

適応 PSO を用いるセルフチューニング PI コントローラによる ウェブ搬送系の重複分割分散制御

正員 西田 健* 上級会員 坂本 哲三* 非会員 ニコラ イバン ジアノカッロ**

Self-Tuning PI Control Using Adaptive PSO of a Web Transport System with Overlapping Decentralized Control

Takeshi Nishida*, Member, Tetsuzo Sakamoto*, Senior Member, Nicola Ivan Giannoccaro**, Non-member

(2011年4月13日受付, 2011年8月1日再受付)

Web transport systems for transporting films, textile material, paper, etc., are usually large-scale systems. The velocity and the tension of web are controlled by dividing the systems into several subsystems in which strong coupling exists between the velocity and tension control. A self-tuning PI (STPI) controller with an estimator based on a novel adaptive particle swarm optimization method is constructed, and it is applied for controlling an actual web transport system. The controllers are designed the basis of the methodology of the overlapping decentralized control by taking into consideration online executions performed by a general computer. The effectiveness of the constructed control system is verified on the basis of several experimental results obtained by using an actual experimental web transport system.

キーワード: ウェブ搬送系, 重複分割分散制御, セルフチューニング PI 制御, 適応 PSO

Keywords: web transport system, overlapping decentralized control, self-tuning PI control, adaptive particle swarm optimization

1. はじめに

ウェブとは紙やフィルム等の薄膜状素材の総称であり, その加工に用いる装置は一般にウェブ搬送装置と呼ばれる。この装置では, 材料のウェブはモータによって駆動されるアンワインダからプロセスに送り出され, 複数のローラによって搬送されながら印刷などの処理が施された後に, モータにより駆動される終端のワインダによって巻き取られる。この加工工程においてウェブの搬送速度が変動すると, 処理部における加工精度にむらが発生し, 不適切な張力が発生するとしわや破断が発生するため, 搬送するウェブにより連結される各部位を協調させ, ウェブの速度と張力を高精度に制御することが要求される。

一般に, ウェブ搬送装置は多数の駆動ローラを含む大規模なシステムであるため, メンテナンス性を向上させる目

的や制御系の構造を単純化する目的で分散制御系が構築される場合が多い⁽¹⁾。分散制御系を構築する場合にはシステムを複数のサブシステムに分割するが, 各サブシステム間の相互干渉をどのように扱うかが問題となる。この問題を解決する手法として, 強い結合部分を一つのサブシステムに含ませ隣接するサブシステム同士で共有させる重複分割分散制御法⁽²⁾が提案されている。一方, 実際にはウェブ搬送装置のパラメータは時間や環境変化にともなって変動し, また, モデル化が困難な高次のダイナミクスが存在することから, 適応機能の構築が課題として残されていた。そして近年, この問題を解決するために, パラメータ変動に対する適応機構を有する STPID (Self-Tuning PID) 制御系の構築手法が提案された⁽³⁾。この研究によって構築されたウェブ搬送装置に対する制御系には次のような特徴がある: (1) 重複分割分散制御法に基づいて系を複数のサブシステムに分割する, (2) ノイズの混入に頑健であるとされる GMVC (Generalized Minimum Variance Control)⁽⁴⁾に基づく Explicit 型 STC 系⁽⁵⁾を構成する, (3) システムパラメータのオンライン同定に PSO (Particle Swarm Optimization)⁽⁶⁾を用いる, (4) GMVC の制御則を PID 制御則に変換する手法⁽⁷⁾⁽⁸⁾を用いる。先行研究⁽⁹⁾において提案された制御手法の有効性は計算機シミュレーションによって検証され, システムの

* 九州工業大学
〒804-8550 北九州市 戸畑区 仙水町 1-1
Kyushu Institute of Technology
1-1, Sensui, Tobata, Kitakyushu 804-8550, Japan

** サレント大学
University of Salento
Via per Monteroni 73100, Lecce, Italy

非線形特性や観測ノイズの影響に頑健であることが示された。しかし、実際のウェブ搬送系にはシミュレーションでは考慮しきれないダイナミクスや観測ノイズが存在するため、それらの影響に対する頑健性を示すための実際のウェブ搬送実験装置による有効性の検証が課題として残されていた。また、実際の機器には実時間実行の必要性に起因する計算量の制限が存在するため、制御アルゴリズムをオンラインで駆動するための実装の工夫も必要である。そこで本論文では、先行研究⁽⁹⁾における提案手法を実際のウェブ搬送系に実装して駆動するための手法の改善や工夫について述べる。具体的には、OPSO⁽⁹⁾（Online PSO）と呼ばれる適応型 PSO を用いる計算効率の高いシステムパラメータのオンライン推定手法と、推定されたパラメータに基づいて自動調整される PI 制御器の具体的な構成方法を示す。また、ウェブ搬送実験装置を用いた制御実験により本手法の有効性を示す。

本論文の構成は以下の通りである。まず、2章において関連研究を概観する。3章では対象とするウェブ搬送実験装置と制御系設計の概要を示す。4章には実験結果を示し、最後に5章で本論文の結論を述べる。

2. 関連研究

〈2・1〉 ウェブ搬送系に関する研究 現在までにウェブ搬送装置の分散制御手法として、 H_∞ 制御法⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、2自由度 H_∞ 制御法⁽¹²⁾⁽¹³⁾ および 2 自由度ゲインスケジューリングコントローラ⁽¹⁴⁾による手法の提案がなされている。これらの研究では、3つのモータを有する実験装置を用いる実験⁽¹²⁾⁽¹⁴⁾や、9つのモータを有する比較的大規模なシステムのモデルに対するシミュレーション⁽¹³⁾によって手法の有効性が検証されている。またこれらの手法では、設計パラメータの調整を詳細な対象のモデルを用いて事前に行い、その結果を実験機に実装するというシミュレーションベースの手順に従って制御系設計が行われた。

モデル規範型のウェブ張力制御系に関する研究には、モデル規範型フィードフォワード制御手法⁽¹⁵⁾やモデル規範型適応 PI 制御手法⁽¹⁶⁾がある。これらの手法は事前に対象の比較的详细なモデルを必要とする一方で、モデル化誤差に対するロバスト性の確保が制御器設計の重要な要素とされている。また、これらの手法の有効性はシミュレーションによって検証されている。

従来研究において提案された手法の検証の大半はシミュレーションによって行われている。実験による検証を行っている研究においても、使用されている実験機はウェブ搬送系の最小構成を模したものであり、本研究で用いるような規模の実験機を用いて検証を行っている研究は見当たらない。

〈2・2〉 PSO による制御器のセルフチューニングに関する研究 PID のゲインの組み合わせを PSO によって探索する手法は数多く提案されており、最も一般的な手法は、同定モデルを利用したオフラインシミュレーションによっ

て応答波形に関する指標を最小化する PID パラメータを PSO を用いて選定する手法^{(17)~(22)}である。これらの手法では、IAE（Integral Absolute-Error criterion）や ISE（Integral Square-Error criterion）、ITSE（Integral-of-Time multiplied Square-Error criterion）、ITAE（Integral-of-Time multiplied Absolute-Error criterion）などを組み合わせて粒子の評価に用い、PID の3つのパラメータによって張られる空間を直接的に探索する。しかし、PID 制御器の特性をこれらの指標を用いて評価するには、過渡応答から定常応答までの制御応答を全体的に評価しなければならないため、これらの手法による PID パラメータのオンライン探索は困難である。

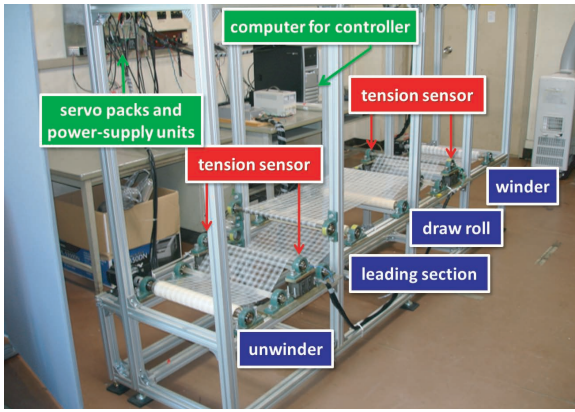
PSO および PID に他の手法を組み合わせる手法として、想定される様々な条件ごとに最適な PID パラメータを PSO を用いて事前に探索しておき、システムを制御する際にファジールールを用いて事前に求めた PID パラメータを動的に合成する手法⁽²³⁾がある。また、ALPSO（augmented Lagrangian PSO）と呼ばれる制約付き問題の最適解探索を目的とする PSO によって H_∞ PID コントローラの設計をオフラインで行う手法⁽²⁴⁾がある。ただしこの手法では、時変システムに対する適応的な探索能力を持たない一般的な PSO アルゴリズムが用いられるため、制御パラメータの探索は静的なシステムモデルに対して実行される必要がある。

PSO をオンラインで駆動する手法として、同定が困難な対象に対して、規範モデルと出力の誤差を最小化するように PID パラメータの調整を行う手法⁽²⁵⁾がある。また、PSO をオフラインおよびオンラインで駆動することで PID 制御則のチューニングを行う手法⁽²⁶⁾がある。ただし、これらの手法においてもシステムの時間変化に対する適応は考慮されておらず、PSO による探索と PID パラメータの調整は時間の経過に伴って収束するため、時変システムへの適用は困難である。

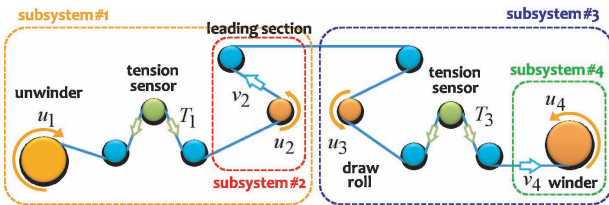
一方、モデル予測制御（MPC : Model Predictive Control）の入力系列の決定に PSO をオンラインで制御に使用する MPC-PSO と呼ばれる手法が提案されている⁽²⁷⁾。この手法は、従来型の PSO を利用して予測制御入力を選択を行う手法であり、線形および非線形システムに対する有効性が示されている。ただし、システムパラメータをオンライン同定するという本研究における PSO の利用法とは異なり、MPC-PSO では対象のモデルを獲得するための手段が別途必要である。また、やはり時変システムに対する適応は考慮されていない。

3. ウェブ搬送実験装置と制御系設計

構成したウェブ搬送実験装置を Fig. 1 に示す。この装置には 12 のローラがあり、その内の 4 つのローラにはサーボモータ、2 つのローラには張力センサが取り付けられている。モータによって駆動されるローラを駆動ローラと呼ぶ。さらに、ウェブを送り出す 1 番目の駆動ローラをアンワインダ、巻き取りを行う最後の駆動ローラをワインダと呼ぶ。本研究では、Fig. 1(b) に示す 2 箇所の張力 $T_1(t)$ と $T_3(t)$ 、お



(a) Overview of the experimental web transport system



(b) Scheme of the experimental web transport system

Fig. 1. The experimental web transport system.

Table 1. Symbols of the parameters.

A [m ²]	Cross-sectional area of web
G_v [N/m ²]	Elastic modulus of web material
η_v [Ns/m ²]	Viscosity modulus of web material
r_i [m]	Radius of i -th drive roll
J_i [kgm ²]	Moment of inertia of i -th drive roll
L_i [m]	Web length between i -th and $(i + 1)$ -th drive roll
u_i [Nm]	Input torque of i -th drive roll
v_i [m/s]	Web velocity on i -th drive roll
T_i [N]	Tension between i -th and $(i + 1)$ -th drive roll

よび 2 番目と 4 番目のモータが取り付けられた駆動ローラを通過するウェブの搬送速度 $v_2(t)$ と $v_4(t)$ を目標値に追従させる制御系を構成することを目的とする。ここで t は時間を表す。また、本論文において用いる記号を Table 1 に示す。

〈3・1〉 重複分割分散制御系 Fig. 1 に示す装置において、各ローラにおけるウェブの粘弾性に基づく張力と速度の関係は以下の式で表現される⁽¹⁾。

$$T_i(s) = \frac{P(s)}{L_i} \{V_{i+1}(s) - V_i(s)\} \dots \dots \dots (1)$$

ここで特性伝達関数 $P(s)$ は以下のような Voigt モデルで表される。

$$P(s) = A \left(\eta_v + \frac{G_v}{s} \right) \dots \dots \dots (2)$$

次に、この実験機の入出力関係を Fig. 2 に示す。これらの関係より、ウェブ速度の伝達関数は

$$V_1(s) = \frac{r_1}{J_1 s} (r_1 T_1(s) - U_1(s)) \dots \dots \dots (3)$$

$$V_2(s) = \frac{r_2}{J_2 s} \{U_2(s) + r_2 (T_2(s) - T_1(s))\} \dots \dots \dots (4)$$

$$V_3(s) = \frac{r_3}{J_3 s} \{r_3 (T_3(s) - T_2(s)) - U_3(s)\} \dots \dots \dots (5)$$

$$V_4(s) = \frac{r_4}{J_4 s} \{U_4(s) - r_4 T_3(s)\} \dots \dots \dots (6)$$

である。 $U_1(s)$ と $U_2(s)$ から $T_1(s)$ へ、もしくは $U_3(s)$ と $U_4(s)$ から $T_3(s)$ への伝達関数は、(1) 式を考慮して

$$T_i(s) = G_i(s) \tilde{U}_i(s) \dots \dots \dots (7)$$

と表せる。ここで

$$\tilde{U}_i(s) \triangleq \frac{r_i}{J_i} U_i(s) + \frac{r_{i+1}}{J_{i+1}} U_{i+1}(s) \dots \dots \dots (8)$$

$$G_i(s) \triangleq \frac{\frac{P(s)}{L_i}}{1 + \frac{P(s)}{L_i} \left(\frac{r_i^2}{J_i s} + \frac{r_{i+1}^2}{J_{i+1} s} \right)} \dots \dots \dots (9)$$

であり、 $i = 1, 3$ である。次に、 U_2 から $V_2(s)$ へ、もしくは U_4 から $V_4(s)$ への伝達関数は、

$$V_i(s) = G_i(s) \tilde{U}_i(s) \dots \dots \dots (10)$$

と表せる。ここで

$$\tilde{U}_i(s) \triangleq U_i(s) \dots \dots \dots (11)$$

$$G_i(s) \triangleq \frac{r_i}{J_i s} \dots \dots \dots (12)$$

であり、 $i = 2, 4$ である。以上のように、本実験装置は (7) 式と (10) 式で表される 4 つのサブシステムに重複分割することができる。以上の関係より、各サブシステムの操作量を

$$\tilde{u}(t) \triangleq (\tilde{u}_1(t) \tilde{u}_2(t) \tilde{u}_3(t) \tilde{u}_4(t))^T \dots \dots \dots (13)$$

と表すと、各モータへの入力は次のように表せる。

$$u(t) = N \tilde{u}(t) \dots \dots \dots (14)$$

ここで $u(t) \triangleq (u_1(t) u_2(t) u_3(t) u_4(t))^T$ であり、

$$N \triangleq \begin{pmatrix} r_1/J_1 & r_2/J_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_3/J_3 & r_4/J_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \dots \dots \dots (15)$$

は操作量の変換行列である。

〈3・2〉 離散時間モデル 制御アルゴリズムとして実験機に実装するために、各サブシステムを次の離散時間モデルで表現する。

$$A_j(z^{-1})y_j(k) = z^{-k_m} B_j(z^{-1})u_j(k) \dots \dots \dots (16)$$

ここで $y_j(k)$ は離散時刻 k における出力を表しており、 k_m はむだ時間の最小値を示す。本研究の対象では $k_m = 1$ として零次ホールドが持つむだ時間のみを考慮する。また j はサブシステムの番号を表すが、すべてのサブシステムに同様の制御系を構成するので、以下では簡単のため j を省いて議論する。

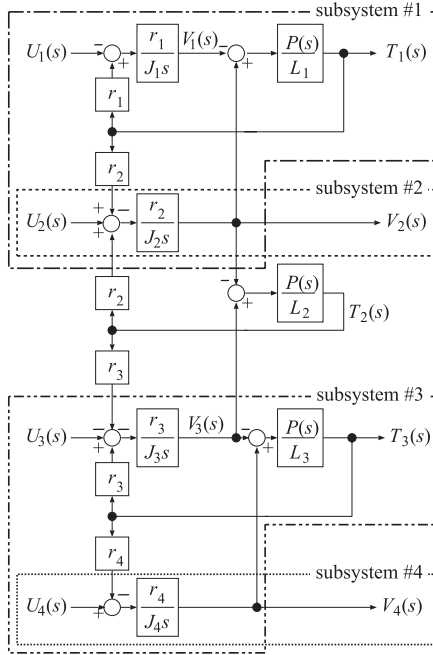


Fig. 2. Block diagram of the system.

本研究では、後述する適応 PSO によって現時刻から 1[s] 以内程度[†]の応答に対して逐次的に $A(z^{-1})$ および $B(z^{-1})$ を同定する機構を構成する。そこで、本研究では (9) 式の応答を逐次的に更新される一次遅れ系で近似し、すべてのサブシステムの伝達関数を一次遅れ要素 $G(s) = K/(T_a s + 1)$ と零次ホールド要素 $(1 - \exp(-T_s s))/s$ を合成して z 変換した

$$\mathcal{Z}[H(s) \cdot G(s)] = \frac{K \{1 - \exp(-T_s/T_a)\} z^{-1}}{1 - \exp(-T_s/T_a) z^{-1}} \dots (17)$$

で近似する。ここで T_s はサンプリング時間, T_a および K はそれぞれ時定数とゲインを表す。これらの関係に基づいて、以下ではシステムパラメータの多項式を次のように表す。

$$A(z^{-1}) = 1 - \exp(-T_s/T_a) z^{-1} \triangleq 1 + a_1 z^{-1} \dots (18)$$

$$B(z^{-1}) = K \{1 - \exp(-T_s/T_a)\} \triangleq b_0 \dots (19)$$

〈3・3〉 OP SO によるシステムパラメータのオンライン同定 確率的な最適解探索法の一つである PSO は、群知能を模倣した非線形計画問題の効率的な解法である⁽⁶⁾。ロバストかつ高速に非線形問題、微分不能問題、多峰問題などの最適解探索を行う性能が数多くの研究によって検証され、現在では数多くの応用事例に適用されている⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾。さらに、当初、静的な最適化問題を対象として提案された PSO は、近年の数多くの研究により動的な実システムへの適用を考慮した改良が加えられ、観測ノイズの混入や対象とするシステムの時間変化に起因する環境変化、すなわち探索空間の変化に適応可能な PSO が開発されている^{(30)~(32)}。さらに最近、著者らは、時変システムのオンライン同定に利用する目的で、計算効率の良い適応 PSO アルゴリズム OP SO

[†] この時間の長さは各サブシステムの支配的なモードを十分に推定可能であると考えられる時間を見込んで設定する。

を提案した⁽⁹⁾。本研究ではこのアルゴリズムを用いて、システムパラメータのオンライン同定機構を構成する。

〈3・3・1〉 アルゴリズム 探索空間内の粒子の位置を $\mathbf{x}_m(k) \triangleq (a_{1m}(k) \ b_{0m}(k))^T$, 速度を $\mathbf{v}_m(k) \in \mathbb{R}^2$ と表す。ここで、 $m = [1, M] \in \mathbb{N}_+$ は粒子の番号を表し、 $a_{1m}(k)$ と $b_{0m}(k)$ は m 番目の粒子によるシステムパラメータの推定値を表す。この時、時間変化する目的関数 $f_k: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ の最適化問題

$$\min_{\mathbf{x}} f_k(\mathbf{x}) \geq 0 \dots (20)$$

の解を OP SO では以下のように探索する。

まず、前時刻の各粒子の最良解 $\hat{\mathbf{x}}_m(k-1)$ を現時刻の評価関数で再評価し、それらの最小値を求める。

$$\tilde{\mathbf{x}}^g(k) = \arg \min \{f_k(\hat{\mathbf{x}}_m(k-1))\} \dots (21)$$

これを用いて、各粒子の速度と位置を以下のように更新する。

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_m(k) &= \omega \mathbf{v}_m(k-1) + c_1 r_1 \{\tilde{\mathbf{x}}^g(k) - \mathbf{x}_m(k-1)\} \\ &\quad + c_2 r_2 \{\hat{\mathbf{x}}_m(k-1) - \mathbf{x}_m(k-1)\} \dots (22) \end{aligned}$$

$$\mathbf{x}_m(k) = \mathbf{x}_m(k-1) + \mathbf{v}_m(k) \dots (23)$$

ここで ω, c_1, c_2 は設定パラメータであり、初期値 $\mathbf{x}_m(0) = \hat{\mathbf{x}}_m(0)$ と $\mathbf{v}_m(0)$ は一様乱数で与える。次に、各時刻において最小の評価値を与える各粒子の位置

$$\hat{\mathbf{x}}_m(k) = \begin{cases} \mathbf{x}_m(k) & \text{if } f_k(\mathbf{x}_m(k)) < f_k(\hat{\mathbf{x}}_m(k-1)) \\ \hat{\mathbf{x}}_m(k-1) & \text{otherwise} \end{cases} \dots (24)$$

とその評価値 $f_k(\hat{\mathbf{x}}^{(m)}(k))$ を求める。最後にこれらを用いて、群全体での最良解、すなわち時刻 k における OP SO の推定結果が

$$\hat{\mathbf{x}}^g(k) = \arg \min \{f_k(\hat{\mathbf{x}}_m(k))\} \triangleq (\hat{a}_1(k) \ \hat{b}_0(k))^T \dots (25)$$

と求まる。

OP SO には従来の PSO アルゴリズムと比較して次に挙げるような特徴がある：(1) 時変の評価関数を用いることで $\hat{\mathbf{x}}_m(k)$ (一般に $pbest$ と呼ばれる) と $\hat{\mathbf{x}}^g(k)$ (一般に $gbest$ と呼ばれる) の評価値が単調減少しない、(2) 新たな設計パラメータの増加が無い、(3) 計算手順が簡潔である、(4) 計算の増加は (21) 式に関する部分のみであるにも関わらず高い適応能力を有する。

〈3・3・2〉 粒子の評価 OP SO によってシステムパラメータを推定するために、次の評価関数を用いる。

$$f_k(\mathbf{x}_m(k)) = \sum_{i=0}^I |y(k-i) - \psi^T(k-i) \mathbf{x}_m(k)| \dots (26)$$

ここで

$$\psi^T(k) \triangleq (y(k-1) \ u(k-1)) \dots (27)$$

であり、 I は評価ステップ数である。また、推定されるシステムパラメータは安定であるという拘束条件より $\hat{a}_{1m}(k) > 0$

もしくは $\hat{b}_{0m}(k) < 0$ の領域の探索は行わない。 I の値を大きく設定するほど、観測ノイズの影響を低減化できるが、 I の値に比例して計算量は増加し、システムパラメータの変化を制御則に反映させるまでの遅延時間が長くなる。本研究では実験機のサンプリング周期は $T_s = 10$ [ms] であり、 $I = 100$ と設定する。これはすなわち、たかだか 1 [s] 以内の応答波形を用いてシステムのダイナミクスを表現するパラメータの算出を行うことを意味する。

〈3・4〉 GMVC に基づく PID 制御器のセルフチューニング 本研究におけるウェブ搬送装置の各サブシステムの制御系の構成には、評価規範の最小化と PID 制御則を関連付ける手法⁹⁾を利用する。PID 制御則への変換は次のような利得を生ずる：(1) PID 制御則によって作動している設備への導入が容易である、(2) システムの挙動を周波数領域で考慮しやすくなる、(3) 自動的に調整される制御入力¹⁰⁾の挙動や意味合いを PID 制御に慣れた技術者に理解しやすく提示する。本研究では特に (2) と (3) の意味で本手法が有効に作用する。すなわち、サブシステム間の相互干渉や計測ノイズに大きな影響を受ける本実験機においては、低周波数域での有効な制御特性を有する PI パラメータが選択されることが重要であり、この観点から、自動調整される制御器の妥当性を判断するために PID パラメータによって制御則が示されることは大変都合が良い。以下には、この手法を本研究における制御対象へ具体的に適用するための手順の概略を示す。

まず、GMVC の手法に基づいて次式の評価規範の最小化を行うことを考える。

$$J = E[\phi^2(k + k_m + 1)] \dots \dots \dots (28)$$

一般化出力 $\phi(k + k_m + 1)$ は次式により与えられる。

$$\phi(k + k_m + 1) := P(z^{-1})y(k + k_m + 1) + \lambda \Delta u(k) - R(z^{-1})w(k + k_m) \dots \dots \dots (29)$$

ここで $w(k)$ は目標値であり、 λ は制御入力に対する重み付けを行う設計パラメータである。また、 $\Delta = 1 - z^{-1}$ である。制御則 $u(k)$ は次式で与えられる。

$$F(z^{-1})y(k) + \{E(z^{-1})B(z^{-1}) + \lambda\} \Delta u(k) - R(z^{-1})w(k) = 0 \dots \dots \dots (30)$$

ただし、 $E(z^{-1})$ および $F(z^{-1})$ は次の Diophantine 方程式に基づいて求められる。

$$P(z^{-1}) = \Delta A(z^{-1})E(z^{-1}) + z^{-(k_m+1)}F(z^{-1}) \dots \dots \dots (31)$$

ここで、

$$E(z^{-1}) = 1 + e_1 z^{-1} \dots \dots \dots (32)$$

$$F(z^{-1}) = f_0 + f_1 z^{-1} \dots \dots \dots (33)$$

である。さらに、立ち上がり時間と減衰振動特性を調整することができるように $P(z^{-1})$ は次のような設計多項式で与

える。

$$P(z^{-1}) = 1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} \dots \dots \dots (34)$$

ここで

$$p_1 = -2e^{-\frac{\rho}{2\mu}} \cos \frac{\sqrt{4\mu - 1}}{2\mu} \rho \dots \dots \dots (35)$$

$$p_2 = e^{-\frac{\rho}{\mu}} \dots \dots \dots (36)$$

$$\rho = \frac{T_s}{\sigma} \dots \dots \dots (37)$$

$$\mu = 0.25(1 - \delta) + 0.51\delta \dots \dots \dots (38)$$

であり、 δ と σ の設計によりシステムの応答特性を調整することができる。本研究では、オーバーシュートの発生を抑えるために常に $\delta = 0$ と設計するので、これらの式は次のように簡単化され、 $P(z^{-1})$ を決定する設計パラメータは σ のみとなる。

$$p_1 = -2e^{-\frac{T_s}{\sigma}} \dots \dots \dots (39)$$

$$p_2 = e^{-\frac{4T_s}{\sigma}} \dots \dots \dots (40)$$

一方、デジタル型 PID コントローラの制御則は次のように表される。

$$\Delta u(k) = k_p \left(\Delta + \frac{T_s}{T_I} + \frac{T_D}{T_s} \Delta^2 \right) e(k) \dots \dots \dots (41)$$

ここで $e(k) \triangleq w(k) - y(k)$ である。次に、この式を次のように表現する。

$$C(z^{-1})y(k) + \Delta u(k) - C(z^{-1})w(k) = 0 \dots \dots \dots (42)$$

ここで、

$$\begin{aligned} C(z^{-1}) &\triangleq c_0 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} \\ &= k_p \left(1 + \frac{T_s}{T_I} + \frac{T_D}{T_s} \right) - k_p \left(1 + \frac{2T_D}{T_s} \right) z^{-1} \\ &\quad + \frac{k_p T_D}{T_s} z^{-2} \dots \dots \dots (43) \end{aligned}$$

である。さらに定常応答を重視して $E(z^{-1})B(z^{-1}) \approx E(1)B(1)$ と近似する¹¹⁾と (30) 式は

$$\frac{F(z^{-1})}{v} y(k) + \Delta u(k) - \frac{R(z^{-1})}{v} w(k) = 0 \dots \dots \dots (44)$$

と記述できる。ここで、

$$v \triangleq B(1)E(1) + \lambda \dots \dots \dots (45)$$

である。したがって、(42) 式と比較して、

$$R(z^{-1}) = F(z^{-1}) \dots \dots \dots (46)$$

$$C(z^{-1}) = F(z^{-1})/v \dots \dots \dots (47)$$

と設計すれば GMVC と PID 制御則が近似的に等価となることから、OPSO によって推定されるシステムパラメータ $\hat{a}_1(k)$ と $\hat{b}_0(k)$ を用いて PID パラメータを次式により算出できる。

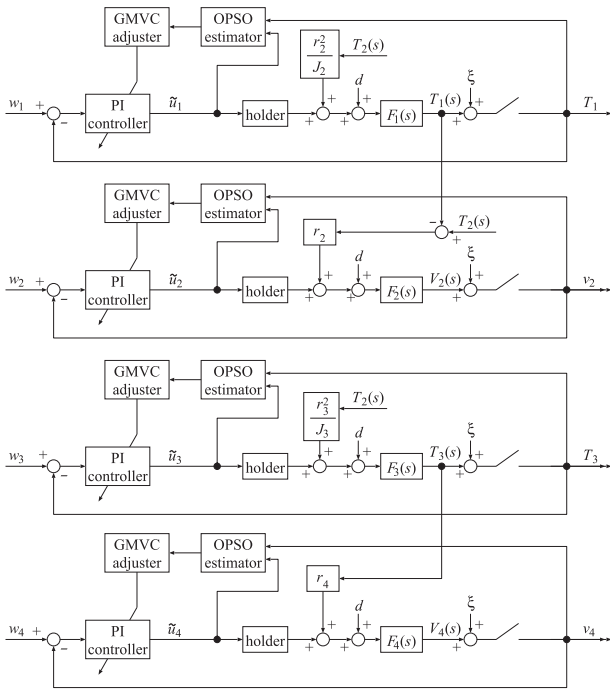


Fig. 3. Block diagram of the control system.

$$k_p = -f_1/v \dots\dots\dots(48)$$

$$T_I = -f_1 T_s / (f_0 + f_1) \dots\dots\dots(49)$$

ただし、本研究ではシステムのダイナミクスを近似する多項式の次数が低いため T_D は算出されない。ここで、(31)式から(40)式より、推定されたシステムパラメータを用いて

$$f_0 = p_2 + \hat{a}_1(k) + (1 - \hat{a}_1(k))e_1 \dots\dots\dots(50)$$

$$f_1 = e_1 \hat{a}_1(k) \dots\dots\dots(51)$$

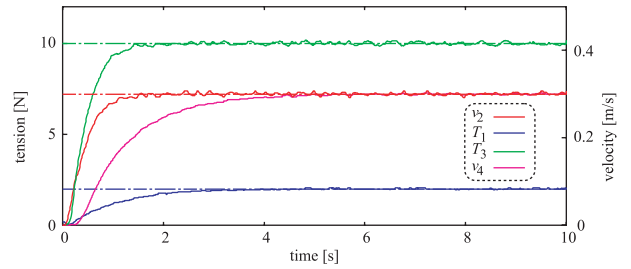
$$v = \hat{b}_0(k)(1 + e_1) + \lambda \dots\dots\dots(52)$$

$$e_1 = p_1 - \hat{a}_1(k) + 1 \dots\dots\dots(53)$$

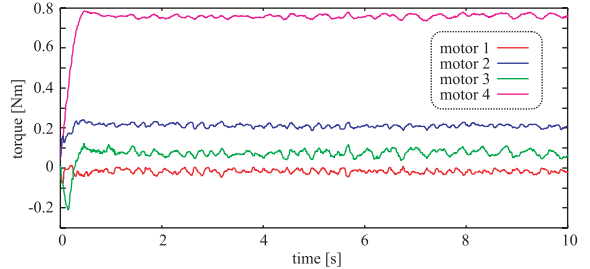
と求めることができる。以上に示した手法を重複分割されたウェブ搬送系に適応して構成した制御系の全体図を Fig. 3 に示す。

以上の GMVC に基づく STPI 制御手法における設計パラメータは λ と σ である。ウェブ搬送系の各サブシステムを同期させて制御したいので、これらのパラメータは各サブシステムに対して共通の値で設定するのが望ましい。すなわち、共通する λ と σ によって 4 つのサブシステムの調整を行う。また、それらの物理的な意味が明確であるので設定は比較的容易である。

先行研究⁽³⁾では、最適化のために各離散ステップ毎に PSO の探索を 40 回以上繰り返し、また、推定モデルの次数を 2 次と仮定して、5 つのシステムパラメータの探索を行っていた。本研究では OPISO の導入と推定モデルの低次化により、計算量を先行研究の 100 分の 1 程度に削減し、実時間での制御アルゴリズムの実行を可能とした。



(a) Time evolution of output values



(b) Time evolution of input torques of each motor

Fig. 4. Experimental results.

4. 実験

〈4・1〉 ステップ入力に対する応答 ここでは、上述の制御系をウェブ搬送実験機に実装して実験を行った結果を示す。PSO の粒子数は $M = 100$ 、(26) 式の評価関数の評価ステップ数は $I = 100$ とした。また、GMVC の設計パラメータを $\lambda = 10$ および $\sigma = 1$ とした。目標値は $w_1 = w_4 = 0.3$ [m/s]、 $w_2 = 2$ [N]、 $w_3 = 10$ [N] とした。また、探索する各パラメータの初期値は $\hat{a}_{1j}(k) = 0$ および $\hat{b}_{0j}(k) = 0$ とした。ここで $j = 1, 2, 3, 4$ はサブシステムの番号を表す。

まず、出力値と入力トルクの時間推移を Fig. 4 に示す。この結果より、各制御量はオーバーシュートすることなく速やかに目標値に収束し、定常応答も安定して推移していることがわかる。次に、推定された各サブシステムのパラメータ \hat{a}_{1j} と \hat{b}_{0j} の時間推移を Fig. 5 に示す。また Fig. 6 に、オンラインで調整された PI パラメータの時間推移を示す。これらの結果より、推定されたシステムパラメータは時間経過に伴って適応的に変化しており、PI パラメータは推定パラメータの時間変化に従って調整されていることがわかる。また、計測ノイズなどの影響によって推定パラメータに変動が生じ、その結果として算出される PI パラメータに振動的な変動が見られる箇所があるが、 k_p が初期応答の一部を除いて 0 から 0.2 の比較的小さい値の範囲で調整されている[†]ために、その影響が入力の推移や制御結果にはほとんど現れていないことがわかる。

[†] Fig. 6 において、サブシステム 2 および 4 の k_p の値が表示範囲を超えている部分があるが、前者は 0.06 [sec] で 0.977、0.07 [sec] で 0.501、0.08 [sec] で 0.259、後者は 0.30 [sec] で 0.220 という値であった。これらの値はごく短期間に発生しており、また系を不安定化させるような大きな値ではなかった。

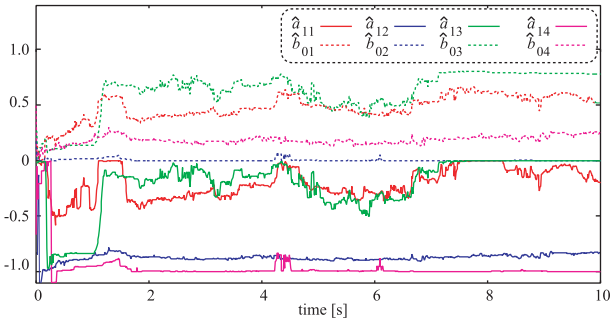


Fig. 5. Time evolution of estimated system parameters of each subsystem.

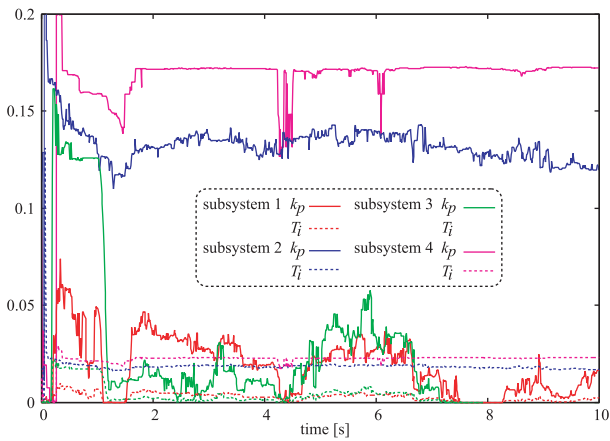


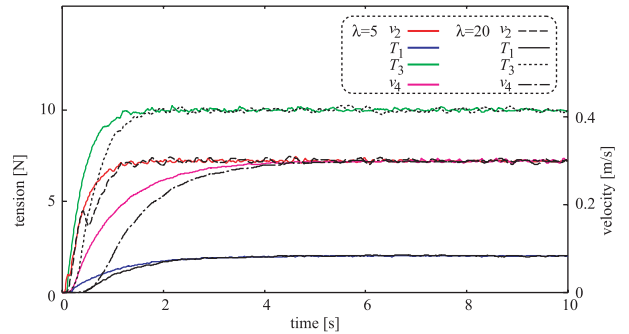
Fig. 6. Time evolution of calculated PI parameters of each subsystem.

〈4・2〉 設計パラメータに対する応答特性の変化 本手法には2種類の設定パラメータ、すなわち入力の変化量に関する制約を与える λ と応答時間に関する調整パラメータ σ がある。ここでは、これらのパラメータの変更が系の応答に与える影響を検証した実験結果を示す。

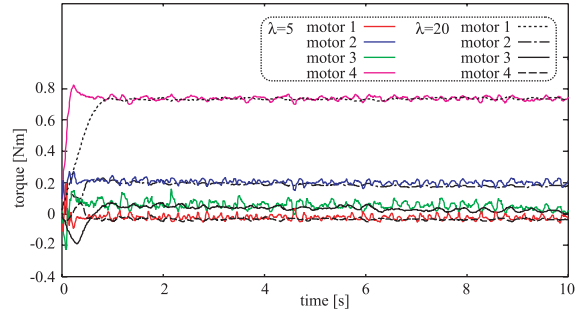
まず、Fig. 7に λ の値を変化させた場合の実験結果を示す。この結果より、 λ の値を小さく設定することで、より大きな入力の変化が許容されることになり、それに伴って目標値への収束が速くなっていることがわかる。ただし、 $\lambda < 3$ ではPI制御則の比例ゲインが大きくなりすぎることで応答が不安定化する現象が確認された。

次に、Fig. 8に σ の値を変化させた場合の実験結果を示す。この結果より、 σ の値を小さく設定すると収束が遅くなることがわかる。ただし、 $\sigma = 0.3$ の場合では1 [sec]付近で v_2 の値に大きな変動が観測されたことから、この値を小さくしすぎると不適切なウェブの速度が発生する可能性があることがわかる。 σ を1以上の大きな値で設定した場合には、(34)式の右辺第2項と第3項が非常に小さな値となるため、 σ の値が系の応答に与える影響は低減化する。

以上のことから、特に応答時間を遅く抑える調整を行う必要がない場合には、まず σ を十分に大きな値で設定した後に、応答が不安定化しない範囲で λ の値を小さく調整すれば良いことがわかる。

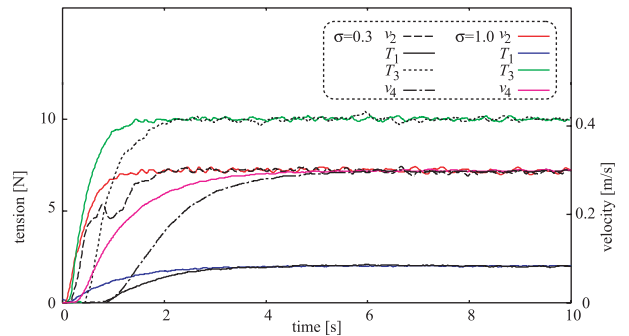


(a) Time evolution of output values

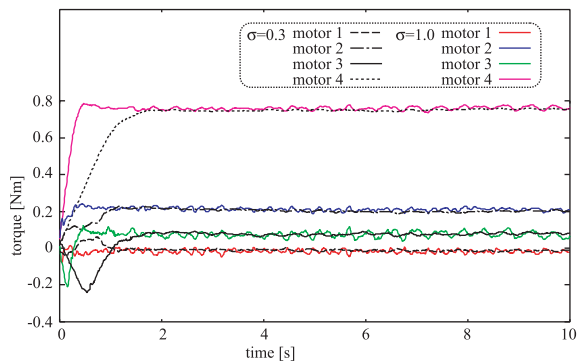


(b) Time evolution of input torques of each motor

Fig. 7. Experimental results using various λ .



(a) Time evolution of output values



(b) Time evolution of input torques of each motor

Fig. 8. Experimental results using various σ .

〈4・3〉 他のPIパラメータ調整手法との性能比較 ここでは、他のPIパラメータ調整による実験結果との比較により本手法の有効性を示す。

まず予備実験によって、一般的に広く用いられるZN法やCHR法によって導出されたPIパラメータでは、破断

Table 2. PI parameters for each subsystem.

	1st	2nd	3rd	4th
k_p	0.01	0.15	0.30	0.15
T_I	0.013	0.020	0.175	0.020

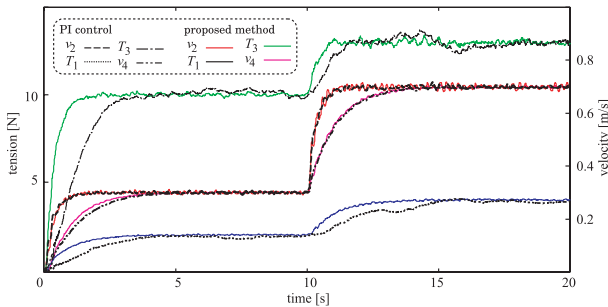


Fig. 9. Experimental results by using fixed PI parameters and using proposed method.

させることなくウェブを搬送することができないことを確認した。これらの調整法では速度調整系である2番目と4番目のサブシステムの比例ゲインが大きな値に設定される傾向にあったため、次に、張力制御系である1番目と3番目のサブシステムのPIパラメータをCHR法によって調整した後に、試行錯誤によって2番目と4番目のサブシステムのPIパラメータの調整を行った。この調整によって得られたPIパラメータの値をTable 2に示し、それらを用いた実験結果をFig. 9に示す。ここでは、目標値の変化に対する応答性能も併せて評価するために、初期の目標値を $w_1 = w_4 = 0.3$ [m/s], $w_2 = 2$ [N], $w_3 = 10$ [N], 時刻10 [s]以降の目標値を $w_1 = w_4 = 0.7$ [m/s], $w_2 = 4$ [N], $w_3 = 13$ [N]と変化させた。他の実験条件は上述の実験と同様である。これらの実験結果より、提案手法による制御結果は目標値の変化にも速やかに適応しており、煩雑な手順を踏んで調整されたPI制御器を上回る性能を有していることがわかる。

5. おわりに

本論文では、ウェブ搬送系の実験装置を構成し、重複分割分散制御手法による制御系構築を行った。各サブシステムに対するコントローラをGMVCに基づくSTPI制御手法により構築し、これを駆動するために必要なシステムパラメータをOPSOによってオンライン推定する機構を構築した。さらに、提案手法を実装したウェブ搬送装置による実験結果より、本研究で構築した制御系はウェブの搬送速度と張力を高精度かつ同時に制御できることが示された。

本手法は次のような特徴を有する：(1) 一般的な計算機によって実時間での実行が可能である、(2) 重複分割された複数のサブシステムの制御性能を調整するためのパラメータが σ と λ の2つのみである、(3) 調整パラメータの物理的な意味が明確であるため調整が容易である、(4) 対象のシステムパラメータを適応的にオンライン推定するので詳細なモデルを必要とせず、従来手法に比べて非常に汎用性

が高い。

今後の課題として、従来研究において提案されている H_∞ 制御法との比較実験の実施や、そのために必要な実験装置の精密なエミュレータの開発などが考えられる。また、より大規模で複雑な実システムを用いる制御性能の検証が考えられる。

文 献

- (1) T. Sakamoto: "Analysis and Control of Web Tension Control System", *T. IEE Japan*, Vol.117-D, No.3, pp.274-280 (1997) (in Japanese)
坂本哲三:「ウェブの張力制御系の解析と制御」, 電学論 D, Vol.117, No.3, pp.274-280 (1997)
- (2) T. Sakamoto and S. Tanaka: "Overlapping Decentralized Controller Design for Web Tension Control System", *T. IEE Japan*, Vol.118-D, No.11, pp.1272-1278 (1998) (in Japanese)
坂本哲三・田中修志:「ウェブ張力制御系の重複分割分散制御設計」, 電学論 D, Vol.118, No.11, pp.1272-1278 (1997)
- (3) K. Mizoguchi and T. Sakamoto: "Self-tuning decentralized controller design of web tension control system", Proc. of EUROSIM congress on Modeling and Simulation (2010)
- (4) P.E. Wellstead and M.B. Zarrop: "Self-Tuning Systems: control and signal processing", John Wiley & Sons (1991)
- (5) 大松 繁・山本 透 編著: セルフチューニングコントロール, コロナ社 (1996)
- (6) J. Kennedy and R.C. Eberhart: "Particle Swarm Optimization", Proc. of IEEE Int. Conf. on Neural Network IV, pp.1942-1948 (1995)
- (7) T. Yamamoto and M. Kaneda: "A Design of Self-Tuning PID Controllers Based on the Generalized Minimum Variance Control Law", *Trans. ISCIE*, Vol.11, No.1, pp.1-9 (1998) (in Japanese)
山本 透・兼田雅弘:「一般化最小分散制御則に基づくセルフチューニングPID制御器の一設計」, システム制御情報学会論文誌, Vol.11, No.1, pp.1-9 (1998)
- (8) T. Yamamoto, Y. Mitsukura, and M. Kaneda: "A Design of PID Controllers Using a Genetic Algorithm", *T. SICE*, Vol.35, No.4, pp.531-537 (1999)
山本 透・満倉靖恵・兼田雅弘:「遺伝的アルゴリズムを用いたPID制御器の一設計」, 計測自動制御学会論文集, Vol.35, No.4, pp.531-537 (1999)
- (9) T. Nishida, N.I. Giannoccaro, and T. Sakamoto: "Online identification of time-varying nonlinear systems by particle swarm optimization", Record of 2010 Joint Conference of Electrical and Electronics Engineers in Kyushu, CD-ROM 06-2A-03 (2010) (in Japanese)
西田 健・N.I. Giannoccaro・坂本哲三:「粒子群最適化による動的非線形システムのオンライン同定」, 電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, CD-ROM 06-2A-03 (2010)
- (10) D. Knittel, D. Gigan, and E. Laroche: "Robust decentralized overlapping control of large scale winding systems", Proc. of American Control Conf. Anchorage, pp.1805-1810 (2002)
- (11) X. Yulin: "Modeling and LPV control of web winding system with sinusoidal tension disturbance", Proc. of Chinese Control and Decision Conference, pp.3815-3820 (2009)
- (12) D. Knittel, E. Laroche, D. Gigan, and H. Koc: "Tension control for winding systems with two-degree-of-freedom H_∞ controllers", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol.39, No.1, pp.113-120 (2003)
- (13) A. Benlatreche, D. Knittel, and E. Ostertag: "Robust decentralised control strategies for large-scale web handling systems", *Control Engineering Practice*, No.16, pp.736-750 (2008)
- (14) F. Claveau, P. Chevrel, and K. Knittel: "A 2DOF gain-scheduled controller design methodology for a multi-motor web transport system", *Control Engineering Practice*, Vol.6, No.16, pp.609-622 (2008)
- (15) D. Knittel, A. Arbogast, M. Vedrines, and P. Pagilla: "Decentralized robust control strategies with model based feedforward for elastic web winding systems", Proc. of American Control Conf., pp.1968-1974 (2006)
- (16) B. Wang, J. Zuo, M. Wang, and H. Hao: "Model reference adaptive tension control of web packaging material", Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Computation Technology and Automation, pp.395-398 (2008)
- (17) Z. Gaing: "A Particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Controller in AVR System", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.19, No.2, pp.384-391 (2004)
- (18) T. Kaneko, H. Matsumoto, H. Mie, H. Nishida, and T. Nakayama: "Off-Line Tuning of Positioning Control System using Particle Swarm Optimiza-

- tion Considering Speed Controller”, *IEE Japan*, Vol.127-D, No.1, pp.52–59 (2007) (in Japanese)
金子貴之・松本寛之・美根宏則・西田英幸・中山智晴:「位置決め制御系における速度制御マイナーラップを考慮した Particle Swarm Optimization によるオフラインチューニング」, *電学論 D*, Vol.127, No.1, pp.52–59 (2007)
- (19) M.E. El-Telbany: “Employing particle swarm optimizer and genetic algorithms for optimal tuning of PID controllers: A comparative study”, *ICGST-ACSE Journal*, Vol.7, No.2, pp.49–54 (2007)
- (20) 大井章弘・中沢親志・松井哲郎・藤原ひろ絵・松本宏治・西田英幸:「PSO を用いた PID 最適調整手法の開発」, *電気学会研究会資料, IIC*, pp.52–59 (2008)
- (21) B. Allaoua, B. Gasbaoui, and B. Mebarki: “Setting up DC motor speed control alteration parameters using particle swarm optimization strategy”, *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, Vol.14, pp.19–32 (2009)
- (22) S.M. GirirajKumar, D. Jayaraj, and A.R. Kishan: “PSO based tuning of a PID controller for a high performance drilling machine”, *Int. Journal of Computer Applications*, Vol.1, No.19, pp.12–18 (2010)
- (23) C. Kao, C. Chuang, and R. Fung: “The self-tuning PID control in a slider-crank mechanism system by applying particle swarm optimization approach”, *Mechatronics*, Vol.16, pp.513–522 (2006)
- (24) T. Kim, I. Maruta, and T. Sugie: “Robust PID controller tuning based on the constrained particle swarm optimization”, *Automatica*, Vol.44, pp.1104–1110 (2008)
- (25) K. Tanaka, Y. Murata, Y. Nishimura, F.A. Rahman, M. Oka, and A. Uchibori: “Variable gain type PID control using PSO for ultrasonic motor”, *Journal of JSAEM*, Vol.18, No.3, pp.294–299 (2010) (in Japanese)
田中幹也・村田裕介・西村悠樹・Abd Rahman Faridah・岡 正人・内堀晃彦:「超音波モータの PSO を用いた可変ゲイン型 PID 制御」, *日本 AEM 学会誌*, Vol.18, No.3, pp.294–299 (2010)
- (26) N. Pillay and P. Govender: “Particle Swarm Optimization of PID Tuning Parameters”, LAP LAMBERT Academic Publishing (2010)
- (27) M.S. Yousuf: “Nonlinear predictive control using particle swarm optimization”, VDM Verlag Dr. Müller (2010)
- (28) 石亀篤史:「Particle Swarm Optimization—群れでの探索—」, *計測と制御*, Vol.47, No.6, pp.459–465 (2008)
- (29) J.L.F. Martínez and E.G. Gonzalo: “The PSO family: deduction, stochastic analysis and comparison”, *Swarm Intelligence*, Vol.3, No.4, pp.332–344 (2009)
- (30) T.M. Blackwell: “Swarms in dynamic environments”, *LNCS*, Vol.2723, pp.1–12 (2003)
- (31) X. Cui and T.E. Potok: “Distributed Adaptive Particle Swarm Optimizer in Dynamic Environment”, *Proc. of IEEE Int. Parallel and Distributed Processing Symposium*, pp.244–250 (2007)

- (32) X. Zhang, Y. Du, Zheng Qin, G. Qin, and J. Lu: “A modified particle swarm optimizer for tracking dynamic system”, *LNCS*, Vol.3612, pp.592–601 (2005)

西田 健



(正員) 1998年九州工業大学・工・設計生産工卒業。2002年九州工業大学大学院博士後期課程修了。同年より九工大・機械知能工学・助手。2007年より助教, 博士(工学)。屋外移動ロボットに関する研究に従事。日本ロボット学会, 計測自動制御学会, 日本神経回路学会などの会員。

坂本 哲三



(上級会員) 1984年九大大学院博士課程修了, 同年九大助手, 翌年九工大助手。以後, 同講師・助教授を経て, 2002年同教授, 工博, 主にリニアドライブ・磁気浮上およびウェブ張力系などの解析・制御の研究に従事。計測自動制御学会などの会員。

ニコラ イバン



ジアノカッロ (非会員) 1996年イタリア, バリ工芸大学電気工学科修了, 2001年博士課程修了。現在サレント大学工学部研究員, Ph.D. 2006年および2010年, 九工大訪問研究員。現在, メカトロニクスに関する研究に従事。