動
油の流量を制御し、
ロボットアームを駆動



油圧閉回路



マスタロボット
電気アクチュエータ



サーボポンプ



ロボットアーム

スレーブロボット
油圧アクチュエータ

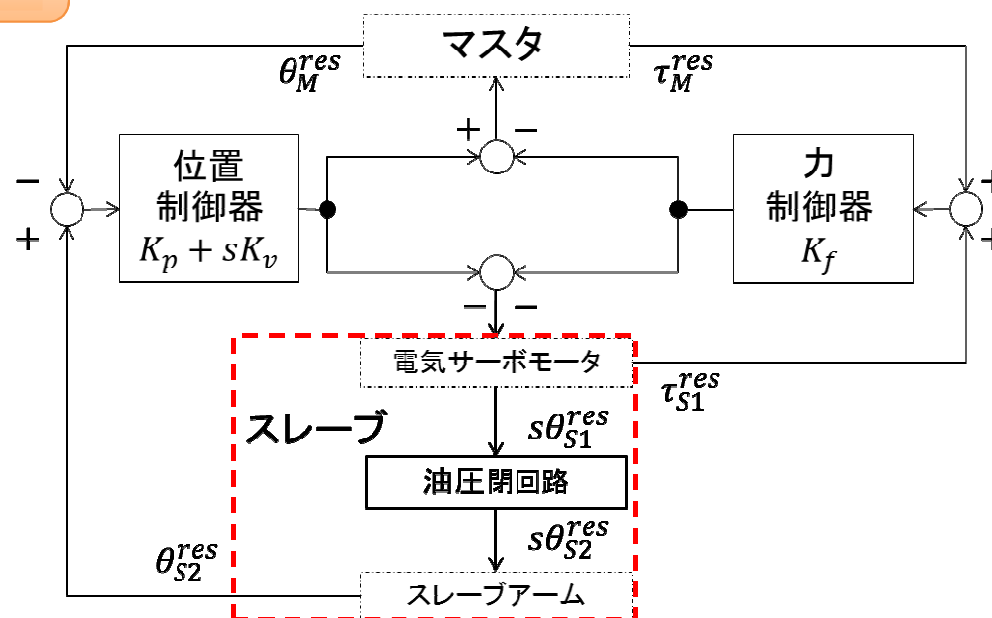
制御系

4ch型バイラテラル制御[5]

位置と力の制御目標

$$\theta_M^{res} - \theta_S^{res} = 0$$

$$\tau_M^{res} + \tau_S^{res} = 0$$



センシング方法

位置情報(角度 θ)

エンコーダで計測

力情報(トルク τ)

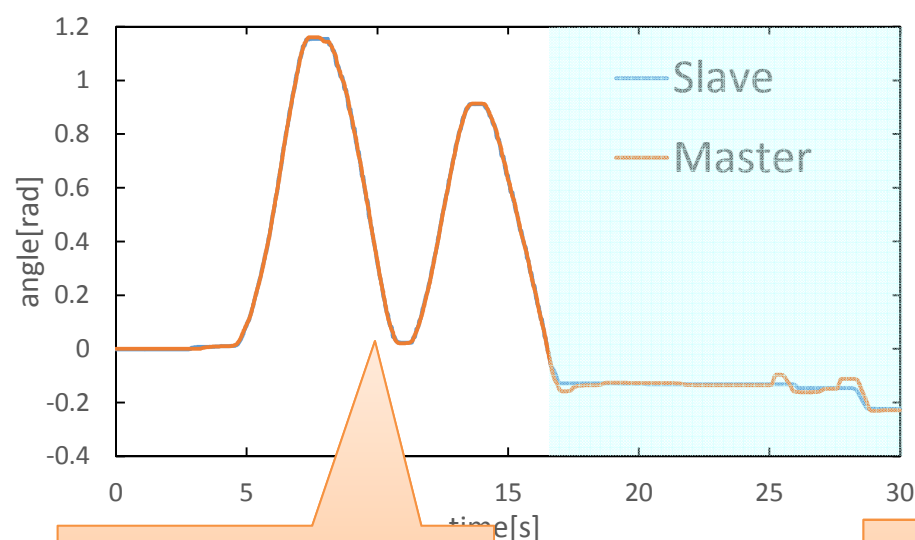
反力推定オブザーバ[6]で推定

[5]Y. Matsumoto, S. Katsura, and K. Ohnishi: "An Analysis and Design of Bilateral Control Based on Disturbance Observer," in *Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology*, Vol. 2, pp. 802-807 (2003)

[6]村上 俊之:多自由度力センサレスバイラテラルシステムの作業空間における制御設計法と性能評価 Vol. 7, pp. 755-763 (2012)

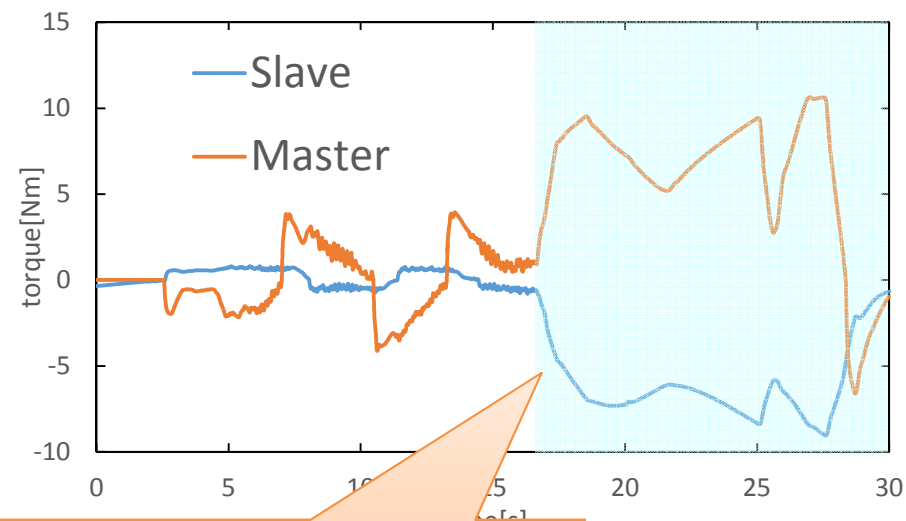
実験結果

バイラテラル制御による位置の追従と力覚呈示



マスタにスレーブ
が追従している

位置応答



マスタとスレーブで作用
反作用の法則が成立し、
力覚呈示を確認した

力応答

マスタロボットを操作し、約15秒間自由動作を行った後、
スレーブロボットを環境に接触させた。

実験結果

バックドライバビリティの確認

スレーブロボットのバックドライブ開始トルクの測定

| | 電源非投入時 | 力制御時 |
|--------------|--------|--------|
| 従来手法(油圧開回路) | 15.4Nm | 0.38Nm |
| 本研究手法(油圧閉回路) | 14.0Nm | 11.8Nm |

ギア比50の減速器をサーボポンプに搭載したためバックドライバビリティを高めることができなかった。ポンプによる効率の低下も要因として考えられる。



従来手法の
スレーブロボット



本研究手法の
スレーブロボット

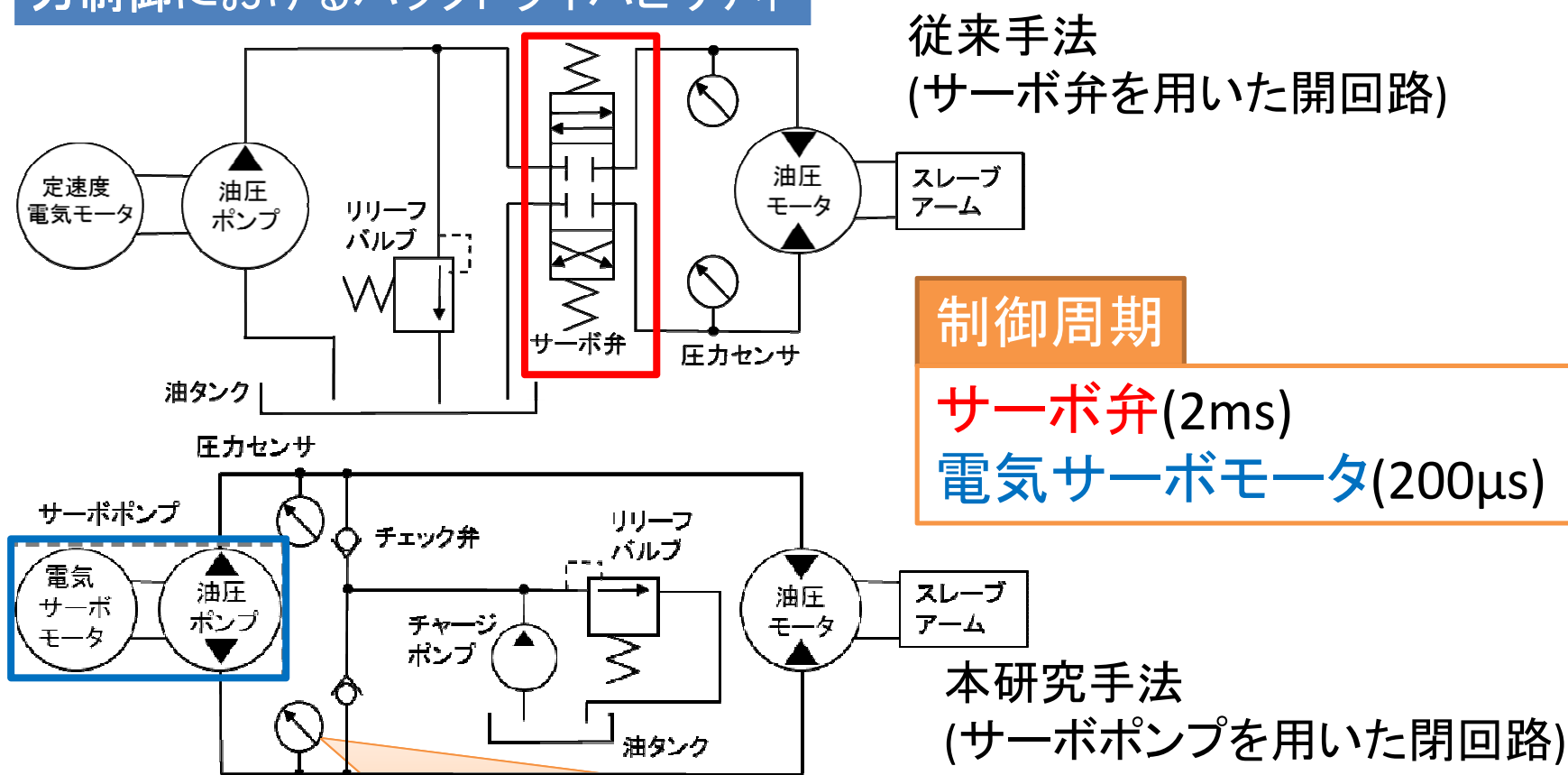


サーボポンプ

実験結果

バックドライバビリティの確認

力制御におけるバックドライバビリティ



力情報のセンシングに圧力センサを用いることで外力に対する感度を高めることができる

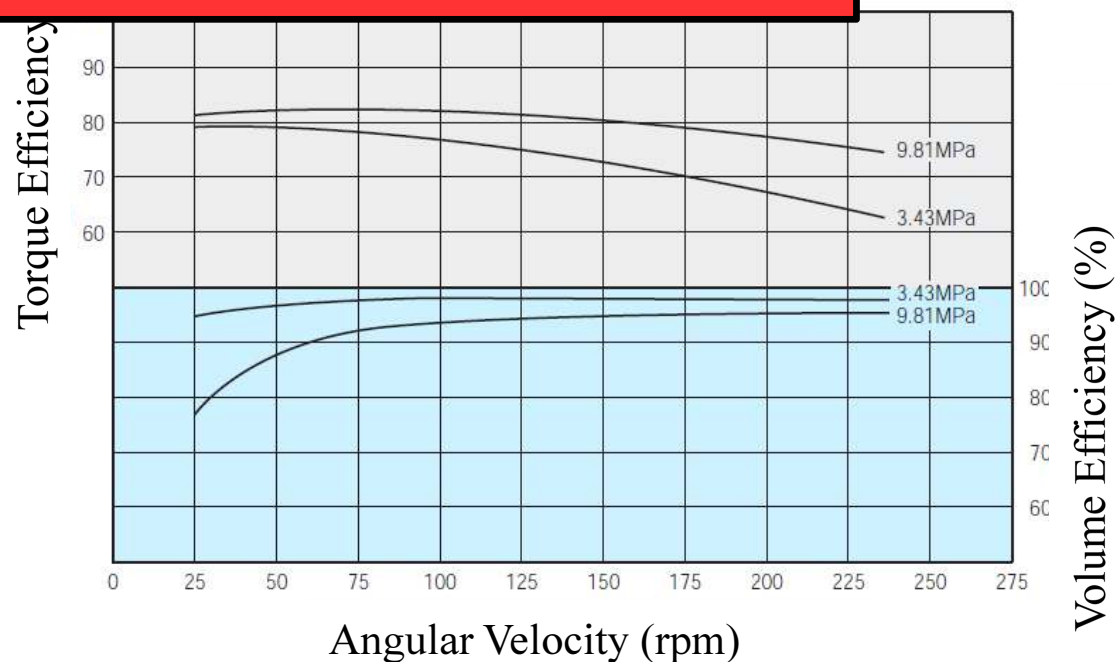
まとめ

- 高バックドライバビリティを実現可能な油圧閉回路構成のスレーブロボットを開発した
- 電気-油圧アクチュエータ間のバイラテラル制御を行い、力覚呈示を確認した
- サーボポンプに搭載する減速器の課題を見出した
- 今後は圧力センサを用いた出力節での制御を実装し、DDモータを搭載したサーボポンプを作成することでバックドライバビリティを改善する

油圧アクチュエータの効率

油圧アクチュエータの特性

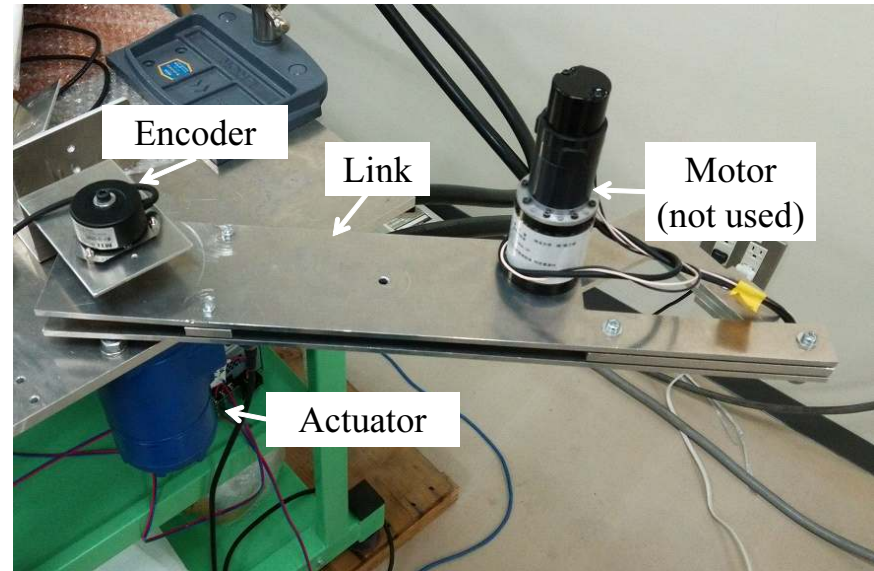
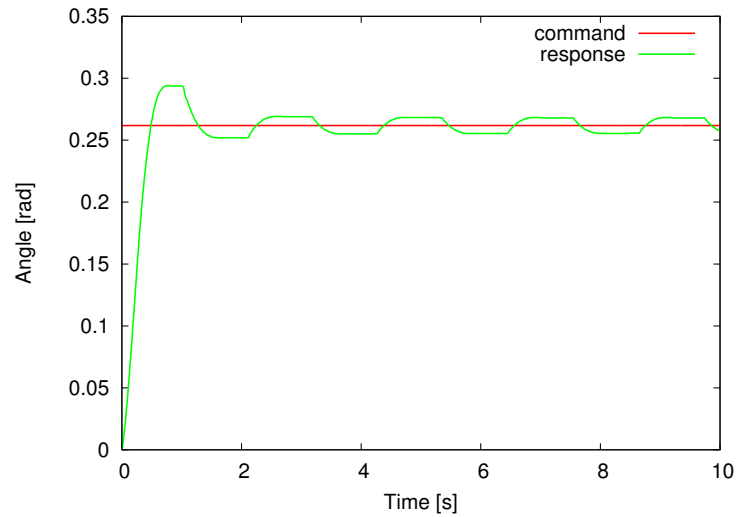
- 零速度付近で効率が激減
- 非常に大きな静止摩擦と等価



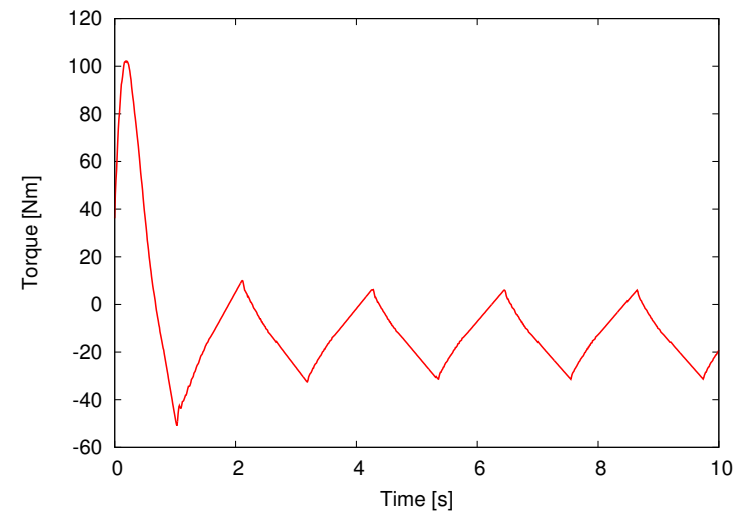
静止摩擦の影響

積分器を入れると
振動が消えない

位置応答



制御入力



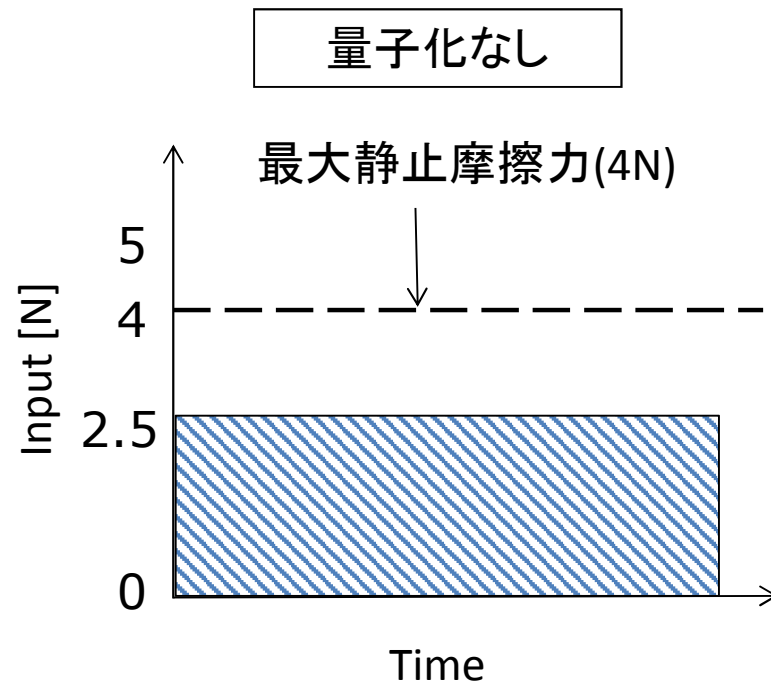
摩擦補償

摩擦補償制御の要求仕様

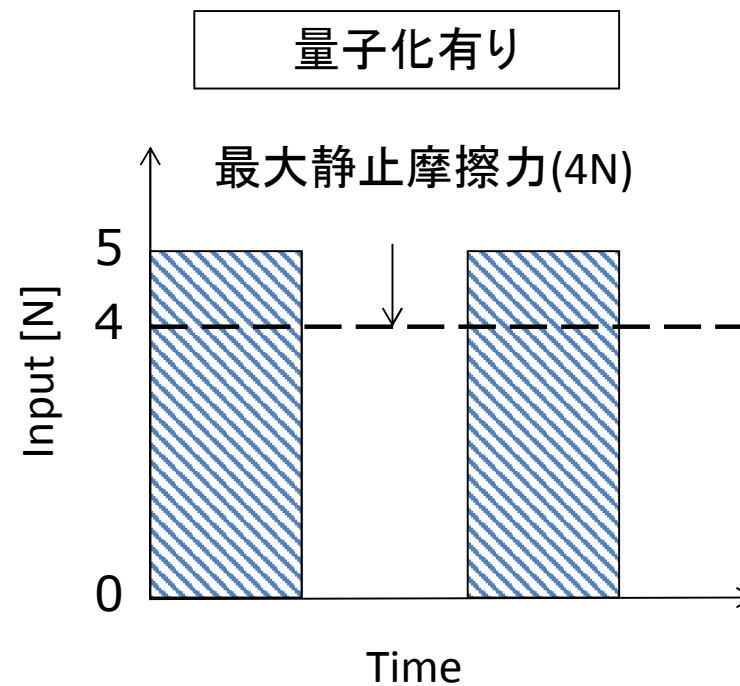
- オンライン同定・パラメータ調整が不要
 - 力制御やバイラテラル制御の時には、モデル化できない外力が制御変数となる。
 - 高速な応答が求められるため、同定は間に合わない。
- 専用の制御系設計論が不要
 - バイラテラル制御は複数ロボットの協調作業なので他の制御系設計論に影響がないことが重要である。

制御系

量子化による静止摩擦の回避



アクチュエータは動かない

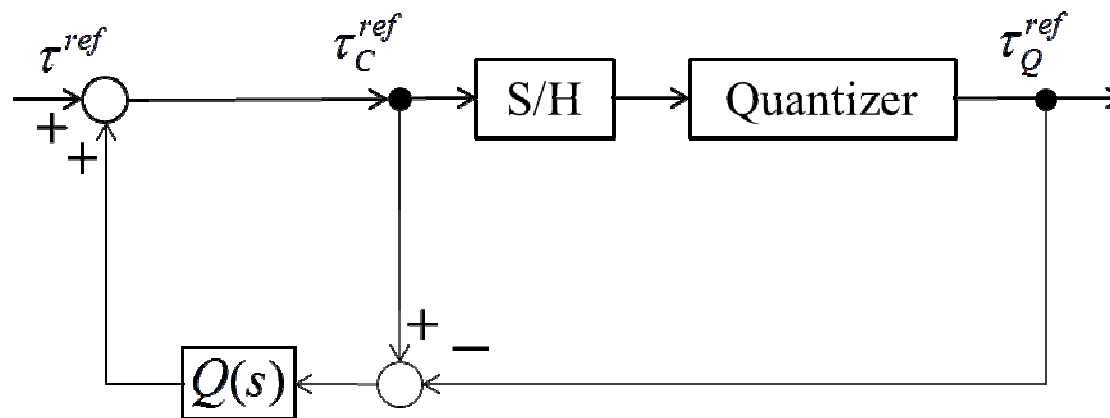


アクチュエータは動く

制御系

フィードバック変調器

- 量子化誤差の影響を抑圧可能
- 安定性は二次のLPF $Q(s)$ により保証可能

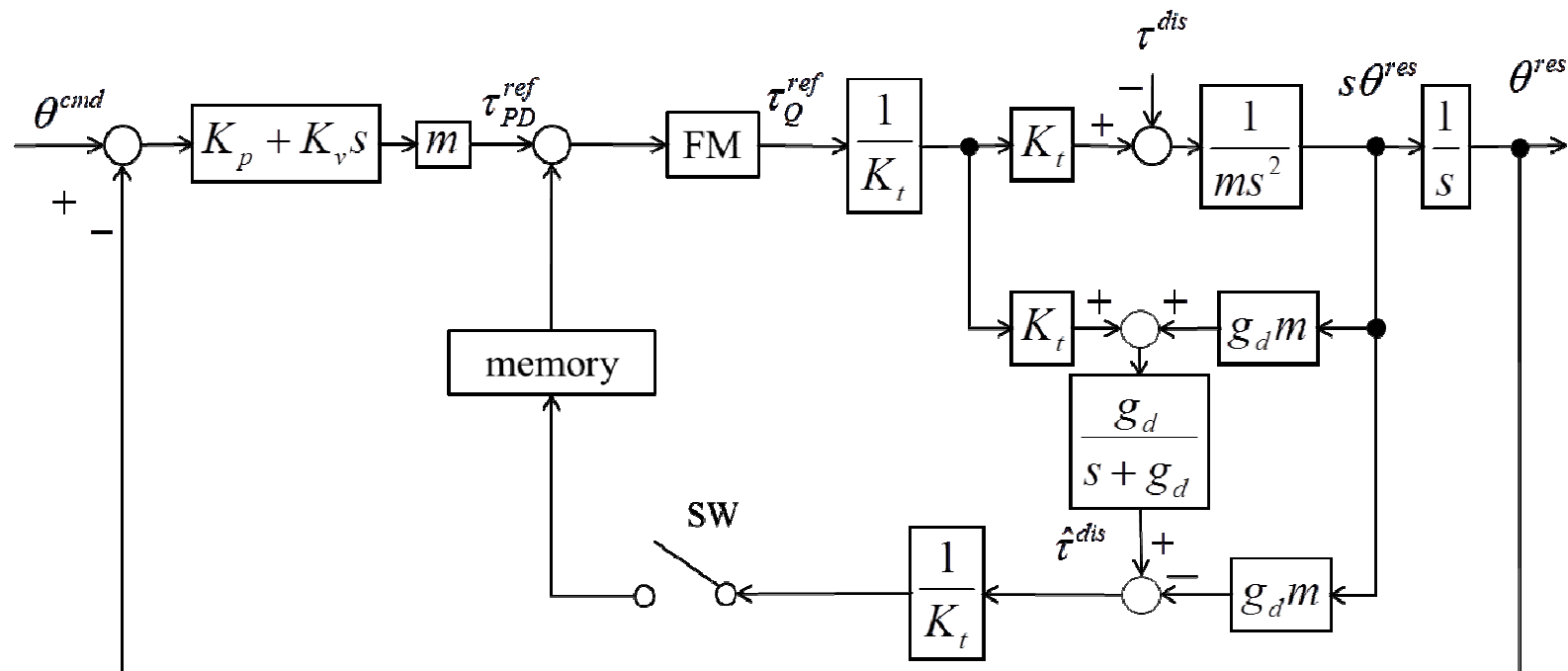


$$1 - Q(s) = \left(\frac{Ts}{Ts + 1} \right)^2$$

制御系

PD制御 + 外乱オブザーバ + フィードバック変調器

$$\tau^{ref} = \begin{cases} \tau_{PD}^{ref} + \hat{\tau}^{dis} & (|\dot{\theta}| > T_{h1}) \\ \tau_{PD}^{ref} + \hat{\tau}_{mem}^{dis} & (|\dot{\theta}| \leq T_{h1}) \end{cases} \quad \tau_Q^{ref} = \begin{cases} \tau^{ref} & (|\dot{\theta}| > T_{h2}) \\ \tau^{ref} + (1 - Q(s))\epsilon & (|\dot{\theta}| \leq T_{h2}) \end{cases}$$



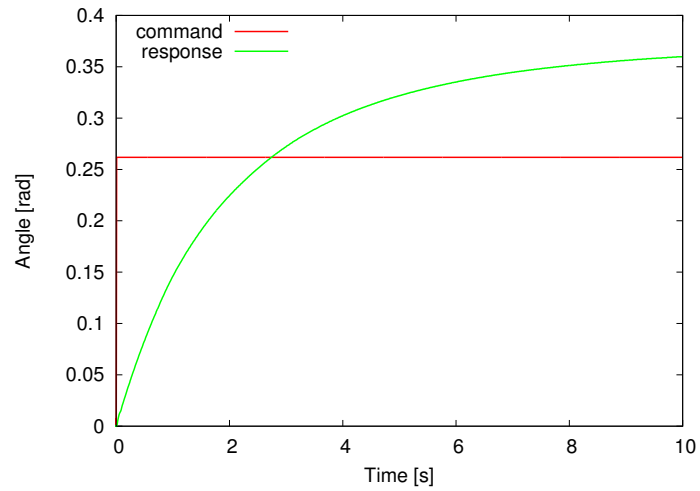
実験

Table III. Control Parameters (Experiment)

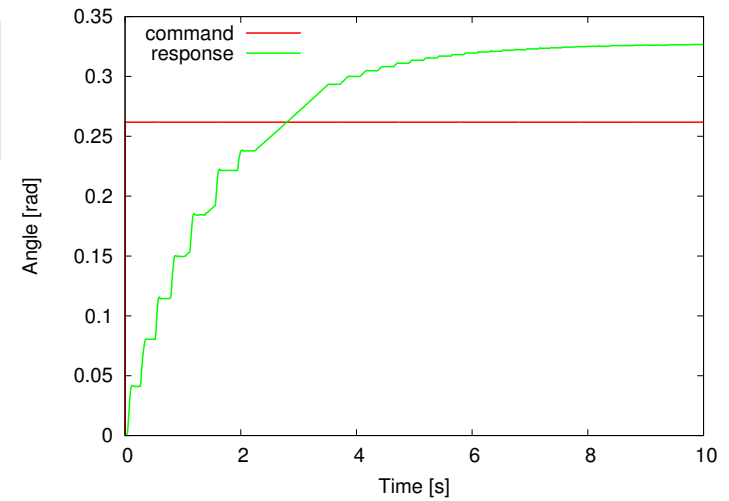
| | | |
|-------------|--|----------------------------|
| m | Inertia | .1.17 [kgm ²] |
| K_p | Proportional Gain | 100 [1/s ²] |
| K_v | Derivative Gain | 20 [1/s] |
| g_d | Cut-off Angular Frequency of DOB | 40 [rad/s] |
| g_p | Cut-off Angular Frequency of Pseudo Differential | 30 [rad/s] |
| St | Sampling Period of Control | 0.005 [s] |
| St_s | Sampling Period of Sensing | 0.0005 [s] |
| k_x | Flow Gain | 0.467×10^{-3} |
| k_p | Pressure Gain | 0.347×10^{-3} |
| η_{tn} | Nominal Pressure Efficiency | 0.8 |
| D_{th} | Displacement | 230 [cm ³ /rev] |
| d | Output Quantization | 100 [Nm] |
| T_{h1} | Threshold | 0.01 [rad/s] |
| T_{h2} | Threshold | 0.2 [rad/s] |

実験

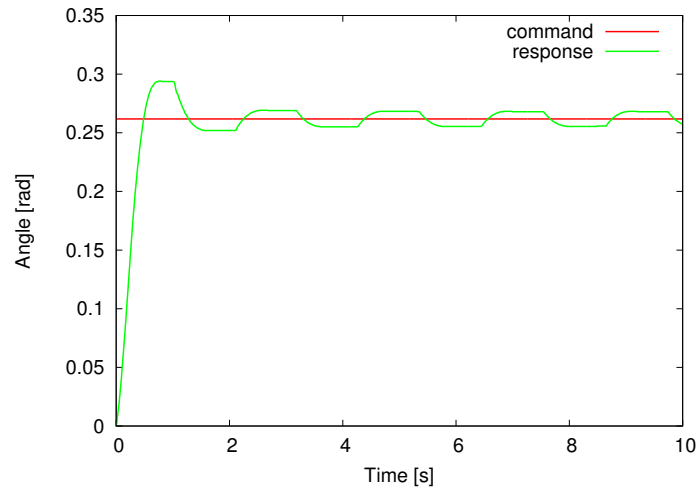
PD



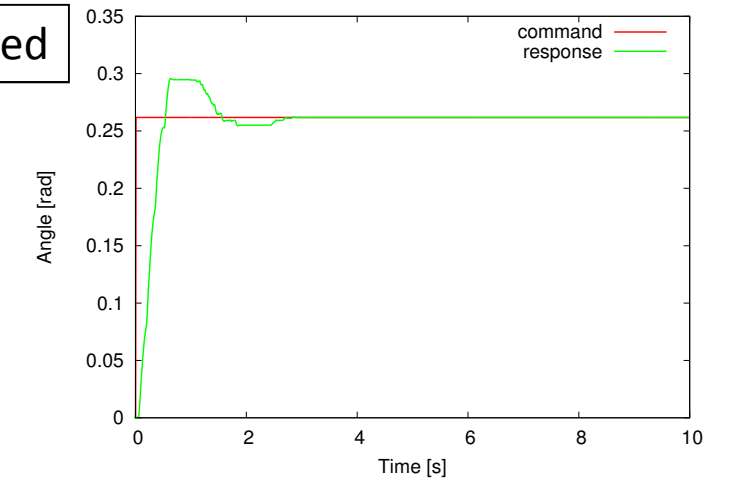
PD +FM



PD +DOB



Proposed



実験

