

令和 3 年 4 月 14 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06233

研究課題名（和文）モーションコントロールのための外乱推定機能を内包する予測制御系設計

研究課題名（英文）Design of predictive control systems with a disturbance estimation mechanism for motion control

研究代表者

佐藤 俊之（Sato, Toshiyuki）

秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授

研究者番号：40315635

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、モーションコントロールへの応用を念頭に、外乱オブザーバのような追加機構を追加することなく、外乱を推定しこれを打ち消すためのモデル予測制御機構に関する検討をおこなった。ここでは主に、モデル予測制御（MPC）の一種であるPredictive Functional Control（PFC）を対象に、内部モデルとして外乱モデルを組み込んだ予測型状態推定器を用いて拡大系を構成することにより、外乱を推定しこれを間接的に打ち消すことを可能にした。また、メカトロサーボ系の位置制御問題に開発手法を適用することにより、実機上でも機能することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロボットやメカトロニクス機器のモーション・コントロールにおいて、位置や速度、力などの物理量を精度良く、かつ高速に制御する必要がある。このような制御を行おうとする場合には一般に、制御対象の精密な動力モデルが必要となる。しかし、精密なモデルの構築には多大なコストが掛かる。本研究成果の意義は、こうしたコストを低減化し、産業的に主流となっているPID制御よりも高度なモデルベース制御手法を提供する点にある。また、制御工学的にも、主となるフィードバック補償器と外乱推定・除去メカニズムとを統合した設計法を開発することは意義がある。

研究成果の概要（英文）：For the aim of motion control, we have studied on model predictive control strategies that have an ability to estimate and cancel disturbance without additive mechanisms such as disturbance observer. Predictive Functional Control (PFC), which is a model predictive control (MPC), is mainly addressed in this research. Generally speaking, PFC does not require the state-estimator. However, to estimate disturbance and cancel it indirectly, we intendedly introduced the prediction-type estimator as an internal model in PFC, constructed an augmented system, and derived the optimal control law. The PFC with such structure is abbreviated as PFC\_EBIM. We applied PFC\_EBIM to a position control problem of a mechatronics servo system. We experimentally confirmed that the designed PFC\_EBIM efficiently estimated and canceled disturbance such as friction and improved the tracking performance.

研究分野：制御工学

キーワード：機械力学・制御 モデル予測制御 状態推定器

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1)グローバル化と労働力人口の減少が進む日本国内の製造業において、コストを削減し対外競争力を確保するために、ロボットアームやテーブル駆動系などのメカトロニクス機械を用いた組立や搬送が今後、ますます重要となる。近年は特に、CPM (Cycle Per Minute) に優れたロボットが国内メカにより開発されるなど、モーションコントロールシステムにおける高速性・高効率性はこれまで以上に重視される傾向にある。

(2)モーションコントロールシステムにおいて、高精度な制御を行おうとする場合には一般に、制御しようとする対象の精密な動力学モデルが必要となる。特に、高速動作を実現しようとする場合には、部材の軽量化に起因する残留振動が生じやすいため、振動特性まで考慮したモデリングが要求される。ところが、精密なモデルの構築には多大な人的および時間的コストが掛かる。また、外乱の存在下では正確なモデリングを行うことは非常に困難なうえ、外乱は高精度な制御を阻害する要因となる。

### 2. 研究の目的

(1)産業用ロボットなどのモーションコントロールシステムにおいて、より高精度で効率的な位置制御を実現し、制御対象のモデリングと制御系設計の労力を低減化するために、外乱オブザーバを用いずに外乱を推定し除去する機能を内包する新たな制御手法を開発すること。

(2)トルク外乱やモデル化誤差が将来時刻における出力に及ぼす影響を、状態変数が拡張された状態推定機構に基づいて予測し、理想的な出力軌道との誤差を最小化するような最適制御入力を算出するための理論構築をおこなうこと。

(3)実際のモーションコントロールシステムを構築し、位置制御実験を通じて、従来の制御手法に対する優位性を検証すること。

### 3. 研究の方法

(1)制御系設計法として、本研究ではモデル予測制御 (Model Predictive Control; MPC) の一種である Predictive Functional Control (PFC) <sup>[1]</sup>を用いる。図1を用いてPFCの考え方を説明する。現在のサンプル時刻を  $k$  とする。図1において  $c$  は制御対象出力  $y_p$  が追従すべき設定値信号をあらわす。現在の制御対象出力  $y_p(k)$  を基点とし、設定値信号への理想的な近づき方をあらわす『参照軌道 (reference trajectory)』と呼ばれる曲線  $y_R$  を定義する。また、参照軌道上に『一致点 (coincidence points)』と呼ばれる点を設定する。次に、一致点において、制御対象出力の予測値  $\hat{y}_p$  と参照軌道の値との差を最小化するように最適制御入力軌道  $u(k), u(k+1), u(k+2), \dots$  を計算する。得られた最適制御入力軌道のうち、 $u(k)$  のみを制御対象に加え、 $u(k+1)$  以降を破棄する。次のサンプル時刻  $k+1$  においては、参照軌道の定義から最適制御入力の適用までの一連のサイクルを繰り返す。以上がPFCによる制御の流れである。

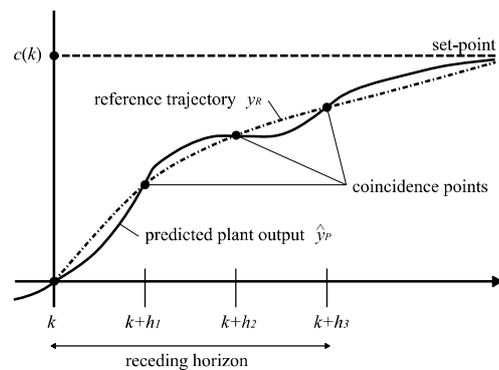


図1 PFC の概念図

(2)PFCの制御性能は内部モデルを用いた予測精度に大きく依存する。そこで、本研究では内部モデルとして、外乱の動的モデルを含めた予測型状態推定器を用いることで外乱を間接的に打ち消し、実制御対象の特性をノミナル特性に近づけるとともに、予測出力の精度を向上させる。以下では、内部モデルとして予測型状態推定器を用いるPFCのことを『内部モデルに状態推定器を用いる Predictive Functional Control (Predictive Functional Control with Estimator-based Internal Model; PFC\_EBIM)』と呼ぶ。通常のPFCと異なる内部モデルを用いることから、本研究ではPFC\_EBIMにおける最適制御則を導出する。

### 4. 研究成果

(1)制御対象の離散時間 SISO 状態空間モデルを次式であらわす：

$$\begin{cases} x_M(k+1) = A_M x_M(k) + b_M u(k), \\ y_M(k) = c_M x_M(k). \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 $x_M \in \mathbb{R}^n$  は状態変数ベクトル、 $u \in \mathbb{R}$  は制御入力、 $y_M \in \mathbb{R}$  はモデル出力をあらわす。式(1)を内部モデルに用いる場合、制御系に加わる外乱の除去は、PFC補償器が有する積分特性のみに依存することになり、高速な外乱除去は期待できない。そこで本研究では、ステップ状

およびランブ状外乱まで表現できる次の外乱モデルを導入した：

$$\begin{cases} d(k+1) \\ \Delta d(k+1) \end{cases} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{cases} d(k) \\ \Delta d(k) \end{cases}. \quad (2)$$

ここで、 $\Delta d(k) := d(k) - d(k-1)$ である．なお、外乱は制御対象入力側に加わるものとする．このとき式(1)と式(2)を用いれば次の拡大系を構成できる：

$$\begin{cases} x_a(k+1) = A_a x_a(k) + b_a u(k), \\ y_a(k) = c_a x_a(k). \end{cases} \quad (3)$$

ただし、

$$\begin{aligned} x_a(k) &:= \begin{pmatrix} x_M(k) \\ d(k) \\ \Delta d(k) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n+2}, \quad A_a := \begin{pmatrix} A_M & b_M & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 1 & 1 \\ \mathbf{0} & 0 & 1 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{(n+2) \times (n+2)}, \\ b_a &:= \begin{pmatrix} b_M \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n+2} \quad c_a := (c_M \quad 0 \quad 0) \in \mathbb{R}^{1 \times (n+2)} \end{aligned} \quad (4)$$

である．式(3)で定義される拡大系に対する予測型状態推定器は次式で定義される．

$$\hat{x}_a(k+1) = A_a \hat{x}_a(k) + b_a u(k) + l \epsilon(k). \quad (5)$$

ここで、 $\epsilon(k) := y_P(k) - c_M \hat{x}_M(k)$ であり、 $y_P(k)$ は実制御対象の出力、 $l$ は推定器ゲインをあらわす．PFC\_EBIMでは、将来の自由応答と強制応答を計算するために式(5)の状態推定器を内部モデルとして利用する．PFCでは、制御入力をサンプル時刻に関する多項式基底関数

$$U_{B_l}(i) = i^{l-1} \quad (6)$$

の重みづけ和を用いて、次のように構成する：

$$u(k+i) = \sum_{l=1}^{n_B} \mu_l(k) U_{B_l}(i) \quad (7)$$

ただし、 $k$ は現在時刻であり、 $\mu_l(k)$  ( $l = 1, 2, \dots, n_B$ )は未知の重み係数である．式(6)より、 $l = 1$ の場合はステップ関数を、 $l = 2$ の場合はランブ関数をあらわすことがわかる．この前提のもとで、式(5)を内部モデルとして用いる場合の最適制御則を導出した．現在時刻を $k$ とすると、 $i$ ステップ先の自由応答は次式で与えられる：

$$\hat{y}_{UF}(k+i) = c_a A_a^i \hat{x}_a(k). \quad (8)$$

一方、総強制応答は、制御入力 $u$ に起因する強制応答と、推定誤差 $\epsilon$ に起因する強制応答の重ね合わせとなる．まず、制御入力 $u$ に起因する強制応答は次のように計算される：

$$\hat{y}_{F_1}(k+i) = \sum_{l=1}^{n_B} \mu_l(k) y_{1B_l}(i). \quad (9)$$

ただし、

$$y_{1B_l}(i) = \sum_{q=0}^{i-1} c_a A_a^{i-1-q} b_a q^{l-1} \quad (10)$$

である．次に、推定誤差 $\epsilon$ に起因する強制応答を求める．これを厳密に計算するには、拡大系の状態変数 $x_a(k)$ がすべて観測可能である必要がある．しかし多くの場合、状態変数の一部しか観測できない．そこで本研究では、一致点が現在時刻よりもそれほど離れておらず、将来時刻における推定誤差 $\hat{\epsilon}(k+i)$ が、現在時刻における推定誤差 $\epsilon(k)$ に比べてあまり変化しないと考えて次の仮定をおく：

$$\epsilon(k+i) \simeq \epsilon(k) = y_P(k) - c_a \hat{x}_a(k), \quad \forall i. \quad (11)$$

式(7)と同様に、推定誤差も基底関数の重みづけ和で表現すると仮定すれば、式(10)よりステップ関数のみで表現していることになる ( $U_{B_1}(i) = 1$ )．以上より推定誤差に起因する強制応答は次のように計算される：

$$\hat{y}_{F_2}(k+i) = \epsilon(k) y_{2B_1}(i). \quad (12)$$

ただし、

$$y_{2B_1}(i) = \sum_{q=0}^{i-1} c_a A_a^{i-1-q} l \quad (13)$$

である．従って、総強制応答は式(9)と式(12)より次のように書ける：

$$\hat{y}_F(k+i) = \hat{y}_{F_1}(k+i) + \hat{y}_{F_2}(k+i) = \sum_{l=1}^{n_B} \mu_l(k) y_{1B_l}(i) + \epsilon(k) y_{2B_1}(i). \quad (14)$$

また、一致点 $h_j$ における予測出力は式(8)と式(14)より次式で与えられる：

$$\hat{y}_P(k+h_j) = \hat{y}_{UF}(k+h_j) + \hat{y}_F(k+h_j). \quad (15)$$

評価関数を

$$J(k) = \sum_{j=1}^{n_h} \{\hat{y}_P(k+h_j) - y_R(k+h_j)\}^2 \quad (16)$$

で定義するとき、最適操作量は、 $\partial J(k) / \partial \mu(k) = 0$ を計算することにより得られる．ただし $\mu(k)$ は次式で定義されるベクトルである：

$$\mu(k) = (\mu_1(k) \quad \mu_2(k) \quad \cdots \quad \mu_{n_B}(k))^T \in \mathbb{R}^{n_B}. \quad (17)$$

以上より，PFC\_EBIM の最適操作量は次式で与えられる：

$$u(k) = k_0(c(k) - y_P(k)) + v_x^T \hat{x}_a(k) + k_\epsilon \epsilon(k). \quad (18)$$

ただし，

$$k_0 := v^T \begin{pmatrix} 1 - \alpha^{h_1} \\ \vdots \\ 1 - \alpha^{h_{n_h}} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}, \quad v_x := - \begin{pmatrix} c_a(A_a^{h_1} - I) \\ \vdots \\ c_a(A_a^{h_{n_h}} - I) \end{pmatrix}^T v \in \mathbb{R}^{n+2}, \quad (19)$$

$$k_\epsilon := -v^T \begin{pmatrix} y_{2B_1}(h_1) \\ \vdots \\ y_{2B_1}(h_{n_h}) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}$$

である．ここで

$$v := (y_{1B}(h_1) \quad \cdots \quad y_{1B}(h_{n_h}))^T \left( \sum_{j=1}^{n_h} y_{1B}(h_j) y_{1B}(h_j)^T \right)^{-1} u_B(0) \in \mathbb{R}^{n_h} \quad (20)$$

であり，

$$y_{1B}(h_j) = (y_{1B_1}(h_j) \quad \cdots \quad y_{1B_{n_B}}(h_j))^T \in \mathbb{R}^{n_B}, \quad (21)$$

$$u_B(0) = (1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0)^T \in \mathbb{Z}^{n_B}$$

である．

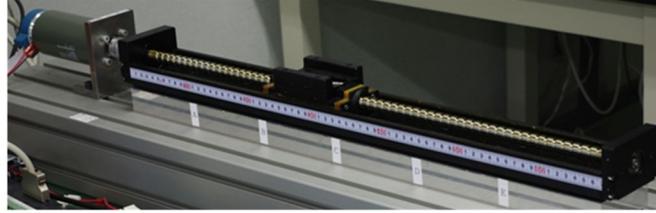


図 2 1 軸位置決め装置

表 1 位置決め装置の仕様

パラメータ	仕様
ボールねじリード	10 mm
ストローク	500 mm
レール長さ	670 mm
定格速度	700 mm/s

表 2 モータの仕様

パラメータ	仕様
定格電圧	24 V
定格電流	2.96 A
定格トルク	0.28 Nm
定格速度	1810 r/min

(2)PFC\_EBIM の制御性能を実験的に評価した．制御対象として，図 2 に示す 1 軸位置決め装置を用いた．装置とモータの仕様をそれぞれ表 1 と表 2 に示す．なお，本研究では，モータの回転角度によりテーブルの位置を制御するセミクロズド制御をおこなう．

モータをトルク制御モードで動かすこととし，モータドライバへのトルク指令値からモータ回転角度までの伝達関数を求めると，以下の一次遅れ系と積分器の直列結合の形式で近似できる．

$$\frac{\Theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K_S}{s(Js+D)}. \quad (22)$$

ここで， $J$  は慣性モーメント， $D$  は粘性摩擦係数， $K_S$  は電圧からトルクへの換算係数をあらわす．本実験装置の場合， $J = 1.5219 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$ ， $D = 5.6201 \times 10^{-4} \text{ Nm/(rad/s)}$ ， $K_S = 0.04 \text{ Nm/V}$  である．サンプリング周期を 1ms とし，式(22)を式(1)の状態空間表現であらわすとき，式(1)に含まれる行列とベクトルはそれぞれ以下ようになる：

$$A_M = \begin{pmatrix} 1 & 0.9982 \times 10^{-3} \\ 0 & 0.9963 \end{pmatrix}, \quad b_M = \begin{pmatrix} 0.1314 \times 10^{-3} \\ 0.2627 \end{pmatrix}, \quad c_M = (1 \quad 0). \quad (23)$$

PFC\_EBIM の制御性能を，通常の PFC および P-PI 制御系の制御性能と比較した．設定値（目標値）として方形波，正弦波，台形曲線を用い，振幅を 50mm とする．図 3 に設定値が方形波の場合の実験結果を示す．設定値に対する誤差を，積分絶対誤差（Integral Absolute Error；IAE）と，積分二乗誤差平方根（Root of Integral Squared Error；RISE）により誤差を評価する．それぞれの定義式は以下ようになる：

$$\begin{cases} \text{IAE} = \int_0^T |e(t)| dt, \\ \text{RISE} = \sqrt{\int_0^T e(t)^2 dt}. \end{cases} \quad (24)$$

各制御方法の IAE 値と RISE 値を表 3 に示す．これより，PFC\_EBIM が，通常の PFC や P-PI 制御に比べて良好な制御性能を示すことが確認された．

表 3 追従誤差の IAE 値と RISE 値

Control method	Reference					
	Rectangular		Sinusoidal		Trapezoidal	
	IAE	RISE	IAE	RISE	IAE	RISE
PFC_EBIM	13.85	22.69	21.22	11.79	10.82	6.45
PFC	27.73	23.13	32.14	17.49	26.98	14.59
P-PI	16.53	22.81	29.28	16.24	15.44	9.01

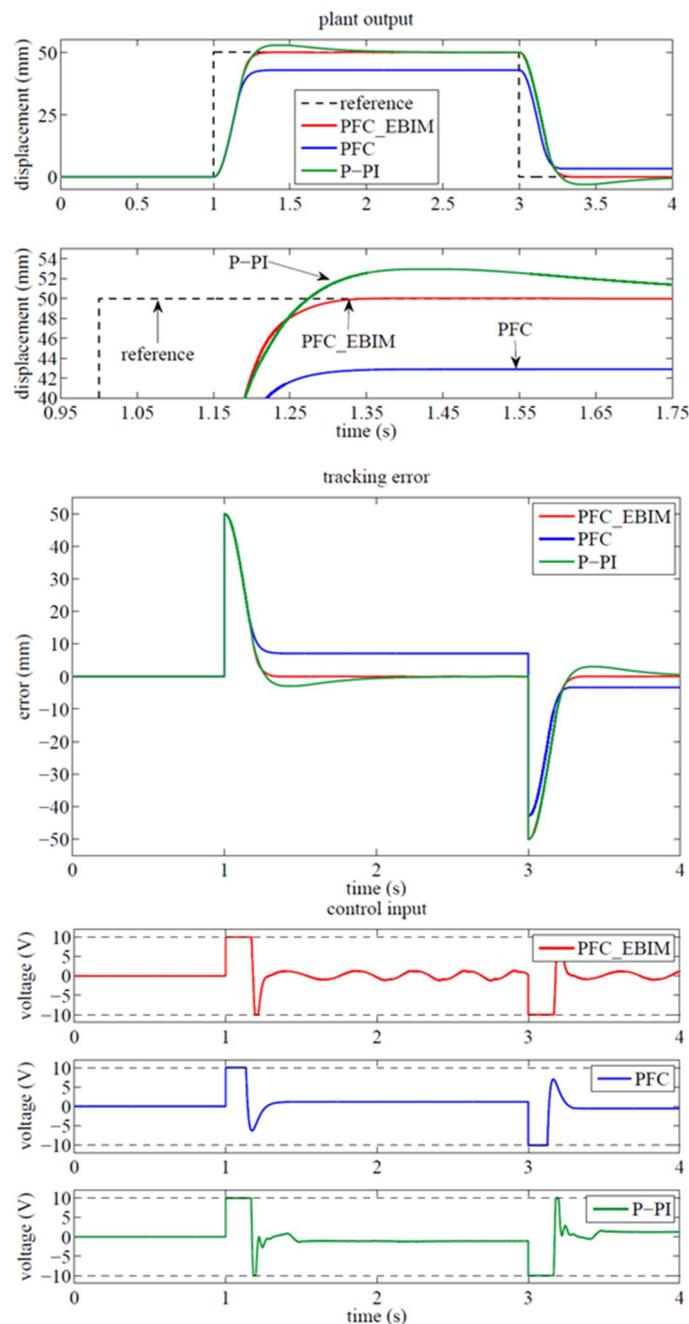


図 3 方形波目標値に対する実験結果

< 引用文献 >

[1] J. Richalet and O'Donovan, Predictive functional Control: principle and industrial applications, London, England, Springer-Verlag, 2009.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Toshiyuki Satoh, Naoki Saito, Jun-ya Nagase and Norihiko Saga	4. 巻 86
2. 論文標題 Predictive Functional Control of an Axis Positioning System with an Estimator-based Internal Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Control Engineering Practice	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.conengprac.2019.02.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐藤 俊之, 永瀬 純也, 嵯峨 宜彦, 齋藤 直樹	4. 巻 83
2. 論文標題 零位相誤差追従コントローラを用いた外乱オブザーバ併用型Predictive Functional Control制御系の追従性能改善	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集 (C編)	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.17-00142	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Toshiyuki Satoh, Naoki Saito, Jun-ya Nagase, Norihiko Saga
2. 発表標題 Performance Improvement of Predictive Functional Control with a State Estimator-based Internal Model
3. 学会等名 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineerin (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤 俊之, 齋藤 直樹, 永瀬 純也, 嵯峨 宣彦
2. 発表標題 状態推定器を内部モデルに用いるPredictive Functional Controlの評価実験と既存手法との比較
3. 学会等名 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤 俊之, 永瀬 純也, 嵯峨 宣彦, 齋藤 直樹
2. 発表標題 状態観測器を内部モデルに用いるPredictive Functional Controlに基づくサーボ系設計
3. 学会等名 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiyuki Satoh, Naoki Saito, Jun-ya Nagase and Norihiko Saga
2. 発表標題 Performance Enhancement of Predictive Functional Control Using Disturbance Observer and Zero Phase Error Tracking Controller
3. 学会等名 International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大森 達哉, 佐藤 俊之, 齋藤 直樹, 嵯峨 宣彦, 永瀬 純也
2. 発表標題 2リンク・マニピュレータのUncertainty and Disturbance Estimatorに基づく制御
3. 学会等名 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 西村 旭正, 佐藤 俊之, 齋藤 直樹
2. 発表標題 状態推定器を内部モデルに用いるPredictive Functional Controlの実験的評価
3. 学会等名 日本機械学会東北支部第53期総会・講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiyuki Satoh, Naoki Saito, Jun-ya Nagase and Norihiko Saga
2. 発表標題 An Application of Predictive Functional Control with a State Observer-Type Internal Model
3. 学会等名 International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 西澤 舜, 佐藤 俊之, 齋藤 直樹, 嵯峨 宣彦, 永瀬 純也
2. 発表標題 人工蜂コロニーアルゴリズムを用いた未知入力推定器の設計
3. 学会等名 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshiyuki Satoh, Shun Nishizawa, Naoki Saito Jun-ya Nagase and Norihiko Saga
2. 発表標題 Design of Unknown Input Estimator with Artificial Bee Colony Algorithm
3. 学会等名 Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	齋藤 直樹  (Saito Naoki)  (60315645)	秋田県立大学・システム科学技術学部・教授   (21401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------