

# 非点収差法を用いた 3 軸変位測定法の研究

## Development of 3 Axes Displacement Measurement System Using Astigmatism Method

CM03008 鳥井 浩平 (指導教員 河村 良行教授)

Kouhei TORII (Yoshiyuki KAWAMURA)

### Abstract

We have developed a 3-D displacement sensor for a Magnetic Suspension and Balance System (MSBS), which is able to measure horizontal, vertical and depth direction. We used astigmatism method for the depth direction. The experimental result showed that horizontal, vertical, and depth accuracy are 8.6 $\mu$ m, 15.4 $\mu$ m, and 182 $\mu$ m, respectively. Horizontal and vertical movement interfered with depth direction. The interference was successfully corrected by means of analytical method using the Mathematica. 2:1 cylindrical model position and altitude was successfully controlled, although typical vertical oscillation of the model was observed. The amplitude of the typical vertical oscillation of the model was suppressed by means of numerical correction.

Key words: Astigmatism, Magnetic Suspension and Balance System (MSBS), 3-D Displacement sensor

### 1. 緒言

現在、本研究室が開発した磁力支持天秤装置は 6 軸制御により直径 70mm、長さ 140mm の円柱模型の浮上、同模型による風洞実験を行える段階である。6 軸制御時浮上模型は、水平面の 2 軸と鉛直方向の 1 軸、これら各軸の回転軸、計 6 軸の変位を計測しなければならない。このとき現在の磁力支持天秤装置では Fig.1 のように、2 軸変位測定装置と 1 軸変位測定装置を複数組み合わせることによって 6 軸の変位を測定している。

変位測定装置の測定精度と複数の軸を同時に測定することによって発生する軸間干渉は、磁力支持天秤装置の支持精度に影響する重要な部分である。本研究では、従来用いられていた 2 軸変位測定装置に「非点収差法」を組み込むことにより、一つの測定装置で 3 軸変位測定が可能となる測定装置の研究を行う。3 軸変位測定装置を磁力支持天秤装置で使用することにより測定装置の有効性を調べる。

### 2. 変位測定原理

#### 2.1 2 軸変位測定原理

Fig.1 に示すように、測定対象物である模型の上側の中心と下側の中心に再帰反射シールを貼り、レーザーからの集光像が再帰反射シールを覆う大きさとなるよう上下からレーザー光を照射する。再帰反射シールからの光は 4 分割光検出器上に集光され、測定対象物の x 軸、y 軸の 2 次元的な変化がそのまま 4 分割光検出器上の集光像の 2 次元的な変化となる。この時、光検出器から出力される 4 種類の電圧を式(1)、(2)に代入し計算することによって x 軸と y 軸の変位を計測することができる。

$$h_x = \frac{((V_1 + V_2) - (V_3 + V_4))}{(V_1 + V_2 + V_3 + V_4)} \quad (1)$$

$$h_y = \frac{((V_1 + V_4) - (V_2 + V_3))}{(V_1 + V_2 + V_3 + V_4)} \quad (2)$$

#### 2.2 3 軸変位測定原理

従来の 2 軸変位測定装置を基に、「非点収差法」を用いた奥行き方向の変位測定機能を付加することによって 3 軸変位測定を行う。非点収差とはレンズの焦点距離が光軸を含む直交する縦断面と横断面二つの断面で異なる値を持つことによる収差である。Fig.3 に示すかまぼこ形のシリンドリカルレンズは、レンズ作用を持つ断面 A-A' と、レンズ作用を持たない断面 B-B' を持つレンズである。シリンドリカルレンズを使用した非点収差を持つ光学系で反射シールからの点像を結合すると、奥行き方向の変位によって像が縦長、円形、横長と変化する。

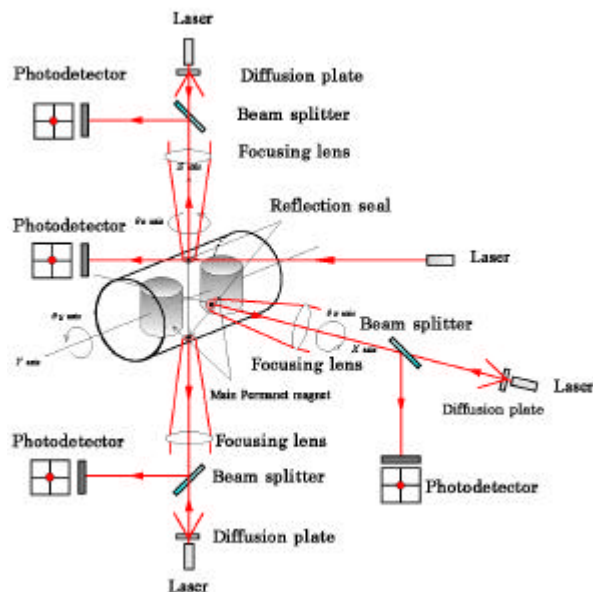
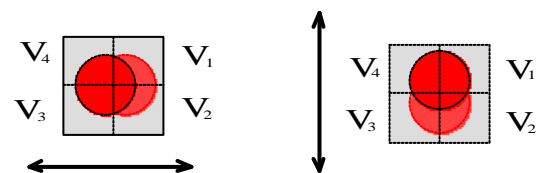


Fig.1 Displacement sensors system used with MSBS.



(a) x axis movement

(b) y axis movement

Fig.2 x and y axis movement focusing image on the photodetector.

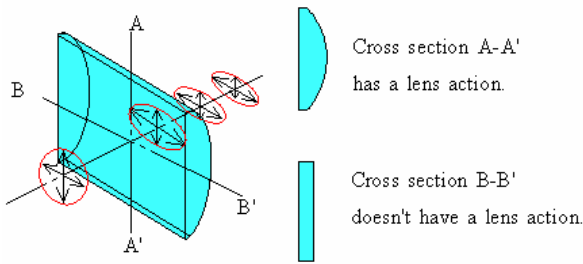


Fig.3 Cylindrical lens.

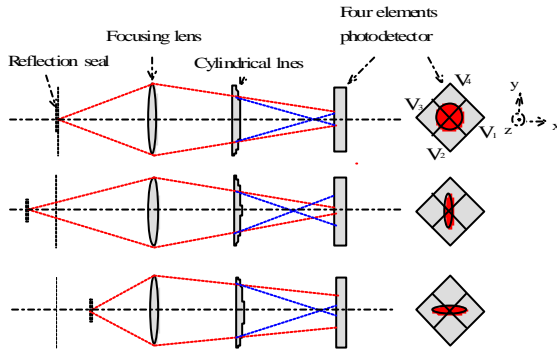
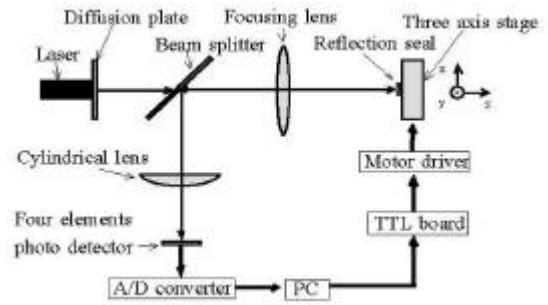


Fig.4 Typical three types of reflect images.

奥行き方向の変位測定を行うには、4分割光検出器の対角線上の二つの素子で、集光像の縦横比変化を検出できるように4分割光検出器を45°回転させ配置する。このときx,y軸の移動軸と計測軸が45°ずれているため、式(1)、(2)で求めた値を45°回転補正を行わなければならない。奥行き方向の変位測定は2軸変位測定と同様に、光検出器から出力される4種類の電圧を式(3)に代入し計算することによってz軸の変位を計測することができる。

$$h_z = \frac{((V_1 + V_3) - (V_2 + V_4))}{(V_1 + V_2 + V_3 + V_4)} \quad (3)$$

### 3. 実験装置

3軸変位測定実験装置図をFig. 5に示す。実験装置は、半導体レーザー、拡散板、ビームスプリッタ、集光レンズ( $f=100$ )、円柱レンズ( $f=150$ )、直径3mmの再帰反射シール、4分割光検出器、3軸ステージ、パソコンなどから構成されている。図中の軸方向は、光軸に対して水平方向をx軸、垂直方向をy軸、光軸方向をz軸とする。まず、半導体レーザーから照射された光は、拡散板で拡散し集光レンズによって直径8mmの大きさで集光する。次に反射シールからの戻り光は、再び集光レンズを通過し、ビームスプリッタで分光され円柱レンズを通過後4分割光検出器上に照射する。このとき生じる光検出器からの電圧をパソコンに入力する。

本装置が変位を測定する磁力支持天秤装置の浮上模型は、回転運動を行うときに反射面が傾くため、反射シールが鏡面反射をすると光検出器に反射光を集光することができない。本装置では、反射面が多少傾いても光検出器に反射光を集光させるために露出レンズ型再帰反射シールを使用する。

## 4. 実験方法

### 4.1 3軸変位測定装置の1軸変位校正実験

1軸変位実験では、測定対象物の変位と変位の結果出力される電圧値の関係を調べるために校正実験を行う。反射シールを貼った3軸自動ステージの3軸それぞれをx軸,y軸に1ステップ10 $\mu$ mずつ $\pm 1$ mm範囲、z軸に1ステップ50 $\mu$ mずつ $\pm 5$ mm範囲で移動させ光検出器からの電圧値をパソコンに入力する。1ステップ毎に100データ入力し、平均化した値を取得する。

### 4.2 3軸同時変位実験

1軸変位校正実験は、測定対象物が1軸のみ移動する限定された場合である。本装置が実際の測定状況である測定対象物が3次的に変位した場合でも測定が行えるか、測定対象物であるステージの3軸を同時に移動させた場合の実験を行う。ステージの移動条件は、x軸,y軸に10 $\mu$ mずつ $\pm 1$ mm範囲、z軸に50 $\mu$ mずつ $\pm 5$ mm範囲とする。

### 4.3 3軸変位測定装置を用いた磁力支持制御

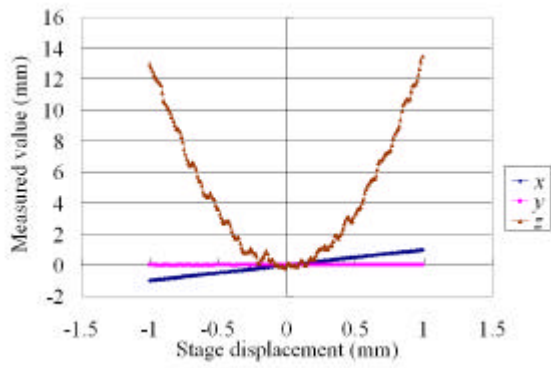
これまでの3軸同時変位実験より、測定対象物が3次的に変位した場合でも測定可能であることが確認できた。実際の測定条件で3軸変位測定装置が機能するか3軸変位測定装置を磁力支持天秤装置に設置し磁力支持制御を行う。本実験では、外力を与えない静的な状態で安定度と、浮上模型の位置をステップ状に移動させたときの軸間干渉を調べる。

## 5. 実験結果及び考察

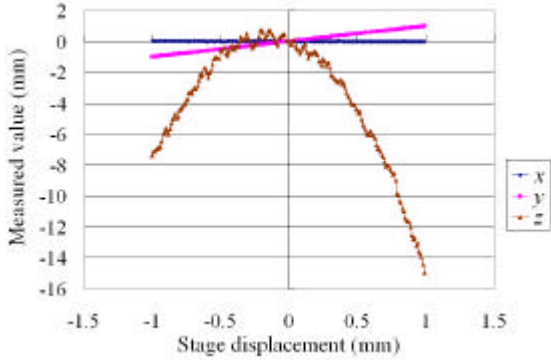
### 5.1 3軸変位測定装置の1軸変位計測

実験の結果x軸,y軸,z軸移動時、主たる信号である $h_x, h_y, h_z$ は線形的に出力された。ステージの変位と出力された電圧比の一次近似線からの標準偏差は、x軸8.6 $\mu$ m、y軸15.4 $\mu$ m、z軸182 $\mu$ mとなった。x,y軸は、目標の測定精度を得たが、z軸は目標の測定精度を得ることができなかった。x軸とy軸の測定可能範囲は $\pm 1$ mmであるのに対して、z軸の測定可能範囲は $\pm 5$ mmと広く、変位に対して出力される電圧比の感度が低く測定精度も悪くなった。

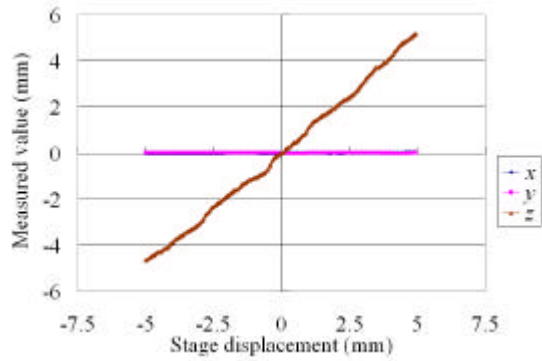
次にFig.6(a),(b)からx軸,y軸移動させたときにz軸が二次曲線的に干渉していることがわかる。この干渉によってz軸の正確な変位を求めることができないため、干渉の補正を行わなければならない。補正は、x軸,y軸、z軸と $h_x, h_y, h_z$ の影響関数Table.1にまとめる。Table.1を式にすると、



(a) x axis movement



(b) y axis movement



(c) z axis movement

Fig.6 Measured displacement as a function of stage displacement.

	$h_x$	$h_y$	$h_z$
$x$	0.4553x	0.0065x	0.1603x <sup>2</sup> +0.001x
$y$	-0.0067y	0.4722y	-0.1346y <sup>2</sup> -0.0413y
$z$	0.0018z	-0.0011z	0.0119z

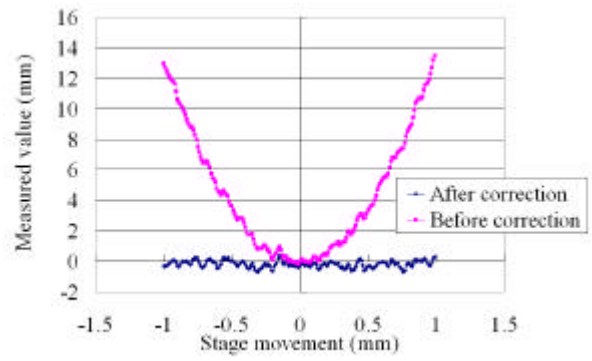
$$h_x = 0.4553x - 0.0067y + 0.0018z \quad (4)$$

$$h_y = -0.0065x + 0.4722y - 0.0011z \quad (5)$$

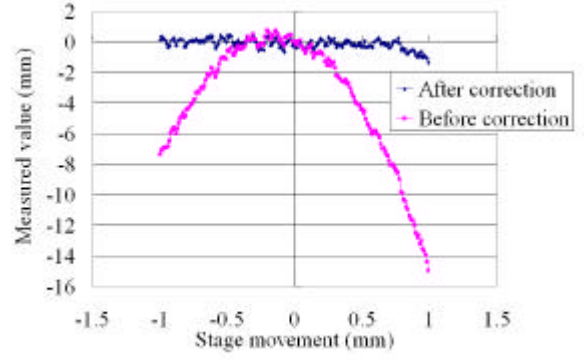
$$h_z = 0.1603x^2 + 0.001x - 0.1346y^2 - 0.0413y + 0.0119z \quad (6)$$

となる。

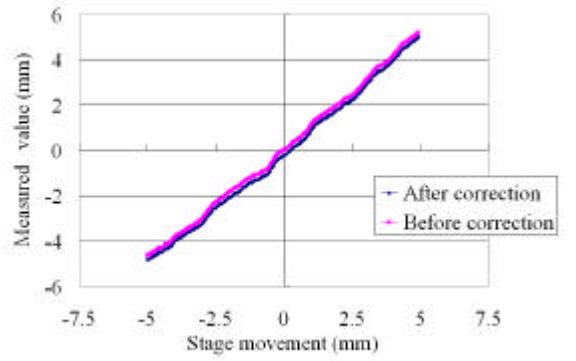
この三元連立二次方程式の解を Mathematica で解くことにより、軸間干渉が補正された式(7),(8),(9)を求めた。このとき二次方程式であるため二組の解が求められるが、本実験では実際に計測した電圧比の値をそれぞれの組の式に代入し、計算の結果妥当な値を示した式を選定した。



(a) x axis movement



(b) y axis movement



(c) z axis movement

Fig.7 Before correction as a function of after correction.

$$x = 1.951 \times 10^{-5} \times (6.983 \times 10^5 - 4.958 \times 10^4 \times h_x - 8.113 \times 10^4 \times h_y - 8.895 \times 10^4 \times \text{Sqrt}[61.63 - 28.63 \times h_x + h_x^2 - 14.34 \times h_y + 3.273 \times h_x \times h_y + 2.678 \times h_y^2 + 3.005 \times h_z]) \quad (7)$$

$$y = 6.374 \times 10^{-14} \times (-1.300 \times 10^{14} + 2.971 \times 10^{13} \times h_x + 4.862 \times 10^{13} \times h_y + 1.656 \times 10^{13} \times \text{Sqrt}[61.630 - 28.63 \times h_x + h_x^2 - 14.340 \times h_y + 3.272 \times h_x \times h_y + 2.678 \times h_y^2 + 3.005 \times h_z]) \quad (8)$$

$$z = 1.951 \times 10^{-5} \times (-1.782 \times 10^8 + 4.137 \times 10^7 \times h_x + 2.111 \times 10^7 \times h_y + 2.270 \times 10^7 \times \text{Sqrt}[61.63 - 28.63 \times h_x + h_x^2 - 14.34 \times h_y + 3.273 \times h_x \times h_y + 2.678 \times h_y^2 + 3.005 \times h_z]) \quad (9)$$

補正後ステージが実際に移動した時の変位と、計測した変位のグラフを Fig.7 に示す。x 軸,y 軸,z 軸移動時に計測される3種類の値の標準偏差は、x 軸 8.6 $\mu$ m、y 軸 15.1 $\mu$ m、z 軸 182 $\mu$ m となった。結果より、x,y 軸移動時に生じるz 軸の誤差は補正を行うと約 350 $\mu$ m 程度のばらつきはあるが、二次曲線的な干渉を解消することができた。



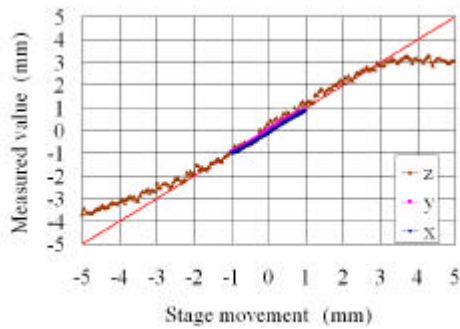


Fig.8 Measured value as a function of stage movement.

### 5.2 3軸同時変位実験

Fig.8に3軸同時変位実験結果を示す。x軸、y軸はステージの変位 $\pm 1\text{mm}$ に対して $\pm 1\text{mm}$ の値が計測され、ほぼ線形的な関係となった。z軸は $+2.5\text{mm}$ 以上、 $-2.5\text{mm}$ 以下でステージの変位に対して計測された値が飽和し非線形的な関係となったが、 $\pm 2.5\text{mm}$ の範囲内では線形的な関係となった。このことから、x軸、y軸で $\pm 1\text{mm}$ 、z軸で $\pm 2.5\text{mm}$ の測定範囲内であれば測定対象物の3次元的な変位を測定できることが確認された。

### 5.3 3軸同時変位測定装置を用いた磁力支持制御

Fig.9にz軸方向の振動を示す。結果から、補正によってz軸の振動が減少したことが分かる。これは、x,y軸方向の変位による干渉が補正されたことによって減少したと考えられる。x,y軸方向の振動は従来の変位測定装置と同程度であった。z軸方向の振動は、測定装置の分解能が $200\mu\text{m}$ 程度であることから、測定限界による振動であると考えられる。

x軸のステップ応答の結果、z軸の変位がステップ状に変化し干渉が発生した。y軸のステップ応答は、ステップの瞬間z軸の変位がパルス状に変化した。z軸方向の支持範囲は $2.4\text{mm}$ であった。

## 6. 結言

本研究では、磁力支持天秤装置で従来使用されていた2軸変位測定装置の光学系に円柱レンズを追加し、非点収差を作り出した。これにより、1つの測定装置で、x,y,z軸方向の変位測定が可能となった3軸変位測定装置を開発した。1軸変位計測の結果、x軸、y軸は従来の変位測定装置と同程度の測定精度を得ることができた。z軸は測定対象物の変位に対して、集光像の縦横比変化が少ないためx,y軸に比べて測定可能範囲が広く測定精度も低い結果となった。この3軸変位測定装置を磁力支持天秤装置に設置し、磁力支持制御を行った。その結果、外力を与えない静的な状態では、測定限界による振動が発生した。ステップ応答を与えた実験では、x,y軸からz軸への干渉が確認された。

本研究から3軸測定装置は、精度や干渉のさらなる改善によって有効な測定装置となると考えられる。

### 参考文献

(1) 林 貴弘：平成9年度卒業論文「非点収差法による光軸垂直方向の変位測定法に関する研究」

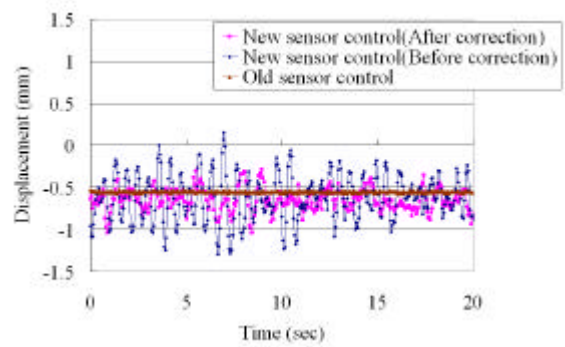
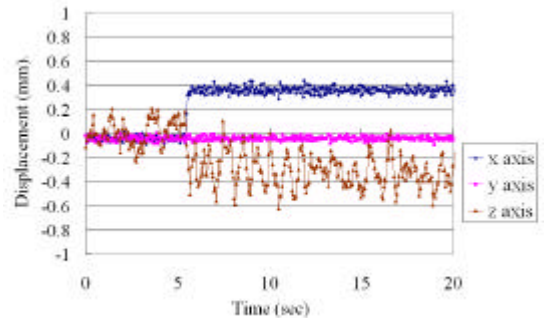
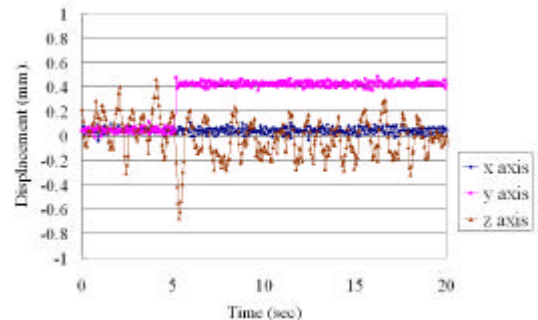


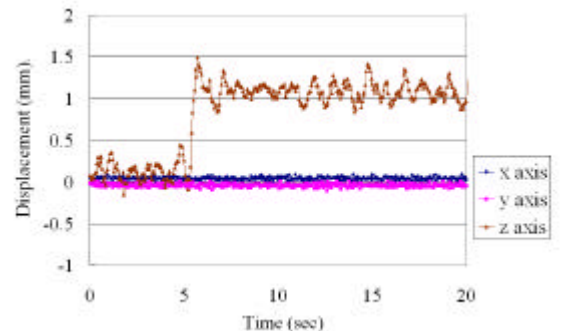
Fig.9 Comparison of vibrations in difference between sensors.



(a) x axis step response



(b) y axis step response



(c) z axis step response

Fig.10 Interference of step response between different axes.

### これまでの研究業績

- [1] Jongbin OH, Kouhei TORII, Yoshiyuki KAWAMURA, Taketo MIZOTA ; “Development of 6-axes Magnetic Suspension and Balance System in Fukuoka Institute of Technology” 7<sup>th</sup> International Symposium on Magnetic Suspension Technology(2003), Page 262-267.
- [2] 鳥井浩平、河村良行：「非点収差法を用いた3軸変位測定法の研究」：日本機械学会2004年度年次大会、北海道大学