

最適レギュレータでモード制御された フレキシブル・リンクの打撃ロボットへの応用

日高 良和* 泉 照之**

Application of a Flexible Link with Mode Control
by Optimal Regulators to a Hammer Robot

Yoshikazu Hitaka* and Teruyuki Izumi**

Abstract

A flexible link hammer can not only absorb the reaction force at hitting but also shorten the impulsive force easily. However a flexible link vibrates with many modes due to a distributed parameter system. The hammer robot system must suppress all the modes of the vibration in a swing-up process before hitting and the second mode or higher modes in hitting.

In this paper optimal regulators with a pre-filter are applied to control the vibration modes of the flexible link for a effective hitting. As the mode to be suppressed is different according to the process of hitting, the frequency characteristic of the pre-filter is changed from low-pass property to band-pass. Therefore two kinds of feedback gain vector are provided. The regulator with an observer is implemented by Digital Signal Processor(DSP) which is able to calculate very fast. Two kinds of the regulator are changed according the process of hitting so that a multiply-add operator can be used effectively.

1. まえがき

フレキシブル・リンクは、マニピュレータの軽量化、高速化、省エネルギー化に大きく貢献できる。しかし、このリンクは分布定数系であるから、多くの振動モードをもって複雑に運動する。したがって、最適レギュレータを用いて振動の全てのモードを抑制する研究が多く行われている^{1)~3)}。このとき高次モードを打ち切ってモデル化するためにspilloverが問題となる。しかし、これは高域遮断特性のフィルタをもった最適レギュレータによって回避されている^{4)~6)}。多くの実験では、フレキシブル・リンクは2次までモデル化されているが、振

動抑制を効果的にするためにはより高次までモデル化する必要がある。高次モードまで考慮する場合、固有周波数の間隔が狭くなるので、フィルタの次数を増加して急峻な遮断特性をもたせると同時に、制御のためのサンプリング時間を短くする必要がある。ところがシステムの次数が大きくなると、計算時間がかかるので、これら2つの要求は矛盾する。

筆者らは、ハンマーの柄にフレキシブル・リンクを用いることによって、衝撃反力を容易に吸収できるだけでなく、衝撃力の時間幅を短くできる打撃ロボットを研究している⁷⁾。この研究は、打撃前にリンクをある振り上げ角に設定するとき生じる振動の全モードが抑制されるだけでなく、打撃期間中はフレキシブル・リンクの振動の第1モードだけを利用するために、2以上の高次モードが抑制されなければならない問題がある。

* 宇部工業高等専門学校電気工学科

** 山口大学工学部

本論文は、周波数特性をもたせた最適レギュレータを応用して、フレキシブル・リンク・ハンマーの振動を制御して、打撃動作を効果的にしている。打撃動作過程において、抑制されるべき振動モードも異なるので、フィルタの周波数特性を高域だけでなく新たに低域も遮断させることを検討している。したがって、最適レギュレータのフィードバックゲインベクトルを2種類用意している。また、フレキシブル・リンクも高次までモデル化しなければならないので、オブザーバ付きレギュレータは高速演算可能なデジタル信号プロセッサ(DSP)で構成されている。2種類のレギュレータは打撃過程に応じて切り換えられ、DSPの特徴である積和演算命令が有効に利用されている。

2. フレキシブル・リンクをもつ打撃ロボット

Fig. 1は、長さ l の柔軟なリンクの先端にハンマー頭部を持つフレキシブル・リンク・ハンマーを示す。リンクの他端はモータで回転されるハブに取り付けられている。その場所でのリンクの接線方向を x 軸、それと直角方向を y 軸とする。この x - y 相対座標系は、水平面内にある X - Y 絶対座標系より、ハブの回転角度 $\theta(t)$ だけ回転しているとす。時刻 t における x - y 座標系から見たフレキシブル・リンクの変位は、リンクの第 i 次振動モードの固有関数 $\phi_i(x)$ の線形結合で、

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i(t) \phi_i(x) \quad (1)$$

と表される⁹⁾。この式の $a_i(t)$ は、第 i 次振動モードの時間的変化を示し、次の常微分方程式を満たす。

$$\ddot{a}_i(t) + 2\delta\lambda_i \dot{a}_i(t) + \lambda_i a_i(t) = -b_i \ddot{\theta}(t) \quad (2)$$

ここで、 δ はリンクの内部粘性係数、 λ_i は第 i 番目の固有値、 b_i は x と $\phi_i(x)$ との内積⁹⁾、そして $\ddot{\theta}(t)$ はハブの回転角加速度である。フレキシブル・リンクは、(1)式からわかるように多くの角振動数

$$\Omega_i = \sqrt{\lambda_i - \delta^2 \lambda_i^2} \quad (i=1, 2, \dots) \quad (3)$$

をもって複雑に運動する。この運動の1次モードを打撃ロボットに利用する場合、ハブをパルス状の角加速度で駆動し、一定の角速度 ω_a で回転させた後打撃させるのが便利である。この場合でも、2以上の高次モードが生じるので、所望の速度で対象物をフラットに打撃することは困難である。3.3(1)で述べる方法で高次モードを抑制して、第1次モードのみにできるならば、フレキシ

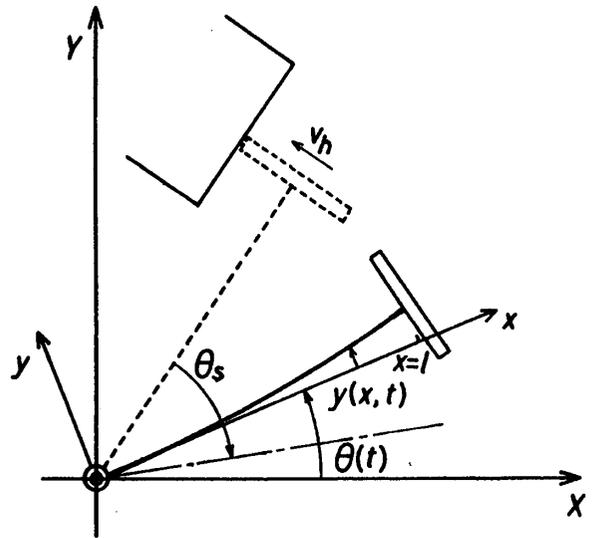


Fig. 1 Hitting by a flexible link hammer

Table Parameters of the lower modes of the vibration

i	$\Omega_i/2\pi$	$\phi_i(l)$	$\phi_i'(l)$	$\phi_i''(0)$	b_i
1	1.86	0.1244	6.22×10^{-3}	4.192×10^{-4}	243.78
2	17.08	-0.0056	-31.82×10^{-3}	32.42×10^{-4}	22.40
3	43.16	-0.0256	22.35×10^{-3}	97.16×10^{-4}	10.52
4	101.24	0.0221	-9.05×10^{-3}	254.6×10^{-4}	5.03
5	193.54	-0.0167	4.58×10^{-3}	494.4×10^{-4}	2.65
6	317.65	0.0132	-2.76×10^{-3}	814.5×10^{-4}	1.63
7	473.14	-0.0109	1.84×10^{-3}	$1215. \times 10^{-4}$	1.09

ブル・リンク・ハンマーは、駆動開始から1次モードの約半周期 π/Ω_1 後にFig. 1の破線のような姿勢となり、対象物をフラットに打撃できる⁹⁾。このとき、打撃速度 v_h は次式のように最大となる⁷⁾。

$$v_h = (l + \phi_1(l) b_1) \omega_a \quad (4)$$

$\phi_1(l)$ 、 b_1 はTableに示すような定数であるから、ハブの角速度 ω_a は、指定打撃速度 v_h から容易に決められる。この打撃条件を満たすためには、Fig. 1の1点鎖線で示す角度

$$\theta_s = (\pi/\Omega_1 + \delta) \omega_a \quad (5)$$

までハンマーを振り上げる必要がある。このとき生じる振動は、打撃サイクルを短くするために1次モードを含むすべての成分を速く減衰させなければならない。

このように、所定の角度だけ振り上げられたハンマーの振動が減衰した後、パルス状の角加速度がハブに与えられ、それによって生じる2以上の高次モードを抑制し、

第1次振動モードだけを打撃動作に利用すれば、希望の速度で対象物をフラットに打撃できる。なお、ねじれ振動は無視できるものとしている。

3. 制御系の構成

Fig. 2はフレキシブル・リンクを打撃動作に利用するための制御系を示している。リンクを駆動するサーボモータは打撃のために速度制御、振り上げのために角度制御されている。また、それぞれで生じるリンク振動のモード制御をする最適レギュレータも図の下半分に併置されている。

3.1 角度制御と角速度制御

サーボモータの入力電圧 $V_m(t)$ に対する角速度 $\omega(t)$ の伝達関数は、 $G_m(s) = k_m / (T_m s + 1)$ である。これにゲイン k_e の速度フィードバック回路が付加されている。速度指令電圧 V_r と速度フィードバック信号 $k_e \omega(t)$ の偏差 $e(t)$ がゲイン k_a のアンプで電力増幅され、その電圧 $V_m(t)$ がモータに印加される。モータは減速比 g の歯車系を通じてハブを角速度 $\dot{\theta}(t)$ で駆動している。 V_r に対する $\dot{\theta}(t)$ の伝達関数は

$$G(s) = (r/g) / (s p + q) \quad (6)$$

である。ここで、 $r = k_m k_a$ 、 $q = k_m k_a k_e + 1$ 、 p は T_m 以外に歯車系の慣性を含んでいる。

所定の振り上げ角を実現するために、角度フィードバック回路のSWが閉じられ位置制御モードにされる。そして、角度指令電圧 V_r によってフレキシブル・リンクを駆動するハブ軸の角度 θ_s が(5)式の値に設定される。このとき生じるフレキシブル・リンクの振動は3.3 (2)で

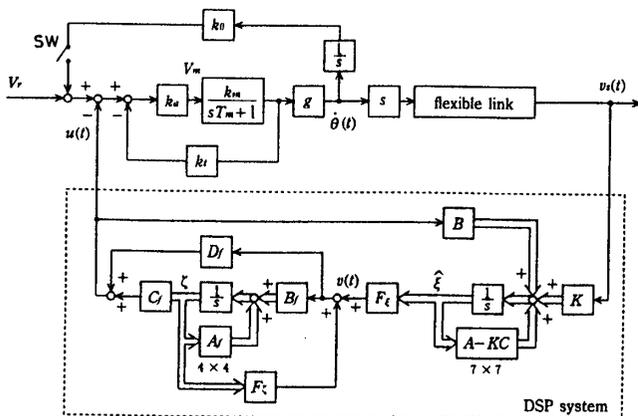


Fig. 2 Block diagram of a control system

述べる最適レギュレータで抑制される。一方、打撃中は、(4)式に基づいてハブを希望の一定角速度 ω_a で回転させる必要がある。このとき、パルス状の角加速度を得るために、アンプが飽和して定電流源特性をもつように速度フィードバックゲイン k_e を大きな値に設定している。これによって定速度特性も得られる。この場合もハブの角加速度によってフレキシブル・リンクが励振されるので、ハンマーが打撃するまでの短期間に振動の2以上の高次モードを十分に抑制させるために最適レギュレータを用いている。

3.2 周波数特性をもつ最適レギュレータの構成

使用したフレキシブル・リンク系の特性は、Table からわかるように i の増加とともに b_i が小さくなるので高次モードは励起されにくくなる。そのため、 $N+1$ 次以上を打ち切ってモデル化する。系の状態変数として、次式のようにフレキシブル・リンクの N 次モードまでの相対変位 $a_i(t)$ 、相対速度に相当した¹⁾

$$v_i(t) = -(\dot{a}_i(t) + \delta \lambda_i a_i(t)) / \Omega_i$$

を、さらにハブの角速度 $\dot{\theta}(t)$ を選んだ。

$$\xi(t) = [a_1(t), v_1(t), a_2(t), v_2(t), \dots, a_N(t), v_N(t), \dot{\theta}(t)]^T \quad (7)$$

この状態変数を用いると、状態方程式は(2)、(6)式からつぎのようになる。

$$\dot{\xi}(t) = A \xi(t) + B u(t) \quad (8)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\delta \lambda_1 & -\Omega_1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \Omega_1 & -\delta \lambda_1 & \dots & 0 & 0 & -q b_1 / p \Omega_1 \\ \vdots & & & & & \vdots \\ \vdots & & & & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -\delta \lambda_N & -\Omega_N & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \Omega_N & -\delta \lambda_N & -q b_N / p \Omega_N \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -q / p \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$B = [0, r b_1 / (g p \Omega_1), 0, r b_2 / (g p \Omega_2), \dots, 0, r b_N / (g p \Omega_N), r / (g p)]^T \quad (10)$$

ここで、 $u(t)$ はフレキシブル・リンク系への入力を示す。振動モードを制御することを目的としているので、出力としてリンク根元の歪み電圧 $v_s(t)$ を測定する。

これは比例定数 K_s を用いて

$$v_s(t) = K_s \sum_{i=1}^N \phi_i''(0) a_i(t) \quad (11)$$

と表されるので、観測方程式は次式のようなになる。

$$v_s(t) = C \xi(t) \quad (12)$$

$$C = [K_s \phi_1''(0), 0, K_s \phi_2''(0), 0, \dots, \\ K_s \phi_N''(0), 0, 0] \quad (13)$$

状態方程式(8)に対する最適レギュレータを構成しても、モデル化誤差によるスピルオーバー現象が生じて(N+1)次モードが励起される場合がある。また、 $v_s(t)$ を検出するアンプのドリフトによって角度 θ が変動する。そこで、操作入力 $u(t)$ に含まれる不必要な成分を抑制するために、周波数特性をもった最適レギュレータを構成する¹⁾。この前置フィルタの状態方程式は、出力 $u(t)$ 、入力 $v(t)$ 、状態変数 $\zeta(t)$ を用いて、次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\zeta}(t) &= A_f \zeta(t) + B_f v(t) \\ u(t) &= C_f \zeta(t) + D_f v(t) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

新しい制御対象は、(8)式のフレキシブル・リンク系と(14)式の前置フィルタの拡大系となるので、新しい状態変数を

$$z(t) = [\xi(t)^T, \zeta(t)^T]^T \quad (15)$$

とすることによって、次のような状態方程式で表現できる。

$$\dot{z}(t) = \begin{bmatrix} A & BC_f \\ 0 & A_f \end{bmatrix} z(t) + \begin{bmatrix} BD_f \\ B_f \end{bmatrix} v(t) \quad (16)$$

このシステムに対して次の評価式を最小にするように最適レギュレータを構成する¹⁾。

$$J_z = \int_0^{\infty} (z(t)^T Q z(t) + v(t)^2) dt \quad (17)$$

ここで Q は、前置フィルタの次数を M としてつぎのような対角行列を用いる。

$$Q = \text{diag}[q_1, q_2, q_3, q_4, \dots, q_{2N}, q_{2N+1}, \\ q_{2N+1+1}, \dots, q_{2N+1+M}] \quad (18)$$

3.3 最適レギュレータの設計

フレキシブル・リンク・ハンマーのモデルの次数を $N=3$ として、最適レギュレータを設計した。

(1) 角速度制御時の最適フィードバックゲイン

フレキシブル・リンク・ハンマーで所望の打撃速度を得るためには、(1)式に基づいてハブの角速度 ω_a を一定にするのが便利である。したがって、打撃中ハブは、速度制御されながら、振動の1次モードのみを残し、2、3次モードを減衰させるように制御される。そのために、(18)式の q_1, q_2 の値が q_3, q_4, q_5, q_6 に比べて極めて小さく設定され、他は適当に決められている。この場合、高い周波数領域でゲインが大きくなるので、スピ

ルオーバー現象が生じる。それを防止するために高域遮断特性をもつ前置フィルタを用いる。この種の多くの実験では2次のフィルタが用いられているが、フレキシブル・リンクの固有振動数の間隔が近いので、次式の伝達関数をもつ $M=4$ 次のバターワース型低域通過フィルタを用いた。

$$C_f [sI - A_f]^{-1} B_f + D_f = \\ \{[(s/2\pi f_{hc})^2 + 2(s/2\pi f_{hc})\cos(\pi/8) + 1] \\ \times [(s/2\pi f_{hc})^2 + 2(s/2\pi f_{hc})\sin(\pi/8) + 1]\}^{-1} \quad (19)$$

この遮断周波数 f_{hc} は、フレキシブル・リンクの4次モードが励起しないように、3次モードの固有周波数 $\Omega_3/2\pi$ 付近に設定されている。(18)式の Q としてつぎのような Q_2 を決めた。

$$Q_2 = \text{diag}[1.0 \times 10^{-7}, 1.0 \times 10^{-7}, 4.8 \times 10^5, 4.8 \times 10^5, \\ 1.0 \times 10^7, 1.0 \times 10^7, 6.0 \times 10^3, 1.0 \times 10^{-5}, \\ 1.0 \times 10^{-5}, 1.0 \times 10^{-5}, 1.0 \times 10^{-5}] \quad (20)$$

そして、最適フィードバックゲインベクトル $F_2 =$

$[F_{2f}^T, F_{2c}^T]^T$ を求めた。

(2) 角度制御時の最適フィードバックゲイン

角度制御で振り上げられたハンマーは1次を含む多くのモードでかなり強く振動する。打撃サイクルを短くするためには、それらの振動の全てのモードを速く減衰させる必要がある。したがって、(17)式の評価関数の Q の要素として、 q_1, q_2 にも相当大きな重みを指定しなければならない。この場合に得られるフィードバックゲインによる閉ループ伝達関数は、直流に対しても相当な感度をもつ。これは、フレキシブル・リンクの根元に張り付けられたひずみゲージ電圧 $v_s(t)$ を検出するアンプのドリフトによって角度 θ を乱す。そこで、直流成分を遮断させるために帯域通過特性をもったつぎのような伝達関数の前置フィルタを用いた。

$$C_f [sI - A_f]^{-1} B_f + D_f = \\ \{[(2\pi f_{lc}/s)^2 + 2(2\pi f_{lc}/s)\cos(\pi/4) + 1] \\ \times [(s/2\pi f_{hc})^2 + 2(s/2\pi f_{hc})\cos(\pi/8) + 1] \\ \times [(s/2\pi f_{hc})^2 + 2(s/2\pi f_{hc})\sin(\pi/8) + 1]\}^{-1} \quad (21)$$

高域遮断周波数 f_{hc} は3.3(1)と同様に決めているが、低域遮断周波数 f_{lc} は、 $\Omega_1/2\pi$ 付近に設定されている。(18)式の Q としてつぎのような Q_1 を決め、

$$Q_1 = \text{diag}[8.5 \times 10^2, 8.5 \times 10^2, 3.0 \times 10^7, 3.0 \times 10^7, \\ 3.0 \times 10^7, 3.0 \times 10^7, 6.0 \times 10^3, 1.0 \times 10^{-5}, \\ 1.0 \times 10^{-5}, 1.0 \times 10^{-5}, 1.0 \times 10^{-5}]$$

$$1.0 \times 10^{-5}, 1.0 \times 10^{-5}, 1.0 \times 10^{-5}] \quad (22)$$

最適フィードバックゲインベクトル $F_1 = [F_{1t}^T, F_{1t}^T]^T$ を求めた。

4. DSPを用いたモード制御実験

(7)式の状態変数は直接測定され得ないので、Fig. 2に示すようなゲイン K のオブザーバを構成して、リンク根元のひずみ電圧 $v_s(t)$ から状態変数値 $\xi(t)$ を推定している。オブザーバを含んだ最適レギュレータはデジタル・シグナル・プロセッサ (DSP) TMS320C25 を用いて構成されている。DSPは積和演算命令をもってあるので、オブザーバによる状態推定、フィルタリング、

状態フィードバックの計算が高速に実現できる。したがって、システムの次数は $2N + 1 + M = 11$ と大きくともサンプリング時間を $1[\text{msec}]$ 以下にできる。しかし、積和演算をするためには、256 words しかない特別な記憶ブロックを用いるので、2種類の制御系をそこに同時に構築できない。そこで、角度設定時のオブザーバと角速度制御時のオブザーバを打撃動作に応じて切り替えた。

実験は、 $v_h = 2.47[\text{m/sec}]$ となるように ω_a を(4)式より決め、(5)式より求めたハンマー振り上げ角 θ_s を設定して、振動が十分減衰した後 $9[\text{msec}]$ のパルス状の角加速度をハブに与え、対象物を打撃している。最初、レギュレータを効かさないので、 $v_s(t)$ の波形を観測すると Fig. 3(b) のようになった。 $v_s(t)$ は最初ハブの角加速度に

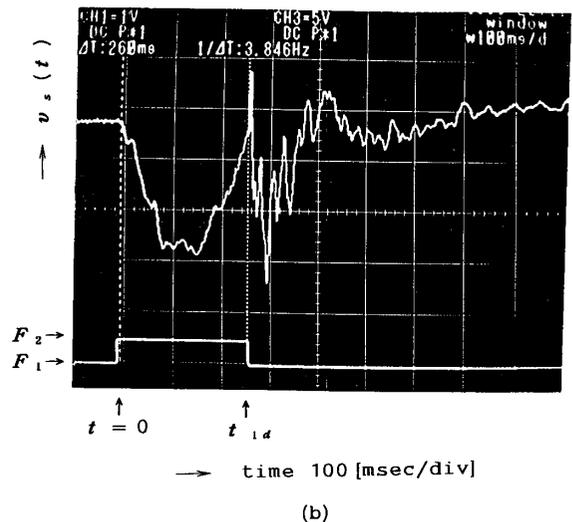
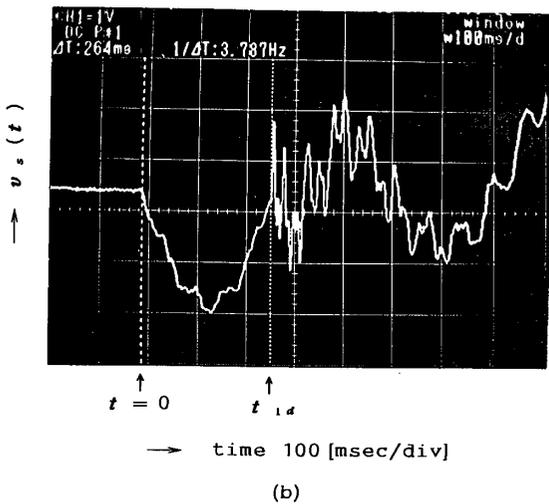
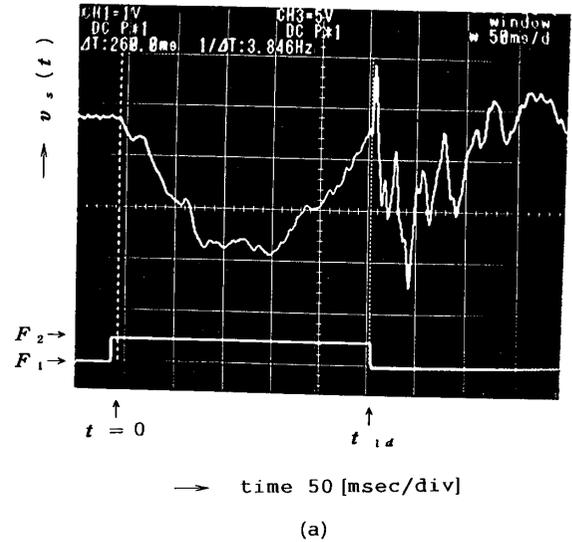
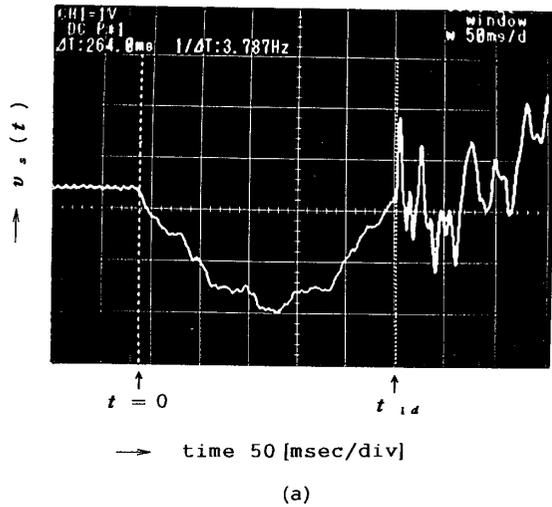


Fig. 3 Strain signal of the flexible link without control

Fig. 4 Strain signal of the flexible link controlled by optimal regulators

よって励振され、1次モード以外に高次モードを含んでいる。 $v_s(t)$ が $t = t_{1d}$ で急激に変化しているの、ハンマーは対象物を打撃していることがわかる。この打撃時の反力によってフレキシブル・リンクはさらに強く励振されている。Fig. 3(a)は、時間軸を変えて、打撃までの様子を拡大している。 $t = t_{1d}$ において2, 3次モード成分が残っているの、ハンマー頭部は対象物をフラットに打撃できていない。

つぎに、レギュレータを作用させて、 $0 < t \leq t_{1d}$ ではフィードバックゲインが F_2 に、 $t > t_{1d}$ では F_1 になるように切り替えて同様な実験をした。そのときの $v_s(t)$ の波形をFig. 4に示す。この図の下部の2値波形はフィードバックゲインの状態を表している。(a)からわかるように $0 < t \leq t_{1d}$ ではフィードバックゲインは F_2 となっていて、これによって加速時 $t = 0$ に発生させられた2, 3次モード成分は打撃時の $t = t_{1d}$ 付近ではかなり減衰させられていることがわかる。DSPは打撃による $v_s(t)$ の急激な変化を感知して、フィードバックゲインとオブザーバを瞬時に切り替えている。新しい F_2 によって、1次モードを含むすべての振動成分が抑制されていることがFig. 4(b)からわかる。この方法を繰り返すことによって、サイクルの短い打撃動作が可能になる。

5. あとがき

フレキシブル・リンクを用いた打撃ロボットを実現するために周波数特性をもった最適レギュレータでリンクの振動を制御した。フレキシブル・リンクは3次までモデル化され、4次以上の残余モードを抑制するために従来より高次の前置フィルタを用いた。打撃前のハンマー振り上げ時には振動の全てのモードを、打撃中は1次モードを除く高次モードを抑制させる必要があったので、これに応じて前置フィルタの周波数特性も低域通過特性と帯域通過特性をもたせた。これにともなって異なる2種類のオブザーバ付きの最適レギュレータを設計し、デジタルシグナルプロセッサ上に構築して、打撃動作過程

に応じて切れ換えて使用した。これによって、フレキシブル・リンク・ハンマーの振動制御が実現できて、効果的な打撃動作が可能になった。

参考文献

- 1) 坂和, 松野: フレキシブル・アームのモデリングと制御, 計測と制御, 25 -1, 64/70(1986)
- 2) 羅, 坂和: フレキシブルアームの曲げ・ねじり連成振動の制御実験, 計測自動制御学会論文集, 27 -4, 422/428(1991)
- 3) D. Wang, M. Vidyasagar: Control of a Class of Manipulators with a Single Flexible Link - Part II: Observer-Controller Stabilization, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 113, 662/668(1991)
- 4) 木田, 池田, 山口: 高域遮断特性をもたせた最適レギュレータとその大型宇宙構造物の制御への応用, 計測自動制御学会論文集, 25 -4, 448/454(1989)
- 5) 木田, 山口, 池田: 大型宇宙構造物の姿勢制御実験 - LQRのループ成形機能によるロバスト安定化, 計測自動制御学会論文集, 28 -1, 107/115(1992)
- 6) 藤森, 大島: 周波数依存重みを用いたLQG制御系の設計, 計測自動制御学会論文集, 29 -5, 547/554(1993)
- 7) 泉, 日高: フレキシブル・リンクを用いる打撃ロボットのための打撃速度と角度の制御, 日本ロボット学会誌, 11 -3, pp. 436/443(1993)
- 8) H. H. Pan: Transverse Vibration of an Euler Beam Carrying a System of Heavy Bodies, ASME Journal of Applied Mechanics, Ser. E, 32, 434/437(1965)
- 9) 泉, 日高: フレキシブル・リンク・ハンマーの打撃速度ベクトルの検討と釘打ちロボットへの応用, 日本ロボット学会誌, 12 -1, pp. 99/104(1994)

(平成8年9月24日受理)