

## 401 超音波振動を用いたアクティブエアベアリング (第6報)

— 直動エアガイドの試作 —

Active Air Bearing based on Ultrasonic Oscillation ( 6th report )  
— Experimental Linear Rectangular Air Guideway —

○ 正 大岩 孝彰\* (静岡大学), 石岡 伸康 (静岡大学学生)

Takaaki OIWA\*, Shizuoka University, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561  
Nobuyasu ISHIOKA, Shizuoka University

This paper reports an active air linear guide that utilizes air films generated by ultrasonic oscillation. The films on eight bearing surfaces of a horn, which is a stator, lift and guide the carriage. Moreover, the oscillation that modulates the amplitude via the positioning signal varies the thickness of the air film. Thus, this bearing regulates the position of the carriage in z direction using a PI controller with a displacement sensor so that its motion error becomes zero. Furthermore, no pneumatic plant is needed in this bearing. The motion error were  $1.28 \mu\text{m}$  p-p in z direction and  $1.08 \mu\text{m}$  p-p in y direction without compensation. Nonrepetitive motion errors were  $0.125 \mu\text{m}$   $2\sigma$  in z direction and  $0.048 \mu\text{m}$   $2\sigma$  in y direction. PI feedback control, in which a fiber optic displacement sensor measures the movement of a gauge block mounted on the carriage, was performed. The settling time for  $0.2\text{-}\mu\text{m}$  step positioning was less than 0.1 seconds. The positioning resolution was less than 20 nm.

**Key Words** : active air guideway, ultrasonic actuator, motion error

## 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. 静圧空気軸受は, 気体潤滑膜によるアベレーシ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ベアリングの研究が行われてきた<sup>[1]~[3]</sup>.

一方, 軸受面を高周波振動させた際に生じるスクイズ効果を応用した空気軸受が研究され<sup>[4]</sup>. 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空気案内が提案されている<sup>[5]~[7]</sup>. しかし振動周波数は数百Hz~数千Hzと低く, 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 20 kHz 以上) で振動させて残留振動を低減させ, 同時に浮上物体の位置・姿勢の制御を能動的に行う軸受の開発を行ってきた. 既報<sup>[8]~[10]</sup>までに, ボルト締めランジュバン型超音波振動子を用いた空気軸受を試作し, ロータの軸方向の回転誤差補正を行った結果について報告した. 本報は直動型のエアガイドを試作し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) を印加して空気膜を発生させ, 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可能である<sup>[11][12]</sup>. 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調整すれば, 浮上物体の位置決めを行うことができる.

本報では浮上物体の四面拘束のための空気膜を得るた

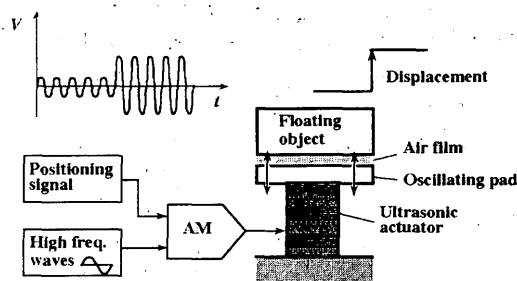


Fig. 1 Principle of active air bearing based on air film generated by ultrasonic actuator

めに, 図2のような形状を持つ振動方向変換体<sup>[13]</sup>を用いる. 図の変換体の両端面を振動子で加振すると, 案内面が振動し変換体中央部が振動の節となる.

## 3. 実験装置

実験装置の概要を図3に示す. アルミ (A2017)製の振動方向変換体 (以下ホーン) の両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 46.5 kHz) で超音波振動させる. ホーンの固定は中央部分の振動の節に近い箇所にて行う. ホーン案内面には研削加工を施した. 加工後の面のうねりは  $W_a = 0.27 \sim 0.88 \mu\text{m}$  程度, あらさは  $R_a = 0.28 \sim 1.13 \mu\text{m}$  程度であった. 固定したホーンを超音波振動子で加振し, ホーン案内面の振動振幅を光ファイバ変位計 (Philtec社, 周波数特性 DC ~ 50 kHz) にて測定した. 加振周波数 39.6 kHz のときに上面と左右面の振幅が同時に最大となり, およそ  $2 \mu\text{m}$  が得られた. 浮上体 (スライダ) は, 4枚のアルミ板から成る ( $W_a = 0.38 \sim 1.53 \mu\text{m}$ ). ホーンとのすき間調整はシムにて行った. スライダ中央部にはゲージブロックを取り付け, 運動の真直度を周波数特性 20 kHz の光ファイバ変位計 (公称分解能 10 nm) を用いて測定した. 以上のスライダの総質量は 720 g となった.

## 4. 制御を行わない場合の実験結果

### 4.1 運動の真直度

まず、超音波振動子に印加する正弦波信号の振幅を一定としてスライダを浮上・左右動させた。この状態において、上下方向の変位を5回にわたって測定した結果を図4に示す。ゲージ取付け時の傾きに起因する誤差成分は除去した。この運動誤差の平均値を繰返し誤差とすると $1.28\mu\text{m}_p$ であり、スライダのうねり $W_a=1.58\mu\text{m}$ と比較して若干小さい程度となった。繰返し誤差と測定値の差を非繰返し誤差とすると、 $0.125\mu\text{m}2\sigma$ となり、比較的良好な結果が得られた。水平方向についても、繰返し誤差 $1.08\mu\text{m}_p$ 、非繰返し誤差 $0.048\mu\text{m}2\sigma$ が得られた。

### 4.2 軸受剛性

次にスライダを浮上させた状態で、鉛直方向と水平方向に荷重をかけたときのスライダの変位から剛性を測定した。荷重1Nの範囲内ではほぼ線形的に変位し。線形近似して求めた剛性は、鉛直方向で $0.83\text{N}/\mu\text{m}$ 、水平方向で $0.24\text{N}/\mu\text{m}$ であった。同じ外形寸法を有する静圧空気ガイドの剛性が $70\text{N}/\mu\text{m}$ 程度である<sup>[12]</sup>ことと比較すると約1/100程度の剛性であり、さらなる改善を要する。

### 5. 制御を行った実験結果

図3に示す実験装置を用いてスライダの上下方向の位置をセンサで測定し、その位置情報をフィードバックすることによってスライダの上下方向位置決め制御を行った。サンプリング周波数は200Hzである。0.2 $\mu\text{m}$ ステップ位置決め時の制動時間は0.1s以下であり、定常状態での位置偏差も小さく、安定して浮上することがわかった。

次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100nm、40nm、20nmと徐々に小さく設定した結果を図5に示す。この実験装置ではA/D変換器の分解能が変位に換算して12nm程度であるが、より高分解能の変位センサ系を用いれば10nm以下の分解能の位置決めが可能になると推察される。

### 6. まとめ

スライダの4面拘束のための空気膜の発生を2台の超音波振動子で得る構造を持つ空気直動案内を試作した。非制御時において $1\mu\text{m}_p$ 程度の運動の真直度が得られた。また20nm程度の位置決め分解能を確認した。

本研究は御器谷科学技術財団および東海産業技術振興財団の助成金にて行われた。記して謝意を表す。

### 文献

[1] T. G. Bifano and T. A. Dow, *Optical Engineering*, 24, 5 (1985) 888.  
 [2] 野村武彦, 金井彰, 宮下政和, 精工誌, 53, 7 (1987) 1104.  
 [3] 渡辺一郎, 青山尚之, 下河辺明, 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, 阿武芳朗, トライボロジスト, 36, 7 (1991) 543.  
 [6] 吉本成香, 阿武芳朗, 精密工学会誌, 58, 3 (1992) 527.  
 [7] 磯部浩巳, 久曾神煌, 小島茂, 精密工学会誌, 65, 3 (1999) 438.  
 [8] 大岩孝彰, 松田 滋, 松田 孝, 日本機械学会第75期通常総会講演論文集 (IV), 250 (1998)  
 [9] 大岩孝彰, 加藤雅也, 第15回電磁気力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集, 529-534 (2003)  
 [10] T. Oiwa and M. Kato: *Review of Scientific Instruments*, (in press).

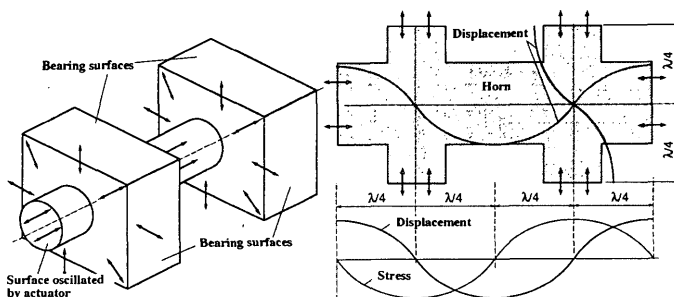


Fig. 2 Directional convertor or horn

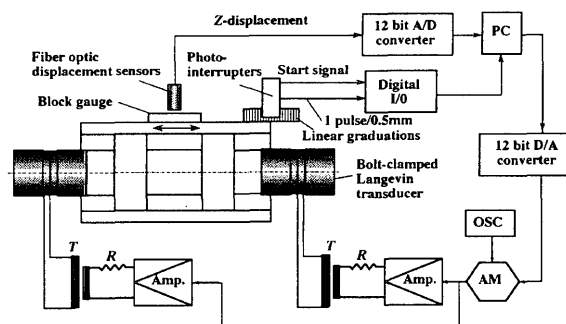
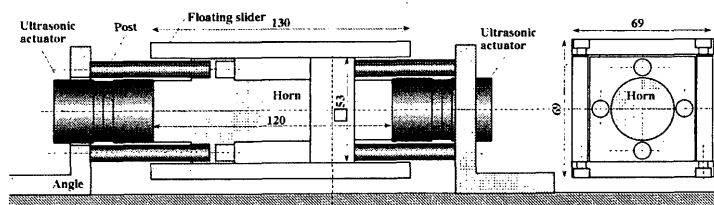


Fig. 3 Experimental setup of active air guide using ultrasonic actuators

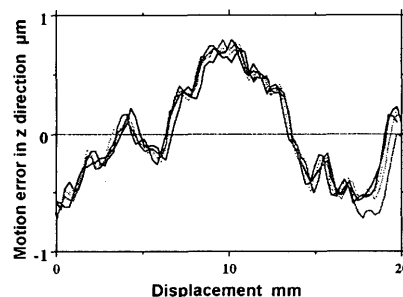


Fig. 4 Measured motion error in z direction

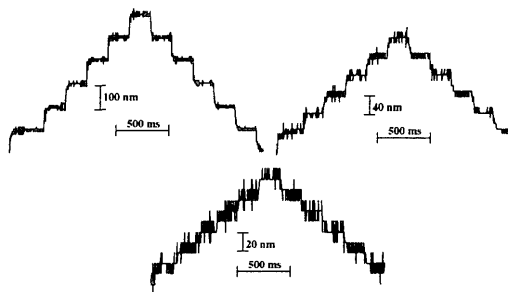


Fig. 5 100-, 40-, and 20-nm step responses

[11] 伊藤勝彦, 森 栄司, 日本音響学会誌, 29, 5, 307-314 (1973)  
 [12] 精密位置決めユニットカタログ, 日本精工株式会社, (2001)