

# カメラ画像・加速度・ねじれトルク を用いたフレキシブルアームの 位置制御



三重大学大学院工学研究科  
電気電子工学専攻

2022（令和4）年度修士論文

魚 谷 尚 志

# 目次

<b>1</b>	<b>序論</b>	<b>2</b>
1.1	研究背景 . . . . .	2
1.2	本論文の構成 . . . . .	4
<b>2</b>	<b>モデリング</b>	<b>5</b>
2.1	フレキシブルアームの動力学 . . . . .	5
2.2	カメラ . . . . .	6
<b>3</b>	<b>制御器設計</b>	<b>9</b>
3.1	角度制御器 . . . . .	9
3.2	外乱オブザーバ . . . . .	10
3.3	状態オブザーバ (SOB) . . . . .	11
3.4	ねじれトルクオブザーバ (RTOB) . . . . .	12
3.5	手法の分類 . . . . .	12
3.5.1	比較手法 . . . . .	12
3.5.2	提案手法 . . . . .	12
3.6	$f_1$ の設計 . . . . .	12
3.6.1	設計条件と結果 . . . . .	12
<b>4</b>	<b>シミュレーション</b>	<b>17</b>
4.1	シミュレーション条件 . . . . .	17
4.2	ステップ入力時の評価 . . . . .	17
<b>5</b>	<b>結論</b>	<b>20</b>
	参考文献	21

# 第 1 章

## 序論

---

### 1.1 研究背景

「協働ロボットや産業用ロボットのアーム部を軽量化すると、低剛性化に伴う 2 つの問題が生じる：1 つ目は機械振動が起こりやすくなることである。2 つ目はアーム関節角度からアーム先端位置を求めにくくなることである。これらの問題の解決策として、カメラを用いて計測したアーム先端位置を制御に用いるというアプローチが考えられる。」以下、論理樹形図に沿って、要点だけを単純明快に記述していく。

文献 [1] では、フレキシブルリンクマニピュレータの制御に視覚を使用することで、タスクレベルの制御に対する総合的な解決策として挙げられている。また、文献 [2] では、固定カメラを用いたロボットマニピュレータの動的制御のための新しい適応制御器が提案されている。文献 [3] では、フレキシブルアームのセミクローズド制御系に対するオープンループ制御に基づく振動抑制手法として、波動モデルに基づく指令値整形器を提案している。しかし、文献 [1] [2] [3] では、モータの角度を用いていないため、モータの角度の基準位置のズレを気にする必要があります。

エンコーダを用いる手法は、視覚センサとしてカメラを使うか使わないかに分類できる。カメラを使わない手法として、文献 [4] では、ねじれトルクのフィードバックに基づく振動抑制制御において、アームのモータ側の加速度情報をフィードバックすることにより、アーム慣性の変動やアーム外乱に対するロバスト性の向上をさせている。また、文献 [5] では、アームの分布定数モデルを用い

た姿勢変動及び先端負荷の変動に対するロバスト安定性の解析と実験を行っている. 文献 [6] では, 直角座標系フレキシブルアームを作成し, 1 次モード振動を抑制するような新たな位置制御法を提案している. 文献 [7] では, エンコーダと圧電パッチアクチュエータを用いて先端位置の振動抑制を行っている. しかしながら, 文献 [4] [5] [6] [7] の手法では, カメラを使っていないため, アーム先端の正確な位置の測定が困難である.

カメラを使う手法は, ねじれトルクをフィードバックする手法としない手法に分類できる. ねじれトルクをフィードバックしない手法として文献 [8] では, 画像データ量を減らすことによる検索範囲の限定, ビデオシステムの利用によりサンプリングレートの増加, 最小二乗法による 3 つのアプローチを用いて振動測定と状態計算の速度と精度の向上をさせている. 文献 [9] では, 2 リンク平面フレキシブルマニピュレータの先端の変形を測定をするためにカメラセンサを歪ゲージの測定値と一緒に使用する制御理論を採用している. 文献 [10] では, フレキシブルマニピュレータの動的方程式を高速サブシステムと低速サブシステムに分離するために特異摂動法を用いて振動抑制をしている. 文献 [11] では, CCD カメラから得られる画像情報の遅れを補償するとともに画像情報のサンプル点間上で推定された変位情報入力とするカルマンフィルタにより速度推定を行う方法を提案している. 文献 [12] では, 非線形ロボットダイナミクスに基づく不動点の安定性を示すリアプノフ理論により, 画像誤差がゼロに漸近収束することを提案しています. 文献 [13] では, スピルオーバを考慮した振動抑制と CCD カメラを用いた適応制御を行っている. しかしながら文献 [8] [9] [10] [11] [12] [13] の手法ではねじれトルクをフィードバックしていないため, 過度なねじれが生じ、振動抑制が困難という欠点があります.

ねじれトルクをフィードバックする手法は加速度センサを用いる手法と用いない手法に分類できる. 加速度センサを用いない手法として文献 [14] では, 画像処理方法の適応に伴う視覚センサによる曲げ振動とねじり振動の測定のデカップリングを用いて, 低周波振動を効果的に抑制できることを示している. . . また, 文献 [15] では, 従来の PD 制御と共振比制御の両方に基づき, 極配置の決定方法について議論しており, 内部ねじり反作用トルクの抑制が実現できることを示している. しかしながら, 文献 [14] [15] では, アーム先端位置の計測をカメラのみに頼ることにより, 計測遅延や離散化誤差が問題となる.

そこで加速度センサを用いることで, さらに精密な制御が可能となるのではないかと考えられる.

以上がフレキシブルアームの位置制御に関する研究の現状である。

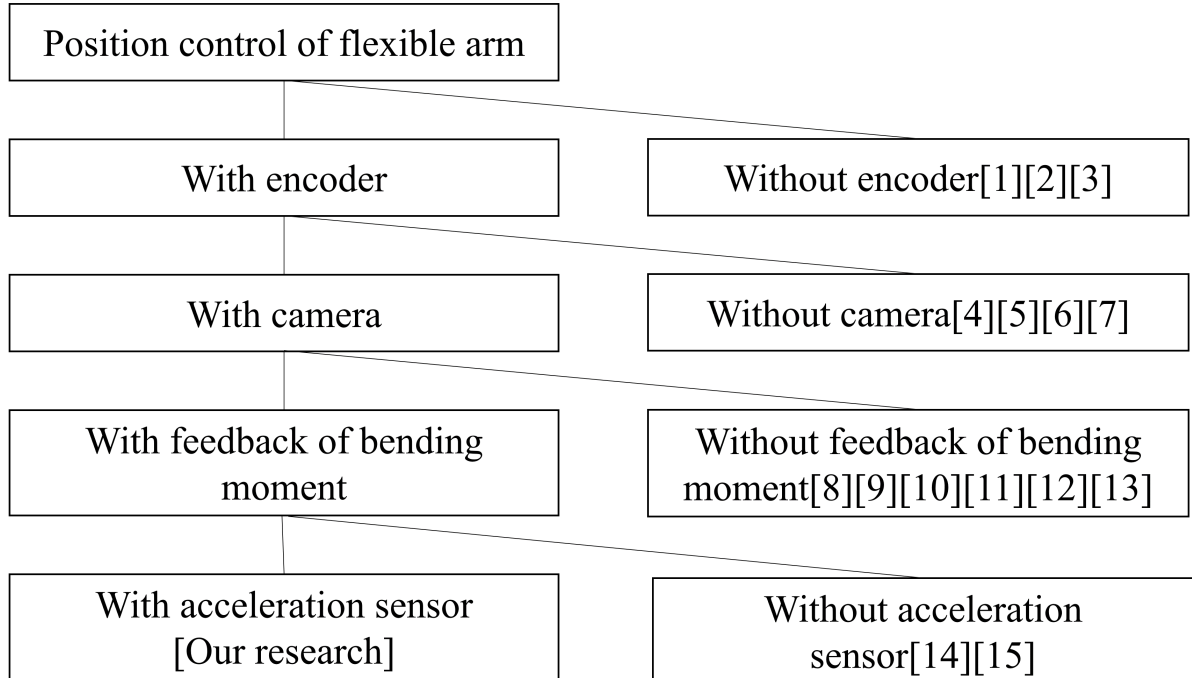


Fig. 1-1: Logic tree diagram of cited references.

## 1.2 本論文の構成

以下に，本論文の構成を示す．2章で制御対象をモデリングする．3章で制御器設計をする．4章でシミュレーションの結果を示す．最後に5章で結論を述べる．

なお本論文中の  $\hat{o}$ ,  $o_n$  はそれぞれ推定値，ノミナル値を示す．

## 第 2 章

# モデリング

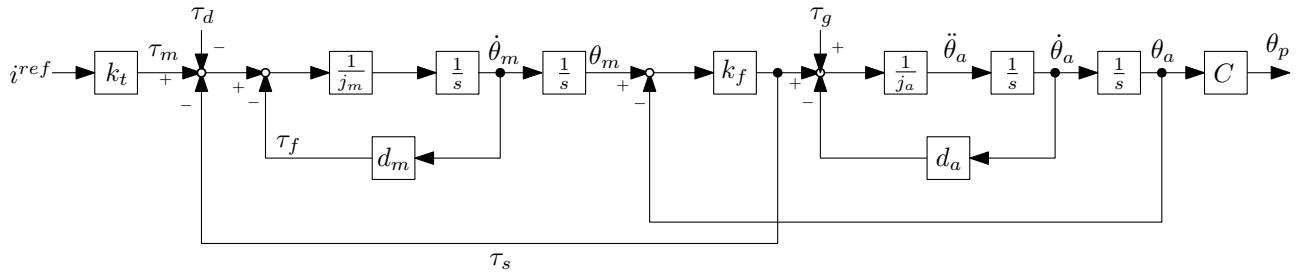


Fig. 2-1: Plant model

### 2.1 フレキシブルアームの動力学

フレキシブルアームの分布乗数モデルを図 2-2(a) に，集中乗数モデルを図 2-2(b) に示す．フレキシブルアームはモータトルク  $\tau_m$  によって回転する．モータ回転軸の角度を  $\theta_m$  とし，アーム先端部の角度を  $\theta_a$  とする．集中乗数モデルのアーム先端側の第 1 リンクの慣性モーメントは  $j_a$ ，モータ側の第 2 リンクの慣性モーメントは  $j_m$  とする．第 1 リンクと第 2 リンクの長さは共に  $a$  とし，質量は  $m$  とする．第 1 リンクと第 2 リンクはばね定数が  $k_f$  のねじりばねを介して連結されているものとする．ねじりばねのねじり角度は  $\theta_m - \theta_a$  で表すことができる．また，フレキシブルアーム

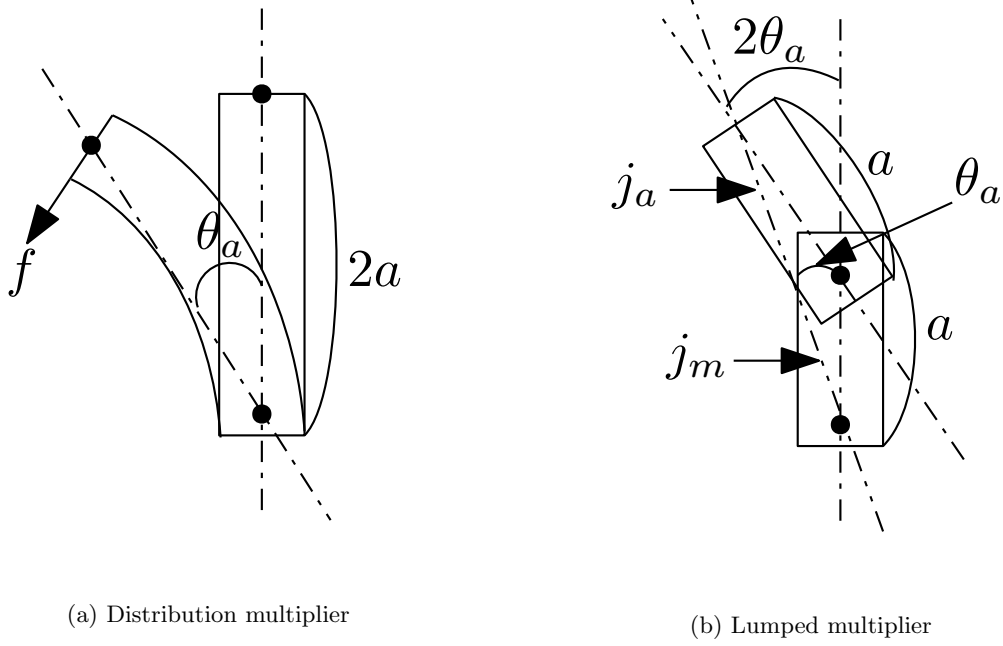


Fig. 2-2: Target model of arm

ムのブロック線図を Fig. 2-1 に示す. ここで, 各パラメータの名称を Table.2.1 に示す.  
モータ回転軸周りの運動方程式は (2.1)–(2.4) 式で表される.

$$j_m \ddot{\theta}_m + \tau_f = \tau_m - \tau_s - \tau_d \quad (2.1)$$

$$\tau_f = d_m \dot{\theta}_m \quad (2.2)$$

$$\tau_m = k_t i^{ref} \quad (2.3)$$

$$\tau_s = k_f (\theta_m - \theta_a) \quad (2.4)$$

$$j_a \ddot{\theta}_a + d_a \dot{\theta}_a = \tau_s + \tau_g \quad (2.5)$$

## 2.2 カメラ

Fig. 2-3 にカメラのブロック線図を示す. ここで, 各パラメータの名称を Table.2.2 に示す. カメラで計測したモータ角度  $\theta_p(t)$  は (2.6) 式で表される.

Table 2.1: Parameter name1

$i^{ref}$	モータに流れる電流
$k_t$	モータのトルク定数
$\tau_m$	モータの駆動トルク
$\tau_s$	ねじれトルク
$\tau_d$	クーロン摩擦
$d_m$	モータの粘性摩擦係数
$d_a$	アームの粘性摩擦係数
$j_m$	モータの慣性モーメント
$j_a$	アームの慣性モーメント
$\theta_m$	モータの角度
$\dot{\theta}_m$	モータの角速度
$\ddot{\theta}_m$	モータの角加速度
$\theta_a$	アームの角度
$\dot{\theta}_a$	アームの角速度
$\ddot{\theta}_a$	アームの角加速度
$k_f$	ばね定数
$\theta_p$	カメラの測定したアーム角度
$C$	カメラ

$$\begin{aligned}
 \theta_p(t) &= e^{-ls} H_0 \theta_a[k] \\
 &= C \theta_a(t)
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

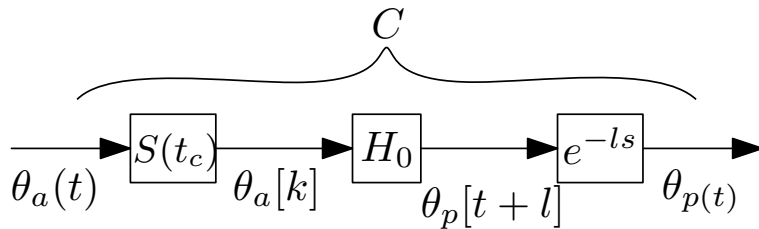


Fig. 2-3: Camera



Table 2.2: Parameter name2

$S(t_c)$	サンプリング周期 $t_c$ のサンブラ
$H_0$	零次ホールダ
$l$	無駄時間
$e^{-ls}$	無駄時間モデル
$\theta_a(t)$	カメラの入力
$\theta_a[k]$	$\theta_a[k] := \theta_a(kt_c)$ ( $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ ) のサンプル値
$t_c$	カメラのサンプリング周期

## 第 3 章

# 制御器設計

---

本節では角度制御器とねじれトルクフィードバックを設計する.

### 3.1 角度制御器

Fig. 3-1 に全制御系のブロック線図を示す. ここで, DOB, Plant model, SOB, RTOB はそれぞれ外乱オブザーバ, 制御対象, 状態オブザーバ, ねじれトルク推定オブザーバを表し, その DOB, SOB のブロック線図はそれぞれ Fig. 3-2, Fig. 3-3, Fig. 3-4 で与えられる. 各パラメータの名称は Table.?? に示す.

出力電流  $i_m^{ref}$  は (3.1) 式で与える.

$$\begin{aligned} i^{ref} = & \frac{j_{mn}}{k_{tn}} \left( k_1 + \frac{gs}{g+s} k_2 \right) (\theta_a^{ref} - \hat{\theta}_a) \\ & - c_r \frac{\hat{\tau}_s}{k_{tn}} + \frac{\hat{\tau}_d}{k_{tn}} \end{aligned} \quad (3.1)$$

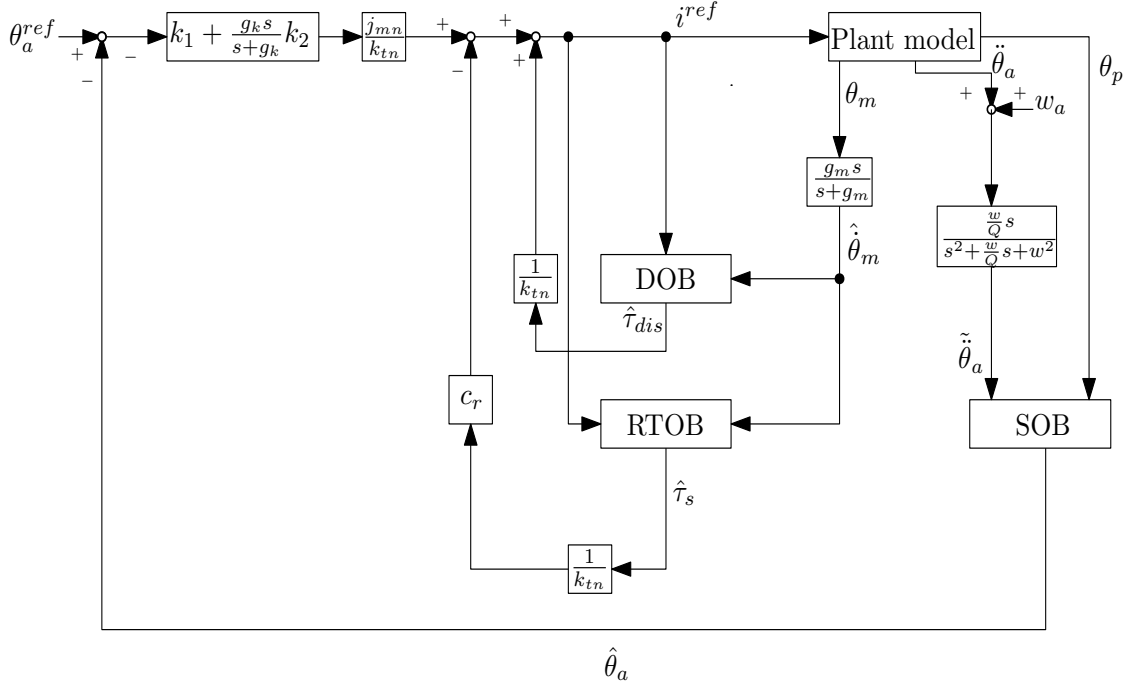


Fig. 3-1: Block diagram of all control systems

## 3.2 外乱オブザーバ

Fig.3-2 に示した DOB による推定外乱トルク  $\hat{\tau}_{dis}$  を (3.2) 式で与える.

$$\hat{\tau}_{dis} = \frac{g_d}{s + g_d} (k_{tn} i^{ref} - s j_{mn} \hat{\dot{\theta}}_m) \quad (3.2)$$

$$\hat{\dot{\theta}}_m = \frac{g_m s}{s + g_m} \theta_m \quad (3.3)$$

Table 3.1: Physical parameters

$\theta_m^{ref}$	角度指令値
$k_1$	比例ゲイン
$k_2$	微分ゲイン
$c_r$	任意に設定できるフィードバックゲイン
$\hat{i}_s$	推定した軸ねじれ電流
$\hat{i}_d$	推定した外乱の電流
$j_{mn}$	モータ慣性のノミナル値
$k_{tn}$	トルク定数のノミナル値
$g_d$	外乱オブザーバのカットオフ周波数
$g_s$	ねじれトルクオブザーバのカットオフ周波数
$\hat{\tau}_d$	推定外乱トルク
$w_a$	加速度センサノイズ
$f_1$	オブザーバの比例ゲイン
$f_2$	オブザーバの微分ゲイン
$\hat{\theta}_a$	アーム角度推定値
$\dot{\hat{\theta}}_a$	アーム角速度推定値
$\ddot{\hat{\theta}}_a$	アーム角加速度推定値
$t_s$	制御周期
$w$	カットオフ角周波数
$Q$	Q 値

### 3.3 状態オブザーバ (SOB)

Fig.3-3 に示した SOB による推定角度  $\hat{\theta}_a$  を (3.4) 式, (3.5) 式, (3.6) 式で与える.

$$\hat{\theta}_a = \frac{1}{s} \dot{\hat{\theta}}_a \quad (3.4)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_a = \frac{1}{s} (f_1 \theta_p + \ddot{\hat{\theta}}_a) + f_2 \theta_p \quad (3.5)$$

$$\ddot{\hat{\theta}}_a = (\ddot{\theta}_a + w_a) \frac{\frac{w}{Q} s}{s^2 + \frac{w}{Q} s + w^2} \quad (3.6)$$

$$f_2 = 2\sqrt{f_1} \quad (3.7)$$

### 3.4 ねじれトルクオブザーバ (RTOB)

Fig.3-4 に示した RTOB による推定ねじれトルク  $\hat{\tau}_{dis}$  を (3.8) 式, (3.9) 式で与える.

$$\hat{\tau}_{dis} = \frac{g_s}{s + g_s} (k_{tn} i^{ref} - s j_{mn} \hat{\theta}_m - \tau_d - \tau_f) \quad (3.8)$$

$$\hat{\theta}_m = \frac{g_m s}{s + g_m} \theta_m \quad (3.9)$$

### 3.5 手法の分類

#### 3.5.1 比較手法

比較手法では, (3.10) 式で表されるように, アーム先端の加速度センサを用いずにカメラの値をそのままフィードバックする.

$$\hat{\theta}_a = \theta_p \quad (3.10)$$

#### 3.5.2 提案手法

提案手法では, (3.11) 式~(3.12) 式で表されるように, 加速度センサを用いる. つまり, 提案手法では  $g_l \neq 0$  を代入する形で  $\hat{\theta}_a$  を求める. また, 加速度センサの絶対値の値によって  $f_1$  の値を切り替えている.

$$(3.4) \text{ 式} \sim (3.6) \text{ 式} \quad (3.11)$$

$$f_1 = \begin{cases} 0 (\tilde{\theta}_a \leq -10.0 \parallel 10.0 \leq \tilde{\theta}_a) \\ 410 (-10.0 < \tilde{\theta}_a < 10.0) \end{cases} \quad (3.12)$$

### 3.6 $f_1$ の設計

#### 3.6.1 設計条件と結果

「カメラのナイキスト周波数 ( $f_n$  Hz) 以下では推定値の位相遅れを  $180+30\text{deg}$  以下とする」という制約条件を課すとカメラ ( $k = 2$ , 離散化は無視) と加速度センサ ( $Q = 0.01$ ,  $w = 2\pi$ ) を併用

した場合に  $f_1, f_2$  の最適解が得られた。その時の算出方法を示す。Fig.3-5 は加速度の真値から状態オブザーバによる推定したアーム角度までをピックアップし、等価変換したブロック線図である。また、A～D は次式に表される。

$$A = \frac{1}{s} \cdot \frac{H}{\tau} \cdot \exp -k \tau s \quad (3.13)$$

$$B = \frac{\frac{w}{Q}s}{s^2 + \frac{w}{Q}s + w^2} \quad (3.14)$$

$$C = \frac{f_1 + f_2 s}{s^2 + f_2 s + f_1} \quad (3.15)$$

$$D = \frac{1}{s^2 + f_2 s + f_1} \quad (3.16)$$

また、 $f_1$  は次式の最適化問題を解くことにより算出する。

$$\min \gamma \quad (3.17)$$

ここで、 $\gamma = \|N\|_2$  であり、 $G$  は  $\theta_a^{ref}$  から  $\theta_a^{ref} - \hat{\theta}_a$  までの閉ループ伝達関数 (目標値追従特性に関する感度関数、(3.18) 式で示した) で、 $N := 1/s^2 - G$  である。

$$G = A * C + B * D \quad (3.18)$$

Table 3.2: Physical parameters

$a$	0.0875 m
$m$	0.035 kg
$k_f$	19.8 Nm/rad
$j_{mn}$	0.00268 kgm <sup>2</sup>
$j_{an}$	0.00025 kgm <sup>2</sup>
$d_{mn}$	0.000179 Nms/rad
$d_{an}$	0.0308 Nms/rad
$k_{tn}$	0.512 Nm/A
$\tau_d$	0.23 Nm/A
$\tau_g$	0.031 Nm/A
$t_s$	0.5 ms
$t_c$	10 ms
$f_n$	50 Hz
$k$	2
$Q$	0.01
$w$	$2 \pi$ Hz
$g_k$	300 rad/s
$g_m$	200 rad/s
$g_d$	300 rad/s
$g_s$	300 rad/s
$w$	$2 \pi$ Hz
$Q$	0.01
$l_n$	2-4 ms

Table 3.3: Design parameters

$k_1(prop)$	3100
$k_2(prop)$	70
$k_1(comp)$	2200
$k_2(comp)$	90

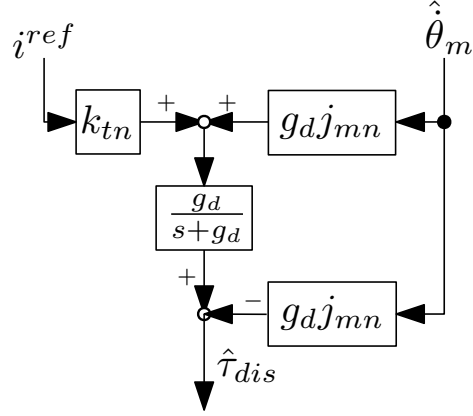


Fig. 3-2: disturbance observer

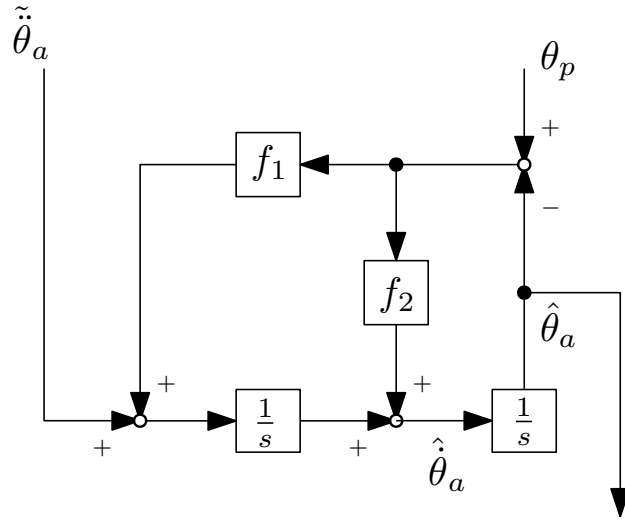


Fig. 3-3: State observer using accelerometer and camera

Table 3.4: Optimization result

$\gamma(\text{prop})$	0.0319
$f_1(\text{prop})$	410
$f_2(\text{prop})$	40.5



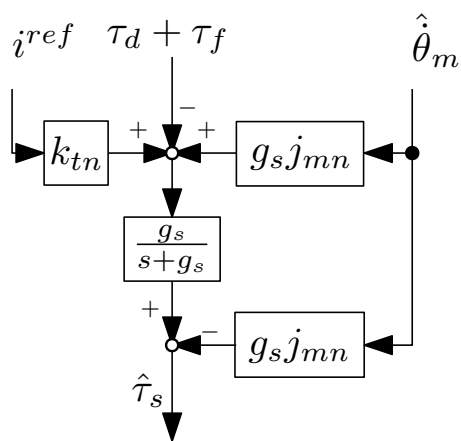


Fig. 3-4: Reaction torque observer

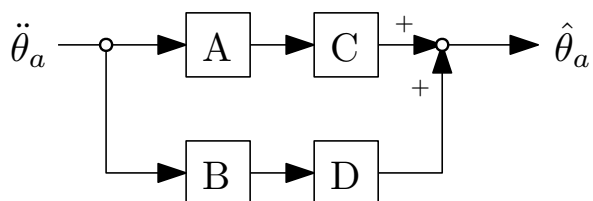


Fig. 3-5: Block diagram with Equivalent conversion

## 第 4 章

# シミュレーション

---

最適化して求めた  $f_1$  と  $f_2$  を用いて提案手法と従来手法の比較を行う.

### 4.1 シミュレーション条件

シミュレーションに用いた物理パラメータを Table. 3.2 に, 設計パラメータを Table. 3.3 に示す. ここで,  $j_{mn} = j_m$ ,  $j_{an} = j_a$ ,  $d_{mn} = d_m$ ,  $d_{an} = d_a$ ,  $k_{tn} = k_t$  を仮定し, 制御入力  $i^{ref}$  の更新周期が  $t_s$  であり,  $l_n$  は無駄時間のノミナル値を表している. また, 比較手法 1 と提案手法の  $c_r$  は  $c_r = 7$ ,  $w_a$  は  $w_a = 2.0\sin(2\pi * 60t) + \cos(2\pi * 667t)$  とした.

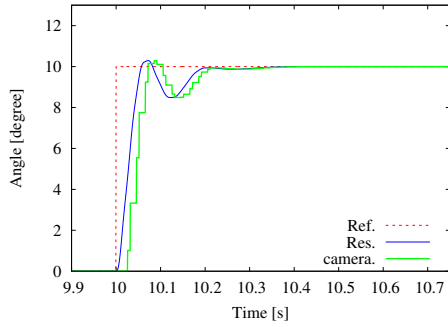
### 4.2 ステップ入力時の評価

$t = 0.0s$  で角度指令  $\theta_m^{ref} = 10$  degree のステップ入力を与えた時の従来手法と提案手法の角度の比較を Fig. 4-1 に示す. また, 従来法と提案手法のそれぞれの DOB の推定値と真値についての比較を Fig.4-2 に, RTOB の推定値と真値の比較を Fig.4-3 に, 提案手法の加速度推定値と真値のグラフを Fig.4-4 に示す. オーバーシュート量を 3%以内の条件を課した場合の従来手法と提案手法の立ち上がり時間とオーバーシュート量の比較を Table.4.1 に示す. ここで, Ref. は  $\theta_a^{ref}$ , Res. は  $\theta_a$  である. Table.4.1 より提案手法のほうが従来手法より対上がり時間が早くかつ、オーバーシュート量が小さいということがわかる. また、Fig.4-1 より提案手法は従来手法と比べて振動が抑制されていることがわかり、Fig.4-2, Fig.4-3 より各推定トルクの推定も提案手法は従来手法と

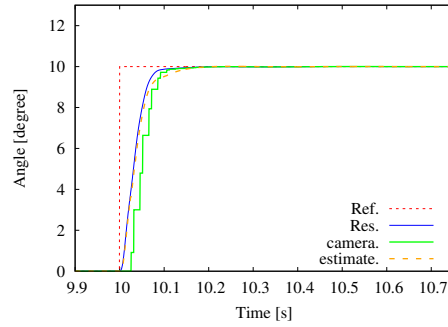
比べて、良くなっていることがわかる．この結果から従来手法と比べて提案手法はフレキシブルアームの位置制御において有用であると言える．

Table 4.1: rise time and amount of overshoot

	立ち上がり時間	オーバーシュート量
prop	0.0570	0.010846
comp	0.1455	0.284575

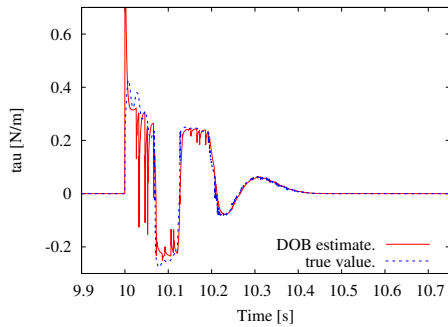


(a) Comparative method

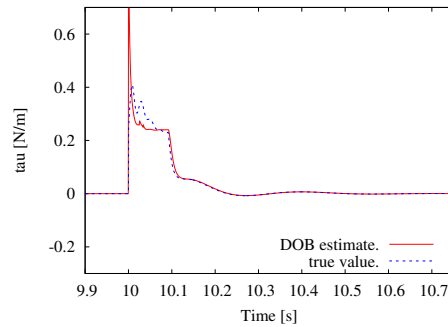


(b) Proposed method

Fig. 4-1: Simulation result of  $\theta_a^{ref}$ ,  $\theta_a$ ,  $\theta_p$  and  $\hat{\theta}_a$



(a) Comparative method



(b) Proposed method

Fig. 4-2: Simulation result of  $\tau_d + \tau_f + \tau_s$ ,  $\hat{\tau}_{dis}$

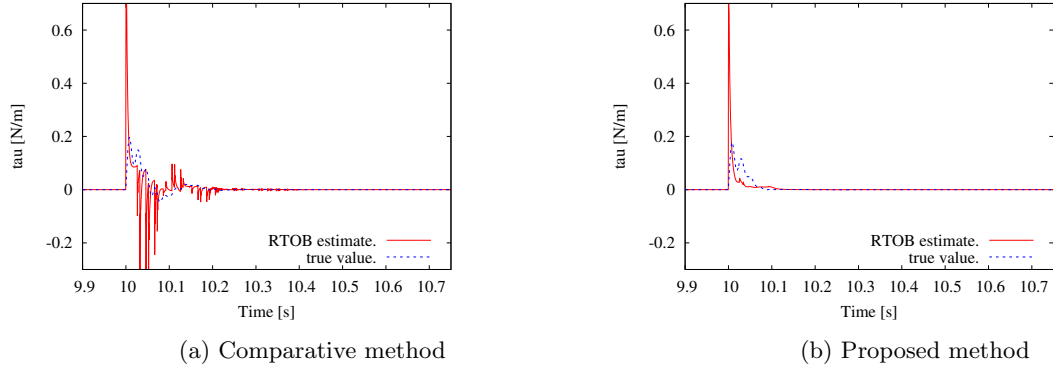
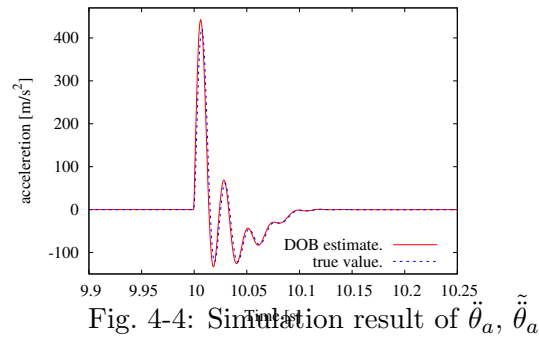


Fig. 4-3: Simulation result of  $\tau_s, \hat{\tau}_s$



## 第 5 章

### 結論

---

本研究ではカメラ画像・加速度・ねじれトルクを用いたフレキシブルアームの制御系を設計することで、安定性低下を防ぎ目標値追従特性の向上を図った。従来手法を状態オブザーバを使用せず、カメラの値をそのままフィードバックする手法とし、提案手法をカメラの値と加速度センサの値を使用し、状態オブザーバを通してアーム先端の角度を推定する手法としたときの従来手法と提案手法の比較により提案手法の有効性をシミュレーションにより確認した。その結果、立ち上がり時間もオーバーシュート量も従来手法と比べて良くなり、加速度センサを併用し、状態オブザーバによりアーム先端の角度を推定することで立ち上がり時間が速くなることがシミュレーション結果から明らかになった。

今後の課題として、 $k_1$ ,  $k_2$ ,  $c_r$  の最適化を行うこととカメラの部分で Smith 法を用いた時にも提案手法の有効性があるかどうかの確認、シミュレーションにより得られた結果を実験にて再現することが挙げられる。

## 参考文献

- [1] Xin Jiang, Atsushi Konno, Masaru Uchiyama: “Vision-Based Task-Level Control of a Flexible-Link Manipulator”, *Advanced Robotics*, Vol.24, No.4, pp.467-488 (2012)
- [2] Yun-Hui Liu, Hesheng Wang, Chengyou Wang, Kin Kwan Lam: “Uncalibrated visual servoing of robots using a depth-independent interaction matrix”, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.22, No.4, pp.804-817 (2006)
- [3] 永嶋 弘樹, 桂 誠一郎: “波動モデルに基づく指令値整形によるフレキシブルアームの振動抑制制御”, 精密工学会誌, Vol.83, pp.593-598 (2017)
- [4] 保坂 元明, 村上 俊之: “多重オブザーバ構成によるフレキシブルアームの防振制御”, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), Vol.124, No.7, pp.693-698 (2004)
- [5] 前川 明寛, 川村 武也, 田中 幸雄: “2 リンクフレキシブルアームの制御 : 第2報, アームの姿勢および先端負荷変動に対するロバスト安定性の評価と実験”, 日本機械学会論文集 C編, Vol.57, No.539, pp.2321-2327 (1991)
- [6] 原田 博之, 三浦 広樹, 山口 晃生, 野田 敦彦: “振動抑制を考慮した直角座標型フレキシブルアームの位置制御”, 日本機械学会論文集 C編, Vol.67, No.661, pp.2792-2797 (2001)
- [7] O.A.Garcia-Perez, G.Silva-Navarro, J.F.Peza-Soli: “Flexible-link robots with combined trajectory tracking and vibration control”, *Applied Mathematical Modelling*, Vol.70, pp.285-298 (2019)

- [8] Pei-Chong Tang, Shui-Shong Lu: “A Video Signal Processing Technique for Vibration Measurement of a Flexible Beam”, *The International Journal of Robotics Research*, (1992)
- [9] LucaBascetta, PaoloRocco: “End-point vibration sensing of planar flexible manipulators through visual servoing”, *Mechatronics*, Vol.16, pp.221-232 (2006)
- [10] Li, Kai and Wang, Hesheng and Liang, Xinwu and Miao, Yanzi: “Visual Servoing of Flexible-Link Manipulators by Considering Vibration Suppression Without Deformation Measurements”, *IEEE Transactions on Cybernetics*, pp.1-10 (2021)
- [11] 高橋 伸也, 西村 秀和, 翁志 強: “画像情報遅れを補償したビジュアルフィードバック制御 (3 リンク宇宙ロボット実験装置を用いた検証)”, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.71, No.707, pp.2225-2232 (2005)
- [12] Wang, Hesheng and Liu, Yun-Hui and Zhou, Dongxiang: “Dynamic Visual Tracking for Manipulators Using an Uncalibrated Fixed Camera”, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.23, No.3, pp.610-617 (2007)
- [13] 橋本 秀紀, 原島 文雄: “フレキシブルアームの振動抑制制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.5, pp.443-447 (1988)
- [14] Zhi-cheng Qiu, Xiang-tong Zhang, and Jian-da Han: “A vision-based vibration sensing and active control for a piezoelectric flexible cantilever plate”, *Journal of Vibration and Control*, Vol.22 (2014)
- [15] S. Katsura and K. Ohnishi: “Force Servoing by Flexible Manipulator Based on Resonance Ratio Control”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.54, No.1, pp.539-547 (2007)

# 謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成に際し、終始丁寧な御指導を賜りました三重大学 大学院工学研究科 電気電子工学専攻 矢代 大祐 助教に心より御礼申し上げます。矢代 先生には、学会発表や実験装置など様々な研究環境をいただき、また、論文の執筆や学会発表の練習では丁寧な指導をして頂きました。この場を借りて、重ねて深く感謝いたします。

電気システム工学講座の全体検討会、修士論文審査会等で適切な指導をして頂いた、三重大学 大学院工学研究科 電気電子工学専攻 駒田 諭 教授、弓場井 一裕 准教授、山村 直紀 准教授、小山 昌人 助教に重ねて謝意を表します。

本研究に関して、常日頃からやさしい指導と多くの助言をして頂いた新崎 拓海 先輩に深く感謝いたします。モーションコントロール分野の輪講、グループ検討会等において鋭い意見や多大な助言を頂きました、高橋 翼 君、辻 裕介 君に厚く感謝を申し上げます。同分野の輪講やグループ検討会等で協力して頂いた、池田 遊斗 君、永澤 慎太郎 君、野場 匡大郎 君、伴藤 信一郎 君に深く感謝いたします。

最後に、6年間何不自由なく大学生活を送らせて頂いた両親に心より感謝いたします。

令和4年2月8日



# 研究業績

## 国際学会発表論文

- [1] Takashi Uotani, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, “Position Control of Flexible Arm using Camera Image, Acceleration and Bending Moment,” *Proceedings of International Symposium (Research Area: A)*, Tsu, Dec. 1st–2nd, 2021.
  
- [2] Takashi Uotani, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, “Position Control of Flexible Arm using Camera Image, Acceleration and Torsion Torque,” *Proceedings of International Symposium (Research Area: A)*, Tsu, Dec. 1st–2nd, 2022.