

# 8条リニアボールガイドを用いた送り駆動系における 微小円弧運動時の摩擦特性と象限突起の関係\*

大橋智史\*\* 柴田 均\*\*\* 岸 弘幸\*\*\* 二見 茂\*\* 佐藤隆太†

Relationship between Friction Behavior and Quadrant Glitch in Microscopic Circular Motions  
of a Feed Drive System with Eight Grooved Linear Ball Bearing System

Tomofumi OHASHI, Hitoshi SHIBATA, Hiroyuki KISHI, Shigeru FUTAMI and Ryuta SATO

This paper experimentally and theoretically investigates the relationship between the nonlinear spring behavior (NSB) of linear ball guide and the quadrant glitch in microscopic circular motions. A high precision stage which has nanometer resolution consists of eight grooved linear ball guides and a linear motor is developed for the experiments. Microscopic circular motion tests are carried out to investigate the quadrant glitches in the region. The experimental results suggest that the shape of the quadrant glitches depend on the radius of the circle. It is also suggested that the height of quadrant glitches depend on the frequency of the motion. Relationship between the shape and height of quadrant glitches and NSB of the linear ball guides has theoretically analyzed based on the simplified NSB model. The theoretical model can adequately explain the actual behaviors. Influence of the ball retainer and preload conditions on the NSB are also investigated. It is confirmed that the ball retainers significantly influences the NSB.

**Key words :** feed drive system, linear ball guide, nonlinear spring behavior, quadrant glitch, circular motion

## 1. 結 言

送り駆動系は数値制御工作機械や半導体製造装置などの性能を支配するといっても過言ではなく、使用される案内内部品の運動精度が重要となる。精密工学会の超精密位置決め専門委員会で行なわれたアンケート調査によると、装置に使用されている案内内部品のうち、転がり案内が占める割合は年々増加しているという結果が報告されている<sup>1)</sup>。

リニアボールガイド (Linear Motion Ball Guide : LMBG) は、キャリッジに転動体の循環機構を有しており、これにより長ストロークの案内を実現している。しかし、転動体の循環するタイミングで負荷軌道内の力の分布が変化し、LMBGのキャリッジに姿勢変化が生じる。この姿勢変化はウェービングと呼ばれ、LMBGの運動精度を低下させてしまう。このため、要求精度の高い分野では、LMBGよりも静圧流体案内が使用されることが多い。

8条リニアボールガイドSPS(THK)<sup>2)</sup>は、超精密分野向けに開発されたLMBGである。通常4条である転動溝の条列数を8条とし、転動体の小径化とキャリッジの長尺化を行うことで負荷軌道中のボール数を増やしている。この結果、転動体循環時の負荷軌道内の力の分布の変化を抑制し、低ウェービングを実現している<sup>3,4)</sup>。しかし、8条リニアボールガイドの微小変位領域での特性に関する調査は、未だ十分ではない。

転がり案内には、運動反転時などの転がり案内の転動体が停止状態から転がりに遷移する際に発生する非線形ばね特性 (Nonlinear Spring Behavior : NSB) が存在することが知られており、同時に、追従誤差に起因する象限突起と呼ばれる現象が発生することも知られている。この象限突起は、輪郭制御にお

いてその輪郭精度を低下させる一因となり、これを抑制する手法について数多く研究が行われてきた。これらの研究の多くは10mm以上の半径で行われており、駆動系にはボールねじを用いたものが多い<sup>5-11)</sup>。また、転がり案内のNSBについての研究も多くなされている<sup>12-16)</sup>。この二つの現象の間には、密接な関係があると考えられているが、この定量的な考察について多くは行われていない。

本研究では、8条ボールガイドの微小運動での特性を明確にするために、これを用いた送り駆動系を使った半径1mm以下の微小円運動の実験を行い、そのとき発生する象限突起の評価を行った。LMBGのNSBは0.1mm以下の変位領域で見られる現象であることから、半径1mm以下の円運動における挙動を評価することが、NSBと象限突起との関係を明確にする上で適切であると考えられる。いくつかの微小円運動における象限突起の測定結果から、象限突起の発生原理について理論的な考察を行うとともに、LMBGの設計因子が微小運動時の挙動に及ぼす影響を明確にするため、いくつかの異なる条件でNSBと象限突起の測定を行ったので報告する。

## 2. 実験装置

本研究で実験を行った送り駆動系を図1に示す。本研究において最も重要な機構要素はLMBG (THK SPS25)<sup>2)</sup>である。これは8条ガイドであり (通常のガイドでは4条)、ボールリテーナ付きである。ただし5章と6章の実験の一部はボールリテーナを取り除いて行った。キャリッジはテーブルの四隅に配置されている。接触ボール数の合計は約2000個である。SPS25の外観斜視図を図2に、SPS25の断面図と概略寸法図を図3に、代表寸法を表1に示す。

ボールリテーナの構造を図4に示す。ボールリテーナは樹脂製のスペーサがバンドにより連結された構造となっており、スペーサの間にボールが保持される。ボールリテーナの有無

\* 原稿受付 平成 29 年 2 月 16 日

掲載決定 平成 29 年 5 月 17 日

\*\* 正 会 員 THK 株式会社 (東京都大田区東糀谷 4-9-16)

\*\*\* THK 株式会社

† 正 会 員 神戸大学大学院 (兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

によるLMBG内部でのボールの動きを図5に模式的に示す。ボールリテーナが無い場合、循環部分では、ボールは後ろのボールに押されることにより進むため、ボールは千鳥状に並ぶ。また、負荷領域に進入する際はボール同士の間隔が一意に定まらず、ボール同士が金属接触をする場合もあれば、隙間が開く場合もある。ボールリテーナを用いた場合、ボールの間にスペーサが存在するため、ボール同士の金属接触は発生しない。また、ボールリテーナによりボールは整列させられるため、循環部、負荷部に関わらずボールの一定の間隔が保たれる<sup>17)</sup>。

モータはコア付きリニアモータ(KOVERY社製)であり、独自のコア構造によりコギング力は小さく、固定部と可動部との間の磁気吸引力も非常に小さい<sup>18)</sup>。最大推力は350Nである。このACモータをリニアアンプで駆動し、電流指令はコントローラから18bitのDAコンバータを介して与える。位置検出にはリニアエンコーダ(Heidenhain LIP281)を用い、位置の検出分解能は31.25 $\mu$ mである。

本実験装置の制御系のブロック線図を図6に示す。位置はP制御、速度はPI制御であり、位置指令の微分値に基づく速度フィードフォワード制御を行う。制御パラメータは、位置比例ゲイン  $K_p$  を1,200 1/s, 速度比例ゲイン  $K_v$  を270 1/s, 速度積分時間  $T_i$  を6.25 ms, フィードフォワードゲイン  $\alpha$  を1(100%)と設定した。本制御系は極めて高ゲインであることが特徴であるが、振幅1mm以下、かつ周波数1Hz以下の正弦波駆動の場合、本実験装置では安定に動作した。

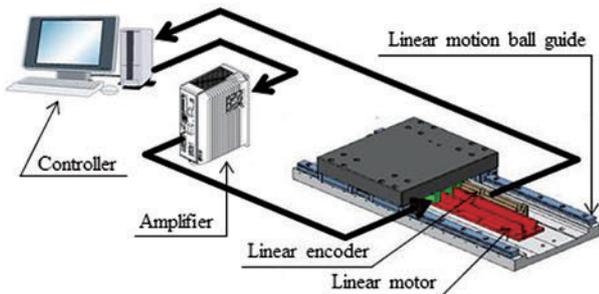


Fig. 1 Configuration of the experimental system

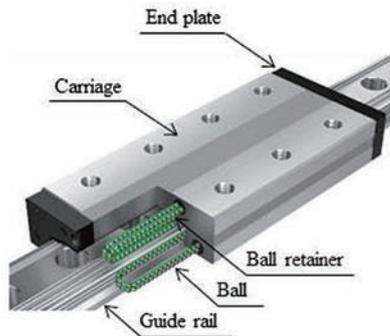


Fig. 2 Perspective view of SPS25<sup>2)</sup>

Table 1 Measurement table of SPS25<sup>2)</sup>

Note	Dimension mm	Note	Dimension mm
M	31	W1	35
K	26.5	W2	18.5
H3	4.5	L	180.1
W	72	L1	158.1

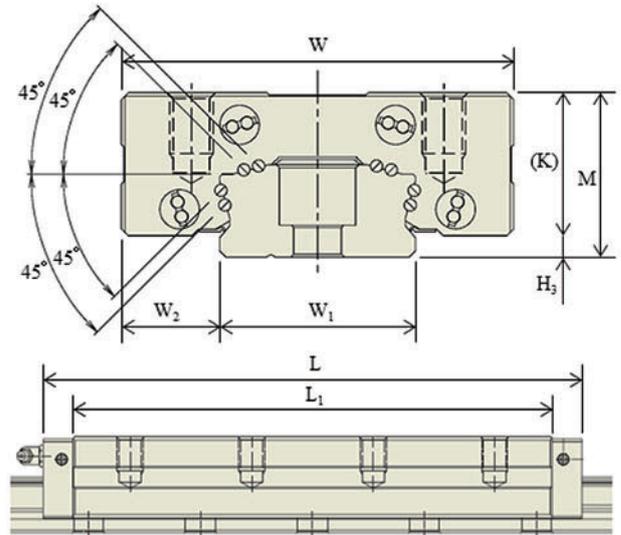


Fig. 3 Cross section view and outline dimensional drawing of SPS25<sup>2)</sup>

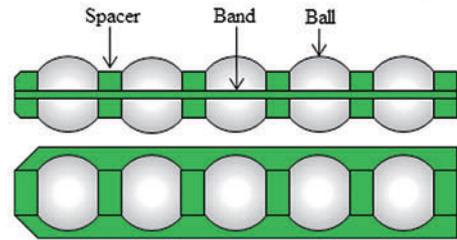


Fig. 4 Structure of ball retainer

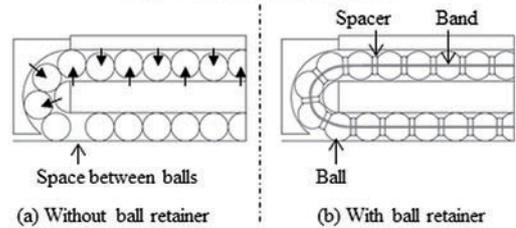


Fig. 5 Comparison of ball behavior of with/without a ball retainer

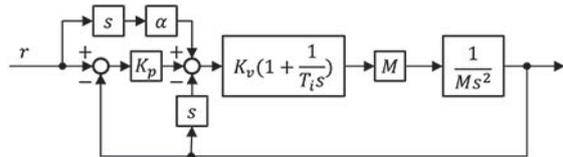


Fig. 6 Block diagram of the control system

### 3. 微小往復運動時の挙動

同時2軸制御運動である円運動では、各軸は正弦波往復運動を行う。正弦波往復運動を指令したときの応答を図7および図8に示す。図7中の破線はリニアエンコーダにより測定されたテーブル変位、赤線は位置指令とテーブル変位との差として求められる位置偏差である。この位置偏差が、円運動における象限突起となる。図7にみられる時刻ゼロにおける大きな位置偏差は初期条件の不一致によるものである。

図7における往復運動の周波数は0.1Hzであり、図7(a)は振幅を10 $\mu$ m, (b)は100 $\mu$ m, (c)は1mmとした場合の結果である。図によると、振幅の大きさにより位置偏差の形と大きさが大きく変化することがわかる。往復運動の振幅が大きくなるにつれ位置偏差も大きくなり、形が急峻になっている。いずれのグラフも2周期分の波形を表示しており、応答の繰返し性は十分に高いことがわかる。

往復運動の振幅を100μmに固定し、周波数を0.01, 0.1, 1Hzと変化させたときの3つの位置偏差を重ね合わせて表示した結果を図8に示す。図の横軸は往復運動の位相角 ( $\theta = \omega t$ ) とし、図の縦軸については位置偏差を往復運動の周波数で除した値としている。図によると、3つの位置偏差の波形は、時刻ゼロにおける応答を除いて一致している。

以上の結果から、正弦波往復運動を行ったときの位置偏差の波形について次のことが言える。

- i) 波形の繰返し性は十分に高い。
- ii) 波形は往復運動の振幅に依存して決まる。
- iii) 偏差の大きさは周波数に依存する。

振幅1mm, 周波数0.1Hzとしたときの偏差の極座標表示を図9に示す。図は、図7(c)の測定結果について、位相を90度ずらした波形をそれぞれX軸とY軸として円弧表示し、半径偏差を1000倍に拡大して表示している。図9の結果について、横軸を円弧回転角、縦軸を半径偏差として表示したものは図7(c)と同じであるため、本研究では、1軸で正弦波往復運動を行った結果から位置偏差を求めた結果を象限突起として評価することにした。

4. 象限突起の発生原理

LMBGなどの転がり案内内では、転動体が停止状態から転がり始めるまでに、転動体自身の変形による非線形ばね特性 (NSB) が存在することが知られており、このNSBは微小変位領域での運動特性に影響を及ぼすことも知られている<sup>12)</sup>。象限突起の発生にも、NSBが密接に関係している<sup>8)9)</sup>。しかしその関係の定量的な考察はほとんどなされていない。本章ではNSBと象限突起との関係を考察する。

NSBの測定結果の例を図10 (a)に示す。本研究では、これを式(1)に示す一次遅れ系として近似する。式(1)を変位と力の関係として表示すると図10 (b)となる。

$$f_d(x) = \begin{cases} 2 \cdot f_m \cdot \left( \frac{1}{2} - \exp\left(-\frac{x}{L}\right) \right) & \text{if } v(t) \geq 0 \\ -2 \cdot f_m \cdot \left( \frac{1}{2} - \exp\left(\frac{x}{L}\right) \right) & \text{if } v(t) < 0 \end{cases} \dots\dots\dots(1)$$

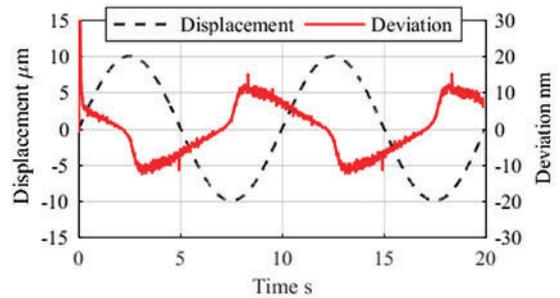
ここで、 $x$ は運動方向反転位置からの変位、 $f_m$  はNSBの定常転がり抵抗、 $L$  はNSBの代表長さである。式(1)で示されるNSBの $x=0$ での微係数は $2 \cdot f_m/L$ となり、 $L$ によりNSBの運動反転時の勾配が決定する。 $L$ が大きければ運動反転時のNSBの立ち上がりはなだらかになり、 $L$ が小さければ急峻になる。

外乱力が加わる位置制御系は、図11 (a)のブロック線図で表される。ブロック線図の等価変換を行うことで、図11 (b)に示すように、力外乱を位置応答に対する外乱に置き換えて考えることができる。外乱力とこれにより生ずる位置偏差との関係は、式(2)のように表される。

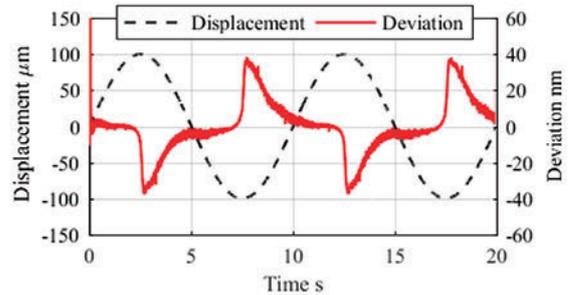
$$d = \frac{T_i s}{K_p K_v M (1 + T_i s)} f_d \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $T_i = 6.25$  ms, 往復運動の周波数は最大1Hzであるので、 $|s| = |j\omega| \leq 2\pi$ であり、 $T_i \omega \ll 1$  であるから、式(2)は式(3)のように近似できる。

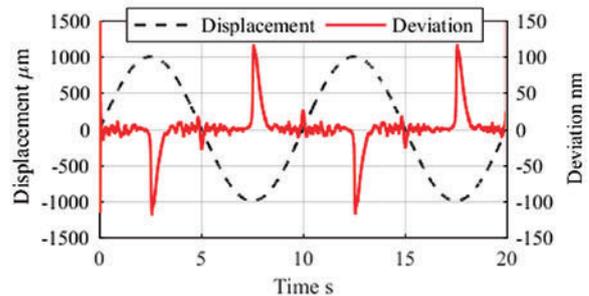
$$d \doteq \frac{T_i s}{K_p K_v M} f_d \dots\dots\dots(3)$$



(a) 10 μm amplitude



(b) 100 μm amplitude



(c) 1 mm amplitude

Fig. 7 Displacement and deviation under sinusoidal motion with 0.1 Hz

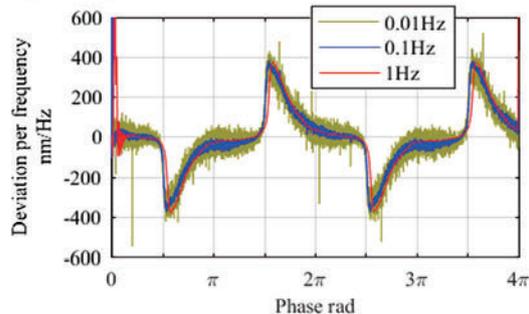


Fig. 8 Comparison of positional deviations under sinusoidal motions with 0.1 mm amplitude

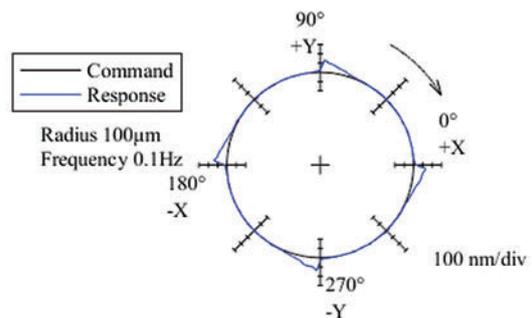


Fig. 9 Polar representation of positional deviation

式(1)ではNSBを時間関数でなく変位 $x$ の関数で表現している。このため、式(1)を式(4)の時間関数に変形し、これを式(3)に代入する。

$$\begin{aligned}
 d(t) &= \frac{T_i}{K_p K_v M} \cdot \frac{d}{dt} f_d(x) \dots\dots\dots(4) \\
 &= \frac{T_i}{K_p K_v M} \cdot \frac{d}{dx} f_d(x) \cdot \frac{dx}{dt} \\
 &= \frac{T_i}{K_p K_v M} \cdot v(t) \cdot \frac{d}{dx} f_d(x)
 \end{aligned}$$

ここで、 $v(t)$ はテーブルの速度である。これに式(1)を代入することで、以下の式(5)を得る。

$$d(t) = \frac{T_i}{K_p K_v M} \cdot \frac{f_m}{L} \cdot v(t) \cdot \exp\left(-\frac{x}{L}\right) \dots\dots\dots(5)$$

時計回り円運動の第3象限を考えると、変位 $x$ と速度 $v$ は式(6)により表現できる。

$$\begin{aligned}
 x(t) &= R \cdot (1 - \cos \omega t) \dots\dots\dots(6) \\
 v(t) &= \omega R \cdot \sin \omega t
 \end{aligned}$$

式(6)を式(5)に代入すると以下の式(7)となる。

$$d(t) = \frac{T_i}{K_p K_v M} \cdot f_m \omega \cdot \frac{R}{L} \cdot \sin \omega t \cdot \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot (1 - \cos \omega t)\right) \quad (7)$$

式(7)は位置偏差の大きさを決定する部分(式(8))とその形状を決定する部分(式(9))の二つに分けることができる。

$$d_{amp}(\omega) = \frac{T_i}{K_p K_v M} \cdot f_m \omega \dots\dots\dots(8)$$

$$d_{shape}\left(\frac{R}{L}, \theta\right) = \frac{R}{L} \cdot \sin \theta \cdot \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot (1 - \cos \theta)\right) \dots\dots\dots(9)$$

なお、式(9)では $\theta = \omega t$ としている。

式(8)によると、象限突起の大きさは、

- i) 周波数に比例する。
- ii) 定常摩擦力に比例する。
- iii) 被駆動体質量に反比例する。
- iv)  $T_i$  に比例し  $K_p$  および  $K_v$  に反比例する。

ことがわかる。

象限突起の形状について考える。 $R/L$  を2, 10, 250としたときの式(9)を、位相角 $\theta$ を横軸にしたグラフに示すと、図12のようになる。ここで、図12の横軸の位相角は、象限切替位置からの角変位に相当する。 $R/L$ が小さければ位置偏差の角度範囲は広くなり、 $R/L$ が大きくなるとその角度範囲は小さく急峻な形状になることがわかる。 $L$ は案内機構のNSBにより決まる値であると考え、象限突起の形状は、周波数が一定すなわち円運動の角速度が一定であれば、円運動の半径 $R$ により決定されることになる。

以上のように、本章で説明した象限突起の発生に関する考察は、第3章の実験結果から確認された象限突起の特徴と完全に一致していることがわかる。また、文献8)および9)に見られるような、円運動の半径を0.1mmとした場合の象限突起が1/8円周上にわたって存在していることも説明される。

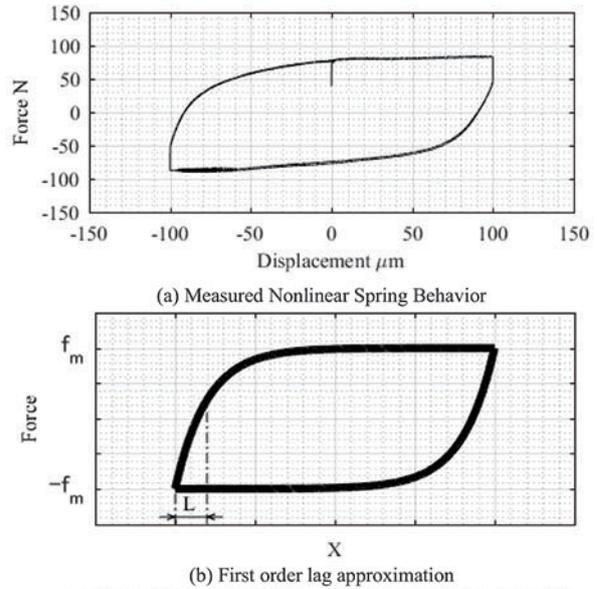


Fig. 10 Simplified expression of Nonlinear Spring Behavior

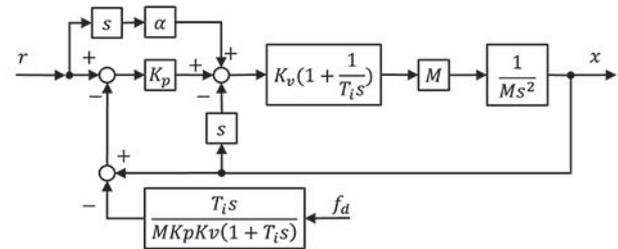
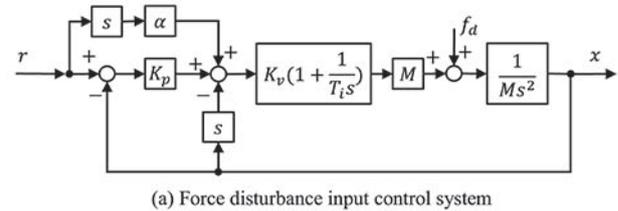


Fig. 11 Conversion force disturbance to displacement one

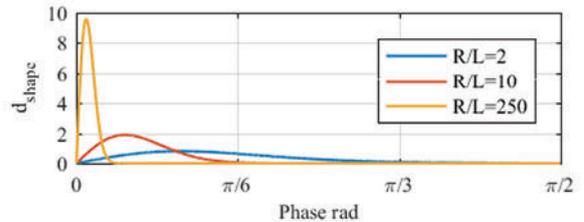


Fig. 12 Calculated quadrant glitches by using the theoretical equation

CN	Ball retainer with / without	Ball size big / small
1	with	big
2	with	small
3	without	big

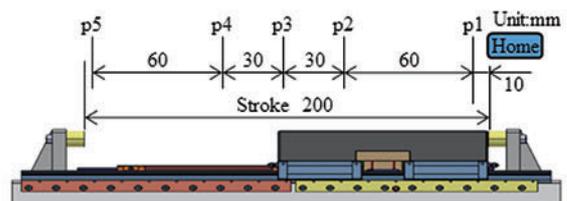


Fig. 13 Measurement positions of NSB

5. 非線形摩擦特性に影響を及ぼす因子

5.1 実験条件

象限突起の生成にはNSBが影響し、象限突起の形状と振幅がどのように決定されるかについて前章で説明した。それによると、NSBの特性が象限突起の大きさや形状に影響を及ぼす。そこで、LMBGの設計パラメータがNSBや微小運動時の挙動に対してどのような影響を及ぼすか実験的に調査した。

実験では、予圧（ボールサイズの大小）とボールリテーナの有無の違いによる影響について調査した。予圧については、リテーナ有の場合でのキャリッジ単体の転がり抵抗が8N程度となるボールサイズを大、3N程度となるボールサイズを小と称する。そのときのボールの半径差は約1 $\mu$ mである。3通りの実験条件を表2に示す。それぞれの条件で、NSBと象限突起の測定を行った。NSBについては、位置による影響も確認するため、図13に示す5箇所測定を行った。

なお、本実験は基本的に2章で示した制御ゲインの設定にて行っているが、CN3の位置ゲイン $K_p$ のみ2000 1/sと変更している。

5.2 実験結果

5.2.1 非線形ばね特性(NSB)

非線形ばね特性の測定結果を図14に示す。正弦波運動の振幅を100 $\mu$ m、周波数を0.1Hzとした場合の結果である。NSBは力と変位の関係であるので、縦軸をモータ推力、横軸をリニアエンコーダから得られる位置情報としている。本実験装置では電流アンプの応答は十分高速であると考え、推力指令=モータ推力としている。図によると、転がり抵抗の最大値は、CN3 > CN1 > CN2の順となった。CN1とCN2の差は、ボールサイズ（予圧）の変更による影響である。CN1とCN3では、リテーナ無とすることで接触ボール数が1割程度増えることと、ボールの整列性が失われることに起因し、転がり抵抗が大きくなったためと考える。また、リテーナ無の場合には、運動方向反転時のばね定数が大幅に大きくなった（NSBの立ち上がりが急峻、つまり代表長さ $L$ が小さい）。この原因は、負荷領域のボールの金属接触が転動面のみでなく隣接するボールとも発生したためと考えられる。図14によると図(a)と(b)のリテーナ有の場合と比べて、図(c)のリテーナ無の場合のほうが測定位置による違いが大きい。これは、リテーナ無の場合にはボール間の接触状態のばらつきが大きいことによると考えられるが、そのことを明確に検証するには至っていない。

リテーナ無の場合の結果である図(c)では、図15<sup>12)</sup>に示すように、線形ばね特性を示す第1領域から転がりと滑りが混在する第2領域へと遷移する際の力が、第3領域での定常摩擦力に比例して変化しており、NSBの形が測定位置によって大きくばらついている。第1領域のばね定数（立ち上がりの勾配）についても、図15の第3領域での定常摩擦力に比例的に変化する傾向がみられた。

図16はストローク中心(p3)における条件CN1, CN2, CN3のNSBの測定結果である。図によると、リテーナの有無による影響が大きいことがわかる。

5.2.2 象限突起

正弦波往復運動中の位置偏差の測定結果を図17に示す。図は、正弦波運動の振幅を100 $\mu$ m、周波数を0.1Hzとした場合の結果である。図17 (b)に第三象限から第四象限にかけての、方向反転前後の位置偏差の時間軸を拡大した図を示す。位置

指令の方向 反転は、図中に1点鎖線で示す7.5sとなる。7.5s以前に緩やかな位置偏差の増加が確認できるが、これは運動方向反転前に起こっており、象限突起と異なる位置偏差である。この現象の発生原因は、現時点では判明していない。象限突起のピーク値はCN1が38nm, CN2が33nm, CN3が98nmであった。象限突起はリテーナ無の場合（条件CN3）が一番大きく、また立ち上がりが急峻であることがわかる。これは、摩擦力の

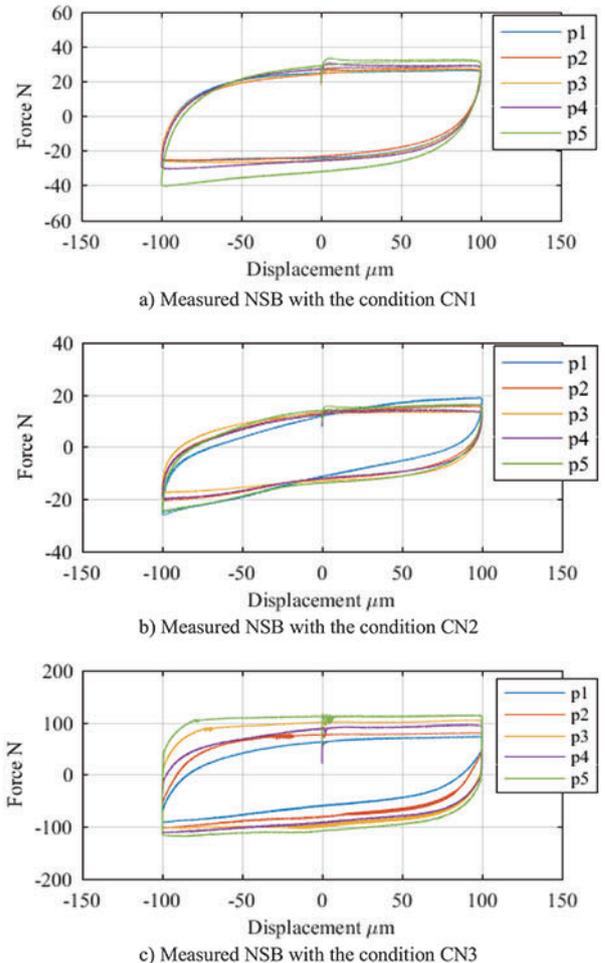


Fig. 14 Comparison of measured Nonlinear Spring Behaviors (NSB)

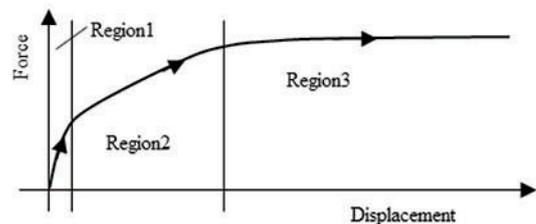


Fig. 15 Schematics of the Nonlinear Spring Behavior of a linear ball guide without ball retainer<sup>12)</sup>

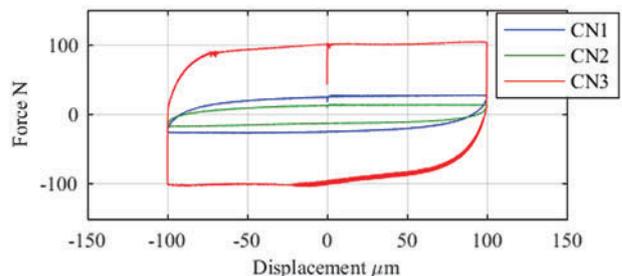


Fig. 16 Measured nonlinear spring behaviors for the three condition (CN1,CN2 and CN3) at the center of the stage

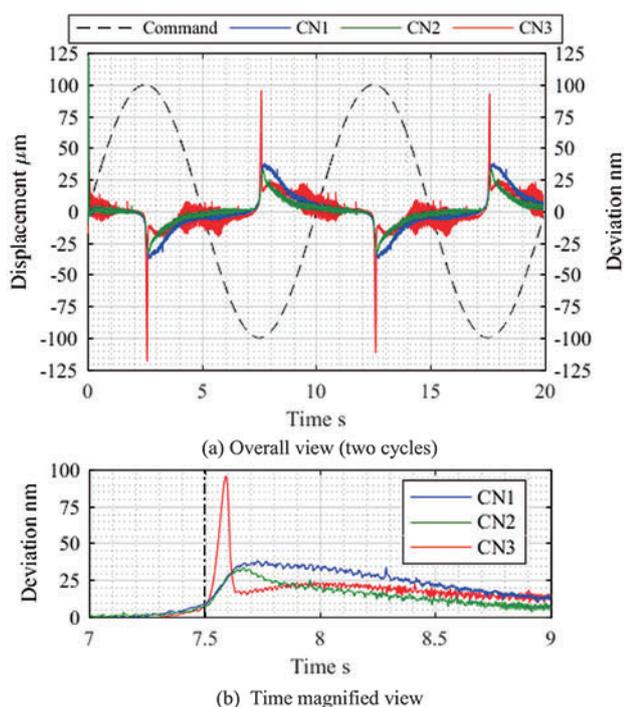


Fig. 17 Comparison of positional deviations for different NSBs

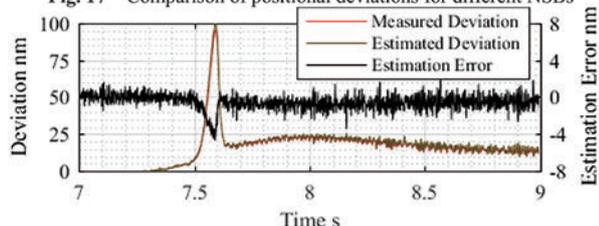


Fig. 18 Comparison of measured and estimated deviation (CN3)

立ち上がりが急峻で代表長さ $L$ が小さく、式(9)における $R/L$ の値が大きいためと考えられる。リテーナ有の場合には、ボールサイズの違いによる象限突起の大きさに有意な差はみられず、立ち上がりの挙動も似ていることがわかる。以上のことから、象限突起の振幅の大小は、NSBの第1領域の勾配が支配的であり、そのため、ボールサイズよりもリテーナ有無の影響が大きく現れ、ボールリテーナが無いと摩擦力の立ち上がりが急峻でNSBの代表長さ $L$ が小さくなり、急峻な象限突起が生じるといえる。

### 5.3 象限突起発生原理の実験的確認

前節の実験条件では、加速度の最大値は $3.95 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ となり、加速に必要な推力は $0.89 \text{mN}$ と非常に小さい。対して最も定常転がり抵抗 $f_m$ が小さいCN2で、 $f_m$ は $20 \text{N}$ 程度である。つまり、モータの発生推力 $f$ は外乱力 $f_a$ の補償にそのほとんどを使用しているため、 $f=f_a$ と考えて差し支えない。4章ではNSBが時間軸を持たないことから式(2)を変形した式(4)に基づいて象限突起を求めているが、モータ推力の時間応答を用い、式(2)から直接位置偏差の推定を行った。最も応答が急峻であったCN3の位置偏差の測定結果と推定結果、および推定誤差について図18に示す。推定結果は実際の位置偏差と一致しており、本研究で提案した発生原理モデルの妥当性が確認できたと言える。

## 6. 結 言

本研究では8条ボールガイドの微小運動での特性を明確にするべく、これを用いた送り駆動系を構成し、この駆動系にて半径 $1 \text{mm}$ 以下の微小円弧運動の実験を行い、そのとき発生

する象限突起を評価した。また、LMBGの設計因子が微小運動に与える影響を明確にするべく、いくつかの異なる条件でNSBと象限突起の測定を行った。その結果、以下に示すことが明らかとなった。

- (1) リニアボールガイドの非線形ばね特性 (NSB) を一次遅れ系としてモデル化することで、象限突起の大きさと形状を理論的に計算できた。また、この考えに基づきモータの発生推力より象限突起の推定を行い、その妥当性を確認した。
- (2) 象限突起の大きさは、円運動の周波数と定常摩擦力に比例し、被駆動体質量に反比例する。
- (3) 象限突起の形状は、円運動の半径とNSBの代表長さの比により決まる。
- (4) リニアボールガイドのNSBには、予圧 (ボールサイズの大小) よりもリテーナの有無による影響のほうがより大きく現れる。
- (5) ボールリテーナがないと摩擦力の立ち上がりが急峻でNSBの代表長さ $L$ が小さくなり、急峻な象限突起が生じる。

本研究により、リニアボールガイドの非線形ばね特性と象限突起の大きさおよび形状との関係を定式化することに成功し、実験結果との比較によりその妥当性が確認された。今後、この成果に基づいた象限突起の補正方法を開発する予定である。

## 参 考 文 献

- 1) 大岩孝彰, 勝木雅英: 超精密位置決めにおけるアンケート調査-精密メカトロニクスと精密計測に関するアンケート-, 精密工学会誌, **81**, 10 (2015) 904.
- 2) THK: カタログ, 362
- 3) 高橋徹, 舟橋浩, 丹羽宏, 飯田勝也, 岸弘幸: 超高剛性/低ウェービングガイドに関する技術, 精密工学会誌, **76**, 6 (2010) 602.
- 4) 岸弘幸: 「超高剛性/低ウェービングガイドに関する技術」にまつわる話, 精密工学会誌, **76**, 6 (2010) 614.
- 5) Zamberi Jamaludin, Hendrik Van Brussel, and Jan Swevers: Friction Compensation of an XY Feed Table Using Friction-Model-Based Feedforward and an Inverse-Model-Based Disturbance Observer, IEEE Transaction on Industrial Electronics, **56**, 10 (2009) 3848.
- 6) 山崎敬則, 瀬戸将城, 堤正臣: 数値制御工作機械送り制御系の摩擦補償器の設計, 精密工学会誌, **66**, 11 (2000) 1781.
- 7) 海野徹, 森本喜隆, 市田良夫, 佐藤隆乃介: 摩擦力を考慮した円弧補間運動の実時間逆伝達関数制御, 精密工学会誌, **74**, 6 (2008) 616.
- 8) R. Sato: Generation Mechanism of Quadrant Glitches and Compensation for it in Feed Drive System of NC Machine Tools. Int. J. of Automation Technology, **62** (2012) 154.
- 9) 佐藤隆太, 寺島義道, 堤正臣: 微小変位領域の摩擦特性を考慮した象限突起補償, 精密工学会誌, **74**, 6 (2008) 622.
- 10) 松原厚: 精密位置決め・送り系設計のための制御工学, 森北出版株式会社 (2008) 185.
- 11) 樋口拓郎, 真鍋佳樹, 佐藤隆太, 堤正臣: NC 工作機械の運動精度向上に関する研究-トルク変化に対する自律形象限突起補償器の開発-, 精密工学会誌, **76**, 5 (2010) 535.
- 12) 二見茂, 古谷彰浩: AC リニアモータと転がり案内を用いたナノメートル位置決め(第2報)-転がり案内のトライボロジー-, 精密工学会誌, **57** (1991) 1808.
- 13) 大塚二郎, 青木一平, 石川智海: 転がり要素の非線形ばね特性の研究(第1報)-簡易測定法-, 精密工学会誌, **66**, 6 (2000) 944.
- 14) 鶴田和寛, 村上輝夫, 二見茂: 転がり案内における速度反転時の非線形摩擦挙動, 精密工学会誌, **69**, 12 (2003) 1759.
- 15) 遠藤弘樹, 丸井悦男: 微小変位領域における転がり摩擦に関する基礎研究(第5報)-荒さモデル状を転がる頃の転がり摩擦特性-, 精密工学会誌, **67**, 12 (2001) 2016.
- 16) 田中淑晴, 大岩孝彰, 大塚二郎, 恩田一: 精密位置決めのためのリニアボールガイドに関する研究-非線形ばね領域の静特性から動特性を推定する方法-, 精密工学会誌, **73**, 3 (2007) 350.
- 17) THK: 技術資料, 268-2.
- 18) 金 弘中: ユニークなコア構造で磁気吸引力を相殺した新しいリニアモータの提案とサブナノメートル位置決め精度の実現, 精密工学会超精密位置決め専門委員会前刷り集, 2013-4 (2013) 35.