

8 条リニアボールガイドの運動特性

第 1 報 走り真直度、剛性、等速度、微小ステップ駆動試験の結果

THK 株式会社 ○柴田 均、二見 茂、大橋 智史、瀧澤 弘幸

Motion properties of eight-groove linear ball guides

1st report: Measurements of straightness, rigidity, constant velocity moving and minute step response

THK Co., Ltd. Hitoshi SHIBATA, Shigeru FUTAMI, Tomofumi OHASHI and Hiroyuki TAKIZAWA

We developed eight-groove ball guides and measurement tests of motion properties of the guides were carried out. The results of the tests were reported in this paper. The straightness was less than $0.3\mu\text{m}$ for a 300mm stroke movements. The rigidity was measured as $1.67\text{kN}/\mu\text{m}$ and this value is larger than roller bearings. In constant velocity tests, the deviations of velocity was less than $\pm 0.04\%$ at 10mm/s velocity and the position error was less than $\pm 3.5\text{nm}$. This regulation of velocity is equal as an air bearing. The response was completely followed to the reference in case of one nanometer step. Response and the rise time was less than 10ms.

1. 緒言

位置決めテーブルの案内部品としてリニアボールガイドを用いるとき、LMガイドブロックとボールの相対位置が周期的に変化することで力のバランスが不均一となり、それに伴い細かな姿勢変化や振動が発生する。この振動を玉通過振動（以下ウェービング）と呼んでいる。

半導体や検査装置などの分野で特に高精度が要求される装置ではウェービングを小さくするため、主に静圧案内が使用されている。しかし、組み立ての容易さや付帯設備のコスト面から高精度な（ウェービングを抑制した）リニアボールガイドの要求があり、それに応えるべく 8 条リニアボールガイドを開発した。

静圧案内の場合、転動体に相当する部分が分子レベルまで極小化された限りなく無限に近い転動体が移動していると考え、リニアボールガイドのようにテーブルの移動に伴って力のバランスが崩れることがないため、ウェービングが存在しない。

そこで高精度リニアボールガイドの開発は、ボール径を小径化してウェービングを向上させ、玉条列数を一般的な 4 条列から 8 条列に増やして定格荷重の低下を補おうというコンセプトのもとで行われた。図 1 に 8 条リニアボールガイドの外観図を示す。

ボールはレールとブロックの間で転がる。またそこで生じる弾性変形により「平均化効果」が働き誤差が吸収され、高精度な運動が実現できる。

本報告では 8 条リニアボールガイド単体の走り真直度、剛性の計測結果およびリニアモータを駆動源として 8 条リニアボールガイドを案内とした 1 軸ステージを用いた、等速度試験、微小ステップ駆動試験、超低速駆動試験結果を報告する。

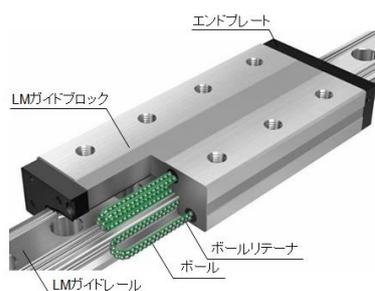


図 1. 8 条リニアボールガイド外観図

2. 走り真直度

走り真直度のデータを図 2 に示す。

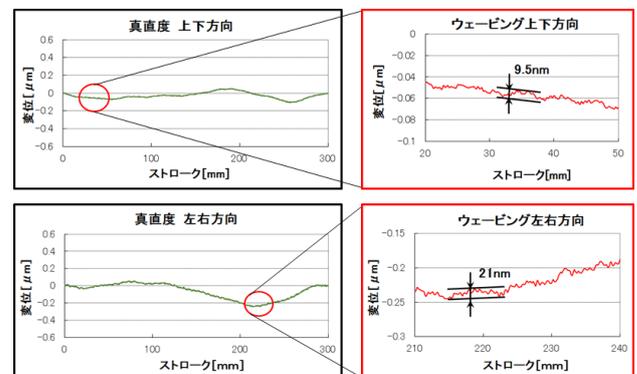


図 2. 8 条ガイドの走り真直度

上下、左右の両方向で 300mm ストロークに対して $0.3\mu\text{m}$ 以下となった。ウェービングは上下方向が 9.5nm、左右方向が 21nm と非常に小さい値となった。

これらの値は静圧案内に匹敵する特性である。

3. 剛性

ラジアル剛性は $1.67\text{kN}/\mu\text{m}$ 、逆ラジアル剛性は $1.15\text{kN}/\mu\text{m}$ であった（図 3）。これらの剛性値は標準のローラガイド（当社比）よりも大きい。

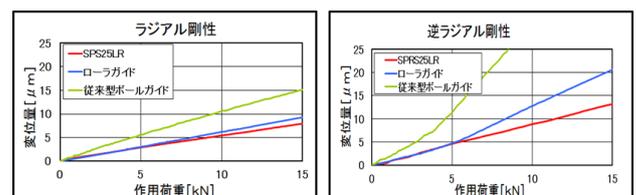


図 3. 8 条ガイドの剛性

4. 実験システム

図4に実験で使用した位置決めシステムを示す。コア付きリニアモータの可動子をテーブルに設置し、2本の8条リニアボールガイドによりテーブルを案内している。リニアモータは独自のコア構造により電機子と永久磁石の間の磁気吸引力が非常に小さく、最大推力は350Nである。また、リニアエンコーダの最小分解能は0.0315nmである。

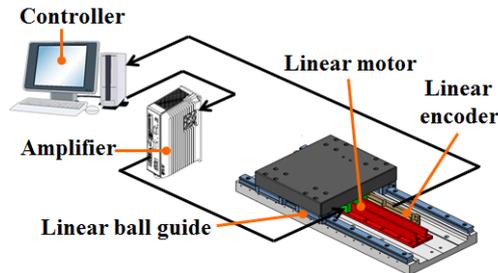


図4. 位置決めシステム

5. 等速度試験

アクティブ除振された石定盤上に直接 LM ガイドレールを固定し、セラミックのテーブルを用いて駆動した。

10mm/s の定速度で送ったときの速度変動率と位置偏差を図5に示す。測定周波数は1kHzである。速度変動率は $\pm 0.04\%$ 以下であり、位置偏差は $\pm 3.5\text{nm}$ 以下であった。これらの値は従来のリニアボールガイドでは実現できない値であり、静圧案内に匹敵する性能である。

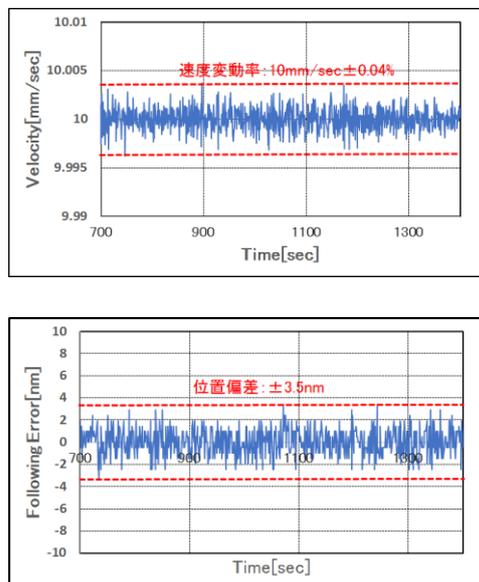


図5. 等速駆動時(10mm/sec)の速度変動と位置偏差

6. 微小ステップ駆動試験

固有振動数が約1.3Hzの空気ばね式防振台にステージを固定し、テーブルは厚さ45mmのアルミで構成した。

ステップ幅を1nmとして、0.5秒毎に正方向に5段、負方向に10段、さらに正方向に5段駆動させた位置データを図6に示す。

指令に対する遅れが小さく、停止時の位置偏差も小さい。

立ち上がり時間は約10msであった。8条リニアボールガイドは1ナノメートルの指令に完全に追従しており、方向反転時のバックラッシュも皆無である。ミリメートル長以上の長ストローク位置決めもナノメートル位置決めも同じサーボ系かつ同一の制御ゲインで実現できたことも特筆すべき点である。

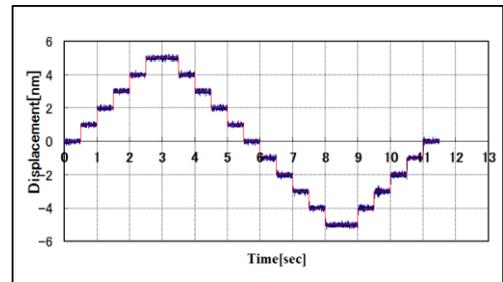


図6. 微小ステップ(1nm)駆動

7. 超低速(1nm/sec)駆動試験

微小ステップ駆動試験と同様の装置を用いて超低速(加速時間=10ms、速度=1nm/secの台形速度パターン)で駆動した結果を図7に示す。測定周波数は16Hzとした。開始から10秒間、ストローク10nmのデータを見ると $\pm 1.5\text{nm}$ 以内の偏差で追従しているのがわかる。

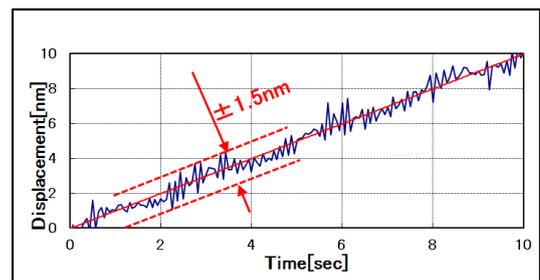


図7. 超低速駆動時(1nm/sec)の位置偏差

8. 結論

高精度リニアボールガイドとして8条リニアボールガイドを開発し、運動特性を計測する試験を行い、次のことがわかった。

走り真直度は $0.3\mu\text{m}/300\text{mm}$ 、ウェービングは上下方向が 9.5nm 、左右方向が 21nm であった。剛性はラジアル方向が $1.67\text{kN}/\mu\text{m}$ 、逆ラジアル方向は $1.15\text{kN}/\mu\text{m}$ であった。

等速度試験では送り速度10mm/sのとき速度変動率は $\pm 0.04\%$ 以下、位置偏差は $\pm 3.5\text{nm}$ 以下であった。

1ナノメートルステップ応答試験では指令に完全に追従した応答を示し、立ち上がり時間は10msであった。

1nm/sの超低速駆動試験では偏差が $\pm 1.5\text{nm}$ 以内で追従した。

総合的な評価としては、静圧案内に匹敵する性能であると考えられる。

参考文献

- 1) THK : カタログ No. 362-3
- 2) Hirofumi SUZUKI, Hitoshi SHIBATA, Shigeru FUTAMI and Hideaki IWANAKA : A Rolling Ball Guide Making Possible Multi-Step Nanometer Positioning And High Speed Positioning Continuously In A Long Stroke Stage, Proceedings of 6th International Conference on Positioning Technology, Kitakyushu, Japan; November 18-21, 2014