制振高速起動制御のためのフィードフォワード正弦波
多項式制御入力の導出とクレーンシステムへの応用*寺嶋 一彦^{*1}, 多賀 正昭^{*2}, 三好 孝典^{*1}Sinusoidal Polynomial Feedforward Control Input
for High-Speed Starting Control with Damping to Reduce Residual
Vibration and Its Application to Crane SystemKazuhiko TERASHIMA^{*3}, Masaaki TAGA and Takanori MIYOSHI^{*3} Department of Production Systems Engineering, Toyohashi University of Technology
1-1 Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi-shi, Aichi, 441-8580 Japan

This paper presents a design method to derive a closed-form control input expressed by a series of sinusoidal polynomial, namely a linear combination of sine functions each with a different frequency content, for any given control specification. Vibration system which is a crane system described by a pendulum model are discussed. In this paper, the several control specifications are given such as the robustness for parameter variations, the minimization of maximum swing angle, and so on. The proposed closed-form control input is given in a simple form of polynomial functions, and unknown parameters in a closed-form of solution can be calculated using the both of Genetic algorithm and analytical formula. Experimental results well agrees with simulation results, and then theoretical and simulation analysis discussed in this paper are validated.

Key Words: Vibration Control, Crane System, Genetic Algorithm, Robustness, Closed-Form Solution, Sinusoidal Polynomial Control Input, Feedforward Control

1. 緒言と問題の記述

機械の高速搬送システムにおいては、不適切な指令入力は振動を発生させ、制御性能を劣化させる。したがって、残留振動を除去するために、指令入力、つまり、フィードフォワード制御入力を適切に与えることは重要である。

時間多項式や正弦波多項式で表現されたフィードフォワード制御入力の導出法については、線形システムや非線形システムに対して、現在まで多くの研究報告がある^{[1]-[9]}。著者らは既にクレーンシステムを対象に残留振動を発生させないフィードフォワード制御入力の方法について報告してきた。そこでは、線形時不変システムに対して、入力を有限個の時間多項式で表現し、その多項式の係数を、解析的に求める公式を導出した^[10]。また、時変線形システムに対しては、クレーンシステムを対象に、ロープ長の長さを陽に含んだ解を導出した^[13]。

さて、正弦波関数表現された制御入力は、時間表現された制御入力と比べ、周波数で示されるため振動システムなどへの適用においては直観的にわかり易い面がある。例えば、正弦波多項式解が共振周波数を含んでいなければ、定常状態では、プラントの振動を励起しない^{[2][8]}、2節で述べるが計算量も少ない。

そこで本論文では、与えられた各種制御仕様を満足させる正弦波多項式入力を求める方法を提案する。提案方法の主なアイデアは、ノミナル条件に対する残留振動抑制の制約条件を正弦波関数の振幅 a_n の値で満足させ、(1) パラメータ変動のロバスト性、(2) 振動の最大振幅最小化、(3) 最短時間搬送、(4) ジャーク最小化などの各種制御仕様を、正弦波関数の角周波数の組み合わせ方で対応させることである。角周波数 ω_n の選択は、遺伝アルゴリズム(GA: Genetic Algorithm)で行い、振幅 a_n の決定は、異なる ω_n に対する $\sin(\omega_n t)$ の線形独立性に着目し、係数比較法により決める。具体的には、GAと係数比較を交互に行い、収束するまで繰り返す。最後に、提案手法は、クレーンに適用され、実験により有用性が検証される。

なお、文献^[11]において西村らは、線形システム

* 原稿受付 2001年7月23日。

^{*1} 正員、豊橋技術科学大学工学部(☎ 441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)。^{*2} 豊橋技術科学大学大学院生産システム工学専攻修士課程。

E-mail: terasima@procon.tutpse.tut.ac.jp

に対してパラメータ変動に対する終端条件のロバスト性を考察した興味ある結果を報告しており、本論文のロバスト性について述べた部分に対応している。しかし、西村らはフィードバック制御を前提にした制御系にフィードフォワード入力を加えて、ロバスト性を改善することを目的としているのに対して、本論文はフィードフォワードのみの制御入力でのロバスト性を考察している点が異なる。また、西村らはロバストフィードフォワード入力を数値計算により求める式を導出しているのに対し、本論文は、既に述べたように、正弦波の多項式関数で表現された制御入力に限定していること、またそれにより、制御入力系列を数値としてメモリしておく必要がないことなどが異なる。

2. 正弦波多項式関数によって表現された解

2.1 制御対象と問題の記述

振動システムの制御対象として、図1に示されたクレーンシステムを考える。簡単化のために、搬送軌道は直線とし、ロープはたわまず、吊り荷の質量により一直線に引っ張られているものとする。ロープの質量は、吊り荷に比べ十分軽いものとし無視する。さらに、荷振れの減衰は小さいので無視する。

Fig. 1 Model of a crane

ラグランジュの方程式、あるいは、質量の釣合い式より、クレーンの運動モデルは次式で現される。

$$l\ddot{\theta}(t) + g\theta(t) = \ddot{x}(t) \quad (1)$$

ただし、 l : ロープの長さ[m], θ : ロープの振れ角[rad], g : 重力加速度 [m/s^2], x : トロリー (台車) の位置 [m] である。

用いた天井クレーン実験装置の概要を図2に示す。実験装置は文献^[12]と同じである。本研究では、 x 軸方向のみの直線搬送を考察の対象とする。制御は、コンピュータで計算された加速度入力 (6) 式を、使用した AC サーボモータのモータモデル (2) 式に代入し、制御入力電圧 $v(t)$ を求める。

$$T\ddot{x}(t) + \dot{x}(t) = Kv(t) \quad (2)$$

ただし、 T : モータ時定数, K : モータゲインであり、 $T=0.09$ s, $K=0.169$ m/s である。

その制御入力電圧 $v(t)$ をコンピュータから出力し、モータアンプを介して、モータを駆動し、クレーンを動かす。クレーンの位置は、AC サーボモータ内蔵のエンコーダ、クレーンのロープの振れ角は、振れ角センサ (2 本のフォークをロープにはさみ、フォークの根元にとりつけたポランショメータを駆動) により測定した。

Fig. 2 Schematic diagram of laboratory experimental crane systems

クレーンの位置、ロープの振れ角のフィードバック制御はせず、結果を確認するため、各々の測定を行った。

本論文では、加速度区間の制御入力に焦点を絞り議論を進める。搬送を加速区間、等速区間、減速区間に分けることができる時、次のことが自明である。すなわち、加速区間の終端時刻で、振動が完全に抑えられれば、等速区間搬送中に残留振動は発生しない。搬送の終端時刻で残留振動を発生させないために、減速区間の制御入力は、加速区間の制御入力の符号を反対にすればよいだけである。したがって、本論文では、加速区間の終端時刻で振動が完全に抑制される制約が与えられる。初期時刻、終端時刻での境界条件は次式のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \theta(0) = 0, \theta(T) = 0, \dot{\theta}(0) \neq 0, \dot{\theta}(T) = 0, \\ x(0) = 0, x(T) = 0.5VT, \dot{x}(0) = 0, \dot{x}(T) = V \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし、 T : 加速時間 [s], V : 加速終了時刻でのトロリー速度 [m/s] である。

さて、制御入力 $u(t)$ が次の時間多項式、

$$u(t) = A_0 + A_1 t + A_2 t^2 + \cdots + A_m t^m + \cdots + A_n t^n$$

で表現される場合を考えてみる。残留振動の完全抑制などの制約を満たす解を多項式で表現できるとき、解は0次の低次から m 個とるだけでなく、任意の m 個で表現されることを著者らは証明している^[13]。つまり、どのような m 個の組み合わせでも制約条件は満足できる。組み合わせの自由度は制御性能に影響する^[13]。ただし、高次の次数を選ぶと、 t^k の計算値は、 t の増大とともに莫大な値になる。

一方、正弦波多項式では、次のような表現を考えたことができる。

$$u(t) = a_1 \sin(\omega_1 t) + a_2 \sin(\omega_2 t) + \dots + a_m \sin(\omega_m t) + \dots + a_n \sin(\omega_n t)$$

残留振動がないという制約を満たす解を m 項の多項式で表現できるとき、制御設計の自由パラメータは a_i ($i=1,2,\dots,n$)であり、 $\omega_1, \dots, \omega_n$ の組み合わせを決めると、2.2節で示すように、振幅 a_i は、代数的に一意的に決まる。この場合、 $\sin(\omega_n t)$ の構造よりわかるように、 t^n と比べ、 t の増大とともに、 $\sin(\omega_n t)$ の値が莫大に大きくなることはない。したがって、本論文では正弦波関数表現において、プラントのノミナル条件(プラントの公称モデルでの設計)において、制御入力の振幅係数 $\{a_1, \dots, a_n\}$ を、残留振動抑制の制約を満たすよう決め、次に、 $\{\omega_1, \dots, \omega_n\}$ の組み合わせ方により、各種制御性能を最適化させることを考える。

2.2 境界条件を満足する正弦波多項式の解の導出法

さて、方程式(1)で表現されたモデルに対する正弦波多項式解を導出する。トロリーの位置 $x(t)$ と、クレーンのロープの振れ角 $\theta(t)$ が、それぞれ次の正弦波多項式関数で表されると仮定する。

$$x(t) = \sum_{i=1}^N a_i \sin(\omega_i t), \quad \theta(t) = \sum_{i=1}^N b_i \sin(\omega_i t) \quad (4)$$

もし、異なる周波数の組み合わせ $\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ が制御系設計者により与えられるとき、解くべき問題は、境界条件を満足するように方程式(4)における係数 a_i と b_i を決定することである。式(4)を式(1)に代入するとき、 $\sin(\omega_i t)$ に関する係数比較法により N 組の方程式が導出される。さらに、6組の方程式が方程式(3)に示された境界条件から導出される。なぜなら、 $x(0)=0$ と、 $\theta(0)=0$ は、 $\sin(0)=0$ より自明なことから、境界条件は8個でなく6個になる。したがって、方程式の総数は $N+6$ 個となる。このとき、正弦波多項式解の決定すべき係数は、(4)式より $2N$ である。したがって、 $6+N=2N$ より、 $N=6$

となる。 $N=6$ での式(4)を、クレーンの基礎運動方程式(1)に代入し、 $\sin(\omega_i t)$ に関して係数比較法を適用すると、次の関係式が導かれる。

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= -C_1 a_1, & b_2 &= -C_2 a_2, & b_3 &= -C_3 a_3 \\ b_4 &= -C_4 a_4, & b_5 &= -C_5 a_5, & b_6 &= -C_6 a_6 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし、

$$C_i = \frac{\omega_i^2}{g - l\omega_i^2} \quad (i=1,2,\dots,6)$$

式(4)、(5)を境界条件式(3)に代入し、方程式を解くことにより a_i と b_i の解析解を得ることができる。実際に、制御入力 $u(t)$ 、つまりクレーンの加速度は、上の手続きにより得られた $x(t)$ を微分することにより求められる。制御入力 $u(t)$ は次式で与えることができる。

$$u(t) = \ddot{x}(t) = \sum_{i=1}^6 \bar{a}_i \sin(\omega_i t) \quad (6)$$

なお、ただし、 $\bar{a}_i = -\omega_i^2 a_i$ ($i=1,2,\dots,6$)である。 a_i, b_i はきわめて複雑な式となるので省略する。 a_i と b_i の導出は Mathematica により行った。

3. 遺伝アルゴリズムによる最適角周波の決定

3.1 正弦波多項式関数における角周波数の組み合わせについて

前節までの議論では、角周波数 ω_i の自由度が残されていた。本論文では、遺伝アルゴリズム(GA)を用いて、正弦波多項式関数における角周波数 ω_i を、次節で与えられる各種制御仕様を最適化するように決める。

近年、GAは多くの分野で広く応用されている。GAのアルゴリズムの主な枠組みは1989年Goldbergにより作られた。制約付きの多峰性を持つ評価関数の最適化に有効である。本論文では、各種制御仕様が与えられたとき、それを満足する正弦波多項式解を次の2つのステップに分けて求めていく。

[最適正弦波多項式制御入力の導出法]

- Step1: 角周波 $\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ の適当な組み合わせを、3.2節で示された評価関数値をもとにGAにより決める。
- Step2: 係数比較法により導出した方程式(5)、(6)式より、正弦波多項式の振幅 a_i, b_i ($i=1,2,\dots,n$)を求める。
- Step3: 上の手順を繰り返し、制御仕様の評価関数が収束したとき、それを最適解とする。

GA のアルゴリズムは、一般的なものを用いることにし、(i) 初期化、(ii) 評価、(iii) 選択、(iv) 交叉、(v) 突然変異の部分から構成する。

本論文では、正弦波多項式関数の角周波数 ω_i は、7 ビットのバイナリ信号で表現することにした。制御入力は本論文で与えた境界条件の下では、既に述べたように、6 個の $\sin$ 関数の組み合わせになることから、遺伝子は 42 ビットとなる。また、 ω_i の定義域は、0.1~12.8 rad/s とした。

バイナリ信号 x_i から角周波数 ω_i へのデコーディングは、次式によってなされる。

$$\omega_i = 12.7 \frac{x_i}{127} + 0.1 \quad (i=1,2,\dots,6) \quad (7)$$

なお、 $\omega_1, \dots, \omega_n$ は互いに違った値でなければならないので、もし、2 つの ω_i が同じ値のとき、0.1 rad/s の差を強制的に与えることにした。

シミュレーション条件は、次の通りである。遺伝子の数は 50 個とした。エリート選択法を用い、一様交叉法を利用し、交叉確率は 50% とした。遺伝子の世代繰り返し回数は $T_f = 3000$ とした。実際の所、角周波数はほぼ 200 世代で収束した。これらの条件は、シミュレーションの試行錯誤により、評価関数を小さくしていく傾向のものを見出し、それを採用した。角周波数のスケール範囲 $\omega = 0.1 \sim 12.8$ rad/s は、入力の振動特性や計算の容易さを考慮して決めた。

3.2 各種制御仕様

クレーンの制御仕様は、ユーザの目的により多種多様である。本論文では、次の 5 つの制御仕様を考えた。

[各種制御仕様]

(I) 最小ジャーク搬送：

$$J_j = \int_0^T |\Delta \ddot{x}(t)| dt + P \quad (8)$$

(II) 最小振れ角搬送：

$$J_\theta = |\theta_{\max}| + P \quad (9)$$

(III) 振れ角最小面積搬送：

$$J_v = \int_0^T |\theta(t)| dt + P \quad (10)$$

ただし、 $T_f = T + 2[s]$ であり、 T は加速度搬送区間の終端時刻、 $2[s]$ は等速搬送区間の時間である。

(IV) ロープ長変化に対するロバスト搬送：

$$J_r = \int_{l_n}^{l_m} \left\{ \theta^2(T, l) + \frac{l}{g} \dot{\theta}^2(T, l) \right\} dl + P \quad (11)$$

(V) ロバスト性とジャーク低減化を考慮した最適搬送：

$$J_{\text{new}} = W \times J_r + J_j \quad (12)$$

ただし、

$$P = \begin{cases} 100 & ; \max |\ddot{x}(t)| > 2.0 \\ 0 & ; \max |\ddot{x}(t)| \leq 2.0 \end{cases} \quad (13)$$

上式で、 P はペナルティ関数である。つまり、もし制御入力が入力大きさの制約を満たさないならば、ペナルティとして、評価関数に 100 を加えることにし、そのような制御入力を選ばないようにさせた。式 (12) の W は、 J_r と J_j の重要度を定める重み関数、 $W = 1000$ とした。ロバスト性を評価する尺度としては、評価関数 (IV) を採用した。

式 (11) の被積分関数は、式 (14) で示すように加速度区間の終端時刻以後での、振れ角の振幅を表している。式 (11) の具体的な計算法を以下に記す。

まずノミナルロープ長 l_n において、(3) 式の境界条件と、(1) 式においての公称モデル $l_n \ddot{\theta} + g \theta = \ddot{x}$ を満たすように、既に述べた方法で、(4) 式の解を得る。

$$x(t) = \sum_{i=1}^6 a_i \sin(\omega_i t), \quad \theta(t) = \sum_{i=1}^6 b_i \sin(\omega_i t)$$

ただし、 a_i, b_i は、(5) 式で与えられ、公称モデルにおいて境界条件を満足する制御入力（以下、ノミナル制御入力と呼ぶ）が求まる。

$$\ddot{x} = \sum_{i=1}^6 \bar{a}_i \sin(\omega_i t), \quad \bar{a}_i = -\omega_i^2 a_i \quad (14)$$

次に、ロープ長が l に変動した場合について、ノミナル制御入力に対する $\theta(t)$ を求める。つまり、

$$l \ddot{\theta} + g \theta = \sum_{i=1}^6 a_i \sin(\omega_i t) \quad (15)$$

の式に対して、 $\theta(0) = 0$ 、 $\dot{\theta}(0) = 0$ とおき、(15) 式の $\theta(t)$ を求めることができる。 $\theta(t)$ は、 l, l_n と、 $\omega_1 \sim \omega_6$ の変数からなる。さて、(11) 式の被積分関数を、ロープ長変動幅 $l_n \sim l_m$ で積分すると、評価関数値 J_r が求まる。 J_r は、 $\omega_1 \sim \omega_6$ を変数とする関数である。本論文では Mathematica により求めた。 $\omega_1 \sim \omega_6$ を与えると J_r が計算されるので、 J_r が最小となる $\omega_1 \sim \omega_6$ の組み合わせを GA で決定すると、

それが、ロープ長変化に対して、残留振動抑制という終端条件への影響を最小感度にする、すなわちロバストであると考えられる。なお、(11) 式の被積分関数がクレーンロープの振れ角振幅になるのは、

$$\theta^2(T, \omega) + \frac{1}{\omega^2} \dot{\theta}^2(T, \omega) = \|A\|^2 \quad (16)$$

より明らかである。

Table 1 Angular frequency of input (ω [rad/s])

	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6
GA_r	0.2	1.5	1.6	4.8	7.6	10.8
GA_j	0.7	1.0	3.2	3.8	6.1	6.4
GA_v	0.6	1.0	1.3	4.2	4.8	12.0
GA_θ	0.1	1.0	1.8	4.6	7.4	11.1
GA_{new}	0.3	0.9	2.2	5.0	7.9	10.0

評価関数 (I) は、加速度制御入力のジャーク (加速度) を最小にする制御入力を求めるものである。

評価関数 (III) は、加速搬送区間、等速搬送区間の間における振れ角の面積を最小化する制御入力を求めるものである。評価関数 (II) は、加速度搬送区間における最大振れ角を最小にする制御入力を求めるためのものである。

Table 2 Comparison of cost function

	GA_r	GA_j	GA_v	GA_θ	GA_{new}
$J_r (10 \times 10^{-4})$	8.668	76.79	93.34	28.22	12.49
$J_j (10 \times 10^{-1})$	165.5	7.633	11.62	32.56	12.62
$J_v (10 \times 10^{-2})$	5.471	5.135	5.102	5.117	5.176
$J_\theta (10 \times 10^{-2})$	7.421	6.116	6.260	3.769	4.846
J_{new}	17.42	8.422	10.50	6.078	3.868

評価関数 (V) は、高次モード振動の影響を低減化するために、ロバスト性と、ジャーク最小化の両方を考慮した制御入力を求めるためのものである。

4. 制御結果と考察

本論文では、加速終了時刻は $T=2$ [s] と考え、そのときの速度は 0.5 m/s とした。ロープの長さは、 $l=0.5$ m をノミナル状態とした。(3) 式の制約条件は、ノミナル状態で満足させることとした。

表 1 に、各制御仕様を最小化させた最適制御入力を構成する正弦波多項式関数の各周波数の組み合わせを示す。例えば、表 1 において GA_r , GA_j は、評価

関数 J_r , J_j を最小にした最適制御入力を意味し、そのときの、 $\omega_1 \sim \omega_6$ の値を表に示した。各制御仕様に対して、 $\omega_1 \sim \omega_6$ の値が異なることがわかる。表 2 は、各々の最適制御入力 $GA_r, \dots, GA_{new}$ を用いたときの、評価関数の値 $J_r, J_j, J_v, J_\theta, J_{new}$ を示す。例えば、表 2 における GA_r の列において J_r, J_j, J_v, J_θ は、 GA_r の最適制御入力を用いて、各々の評価関数を計算したものである。図 3, 4, 5 は、制御シミュレーション結果である。図 3 は、それぞれ $GA_r, GA_j, GA_v, GA_\theta$ の制御入力を示す。図 4 は、 $GA_r, GA_j, GA_v, GA_\theta$ の各制御入力を用いた場合のロープの振れ角を示す。ノミナルロープ長 0.5 m におけるシミュレーションであるため、いずれの場合にも加速終了時刻の 2 s 以後、残留振動はない。図 5 は、各制御入力 $GA_r, GA_j, GA_v, GA_\theta$ を、ロープ長さを $0.5 \sim 0.85$ m の間で、 0.05 m 毎にロープ長を変更させた場合における加速終了時の残留振動の振幅を示す。

Fig.3 Control input for various control specification

なお本論文では荷振れの減衰は小さいこと、及び加速終了時での振動抑制効果をみることに主目的であるので、減衰項をモデル式 (1) より除いている。したがって、図 5 の残留振動の大きさは減衰係数を零として求めたものであり、ノミナル条件以外では残留振動があるが、実際の実験では、十分時間が経過するとすべてのロープ長条件で残留振動は零になる。さて、表 2 から理解されるように、ジャーク最小化を考えた制御入力 GA_j は、 $GA_r, GA_j, GA_v, GA_\theta, GA_{new}$ の中で、当然のことながら評価関数 J_j を最小化させていることがわかる。図 3 から、制御入力 GA_j の振幅は小さく振動的でなく滑らかに台形形状をしている。一方、ロバスト制御入力 GA_r の形は、振動的であり、大きなジャークを持っている。また、図 5 よりわかるように、ロープ長変化の残留振動への

影響は GA_r の場合が最も低感度である。以上、提案した手法により得られた結果は、期待通りの性能を有しており、本提案手法が妥当であることがわかる。

Fig. 4 Swing angle of the rope for various control Specification

Fig. 5 Amplitude of residual vibration of the rope

図6はジャーク最小化の制御入力 GA_j を使った、ロープ長 0.5 m に対する制御シミュレーションと制御実験結果である。実験結果はシミュレーション結果に良好に一致している。これは、クレーンモデルの妥当性を示している。図7はロバスト制御入力 GA_r を用いたの制御シミュレーションと制御実験結果を示す。この場合には、実験結果では、(a)、(b)ともに高周波の残留振動が生じており、実験結果はシミュレーション結果と一致していない。この理由としては、クレーンの高次振動モードの影響が考えられる。ロープの振れが1次振動モード、ロープと荷物の間の振れが2次振動モードであり、2次振動モードの影響がでている。シミュレーションでは2次振動モードは考慮しておらず1次振動モードのみ考慮したモデルを構築している。ここで用いたロバスト制御入力、図7(a) $l=0.5$ m の制御シミュレーション

では、残留振動が良好に制御されている。しかし、実験では高次モードの振動が発生しており、実験とシミュレーションに差が大きい。なお、図7(b)の場合は、シミュレーションにおいても、低周波の残留振動が若干残っている。(a)の $l=0.5$ m がノミナル条件であり、このときは残留振動抑制が完全にされるのに対して、(b)の場合はロバスト制御により振動抑制効果はあるものの、加速終端時刻での振動の完全抑制を目指しているわけではないことによる。しかしながら図5より他の場合と比べ総合的にロバスト制御の残留振動抑制の効果が表れていることがわかる。

Fig. 6 Simulation and experimental result (GA_j)

Fig. 7 Simulation and experimental result (GA_r ; (a) $l=0.5$ m, (b) $l=0.85$ m)

Fig. 8 Frequency characteristics of control input

そこで、高次モード対策を考えるにあたって、制御入力の周波数特性を見る。図8は各評価関数を最小化する最適制御入力の周波数特性を示す。周波数特性は、(6)式を、時刻0から、加速時間Tまでプラス変換し、 s を $j\omega$ に変換することで求めた。この図より理解されるように、ロバスト制御入力とは他の制御入力と比較して、高周波数帯域で制御入力ゲインが高くなっている。これは、ここで求めたロバスト制御入力では、ロープ長さの変動に対応するロープの固有周波数変動帯域で、制御ゲインを低くすることから、全体のパワーを保持するために、それ以上の高周波数帯域のゲインが大きくなったと考えられる。したがって、ロバスト制御入力 GA_r は、高次モード振動を励振し、残留振動が実験で現れた。次に、実験とシミュレーションの不一致を解消するために、高周波数帯域での制御ゲインを下げることを考えた。

Fig. 9 Frequency characteristics of control input

Fig. 10 Amplitude of residual vibration

そこで、式(12)で与えられた評価関数 J_{new} を、高次モード振動の影響を低減化させるために新たに提案した。評価関数における重み関数 W は、 $W=1000$ とした。これは、シミュレーションを繰り返し、試

行錯誤的に求めたものである。図9は、その場合の制御入力の周波数特性である。図より、制御入力 GA_{new} のゲインは、 GA_r と比べて、高周波数帯域で下げられていることがわかる。図10は、 $l=0.5\text{m}$ でノミナル設計したロープ長変化に対する加速終了時での残留振動の振幅を示す。式(12)によって修正された最適制御入力 GA_{new} は、図7で示したロバスト制御入力 GA_r と比べて高次モード成分がないため、1次モードで構築したクレーンモデルのシミュレーションと実験がほぼ一致し、シミュレーションで設計した性能が実験ではほぼ実現できることが期待される。図11は、 GA_{new} を用いた場合のロープ長 $l=0.5\text{m}$ と $l=0.85\text{m}$ の場合に対する制御シミュレーションと制御実験結果である。実験結果はシミュレーション結果とよく一致しており高次振動モードが生じていないことがわかる。ロープ長変動が生じたロープ長が $l=0.85\text{m}$ においても、加速終了時の残留振動は 0.009rad と振れは小さい。図10の GA_r の結果は図5の GA_r と同じものであり、高次モードが発生しないという仮定の結果であり参考に付記したものである。実際にはこれより振動抑制性能が劣化することは既に示した。しかし、ここに記した GA_r と比べても、 GA_{new} のシミュレーション結果は、ほぼ同程度の振動抑制効果、また実験では高次モード振動が発生しない点で、制御仕様(V)で求めた GA_{new} の制御入力は、ロープ長変動の場合に対して、制御仕様(IV)で求めた GA_r を改善しているといえる。

Fig. 11 Simulation and experimental result
(GA_{new} ; (a) $l=0.5\text{m}$, (b) $l=0.85\text{m}$)

以上の結果より、各種制御仕様を満足させる制御入力を自動的に導出するために本論文で提案された手法は有効であることが明らかになった。ロープ長変化に対応させるために考えたロバスト制御入力 GA_r と、高周波成分低減化を目的として導入したジャーク最小化制御入力 GA_j から構成させた最適制御入力 GA_{new} は、 GA_r より残留振動が若干大きい、実用的見地からは、その部分の性能劣化よりも、モデルに考慮されていない高次モードの励振を押さえ

ることのメリットが大きいと考える。本論文では、最適フィードフォワード制御入力を導くための一手法がクレーンモデルに対して適用されたが、本提案手法は振動システム一般に応用が可能であると考えられる。

5. 結言

本論文で得られた結果は次の通りである。

- (1) ノミナル条件で残留振動がなく、かつ各種制御仕様を満足するフィードフォワード制御入力を、正弦波多項式関数で表現した。
- (2) 正弦波多項式関数を構成する角周波数の組み合わせを遺伝アルゴリズムで数値的に求め、また、入力の振幅係数を、振動モデルや境界条件式を基に、係数比較法で解析的に求める手法を提案した。
- (3) 実験室用のクレーン装置を用いて、本提案手法の有効性を、実験とシミュレーションにより実証した。
- (4) 各種制御仕様に対する最適フィードフォワード制御入力を求めた。モデルの不確かさや高次モードの影響があるプラントでは、ロープ長変化を考慮したロバスト性と、高周波数帯域でのゲインを低下させるジャーク低減化を考慮して、最適制御入力を求めることが、フィードフォワード制御入力として有効性のあることを示した。

文献

- [1] Meckl, Peter H. and Kinceler, Roberto : Robust Motion Control of Flexible Systems using Feedforward Forcing Functions, IEEE Trans. Control Systems Technology, Vol.2, No.3, pp.245-254(1994)
- [2] Bhat, S.T. and Miu, D.K.: Precise Point-to-Point Positioning Control of Flexible Structure, Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control, Vol.112, No.4, pp.667-674 (1990)
- [3] 山浦, 小野: ロバスト性を有する制振アクセス制御, 機論, 58-549-C, 1339/1405(1992)
- [4] 山浦, 小野: 高次振動モードを考慮した制振アクセス制御, 機論, 59-559-C, 727/732(1993)
- [5] 小木曾, 田島, 竹本, 毛塚: 指数乗正弦波曲線を用いた移動体の加速度パターンの最適化, 機論, 59-564-C, 2451/2458(1993)
- [6] 伊藤, 辻, 小笠原, 光田: ジャーク値を制約とした最適軌道による振動制御, 機論, 59-558-C, 372/378(1993)
- [7] 小野: 振動機構系の最適な高速起動制御, 機論, 51-469-C, 2233/2240(1985)
- [8] Terashima, K. and Yoshida, T.: Nonlinear Optimal Control with Specified Frequency and Its Application to Liquid Container Transfer, Procs. of 5th Triennial International Symposium of Flucon'97, Hayama(Japan), Vol.2, pp.767-772 (1999)
- [9] Miyoshi, T. and Terashima, K.: Advances in Manufacturing-Decision, Control and Information Technology, Ed. by S.G. Tzafestas, Robust Feedforward Control Design for Variation of Resonant Frequency and Its Application to Crane Systems, Springer, 321-328 (1999)
- [10] 三好孝典, 寺嶋一彦: 境界条件を考慮した有限時間多項式表現による制御入力の解析解導出, 計測自動制御学会論文集, Vol.36, No.6, pp.489-496 (2000)
- [11] 西村秀和, 舟木厚司, 戸谷隆美: フィードフォワード入力を用いた終端状態制御のパラメータ変動に対するロバスト性能(走行振り子の位置決め制御による検証), 機論, 61-587-C, 296/302 (1995)
- [12] 兼重明宏, 寺嶋一彦, 宗利秀和, 定森健: 荷位置情報に基づく3次元天井クレーンのモデリングと搬送制御(第2報, ロープ長変化を考慮した荷位置フィードバック制御系の構築), 機論, 64-628-C, 253/260 (1998)
- [13] 三好孝典, 寺嶋一彦: 時変振動機構に対する制振フィードフォワード制御入力の導出とクレーンへの応用, 機論, 64-624-C, pp.2859-2866 (1998)