直動ボールガイドシステムの精度平均化効果に関する研究*

清水 茂 夫**

Study on Accuracy Average Effect of Linear Motion Ball Guides System

Shigeo SHIMIZU

In this paper, the accuracy average effect of LMBG system is intended to verify by an experiment using the X-table composed of four guide blocks and two rails. One of the rails is used as a reference rail and the other is bent by a wedge-shaped loading unit to forcedly apply a misalignment towards the z-axis, which intersects with x-axis at a horizontal plane. The shape of misaligned rail is measured against the reference rail and then the X-table is traveled over the misaligned rail portion. The y, z displacement, pitching, rolling and yawing angle are measured by means of six electric micrometer sensors, which are attached to the X-table and set against two straight edges. These are also laid parallel to the X-table and aligned with the reference rail in the horizontal and vertical plane, respectively. The measurements are carried out by giving the preloads with assembling various over size balls into the guide blocks and by applying various misalignments to the rail. The followings are the reached conclusions. (1) The accuracy average effect of LMBG system is increased in accordance with the increase in the preloading. (2) The good agreements are obtained between the experiments and theories, but in most cases the former are greater than the latter in the average effects. One can think that this reason is mainly due to the load distribution theory of LMBG system, which is ignored the elastic deformations of the guide block jaws, and is only considered the Hertzian deformations of balls between the blocks and rails.

Key words: linear motion ball guide, accuracy average effect, misalignment, preloading

1. ま え が き

前2報では、工作機械のXテーブルを想定してLMBG (Linear Motion Ball Guides) システムを構成し、玉のHertz接近量に起因するシステム内負荷分布をたて、レールやガイドブロックのミスアライメントを無視した場合¹⁾ならびに2本のレールのいずれか1本に正規分布状のミスアライメントを付与した場合²⁾におけるシステム内最大分布負荷、負荷分布状態、案内精度の変動状態、玉通過に起因するウェービング問題、精度平均化効果等を理論的に解明した結果を報告した。

本報では、引き続き2本のレールの内一方を基準レールとし、他方をくさび状の荷重装置によって強制的に曲げ変形させることによってz軸方向に種々のミスアライメントを付与し、テーブルにどのような姿勢

変化が生じるかを測定して、LMBGシステムの精度平均化効果に関する理論と実験の両面から比較検討を加えた結果を報告する。

2. 実験装置と実験方法

本実験で使用したボールガイドは、THK社製HSR 35の精密級であり、前報¹⁾と同一諸元のXテーブルを構成したが、軌道面両端部におけるクラウニング幅と深さは4個のブロック軌道面実測結果の平均値でそれぞれ $X_f=1.285$ 、 $\lambda_0=0.027$ mmのガイドブロックであった。また、本報ではデータを整理するまでには至っていないが、各ガイドブロックには繰返し精度2 μ mの渦電流形近接センサを埋め込んで玉通過ピッチの測定をしている。玉間ピッチはその平均値で求め $\overline{xD_a}=6.361$ mmであったので、この数値を代表寸法とした。

このようなボールガイドを用い、図1に示すようにLMBGシステムを構成した。XテーブルはDCサー

* 原稿受付 平成4年2月25日

** 正 会 員 明治大学理工学部 (川崎市多摩区東三田1-1-1)

Fig. 1 Ground plane view of LMBG system

ボモータによりピッチ 5 mm のボールねじを介して駆動され、測定系の座標原点をテーブル中心で NC 工作機械のインクリメンタル方式にとり、ミスアライメント部はレール 1 の右から 3 本目と 4 本目のボルトの中心間にくさび状ミスアライメント付与装置を用い、任意の大きさを水平方向に付与できるようにしている。

図 2 は DC サーボモータ側から見たシステム構成を示す。システムの芯出しはレール 2 を基準にして、まずレール 1 を全長にわたって 1~2 μm に入るように調整した後、4 個のブロックを 4 μm 程度の予圧状態にして X テーブルに取り付けた。次いで、600 mm 間で平行度が 2 μm 以内の 2 本のセラミックス製ストレートエッジ①を図 2 および図 3 に示すように調整テーブル下の 3 個の最小目盛 0.2 μm を持つ微動上下ユニット②上において支持し、垂直面内、すなわち x, y ならびに y, z 面内における微調整ができるようにした。さらに、その下に水平面内、すなわち x, z 面内の調整ができるように最小目盛 10 μm の 2 台の直動ユニット③をおいて、ストレートエッジはあらゆる方向に対する芯だし調整ができるように工夫した。図 3 はこのようなストレートエッジ部の芯出し状況を示す。また、図 4 にストレートエッジの真直度実測データを示す。

なお、レールとベースならびにガイドブロックとテーブル間の取付けには 8 mm の六角穴付きボルトを使用してメーカーの推奨締付けトルク $T=3 \text{ Nm}$ でそれぞれトルクレンチを用い締結した。

テーブル走行時の姿勢変化はテーブルに 2 本のアームを取り付け、 y 軸方向に 4 本、 z 軸方向に 2 本の電気マイクロ

メータ変位センサを用い、各センサとストレートエッジとの相対変位から垂直変位、水平変位、ピッチング、ローリングおよびヨーイングに関する変位 5 成分を次式から換算して求めるようにした。すなわち

$$\text{垂直変位} : a_1 = (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)/4$$

$$\text{ピッチング} : a_2 = (y_1 - y_2 - y_3 + y_4)/4l_x$$

$$\text{ローリング} : a_3 = (y_1 + y_2 - y_3 - y_4)/4(l_x + 185)$$

$$\text{水平変位} : a_4 = (z_1 + z_2)/2$$

$$\text{ヨーイング} : a_5 = (z_1 - z_2)/2l_x$$

なお、 $l_x = l_z = 125 \text{ mm}$ であり、4 個の

ブロック取付けピッチの 1/2 寸法を表す。

また、図 5 はくさび状ミスアライメント付与装置と基準レール 2 に対してレール 1 にどの程度のミスアライメントが付与されたかを測定するための説明図を示す。

Fig. 2 Side view of LMBG system

Fig. 3 Situation of aligning

Fig. 4 Straightness of straight edge

Fig. 5 Device for making misalignment and its measuring method

す。基準レール2に2個のガイドブロックを組み付け、L形の鋼板にねじで締結しておいて中央の六角穴付きボルトを締め込んでねじとくさびの相乗効果を利用してレール1にミスアライメントを付与し、 z 軸方向の湾曲状態および y 軸方向の変形状態を測定できるようにしている。

実験の手順は、まずレール1にミスアライメントを付与しない状態でテーブルを右端に移動させ、トリガスイッチ部から x マイナス方向に速度10 mm/sで走行させる。トリガ入力と同時に各センサのアナログ出力を1チャンネル2 μ sのAD変換器を介してPC 9801 RA 5に取り込むようにした。AD変換器の取込み分解能は電気マイクロメータの分解能が0.04 μ m/mVであるから、1ビット当たり0.1 μ mになる。また、ヨーイングの分解能は 4×10^{-7} rad/bit = 0.0825 s/bitになるので、かなりの高精度計測を実施していることになる。

次いで、図6に示すようなミスアライメントをレール1に付与しておいて、再び右端からテーブルを駆動させ、各変位データを取り込んでミスアライメントを付与しない状態とのそれぞれの差を取り、変位5成分を求めテーブルの姿勢変化、すなわち案内精度とした。

このようなデータ集録法にすれば、ストレートエッジの真直度の誤差成分は一応消去できることになる。

また、各ボールガイドに付与する予圧はラジアルすきまがゼロの時、玉径が6.35 mm - 4 μ mであったので、 $D_a = 6.346, 6.350$ および 6.358 mm として $\lambda =$

Fig. 6 Various misalignments in z -direction

0, 4 および 12 μ m とした。そして、このようにすべのボールガイド内における組込み玉系列の玉を変えながら上記実験手順を繰り返してミスアライメントや予圧による案内精度の影響を調べることにした。

なお、予圧 $\lambda = 4 \mu$ m は、基本静定格荷重に対する玉の Hertz 変形量の 1/12 で、予圧力に換算すると 62 N になる。

3. 理論解析

実験に先立って、ここではミスアライメントの実測データとその平滑化の結果ならびに先にたてた LMBG 内負荷分布式にその結果を適用し、テーブル重量 500 N が作用する条件下で各変位成分の変動状態を求めた結果を示す。図6は、くさび荷重装置を用いて4種類のミスアライメントを付与し、それぞれに8次の最小2乗法を適用して平滑化した結果である。これより、ミスアライメント形状は230 mm間にわたってほぼ正規分布状を成していることがわかる。

なお、工作機械等における芯出しでは、 Δz は通常 5, 10 または 20 μ m 以内とされる。

次に、同図と同程度のミスアライメント量をレール1に付与した場合に対して前報²⁾式(4)の代わりにそれぞれの8次近似平滑化曲線式を適用し、テーブルがミスアライメント部を通過する際の垂直変位 a_1 、ピッチング a_2 、ローリング a_3 、水平変位 a_4 およびヨーイング a_5 のそれぞれの変動状態を求め、ガイド内に付与した予圧が $\lambda = 0, 4, 12 \mu$ m の各場合に対して図7~11に示す。横軸にはテーブルの移動量 T_x とブロックの半幅 u_x の和に対する玉ピッチ $x D_a$ の比をとって無次元化している。これらより、付与したミスアライメント Δz の方向における変位成分 a_1 および a_5 が大きく、それと直交する方向の変位成分 a_1, a_2 および a_3 は無視し得るほど小さいことがわかる。また、 $\lambda = 12 \mu$ m の場合は省略したが、 $\lambda = 0$ の場合には a_1, a_2 および a_3 にはミスアライメント部を通過する際の

Fig. 7 Fluctuations of horizontal displacements, α_4 Fig. 8 Fluctuations of yawing angles, α_5 Fig. 9 Fluctuations of vertical displacements, α_1 Fig. 10 Fluctuations of pitching angles, α_2 Fig. 11 Fluctuations of rolling angles, α_3

テーブル重量 500 N による影響が若干現れ、予圧を 4 μm 付与するとその影響はなくなり、予圧が増大するほど各変位 5 成分は減少していることがわかる²⁾。

また、表 1 は各予圧量 λ に対して 4 種類の Δz を付与して水平変位 α_4 ならびにヨーイング α_5 のピーク値のみを整理した結果を示す。

以上、簡単に本実験に対応した条件下における解析結果を説明したが、ミスアライメント Δz に比べミスアライメント方向の変位成分はかなり小さくなる。図 12 はテーブルがミスアライメント部を通過する際の

ブロック 1 の変位状況であり、システムとして平均化がなされていないければ、ブロック 1 は破線の位置に移動するが、実際には平均化効果があるためブロック 1 は Δz に比べてかなり小さい変位、すなわち α_4 と α_5 しか現れない。そこで、LMBG システムの精度平均化効果の定義として、ここではそれぞれ

$$\text{水平変位に対する平均化効果} = \alpha_4 / \Delta z$$

$$\text{ヨーイング角に対する平均化効果} = \alpha_5 / \Delta \alpha_5$$

として定量的に表すことにする。

Table 1 Theoretical results

λ μm	Δz μm	α_4 μm	α_5 s
0	7.394	1.808	2.917
	15.892	3.638	5.791
	21.123	5.015	7.896
	28.022	6.672	10.501
4	7.394	1.787	2.895
	15.892	3.545	5.746
	21.123	4.856	7.858
	28.022	6.470	10.426
12	7.394	1.766	2.837
	15.892	3.499	5.625
	21.123	4.775	7.683
	28.022	6.358	10.213

Fig. 12 Definition of accuracy average effects

Fig. 13 Fluctuations of α_4 with preloadings λ Fig. 14 Fluctuations of α_5 with preloadings λ Fig. 15 Fluctuations of α_1 , α_2 and α_3

4. 実験結果と考察

図 13, 14 にそれぞれ予圧量 $\lambda = 0, 4, 12 \mu\text{m}$ の場合における水平変位 α_4 ならびにヨーイング α_5 の変動状態を測定した結果を示す。これより、付与した $\Delta z = 28.5 \mu\text{m}$ のミスアライメントに対してテーブルの中

Table 2 Experimental results

λ μm	Δz μm	α_4 μm	α_5 s
0	7.2	0.8	3.0
	16.5	3.0	7.5
	22.0	4.5	9.8
	28.0	6.2	13.8
4	7.5	0.9	1.8
	16.0	2.2	4.5
	22.5	3.6	7.6
	28.5	4.7	10.0
12	8.5	0.6	1.6
	15.5	1.6	4.0
	21.5	2.8	6.8
	28.5	4.0	8.9

Table 3 Average effects of LMBG system

Δz μm	λ μm	$\alpha_4/\Delta z$		$\alpha_5/\Delta \alpha_5$	
		Theory	Ex.	Theory	Ex.
7.4	0	1/4.1	1/9.0	1/4.2	1/4.0
	4	1/4.1	1/8.0	1/4.2	1/6.9
	12	1/4.2	1/14.0	1/4.3	1/8.8
15.9	0	1/4.4	1/5.5	1/4.5	1/3.6
	4	1/4.5	1/7.3	1/4.6	1/5.9
	12	1/4.5	1/9.7	1/4.7	1/6.4
21.1	0	1/4.2	1/4.9	1/4.4	1/3.4
	4	1/4.3	1/6.3	1/4.4	1/4.9
	12	1/4.4	1/7.7	1/4.5	1/5.2
28.0	0	1/4.2	1/4.5	1/4.2	1/6.9
	4	1/4.3	1/6.1	1/4.4	1/4.7
	12	1/4.4	1/7.1	1/4.5	1/5.3

心において α_4 は 1/5~1/7 の変動しか現れず、 α_5 は 8.9~13.8 s 程度しか現れないことがわかる。また、システムに付与する予圧量が増大していくほど α_4 、 α_5 は低減していく様子を伺い知ることができる。

また、参考までに $\lambda=0$ の場合に対して垂直変位 α_1 とピッチング α_2 およびローリング α_3 の変動状態を測定した結果を図 15 に示す。ミスアライメントに直交する方向のこれらの変位成分は図 9~11 の理論解析結果と同様にかかなり小さいことがわかる。

また、表 2 に本実験で実施したすべての条件に対する水平変位 α_4 とヨーイング α_5 の波形変動のピーク値を整理した結果を示す。この結果を表 1 の理論値と比較すると実験値の方が全般的に小さめの傾向を示しているが、両者は定量的にもよく合致している。

以上の結果を平均化効果に着目して整理し直した結果を表 3 に示す。同表より、計算結果と実験結果はか

Fig. 16 FFT analysis of LMBG system

なり合致しているといえるが、 α_4 に対する平均化効果はいずれの条件においても実験結果の方が計算結果に比べより顕著に現れ、 α_5 に対する平均化効果は $\lambda=0$ の場合における $\Delta z=7.4$ 、15.9 と 21.1 μm の 3 例を除いて、実験値のほうが理論値に比べて増大していることがわかる。この理由は、理論解析では各ブロック各玉列の玉並び状態がすべて一様に整列配置されていて、しかも各ブロック、各軌道面の玉の位置関係はすべて同一かつ一定として玉通過の影響は無視したことも一因であるが、ブロック頸部の曲げ変形やその他のシステムの構造変形などを無視して玉の Hertz 変形量のみで変位 5 成分を求めたことにある。一方、実験ではミスアライメント部以外にある他の 3 個のガイドブロックがテーブルの姿勢変化を妨げ、システムに予圧が付与されていればいるほどミスアライメント部通過時におけるガイドブロック頸部の曲げ変形を生じやすくする結果、平均化効果をさらに増大させる傾向にあると考えることができる。

次に、図 16 に FFT を用い本 LMBG システムにおいてどのような周波数成分が現れているかを図 15 のデータについて分析してみた結果を示す。システムに影響を及ぼす振動発生源として、まず考えられるのがテーブルのウェービングやバウンス現象を引き起こすガイド内玉通過振動である。本実験では、テーブルの送り速度が $V=10$ mm/s、玉径が $D_a=6.350$ mm であるから、玉通過周波数は $f_1=V/2D_a=0.787$ Hz となる。また、ボールねじの回転に起因してねじ軸の触れ回りや玉通過振動が考えられる。これらはボールねじのピッチが $p=5$ 、玉径が $D_a=3.175$ 、ピッチ円直径が $d_m=20.5$ mm であるから、それぞれ $f_2=V/p=2$ Hz ならびに $f_3=f_2\pi d_m/2D_a=20.3$ Hz となる。

本実験に用いた電気マイクロメータの応答周波数は2~3 Hzであるが、このことを考慮しながら図16をみると工作機械等で時として問題視されるボールねじの触れ回り等の振動周波数が本システムでは現れていないことがわかり、ピーク値は玉通過周波数の整数倍となって5次のモードまで現れていることがわかる。このような周波数成分は、理論上システムを構成するブロック数の玉列倍まで現れることになる。また、前出図15で α_1 には0.2 μm 、 α_2 と α_3 にはそれぞれ0.2 s程度の玉通過振動振幅が認められる。

したがって、予圧量との対比で示した図13, 14にも当然このような微振動が存在するわけであり、理論値には玉通過影響項をも考慮すべきであるが、ソフトウェアの易算性を考慮してこれを無視した。

5. ま と め

直動ボールガイドを用いてLMBGシステムとしてXテーブルを構成し、種々の水平方向ミスアライメントならびに0, 4, 12 μm の3種類の予圧を付与してテーブルの案内精度を測定し、これまでにたてた負荷分布式を用い計算した結果と比較検討した。その結果、

(1) 計算結果は実験結果によく合致するが、実験

値はガイドブロック頸部の曲げ変形が生じるため計算値よりさらに精度平均化効果が大きく現れる。

- (2) 予圧を増大すると精度平均化効果は増大する。
- (3) ミスアライメントに直交する変位成分は、無視し得るほど小さい。
- (4) 玉の負荷圏への出入りに伴い、微小ではあるが1次から5次までの玉通過振動波形を観測した。

本研究は、昭和63年度と平成元年度の2年間にわたって財団法人工作機械技術振興財団の助成を得て、高橋正人君（現在、(株)ニコン勤務）の修士論文として実施したものである。また、(株)牧野フライス製作所ならびにTHK(株)の両社には実験装置の試作に対して種々ご援助を賜った。ここに、関係者各位に対し深く感謝申し上げる次第である。

文 献

- 1) 清水茂夫：直動ボールガイドシステムの負荷分布と精度・剛性に関する研究，精密工学会誌，56，8（1990）1445。
- 2) 清水茂夫：直動ボールガイドシステムの負荷分布と精度・剛性に関する研究，精密工学会誌，57，10（1991）1814。

科技厅，学際研究の実態調査

科学技術庁では、このほど「自然科学と人文・社会科学の学際研究の実態とその課題に関する調査報告書」をまとめた。

情報系科学やソフト系科学など、自然科学と人文・社会科学とをつなぐ学際研究の芽生えは日米ほぼ同時期に起きているのに、研究交流の制度や組織形態の違いから日本は米国のように順調な発展を示さなかったとするわが国の研究制度の不備を指摘するもので、科学技術振興調整費により昨年度から2年間にわたって行った中間報告書である。

ところで、本報告書は人工知能，認知科学，神経回路学の三つの専門分野をとりあげ、日本でのその発展史，発展途上における自然科学と人文・社会科学との交流などを調査することにより，新たな専門分野が成育する過程を明らかにするとともに，日米の発展史の相違やその要因などを分析している。

報告書によると，これらの専門分野は萌芽的な活動は日米ほぼ同時に始まり，初期段階では学際研究は行われているが，当時の研究交流規模やその後の成長期に至

る研究組織の形成には大きな開きがあるという。

萌芽期に日本の学際研究は大学内の小規模な組織で行われ，外部からの資金援助のない自主的なものだったのに比べ，米国は民間財団など複数のスポンサーによる資金を受け，組織内外を問わず異分野の研究者がシンポジウムや会議を開催，幅広い研究を実施してきた。

また，研究組織の形成も日本が萌芽期，成長期を通じ，ほとんどが「講座レベル」の活動なのに対し，米国は複数の大学にセンターが設置され学際研究のメッカとなった。経験的知識の蓄積とともに大学研究所や大学院プログラムが作られ，成熟期には学科や学部設置につながってきたのに対し，日本では成長期での学科設立も数えるほどだったという。

米国では専門分野の成長に伴い，研究組織が拡大しており，基本的にスポンサーを見つけ資金を獲得したところが勝ち上がるという「市場メカニズム」が働いており，今後，組織の柔軟性など学際研究を活発化させるためには日本も見習うべき点が多いことを指摘している。

（服部 敏夫）