

リファレンスガバナを用いた精密位置決め制御 ～制約を考慮した突発外乱抑圧制御～

矢崎 雄馬*, 藤本 博志 (東京大学)

High Precision Control by Reference Governor : Sudden Disturbance Suppression Considering with Constraints
Yuma Yazaki*, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)

Abstract

Reference governor (RG) is a control method which add-on a control scheme in closed-loop system to supervise reference signals and enforce constraints. In previous studies of RG, a command tracking performance has been mainly discussed, but a disturbance suppression performance has been rarely discussed. This paper proposes an novel control method based on RG to suppress an effect of sudden disturbance. Simulations and experiments were performed to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

キーワード：リファレンスガバナ, 参照値整形, 外乱抑圧, 突発外乱, 精密位置決め, 制約付き制御
(reference governor, modifying reference command, disturbance suppression, sudden disturbance, precise control, constrained control)

1. はじめに

精密位置決めステージは, 半導体や液晶パネル製造に欠かせない産業機械である。近年, 製品の低価格化及び高集積化の要求が高まっており, 精密位置決めステージにはスループットの向上及び高精度化が求められている。高速高精度化のためにはフィードバック (FB) 帯域の高帯域化が不可欠であり, そのために2段アクチュエータ構造の採用やアクチュエータの小型化などの工夫がなされてきた^{(1)~(4)}。

しかし, アクチュエータを小型化すると最大推力も小さくなるため, 推力の飽和が起りやすくなるという問題がある。また, 2段アクチュエータでは粗微動間のギャップや相対速度に関する制約を破らないように制御を行う必要がある。従って拘束条件の存在を陽に考慮した制御系設計法の確立が重要である。

精密位置決めにおける軌道追従制御では, フィードフォワード (FF) 制御とFB制御を組み合わせた2自由度制御が広く用いられている。FF制御は主に目標軌道に対する軌道追従特性を向上させるために用いられ, 著者らは先行研究でFF制御の枠組みにおける推力制約を考慮した制御法を提案した⁽⁵⁾。一方FB制御では, 想定される外乱のスペクトルを解析し, その外乱に対する抑圧性能を最適化した制御器を設計する場合が多い。この場合, 制御器は想定外乱に対しては良好な外乱抑圧性能を示すものの, 想定されていない突発外乱に対してはアクチュエータの飽和などにより抑圧性能が悪化する可能性がある。そのため, 想定外乱に対しては良好な外乱抑圧性能を示しつつ, 想定されていない突発外乱にも対応できる制御法が求められる。

そこで本稿では, リファレンスガバナ (Reference Governor: RG) の考え方をを用いたオンライン計算に基づく外乱抑圧制御法を提案する。RGとは外部からの参照入力を整形する機構を制御系に追加する手法であり, 参照入力を適切に変化させることによって定められた制約を達成する。RG

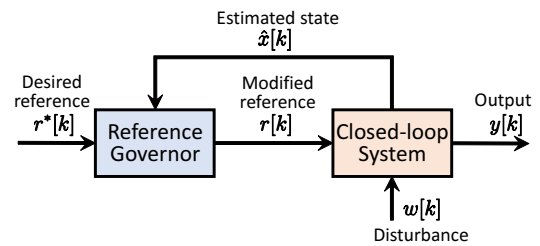


Fig. 1 Block diagram of reference governor.

のブロック線図を Fig.1 に示す。本提案法ではRGの考え方をを用いて参照入力を適切に整形することにより, 定められた制約の範囲内で外乱抑圧性能を高めることを可能にする。

RGの先行研究においては, Scalar Reference Governor (SRG)⁽⁶⁾⁽⁷⁾, Command Governor (CG)⁽⁸⁾⁽⁹⁾, Extended Command Governor (ECG)⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾, Model Predictive Control-based RG⁽¹²⁾ など様々な手法が提案されているが, いずれも定値参照入力に対する追従性能について議論を行っており, 外乱抑圧特性に対する議論は行われていない。また文献(13)においては外乱を考慮したRGが提案されているが, この文献においても定値参照入力に対する追従性能の議論に重きが置かれていることに加え, オフライン計算による参照入力整形でありモデル化誤差の影響を顕著に受ける問題がある。

RGは計算コストが大きいことから実験による検証がほとんど報告されていない手法である。本提案法では文献(7)の手法を一部用いることによりオンライン計算を行い, 実験によるRGの有用性の検証を可能とした。また, 本稿は今までRGの分野では注目されてこなかった外乱抑圧性能に焦点を当てており, この分野において新たな視点を与えるものと考えられる。

本稿ではまず第2章において, 制約なしモデル予測制御 (Model Predictive Control: MPC) に基づく参照入力整形を用

いた外乱抑圧制御法を提案する。次に第3章において、RGに基づく参照入力整形を用いた制約を陽に考慮した外乱抑圧制御法を提案する。最後に第4章において、提案法の有効性を実験により示す。

2. 制約なしモデル予測制御に基づく参照入力整形による外乱抑圧制御

本章では制約なし MPC に基づく参照入力整形による突発外乱抑圧制御法を提案する。本稿では突発外乱としてインパルス状の入力端外乱を仮定する。第2.1節において、インパルス外乱応答に対する一般論及び本稿で提案する手法の概念について述べる。第2.2節において、参照入力整形による外乱抑圧制御法について述べる。第2.3節において、シミュレーションにより参照入力整形による外乱抑圧制御について考察する。

〈2.1〉 インパルス外乱応答 モーションコントロールにおいては、ステップ外乱に対する定常誤差を避けるために制御器に積分器を1つ以上用いる場合が多い。このような制御器に対してインパルス入力端外乱が加わったとき、指令値を $r(t)$ 、出力を $y(t)$ とすると誤差 $e(t) = r(t) - y(t)$ に以下の関係が成り立つことが知られている⁽¹⁴⁾。

$$\int_0^{\infty} e(t)dt = 0 \dots \dots \dots (1)$$

従って、インパルス入力端外乱が印加されたときの応答は Fig.2(a) のように誤差の積分値が0になる応答となる。制御器の帯域を向上させたとしても、インパルス入力端外乱に対しては誤差について式(1)の関係が常に成り立つため、応答波形の概形を変えることはできない。

そこで、元々の参照入力を整形することを考える。整形後の参照入力を指令値とすると、整形後の参照入力と出力の誤差には式(1)の関係が成り立つが、元々の参照入力と出力の誤差には式(1)の関係は成り立たない。従って元々の参照入力と出力の誤差が小さくなるように参照入力を整形することで、応答を改善できると考えられる。すなわち、本制御法は従来の指令値と出力の関係を入れ替えるような制御であるといえる。参照入力整形を施した場合のインパルス外乱応答の概念図を Fig.2(b) に示す。本稿では参照入力整形によるインパルス外乱抑圧制御法について考察する。

〈2.2〉 制約なし MPC に基づく参照入力整形 本稿では、次のような線形離散時間サーボシステムを考える。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}[k+1] &= \mathbf{A}\mathbf{x}[k] + \mathbf{B}r[k], \mathbf{x}[0] = \mathbf{x}_0 \dots \dots \dots (2) \\ y[k] &= \mathbf{C}\mathbf{x}[k] \end{aligned}$$

ここで、 $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ は閉ループシステムの状態、 $y \in \mathbf{R}^1$ は制御量、 $r \in \mathcal{R} = [r_{\min}, r_{\max}] \subseteq \mathbf{R}^1$ は外部入力である。また本稿では \mathbf{A} は安定行列であると仮定する。このとき $i (i \geq 1)$ サンプル先の状態空間は次のように予想される。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}[k+i] &= \mathbf{A}^i \mathbf{x}[k] + \sum_{j=0}^{i-1} \mathbf{A}^{i-j-1} \mathbf{B}r[k+j] \dots \dots (3) \\ \hat{y}[k+i] &= \mathbf{C}\mathbf{A}^i \mathbf{x}[k] + \mathbf{C} \sum_{j=0}^{i-1} \mathbf{A}^{i-j-1} \mathbf{B}r[k+j] \end{aligned}$$

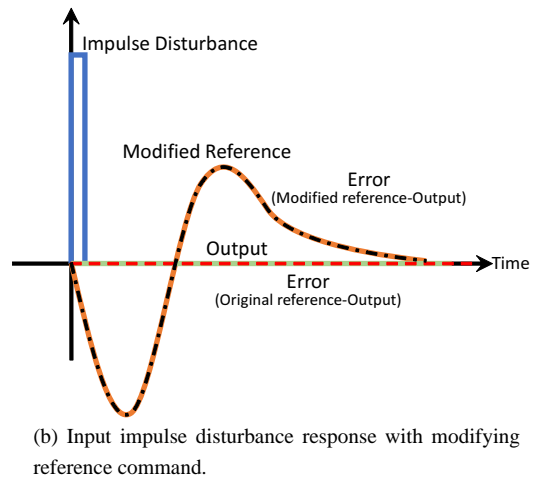
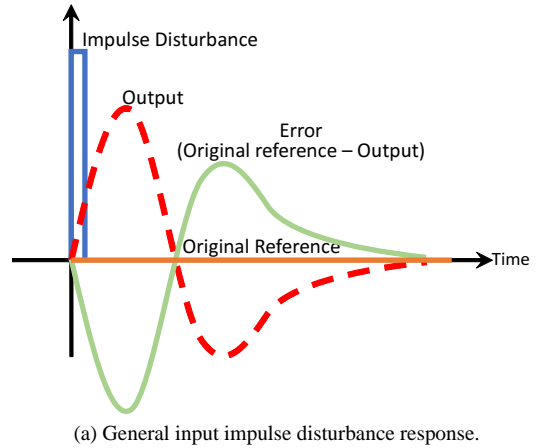


Fig. 2 Impulse input disturbance response. It becomes possible to manage the shape of response itself by modifying the original reference signal as shown in Fig.2(b).

従って時刻 $k+i$ における元々の目標値 r^* に対する誤差は以下のように予測される。

$$\begin{aligned} \hat{e}[k+i] &= r^* - \hat{y}[k+i] \\ &= r^* - \left(\mathbf{C}\mathbf{A}^i \mathbf{x}[k] + \mathbf{C} \sum_{j=0}^{i-1} \mathbf{A}^{i-j-1} \mathbf{B}r[k+j] \right) \dots (4) \end{aligned}$$

ここで、予測ホライズン内で外部入力 r が一定であると仮定し、 $r[k+j] = r (0 \leq j \leq i-1)$ とすると

$$\hat{e}[k+i] = r^* - \left(\mathbf{C}\mathbf{A}^i \mathbf{x}[k] + \sum_{j=0}^{i-1} \mathbf{C}\mathbf{A}^j \mathbf{B}r \right) \dots \dots (5)$$

r^* は事前に与えられる値、 $\mathbf{x}[k]$ は各時刻において測定可能な値であるため、 $\hat{e}[k+i]$ は r に対して高々1次である。従って、評価関数を誤差の2乗積分値と終端値を用いて

$$\begin{aligned} J &= \|\hat{e}_{i-1}\|_2^P + \|\hat{e}[k+i]\|_2^Q, \\ \hat{e}_h &= \begin{bmatrix} \hat{e}[k] \\ \hat{e}[k+1] \\ \vdots \\ \hat{e}[k+h] \end{bmatrix}, h \in \mathbf{Z}_+ \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

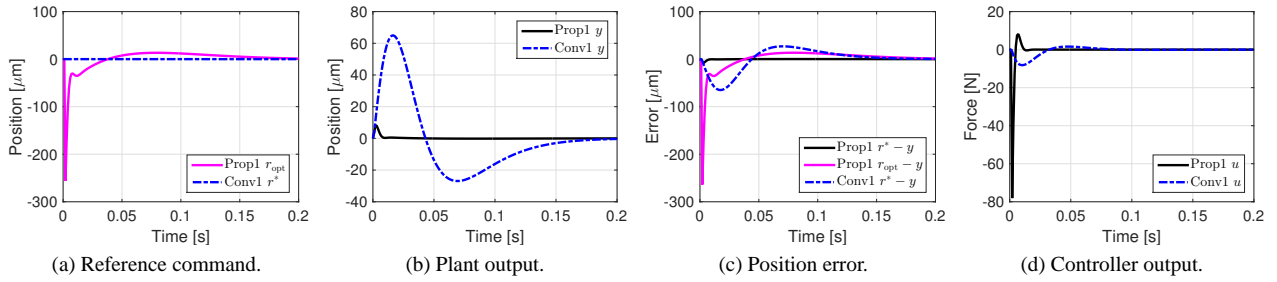


Fig. 3 Simulation results of disturbance suppression control by reference command modification based on MPC.

と置くと、評価関数は r に関する 2 次関数として表すことができる。評価関数の最適値 r_{opt} は、評価関数 J が $J = p_2(\mathbf{x}[k], r^*)r^2 + p_1(\mathbf{x}[k], r^*)r + p_0(\mathbf{x}[k], r^*)$ で表されるとき、

$$r_{\text{opt}} = -\frac{p_1(\mathbf{x}[k], r^*)}{2p_2(\mathbf{x}[k], r^*)} \dots \dots \dots (7)$$

と表される。各時刻で計算された r_{opt} を指令値として用いることにより、インパルス外乱応答を改善できると考えられる。

〈2・3〉 外乱抑圧性能のシミュレーションによる検証
 本シミュレーションでは、目標値 $r^* = 0$ 、初期状態 $\mathbf{x}[0] = \mathbf{O}$ に対してインパルス状の外乱が印加された場合の外乱抑圧性能について議論を行う。目標値 r^* を整形しない場合を従来法 1、第 2.2 節の手法により得られた最適な参照値 r_{opt} を目標値として用いる場合を提案法 1 とする。本シミュレーションにおいて、プラントは式 (8) に表される 2 次の剛体モデルを用いる。

$$P(s) = \frac{1}{M_p s^2}, M = 14.0 \text{ kg} \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 M_p は質量を表す。制御周期は $T_s = 1.0 \text{ ms}$ とし、FB 制御は PID 制御器により閉ループ系の極を -10 Hz に重根配置した。外乱 $w(t)$ は以下のようなインパルス状の外乱を印加した。

$$w(t) = \begin{cases} 100 \text{ N}, & 0 \leq t \leq T_s \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \dots \dots \dots (9)$$

また今回は簡単のため、評価関数を

$$J = \|\hat{\mathbf{e}}_i\|_2 \dots \dots \dots (10)$$

とし、予測ホライズンは $i = 3$ とした。

シミュレーション結果を Fig.3 に示す。Fig.3(b) より、従来法 1 では元々の指令値に対する誤差の積分値が 0 になるように制御器が働くため、収束に時間がかかっている。一方、提案法 1 では指令値を適切に整形し、整形後の指令値に対する誤差の積分値が 0 になるように制御器が働くことにより、元々の指令値に対する誤差の収束が早くなっている。整定時間を外乱が印加されてから位置誤差が $1 \mu\text{m}$ 以下に収束するまでの時間と定義すると、従来法 1 の整定時

間は 177 ms 、提案法 1 の整定時間は 7.49 ms であり、大幅な改善が見られた。しかし提案法 1 の場合、制御器の出力が非常に大きくなっており、これを小さくするためには制御器の出力の制約を考慮した指令値整形が必要である。

3. リファレンスガバナを用いた参照入力整形

第 2 章で提案した手法により、指令値を適切に整形することでインパルス入力端外乱の影響を小さくできることを示した。しかし、第 2 章で提案した手法では制御器の出力の値が大きくなるという問題がある。実際のアクチュエータの出力には限界があるため、出力の制約を考慮した手法が必要である。そこで本稿では RG を用いることにより制約を考慮した指令値整形を可能とする。

本章ではまず、第 3.1 節において RG に関する多くの研究で用いられている最大出力許容集合について説明する。次に第 3.2 節において、RG を用いた指令値整形法について述べる。最後に第 3.3 節においてシミュレーションにより提案法の有効性を示す。

〈3・1〉 最大出力許容集合

拘束条件を考慮しつつ参照入力を適切に整形するためには、拘束条件に対して制御系がどのような状態にあるかを把握することが重要である。拘束条件を達成する状態変数のすべてからなる状態空間の領域は、状態拘束集合と呼ばれる。一方、ある集合に含まれる初期状態が与えられたとき、任意の外部入力に対して状態がその集合の内部に留まり続ける集合は正の不変集合と呼ばれる。状態拘束集合と正の不変集合の積集合を出力許容集合と呼び、そのなかで最大のものを最大出力許容集合 (Maximal output Admissible Set: MAS) と呼ぶ。

初期状態が MAS に含まれるならば、システムは常に拘束条件を達成できることが保証される。参照入力及びそのときの状態に応じて MAS は存在する。RG に関する多くの研究では、適切に参照入力を整形することにより制約を破らない MAS を選択している。

〈3・1・1〉 拘束条件を有する線形離散時間システム

線形離散時間サーボシステム式 (2) に加え、状態と入力に関する制約を考えるための変数 $z[k]$ を定義する。

$$z[k] = \mathbf{L}\mathbf{x}[k] + \mathbf{D}r[k] \in \mathcal{Z}(\xi) \subseteq \mathbf{R}^p \dots \dots \dots (11)$$

また、 $\mathbf{O} \in \mathcal{Z}$ を仮定する。さらに \mathcal{Z} は有界であるとする。これらの仮定を考慮して、 \mathcal{Z} を以下のような凸多面体と

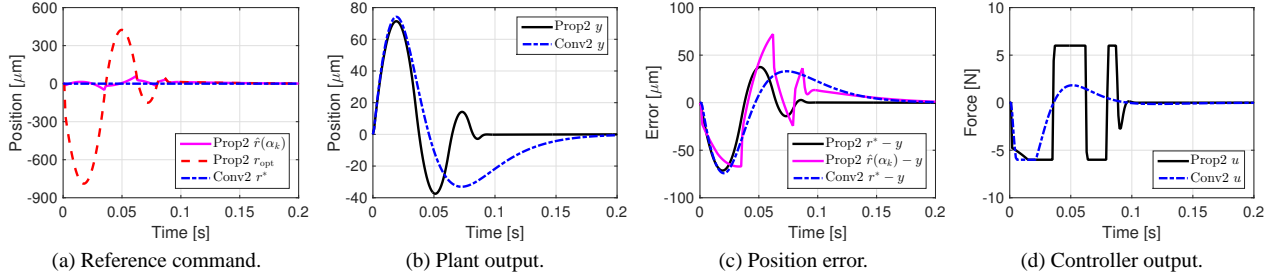


Fig. 4 Simulation results of disturbance suppression control by reference command modification based on RG.

して考える。

$$\mathcal{Z} = \{z \in \mathbf{R}^p | Mz \leq m(\xi)\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

これらの不等式は、ベクトルの各要素ごとに成立するものとする。また、 $M \in \mathbf{R}^{q \times p}$, $m(\xi) \in \mathbf{R}^q$ である。 $\xi \in \Xi$ は制約を特徴づける変数であり、制御を開始した時に初めて与えられる。

〈3・1・2〉 最大出力許容集合の定義 本節では、式 (2), (11) に対する MAS を定義する。

$\mathbf{x}[i; k, \mathbf{x}_0, \hat{r}]$ を全ての $i \in \mathbf{Z}_+$ に対して $\mathbf{x}[k] = \mathbf{x}_0$, $r[k+i] = \hat{r}$ を満たすときの式 (2) の解とする。また、 $z[i; k, \mathbf{x}_0, \hat{r}] = L\mathbf{x}[i; k, \mathbf{x}_0, \hat{r}] + D\hat{r}$ とする。このとき、MAS は Ω_∞ として次のように定義される⁽¹⁵⁾。

$$\Omega_\infty(\mathcal{R}, \Xi) = \{(\mathbf{x}_0, r, \xi) : \mathbf{x}_0 \in \Omega_\infty(r, \xi), \text{ for some } (r, \xi) \in \mathcal{R} \times \Xi\}, \quad \dots\dots (13)$$

$$\Omega_\infty(\hat{r}, \xi) = \{\mathbf{x}_0 : z[i; k, \mathbf{x}_0, \hat{r}] \in \mathcal{Z}(\xi), \forall i \geq 0\}$$

この定義より、 $\Omega_\infty(\hat{r}, \xi)$ は正の不変集合である。正の不変集合とは、もし $\mathbf{x}[k] = \mathbf{x}_0 \in \Omega_\infty(\hat{r}, \xi)$ を満たすならば、 $i \in \mathcal{K}$ を満たすすべての i に対して $\mathbf{x}[k+i] \in \Omega_\infty(\hat{r}, \xi)$ となる集合である。また A は安定行列であるため、それぞれの $\hat{r} \in \mathcal{R}$, $\xi \in \Xi$ に対して $\Omega_\infty(\hat{r}, \xi) = \Omega_i(\hat{r}, \xi)$ を満たす整数 \hat{i} が存在する。このとき、整数 κ を次のように仮定する。

$$\kappa = \sup_{\hat{r} \in \mathcal{R}, \xi \in \Xi} \hat{i} \quad \dots\dots\dots (14)$$

もしこのような κ が得られるとき、MAS は次のようにあらわされる。

$$\Omega_\infty(\hat{r}, \xi) = \Omega_\kappa(\hat{r}, \xi), \quad \forall \hat{r} \in \mathcal{R}, \forall \xi \in \Xi \quad \dots\dots\dots (15)$$

本稿では、このようなステップ数 κ はあらかじめ求められているものとする。 κ の計算方法は文献 (16) に示されており、この際プラントの初期状態を $\mathbf{x}_{p0} = A_p^{-1}b_p w$ として計算した。ここで A_p, b_p はプラントの離散時間状態方程式 $\mathbf{x}_p[k+1] = A_p \mathbf{x}_p[k] + b_p u[k]$ の状態 $\mathbf{x}_p[k]$, 入力 $u[k]$ の係数である。

〈3・1・3〉 最大出力許容集合の特徴づけ MAS をオンライン計算するために MAS の特徴づけを行う⁽⁷⁾。式 (3), (11) より時刻 $k+i$ における $z[k+i]$ は以下のように表される。

$$z[k+i] = LA^i \mathbf{x}[k] + L \sum_{j=0}^{i-1} A^{i-j-1} B r[k+j] + D r[k+i] \quad \dots\dots (16)$$

ここで、 $r[k+j] = \hat{r}$ ($0 \leq j \leq i$) と仮定すると、式 (12), (16) より時刻 $k+i$ における拘束条件は以下のように表される。

$$M L A^i \mathbf{x}[k] + M \left(L \sum_{j=0}^{i-1} A^j B + D \right) \hat{r} \leq m \quad \dots\dots (17)$$

ここで次のような変数を定義する。

$$h_{l,i} = M_l L A^i, \quad g_{l,i} = M_l \left(L \sum_{j=0}^{i-1} A^j B + D \right), \quad \dots (18)$$

$$l \in \mathcal{L} = \{1, 2, \dots, q\}, \quad i \in \mathcal{K} = \{0, \dots, \kappa\}$$

式 (13), (18) より、MAS は次のように表すことができる。

$$\Omega_\kappa(\mathcal{R}, \Xi) = \{(\mathbf{x}_0, \hat{r}, \xi) : h_{l,i} \mathbf{x}_0 + g_{l,i} \hat{r} \leq m_l(\xi), \quad \dots (19) \\ l \in \mathcal{L}, i \in \mathcal{K}, \hat{r} \in \mathcal{R}, \xi \in \Xi\}$$

以上より MAS を特徴づけることができ、MAS を $q \times (\kappa+1)$ 本の不等式により表現できた。

〈3・2〉 リファレンスガバナの設計 システムの状態 \mathbf{x} は可観測であると仮定する。このとき $\mathbf{x}[k] \in \Omega_\kappa(\hat{r}(\alpha_k), \xi)$ となる $r[k] = \hat{r}(\alpha_k)$ をオンラインで計算する。ただし、 $\hat{r}(\alpha_k)$ は次式で与えられる。

$$\hat{r}(\alpha_k) = (1 - \alpha_k) \bar{r}_{\text{opt}} + \alpha_k r_{\text{opt}} \quad \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 $\bar{r}_{\text{opt}} = -\beta r_{\text{opt}}$ ($\beta > 0$) とする。 $\mathbf{x}[k] \in \Omega_\kappa(\hat{r}(\alpha_k), \xi)$ を満たす最大の $\alpha_k \in [0, 1]$ を選択することで、制約を満たしつつ最適解 r_{opt} に近い値を与えることができる。式 (19), (20) より、次式が成り立つとき $\mathbf{x}[k] \in \Omega_\kappa(\hat{r}(\alpha_k), \xi)$ が満たされる。

$$\alpha_k g_{l,i} (r_{\text{opt}} - \bar{r}_{\text{opt}}) \leq m_l(\xi) - h_{l,i} \mathbf{x}[k] - g_{l,i} \bar{r}_{\text{opt}}, \quad \dots (21) \\ \forall l \in \mathcal{L}, \forall i \in \mathcal{K}$$

$h_{l,i}, g_{l,i}$ は事前に計算しておくとする、実装の際には α_k は次のように求めることができる。

$$\alpha_k = \min\{1, \tilde{\alpha}_k\}, \\ \tilde{\alpha}_k = \min_{(l,i) \in \mathcal{L} \times \mathcal{K}} \frac{m_l(\xi) - h_{l,i} \mathbf{x}[k] - g_{l,i} \bar{r}_{\text{opt}}}{g_{l,i} (r_{\text{opt}} - \bar{r}_{\text{opt}})} \quad \dots\dots\dots (22)$$

以上より α_k をオンライン計算することが可能となった。

上記のような指令値の決定法は SRG でよく用いられているが、従来の SRG に関する研究では指令値が単調に変化するように整形することを仮定する研究が多かった。従って本研究のようにプラントの初期状態と最終指令値が一致し、外乱の影響のみが問題となる場合では、外乱に対応して指令値を整形することが不可能であった。

一方、本提案法では制約なし MPC を用いたのちに RG を適用することにより、制約を考慮しつつ指令値が単調に変化しないような指令値整形が可能である。その結果従来の手法では不可能であった外乱に対応して指令値を適切に整形することが可能となった。

〈3・3〉 制約を考慮したインパルス外乱抑圧制御のシミュレーションによる検証 本節では第 2.3 節の条件に加え、制御器の出力に制約を設けた場合のインパルス外乱抑圧制御について議論を行う。目標値 r^* を整形しない場合を従来法 2 とする。従来法 2 では制御器の飽和によるワインドアップを防ぐために、文献(17)で提案されているアンチワインドアップ補償を適用した。また、第 3.2 節の手法により得られた参照値 $\hat{r}(\alpha_k)$ を目標値として用いる場合を提案法 2 とする。 β の値は $\beta = 10$ とした。制御器の出力に対する制約は $u_{lim} = 6\text{N}$ とした。

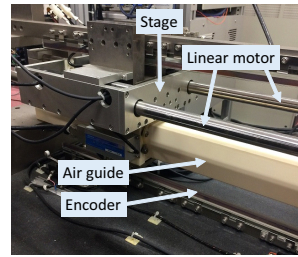
シミュレーション結果を Fig.4 に示す。Fig.4(b) より提案法では、指令値を整形することにより元々の指令値に対する誤差の収束が早くなっていることがわかる。Fig.4(a) より提案法では指令値が単調に変化せず自由に整形できており、その結果 Fig.4(d) に示すように、制御器の出力制約の範囲内で動作していることがわかる。また、第 2.3 節と同様に整定時間を定義すると、従来法 2 の整定時間は 185 ms、提案法 2 の整定時間は 89.2 ms であり、大幅な改善が見られた。

4. 実験による検証

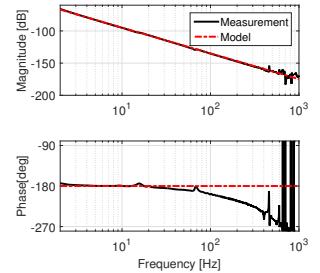
〈4・1〉 実験条件 本実験では Fig.5(a) に示される精密位置決めステージを用いる。このステージはエアガイドにより案内され、リニアモータにより駆動される。ステージの位置は分解能 1 nm のリニアエンコーダにより取得し、速度は位置の差分により得られた値を用いた。ステージの周波数特性を Fig.5(b) に示す。得られた周波数特性に対するフィッティングにより、プラントは式(8)に表される 2 次の剛体モデルでモデル化した。このプラントに対して閉ループ極を -10Hz に重根配置する PID 制御器を設計し、プラント及び PID 制御器をそれぞれ 0 次ホールド、Tustin 変換により離散化した。サンプリング周期は $T_s = 1.0\text{ms}$ とした。外乱は式(9)で表される入力をモータに印加した。 β の値は $\beta = 10$ とした。

本実験では以下の 4 つの比較を行う。

- 従来法 1 : 制御器の推力制約を設けない通常の FB 制御
- 従来法 2 : 制御器の推力制約を考慮し、アンチワインドアップ補償⁽¹⁷⁾を適用した FB 制御
- 提案法 1 : 制御器の推力制約を設けず、第 2.2 節で提案した参照値整形法を適用した手法



(a) Structure of the experimental stage.



(b) Frequency response of the experimental stage.

Fig. 5 Experimental stage.

提案法 2 : 制御器の推力制約を考慮し、第 3.2 節で提案した参照値整形法を適用した手法

制御器の出力に対する制約は $u_{lim} = 6.0\text{N}$ とする。従来法 2 においては実験の際にプログラム上で u_{lim} の制約を付加している。提案法 2 の場合は MAS を生成するときに u_{lim} の制約を考慮しているが、実験の際にはプログラム上で制約を与えていないことに注意する。また、整定時間は外乱が印加されてから位置誤差が $1\mu\text{m}$ 以下に収束するまでの時間と定義する。

〈4・2〉 実験結果 提案法 1 と従来法 1 を比較した結果を Fig.6 に、提案法 2 と従来法 2 を比較した結果を Fig.7 に示す。入力制約を考慮しない場合である従来法 1 と提案法 1 を比較すると、従来法 1 の整定時間は 198 ms、提案法 1 の整定時間は 17.1 ms であり、大幅な改善が見られた。一方入力制約を考慮した場合である従来法 2 と提案法 2 を比較した場合でも、従来法 2 の整定時間は 167 ms、提案法 2 の整定時間は 112 ms であり、応答が改善した。また、Fig.7(d) より提案法 2 においては実験の際に制御器の出力に対する制約を与えていないにも関わらず、RG を適用することにより事前に定めた制約 u_{lim} の範囲内で動作することができていることがわかる。

5. まとめ

本稿ではまず、指令値を整形することでインパルス入力端外乱応答が改善できることをシミュレーションにより示した。次に RG を用いた制御器の出力制約を考慮した指令値整形法を提案した。最後に提案法の有効性を実験により示した。本稿では今まで RG の分野において注目されてこなかった外乱抑圧特性に焦点を当てており、指令値を単調に変化させず自由に整形できる手法を提案することにより、外乱に対応した指令値整形を可能とした。本手法を拡張することでインパルス外乱だけでなく、発生頻度が低いが振幅が大きいような外乱にも対応できると考えられる。

モデル化誤差に対するロバスト性の検証や外乱の大きさと MAS を計算するために必要なステップ数 κ の関係の検証に関しては今後の課題としたい。

参考文献

- (1) H. Butler, "Position Control in Lithographic Equipment [Appli-

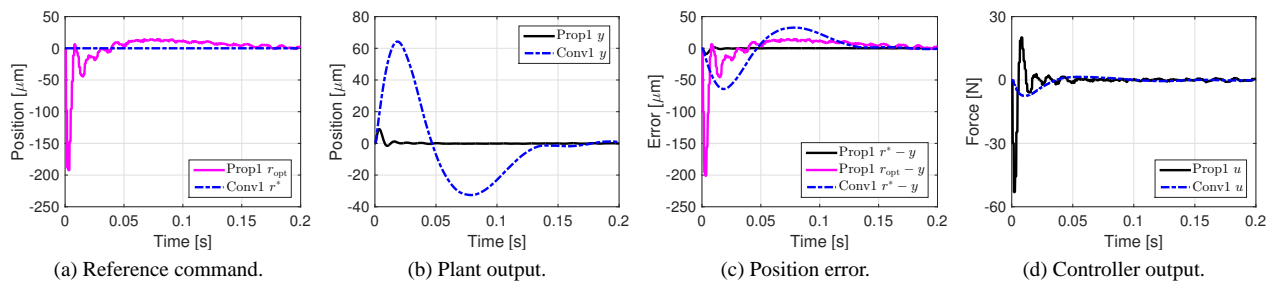


Fig. 6 Experimental results of disturbance suppression control by reference command modification based on MPC.

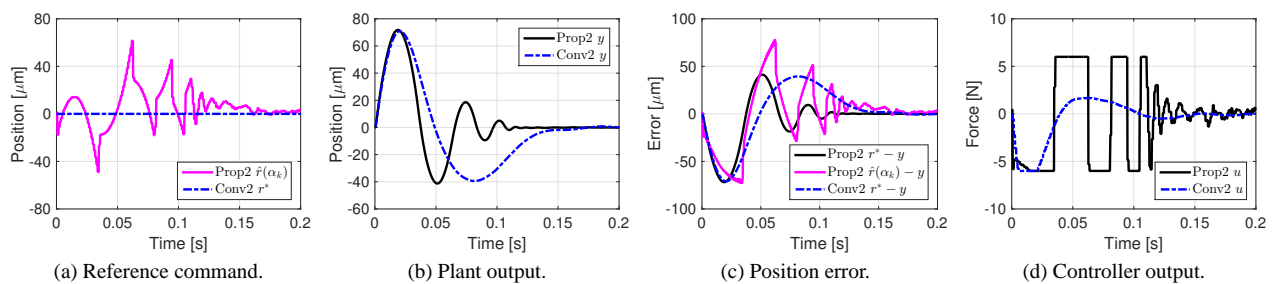


Fig. 7 Experimental results of disturbance suppression control by reference command modification based on RG.

cations of Control,” *IEEE Control Systems*, vol. 31, pp. 28–47, Oct. 2011.

- (2) Y. M. Choi and D. G. Gweon, “A High-Precision Dual-Servo Stage Using Halbach Linear Active Magnetic Bearings,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 16, pp. 925–931, Oct. 2011.
- (3) R. van Herpen, T. Oomen, E. Kikken, M. van de Wal, W. Aangenent, and M. Steinbuch, “Exploiting additional actuators and sensors for nano-positioning robust motion control,” *Mechatronics*, vol. 24, pp. 619–631, Sept. 2014.
- (4) Y. Yazaki, H. Fujimoto, Y. Hori, K. Sakata, A. Hara, and K. Saiki, “Method to Shorten Settling Time Using Final State Control for High-Precision Stage with Decouplable Structure of Fine and Coarse Parts,” *IEEJ Transactions on Industry Applications*, vol. 135, no. 3, pp. 227–236, 2015. (in Japanese)
- (5) Y. Yazaki, H. Fujimoto, K. Sakata, A. Hara, and K. Saiki, “Application of mode switching control using initial state variables in constraint final-state control to high-precision dual stage,” in *2015 American Control Conference (ACC)*, pp. 4155–4161, IEEE, July 2015.
- (6) E. Gilbert, I. Kolmanovsky, and K. T. Tan, “Nonlinear control of discrete-time linear systems with state and control constraints: a reference governor with global convergence properties,” *Proceedings of 1994 33rd IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 1, pp. 144–149, 1994.
- (7) Y. Ohta and I. Masubuchi, “On the implementation of reference governor,” in *Proc. 40th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2014)*, pp. 215–220, 2014.
- (8) A. Bemporad, A. Casavola, and E. Mosca, “Nonlinear control of constrained linear systems via predictive reference management,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 42, no. 3, pp. 340–349, 1997.
- (9) A. Casavola, E. Mosca, and M. Papini, “Control Under Constraints: An Application of the Command Governor Approach to an Inverted Pendulum,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 193–204, 2004.
- (10) E. G. Gilbert and C. J. Ong, “Constrained linear systems with hard constraints and disturbances: An extended command governor with large domain of attraction,” *Automatica*, vol. 47, no. 2, pp. 334–340, 2011.
- (11) M. J. Dillsaver, U. V. Kalabic, I. V. Kolmanovsky, and C. E. S. Cesnik, “Constrained control of very flexible aircraft using reference and extended command governors,” in *2013 American Control Conference*, pp. 1608–1613, IEEE, June 2013.
- (12) S. Aghaei, F. Sheikholeslam, M. Farina, and R. Scattolini, “An MPC-based reference governor approach for offset-free control of constrained linear systems,” *International Journal of Control*, vol. 86, no. 9, pp. 1534–1539, 2013.
- (13) T. Hatanaka and K. Takaba, “Design of Reference Governor for Constrained Systems Subject to Disturbance,” *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, vol. 40, no. 8, pp. 806–814, 2004. (in Japanese)
- (14) G. Goodwin, S. Graebe, and M. Salgado, *Control System Design*. Prentice-Hall, 2001.
- (15) E. G. Gilbert and K. T. Tan, “Linear systems with state and control constraints: The theory and application of maximal output admissible sets,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 36, no. 9, pp. 1008–1020, 1991.
- (16) K. Hirata and K. Kogiso, “An Off-Line Reference Management Technique for Constraint Fulfillment,” *Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers*, vol. 14, no. 11, pp. 554–559, 2001. (in Japanese)
- (17) K. Ohishi and T. Mashimo, “Design Method of Digital Robust Speed Servo System Considering Output Saturation,” *IEEJ Transactions on Industry Applications*, vol. 119, no. 1, pp. 88–96, 1999. (in Japanese)