

超音波振動を用いたアクティブエアベアリング

振幅変調を用いた精密位置決め

大岩 孝彰*，野原 賢治（静岡大学）

Active Air Bearing using Ultrasonic Oscillation -Precision Positioning based on Amplitude Modulation-

Takaaki OIWA* and Kenji NOHARA (Shizuoka University)

This paper proposes an active air bearing based on the squeeze air film using the ultrasonic oscillation. The squeeze film generated on the oscillating pad lifts the floating object. Furthermore, amplitude variation of the oscillation varies the thickness of the film and positions actively the object. The ultrasonic oscillation considerably eliminates residual vibration of the object. Positioning experiment using PID feedback control with a fiber optic displacement sensor showed that the settling time of 4 μm step positioning was less than 0.2 second and the positioning resolution was less than 30 nm.

キーワード：アクティブエアベアリング，スクイーズ空気膜，超音波振動子，位置決め
(Key Words : Active Air Bearing, Squeeze Air Film, Ultrasonic Actuator, Positioning)

1. 緒言

近年、超精密加工機や測定機に用いられる案内要素の高精度化の要求はますます高くなっている。特に回転軸受では、高精度化と高剛性化が求められている。静圧空気軸受は、気体潤滑膜によるアベレージング効果により高い回転精度が得られるが、反面空気膜の圧縮性と低粘性による軸受剛性や振動減衰性の不足という問題が生じている。そこで、機械式軸受や静圧軸受の軸の振れ回りを能動的に制御し、回転精度と剛性を向上させるアクティブペアリングの研究が行われてきた^{(1)~(3)}。

一方從来より、軸受面を高周波振動させた際に生じるスクイーズ効果を応用した空気軸受が研究してきた⁽⁴⁾。このスクイーズ型空気軸受についても、積層型圧電アクチュエータを用いて能動的な制御を行うアクティブエアベアリングが提案されている^{(5)~(7)}。しかし、この場合の振動周波数は数百Hz～数kHzと低く、軸に残留振動が発生する問題があった。そこで、本研究では軸受面を超音波領域の周波数（約20kHz以上）で振動させることにより残留振動を低減させ、同時に回転中の軸の心振れ・姿勢の制御を能動的に行う新しい軸受の基礎的研究を行う。既報⁽⁸⁾では、超音波領域での駆動により残留振動がほぼ消滅すること、浮上と位置の制御が行えることがわかった。本報では、ボルト締めランジュバン型超音波振動子を用いて浮上物体の精密位置決めを行った結果について報告する。

2. 原理

原理図を図1に示す。超音波振動子に浮上用高周波信号（正弦波）を印加し、スクイーズ空気膜を発生させ、物体を浮上させる。このとき浮上物体には加振周波数と同じ振

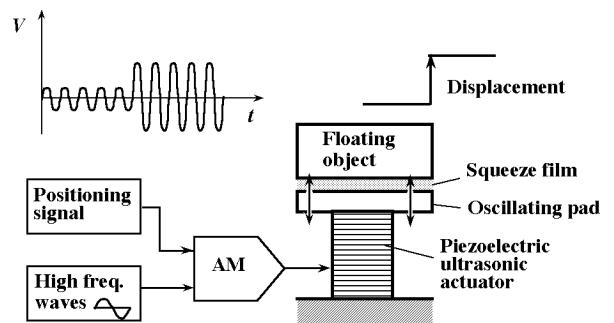


Fig. 1 Principle of active air bearing based on squeeze air film generated by ultrasonic actuator

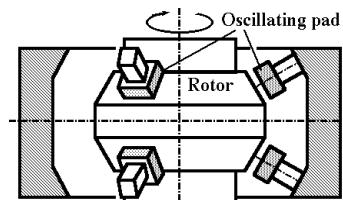


Fig. 2 Arrangement diagram of rotor and six oscillating pads

動数を持つ微小な残留振動が生ずるが、加振周波数を超音波領域とすることで、加振振幅の数百分の1のレベルに減少させることができるのである⁽⁴⁾⁽⁸⁾。そして、浮上物体の平均浮上量は振動面の振幅の大きさにほぼ比例するので、位置決め制御用信号を用いて加振信号の振幅を変調すれば、浮上物体の位置決めを行うことができる。

さらに、図2のように6個の振動パッドとアクチュエータを回転軸が5自由度方向に運動できるように配置すれば、軸の回転方向を除いた5自由度（並進3自由度および姿勢2自由度）方向の心振れの補正が行えることになる。

3. 実験

3.1 実験装置

実験装置の概要を図3に示す。アルミ製丸棒(Φ45)により製作したホーンの端面を、ボルト締めランジュバン型超音波振動子(本多電子、共振周波数28kHz)で上下方向に超音波振動させる。浮上物体はSS材の平板を平面研削したもの(t10×60×70, 質量332g)であり、厚さ0.1mmのポリエチレンフィルムで水平方向から支えた。浮上物体の変位は光ファイバー型変位計(Philtec社、測定分解能30nm、周波数特性DC~50kHz)で記録する。同時にもう一本の同変位計(測定分解能25nm、周波数特性DC~20kHz)を位置決め用フィードバックセンサとして用いた。制御用コントローラとしてパソコンコンピュータ、ADおよびDAコンバータを用いた。

3.2 実験結果

まず、加振周波数に対するホーンの振動振幅、浮上物体の平均浮上量および浮上物体の残留振動の振幅を図4に示す。残留振動は変位計のノイズレベル(30nm)以下であり、確認できなかった。

次に制御を行わない状態で浮上物体上に錐を載せ、そのときの沈み込んだ変位を測定した結果を図5に示す。実験の範囲内では剛性は線形的であった。この図より、非制御時のバネ定数は0.57N/μm程度となる。

次に、前述の変位センサを用いてフィードバック制御を行った際、4μmのインディシャル応答の様子を図6に示す。制定時間は0.2s以下であり、定常状態での位置偏差も小さく、安定して浮上していることがわかる。

最後に、位置決め分解能を評価するために階段状のステップ入力を行い、ステップ幅を徐々に小さく設定した。結果を図6に示す。この実験装置ではAD変換器の分解能が変位で約17nmであった。これらの図から、位置決め分解能がフィードバックセンサとして用いた変位計のノイズレベル(30nm)と同等となっていることがわかる。

4. 結言

超音波振動で発生したスクイズ空気膜により物体の浮上と位置決め制御実験を行った結果、以下の結果を得た。

- (1) 非制御時の空気膜の剛性は0.57N/μmであった。
- (2) 質量332gの物体を4μm変位させたときの制定時間は0.2s以下であった。
- (3) 位置決め分解能は30nm程度であり、変位センサのそれと同等であった。

参考文献

- (1) T. G. Bifano and T. A. Dow, Optical Engineering, 24, 5 (1985) 888.
- (2) 野村武彦他2名、精密工学会誌、53, 7 (1987) 1104.
- (3) 渡辺一郎他2名、精密工学会誌、54, 2 (1988) 329.
- (4) 例えば、小野京右、潤滑、21, 9 (1976) 589.
- (5) 吉本成香他1名、トライボロジスト、36, 7 (1991) 543.
- (6) 吉本成香他1名、精密工学会誌、58, 3 (1992) 527.
- (7) 磯部浩巳他2名、精密工学会誌、65, 3 (1999) 438.
- (8) 大岩他2名、第75期通常総会講演会講演論文集(), (1998) 250.

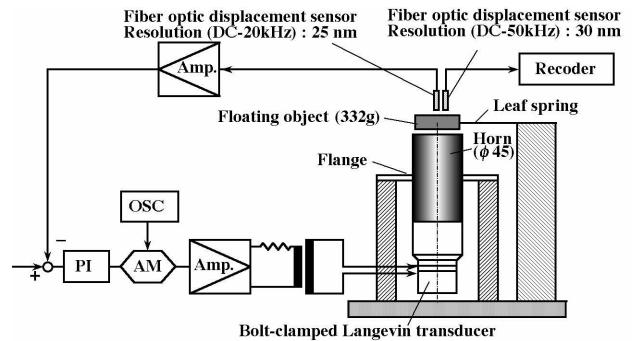


Fig. 3 Experimental setup with Langevin ultrasonic transducer

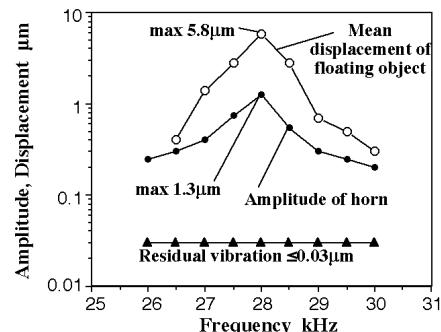


Fig. 4 Amplitude of horn, floating distance and residual vibration of floating object

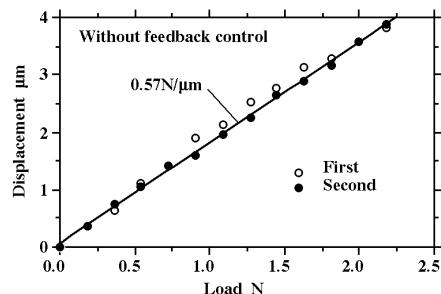


Fig. 5 Stiffness of squeeze film

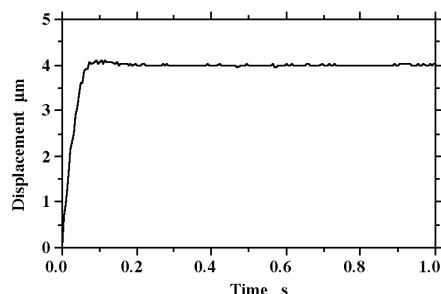


Fig. 6 4 μm step response

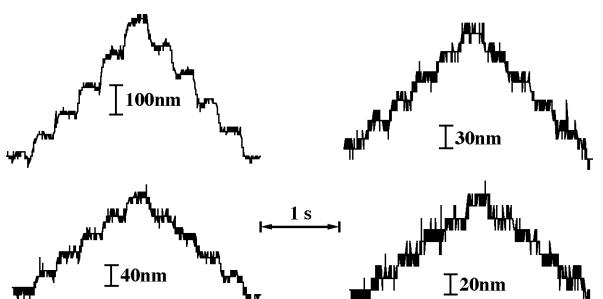


Fig. 7 100 nm, 40 nm, 30 nm and 20 nm step responses

参考文献

- (1) T. G. Bifano and T. A. Dow : Real time control of spindle runout, *Optical Engineering*, 24, 5 (1985) 888.
- (2) 野村武彦, 金井彰, 宮下政和: 静圧支持回転軸系の回転振れ自動補正機構 提案と基本動作特性, *精密工学会誌*, 53, 7 (1987) 1104.
- (3) 渡辺一郎, 青山尚之, 下河辺明: 能動空気軸受 浮上方向の位置と振動の超精密制御, *精密工学会誌*, 54, 2 (1988) 329.
- (4) 例えば, 小野京右: 圧縮性スクイーズ膜に関する基礎的研究, *潤滑*, 21, 9 (1976) 589.
- (5) 吉本成香, 阿武芳朗: 圧電素子を用いた動圧形スクイーズ空気案内面, *トライボロジスト*, 36, 7 (1991) 543.
- (6) 吉本成香, 阿武芳朗: 圧電素子を用いた動圧形スクイーズ空気案内面 リニアガイドへの応用, *精密工学会誌*, 58, 3 (1992) 527.
- (7) 磯部浩巳, 久曾神煌, 小島茂: 圧電素子の高周波振動を利用したアクティブスクイーズ空気軸受の開発(第1報) プロトタイプモデルによる基礎的研究, *精密工学会誌*, 65, 3 (1999) 438.
- (8) 大岩孝彰, 松田滋, 松田孝: スクイーズ膜効果を用いたアクティブエアベアリングの研究, *日本機械学会第75期通常総会講演会講演論文集* (), (1998) 250.