

磁気吸引力を利用した可撓支持微動テーブルの開発

九州工業大学 ○田丸 雄摩, 常石造船 宅野 元気, 九州工業大学 清水 浩貴

1. はじめに

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。我々は微動性能向上の手段として摺動摩擦の低減を挙げており、スキューズ効果での空気静圧力を利用して支持と駆動力を得る微動テーブルを提案している⁽¹⁾。一方、剛性を確保するには可撓支持が有利であり、本報では可撓支持に永久磁石と電磁石間で作用する磁気吸引力での駆動を組合せた微動テーブルを提案する。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が期待できる。今回は1軸の装置を製作し基本的な微動性能を調べた。本装置の特徴は永久磁石と電磁石を2対設けた点にある。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発生させることができるため長ストロークと高分解能の微動を連係して出力できる。吸引力の校正や可撓機構の剛性解析によって印加電流と変位の関係を推定し、長ストロークと高分解能および、両者を連係させた場合の微動性能を評価した。

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3本のはりで構成される。ビーム1, 2は厚み×長さ=6mm×142mm, ビーム3は6mm×200mmで、切欠き部の厚みは1mmである。ビーム1~3の材質はすべて同じでありA2017, C5191, SUS303の3種類を用いてそれぞれに交換して微動試験を実施できる。ビーム3の中央内側と外側には永久磁石(ネオジウム磁石)、上部にはテーブルを設置している。ネオジウム磁石はφ30mmで厚み $t=2, 1$ mm(磁束密度:40mT, 79mT)の2種類を用いる。予め $t=2$ を取付けてあり、 $t=2:1$ 枚の場合と $t=2$ に $t=1$ を吸着させた $t=2+1:2$ 枚の場合での磁力を発生できる。(b)は外側のネオジウム磁石に対して適当な間隔を設けて電磁石(心棒:S45C, 線材:銅φ0.4mm, 330巻, 磁極面径φ25)を対向設置した場合に、相互間に作用する吸引力で微動するテーブル変位を模式的に示す。印加電流の加減で吸引力が変化し微動量を調整できる。可撓機構は微動方向を中心に対称構造とすることで微動にともなう軸間干渉が生じない工夫をしている。(c)は内側のネオジウム磁石に対して吸引力を作用させた場合であり、(b)と逆方向に微動する。

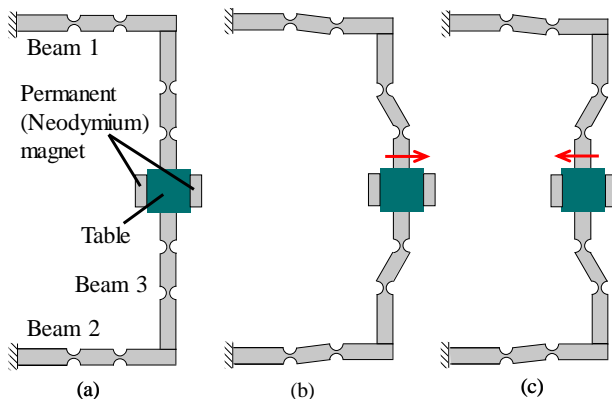


Fig.1 Table positioning and hinges deformation

- (a) Initial condition
(b) Attraction force occurred by outside electromagnet
(c) Attraction force occurred by inside electromagnet

3. 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印加電流に対する吸引力と吸引力に対する出力変位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ネオジウム磁石と電磁石の磁極間隔と吸引力の関係を実験的に求めた。図2はネオジウム磁石厚み t および磁極間隔 Gap をそれぞれ $2+1$ mm, 0.2 mmに設定した場合の(a)電流上昇時(b)電流降下時の吸引力を示す。電流を5往復連続で増減させた結果、1往復目では吸引力がゼロに戻らず残留磁気によるヒステリシスがみられる。2往復目以降はヒステリシスがみられず、最大吸引力は残留磁気に相当する分だけ小さくなる。なお、一旦磁極間隔を ∞ にした後、試験すると再び1回目の特性が表れ、 t と Gap を変えても同様の特性がみられた。印加電流は電磁石に相当の発熱が認められる2Aを最大としている。図3は $t=2+1$ mm, $Gap=0.2$ mmおよび $t=2$ mm, $Gap=5$ mmでの印加電流と吸引力の関係を示す。図4は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<SUS303に依っている。当結果と図3より図5で示す印加電流に対する微動変位を見積もることができる。

4. 吸引力による微動制御と変位計測

電磁石は両側のネオジウム磁石に対向して設置する。各々の電磁石は直動ステージに取付け、磁極間隔を調整できる。つまり、内側と外側で個別に間隔を設定することで性能の等しい双方の電磁石に同じ電流を印加しても異なる吸引力を生じさせることができる。この特徴を用いると例えば、図6に示すように $Gap1 < Gap2$ を設定す

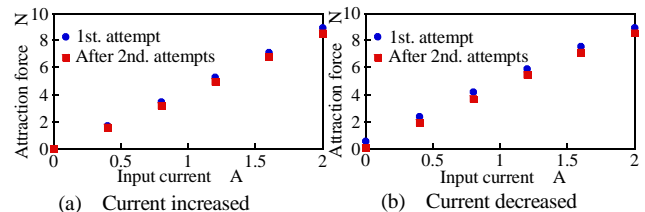


Fig.2 Attraction force for input current change ($t=2+1, Gap=0.2$)

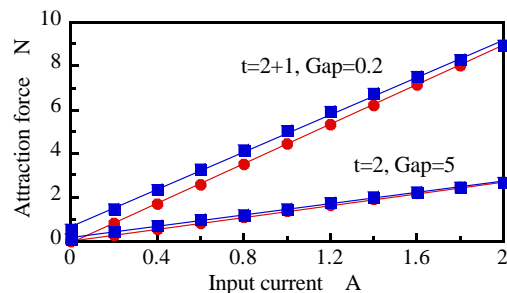


Fig.3 Relationship between input current and attraction force

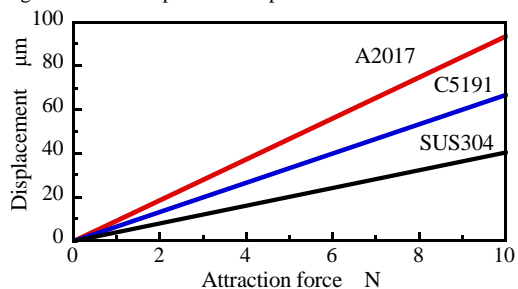


Fig.4 Theoretical of flexible support stiffness

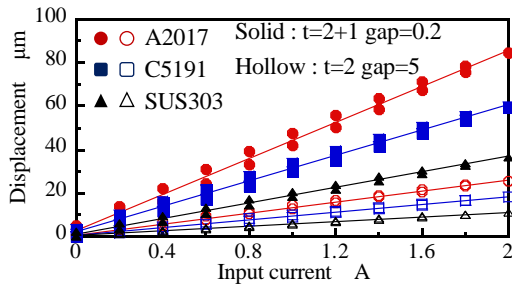


Fig.5 Theoretical relationship between input current and displacement

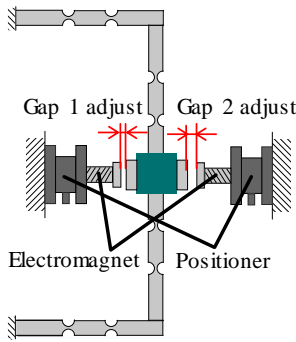


Fig.6 Adjustable gap

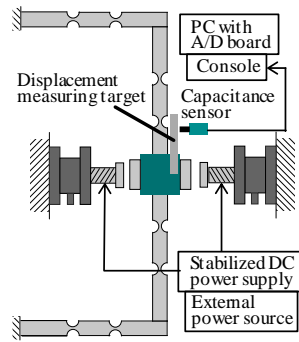


Fig.7 Drive and measuring

ることで外側ではストロークは小さいが高分解能変位の位置決め、内側ではその逆の特性が生じる。さらに両者を連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7は電磁石駆動と変位計測を示す。電流は直流安定化電源で印加し、外部電圧で各々の磁力を個別に調整できる。変位は静電容量変位計で計測し、PCでデータを取得する。

5. ステップ微動特性

ステップ微動特性を調べた。ここでは可撓機構にC5191を設定した場合の長ストロークおよび高分解能、さらに両者を連係させたステップ応答を示す。図8は長ストローク変位を得る目的で $t=2+1\text{mm}$, $\text{Gap}1=0.2\text{mm}$, $\text{Gap}2=\infty$ に設定し、印加電流を最大2Aまで0.4Aステップで往復微動させた結果である。電流変化に追従して階段状の微動変位が得られている。図9に印加電流と図8のステップごとの変位を平均した値との関係を示す。2A印加時の最大変位は約71 μm であり、図5の理論値と傾きの比較で約16%大きくなった。図10に高分解能変位が得られる $t=2\text{mm}$, $\text{Gap}1=5\text{mm}$, $\text{Gap}2=\infty$ でのステップ応答を示す。階段状変位を判別可能な最小印加電流は10mAであり、ステップ変位(変位分解能に相当)は約131nmであった。図11は $t=2+1\text{mm}$, $\text{gap}1=0.2\text{mm}$, 0.4Aステップおよび、 $t=2\text{mm}$, $\text{gap}2=5\text{mm}$, 10mAステップに設定し、長ストローク(内側)と高分解能(外側)を組み合わせて連係微動を行った結果を示す。図12は高分解能ステップ応答を拡大して示す。図より長ストロークと高分解能のステップ微動が連続して表れており、両者の連係微動が可能であることが分かる。なお、連係微動の最大変位は69 μm 、変位分解能は137nmであり、長ストロークおよび高分解能のステップ微動をそれぞれ単独で行った場合とほぼ同等の結果が得られた。

6. 結言

- 1) 電磁石と永久磁石の吸引力を利用して非接触で駆動力を伝達する可撓支持微動テーブルを提案した。
- 2) 構造的に軸間干渉を排除した3本のはりで構成する可撓機構を設計し、内外両方向に微動可能な微動装置を開発した。
- 3) 吸引力の校正および可撓機構の剛性解析によって印加電流に対する微動変位を予測した。

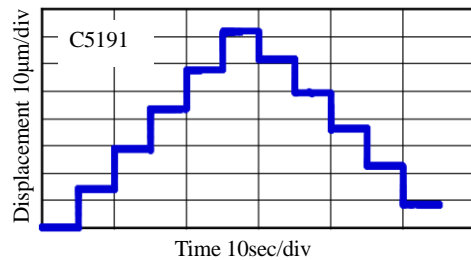


Fig.8 Coarse step feed ($t=2+1\text{mm}$ $\text{gap}1=0.2\text{mm}$ $\text{gap}2=\infty$ current step=0.4A)

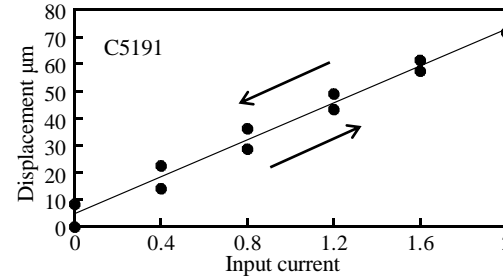


Fig.9 Average of step feed displacement based on fig.8

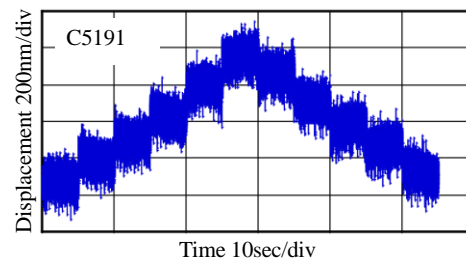


Fig.10 Fine step feed ($t=2\text{mm}$ $\text{gap}1=5\text{mm}$ $\text{gap}2=\infty$ current step=10mA)

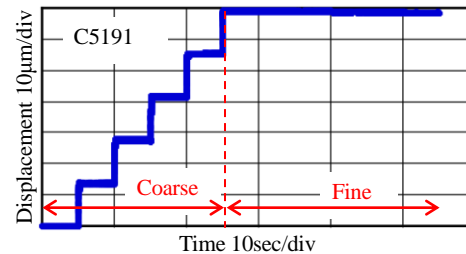


Fig.11 Cooperative of coarse and fine step feed ($t=2+1\text{mm}$ $\text{gap}1=0.2\text{mm}$ current step=0.4A and $t=2\text{mm}$ $\text{gap}2=5\text{mm}$ current step=10mA)

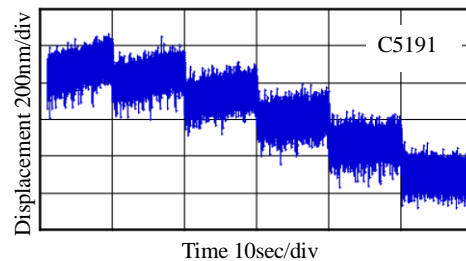


Fig.12 Zoomed in fine step feed section of fig.11

- 4) 磁極間隔と永久磁石の厚みを適切に設定することで長ストローク変位: 71 μm と高分解能のステップ微動(ステップ変位: 131nm)が得られた。
- 5) 長ストロークと高分解能を組み合わせた連係微動が可能であることを示し、それぞれ69 μm 、137nmであった。

文献 (1) 田丸ほか精密工学会秋季大会講演(2018), pp.494-495
 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したものである。ここに記して謝意を表す。