

# 磁気吸引力を利用した 2 軸可撓支持微動テーブルの開発

## Developing of biaxial flexible support table for fine positioning by magnetic attraction controlled

○学 河田 謙介<sup>\*1</sup>, ◎正 田丸 雄摩<sup>\*1</sup>, 正 清水 浩貴<sup>\*1</sup>

Kensuke KAWATA<sup>\*1</sup>, Yuuma TAMARU<sup>\*1</sup> and Hiroki SHIMIZU

<sup>\*1</sup> 九州工業大学 Kyushu Institute of Technology

**Key Words** : Fine positioning, Frictionless motion, Flexible support, Magnetic attraction control, Biaxial positioning

### 1. 結 言

近年、機械加工品は超小型・超微細化が進展しており、位置決めもそれに適応する性能が要求される。ところで、位置決め性能を高めるには微動で生じる摺動摩擦の低減が効果的である。一方、剛性を確保する観点では可撓支持が有効である。そこで本研究では永久磁石と電磁石相互間の磁気吸引力を駆動源とする可撓支持微動テーブルを提案する。非接触で駆動力が伝達されるため高精度位置決めのため有利であり、電磁石への印加電流で自在に吸引力が調整できるため、簡単な弾性ヒンジ構造で長ストロークから高分解能に至る微動性能が期待される。今回、1 軸微動装置での性能評価<sup>(1)</sup>をもとに 2 軸での微動を可能にする装置を開発した。本装置の特徴は各軸に対して永久磁石と電磁石を 2 対設けた点にある。これにより磁極間隔の一方を広く、他方を狭くすることで同じ印加電流でも異なる吸引力を生じさせられるため、長ストロークと高分解能に至る微動を連係して出力可能である。これらの微動特性に加えて理論変位との比較や軸間干渉の測定、および、長ストロークと高分解能微動を連係させた場合の性能評価について報告する。

### 2. 可撓機構と微動原理

図 1 に可撓機構と微動原理を示す。(a)は微動が生じる前の初期状態を表す。可撓機構は円弧切欠きの弾性ヒンジを施した 4 本のビームで構成される。ビーム 1~4 は A2017, C5191, SUS304 の 3 種類を交換可能で互いに端部をボルト締結しており、厚み×全長=6×400, 切欠き厚み=1 である。また、ビーム 1, 3 の中央部を固定支持、ビーム 2, 4 は中央部をストラットで結合し、ビーム 2, 4 の外側中央部とストラットの中央両側面には永久磁石(ネオジウム磁石:以下 PM と称する), 上部にテーブルを設置している。PMA~D はφ30 で厚み $t=1,2$ (磁束密度:40mT, 79mT)の 2 種類を用いる。予め $t=2$ が取り付けられており、 $t=2:1$ 枚の場合と $t=2$ に $t=1$ を吸着させた $t=2+1:2$ 枚の場合で磁力を生じさせる。(b)は PM B に対して適当な間隔で電磁石(以下 EM と称する)を対向設置した場合に、磁極間に作用する吸引力で B 側(X 軸)に微動する様子を模式的に示す。(c)は同様に C 側(Y 軸)に微動する様子を示し、各々逆方向に吸引力を作用させれば A,D 側に微動する。また、可撓機構は各軸に対して対称構造であるため幾何形状的には軸間干渉は生じない。

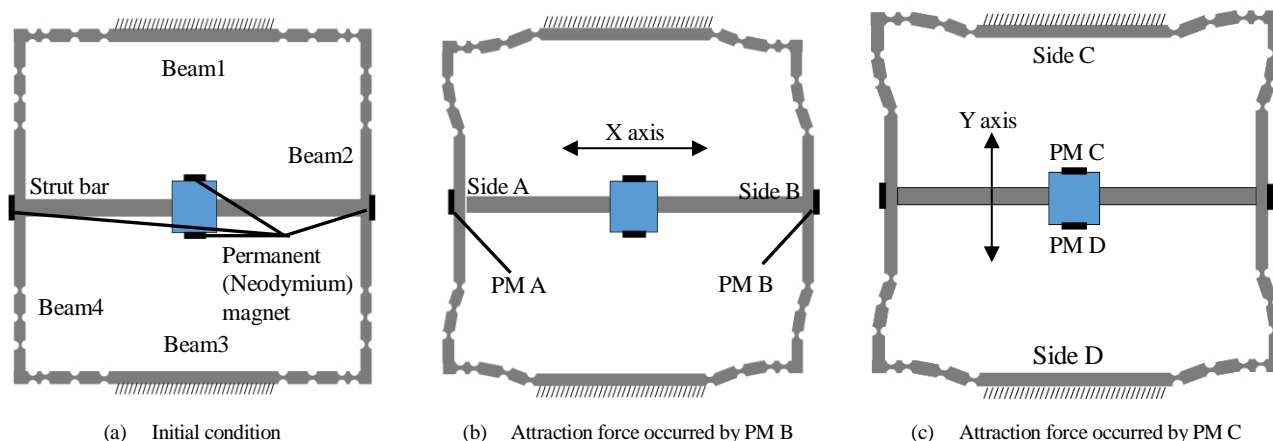


Fig.1 Table positioning and flexible hinges deformation

### 3. 印加電流, 吸引力に対する出力変位の見積

可撓機構を設計するために電磁石の印加電流～磁極間の吸引力～出力変位の三者間の関係を見積もる必要がある。印加電流と吸引力の関係は理論的に予測し難いため EM, PM の磁極間隔と吸引力の関係を実験的に求めた。図 2 は PM の厚み  $t$  と磁極間隔  $Gap$  がそれぞれ  $t=2+1$ ,  $Gap=0.2$  (最大吸引力) および  $t=2$ ,  $Gap=5$  (最小吸引力) での印加電流と吸引力の関係を示す。実験は各条件でそれぞれ 5 回行ったが、ここでは 1 回目の実験結果を示している。印加電流の最大は発熱を考慮して 2A とした。1 回目の電流増減時に 0A に戻しても吸引力はゼロにならず残留磁気によるヒステリシスが表れるが、2 回目以降、増減を繰り返す過程ではヒステリシスが表れず、2A での吸引力は残留磁気分小さくなった。なお  $Gap$  を  $\infty$  にした後に試験をすると図 2 の特性が再現した。図 3,4 は各軸の吸引力とテーブル変位の関係を CATIA で解析した結果であり、変位の大小はヤング率:  $A2017 < C5191 < SUS304$  に倣っている。なお、同条件下では剛性の違いから X 軸変位  $>$  Y 軸変位の関係になっている。当結果と図 2 の結果を用いると図 5,6 で示す各軸の印加電流に対する微動変位を見積もることができる。

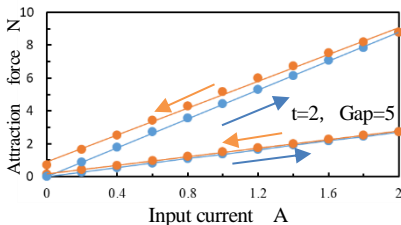


Fig.2 Relationship between input current and attraction force

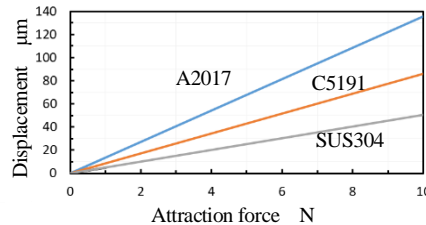


Fig.3 Theoretical of flexible support stiffness (X axis)

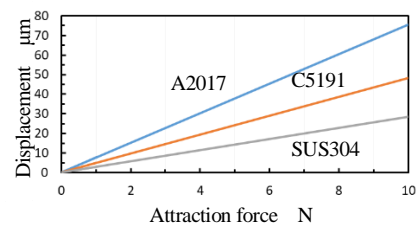


Fig.4 Theoretical of flexible support stiffness (Y axis)

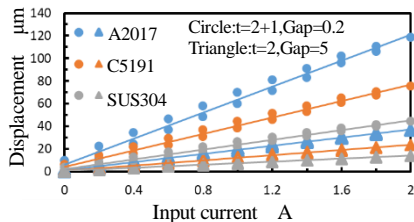


Fig.5 Theoretical relationship between input current and displacement (X axis)

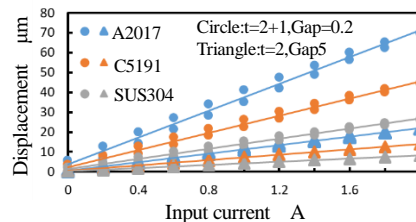


Fig.6 Theoretical relationship between input current and displacement (Y axis)

### 4. 磁極間隔調整による吸引力制御と変位計測

EM と PM は X, Y 軸に対して各々 2 対設置し, EMA~D (心棒: S45C, 線材: 銅,  $\phi 0.4$ , 330 巻, 磁極面径  $\phi 25$ ) は直動ステージで磁極間隔を調整できる。つまり、図 7 に示すように  $Gap X_1, X_2$  および  $Y_1, Y_2$  を個別で設定できるため例えば  $X_1 < X_2$ ,  $Y_1 < Y_2$  とすると図 1 で示す B および D 側ではストロークは小さいが高分解能変位の位置決め、A および C 側ではその逆の特性の長ストローク位置決めができる。さらに両者を関係させることで長ストロークと高分解能位置決めを容易に両立できる。図 8 は EMA~D の駆動および変位計測システムを示す。EM への電流は直流安定化電源で印加し、外部電圧 (ファンクションジェネレータ) 制御によって各々の磁力を個別に調整できる。変位は X, Y, Z 各軸方向に対して静電容量型変位計で計測し、PC でデータを取得する。

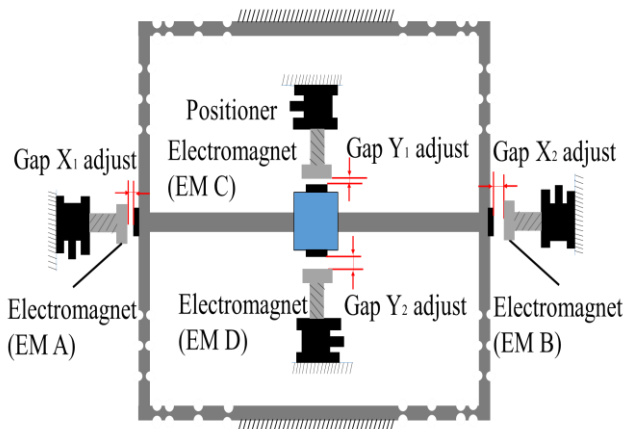


Fig.7 Adjustable gap for attraction force

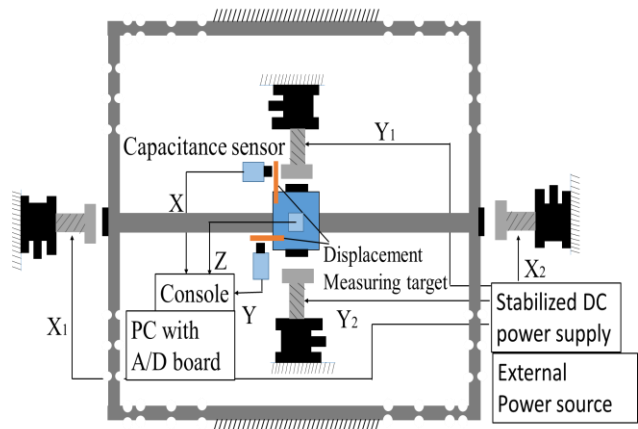


Fig.8 Driving and measuring system

## 5. 微動特性

可撓機構に A2017 を設定し, X 軸微動, Y 軸微動, X-Y のジグザグ微動を行わせたときの特性を以下に示す.

### 5・1 X 軸微動

3 軸座標を図 9 のように定義したときの X 軸微動の結果を図 10~13 に示す. 図 10 は図 1(b)に示す PM A を  $t=2+1$  に設定して Gap  $X_1=0.5$ , Gap  $X_2, Y_1, Y_2=\infty$  で EM A を設置した場合における印加電流  $0.4A \times 5$  ステップの長ストローク微動の結果である. Gap  $X_1=0.2$  で最大吸引力が得られるが電流を大きくすると PM A と EM A が接触するため  $0.5$  としている. 電流変化に追従したステップ応答を観察でき, 約  $340 \mu m$  の最大変位を得た. なお 3 章より見積では  $113 \mu m$ , 約 3 倍となった. また, Z 軸干渉はほぼゼロだが Y 軸干渉が X 軸変位の 4%程度発生した. 図 11 は同じく最小吸引力を与えて高分解能変位を得た結果である. 印加電流は階段形状変位を観察できる限界の  $2mA$  とした. 1 ステップ変位は約  $85nm$  であった. 図 12 は A 側:長ストローク, B 側:高分解能微動を設定し, 両者の連係で変位を増減させた場合のステップ応答を示す. 図より連係微動が認められ, 長ストローク, 高分解能ともにそれぞれを単独で微動させた図 10,11 とほぼ等しい最大変位と 1 ステップ変位が得られた.

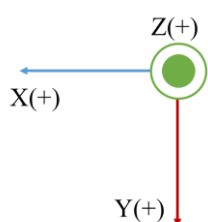


Fig.9 Definition of coordinate axis

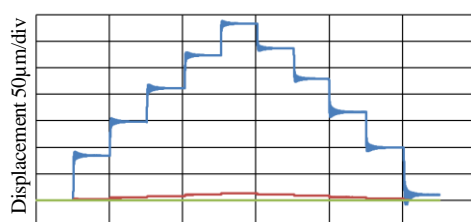


Fig.10 Coarse step feed ( $t=2+1$  Gap  $X_1=0.5$   
Gap  $X_2, Y_1, Y_2=\infty$  Current step= $0.4A$ )

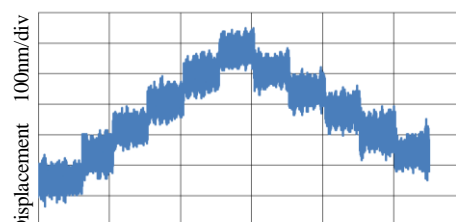


Fig.11 Fine step feed ( $t=2$  Gap  $X_1=5$   
Gap  $X_2, Y_1, Y_2=\infty$  Current step= $2mA$ )

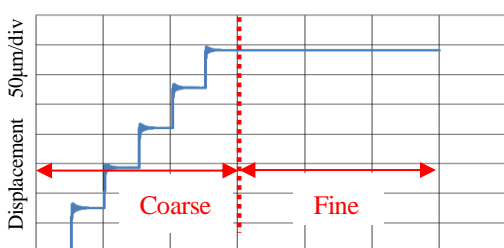


Fig.12 Cooperative of coarse and fine step feed ( $t=2+1$  Gap  $X_1=0.5$   
Current step= $0.4A$  and  $t=2$  Gap  $X_2=5$  Current step= $2mA$  Gap  $Y_1, Y_2=\infty$ )

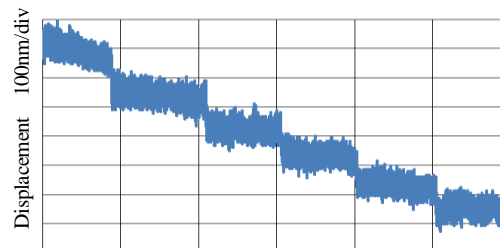


Fig.13 Zoomed in fine step section of fig.11

### 5・2 Y 軸微動

3 軸座標を図 14 のように定義したときの Y 軸微動の結果を図 15~18 に示す.図 15 は図 1(c)に示す PM C を  $t=2+1$  に設定して Gap  $Y_1=0.2$ , Gap  $X_1, X_2, Y_2=\infty$  で EM C を設置した場合における印加電流  $0.4A \times 5$  ステップの長ストローク微動の結果である. X 軸微動と同様にステップ応答を観察でき, 約  $140 \mu m$  の最大変位を得たが, 見積変位:  $68 \mu m$  の約 2.4 倍となった. また, X 軸干渉が Y 軸変位の 3%程度発生した. 図 16 は高分解能変位を示す. 印加電流は  $2mA$  で 1 ステップ変位は約  $40nm$  であった. 図 17 は C 側:長ストローク, D 側:高分解能微動を設定し, 両者の連係で変位を増減させた場合のステップ応答を示す. X 軸微動と同様に連係微動が認められるが, 高分解能微動では単独と異なり印加電流を  $3mA$  とした.  $2mA$  では階段形状変位を観察できなかったためである. そのため長ストロークの最大変位は単独とほぼ同等だが, このとき 1 ステップ変位は約  $56nm$  となった.

### 5・3 X 軸, Y 軸微動の結果の考察

X 軸, Y 軸微動ともに解析による見積よりも大きい変位となった. これはビーム 1, 3 固定支持部やビーム 1~4 端部結合部の変形が考えられる. ただし, 前者について支持部の変位はほぼ 0 であった. その他に各ビームサイズの誤差, 特に切欠き厚みの誤差が大きく影響すると考えられる. 2 章より幾何形状では軸間干渉は生じないが, 実際は変位の 3~4%で生じている. これはビームごとに若干の形状差があると推察され, 変位が見積よりも大きくなる一因でもありとされる. また, 連係の高分解能微動において X 軸微動では 1 ステップ目が完全に

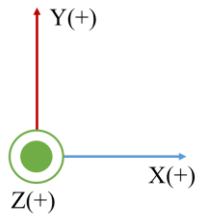


Fig.14 Definition of coordinate axis

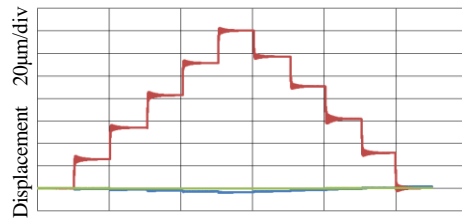


Fig.15 Coarse step feed ( $t=2+1$  Gap  $Y_1=0.2$  Gap  $X_1, X_2, Y_2=\infty$  Current step=0.4A)

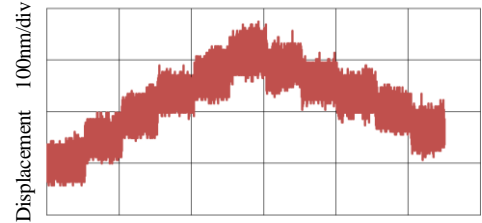


Fig.16 Fine step feed ( $t=2$  Gap  $Y_1=5$  Gap  $X_2, Y_1, Y_2=\infty$  Current step=2mA)

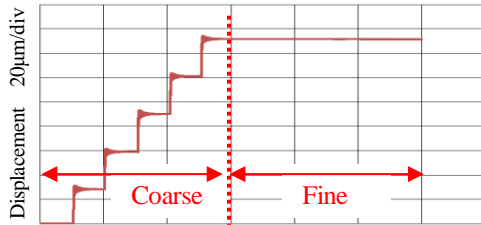


Fig.17 Cooperative of coarse and fine step feed ( $t=2+1$  Gap  $Y_1=0.5$  Current step=0.4A and  $t=2$  Gap  $Y_2=5$  Current step=3mA Gap  $X_1, X_2=\infty$ )

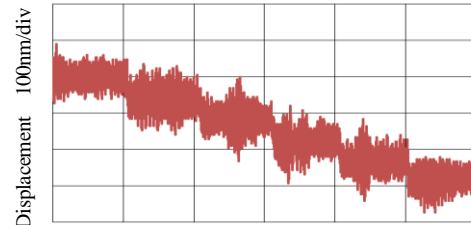


Fig.18 Zoomed in fine step section of fig.15

整定しておらず、Y軸微動では印加電流を大きくした分だけ単独微動より1ステップ変位が大きくなる。これらは長ストロークの吸引力が影響しているからと考える

#### 5・4 X-Y ジグザグ微動

A側、C側交互に吸引力を与えてX-Yジグザグ微動させた結果を図19に示す。X軸、Y軸とも長ストロークと同等の設定にした。図よりジグザグ微動が観察できる。全ストロークはX軸：約330 $\mu\text{m}$ 、Y軸：約132 $\mu\text{m}$ と単独微動より小さくなった。これは軸間干渉がB側、D側に生じているためであると考えられる。

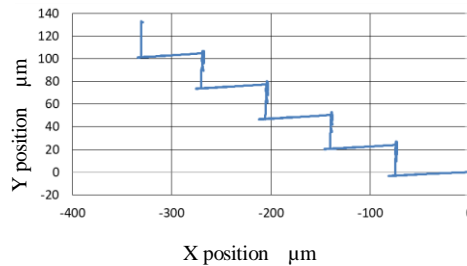


Fig.19 X-Y zigzag positioning ( $t=2+1$  Gap  $X_1=0.5, Y_1=0.2$  Current step=0.4A Gap  $X_2, Y_2=\infty$ )

## 6. 結 言

- 1) 電磁石～永久磁石相互間の吸引力を利用して非接触で駆動する2軸可撓支持微動テーブルを提案した。
- 2) 軸間干渉を構造的に排除した装置を製作した。また、X,Y軸それぞれで電磁石・永久磁石を2対設け、磁極間隔を調整することで長ストロークと高分解能、あるいは両者を連係する微動を可能にした。
- 3) 吸引力の校正および可撓機構の剛性解析によって電磁石印加電流に対する微動変位を見積もって予測した。
- 4) 長ストローク変位はX軸：340 $\mu\text{m}$ 、Y軸：140 $\mu\text{m}$ であり、各々見積の3倍、2.4倍となった。
- 5) 識別可能な最小ステップ変位（変位分解能）はX軸：85nm、Y軸：56nmであった。
- 6) 微動変位に対して3～4%の軸間干渉を認められた。結合部の変形やビームの形状差が一因と推察する。
- 7) 連係微動が可能であることを示し、単独微動とほぼ同等の性能を表した。一方、X軸の高分解能微動では1ステップ目が完全に整定せず、Y軸では単独より大きくなった。長ストロークの吸引力が影響すると考える
- 8) X-Yジグザグ微動を行わせた。全ストロークはX軸：約330 $\mu\text{m}$ 、Y軸：約132 $\mu\text{m}$ であった。

## 謝 辞

本研究は公益財団法人JKA補助事業（競輪）の支援を受けて実施されたものである。ここに記して謝意を表す。

文 献 (1) 宅野, 田丸, 清水, 日本機械学会九州支部学生会第49回講演会講演論文集(2018), H46.