引込み現象を利用した楕円振動機械の共振点駆動法*

村 岸 恭 次^{*1}, 栗 田 裕^{*2}
松 村 雄 一^{*2}, 中 川 淳 一^{*3}Driving at Resonance Point of Elliptical Vibratory Machine
Using Frequency EntrainmentYasushi MURAGISHI^{*4}, Yutaka KURITA,
Yuichi MATSUMURA and Junichi NAKAGAWA^{**} Research & Development Laboratory, Shinko Electric Co., Ltd.,
100 Takegahana-cho, Ise-shi, Mie, 516-8550 Japan

This paper describes the driving at a resonance point of an elliptical vibratory machine that consists of a horizontal vibratory system and a vertical vibratory system. The driving of the vibratory machine by self-excited vibration, which is generated by positive feedback of velocity, follows the change of resonance frequency automatically and reduces electric power consumption. The resonance of frequency of the horizontal system and that of the vertical system cannot be completely made in agreement, so then self-excited vibrations in both systems differ in frequency. The synchronization control using frequency entrainment drives both systems at the same frequency in the middle of the two resonance frequencies, and both systems can vibrate in a state of near resonance frequency. Furthermore, phase shift filters in the synchronization controller give a desired phase difference between horizontal vibration and vertical vibration. By combining self-excited vibration driving and the synchronization control, an elliptical vibration locus can be kept constant and an elliptical vibratory machine can be driven efficiently.

Key Words: Vibration Control, Self-Excited Vibration, Nonlinear Control, Frequency Entrainment, Synchronization, Elliptical Vibration

1. 緒 言

振動を利用して物体を搬送したり、整列、ふるい分けしたりすることができる⁽¹⁾。物体を載せた平面を、楕円軌跡を描くように加振すれば、単に直線状に加振する場合に比べて数倍の速度で滑らかに物体を搬送することができる⁽²⁾⁽³⁾。

所望の大きさの楕円振動をできる限り少ないエネルギーで得ようとする、水平方向、垂直方向ともに共振状態にするのが望ましい。しかし、減衰の小さい機械振動系では、共振周波数付近で振幅、位相ともに急激に変化するので、水平方向と垂直方向に同じ加振信号を与えても、わずかな共振周波数の変動で楕円振動の振幅と位相差は大きく変化する。このように楕円振動は、搬送特性には優れているものの加振方法が難しいので、あまり使われていない。

これまで著者らは、振動搬送機械の効率的な駆動法について研究を行ってきた。振動量のフィードバックで発生する自励振動を利用すれば、変化する共振周波数を追尾できることを明らかにした^{(4)~(7)}。また、可変速度フィードバック制御によって、自励発振だけでなく、アクティブ制振の状態も実現できることを示した⁽⁸⁾。さらに、可変速度フィードバックで制御された自励振動子間に生じる引込み現象を明らかにし⁽⁹⁾、分散形振動搬送の同期制御に適用した⁽¹⁰⁾。

本研究では、水平方向と垂直方向の 2 自由度をもつ楕円振動機械の効率的な駆動法について検討する。前報では、可変速度フィードバックによる自励振動と引込み現象を利用した同期制御によって、楕円振動機械を効率的に駆動できることをシミュレーションで示した⁽¹¹⁾。また、実験装置を製作し、速度フィードバック制御がどのような働きをしているのか明らかにした⁽¹²⁾。本研究では、可変速度フィードバックと同期制御によって、楕円振動機械を共振点で安定して駆動できることを実験で示す。まず、水平方向と垂直方向の振動系それぞれに、可変速度フィードバック制御を適用して自励振動を発生させる。次に、それぞれの固有振動数で自励振動している水平方向と垂直方向の振

* 原稿受付 2005 年 3 月 22 日。

^{*1} 正員、神鋼電機(株)研究部(☎516-8550 伊勢市竹ヶ鼻町 100)。^{*2} 正員、滋賀県立大学工学部(☎522-8533 彦根市八坂町 2500)。^{*3} 准員、滋賀県立大学大学院工学研究科。

E-mail: muragishi_y@ise.shinko-elec.co.jp

動系を、引込み現象を利用して同期振動させる。さらに、同期振動している水平方向と垂直方向の振動系に、任意の位相差を与える方法について示す。

2. 実験装置

2.1 楕円振動機械 本研究で用いた楕円振動機械を図 1 に示す。振動台に与える楕円振動の振幅と位相差を自由に変えることができるように、水平方向と垂直方向を独立して加振できる構造とした。垂直振

Fig. 1 Experimental apparatus

(a) Horizontal direction

(b) Vertical direction

Fig. 2 Resonance curve of elliptical vibration machine

動は水平に取り付けた 2 枚の板ばねで構成される平行ばねで与え、水平振動は鉛直に取り付けた 4 枚の板ばねからなる平行ばねで与えるようにした。

楕円振動機械を効率よく駆動するために、水平方向の固有振動数と垂直方向の固有振動数が一致するようにした。垂直振動系の質量は振動台を含めて 0.47kg であり、水平振動系の質量は垂直振動系の質量を含めて 1.06kg である。板ばねの長さや厚さを調整して水平方向、垂直方向ともに固有振動数が 84.5~85Hz になるようにした。加振周波数がこの付近の周波数であれば、水平方向と垂直方向ともにほぼ共振状態となる。

加振力は、バイモルフ構造となるように板ばねに貼り付けた圧電素子の変形で与えた。圧電素子の駆動に用いたパワーアンプの出力範囲は±200V である。また、水平方向と垂直方向の振動変位は、渦電流式の変位センサで検出した。検出した変位信号をサンプリング周期 100μs で DSP コントローラに取り込んだ。

2.2 共振特性 楕円振動機械を強制加振し、共振特性を調べた結果を図 2 に細い実線で示す。水平方向、垂直方向ともに共振による振幅のピークが現れている。この共振周波数で加振すれば、所望の振幅を得るために必要な加振のためのアクチュエータやパワーアンプを小形化でき、消費エネルギーも小さくなる。しかし、共振周波数付近では振幅だけでなく位相も急激に変化している。このため、楕円振動を得るために水平方向と垂直方向を同一周波数で加振しても、共振周波数が少しでも変化すると、水平方向と垂直方向の振幅と位相差が大きく変化する。

2.3 搬送特性 楕円振動による搬送特性を図 3 に示す。駆動周波数 84Hz、垂直振幅 0.035mm、水平振幅 0.1mm、0.2mm、0.4mm のときの計算結果と

Fig. 3 Transportation velocity as a function of phase difference

実験結果⁽¹²⁾であり、図上部の矢線は楕円振動の概略波形を示している。実験に使用した搬送物の質量は約 3.5g であり、楕円振動機械の固有振動数への影響は小さい。また、楕円振動機械の駆動には速度フィードバック制御を適用し、安定した楕円振動を発生させた。

図 3 から、正方向（右向き）の搬送の場合は位相差が -90° 付近で搬送速度が最大となり、負方向（左向き）の搬送の場合は $+90^\circ$ 付近で最大になることがわかる。このとき、直線振動（位相差 0° に相当）に比べて数倍の速度が得られる。このように楕円振動による搬送では、水平振動と垂直振動の位相差によって搬送速度が大きく変化するので、安定した高速搬送を得るためには振幅と位相差を一定に保つ必要がある。

3. 楕円振動機械の駆動法

3.1 可変速度フィードバック 振動機械を共振点で駆動すれば、小さな力で所望の振幅が得られ効率がよい。そこで、振動機械の共振周波数の変化を駆動周波数が追尾するように、速度正帰還によって発生する自励振動を利用した⁽⁸⁾。振動系の固有振動数では、加振力に対する振動変位の位相が 90° の位相遅れとなる。そこで、速度正帰還を行えば一巡伝達関数は固有振動数で 180° の位相遅れとなるので、常に固有振動数で自励振動を発生させることができる。

制御系のブロック線図を図 4 に示す。この制御系は質量 m 、粘性減衰係数 c 、ばね定数 k の機械振動系と可変フィードバックゲイン K_V の速度フィードバックループ、および K_V を振幅に応じて変化させるための振幅コントローラと振幅検出器から構成されている。

この制御系の運動方程式は次式のように表される。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = K_V \dot{x} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $K_V \dot{x}$ は機械系に作用する制御力であり、安定条件は次のようになる。

$$\left. \begin{array}{ll} K_V > c & \text{不安定（自励発振）} \\ K_V = c & \text{安定限界（持続振動）} \\ 0 \leq K_V < c & \text{安定（減衰振動）} \\ K_V < 0 & \text{安定（アクティブ制振）} \end{array} \right\} \quad (2)$$

Fig. 4 Velocity feedback control with variable gain

そこで、振幅 r が目標振幅 $\bar{r}$ よりも小さいときには、可変速度フィードバックゲインを $K_V > c$ とすれば自励振動が発生し振幅は成長する。振幅が大きい場合は、 $K_V < c$ とすることで振動は減衰する。このように K_V を連続的に変化させれば、自励振動の振幅を目標値と等しく保つことができる。本論文では K_V の値を調整する振幅コントローラを、振幅偏差の比例項と 3 乗項、振幅偏差をなくすための積分項から構成した。

$$K_V = K_1 \left(1 - \frac{r}{\bar{r}} \right) + K_3 \left(1 - \frac{r}{\bar{r}} \right)^3 + K_I \int \left(1 - \frac{r}{\bar{r}} \right) dt \quad \dots\dots\dots (3)$$

3.2 自励振動駆動 楕円振動機械の水平方向と垂直方向それぞれに、可変速度フィードバックにより自励振動を発生させ、共振点追尾性を調べた。振幅指令を変化させたときの自励振動の振幅と周波数の関係を図 2 中に太い破線で示す。図 2 から自励振動の周波数は、入力電圧の大きさによって変化する共振特性のピークを追尾し、常に機械系の共振点で振動していることがわかる。

振動機械を共振点で駆動する場合の安定性を調べるため、固有振動数が変化したときの振動変位や駆動電圧の変化を調べた。速度フィードバックなしの振動機械に周期的な加振指令を与えて強制加振した場合、固定ゲインの速度フィードバック（通常速度フィードバック）で制御した振動機械を強制加振した場合⁽¹²⁾、可変速度フィードバックで振動機械に自励振動を発生させた場合を比較して図 5 に示す。水平方向振動系を例に、楕円振動機械の振動台の質量を調節して、固有振動数 f_n を基準の固有振動数 $f_{n0}=84.0\text{Hz}$ に対して $\pm 1\%$ 変化させた。強制加振のための振動指令 (Reference) は基準の固有振動数に等しい 84.0Hz であり、その振幅は各加振方法で一定である。図 5(a) からわかるように、速度フィードバックがない場合は固有振動数が $\pm 1\%$ 変化すると、 $f_n = f_{n0}$ の場合に比べ振幅が $50 \sim 70\%$ 程度に小さくなり、振動変位の位相も $\pm 60^\circ$ 程度変化する。また、図 5(b) に示すように速度フィードバック制御した振動機械を強制加振する場合には、固有振動数が変化しても振動変位の振幅と位相はほとんど変化しない。その代わりに、パワーアンプの出力電圧は増加し、振動指令に対する位相も変化的ことで、振動変位が変わらないように制御している。図 5(c) は自励振動を発生させた場合であり、強制振動の振動指令に相当するものはない。このとき、振動系の固有振動数が $\pm 1\%$ 変化しても自励振動の周波数が固有振動数の変化を追尾するため、駆動電圧の振幅は小さいまま振動変位を一定に保つことができている。

次に、楕円振動機械の水平方向と垂直方向をそれぞれ独立に自励振動で駆動したとき、振動台がどのように振動し、搬送がどのように行われるのかを検討した。物体の搬送状態と振動台の振動を図 6 に示す。楕円振動機械の水平方向と垂直方向の固有振動数は、ばね定数のばらつきや非線形性のために、厳密に一致させることができない。このため、発生する自励振動の周波数も異なる。図 6 の場合、自励振動の周波数は水

平方方向が 84.0Hz、垂直方向が 84.4Hz と 0.4Hz の差があった。図 6 の上の図は振動台上の物体の位置の変化を表し、中の図は振動台の水平振動と垂直振動、下の図はそのときの楕円振動の軌跡である。図 6 からわかるように、振動台の水平方向と垂直方向の振動の位相差は時刻により変化し、これに伴って楕円振動の軌跡も変化している。このため、物体の移動方向が 2.5 秒ほどの周期で変化し、一定の速度が得られない。

3・3 同期制御 異なる周波数で自励振動している水平振動と垂直振動を同期させるため、引込み現象を利用した同期制御⁽⁹⁾⁽¹¹⁾を行った。図 4 の制御系に作用する周期外力 w を大きくしていくと、外力による振幅が目標振幅より大きくなる。このとき K_V は振幅を一定に保つため、アクティブ制振として作用するようになる。そこで、自励振動は停止し、振動の周波数は外力の周波数に等しくなる。この引込み現象を利用して水平方向と垂直方向の振動を同期させる。

同期制御系のブロック線図を図 7 に示す。水平方向と垂直方向それぞれを独立に、局所的な可変速度フィードバックで制御した。さらに、引込み現象を起こすため、水平方向と垂直方向の振動速度信号を平均し、同期ゲイン K を掛けた信号を同期指令としてそれぞれの振動系に入力した。水平振動と垂直振動の大きさによらず、互いの共振周波数の中間で同期振動するように、平均する振動速度はそれぞれの振幅の指令値で割って正規化した。また、 G_P , G_P^{-1} は水平振動と垂直振動に位相差をもたせるための位相シフトフィルタであり、詳細は 3・4 節で述べる。

同期ゲイン K を変えて、同期制御の効果を調べた結果を図 8 に示す。図 8 の左の図は、各同期ゲイン

Fig. 5 Effect of self-excited vibration control

Fig. 6 Work transportation and asynchronized vibration

における水平方向と垂直方向の振動の様子であり、右の図はそのときの局所ループの速度フィードバックゲイン K_{V1} , K_{V2} を示している。振幅の目標値は水平方向が 0.05mm 、垂直方向が 0.035mm とした。なお、このとき位相シフトフィルタ G_P は用いておらず、水平方向と垂直方向の同期指令の位相差は 0° である。

$K=0.0$ の場合は同期制御を行っていない状態である。局所ループの速度フィードバックゲイン K_{V1} , K_{V2} は正の値であり、自励振発振の作用をしている。このとき水平方向と垂直方向の振動系は、それぞれの固有振動数で持続的に振動している。同期ゲインを大きくし $K=0.00386$ にすると、 K_{V1} , K_{V2} は、わずかに負となりアクティブ制振として作用する。そこで、局所ループの自励振は停止し、水平方向と垂直方向は同期信号と同じ周波数で振動するようになるが、約 60° の位相差がある。さらに $K=0.075$ とすると、 K_{V1} , K_{V2} は負の大きな値になり、アクティブ制振の作用が大きくなる。このとき、水平方向と垂直方向の位相差

Fig. 7 Synchronization control

Fig. 8 Vibration wave and synchronization gain

は小さくなり、ほぼ同位相で同期振動するようになる。以上のように同期ゲインを大きくすると、2つの局所ループはアクティブ制振として作用し、共に同期指令に引込まれ同期して振動する。同期ループは平均速度を正帰還し、局所ループに代わって発振の作用をする。

次に、同期制御時の周波数と振幅の関係を図 2(a)中に太い実線で示す。垂直振幅は 0.035mm 、同期ゲインは $K=0.075$ とした。図中の細い破線は垂直振幅が 0.035mm のときの垂直振動系の共振周波数である。図 2(a)から、同期周波数は各振幅での水平方向と垂直方向の共振周波数のほぼ中間になることがわかる。

3.4 位相シフトフィルタ 搬送に適した楕円振動を得るため、同期振動している楕円振動機械の水平方向と垂直方向に所望の位相差をもたせる方法について検討する。そこで、図 7 に示すように、同期ゲインの出力を水平方向にはそのまま入力し、垂直方向の振動系には位相差をもたせるための位相シフトフィルタ G_P を介して入力した。また、 G_P によって変化した垂直方向の同期ループの位相を補償するために、 G_P と逆の特性をもつ G_P^{-1} を、平均速度を演算する前の垂直方向の同期ループに設けた。

位相シフトフィルタとして、次式のような伝達関数をもつフィルタ G_P について検討した。

$$G_P = \frac{s + \alpha\omega_p}{\alpha s + \omega_p} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中の α により周波数 ω_p における位相差の調整が可能で、 α を $1 < \alpha$ で与えれば $-90^\circ \sim 0^\circ$ の位相差が得られ（位相遅れ特性）、 $0 < \alpha < 1$ で与えれば $0^\circ \sim 90^\circ$ の位相が得られる（位相進み特性）。任意の楕円振動波形を得るためには、 $\pm 180^\circ$ の範囲で連続的に位相差を調整できるのが望ましい。そこで、同期制御系に適用する位相シフトフィルタ G_P は、式(4)のフィルタ 3 段を直列に接続して構成した。図 9 に実験に用いた 3 段分の位相シフトフィルタの特性を示す。このとき、 α を $1/3.73 \sim 3.73$ の範囲で変えることで、位相差を $\pm 180^\circ$ の範囲で連続的に調整することが可能となる。サンプリング周期の影響による遅れが高い周波数領域で見られるが、固有振動数に近い 84Hz 付近ではほぼ計算どおりの位相特性が得られている。また、 84Hz 付近の位相の変化は緩やかであり、振動周波数が多少変動しても位相差の変化は小さい。

4. 楕円振動波形

4.1 位相差と楕円振動 同期振動している水平振動と垂直振動の位相差を、位相シフトフィルタを用いて調整した。位相シフトフィルタの係数 α を $1/3.73$

～2.75 の範囲で変えたときの楕円振動の波形と位相差を図 10 に示す。同期ゲインは $K=0.075$ である。図 10 からわかるように、位相シフトフィルタにより、楕円振動波形を連続的に変化させることができる。

4.2 楕円振動のロバスト性 水平方向の振幅や振動台の質量が変化すると、楕円振動機械の共振周波数は変化する。このとき、楕円振動の波形がどの程度変化するのかを調べることによって、楕円振動のロバスト性を評価した。実験に用いた楕円振動の水平振幅は 0.05mm 、垂直振幅は 0.035mm 、水平振動と垂直振動の位相差は -60° (60° の位相遅れ) である。

水平方向の振動の大きさを、 0.05mm 、 0.1mm 、 0.2mm と大きくしたときに、楕円振動がどのように変化するのかを調べた結果を図 11 に示す。図 11(a) は、速度フィードバックなしで振動機械を強制加振した場合の実験結果である。水平振幅を 0.05mm から 0.1mm に大きくすると、位相差は -42.6° と小さくな

る。水平振幅を 0.2mm とさらに大きくすると、位相差は -60° 近くまで回復するものの、垂直振幅が大きくなってしまふ。これは、今回の実験装置では水平振動と垂直振動を完全に分離することができず、干渉が生じているためと考えられる。これに対して、速度フィードバック制御を追加し強制加振をすると⁽¹²⁾、図 11(b) に示したように、水平方向、垂直方向ともに指令どおりの振幅になり、位相差もほぼ一定に保たれている。また、図 11(c) の自励振動による駆動の場合にも、指令どおりの振幅と位相差が得られている。

次に、振動台の質量を変えて固有振動数が変化した場合の楕円振動と駆動電圧の変化を調べた。楕円振動機械の振動台には、搬送物を整列させるためのアタッチメントやセンサが取り付けられる。このため、これらの付属品を取り替えるとはね上の質量が変化し、水平方向と垂直方向の固有振動数が変化したりずれたりする。また、振動台上の搬送物の質量が変動しても、固有振動数は変化する。このような質量変化を想定し、振動台に 20g および 100g のおもりを付加した。

振動台の質量を変化させたときの、楕円振動の変化を図 12 に示す。速度フィードバックがない場合には、図 12 (a) からわかるように、ばね上の質量の増加に伴い、楕円振動の振幅は大幅に減少し、位相差も大きく変化している。このとき、駆動電圧は水平方向、垂直方向ともに一定のままである。また、速度フィードバック制御を行いながら強制加振した場合⁽¹²⁾ には、図 12(b) に示すように、ばね上の質量が変化しても楕円

Fig.9 Phase shift filter

Fig. 10 Elliptical vibration wave

Fig. 11 Effect of synchronization control (Influence of amplitude of horizontal vibration)

振動の変化は小さい。ただし、駆動周波数と共振周波数がずれるため、駆動電圧は水平方向、垂直方向ともに大きくなっている。これに対して、自励振動による駆動では、図 12(c)からわかるように、楕円振動の変化は小さい。また、駆動周波数が水平方向と垂直方向の共振周波数の変化を平均的に追尾するため、駆動電圧の増加も固定ゲインの速度フィードバックのときに比べて小さくなる。

5. 結 論

本研究では、楕円振動機械を効率よく駆動するために、可変速度フィードバックによる自励振動駆動と引込み現象を利用した同期制御を検討した。

(1) 可変速度フィードバックによって発生する自励振動を利用することにより、常に共振点で駆動することができる。

(2) わずかに異なる共振周波数で自励振動している水平方向と垂直方向の振動を、引込み現象を利用して同期させた。この同期振動の周波数は、楕円振動機械の水平方向と垂直方向の共振点を平均的に追尾する。

(3) 位相シフトフィルタにより、任意の位相差をもった楕円振動を発生させることができた。また、質量変化などにより、共振周波数が変化してもこの楕円振動の振幅と位相差はあまり変わらない。

文 献

- (1) 横山恭男, パーツハンドリング, (1985), 227-270, 工業調査会.
- (2) 岡部佐規一, 横山恭男, 神保泰雄, 振動輸送の研究 (第3報), 精密機械, 40-10, (1974), 840-845.
- (3) 横山恭男・石川憲一・岡部佐規一・小泉邦雄, 振動応用技術, (1992), 93-98, 工業調査会.
- (4) 栗田裕・村岸恭次・安田均, 振動量のフィードバックによる共振形振動機械の自励振動駆動, 機論, 62-597, C(1996), 1691-1696.
- (5) 栗田裕・村岸恭次・安田均, 可変フィードバックゲインによる自励振動形振動機械の振幅一定制御, 機論, 62-598, C(1996), 2140-2146.
- (6) 栗田裕・村岸恭次, 電磁加振式振動機械の自励振動駆動, 機論, 63-605, C(1997), 35-40.
- (7) 栗田裕・北川康則・岸根申尚・田中明弥・松村雄一, 被搬送物の反作用が無視できない場合の振動機械の共振特性と駆動方法, 機論, 66-641, C(2000), 38-44.
- (8) 栗田裕・松村雄一・田中明弥・東門太幸, 可変速度フィードバックによる振動搬送機械の自励振動駆動とアクティブ制振, 機論, 68-674, C(2002), 2859-2864.
- (9) 栗田裕・松村雄一・後伸昌・村岸恭次, 可変速度フィ

(a) Without feedback

(b) With velocity feedback

(c) With synchronization control

Fig. 12 Effect of synchronization control (Influence of table mass)

- ードバックで制御された自励振動子群の引込み現象, 機論, 70-690, C(2004), 349-355.
- (10) 栗田裕・松村雄一・田中明弥・波多野知典, 分散制御された自励振動機械の協調による振動搬送, 機論, 69-681, C(2003), 1191-1196.
- (11) 村岸恭次・栗田裕・松村雄一, 同期引込み現象を利用した楕円振動機械の駆動法, 機論, 69-684, C(2003), 2005-2010.
- (12) 村岸恭次・栗田裕・松村雄一・中川淳一, 速度フィードバックを用いた楕円振動機械の共振点駆動法, 機論, 70-693, C(2004), 1251-1257.