スムーズインパクト駆動機構(SIDM)の開発(第2報)*

—駆動電圧波形の最適化—

吉田 龍一** 岡本 泰弘** 岡田 浩幸***

Development of Smooth Impact Drive Mechanism (2nd Report)
—Optimization of waveform of driving voltage—

Ryuichi YOSHIDA, Yasuhiro OKAMOTO and Hiroyuki OKADA

The piezoelectric element has high positioning resolution although it suffers from the problem of a rather small displacement range. The proposed actuator can achieve both a high positioning resolution and a long stroke. This mechanism is modified the construction of Impact Drive Mechanism(IDM), and is named Smooth Impact Drive Mechanism(SIDM) because of the smooth movement. To drive SIDM, the piezoelectric element is expanded slowly, and is contracted rapidly. The waveform of displacement of piezoelectric element is saw-tooth. To generate saw-tooth displacement, saw-tooth voltage has been supplied. But the saw-tooth voltage is not always best, because transfer function from voltage to displacement in the piezoelectric element is not flat. It is necessary that the transfer function is considered to optimize waveform of voltage. By simulation it is found that the optimum waveform at 0.7 scale of resonance frequency is similar to rectangular pulse. And it is reported that SIDM can be driven by using the rectangular voltage.

Key words: positioning, piezoelectric element, friction

1. 結 言

近年、携帯電話などのモバイル機器の小型化の流れの中で、使用されるアクチュエータ(駆動機構)にも、小型化、高精度化が望まれ、着実に進歩を遂げてきた。しかし、従来の代表的なアクチュエータである電磁モータでは、今後いっそう進むであろう小型化に十分対応していくことは難しいと考えられる。

これに対し、単純な構成で小型化、高精度化が可能なアクチュエータが様々提案されてきた。その1つとして圧電素子の急速変形と慣性を利用したインパクト駆動機構(IDM)が挙げられる^{2),3)}。我々はこのIDMの構成を基礎とし、よりスムーズな動きが可能なスムーズインパクト駆動機構(SIDM)の開発を進めてきた^{4),5)}。

本報では、SIDMに必要なノコギリ波形の変位を得る最適な電圧波形を解析する。そしてその電圧波形を実現する電気回路を提案し、小型SIDMユニットを駆動した結果について報告する。

2. 駆 動 原 理

図1にSIDMの駆動原理を示す。圧電素子の一端が固定部材に固定され、圧電素子のもう一端には駆動軸が取り付けられる。駆動軸に対し、移動体は摩擦力で保持される。この構成において

- 1) 圧電素子をゆっくり伸ばすと、駆動軸がゆっくりと動く。このとき移動体も駆動軸との間の摩擦により、ゆっくり動く
 - 2) 圧電素子を急速に縮めると、駆動軸も急速に動く。このとき移動体はその慣性のため、滑りを生じほぼその位置にとどまる
- そして1), 2)を繰り返すことで長ストローク駆動が可能となる。この動きを図2に示す。

Fig.1 Principle of SIDM

Fig.2 Displacement of piezo and moving body

駆動周波数が低い場合、圧電素子にノコギリ波形の電圧を印加すれば、ノコギリ波形の変位となり、1), 2)の動作が可能となる。この駆動周波数を高くすれば、SIDMを高速化できる。しかし、高い駆動周波数では、圧電素子の伝達関数の影響で、電圧波形と変位波形は相似ではなくなる。このためノコギリ波形の電圧を印加してもノコギリ波形の変位が得られず、移動体を動かすことができなくなる。SIDMの高速化のため、高い駆動周波数を用いる場合、この圧電素子の伝達関数を考慮した電圧波形の設定が必要となる。

* 原稿受付 平成13年10月5日

** 正会員 ミノルタ(株) (堺市大仙西町3-91)

*** ミノルタ(株)

3. 解析

圧電素子は図3のようにバネ、ダンパー、質量でモデル化される。SIDMはこの圧電素子に駆動軸が結合され、摩擦力を介して移動体が保持される構成となる。SIDMの運動方程式は(1)～(7)となる。

$$F_p = A \cdot V(t) \quad (1)$$

1) 移動体が滑らない時*)

$$F_p = (m_p + m_r + m_m) \ddot{x}_p + c_p \dot{x}_p + k_p x_p \quad (2)$$

$$F_p = (m_p + m_r + m_m) \ddot{x}_m + c_p \dot{x}_m + k_p x_m \quad (3)$$

2) 移動体が滑る時**)

2-1) $\dot{x}_p > \dot{x}_m$ の時

$$F_p = (m_p + m_r) \ddot{x}_p + c_p \dot{x}_p + k_p x_p + F_d \quad (4)$$

$$F_d = m_m \ddot{x}_m \quad (5)$$

2-2) $\dot{x}_p < \dot{x}_m$ の時

$$F_p = (m_p + m_r) \ddot{x}_p + c_p \dot{x}_p + k_p x_p - F_d \quad (6)$$

$$F_d = -m_m \ddot{x}_m \quad (7)$$

*) $\dots (\dot{x}_p = \dot{x}_m) \text{ and } (|\ddot{x}_p| \leq F_s / m_m)$

**) $\dots (\dot{x}_p \neq \dot{x}_m) \text{ or } (|\ddot{x}_p| \geq F_s / m_m)$

F_p : 圧電素子発生力 m_p : 圧電素子端点等価質量
 A : 圧電素子電圧-力係数 m_r : 駆動軸質量
 $V(t)$: 印加電圧 m_m : 移動体質量
 x_p : 圧電素子変位 F_f : 摩擦力
 x_m : 移動体変位 F_d : 動摩擦力
 k_p : 圧電素子スティフネス F_s : 最大静止摩擦力
 c_p : 圧電素子材料粘性

Fig.3 Mechanical Model of SIDM

この運動方程式を解析ソフトで過渡解析することで、移動体の速度を導出できる。そして駆動電圧波形を様々に変えて解析を繰り返せば、電圧波形を最適化できる⁶⁾。しかしこの方法は条件が変わる毎に行わなければならない、実用的とはいえない。そこで本報では、次の仮定のもと最適な駆動電圧波形の理論的導出を試みる。

1) 移動体が常に滑る条件での駆動に限定

2) 摩擦を粘性に置換し、式(4)、(6)を線形方程式の式(8)に近似
 既報^{4),5)}で示したように、高駆動周波数では必然的に常に滑る状態になるため、1)のみの条件で十分と考える。このとき圧電素子の運動方程式は、式(4)、(6)を近似した式(8)を用いる。この線形近似における共振の Q は実験にてらし、 $Q=2.5$ を用いる。

$$F_p = (m_p + m_r) \ddot{x}_p + c_p \dot{x}_p + k_p x_p \quad (8)$$

$$c_p' = \frac{\sqrt{k_p(m_p + m_r)}}{Q} \quad (9)$$

圧電素子の電圧-変位伝達関数 $X_p(s)$ 、共振周波数 f_s は次式となる。

$$X_p(s) = \frac{A}{(m_p + m_r)s^2 + c_p's + k_p} \cdot V(s) \quad s = j\omega = j \cdot 2\pi f \quad (10)$$

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_p}{m_p + m_r}} \quad (11)$$

この伝達関数のゲイン特性を $G(f)$ 、位相特性 $\theta(f)$ とする。

図4にノコギリ電圧を印加したときの圧電素子変位を示す。ここでは電圧波形から変位波形への変換を、次の1)～3)の順序で行う。

1) 印加電圧波形をフーリエ変換後、周波数領域で示す。

(ここでは計算の都合上、 $-\sin x$ を位相基準とする)

図中のノコギリ電圧波形をフーリエ変換すると次式となる。

$$V(t) = -\frac{V_p}{\pi} \left[\frac{\sin(2\pi f_d t)}{1} + \frac{\sin(2 \cdot 2\pi f_d t)}{2} + \frac{\sin(3 \cdot 2\pi f_d t)}{3} + \dots \right] \quad (12)$$

2) 式(10)の圧電素子伝達関数を乗じる。

3) 周波数領域から時間領域へ直し、逆フーリエ変換する。

駆動周波数 f_d が共振周波数 f_s に比べ十分低い($f_d = 0.15f_s$)時、図に示すように変位波形の概形はノコギリ波形となり、共振周波数近傍の高次項の振幅が拡大し、変位波形に重畳する。

SIDM駆動に適した電圧波形を求めるには、変位波形を最適化した後、3→2→1と逆解析し、電圧波形を求めれば良い。

Fig.4 Piezo displacement supplying sawtooth driving voltage at low frequency ($= 0.15f_s$)

3.1 SIDM駆動に適した圧電素子変位波形

SIDMの高速化には駆動周波数 f_d を高くすればよい。しかし f_d が高くと、伝達関数の影響で変位波形中の高次項の成分が小さくなる。そこで「SIDM駆動に適した変位波形」を、次式の2次項までの正弦波の重ね合わせとし、その上で最適化を図る(b, θ は変数)。

$$x_p(t) = -\frac{X_p}{\pi} \left[\frac{\sin(2\pi f_d t)}{1} + \frac{\sin(2 \cdot 2\pi f_d t - \theta)}{b} \right] \quad (13)$$

この圧電素子変位に対し、移動体が式(5)、(7)に従うものとして数値積分法で解析する。図5は $b=4, \theta=0$ の場合の変位、速度である。移動体は常に滑りながら、摩擦力のかかる時間差で加速する。

Fig.5 Displacement and velocity of piezo and moving body

b , θ をパラメータとして、この移動体の定常速度を図6に示す。併せて b , θ が変化した時の変位波形を図中に示す。 b が小さいとコブのような乱れが生じ、大きいと非対称性が低くなる。グラフより次式の $b=4$, $\theta=0$ が正方向駆動時の最適変位波形であるといえる。

Fig.6 Influence of secondary part of waveform

3.2 SIDM駆動に適した電圧波形

式(14)を与える電圧波形は、伝達関数ゲイン特性 $G(f_d)$ 、伝達関数位相特性 $\theta(f_d)$ を用い、式(14)を逆変換すればよい。

$$V(t) = -\frac{X_p}{\pi} \left[\frac{\sin(2\pi f_d t - \theta(f_d))}{G(f_d)} + \frac{\sin(2\pi \cdot 2f_d t - \theta(2f_d))}{4G(2f_d)} \right] \quad (15)$$

式(15)を1次項で規格化する。

$$V(t) = -\frac{X_p}{\pi \cdot G(f_d)} \left[\sin(2\pi f_d t) + G(f_d)' \sin(2\pi \cdot 2f_d t + \theta(f_d)') \right] \quad (16)$$

$$G(f_d)' = \frac{G(2f_d)}{4 \cdot G(f_d)}, \quad \theta(f_d)' = 2 \cdot \theta(f_d) - \theta(2f_d)$$

$G(f_d)'$, $\theta(f_d)'$ の周波数特性を図7に示す。そして、これより求められる「適した電圧波形」の周波数依存性を図8に示す。

Fig.7 Adjustment of gain and phase for sawtooth displacement

Fig.8 Waveform of driving voltage for sawtooth displacement

移動体を負方向に駆動するため必要な変位波形は、図6中の $b=4$, $\theta=\pi$ の波形である。これより求められる「SIDM駆動に適した電圧波形」のうち $f_d=0.70f_s$ の時の波形を図9に示す。

Fig.9 Waveform of driving voltage for sawtooth displacement

3.3 矩形波電圧駆動

図8, 9の $f_d=0.7f_s$ において、左右対称に近い電圧波形でノコギリ変位が得られることから、SIDMを矩形波電圧で駆動可能と考えられる。振幅が V_d 、デューティ比 Du の矩形波をフーリエ変換し、同様に1次項で規格化すると次式となる。

$$V(t) = -V_d \cdot \frac{2}{\pi} \left[\frac{\sin(\pi Du)}{1} \sin(2\pi f_d t) + \frac{\sin(2\pi Du)}{2} \sin\left(2 \cdot 2\pi f_d t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{\sin(3\pi Du)}{3} \sin(3 \cdot 2\pi f_d t + \pi) + \dots \right] \quad (17)$$

$$= -V_d \cdot \frac{2\sin(\pi Du)}{\pi} \left[\frac{\sin(2\pi f_d t) + \cos(\pi Du) \sin\left(2 \cdot 2\pi f_d t + \frac{\pi}{2}\right)}{1} + \frac{\sin(3\pi Du)}{3\sin(2\pi Du)} \sin(3 \cdot 2\pi f_d t + \pi) + \dots \right]$$

式(17)より、矩形波形中の2次項の位相ずれは $\pi/2$ と一定で、その大きさは $\cos(\pi Du)$ とデューティ比 Du に依存する。これに対し「SIDM駆動に適した電圧波形」で $\theta(f_d)' = \pi/2$ となるのは、図7より $f_d=0.7f_s$ 付近で、この時 $G(f_d)' = 0.48$ となる。よって両波形の2次項が一致する条件は、 $\cos(\pi Du) = 0.48$ であり、 $Du = 0.34$ が得られる。

この $f_d=0.7f_s$, $Du=0.34$ の条件で、電圧波形から変位波形への変換を図10に示す。伝達関数の位相遅れにより、矩形波形の1次項と2次項の位相差 ($=\pi/2$) は、変位波形では0となる(ただし1次項で規格化後)。1次項と2次項の大きさの比も変位波形では、式(14)で示した4となる。そして矩形波形の3次項以降は、ゲインが低下し、変位波形にほとんど寄与しない。これらの結果、矩形波形電圧によりノコギリ波形変位が得られると推測できる。

Fig.10 Piezo displacement supplying rectangular pulse voltage at high frequency ($= f_s \times 0.7$)

4. 試 作

4.1 駆動ユニットの試作

図11にSIDMの原理を用い、試作した駆動ユニットを示す。外形が $\phi 2 \times 10\text{mm}$ で、移動体のストロークは3.5mmである。

圧電素子の両端に、駆動軸と固定部をエポキシ系接着剤で接着し、駆動軸に移動体を摩擦保持する。この摩擦力発生のため、移動体に割りの入った貫通穴を設け、駆動軸の径をこの穴より少し太くすることで割り部を弾性変形させている。このとき穴径を変えて、摩擦力が300, 500, 700mNの移動体を用意した。

表1に各部品の寸法等、表2に使用する圧電素子の特性を示す。

圧電素子の振動をできるだけ駆動軸側で発生させるためには、固定部は重い方が望ましい。そこで固定部の材料には、密度の大きなタングステンをを用いている。

また駆動軸は軽く高剛性が望ましいため、カーボン繊維強化複合樹脂を用いている。この駆動軸には移動体の回り止めのためDカットを施し、抜け止めのため先端に接着剤を盛り、凸部を設けている。

図12に圧電素子の電圧-変位特性を示す。測定には分解能が、0.1nmの表面粗さ計（日本真空、DECTAK3ST）を用いた。この圧電素子は圧電横効果を利用する構造であり、変位係数は負となる。-3 ~ +3Vの電圧印加で70nm_{p-p}の変位を示すことが分かる。

Fig.11 Oblique view of fabricated unit

Table.1 Characteristics of the parts

	Dimensions mm	Mass mg	Material	E 10^9N/m^2	ρ kg/m^3
Piezo	$\phi 1.2 \times 2.5$	35	PZT	50	7.9
Base	$\phi 2 \times 2$	120	Tungsten	362	19.1
Driving rod	$\phi 1 \times 5.5$	6	Carbon fiber	120	1.6
Moving body	$2 \times 2 \times 2$	39	Phosphor bronze	104	8.6

Table.2 Characteristics of the used piezo

Resonance frequency of free mode	f_{s0}	540kHz
Electric capacitance	C_0	30nF

Fig.12 Voltage vs. Displacement at used piezoelectric element

4.2 駆動回路の試作

SIDMの応用を考える場合、駆動回路は小型で安価でなければならない。

ノコギリ電圧で駆動する場合、図13(a)のように波形発生器とアンプの組み合わせが考えられるが、この回路は大きく高価なものとなる。これに対し矩形波電圧を圧電素子に印加する場合、図13(b)のようにスイッチング素子だけでよい。さらに図13(c)のようにスイッチを構成すれば、分極と逆方向への電界印加も使うことができ、電源電圧印加の2倍の伸縮を取り出すことができる（ただし逆電圧の印加は分極反転電界以下での使用に限られる）。

図14(a)に実験に使用した回路を示す。これは直流モータの正逆転に用いられるHブリッジ回路であり、4個のFETより構成される。この回路を用いて圧電素子に矩形波電圧を印加する。

FETへはch1, ch2のデジタル信号が入力される。図14(b)にそのタイミングチャートと印加される電圧を示す。この電圧値は圧電素子の一方の電極からもう一方の電極を見た値である。

Fig.13 Electrical circuit for driving SIDM

Fig.14 H bridge circuit and timing chart

5. 実 験

SIDMの駆動特性は解析でも示したようにその共振周波数に依存する。そこで正弦波形の電圧を印加し、周波数を30~550kHzの範囲でスイープさせながら、駆動軸先端変位を測定し、共振周波数を求めた。図15に測定方法を示す。レーザードップラー振動計（Polytec社、OFV501）で振動速度を測定し、それより振動振幅を算出している。また図18,19に示す駆動軸、移動体の変位もレーザードップラー振動計を使用し測定した。

Fig.15 Measurement of displacement

図16, 図17に周波数-変位特性を示す。図18は重り, 圧電素子, 駆動軸だけで測定した特性, 図19は移動体が摩擦保持された状態で測定した特性である(摩擦力300mNの移動体使用)。

図16より, 共振周波数 f_s は206kHz, 共振のQは約20である。そしてこれらは印加電圧の大小にあまり依存しない。

図17より, 摩擦がある場合は, 電圧に対し非線形な特性を示す。電圧が低い時, 図16の摩擦のない状態に対し, 共振周波数は高くなり, Qは低い。そして電圧を高くするにつれ, 共振周波数, Qともに, 摩擦のない場合に近づくことが分かる。

Fig.16 Resonance frequency of unit with no friction

Fig.17 Resonance frequency of unit with friction

図18にデューティ比0.7で, 駆動周波数を50, 100, 150kHzの矩形波電圧波形を印加したときの駆動軸先端変位を示す。ここで圧電素子が負の変位係数を持つため, 正, 負方向駆動に対するデューティ比の考え方を先に示した解析時と逆にする必要がある。

駆動周波数が50kHzの場合, 変位波形の概形は矩形波形を保ち, それに高次振動が重畳したものとなっている。

Fig.18 Piezo displacement supplying rectangular pulse voltage

しかし, 駆動周波数が高くなるにつれて, 矩形変位波形は変わっていき, 駆動周波数が共振周波数の0.7倍付近の150kHzの場合, 解析で示したように変位波形はノコギリ波形となることがわかる。ただその波形は解析の波形に比べ, 尖りのあるノコギリ波形である。これは解析では圧電素子の1次共振しか考慮していないが, 実際には高次共振があり, その影響と考えられる。

図19に駆動周波数150kHz, デューティ比0.7の電圧波形を加えたときの駆動軸先端の変位, 移動体の変位の過渡特性を示す。ここに示す電圧波形は, 圧電素子の一方の電極からもう一方の電極を見たものであり, 図14の回路を用いることで電源電圧は3Vでも, 実質的に6V_{p-p}の電圧が印加されることがわかる。

駆動軸は矩形波電圧を重ねるごとに, 変位がノコギリ波形に近づいていく。そして移動体は, 徐々に加速しながら動いていくことがわかる。

Fig.19 Driving Voltage and displacement

図20に矩形波形の電圧で動かした時の駆動周波数-移動体速度特性を示す。速度は3.5mmのストローク内での平均速度である。

駆動周波数40~60kHzではデューティ比0.9, 60~110kHzではデューティ比0.8, 120~140kHzではデューティ比0.7で高速度となる。そして駆動周波数148kHz, デューティ比0.7で, 最高速度14.7mm/sを得る。駆動周波数110kHzの速度の落ち込みは矩形波中の2次項が共振と重なり, 変位波形が乱れるためと考えられる。

実用的には, 150kHz付近にある共振周波数の0.7倍付近のピークで駆動するのが適当といえる。そしてこのピークはブロードであるため, 温度, 負荷変動によるピーク位置変動を考慮した場合でも, 固定した駆動周波数で使用できることを確認している。このことから超音波モータのように, 共振を追尾するような特殊な回路を必要とせず, 図14に示す回路のままで実用化できると考えられる。

Fig.20 Influence of driving frequency

図21にデューティ比-速度特性を示す。デューティ比が0.5未満の時、負の速度となり、デューティ比が0.5より大きくなると正の速度となる。その境界部には不感帯が存在する。そして負の方向ではデューティ比0.325の時、正の方向ではデューティ比0.675の時、最も速くなる。この結果より、SIDMの速度をデューティ比で制御することも可能といえる。

Fig.21 Influence of duty ratio

図22に電圧-速度特性を示す。電圧は圧電素子両端間のもので電源電圧は、この1/2である。

摩擦力が300mNの場合、電圧4.0Vppから移動体が動き始め、摩擦力が500mN、700mNと高くなるに従い、このしきい値となる電圧が高くなる。このしきい値が存在するのは、電圧が低いと圧電素子の発生力が不足して、摩擦部に滑りを生じさせることができないためと考えられる。

Fig.22 Influence of driving voltage

図23に負荷-速度特性を示す。負荷は重量負荷として移動体に重りを取り付け持ち上げる方法で与えた。

負荷をかけると速度は直線的に落ちていく。摩擦力が300mNの場合65mNの負荷まで動作可能である。摩擦力が500mNの場合、無負荷時速度は低くなるものの、推力は大きくなり95mNまで動作可能である。さらに摩擦力を700mNと高くすると、無負荷時速度だけでなく、推力も低下する。

図22、23の結果より、速度、推力それぞれに対し最適摩擦力が存在し、この最適摩擦力は駆動電圧とともに変化すると考えられる。

Fig.23 Influence of load

図24にSIDMユニットを用い、2gの重りを持ち上げている写真を示す。大きさを比較するため、1円硬貨の上に載せている。このようにモーメントがかかった状態でも問題なく動かすことができる。

この時、移動体質量も合わせた負荷は24mNであり、図23より上方向速度は、無負荷時に比べ約10%低下する。

Fig.24 Photography of SIDM unit

6. 結 言

圧電素子をノコギリ波形で変位させ移動体を動かす駆動機構、SIDMにおいて、ノコギリ変位を得る電圧波形を解析により最適化し、これを実験で確認した。主な結論を以下にまとめる。

- (1) 圧電素子の運動方程式を線形に近似し、ノコギリ変位を得る電圧波形が共振周波数 f_s 、駆動周波数 f_d に依存することを明らかにした。
- (2) $f_d = 0.7 f_s$ 付近では、矩形波電圧でノコギリ変位が得られ、SIDMを駆動でき、矩形波のデューティ比 Du を0.3と0.7の間で変えることにより、移動方向も制御できることを明らかにした。
- (3) 矩形波電圧を実現する実用的な回路として、Hブリッジ回路を提案し、実質的に電源電圧の2倍の電圧を利用可能であることを実験により確認した。
- (4) SIDMを試作し、摩擦負荷時の共振周波数、変位を調べ、共振周波数が電圧に依存するなど非線形な現象はあるものの、矩形波電圧でノコギリ変位が得られることを実験的に確認した。
- (5) SIDMを矩形波電圧で駆動し、駆動周波数150kHz、デューティ比0.7、電源電圧3V、摩擦力300mNの条件で、最大速度14.3mm/sと最大推力65mNを得た。

今後は、固定部の質量、駆動軸の弾性、2次共振を考慮した解析を行い、さらなる性能向上を図りたいと考える。

参 考 文 献

- 1) 高森 年:ミリマシンのためのアクチュエータ技術, 精密工学会誌, 60, 3 (1994) 333.
- 2) 樋口俊郎, 渡辺正浩, 工藤謙一: 圧電素子の急速変形を利用した超精密位置決め機構, 精密工学会誌, 54, 11 (1988) 2107.
- 3) 樋口俊郎, 古谷克司, 山形 豊, 工藤謙一, 小川 優: 摩擦制御によるインパクト駆動機構の高速化, 精密工学会誌, 58, 8 (1992) 1327.
- 4) 吉田龍一, 岡本泰弘, 樋口俊郎, 浜松 玲: スミーズインパクト駆動機構 (SIDM) の開発 - 駆動機構の提案と基本特性 -, 精密工学会誌, 65, 1 (1999) 111.
- 5) 岡本泰弘, 吉田龍一: 圧電リニアアクチュエータの開発, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J80-A No. 10 (1997) 1751.
- 6) 浜松 玲, 樋口俊郎, 吉田龍一, 岡本泰弘: スミーズインパクト駆動機構 (SIDM) の開発 (第4報) - 自走式タイプの解析 -, 1997年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1997) 356.