[JSPE-58-06
'92-06-973]

開発論文

デュアルバイブレータを用いた移送アクチュエータの開発*

小田高広**　青柳誠司***　神谷好承***　岡部佐規一***

Development of the Sheet Feeding Mechanism Using Two Sets of Ultrasonic Vibration Actuators

Takahiro ODA, Seiji AOYAGI, Yoshitugu KAMIYA and Sakiichi OKABE

This study describes the development of the sheet feeding mechanism using ultrasonic vibration actuator. It consists of a driving rotor, a sub-rotor, and two sets of piezoelectoric vibrators, which is called the dual vibrator in this paper. That vibrator generates the mode of bending vibration. Driving rotor is rotated by the ultrasonic vibration of the dual vibrator. The driving frequency and amplitude of one vibrator is different from that of the other. In this paper, the motion of driving rotor is analyzed theoretically, and it is confirmed that its rotor can be rotated in the clockwise or counterclockwise direction. As a result of fundamental experiments, it was proved that telephone card could be fed easily, and flat and compact sheet feeding mechanism could be obtained.

Key words: sheet feeding, ultrasonic vibration, piezoelectoric ceramics

1．緒　言

超音波モータは構造が簡単で，単位重量当たりの出力トルクが電磁式アクチュエータに比べて大きくできる．そのため，駆動系の小型・軽量化にとって非常に有効であり，様々な分野への応用が検討されている．その一例として，情報機器ではカードの搬送に直接応用するといった研究が早くから報告されている[1)2)]．

モータとしての使用に際しては，多くの場合，ロータ（回転体）の正逆方向への回転が必要とされる．進行波型モータ[3)]では，合成する２つの振動の位相差を電気的に調節することで進行波の振動方向が制御できるため正逆回転が容易に可能である．一方，定在波型モータ[4)]では，原理上振動方向の制御が困難であるため振動子自身の工夫が必要である．よって，実用されている超音波モータのほとんどは前者の方式である．しかし，モータの効率面では[5)]，定在波型が80％程度可能であるのに対し，進行波型では50％程度というように定在波型の方が高効率であること，さらに振動子の設計が比較的容易であることなどから，現在でも定在波型モータの研究は行われている．

本研究では，定在波型モータの正逆回転を容易に可能とすることで，駆動系をコンパクト化したカード搬送装置の開発を目的とする．実際に試作した移送アクチュエータでは，超音波振動子を駆動ロータを中心に左右対称に配置する最も基本的な構成を採用し[6)]，ここでは，２つの超音波振動子の駆動振動数比と振幅比を制御して，駆動ロータを効率よく正逆回転させる方法を新たに考案した．本論文では，この駆動方法について，２つの超音波振動子と駆動ロータとの接触関係を考慮した運動方程式を導出することで，駆動ロータの回転特性を数式的に明らかにした．また，試作した移送アクチュエータに本方式を用いたところ，実験結果は理論特性と比較的よく一致したので，これらについて報告する．

2．駆動メカニズム

2．1　基本構成

図1に移送アクチュエータの駆動原理を示す．駆動ロータは，補助ロータと一体に構成されて，予圧 F_C により２つの超音波振動子１，２に押し付けられている．超音波振動子１，２が駆動ロータと接触する点を Q_1，Q_2とし，無振動時において，それらと駆動ロー

* 原稿受付 平成3年10月3日
** 正会員 沖電気工業㈱（八王子市東浅川町550-5）
*** 正会員 金沢大学工学部（金沢市小立野2-40-20）

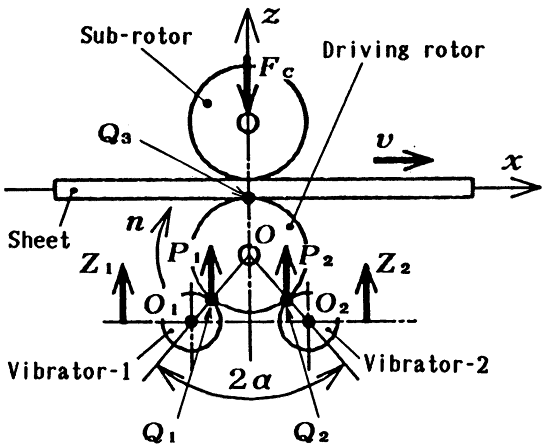


Fig. 1 Driving mechanism of an actuator

タの重心Oとがなす角度を2αとする．このとき，駆動ロータは超音波振動子1，2からの力P_1, P_2により重心Oを中心とする回転運動（**図1**では時計方向を正とする）を行う．なお，カードは，駆動ロータと補助ローラとの間で挟まれ，接触点Q_3で駆動ロータから受ける摩擦力により，x方向に移送される．

2．2 運動形態

駆動ロータの回転力として，超音波振動子1，2からの力P_1，P_2により駆動ロータの接線方向に発生する摩擦力を用いている．そのため，駆動ロータと超音波振動子1，2との接触状態が重要となり，両者間の相対運動を考慮する必要がある．

いま，**図1**において，超音波振動子1，2が点O_1, O_2を中立点としてz方向に，振幅がU_1, U_2，駆動角振動数がω_1, ω_2で振動すると，接触点Q_1, Q_2の運動は，

$$Z_i = U_i \sin\omega_i t \qquad (i=1, 2) \qquad (1)$$

で表される．ここでは，ω_1, ω_2の値として超音波領域を使用するため，超音波振動子と駆動ロータとの加速度の差が大きくなり，z方向では，両者の間で接触と分離が生じる．このとき，一般に，分離した物体が再び接触する場合，一種の衝突現象が生じる[7)~9)]．しかし，本機構では駆動ロータの質量が超音波振動子の質量と比べ十分大きく，しかも両者の接触時間が非常に短いことから反発しないと考えられる．よって，超音波振動子1，2と駆動ロータとのz方向の運動は，接触と分離を定常的に繰り返す運動といえる．

一方，接触点Q_1，Q_2における駆動ロータの接線方向では，超音波振動子と駆動ロータとの速度の差から滑りが生じる．よって，接線方向の運動では，滑りによる損失を考慮する必要がある[10) 11)]．このとき，超音波振動子1，2の表面速度v_1, v_2は，式(1)と接触角度2αより，次式(2)で表される．

$$v_i = \omega_i U_i \sin\alpha \cos\omega_i t \qquad (i=1, 2) \qquad (2)$$

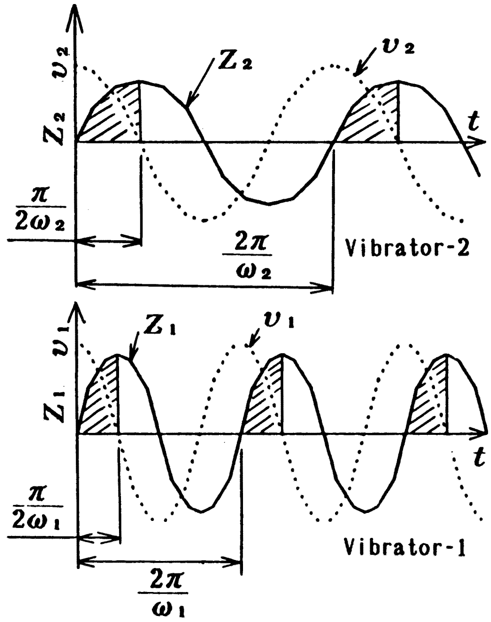


Fig. 2 Motion of two sets of vibrators

3．駆動ロータの運動解析

3．1 平均押付力と平均表面速度の導出

図2に超音波振動子1，2の運動を示す．このとき，駆動ロータは超音波振動子1，2との加速度の差から，$Z_i \geqq 0$かつ$v_i \geqq 0$のときに超音波振動子iと接触し（図中の斜線で囲まれた領域），それ以外では分離すると考えられる．

同図の接触区間において，力P_1，P_2がz方向で生じる振動子の変形量で近似できるとすると，

$$P_i = \kappa_i U_i \sin\omega_i t \qquad (i=1, 2) \qquad (3)$$

と表される．ここで，κ_1, κ_2は超音波振動子1，2のz方向の曲げ剛性である．

ここで，式(2)，(3)で表されるv_iとP_iとは，超音波領域の角振動数ω_iで変化するため，マクロ的にみると，その変動が平均化されたようになる．よって，v_iの変動をその接触時間で平均化したものを平均表面速度$\overline{v_i}$，P_iの変動をその接触時間で平均化したものを平均押付力$\overline{P_i}$とすると，それぞれ以下のようになる．

$$\overline{v_i}=\frac{\omega_i}{2\pi}\int_0^{\pi/(2\omega_i)}\omega_i U_i \sin\alpha\cos\omega_i t\,dt=\frac{\omega_i U_i\sin\alpha}{2\pi} \tag{4}$$

$$\overline{P_i}=\frac{\omega_i}{2\pi}\int_0^{\pi/(2\omega_i)}\kappa_i U_i \sin\omega_i t\,dt=\frac{\kappa_i U_i}{2\pi} \tag{5}$$

3．2 駆動ロータの運動方程式の導出

接触点Q_1，Q_2において，駆動ロータが超音波振動子iより受ける回転力をF_{Mi}とする．このとき，超音波振動子iが$\overline{v_i}\pi/(2\omega_i)$だけ滑る間の仕事量と滑りによる損失量との関係を，

$$\frac{F_{Mi}\overline{v_i}\pi}{2\omega_i}=\frac{(e_{1i}-e_{2i})\overline{v_i}\pi}{2\omega_i} \tag{6}$$

として，回転力F_{Mi}を，

$$F_{Mi}=e_{1i}-e_{2i}=\varepsilon e_{1i} \tag{7}$$

で表す．ここで，$(e_{1i}-e_{2i})$は単位距離を滑るときの損失量，e_{1i}は超音波振動子iから駆動ロータへ，e_{2i}は駆動ロータから超音波振動子iへそれぞれ与えられる単位距離当たりの仕事量である．εは損失を表す係数で，接触点Q_1, Q_2で同じとする．

図1で駆動ロータが角速度ωで時計方向に回転すると，接触点Q_1, Q_2の滑り速度はそれぞれ$(v_1-R\omega)$と$(-v_2+R\omega)$となり，仕事量e_{1i}は，

$$e_{1i}=\pm\frac{\mu\overline{P_i}(\overline{v_i}-R\omega)\cos\alpha}{\overline{v_i}} \tag{8}$$

で表される．複号は同順で，$i=1$のとき上，$i=2$のとき下をとる．なお，μは滑り摩擦係数であり，滑り速度によらず一定とする．ゆえに，回転力F_{Mi}は式(7)に式(4), (5), (8)を代入することで，次式(9)で表される．

$$F_{Mi}=\frac{\pm\varepsilon\mu\kappa_i U_i\cos\alpha}{2\pi}\left(1-\frac{2\pi R\omega}{\omega_i U_i\sin\alpha}\right) \tag{9}$$

ただし，$\omega=d\theta/dt$

なお，駆動ロータの回転時間tは超音波振動子の周期に比べ十分大きく次の関係が成り立つ．

$$t=2\pi n_1/\omega_1=2\pi n_2/\omega_2 \tag{10}$$

式(9)より，駆動ロータの運動方程式は次式(11)で表される．

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2}=R(F_{M1}+F_{M2}) \tag{11}$$

ただし，$J=MR^2/2$

ここで，Mは駆動ロータの質量，Rは駆動ロータの半径である．

3．3 回転数及び送り速度の導出

式(11)を，初期条件($t=0$のとき，$\theta=d\theta/dt=0$)で解くと，駆動ロータの角速度ωは，

$$\omega=\frac{\omega_2 U_2\left(\frac{U_1}{U_2}-\frac{\kappa_2}{\kappa_1}\right)\sin\alpha}{2\pi R\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}-\frac{\kappa_2}{\kappa_1}\right)} \tag{12}$$

となる．このとき，駆動ロータの回転数nは$n=60\omega/(2\pi)$で求められるため式(12)より次式で表される．

$$n=\frac{15\omega_2 U_2\left(\frac{U_1}{U_2}-\frac{\kappa_2}{\kappa_1}\right)\sin\alpha}{\pi^2 R\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}-\frac{\kappa_2}{\kappa_1}\right)} \tag{13}$$

一方，カードの送り速度については，駆動ロータとカードとの間の滑りを考慮して，駆動ロータの回転数nと同様に解析する．まず，x方向の滑り速度は，式(12)より駆動ロータの表面速度が$v_R=R\omega$となるため，(v_R-v)となる．よって，カードが駆動ロータから受ける押付力を$F_C=\overline{P_1}+\overline{P_2}$とすると，カードの$x$方向(**図1**の右方向)の運動方程式は，

$$m_P\frac{d^2X}{dt^2}=\varepsilon_P\mu_P F_C\left(1-\frac{v}{v_R}\right) \tag{14}$$

ただし，$v=dX/dt$

となる．ここで，μ_Pは駆動ロータとカードとの間の滑り摩擦係数，ε_Pは損失を表す係数である．

式(14)を，初期条件($t=0$のとき，$X=dX/dt=0$)で解くと，送り速度は$v=R\omega$となり，式(12)を代入することで，

$$v=\frac{\omega_2 U_2\left(\frac{U_1}{U_2}-\frac{\kappa_2}{\kappa_1}\right)\sin\alpha}{2\pi\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}-\frac{\kappa_2}{\kappa_1}\right)} \tag{15}$$

で表される．

このとき，式(13), (15)を次式(16)のように展開すると，回転数n及び送り速度vは関数$f(U_1/U_2)$で評価できる．

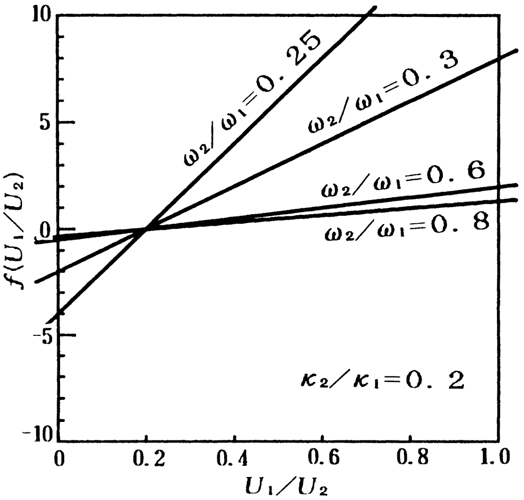


Fig. 3 Relation between $f(U_1/U_2)$, U_1/U_2 and ω_2/ω_1

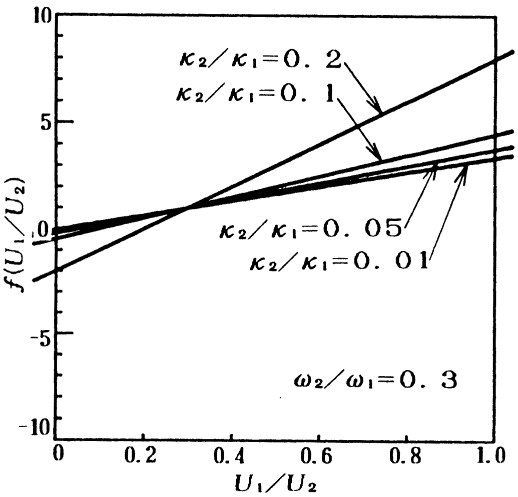


Fig. 4 Relation between $f(U_1/U_2)$, U_1/U_2 and κ_2/κ_1

$$f\left(\frac{U_1}{U_2}\right)=\frac{n}{\dfrac{15\omega_2U_2\sin\alpha}{\pi^2R}}=\frac{v}{\dfrac{\omega_2U_2\sin\alpha}{2\pi}}$$

$$=\frac{U_1/U_2-\kappa_2/\kappa_1}{\omega_2/\omega_1-\kappa_2/\kappa_1} \tag{16}$$

なお，駆動ロータの回転方向あるいは媒体の搬送方向を考慮した場合に，$U_1/U_2\to+\infty$に対して$f(U_1/U_2)\to+\infty$となり，しかも$f(U_1/U_2)$の符号が変化しないことが望ましい．ただし，ω_2/ω_1とκ_2/κ_1との関係は**図9**からわかるように，$0<\omega_2/\omega_1<1$のとき，$0<\kappa_2/\kappa_1<1$となる．

図3，**4**に$0<\omega_2/\omega_1<1$かつ$0<\kappa_2/\kappa_1<1$のときのU_1/U_2と$f(U_1/U_2)$との関係を示す．両図とも，$U_1/U_2\to+\infty$に対して，$f(U_1/U_2)\to+\infty$となることがわかる．グラフの傾きは，$(\omega_2/\omega_1-\kappa_2/\kappa_1)$の逆数の大きさに比例して大きくなり，$U_1/U_2=\kappa_2/\kappa_1$のとき，$f(U_1/U_2)=0$となる．

以上より，$U_1/U_2\to+\infty$ に対して，駆動ロータが安定して回転する駆動条件は，

$0<\omega_2/\omega_1<1$, $U_1/U_2\geqq\kappa_2/\kappa_1$, $0<\kappa_2/\kappa_1<1$

となる．このとき，駆動ロータの回転方向は**図1**の正方向であり，カードの搬送方向はxの正方向である．

なお，駆動ロータの回転方向あるいはカードの搬送方向は，上記の条件を超音波振動子1，2で切り替えて入力することで可能となる．

4．試作による駆動特性の基礎的実験

4．1 実験装置

図5に試作した移送アクチュエータの主要部分を示す．このとき，超音波振動子1，2内で出力部を2つ設計し，駆動ロータと補助ロータとをそれぞれに設置した．なお，接触角度2αを$\pi/2$とした．また，図のように接着した圧電素子1により超音波振動子1，2を励振し，振動状態を圧電素子2により検出した．

超音波振動子1，2の試作では，前節の正逆回転の原理より，駆動特性を同一にする必要がある．よって両者の形状と寸法を同一とした．また，使用する駆動

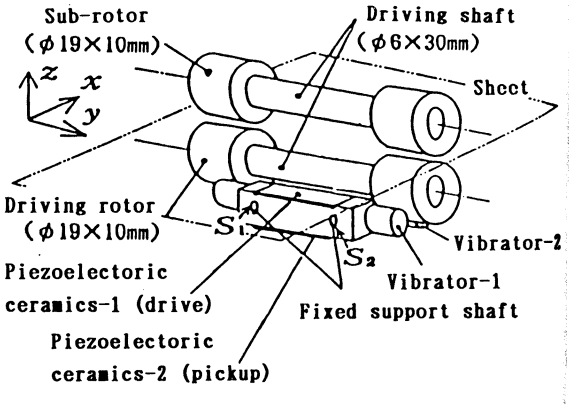
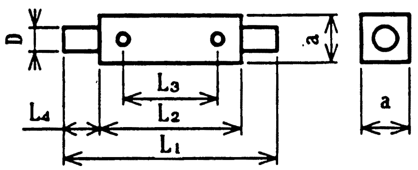
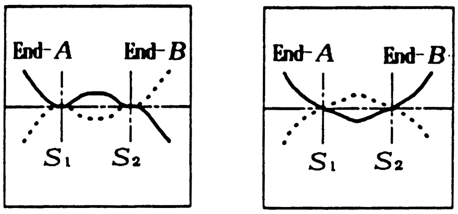


Fig. 5 Schematic diagram of a trial-made sheet feeding actuator



L_1=42, L_2=30, L_3=16.6, L_4=6, D=3, a=5　Unit: mm

Fig. 6　Design of a trial-made vibrator



$\omega_1=2\pi\times3.64\times10^4$ rad/s　(a)　　$\omega_2=2\pi\times1.32\times10^4$ rad/s　(b)

Fig. 7　Vibration mode of a trial-made vibrator

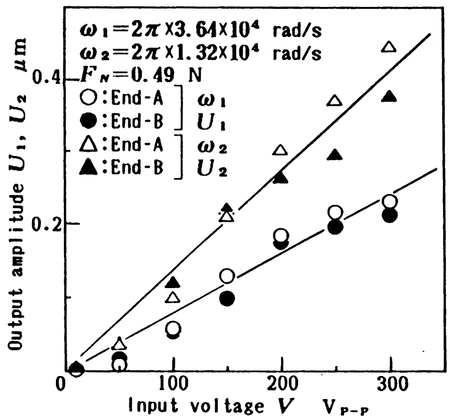


Fig. 8　Relation between input voltage V and output amplitude U_1, U_2

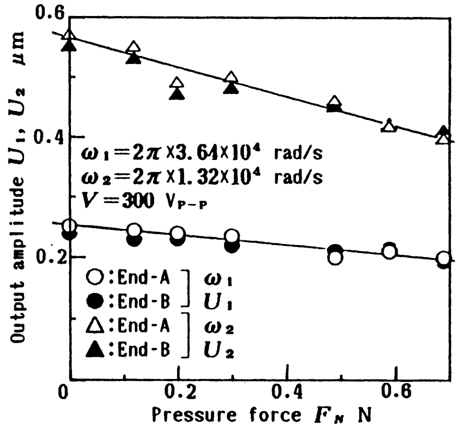


Fig. 9　Relation between pressure force F_N and output amplitude U_1, U_2

角振動数として，振幅との関係より，10kHzから40kHzの範囲にある共振周波数を２つ選択し，超音波振動子１，２の駆動角振動数ω_1, ω_2($\omega_1>\omega_2$)とした．ここで，**図６**に示す超音波振動子の寸法比（D/a, L_4/L_2)を変化させたところ，設計上両者の比は，$1.5<\omega_1/\omega_2<3$の範囲内にあったため，ω_1/ω_2が最大になる寸法で試作した．**図６**にそのときの寸法値を示す．なお，材質は黄銅で，質量は1.77×10^{-3}kgである．**図７**に使用した共振モードを示す．ここで，**図７(a)**の端部A, Bで位相差があるが，これは超音波領域の角振動数で生じるため，駆動ロータの回転数及びカードの送り速度の評価では本質的な問題とならない．また，圧電素子１，２として，分極が厚み方向で，厚さ1mm，幅5mm，長さ16.7mmの単板型圧電素子を用いた．

図８に試作した超音波振動子の入力電圧－振幅特性を示す．このとき，光学式変位計を用いて端部A，Bの振幅を測定した．なお，図中の直線は，測定値から一次近似したものである．これより，ω_1, ω_2の場合とも入力電圧に比例して，振幅が増加することがわかる．**図９**に試作した超音波振動子の負荷力－振幅特性を示す．測定値から近似した直線の傾きより，ω_1のときの曲げ剛性κ_1を1.38×10^7N/m，ω_2のときの曲げ剛性κ_2を3.97×10^6N/m，とそれぞれ求めた．

４．２　振幅比－回転数特性

図１０に試作した移送アクチュエータの振幅比－回転数特性（正回転）を示す．このときの駆動条件を図中に示す．これより，回転数nは振幅比U_1/U_2に比例して増加することがわかる．なお，超音波振動子１を36.4kHz，超音波振動子２を13.2kHzで振動させたとき駆動ロータは正回転し，この駆動振動数を入れ替えて振動させたときは逆回転した．また，回転数特性の比較として，どちらか一方の超音波振動子のみで駆動ロータを回転させたが，ほとんど回転しなかった．

４．３　振幅比－送り速度特性

図１１にテレフォンカードを搬送させたときの振幅比－送り速度特性（正方向）を示す．このときの駆動条件を図中に示す．これより，送り速度vは，振幅比U_1/U_2に比例して増加することがわかる．なお，駆動ロータとテレフォンカードとの間の滑り摩擦係数は0.20～0.30であった．

４．４　測定値と計算値との比較及び考察

図１０，１１に式(13)，(15)より算出した計算値を実線で示す．このとき，計算式内の各パラメータは実験時と同じ($\omega_1/\omega_2\fallingdotseq2.8$, $\kappa_2/\kappa_1\fallingdotseq0.29$, $\omega_1=2\pi\times3.64\times10^4$ rad/s, $\omega_2=2\pi\times1.32\times10^4$ rad/s, $U_2=0.210\times10^{-6}$m, $R=9.5\times10^{-3}$m, $\alpha=45°$)とし，

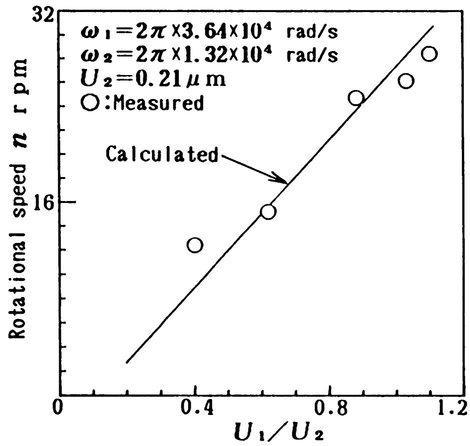


Fig. 10 Rotational speed n of a driving rotor using a trial-made actuator

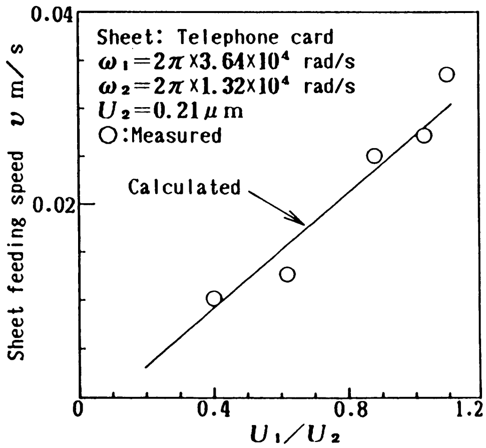


Fig. 11 Sheet feeding speed v using a trial-made actuator

U_1/U_2=0.2～1.2まで計算した．両図とも，測定値と計算値は定性的にほぼ一致していることがわかる．

5. 結　　言

デュアルバイブレータを用いた移送アクチュエータを試作し，その駆動特性に関して，理論と実験の両面から検討を行った．以下に主な結果を述べる．

(1) 本研究では，2つの超音波振動子からなるデュアルバイブレータに駆動ロータを押し付け，それぞれを異なる駆動振動数と振幅で励振することにより，駆動ロータを正逆方向に回転できる方法を考案した．

(2) 駆動ロータの運動解析として，重力方向を振動子との加速度の差から接触と分離を定常的に繰り返す運動，駆動ロータの接線方向を振動子との速度の差から滑り運動とそれぞれ仮定し，回転運動に関する運動方程式を導出した．

(3) (2)の式より，駆動ロータの回転数及びカードの送り速度の式を導くとともに，これらと駆動振動数比及び振幅比との関係を明らかにした．

(4) 試作による実験結果は，(3)で行った解析結果の傾向と比較的よく一致した．このことから，定在波型超音波モータに対する本方式の有利性が確認できた．

謝　　辞

最後に，本研究の実施に関し，機会と援助を与えて下さった沖電気工業の関係各位，および実験装置の製作に関して御示唆を賜った金沢大学工学部の野村久直技官に心から感謝の意を表します．

参 考 文 献

1) 吉田哲男:超音波モータのカード送り装置への応用，固体アクチュエータ研究部会2周年記念シンポジウム講演論文，10(1989) 3.
2) 富川義朗，柳沼雅利，小笠原俊治，高野剛浩:縦L_1-屈曲B_n多重モード振動子を用いた平板状超音波モータの応用，日本音響学会平成元年度秋季研究発表会講演論文集Ⅱ，10，(1989) 945.
3) 松下電器産業モータ事業部:超音波モータ，ナショナル技術資料.
4) 指田年生:超音波駆動モータの試作，応用物理，51，6，(1982) 713.
5) 黒澤　実，上羽貞行:進行波型超音波モータの効率，日本音響学会誌，44，1，(1988) 40.
6) H.V.Barth: Ultorasonic Driven Motor, IBM Tech.Disclosure Bull., 16, 7, (1973) 2263.
7) 岡部佐規一，横山恭男，神保泰雄:振動輸送の研究(第1報)－振動する面上にある物体の運動－，精密機械，35，5，(1969) 299.
8) 横山恭男，小泉邦雄:衝突振動の研究(第1報 基本式と実験装置)，精密機械，36，11，(1970) 731.
9) 西村源六郎，横山恭男:振動加工の研究(第1報)－工具運動の解析－，精密機械，30，2，(1964) 171.
10) A.K.Banerjee: Influence of Kinetic Friction on the Critical Velocity of Stick-slip Motion, Wear, 12, (1968) 107.
11) 石川義雄，須田　稔:ころがり摩擦の基礎研究，精密機械，44，6，(1978) 704.