Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-04

8条リニアボールガイドを用いた送り駆動系における象限突起補正による高精度輪郭制御

大橋，智史
柴田，均
二見，茂
佐藤，隆太

(Citation)
精密工学会誌,84(11):925-930

(Issue Date)
2018-11-05

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90006768

論文

8条リニアボールガイドを用いた送り駆動系における象限突起補正による高精度輪郭制御*

大橋智史** 柴田　均*** 二見　茂** 佐藤隆太†

High Accuracy Contouring Control by Quadrant Glitch Compensation for a Feed Drive System Using Eight Grooved Linear Ball Bearing System

Tomofumi OHASHI, Hitoshi SHIBATA, Shigeru FUTAMI and Ryuta SATO

This paper describes the results of nano-order accuracy contouring control by quadrant glitch compensation for a feed drive system with eight grooved linear ball guide. Three kinds of compensation methods are applied and compared in this study. Those are; 1) repetitive control technique, 2) disturbance observer, and 3) combination of the both. As the results of experiment, the first method decreases the height of quadrant glitch to 0.5 nm by 5 times repetitive compensations. The second method also decrease the height of quadrant glitches to 2 nm, and the third method also can decrease the height to 0.5 nm with repetitive compensation at first time. It is confirmed that the nano-order contouring accuracy can be achieved by combination of the eight grooved linear ball guide and quadrant glitch compensations.

Key words : feed drive system, linear ball guide, quadrant glitch, circular motion, disturbance observer, repetitive control

1. 緒　　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，送り駆動系の運動精度向上のためには使用される案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によって4年に一度行なわれているアンケート調査によると，装置に使用されている案内部品のうち，直動転がり案内が占める割合は年々増加している[1]．

直動転がり案内である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よりも静圧案内が使用されることが多い．しかし静圧案内は，空気圧または油圧を用いるため，このための様々な装置が必要であり，高コストとなる．直動転がり案内によって高精度な運動が実現できれば装置のコスト低減に貢献できる．

8条リニアボールガイドSPSシリーズ(THK)[2]は，このような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[3)4)]．8条リニアボールガイドを用いることで，ウェービングによる送り駆動系の運動精度の低下を改善でき，静圧案内の一部を置き換えることができる可能性がある．しかし超精密加工機等では，複数の軸を同時に制御する輪郭運動制御が必要であり，例えば同時2軸制御運動である円運動を行うと，各軸の運動方向が反転する象限切替え時に，摩擦力の影響による象限突起と呼ばれる軌跡誤差が生じる．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が，これらの研究の多くはボールねじを用いた駆動系を対象として10mm以上の半径で行われている[5)-11)]．

近年，スマートフォンのカメラに用いられる小形の非球面レンズや医療用マイクロニードルなどの微細な形状を持つ造形物の需要が高まっている．これらの製品の製造に使用される金型の製作には，ナノメートルオーダの加工精度が要求されるとともに，1mmよりはるかに小さい半径の円運動が行われるため，微細円運動における象限突起補正は重要な技術課題となっている．また，これらの加工における円運動は1Hz以下の周波数であることが多い．著者らはこれまでに，8条ボールガイドを用いた送り駆動系で微細円運動を行った際に生じる象限突起に対して，運動条件と8条ボールガイドの非線形ばね特性(Nonlinear Spring Behavior : NSB)が与える影響に関しての解析を行い，この関係を明確にした[12)]．8条ボールガイドを用いた送り駆動系においても象限突起補正が実現され，ナノメートルオーダの輪郭精度が達成できれば，これまで静圧案内が用いられてきた装置への転がり案内の適用が可能になる．

そこで本研究では，8条リニアボールガイドを用いた超精密送り駆動系において象限突起の補正を行い，微細円運動時におけるナノメートルオーダの輪郭運動精度が実現できるか検証した．象限突起の補正方法として，繰返し制御による補正方法と，外乱オブザーバを用いた推定外乱力による補正方法，およびその二つの補正方法を組み合わせた補正方法を適用し，その効果を検証したので報告する．

2. 実 験 装 置

本研究で実験に使用した送り駆動系を図1に示す．これまでに，この実験装置における象限突起の特性について調査済み

*　原稿受付　平成30年4月26日
　　掲載決定　平成30年7月13日
**　正 会 員　THK株式会社（東京港区芝浦2-12-10）
***　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）

である[12]．最も重要な要素である案内部品には8条リニアボールガイド (SPS25 THK社製)を使用した．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，固定子と可動子との間の磁気吸引力も非常に小さい．最大推力は350Nである．ACリニアモータの電流指令はコントローラから18bitのDAコンバータを介し与えられ，リニアアンプで駆動する．位置の検出にはリニアエンコーダを使用している．リニアエンコーダの信号周期は512nmであり[13]，それを65,536分割に内挿分割する．位置分解能は7.8125pmとなる．また，固有振動数1.3Hzの空気除振台上に本実験装置を設置し，地動外乱を除去した状態で実験を行った．この実験装置では，固定部と可動部間の機械的な接触はLMBGのみである．そのため，象限突起の原因となる外乱力はLMBGの摩擦力のみとなる．

本実験装置の制御系のブロック線図を図2に示す．位置制御はP制御，速度制御はPI制御により行っており，それに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組み合わせている．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，速度積分時定数T_iを6.25 msとし，フィードフォワードゲインα は1(=100%)とした．この設定は通常の送り駆動系と比べて高ゲインであるが，振幅1mm以下，かつ周波数1Hz以下の正弦波指令の場合，安定して動作することが確認されている[12]．象限突起は同時2軸制御運動による円運動において観測される現象であるが，本研究では，単軸の駆動系に正弦波運動を行わせ，このときの目標位置とテーブル変位との偏差を評価している．往復運動中の変位と偏差との関係の一例を図3示す．図3中の2.5秒付近と7.5秒付近で運動方向が反転しており，偏差には突起状の偏差が生じている．これは円運動で生じる象限突起と同じものであり，この偏差の大きさを評価することで，象限突起の大きさを評価できる．

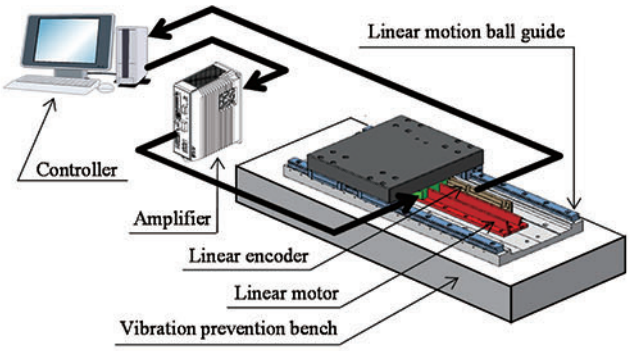


Fig. 1 Configuration of the experimental system

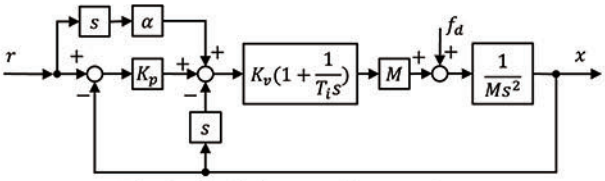


Fig. 2 Block diagram of the control system

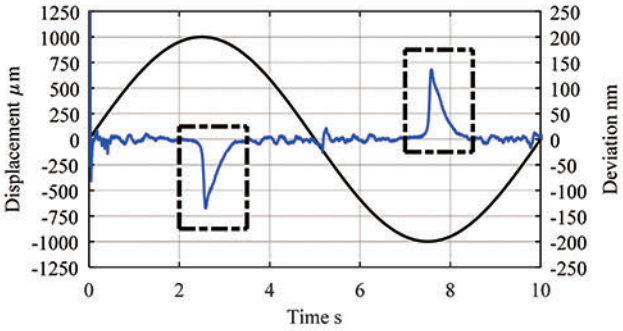


Fig. 3 Displacement and deviation during sinusoidal motion

3. 繰返し制御による補正

3.1 補正方法

制御系の追従遅れに起因する位置偏差が十分に小さい場合，結果に現れる位置偏差は，主に外乱力f_d に起因するものとなる．本研究で実験に用いた送り駆動系では，フィードフォワードゲインα が1に設定されており，位置比例ゲインK_p も高いほか，位置指令を振幅100μm，周波数0.1Hzの正弦波としたことから，追従遅れによる影響は無視できることになる．よって，測定に現れる偏差は主にLMBGの摩擦力に起因するものであると考えられ，これを以下の手順で補正できるか検討した．

Step 1　正弦波往復運動を行わせ，その運動中の位置偏差を記録する．

Step 2　位置偏差を記録したときと同じ位置指令に対し，記録した位置偏差を補正量として加算したものを補正後の位置指令とする．

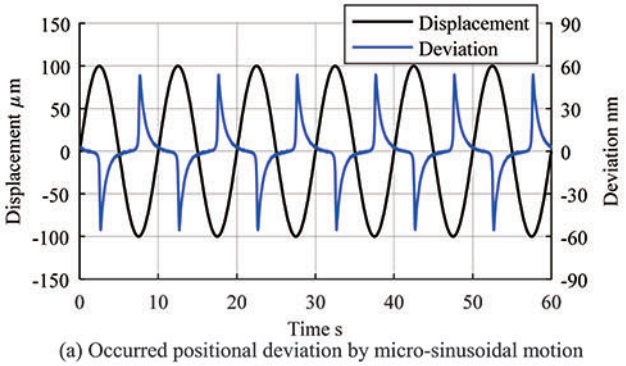
この補正方法は，繰返し制御を用いた外乱力の補正となる．このため，補正には位置偏差を測定して記録する必要があり，オフライン的な補正となる．以後，この補正方法をオフライン補正と呼ぶ．繰返し制御では，補正後に発生した位置偏差を記録してさらに補正量として加算することで，その補正効果をより向上できることが知られている．しかしその一方で，繰返し回数が増加すると応答に不必要な高周波成分への過追従が発生し，これが原因で振動的な応答が発生することがある．そのため，補正量を保存する際は適切なフィルタリングが必要となることも知られている[14]．

3.2 偏差の再現性

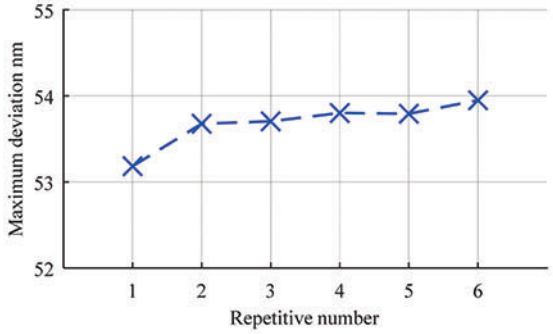
この補正方法が有効に作用するためには，発生する位置偏差に高い再現性が必要となる．偏差の再現性を確認するために，振幅100μm，周波数0.1Hzの正弦波運動を6往復連続で行った．そのときに発生した位置偏差を図4(a)に示す．また，正弦波運動の1周期目から6周期目に発生した位置偏差の最大値を図4(b)に示す．図によると，位置偏差の最大値の変動は1nm以下であり，高い再現性を有することが確認できる．

3.3 実験結果

オフライン補正を適用し，その効果を確認した．往復運動の振幅は100μm，周波数は0.1Hzとした．繰返し制御を行う際に使用するローパスフィルタのカットオフ周波数は，試行錯誤的に30Hzに決定した．実験結果を図5に示す．実験は3往復行っており，図中の(i)は補正を行わない場合，(ii)は(i)での位置偏差を補正量として位置偏差の補正を行った場合，(iii)は(ii)で使用した補正量に，さらに(ii)で発生した位置偏差を加算した補正量を用いた場合の補正結果となる．補正を行っていない(i)では，運動方向反転時に56nm程度の位置偏差が発生しているが，オフライン補正を1回行った(ii)では，運動方向反転時の位置偏差は5nm程度まで低減され，さらに，オフライン補正を2回繰返すことで，(iii)に示されるように偏差は2nm程度となった．オフライン補正を3回繰り返した際の補正結果を図6に示



(a) Occurred positional deviation by micro-sinusoidal motion



(b) Maximum values of each cycle positional deviations

Fig. 4 Repeatability of positional deviation during sinusoidal motion

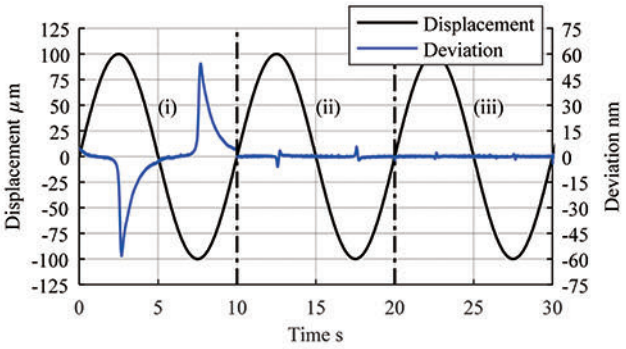


Fig. 5 Experimental results of the offline compensation

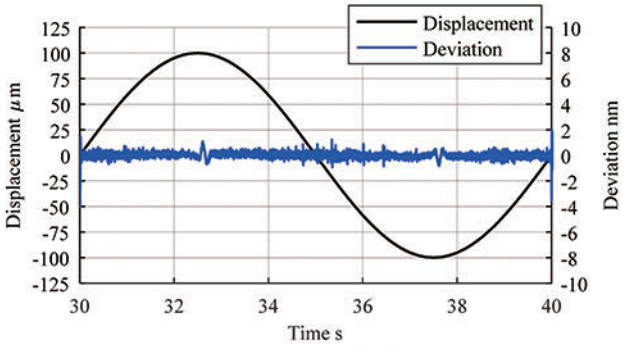


Fig. 6 Experimental result with 3 times repetitions

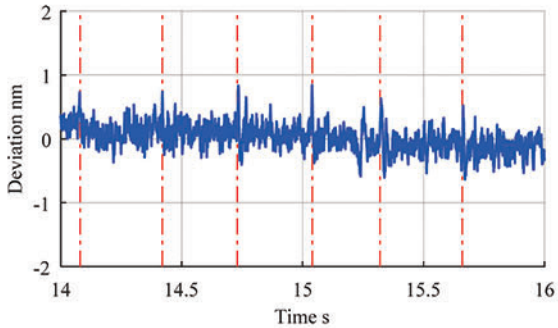


Fig. 7 Periodical deviation due to sine table resolution for vector control

す．運動方向反転時の位置偏差はさらに小さく，1nm程度となった．運動方向の反転が生じない，図5中の14～16秒の範囲を拡大した波形を図7に示す．図7中の一点鎖線で示した箇所に，1nmに満たない程度ではあるが，スパイク状の位置偏差が発生している．これは約19μmのピッチで発生しており，波形全体で確認できる．このスパイク状の位置偏差は，モータ制御で行う座標変換に用いる，正弦波テーブルの参照先の切り替りが原因で発生している．三相サーボモータの駆動装置においては，ベクトル制御と呼ばれる制御手法を用いることが一般的である．ベクトル制御では三相交流電流を回転座標系へ座標変換し電流制御を行うが，この座標変換に正弦波関数を使用する．電流制御の演算は，制御ループの最も内側にあり，その演算は最も短い時間間隔で行われる．座標変換の計算負荷を軽減するための一般的な手法として，正弦波の値を予めメモリ領域に格納して正弦波テーブルを作成し，与えられた位相角より正弦波テーブルの参照先を求め，座標変換に必要な値を得る方法が用いられており，実験に使用したコントローラでも同様の手法を実施している．実験装置では正弦波1周期を2048分割したテーブルが使用されている．リニアモータの磁石ピッチ（N極-N極間距離）は39mmである．すなわち，正弦波テーブルの参照先の切り替わりピッチは，39mm / 2048≒19.04μmとなり，スパイク状の位置偏差の発生間隔と一致する．一般的なサーボモータの制御であれば，正弦波テーブルの分割数は2048もあれば十分である．しかし，今回の実験では極めて高い位置分解能での評価を行っており，正弦波テーブルの不連続性に起因して発生するスパイク状の位置偏差が観測された．本現象は位置に依存するが，繰返し制御では補正されずに，かえってその振幅が成長してしまうことが確認されている．そこで本研究では，実験結果の評価の一部において，この現象による影響を回避するために，位置偏差の最大値でなく偏差の二乗平均平方根を使用することとした．

オフライン補正を5回繰返したときの，補正回数と位置偏差との関係について，運動方向反転時に発生する位置偏差の最大値，最高送り速度付近で発生する位置偏差の二乗平均平方根，および正弦波指令の周期切り替わり時，すなわち補正値の更新時に発生する位置偏差の最大値を図8に示す．補正回数0回は，補正無しを意味する．図によると，運動方向反転時に発生する位置偏差の最大値は，補正回数の増加とともに低減していることが確認でき，5回補正を行うことで0.5nm程度となっている．一方，最高送り速度付近で発生する位置偏差の二乗平均平方根を見ると，1回目の補正以降，補正回数を増やすことで，その値が大きくなっている．これは，最高速時に発生する振動的な位置偏差が，駆動の際に誘発された時間に依存する振動応答であるため，オフライン補正が有効に作用しないと考えられる．さらに，補正値の更新時に発生する位置偏差の最大値については，補正回数によらず変化しない．この正弦波指令の周期切り替わり時に発生する位置偏差について，1周期から4周期までを重ねて表示した結果を図9に示す．図中の10秒に示す破線は，補正量が更新される時刻である．図を見ると，どの場合にも4nm程度の偏差が生じている．ここで発生している偏差は，補正量がステップ状に変化することに対する過渡

応答であるため，オフライン補正による補正はなされない．この偏差を生じさせないようにする方法として，更新時の補正量の変化を連続的に行うことなどが考えられる．

以上のことから，8条リニアボールガイドとリニアモータの組み合わせによる送り駆動系では，位置偏差波形の再現性が高く，オフライン補正によるナノメートルオーダでの象限突起の補正が可能であるといえる．また，オフライン補正を繰返すことで，象限突起の高さをナノメートル以下まで低減できるといえる．

4. 外乱オブザーバによる補正

運動制御分野における力外乱の推定方法および補償方法として，剛体モデルを用いた外乱オブザーバが一般的に用いられており[15]，外乱オブザーバと摩擦モデルを用いた象限突起の補正方法ついても報告されている[5]．外乱オブザーバを用いた外乱補正は，動作を行いながら同時に補正量を求める，いわゆるオンライン補正となるため，以後，オンライン補正と呼ぶ．外乱オブザーバによる外乱力補正方法のブロック線図を図10に示す．図に示すように，位置情報の二階差分より加速度情報を得た後，推力指令と加速度情報より得られる慣性力情報の差分量をローパスフィルタにてフィルタリングした値を推定外乱力とする．図中T_sはサンプリング時間である．

位置偏差の補正結果を図11に示す．このときローパスフィルタは1次遅れ系とし，そのカットオフ周波数はオフライン補正の場合と同じ30Hzとした．図によると，オンライン補正によって象限突起は2nm程度にまで低減できていることがわかる．方向反転時に生じる位置偏差について，オンライン補正とオフライン補正の結果を比較してみると，オフライン補正を2回繰返した結果と同程度の補正効果がオンライン補正により達成されていることがわかる．

5. オンライン補正＋オフライン補正

5.1 補正方法と実験結果

繰返し制御によるオフライン補正は，フィードフォワード制御の一種である．一方，外乱オブザーバを用いたオンライン補正はフィードバック制御である．フィードフォワード制御は制御系の安定性に影響を与えないため，オンライン補正とオフライン補正を併用しても制御系の安定性に影響を及ぼさない．そこで，この二つの補正方法を組み合わせた補正を行い，その効果を確認した．オンライン補正とオフライン補正を組み合わせて用いる場合，以下の手順で補正を行う必要がある．この手順を逆にした場合，かえって偏差が増大するため注意が必要である．

Step 1　オンライン補正を適用した状態で正弦波往復運動を行わせ，その運動中の位置偏差を記録する．

Step 2　位置偏差を記録したときと同じ位置指令に対し，記録した位置偏差を補正量として加算したものを補正後の位置指令とする．

オンライン補正を適用した状態でオフライン補正を行った場合の実験結果を図12に示す．実験は3往復行っており，図中の(i)はオンライン補正のみを適用した場合，(ii)はオンライン補正を行った状態でオフライン補正を1回適用した場合，(iii)はオンライン補正を行った状態でオフライン補正を2回適用した場合の結果である．

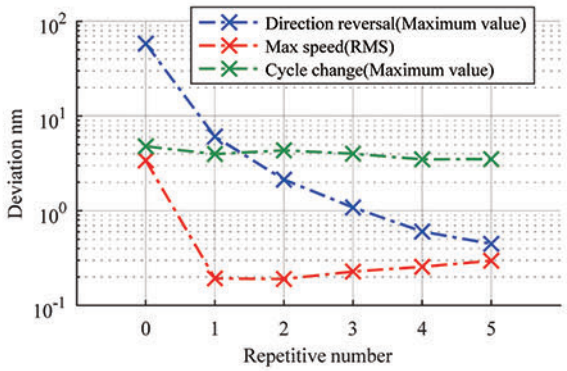


Fig. 8　Relationships between the repetition number of the offline compensation and deviations

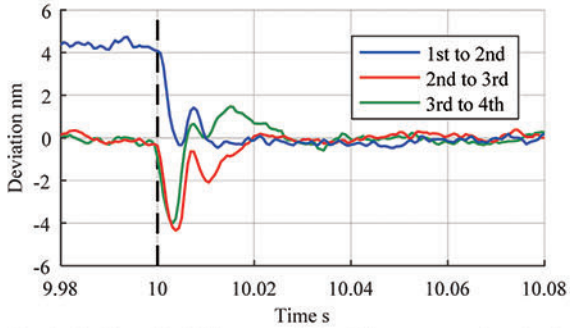


Fig. 9　Positional deviations around the offline compensation signal changing point

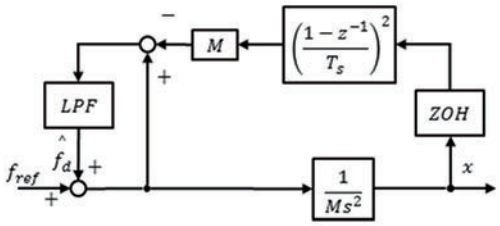


Fig.10　Block diagram of control system with disturbance observer

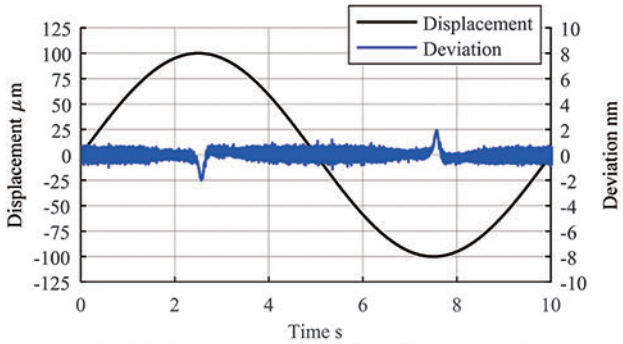


Fig.11　Experimental result of the online compensation

オンライン補正とオフライン補正を組み合わせた補正における，オフライン補正の繰返し回数と，発生した位置偏差との関係について図13に示す．本図は，オフライン補正を5回繰返した際の，運動方向反転時に発生する位置偏差の最大値，最高送り速度付近で発生する位置偏差の二乗平均平方根，および正弦波指令の周期切り替わり時，すなわち補正値の更新時に発生する位置偏差の最大値の結果を示している．

図によると，運動方向反転時の位置偏差，すなわち象限突起に対する補正効果は，オフライン補正を1回だけ適用した場合

が最も高いことがわかる．このときの位置偏差の最大値は0.6nm程度であり，オフライン補正のみを5回実施した場合と同等の結果が得られている．しかし，オフライン補正を繰返し適用すると，位置偏差が増加してしまっている．また，最高送り速度付近で発生する位置偏差の二乗平均平方根をみると，オフライン補正のみを適用した場合と大きな差異はないことがわかる．

運動方向が反転する領域での位置偏差の拡大図を**図14**に示す．図中の破線で示す7.5秒で指令の運動方向が反転する．図では，1周期から6周期分の波形を重ねて表示している．図によると，1周期目の波形では運動方向反転後の象限突起に相当する位置偏差が発生した後，振動的な波形が生じている．これは外乱オブザーバを用いることにより励起された振動であるが，この振動が発生するメカニズムについては，現段階では明確になっていない．オフライン補正を1回実施した結果を示す赤線の波形を見てみると，運動方向反転後に生じる象限突起に相当する位置偏差は完全に消滅していることが確認できるが，その後の振動が増幅されてしまっていることがわかる．このことが，オンライン補正とオフライン補正を組み合わせた補正方法で，オフライン補正の繰返し回数を増やしたときに，偏差の最大値が大きくなってしまう原因である．正弦波指令の周期切り替わり時に発生する位置偏差について，1周期から4周期までを重ねて表示した結果を**図15**に示す．図中の10秒に示す破線は，補正量が更新される時刻である．オンライン補正もあわせて適用した場合，オフライン補正のみを適用した場合に見られたような補正量のステップ状の変化は生じず，それに伴う振動も発生しない．しかし，外乱オブザーバの適用に起因する持続的な振動が生じてしまっている．

以上のことから，オンライン補正とオフライン補正とを組み合わせることで，オフライン補正を繰返さなくても象限突起の高さをナノメートル以下にまで低減できるといえる．今後，外乱オブザーバを適用した場合に生じている振動を低減できれば，より有効にオフライン補正を適用することが可能となり，さらに高い精度での輪郭運動制御が実現できる可能性がある．

6. 結　　言

本研究では，8条ボールガイドを用いた一軸の送り駆動系について，その象限突起を補正するために，繰返し制御による補正方法と，外乱オブザーバを用いた推定外乱力による補正方法を適用し，その効果を検証した．さらにその二つの補正方法を組み合わせた場合の効果についても検証した．その結果，以下に示すことが明らかとなった．

(1) 8条リニアボールガイドとリニアモータの組み合わせによる送り駆動系では，位置偏差波形の再現性が高く，オフライン補正によるナノメートルオーダでの象限突起の補正が可能である．

(2) オフライン補正を繰返すことで，象限突起の高さをナノメートル以下まで低減できる．

(3) 外乱オブザーバによるオンライン補正を適用すると，

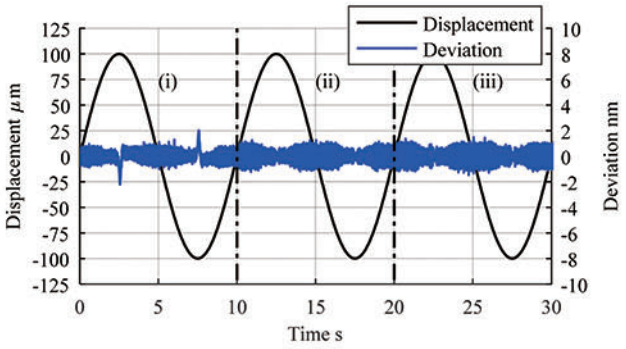


Fig.12 Experimental result with combination of both compensations

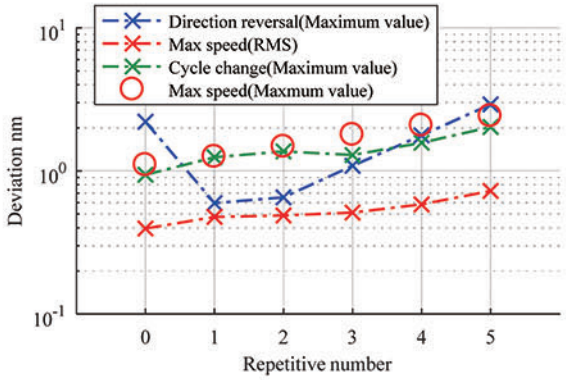


Fig.13 Relationships between the repetitive number of the offline compensation and deviations in case of apply both compensations

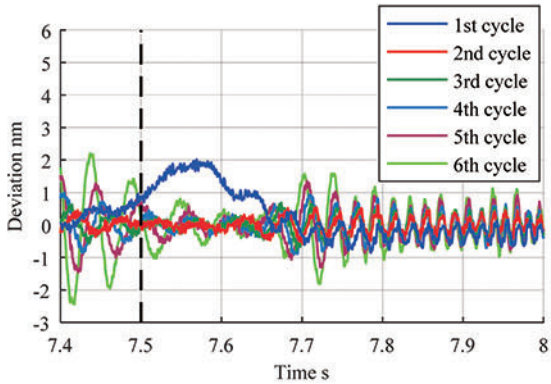


Fig.14 Positional deviations around the motion direction changing point in case of apply both compensations

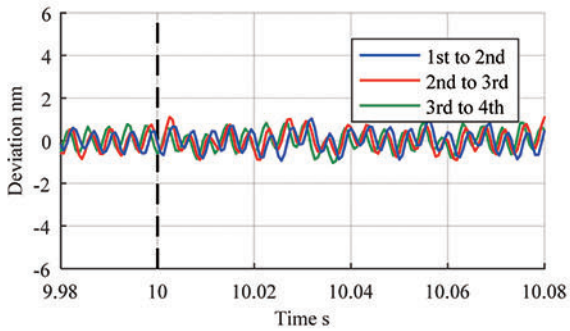


Fig.15 Positional deviations around the offline compensation signal changing point in case of apply both compensations

オフライン補正を2回繰返した結果と同程度の象限突起補正効果が得られる．オンライン補正とオフライン補正とを組み合わせることで，オフライン補正を繰返さなくても，象限突起の高さをナノメートル以下にまで低減できる．

今後，外乱オブザーバを適用した場合に生じている振動の原因を明らかにするとともに，その振動を低減するための方法を開発することで，より効果的に繰返し制御を適用し，直動転がり案内を用いた送り駆動系における輪郭運動精度の限界に挑戦したいと考えている．また，今回は半径100μm，周波数0.1Hzの，低速かつ微細な円運動を対象として提案手法の象限突起補正性能の評価を行ったが，今後，より大きな半径で高速な円運動において生じる象限突起についても補正効果について検証を行う予定である．

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：ボールリテーナ入り LM ガイド SPS/SPR カタログ，**362-4** (2010).
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) 大橋智史，柴田均，岸弘幸，二見茂，佐藤隆太：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，精密工学会誌，**83**, 8 (2017) 796.
13) ハイデンハイン：カタログ 208 960-J9 (2016) 37.
14) 中野道雄，井上悳，山本裕，原辰次：繰返し制御，コロナ社 (1989) 16.
15) 大西公平：外乱オブザーバによるロバストモーションコントロール：日本ロボット学会誌，**11**，4 (1993) 486.