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*

永嶋 弘樹**

桂 誠一郎***

Vibration Control of Flexible Arm by Input Shaping Based on Wave Model

Hiroki NAGASHIMA and Seiichiro KATSURA

This paper proposes a method of vibration control of a flexible arm by input shaping based on wave model. Through the wave model which is one of the distributed parameter system, we can consider the infinite numbers of resonance in the flexible arm. Using the inverse system of the flexible arm, we design the input shaper for vibration suppression. Based on the frequency analysis, we show the characteristics of the proposed input shaper based on wave model. Using a single link flexible manipulator, the proposed method is compared with the conventional methods considering the finite numbers of the resonance frequency. From the experimental results, the effectiveness of the proposed method has been confirmed in terms of Root Mean Squared Error (RMSE) and the settling time.

Key words: vibration control, flexible manipulator, distributed parameter system, input shaping, wave model

1. 緒 言

近年、様々なものがインターネットにつながり、相互に利便性を高めあう IoT (Internet of Things) 社会¹⁾の到来により社会全体が大きな変革期にある中で、制御技術はこれまで以上に重要性を増している。制御技術の利活用先は産業のみならず、医療・福祉サービスや生活支援等、様々な広がっている²⁾。制御技術の社会実装を促進する上では様々な技術的な課題が存在するが、その一つに振動現象がある³⁾。例えば、産業用システムにおける機械の加速または減速時に誘発される振動が挙げられる⁴⁾⁵⁾。また、医療用システムやサービスロボット等、軽量化のニーズがある場面では、軽量化により共振周波数が低下し振動が励起されやすくなってしまふ⁶⁾⁷⁾⁸⁾。

振動抑制には主にオープンループ制御、フルクロズドループ制御、セミクロズドループ制御による手法に大別される。オープンループ制御においては指令値整形⁹⁾¹⁰⁾やフィードフォワード補償などが考えられる¹¹⁾。システムの構造が明らかな場合には、精密な動作を実現できるという点で効果的な方法である。フルクロズドループ制御は、制御系が設計しやすいという利点がある一方で、振動抑制で扱うような共振系のシステム、特に柔軟システムでは先端へのセンサの取り付けが困難な場合も存在する。セミクロズドループ制御は、制御量を状態量から観測器を通じて推定したり、事前に同定する必要があるが、上記とは異なり、計測可能な状態量によって制御系を構成することから実現性という観点で利点も存在する¹²⁾。なお、本稿が対象とするのは、セミクロズドループ制御系へ付加的に適用するオープンループ制御による手法である。

オープンループ制御の従来手法としては、システムが持つ最も支配的な共振周波数を取り挙げて、集中定数モデルに基づき

モデル化を行う二慣性共振モデルによる手法が主流となっている¹³⁾。他にも2つ以上の共振周波数を考慮できる三慣性共振モデルや多慣性共振モデルに基づく方法等が考えられている¹⁴⁾¹⁵⁾。これらのモデルに基づき指令値整形を行う際には指令値に次数制約が存在することが知られており、具体的には、システムを N 慣性共振モデルに基づきモデル化すると、指令値には $2N$ 以上の次数を持たせなくてはならない。さらに、多慣性共振モデルは、高次のモデルであるがゆえ、その設計も実装も難しくなってしまう。

これに対して、分布定数モデルの一つである波動方程式に着目し、無限個の共振周波数を考慮した振動抑制の手法が研究されている¹⁶⁾¹⁷⁾。Halevi は、柔軟システムを波動方程式によって無限次元の伝達関数として表現し、予測器・観測器を用いた制御系の構成している¹⁶⁾。齊藤らは、柔軟システムを波動方程式に基づきモデル化し、システムにおける反射波を除去することによって、制御対象をむだ時間と等価として扱うことが可能な波動補償器の提案をしている¹⁷⁾。

そこで、本稿は柔軟体のセミクロズドループ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する。

波動モデルに基づき指令値整形器を設計することから、分布定数モデルが持つ無限次元性によって精密な設計を行うことが可能となる。本稿では波動モデルに基づく提案の指令値整形器の出力が、元の指令値を時間シフトした信号から導出可能であることを明らかにしている。また、提案の指令値整形器は有限次元のモデルに基づく指令値整形器と異なり、任意の入力信号に対して増幅させない特長を有することを示している。

本稿は以下のように構成される。2章では波動モデルに基づくフレキシブルアームのモデル化を行う。3章では2章で導入したモデルに基づき、その逆システムから指令値整形器を導出するとともに同指令値整形器の周波数特性について解析を行う。そして、4章において1リンクマニピュレータを用いて比較実験を行い、最後に5章で結論を述べる。

* 原稿受付 平成 28 年 11 月 17 日

掲載決定 平成 29 年 2 月 15 日

** 学生会員 慶應義塾大学 (神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1)

*** 正 会 員 慶應義塾大学

Fig.1 Model of the flexible manipulator

2. モデリング

2.1 波動モデルに基づくフレキシブルアームのモデリング

本稿で扱うフレキシブルアームの概要図を図 1 に示す。まず、モデリングに適用する波動方程式を下記に示す。

$$\frac{\partial^2 \theta(t, x)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \theta(t, x)}{\partial x^2} \quad (1)$$

ただし、 θ , κ , ρ , c はそれぞれ角度、単位長さ当たりの剛性係数、質量密度、伝搬速度を示す。また、ここではフレキシブルアームの動作範囲が十分に小さいと仮定し、下記の近似を適用している。

$$y = L \sin \theta \quad (2)$$

$$\simeq L\theta \quad (3)$$

式 (1) の波動方程式に対してラプラス変換を適用することによって、下記を得る。

$$s^2 \theta(s, x) = c^2 \frac{\partial^2 \theta(s, x)}{\partial x^2} \quad (4)$$

上記の波動方程式における初期条件及び境界条件について定義する。第一に、初期時刻より運動が開始していることから初期条件は下記のように表される。

$$\begin{cases} \theta(0, x) = 0 \\ \frac{\partial \theta(0, x)}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

第二に、 $x = 0$ においてフレキシブルアームに接続される回転モータの運動方程式を考慮することによって、境界条件は下記のように表される。

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta(s, 0)}{\partial x} = \frac{1}{\kappa} (J_m s^2 \theta_m - \tau_m) \\ \frac{\partial \theta(s, L)}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

上記の波動方程式、対応する初期条件及び境界条件から回転モータの出力トルク τ_m からフレキシブルアームの先端位置 $\theta(s, L)$ までの伝達関数は下記のように導出される。

$$\frac{\theta(s, L)}{\tau_m} = \frac{2e^{-\frac{2L}{c}s}}{J_m s^2 (1 + e^{-\frac{2L}{c}s}) + \sqrt{\rho \kappa} s (1 - e^{-\frac{2L}{c}s})} \quad (7)$$

これらの波動システムの全体のブロック線図を図 2 に示す。

Fig.2 Block diagram of the wave system

Fig.3 Block diagram of the wave system with DOB

Fig.4 Block diagram of the wave system in control bandwidth

2.2 波動システムにおけるねじれ反力トルクの補償法

本稿で扱うシステムにおけるモータは、フレキシブルアームとの接続に起因し、波動システムからのねじれ反力トルクの影響を受ける。モータが受けるねじれ反力トルクの影響を抑制するために、本稿では外乱オブザーバ (DOB; Disturbance observer)¹⁸⁾ を適用する。DOB の適用によって、ねじれ反力トルク等の外乱として作用するトルクをカットオフ周波数 g_{dis}^* の範囲において、下記のように推定することが可能となる。

$$\hat{\tau}_{dis} = \frac{g_{dis}^*}{s + g_{dis}^*} \sqrt{\rho \kappa} s (1 - e^{-\frac{2L}{c}s}) (\theta(s, 0) - \theta(s, L)) \quad (8)$$

DOB による上記の推定値に基づき補償したシステムは図 3 として表される。ここで、カットオフ周波数の運動範囲において、上記の図 3 は図 4 として扱うことができる。換言すれば、角加速度の参照値 $s^2 \theta_m^{ref}$ と角加速度の応答値 $s^2 \theta_m^{res}$ の関係性は下記のように示される。

$$s^2 \theta_m^{ref} = s^2 \theta_m^{res} \quad (9)$$

以上により、本システムにおける角加速度の参照値 $s^2 \theta_m^{ref}$ からフレキシブルアームの先端位置 $\theta(s, L)$ までの伝達関数は下記のように導出される。

$$\frac{\theta(s, L)}{s^2 \theta_m^{ref}} = \frac{1}{s^2} \frac{2e^{-T_a s}}{1 + e^{-2T_a s}} \quad (10)$$

$$T_a = \frac{L}{c} \quad (11)$$

ここで、 T_a はフレキシブルアームにおける根元から先端までの波動の伝搬時間を示す。

Fig.5 Block diagram of the whole control system

3. 波動モデルに基づく指令値整形

3.1 制御対象の逆システムによる指令値整形の設計

本章では、前章で導出したフレキシブルアームのモデルについて、振動抑制を行うための指令値整形器を提案する。本制御対象に対するオープンループ制御が持つ主たる機能として、加速度フィードフォワード信号の印加による速応性の向上及び動作の高精度化¹⁹⁾と、指令値整形による振動抑制が考えられるが、本稿では後者の振動抑制に焦点を当てて議論を進めていく。

制御系全体のブロック線図を図5に示す。前章で波動モデルに基づきモデル化したフレキシブルアームについて逆システムを導出する。波動システムは下記のように表される。

$$\frac{\theta^{res}(s, L)}{\theta^{res}(s, 0)} = \frac{2e^{-T_a s}}{1 + e^{-2T_a s}} \quad (12)$$

$$= \frac{2}{e^{T_a s} + e^{-T_a s}} \quad (13)$$

$$= \text{sech} T_a s \quad (14)$$

これより、波動モデルに基づくフレキシブルアームの逆モデルは下記のように導出される。

$$\frac{\theta^{res}(s, 0)}{\theta^{res}(s, L)} = \frac{1}{\text{sech} T_a s} \quad (15)$$

$$= \cosh T_a s \quad (16)$$

$$= \frac{e^{T_a s} + e^{-T_a s}}{2} \quad (17)$$

以上の逆システムから、モータの指令値は下記のように整形される。

$$\theta^{cmd}(s, 0) = \frac{e^{T_n s} + e^{-T_n s}}{2} \theta^{cmd}(s, L) \quad (18)$$

ここで、 T_n は設計される調整時間であり、元の指令値からの時間シフトを意味している。上記の整形した指令値を時間領域で表現すると下記ようになる。

$$\theta^{cmd}(t, 0) = \frac{\theta^{cmd}(t + T_n, L) + \theta^{cmd}(t - T_n, L)}{2} \quad (19)$$

式(19)から、整形された指令値は元の指令値を T_n 進めた指令値と元の指令値を T_n 遅らせた指令値の平均から算出可能であることがわかる。提案の波動モデルに基づく指令値整形の概念図を図6に示す。

提案の指令値整形器の設計パラメータである T_n は、本稿で扱うフレキシブルアームのように共振周波数が低い対象については、試行錯誤的に決定していく。また、共振周波数が高い制

Fig.6 Overview of input shaping

御対象については T_n の設計において誤差が生じやすいことから、 T_n を自動的に決定するための最適化問題を設定するなど工夫が必要となる。

3.2 波動モデルに基づく指令値整形の周波数特性

本項では、提案した波動モデルに基づく指令値整形について周波数特性の解析を行う。ここでは、オイラーの公式に基づき、指令値整形器の大きさを下記のように変換する。

$$|\cosh T_n(j\omega)| = \left| \frac{e^{jT_n\omega} + e^{-jT_n\omega}}{2} \right| \quad (20)$$

$$= \left| \frac{\cos T_n\omega + j \sin T_n\omega + \cos T_n\omega - j \sin T_n\omega}{2} \right| \quad (21)$$

$$= |\cos T_n\omega| \quad (22)$$

上記の結果から、提案の指令値整形器は角周波数 ω の余弦関数の絶対値を特性として持つことが分かる。そして、この関数は角周波数 ω の値に応じて下記のような値を持つ。

$$|\cos T_n\omega| = \begin{cases} 1 & (\text{if } T_n\omega = n\pi) \\ \cos T_n\omega & (\text{if } n\pi < T_n\omega < \frac{\pi}{2} + n\pi) \\ 0 & (\text{if } T_n\omega = \frac{\pi}{2} + n\pi) \\ -\cos T_n\omega & (\text{if } \frac{\pi}{2} + n\pi < T_n\omega < (n+1)\pi) \end{cases} \quad (23)$$

つまり、 $|\cos T_n\omega|$ の値が0を取るときには、対応する角周波数に関する振動は抑制される。ここでは T_n の違いに応じたいくつかの数値例を図7に示す。図7より $T_n = 0$ sの場合、大きさ及び位相の両方が0となるため、指令値は整形されないこ

Fig.7 Frequency characteristics of the wave-based input shaper

とを示している．図 7 より， T_n の増加に応じて振動が抑制される最小の角周波数が小さくなっていることが分かる．以上の数値例から，提案の指令値整形器が調整時間 T_n の値に応じて，その周波数特性を変化させ， T_n を適切に設定することによって，振動抑制する最小の角周波数を所望の値に設計することが可能となることを示した．

4. 実験

4.1 実験設定

本稿では，提案する指令値整形器の有効性を検証するために 1 リンクのフレキシブルマニピュレータを用いた比較実験を行う．実験システムを図 8 に示す．実験システムはダイレクトドライブモータ，1 リンクのフレキシブルアーム，アーム先端位置の計測用カメラ及び検出用マーカーから構成される．先に述べたように，本稿で扱う制御系全体にはアーム先端位置の情報は含んでおらず，実験システムで用いているカメラはねじれ角度の評価用だけにのみ用いている．実験に用いるパラメータは表 1 に示している．この実験システムを用いて，本実験では下記の 4 種の方法を比較していく．

Fig.8 Frequency characteristics of the wave-based input shaper

Table1 Parameters in the experiments

Class	Value	unit
Sampling time of control loop T_s	100	μ s
Resolution of encoder	262144	pulse/rev
	18	bit
Sampling time of load position sensor	52	ms
Torque coefficient K_{tn}	1.18	Nm/A
Inertia of motor J_{mn}	0.0035	kg m ²
Time before motion T_{pre}	0.25	s
Time for acting time T_{act}	0.25	s
Time after motion T_{post}	5.0	s
Destination $\bar{\theta}$	0.15	rad
Adjustment time T_n	0.035	s
First resonance frequency ω_{1n}	44.9	rad/s
Second resonance frequency ω_{2n}	297.8	rad/s
Proportional gain K_p	ω_{1n}^2	
Velocity damping gain K_v	$4\omega_{1n}$	
Cutoff frequency of DOB g_{dis}^*	500	rad/s
Cutoff frequency of RFOB g_{rfob}	300	rad/s
Cutoff frequency of pseudo differential g_{psd}	2000	rad/s

1. 指令値整形なし
2. 慣性共振モデルに基づく指令値整形
3. 慣性共振モデルに基づく指令値整形
4. 波動モデルに基づく指令値整形 (提案法)

指令値には対称な両停留曲線の 1 つとして知られる下記のサイクロイド曲線を用いる．

$$\begin{aligned} \theta^{cmd}(t, 0) &= \theta^{cmd}(t, L) \\ &= \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ \bar{\theta} \left(\frac{t}{T_{act}} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(2\pi \frac{t}{T_{act}} \right) \right) & (0 \leq t < T_{act}) \\ \bar{\theta} & (T_{act} \leq t) \end{cases} \quad (24) \end{aligned}$$

そして，提案手法においては，下記の指令値を用いる．

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}^{cmd}(t, 0) &= \begin{cases} 0 & (t < -T_n) \\ \frac{\theta^{cmd}(t + T_n, L) + \theta^{cmd}(t - T_n, L)}{2} & (-T_n \leq t < T_{act} + T_n) \\ \bar{\theta} & (T_{act} + T_n \leq t) \end{cases} \quad (25) \end{aligned}$$

Fig.9 Comparison of gain characteristics

指令値整形に用いる調整時間 T_n は予備実験の結果に基づき決定する。ここでは T_n を 0 秒から 0.005 秒毎に大きくしながら、ねじれ角の整定時間が最も小さくなる値を探索している。予備実験により本実験で用いる調整時間は $T_n = 0.035\text{s}$ として決定した。また、提案手法の比較対象として二慣性共振モデル及び三慣性共振モデルに基づく指令値整形法を適用するために、別途システム同定を行っている。システム同定には小野測器社の FFT アナライザ DS3200 を用いており、モータ側に線形正弦信号を印加した際の反共振周波数に基づいて行っている。システム同定の結果を図 9(a) に示す。上記のシステム同定に基づき、二慣性共振モデルに基づく指令値整形は下記のように表される¹³⁾。

$$\theta^{cmd}(s, 0) = \theta^{cmd}(s, L) + \frac{s^2}{\omega_{1n}^2} \theta^{cmd}(s, L) \quad (26)$$

同様に、三慣性共振モデルに基づく指令値整形は下記のように表される。

$$\begin{aligned} \theta^{cmd}(s, 0) = & \theta^{cmd}(s, L) + \frac{\omega_{1n}^2 + \omega_{2n}^2}{\omega_{1n}^2 \omega_{2n}^2} s^2 \theta^{cmd}(s, L) \\ & + \frac{1}{\omega_{1n}^2 \omega_{2n}^2} s^4 \theta^{cmd}(s, L) \end{aligned} \quad (27)$$

図 9(b) に各指令値整形器の周波数特性に関するゲイン線図を示す。図から、提案の指令値整形器を用いた場合は、有限次元によるモデル化を行った指令値整形器を用いた場合とは異なり、任意の入力信号に対して増幅させることがないことがわかる。

4.2 実験結果

実験結果を図 10 から図 13 に示す。各図の上部には角度指令値 $\theta^{cmd}(t, 0)$ 、モータの角度応答値 $\theta^{res}(t, 0)$ 及びアーム先端の角度 $\theta^{res}(t, L)$ を示している。また、各図の下部には指令値と応答値の誤差 ε_{res} 及びモータの角度とアーム先端角度のねじれ角度 ε_{tor} を示している。実験結果は平方平均自乗誤差 (RMSE: Root Mean Squared Error) 及び、ねじれ角度 ε_{tor} の 2%

Fig.10 Experimental results without input shaping

Fig.11 Experimental results with input shaping considering two mass resonance model

整定時間によって評価する。ここで、RMSE は下記のように導出している。

$$\begin{aligned} \text{RMSE of torsion} = & \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\theta^{res}(k, 0) - \theta^{res}(k, L))^2} \\ & (-T_n \leq t \leq T_{act} + T_{post}) \\ N = & \frac{T_n + T_{act} + T_{post}}{T_s} \end{aligned} \quad (28)$$

各手法間で公平な比較を行うため、提案手法における整定時間については元の指令値に対する事前駆動時間を加えている。実験結果の要約を表 2 に示す。表 2 より、提案手法が RMSE 及び整定時間の両面において最も優れた結果を示していることが分かる。図 11 及び図 12 から分かるように、指令値整形を行っていない手法と比べて RMSE 及び整定時間の両面で性能が向上している。以上のように、実験結果を通じて波動モデルに基づく提案の指令値整形器がフレキシブルアームの振動抑制制御に対して有効であることを確認した。

Fig.12 Experimental results with input shaping considering three mass resonance model

Fig.13 Experimental results with proposed wave-based input shaping

Table2 Summary of experimental results

Class	RMSE of torsion rad	2 % settling time s
Without input shaping	0.0322	10.06
2 mass resonance model	0.0040	0.497
3 mass resonance model	0.0045	0.447
Proposal	0.0030	0.431

5. 結 言

本稿では、フレキシブルアームを制御対象として、オープンループ制御による振動抑制制御手法として、波動モデルに基づく指令値整形器を提案し、以下のような結果を得た。

- (1) 波動モデルに基づく提案の指令値整形器の出力が、元の指令値の時間シフトした信号から導出可能であることを明らかにした。
- (2) 周波数特性の解析より、提案の指令値整形器は、有限次元モデルに基づく指令値整形とは異なり、任意の入力信号に対して増幅させない特長を有していることを示した。

- (3) 比較実験によって提案する波動モデルに基づく指令値整形が有限次元のモデルに対してねじれ角の RMSE 及び 2% 整定時間の両面で良好な結果を示すことを確認した。

本提案における指令値整形の調整時間 T_n を自動決定する学習過程や、粘性項や外乱項を考慮した波動モデルへの拡張等、発展的な課題について今後検討したい。

謝 辞

本研究発表の一部は、文部科学省博士課程教育リーディングプログラム (オールラウンド型) 「超成熟社会発展のサイエンス」の RA 支援によって行われたことを記し、関係各位に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 中村昌弘: 設計と製造をシームレスにつなぐ ICT システムの現状と今後の方向性, 精密工学会誌, **81**, 3, (2015) 220.
- 2) 浅間一: サービス工学とサービスロボット, 精密工学会誌, **78**, 3, (2012) 196.
- 3) 笹木亮, 新堀康平, 伊藤夏樹, 池本有助, 神代充: 微小部品の高速位置決めにおける起動後補正による制振制御, 精密工学会誌, **80**, 5, (2014) 479.
- 4) 山本暁洋, 宮河秀和, 浜松弘, 後藤聡, 中村政俊: 機台振動の抑制を図ったリニアモータ駆動テーブルの高速位置決め制御, 精密工学会誌, **70**, 5, (2004) 645.
- 5) 盧泳辰, 李康源, 荒井義和, 高偉: カセンサを組み込んだ高速工具制御システムに関する研究—システムの設計と加工力のインプロセス計測実験—, 精密工学会誌, **77**, 1, (2011) 85.
- 6) J. M. Balas: Feedback Control of Flexible Systems, IEEE Transactions on Automatic Control, **4**, (1978), 673.
- 7) T. Yoshikawa, A. Ohta and K. Kanaoka: State Estimation and Parameter Identification of Flexible Manipulators Based on Visual Sensor and Virtual Joint Model, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'01-SEOUL, (2001) 2840.
- 8) 岩下平輔, 中野勉, 猪飼聡史, 高山賢一: NC 工作機械の送り軸のための 2 慣性系モデルによる低周波振動抑制制御の研究, 精密工学会誌, **82**, 8, (2016) 745.
- 9) Z. Mohamed and M. O. Tokhi: Command Shaping Techniques for Vibration Control of a Flexible Robot Manipulator, Mechatronics, **14**, 1, (2004) 69.
- 10) W. Singhose: Command Shaping for Flexible Systems: A Review of the First 50 Years, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, **10**, 4, (2009) 153.
- 11) 岩崎誠, 中村紘之: 波動歯車の角度伝達誤差に起因する共振振動の可変ノッチフィルタによる制振制御, 精密工学会誌, **78**, 10, (2012) 887.
- 12) K. Yuki, T. Murakami and K. Ohnishi: Vibration Control of 2-mass Resonant System by Resonant Ratio Control, Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, IECON'93-MAUI, 3, (1993) 2009.
- 13) 岩崎誠, 浅井雄二, 松井信行: パラメータ自動計測機能を有するロボットアームのフィードフォワード補償による制振制御, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), **114**, 10 (1994) 1046.
- 14) J. M. Hyde and W. P. Seering: Using Input Command Pre-Shaping to Suppress Multiple Mode Vibration, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'91-Sacramento, (1991) 2604.
- 15) S. Katsura and K. Ohnishi: Absolute Stabilization of Multimass Resonant System by Phase-Lead Compensator Based on Disturbance Observer, IEEE Transactions on Industrial Electronics, **6**, (2007) 3389.
- 16) Y. Halevi: Control of Flexible Structures Governed by the Wave Equation Using Infinite Dimensional Transfer Functions, ASME Journal of Dynamics, System, Measurement and Control, **4**, (2005) 579.
- 17) E. Saito, S. Katsura: Vibration Control of a Two-mass Resonant System Using Wave Compensator, Proceedings of SICE Annual Conference, (2011) 2672.
- 18) K. Ohishi, K. Ohnishi and K. Miyachi: Torque-Speed Regulation of DC Motor Based on Load Torque Estimation, Proceedings of IEEJ International Power Electronics Conference, IPEC'83-TOKYO, (1983) 1209.
- 19) M. Iwasaki, K. Seki and Y. Maeda: High-Precision Motion Control Techniques—A Promising Approach to Improving Motion Performance, IEEE Industrial Electronics Magazine, **6**, (2012) 32.