

論文題目：楕円振動機械の共振点駆動

著者：村岸 恭次

研究科，専攻名：工学研究科 機械システム工学専攻

学位記番号：工課第1号

博士号授与年月日：2004年3月24日

【論文の要旨】

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。物体を載せた平面を，水平から少し角度をもたせて加振すれば，物体は平面上を滑るように移動していく。このような振動を利用した搬送は，搬送を行うと同時に部品の整列，付着物や絡み合った部品の分離，加熱・冷却・乾燥などが行えるといった特徴を有している。そこで，機械部品や電子部品の整列供給をはじめ，食品や化学工業など広い分野で利用されている。

機械部品などの整列供給には，部品の姿勢を安定させながら高速で搬送することが求められる。部品を載せた平面を直線状に振動させる場合，振幅を大きくすれば搬送速度は大きくなるが，部品の跳躍が発生しその姿勢が不安定になる。このため，あまり振幅を大きくすることができない。平面上の点が楕円軌跡を描くように水平方向と垂直方向の振動を与えれば，跳躍が発生させることなく直線状に加振する場合に比べて数倍の搬送速度が得られる。この楕円振動の搬送特性は，水平方向と垂直方向のそれぞれの振動の振幅と位相差によって決まる。

できるだけ少ないエネルギーで所望の楕円振動を得ようとすると，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，共振周波数付近で位相特性が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たとしても，得られる振動の位相差は，符号の正負を含めて大きく変動する。そこで，現状の楕円振動機械では，水平方向の固有振動数は加振周波数と一致させているが，垂直方向の固有振動数は少し高めに設定して加振周波数付近での位相変化を緩やかにしている。そして垂直方向は加振信号の振幅だけを調整し，水平方向は振幅と位相を調整して所望の楕円振動を得ている。この場合，水平方向は共振状態にできるが，垂直方向は共振からずれてしまう。

本研究では，搬送特性に優れる楕円振動機械を，できる限り少ないエネルギーで駆動する方法を検討した。まず，直線振動に対する楕円振動搬送の優位性を示す。次に，小さな加振力で所望の振幅が得られるように，楕円振動機械の水平方向と垂直方向の固有振動数を一致させて，二方向とも共振周波数で加振できるようにした。このとき，安定した楕円振動が得られるように，水平方向と垂直方向の振幅と位相差を一定に保つための制御を行った。これらの効果についてシミュレーションと実験により示す。

第1章では振動搬送の特徴と利用分野，直線振動を用いた振動搬送装置の問題点，および直線振動に比べ搬送特性に優れる楕円振動搬送を実現するための課題などについて示した。

第 2 章では、直線振動と楕円振動の搬送メカニズムを明らかにし、楕円振動搬送の優位性について検討した。振動による物体の搬送について数学モデルを作成し、直線振動による搬送と楕円振動による搬送の特性について調べた。楕円振動では、水平方向と垂直方向の振動の位相差により搬送速度だけでなく搬送方向も変化する。搬送速度が最大となる位相差では摩擦力を効率よく物体の推力として利用することができ、直線振動に比べ数倍の搬送速度を得ることができることがわかった。また、数学モデルから得られた搬送特性は、実験結果ともよく一致した。

第 3 章では実験に用いた楕円振動機械の特性について説明した。できるだけ小さな加振力で所望の振幅が得られるように、水平方向と垂直方向ともに減衰が小さくなるようにした。また、同一周波数で水平方向と垂直方向を共振状態にできるように、固有振動数を一致させた。このような楕円振動機械の振動特性は、水平方向と垂直方向ともに固有振動数付近で共振のピークを持つとともに、固有振動数付近では加振力に対する位相が急激に変化する特性となる。また、今回の実験装置では、水平方向の共振特性が振幅の大きさによって変化するという非線形性を有している。このため、固有振動数付近で加振すると小さな力で所望の振幅を得ることができるが、搬送物や振幅の増減により固有振動数が少しでも変化すると、振幅だけでなく水平方向と垂直方向の振動の位相差も大きく変動する。

第 4 章では、楕円振動機械を外部からの強制加振信号で駆動する方法について検討した。機械振動系の減衰を大きくすれば、共振周波数付近の振幅や位相の急激な変化を緩やかにすることができる。しかし、このとき共振特性を緩やかにするだけでなく、共振倍率も抑えてしまうので、所望の振幅を得るのに大きな加振力が必要になる。そこで、水平方向と垂直方向のそれぞれでゲインを固定した速度フィードバック制御を行い、固有振動数付近の振幅や位相の変化が緩やかになるようにした。速度フィードバックは見かけの減衰を大きくするが、機械系自身の共振特性は変化しない。このため、機械系の共振周波数で加振すれば効率よく所望の振幅が得られるとともに、多少加振周波数と固有振動数がずれても振幅や位相の変化は小さく抑えられる。この結果、外部からの強制加振信号で、所望の振幅と位相差をもつ楕円振動が得られた。さらに、速度フィードバックにより部品投入時の振動など外乱に対する影響を抑制する効果が得られるほか、振動機械を共振点で駆動する際の起動・停止時の応答性を改善することができた。

第 5 章では、振動機械の共振周波数が変化してもこれを追尾し、常に共振周波数で加振できるようにする制御について検討した。速度フィードバック制御による方法では加振周波数が一定であり、固有振動数と加振周波数のずれが大きくなると、所望の振幅を得るのに必要な加振力が大きくなってしまふ。そこで、常に共振周波数で加振するための共振点追尾制御を検討した。振動系に速度フィードバック制御を行い速度正帰還により自励振動を発生させる方法や、振動変位を負帰還して変位を位相遅れ制御することで自励振動を発生させる方法により、常に共振周波数で加振できることを示した。このようにすれば、常に小さな力で効率よく駆動することができるので、電力消費が低く抑えられるとともに、アクチュエータやパワーアンプを小型化することも可能となる。しかし、楕円振動機械では水平方向と垂直方向の固有振動数がわずかでも違ふと、それぞれの振動系で発生する自

励振動の周波数も異なるため、一定の楕円振動を得ることができない。

第 6 章では、楕円振動機械の水平方向と垂直方向それぞれに発生させた自励振動を、同期させる制御について検討した。異なる周波数で振動している自励振動子の振動量が互いに影響しあい、同じ周期で振動するようになることがある。このような周波数引込み現象を制御系で実現することで、水平方向と垂直方向を同期振動させた。まず、水平方向と垂直方向の振動から作成した同一信号を、それぞれの入力部にフィードバックする外部ループを設ける。また、自励振動を発生させる速度フィードバックゲインを振幅に応じて変化させることにより、自励発振、振幅一定の持続振動、アクティブ制振の状態が自動的に切り換わるようにする。この外部ループと可変ゲインの組み合わせにより、周波数の引き込み現象を発生させて、自励振動している水平方向と垂直方向を同期させることができた。また、同期制御のゲインを大きくすることで、水平方向と垂直方向の位相差を小さくできた。自励振動が同期している状態では、可変速度フィードバックは制振の働きをすることで局所ループの見かけの減衰を大きくし、振幅一定に制御しつつ水平方向と垂直方向の位相差を小さくする働きをする。外部ループである同期制御は局所ループの見かけの減衰を打ち消し、機械振動系を不減衰系することで発振の働きをする。

第 7 章では、楕円振動機械に自励振動を発生させながら、所望の位相差の楕円振動を安定に発生させる方法について検討した。楕円振動により高速搬送を実現するためには、水平方向と垂直方向の振動を搬送に適した位相差に調整する必要がある。周波数引き込みによる同期制御系は 2 つの自励振動を同位相で同期させることはできるが、任意の位相差を作ることができない。そこで、水平方向と垂直方向の振動の位相差を制御する方法を検討した。同期制御のためのフィードバック信号に位相差を持たせることで、位相差の制御を行った。同期信号に位相差を与えるための位相シフトフィルタは、入力信号の周波数が変化しても、得られる信号の位相差の変化が小さくなるようにした。このような同期制御と位相差制御により、楕円振動機械の水平方向と垂直方向をほぼ共振状態としながら、所望の楕円振動を得ることができた。また、振動台の質量変化などによる固有振動数の変動があっても、楕円振動の変化を小さく抑えることができた。このときの楕円振動の周波数は、常に水平方向と垂直方向の固有振動数の中間付近であり、平均という意味で共振点を追尾することができた。

本研究では、まず、楕円振動機械に速度フィードバック制御を適用し、共振点付近でも安定した楕円振動が得られることを示した。次に、楕円振動機械の水平方向と垂直方向に自励振動を発生させ、引込み現象を利用した同期制御と位相差制御を適用した。これにより、楕円振動機械を共振状態にしつつ、安定した楕円振動を発生させる方法を確立できた。