

回転誤差補正による高精度回転装置の研究

The development of ultra precision rotate spindle.

キーワード

空気軸受, 磁気軸受, 3点法, 3点法真円度測定,
回転精度, 回転誤差, 剛性

技術開発部
加工技術部
原 外満

摘要

光学部品加工用などのワークスピンドルには現在の最高水準の回転精度の空気軸受が使用されているが、さらに高精度化し、将来の需要にも対処できるようにするためのひとつの方策として、磁気補正装置を組み込んだ空気軸受を試作し、特性を評価した。

高精度に調整された空気軸受は、ラジアル方向の回転誤差として $0.03\mu\text{mp-p}$ が最良であったが、磁気補正によって2000rpm時、 $0.008\mu\text{mp-p}$ にまで改善することができた。またこのような非常に微小な回転誤差(軸心の運動軌跡)を実時間で測定するために3点法回転精度測定装置をあわせて開発した。

Abstract

An air spindle with the finest rotational precision available is normally used for machining optical parts. Here we improved the precision to respond to future requirements by producing an experimental air spindle which consists of a magnetic compensation device, and evaluated the characteristics of the sample product.

The optimal radial error of the finely adjusted air spindle was $0.03\mu\text{mp-p}$, however, this improved to $0.008\mu\text{mp-p}$ at 2,000 rpm by introducing magnetic compensation. We also developed a three-point measuring device that traces the center-of-axis path to measure very minute radial errors at real time.

1. はじめに

反射鏡などの光学部品は高い形状精度が要求されており、その形状を直接削り出す加工機に要求される運動精度も非常にきびしいものがある。とくに回転運動を担うスピンドルの回転誤差については、品質に直接影響するので、現在の最高水準のスピンドルといえども十分ではない。将来、エキシマレーザー光($\lambda=0.3\mu\text{m}$)または軟X線($\lambda=0.1\mu\text{m}$ 以下)用部品では、さらに高い精度が要求される傾向にある。そこで将来需要にも応えられる光部品加工機用と

して、 $0.01\mu\text{mp-p}$ (2000rpm) の回転精度の実現を目指して、新形式の構成によるスピンドルを数種類試作した。これらは、空気軸受に磁気補正装置を取付け、空気軸受の発生する回転運動誤差を補正するという構成をとっている。また回転精度の評価方法については、従来のトータルインディケータリーディング(以下TIRと表記する)という加工誤差も回転誤差もひっくるめた表現ではなく、これらを区

別して厳密な評価ができるようにするため3点測定法¹⁾²⁾を採用し、軸心の動きだけを取り出せるようにした。

これらの試作品のうち最終試作スピンドルによって2000rpm時、 $0.008\mu\text{mp-p}$ の回転精度が得られた。また3点法を適用した回転精度の評価装置によって $0.003\mu\text{mp-p}$ の分解能で軸心運動の軌跡が得られた。

2. 開発の背景

言うまでもなく、スピンドルはできるだけ心振れのない回転運動、スライドテーブルはできる限り真っ直ぐな直線運動をめざしてさまざまな工夫がなされてきた。特に光部品などを加工する精密機械に使用されるスピンドル、スライドテーブルの運動精度は最も高度の特性が要求されている。

10年前までは光学用レンズの形状は球面形状が主で、その加工用スピンドルには空気軸受が使用されてきた。

数年前から非球面形状のレンズが主流となり、これを直接削り出す加工機が出現し、現状の空気軸受では十分な対応ができなくなっている。

また将来エキシマレーザー光など紫外線領域用の光学部品加工用には $0.01\mu\text{mp-p}$ 以下が要求されるようになると思われ、この段階では特別な軸受システムを準備しなければならない。

これを解決する一つの方法として、空気軸受の回転誤差を補正することが考えられる。そのために次の二つの項目を実現しなければならない。

① $0.01\mu\text{mp-p}$ 以上の高分解能で軸心の動きだけを検出で

きる実時間応答の測定システム

② 回転軸の外側から非接触で高速・高分解能の力を作用させることのできるアクチュエータと、①の測定値をフィードバックする制御システム

①の測定システムとして3点測定法を採用した。従来のTIR測定のように1本のセンサを基準球に向かい合わせただけの場合、基準球の真円度誤差と軸心の動きとが合成された信号となり、そのまま回転誤差信号とはならない。そこで3点法真円度測定³⁾の原理を適用し、3本のセンサと数値計算処理とによって軸心の運動に影響されることなく基準球またはセンサターゲット(軸に設けられたセンサにて計測する部分)の外径形状を算出する。その形状データは軸の回転角に合わせてアナログ信号に変換され、それと各センサ出力の差をとれば実時間応答の軸心運動が得られる。

②のアクチュエータとして電磁石を採用した。電磁石で、鉄系材料で構成される軸に吸引力を作用させ、その強さをコイル電流でアナログ的に制御する。

3. 開発初期の検討項目の詳細

3.1 空気軸受の回転精度

一般的に制御性能を表す特性として、外部からの望ましくない変位に対してそれを戻そうとする復原力の強さを表わす[剛性]があり、これが強ければ強いほど誤差運動補正の能力は高まる。しかし、この能力は周波数特性を持ち、周波数が高くなると低下してしまう。したがって制御対象の空気軸受の回転誤差の振幅と周波数分布をつかむことが先決である。

図1に示すように回転軸の一端に基準球を取付け、X軸Y軸2方向のTIRをリサージュ法³⁾で測定する(使用した基

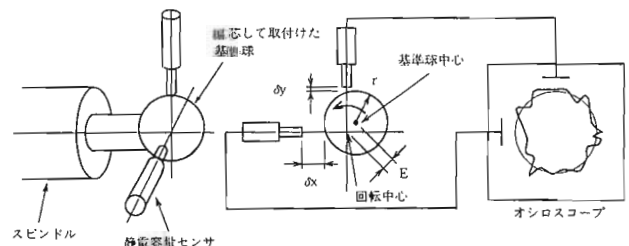


図1. リサージュ法による回転精度測定法

表1. 空気軸受の回転誤差の周波数成分

基本波	$0.2\mu\text{mp-p}$
2倍波	$0.15\mu\text{mp-p}$
3倍波	$0.1\mu\text{mp-p}$
-----	-----
7-12倍波	$0.04\mu\text{mp-p}$

準球の真球度は $0.1\mu\text{m}$ である)。また周波数分析を併用する。ただし周波数[Hz]基準ではなく軸一回転当たりの[倍数]に変換して表現する。表1に代表的な値を示す。12倍波までの回転誤差を補正するには、回転数を2000rpmとして、 $2000 \div 60 \times 12 = 400\text{Hz}$ までの剛性を十分強くしなければならない。また12倍波の誤差運動振幅は $0.04\mu\text{mp-p}$ なので、これを $0.01\mu\text{mp-p}$ に抑えるには、磁気補正による剛性を空気軸受単独の剛性より4倍強くすればよいことが予想できる。

3.2 空気軸受の不安定性

前項の検討より、要求されるおよその制御特性がわかったが、センサ・制御回路・アクチュエータからなる制御システムが、はたして安定に実現できるかどうか問題である。そのために、制御対象としている空気軸受がどんな振る舞いをしているかについて調べておく必要がある。

空気軸受にはいくつかの不安定現象が知られている。たとえば同期振動、ニューマチックハンマ、軸の曲げ共振などがある⁴⁾。

これらに対する特性を調べるため、周波数を変化させながら軸に微小な振動を与え、そのときの軸の挙動—伝達特性を測定した。図2はこのようにして、第1号試作スピンドルの空気軸受の動剛性を測定したものである。(構造は第4図に示されている最終試作高精度回転装置とほぼ同じである。)このスピンドルは空気軸受部が自成絞りでギャップは $20\mu\text{m}$ である。先端と後端にそれぞれ電磁石とセンサがとりつけられている。

電磁石に小さな正弦波電流を流し、軸に振動を与え、センサで振幅と位相を測定する。200Hz以下は一定で静剛性と等しく、その実測値は $2.5 \times 10^7\text{N/m}$ である。350Hz付近

で緩やかなピークを持ち、10dBの高さがある。それより高い周波数においては -40dB/decade で低下している。この特性は質量・粘性・バネ定数のいわゆる二次系の応答である。また1.9kHz、3.6kHzに軸の曲げモード共振の鋭いピークがみられる。

また、条件によっては350Hzのピークが極めて高くなることもあり、そのような場合は軸が自励的に振動を始める、いわゆるニューマチックハンマ現象を起こすことが分かった。

以上をまとめると表2のようになる。また、それに対する制御系の方策もまとめて併記した。

3.3 磁気補正装置の仮仕様

制御対象となる空気軸受の特性をもとに、磁気補正装置に要求される特性を仮に表3のようにしておく。

3.4 三点法回転精度測定装置の仮仕様

この装置は、軸の回転中に、3本のセンサ出力を最低1回転分デジタルメモリに記憶し、3点測定法の計算処理によってセンサターゲットの形状を求めるものである。図3にブロック図を示す。

表2. 空気軸受の不安定現象と制御系の方策

不安定現象	測定内容	制御系の方策
同期振動	回転数成分 剛性不足	剛性の向上
ニューマチックハンマ	350Hz +数+dB 空気の減衰過小	減衰項の付加 最大発生力
軸の曲げ共振	1.9kHz 3.6kHz	ノッチフィルタ

表3. 磁気補正装置の仮仕様

周波数応答	500Hz
最大吸引力	49N
最大制御可能範囲	$2\mu\text{m}$
電磁石の発熱	1W total

- ・電磁石のコアは0.35mm厚の珪素鋼板
- ・シャフト材質はSUS420J2
- ・空気軸受の絞りは自成絞

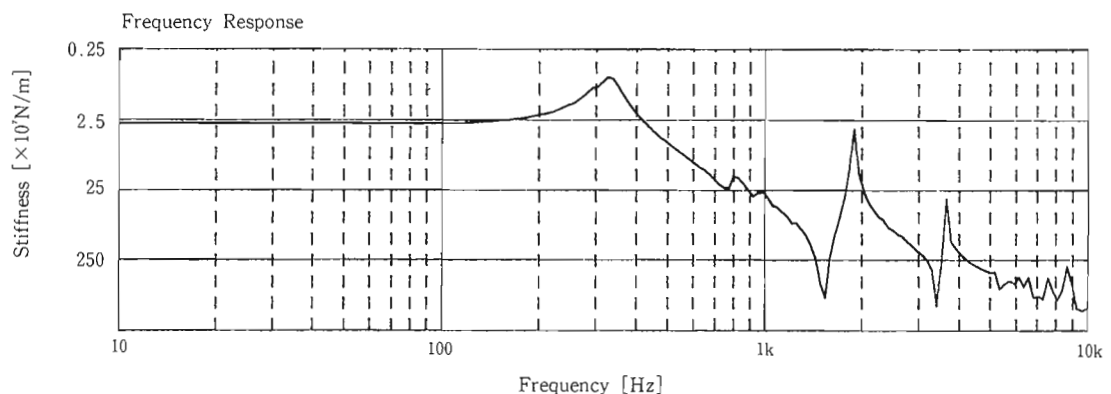


図2. 試作第1号スピンドルの動剛性特性

演算結果はX軸の方向から見た形状データとして得られるようになっているので、これを90°ずらせばY軸の方向から見た形状データとなる。その後、軸の回転角に同期させながらX軸、Y軸おのおののアナログ信号に変換し、センサA、センサBとの差を取れば実時間応答のX軸方向、Y方向の軸心の運動となる。

演算時間はできるだけ短い方が望ましいが、定速回転中はセンサターゲットの形状が刻々変化していくとは考えられず、数秒間の演算時間は許されるものと考えられる。

3.5 センサ

選定したセンサは(米) ADE社の静電容量型のもので、バンド幅40kHz、測定分解能0.01 μ m-pである。ただし、分解能を決定しているのはホワイトノイズであり、ローパス・フィルタ(以下LPFと表記する)を挿入しバンド幅を狭めれば、より向上させることができる。制御回路には10kHzのLPFで0.006 μ m-p、3点測定法には1kHzのLPFで0.003 μ m-pの分解能を得ている。

3.6 モータ

カップリングを使わず直接回転駆動力を得るためにビルトイン型とする。またラジアル方向の外乱発生をできるだけ少なくするには鉄心を使ったものは避ける。永久磁石とコイル電流が直接力を及ぼし合うタイプのものを使用した。ステータ側はコアレス界磁コイル、ロータ側は永久磁石である。駆動電流は完全なサイン波とする。

また、安定に制御できる周波数帯域を広くとるため、軸の曲げモード共振周波数が低下しないよう、モータの質量は、できるだけ小さくすることにした。

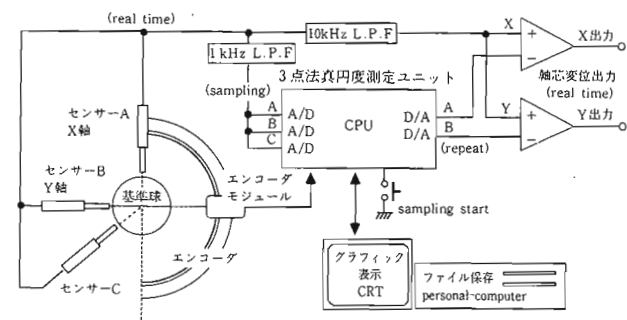


図3. 3点式回転精度測定装置ブロック図

4. 最終試作高精度回転装置

4.1 スピンドル部分と磁気補正装置部分

最終試作高精度回転装置の組図を図4に示す。[磁気で補正する空気軸受]とも[空気に支えられた磁気軸受]とも

みることもできる。空気軸受部へ空気を供給するため外筒は二つに分割する型式にした。磁気補正能力を大きくとるため、電磁石・センサを両サイドに配置した。磁気補正装

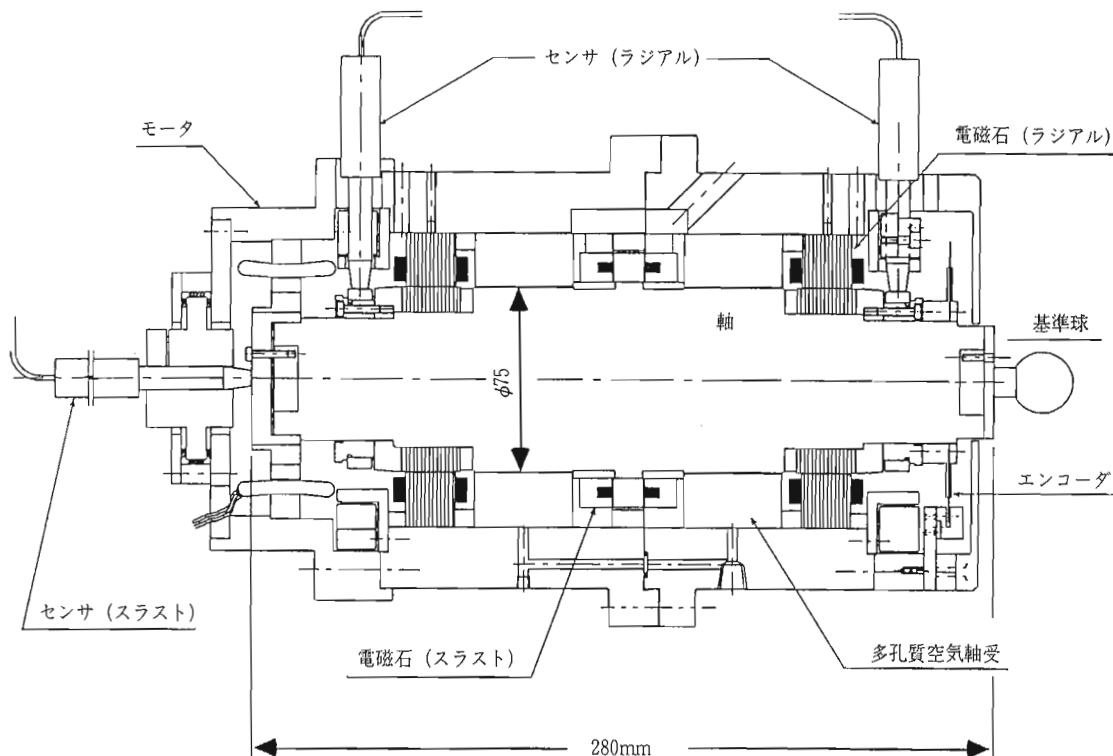


図4. 最終試作高精度回転装置の組立断面図

置の仕様を表4に示す。また当初の見込みから変わったところも併記する。

2000rpmで回転する空気軸受の発生する微小な振動は、500Hz以上の成分も含まれているため、はじめの仮仕様の500Hzの周波数応答では十分に回転誤差を補正することができなかった。周波数応答を高めるために、アルミナセラミックスの軸を用いて質量を軽くし、フェライトコアの電磁石を用いて磁力の時間遅れを小さくした。また自成絞りを多孔質絞りに変更して発生外乱を小さくした。モータの質量は軸の全質量に比べて小さく、曲げモード共振周波数が低下することはない。

スラスト方向に関しては外乱は発生しないと仮定し、非接触浮上させているだけである。空気軸受、磁気軸受両方も試作し特性を評価しているが、剛性は磁気が⁷⁾、また、最大負荷は空気が優れている。

4.2 3点法回転精度測定装置

表5に3点法真円度測定ユニットの仕様を示す。初期の装置では、CPUにインテル社の8087-8MHzを使用し演算時間は約3秒であった。問題はパソコン内のクロックノイズが大きいことであった。そこで3点測定回路とCPUをユニットとして単独ケースに納めパソコンから離し、演算の時以外はクロックを停止させておく。(英)インモス社の

T800-20MHzは起動が極めて速くこのような使用方法に向いており、演算時間も0.3秒と優れている。図5に本装置の外観を示す。

エンコーダは0.1mm厚のステンレス板に2048本のスリットをエッチングした光透過型であり、検出モジュールは別に取り付けられるので自由度が大きい。

表4. 磁気補正装置の仕様

周波数応答	800Hz
最大吸引力	10N
最大制御可能範囲	1 μ m
電磁石の発熱	1 W total

- ・シャフトはアルミナセラミックス材で質量 6.8kg
- ・電磁石はコイル側も軸側もフェライト材
- ・空気軸受の絞りは多孔質絞りで ギャップ 20 μ m
- ・モータのロータ質量 520g

表5. 3点法真円度測定ユニット

データ取り込み数	2048points/rev
チャンネル数	6 ch
A/D変換分解能	12bit
最高サンプリング速度	300kHz
演算時間	約0.3sec



図5. 3点法真円度測定ユニット (210^W×110^H×300^D)

5. 結果

5.1 3点法回転精度測定装置による回転精度測定

“3点法回転精度測定装置”を使ってセンサターゲットの真円度と軸心の運動とを測定した。マジックインキで小さな印をつけ、このマークが正しく再現できるかどうかで真円度測定の信頼性を評価する。結果を図6に示す。左図がセンサ出力、中央の図が3点法で算出した形状、右図は両者の差であり、軸心のふれである。形状算出の計算は120次フーリエ成分まで行った。右図にはマークの成分が若干残っておりまだ完全とは言えないが、実際にはこのような鋭いマークはあり得ないので実用には問題はないと思われる。

左図のセンサ出力を2000rpmと1000rpmとで比較してみるとそれほど顕著な差は分らないが、右図で比較するとその違いがよく分かる。また3点法で算出されたセンサターゲット形状は回転数にはほとんど無関係で、中央の図を

ふたつ重ねてみると大変良く一致している。

5.2 最終試作高精度回転装置の動剛性

図7は最終試作高精度回転装置の動剛性特性である。上のカーブは空気軸受単独の場合、下のカーブは空気軸受で浮上させかつ磁気補正をかけた場合である。(第1号試作スピンドルとは異なる。)両者の差が補正能力をあらわしている。たとえば100Hzでは二つのカーブの剛性比は1.5:24[$\times 10^7$ N/m]=1:16である。もし100Hzの外乱が1 μ mの振幅で入ってきたとすれば、制御を働かせることによって1/16の0.06 μ mに縮小できる⁸⁾。両者は800Hzで交わっており、補正能力は800Hzまでである。この周波数における剛性値は8.5 $\times 10^7$ N/mであり、数年前の当社の製作した内研スピンドル用磁気軸受と比べて40倍高くなっている。

もうひとつの特徴は、補正をかけたものは、同期振動の

要因となる250Hzにおけるピークが見られないことであり、-30dBも減衰しているのが読みとれる。これは大きなメリットである。図8に全体のブロック線図を示す。

5.3 補正制御結果

図9に磁気補正制御を働かせたときの回転精度を示す。デジタルストレージオシロにて軸の一回転分、1000点のX方向とY方向のデータを取り込み、X-Y表示した。見やすくするため適当な半径の基準円を付け足してあらわすと右図のようになる。2000rpmのとき補正誤差残差が0.008 μ m-pとなっている。この図はモータでドライブしている状態であり、回転中にモータ配線ははずしても変化がないこと

からモータの外乱はないものとみなせる。

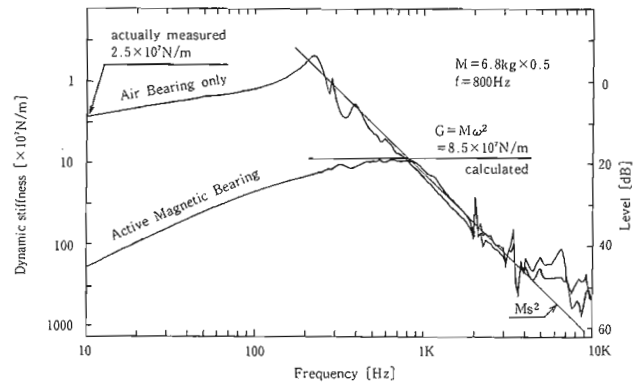


図7. 最終試作高精度回転装置の動剛性特性
空気軸受単独の場合 (上)
磁気補正制御を働かせた場合 (下)

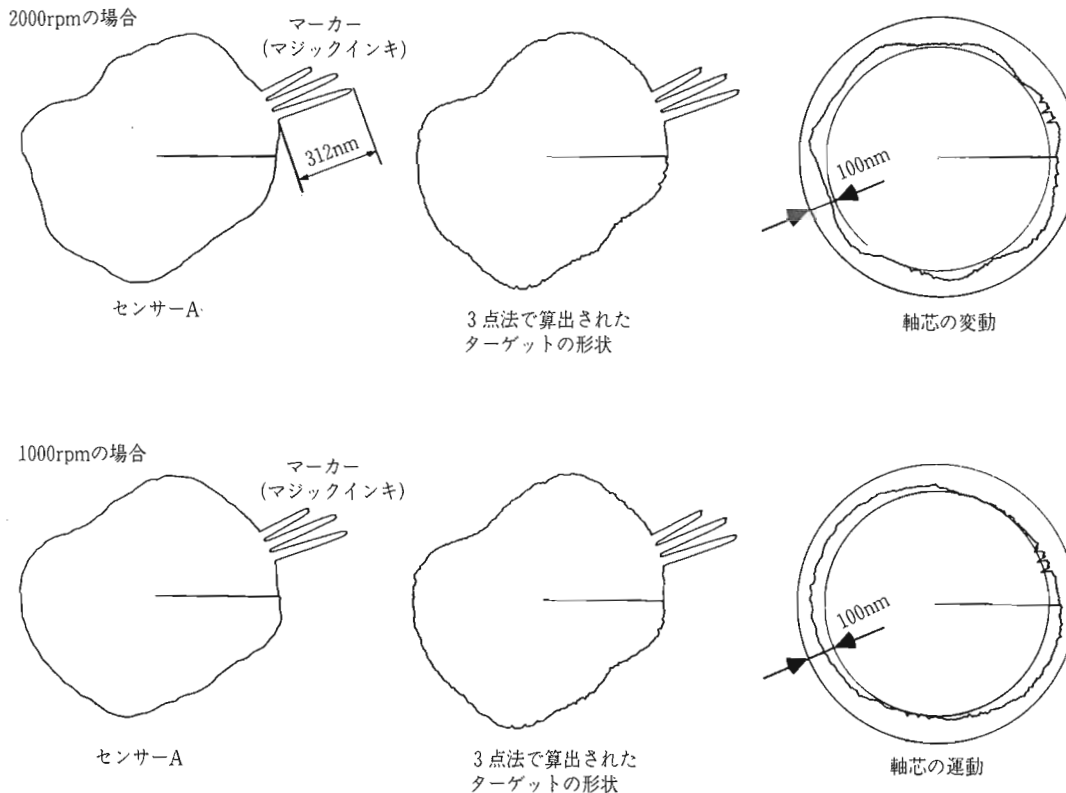


図6. 3点法回転精度測定装置による(中央)センサターゲット真円度と(右図)回転誤差

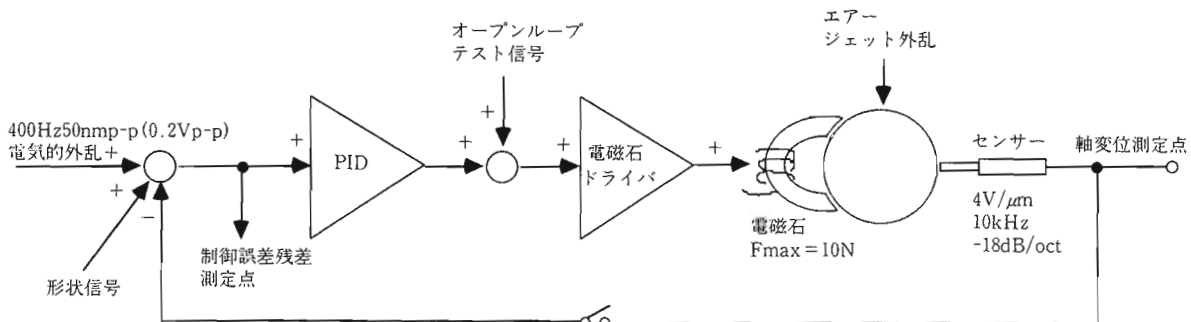
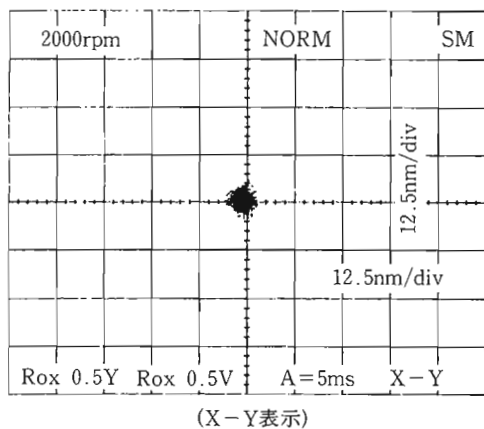
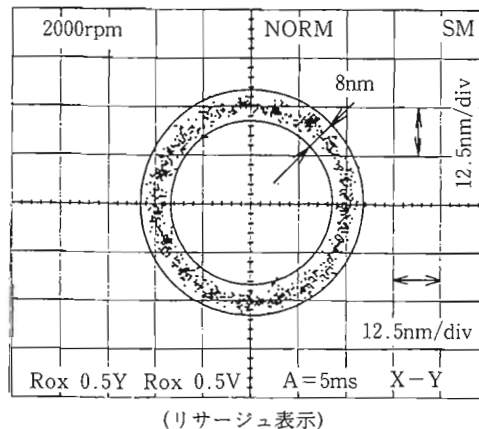


図8. 制御システムブロック線図



(X-Y表示)



(リサーチ表示)

図9. 回転精度 (制御誤差信号)

6. まとめ

- (1) 空気軸受に磁気補正装置を取り付けて $0.008\mu\text{m-p}$ の回転精度を得た。
- (2) 3点法によって $0.003\mu\text{m-p}$ の分解能で軸心の運動軌跡が得られるようになった。

7. おわりに

今後の課題としてつぎの2点があげられる。

- (1) 実際に加工に適用し、スラスト方向の外乱、センサーターゲットの経時変化などについて問題を洗い出す。
- (2) 3点法の高次の信頼性を上げ、120倍波までの形状算出を完全にする。

なお、本研究は、通商産業省工業技術院の産業科学技術研究開発制度に基づき実施されている“超先端加工システムの研究開発”の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構から超先端加工システム技術研究組合への委託事業によりまとめたものである。

文献

- (1) 三井. 日本機械学会論文集 (C編). 48(425), 115-123 (昭57.1)
- (2) 青木, 大園. 精密機械. 32(12), 831 (昭41)
- (3) 垣野. 工作機械84-1st Issue. 大河出版, 1984, p.41 (ISBN4-88661-701-8)
- (4) 福山. 機械の研究. 34 (1), 114-120(1982)
- (5) 十合. 気体軸受. 共立出版, 1984, p.121-123 (ISBN4-320-08035-1)
- (6) 米山他. 日本機械学会論文集 (C編). 54(507), 2723-2728 (昭63-11)
- (7) 原. 電気学会リニアドライブ研究会資料. LD-92-82.p.21-26
- (8) Hara et. al. Proceeding of the Third International Symposium on Magnetic Bearings. TECHNOMIC Publishing Co., 1992-Aug., p.421-428 (ISBN0-87762-976-5)



原 外満