

令和 5 年 4 月 11 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04106

研究課題名（和文）テーブルの浮上支持と精密位置決めをスクイズ効果で可能にする微動機構の開発

研究課題名（英文）Development of fine feed mechanism that provides table floating support and precision positioning with squeezed-air effect

研究代表者

田丸 雄摩（Tamaru, Yuma）

九州工業大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：30284590

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：支持と微動の両立を実現するユニークなテーブルを製作した。スクイズ効果を用いてテーブルを浮上支持させた。浮上圧力を調整することで微動を可能にした。加振機構においては加振面の傾斜角度を調整可能にした。このことでテーブルの被加振面と加振機構の加振面の平行度を高めることができた。長ストローク、小ステップ、高分解能の微動試験を実施した。これらの位置決め性能を幾何学的な手法に基づいて算出した推定変位と比較評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

位置決めは加工に不可欠な技術要素である。最近のセンサや電子部品は微細加工技術に頼っており位置決めの高精度化に対する要求は厳しい。本研究では位置決めを非接触で実現させる目標のもと、スクイズ効果を用いた支持と微動が可能であることを示し、摺動摩擦の排除によって高精度の位置決めが達成される基本性能を提供した。また、本効果は自律的に空気圧力を生成するため省スペース、省コスト化に貢献する。

研究成果の概要（英文）：A unique table was fabricated to achieve both support and fine feed. The table was floating supported using the squeeze effect. Fine feed was possible by adjusting the floating pressure. In the excitation mechanism, the inclination angle of the excitation surface can be adjusted. This increased the parallelism between the table's facing surface and the excitation surface of the excitation units. Long-stroke, small-step, and high-resolution feed experiments were conducted. Their positioning abilities were evaluated in comparison with the estimated displacements calculated based on geometrical approaches.

研究分野：機械要素

キーワード：スクイズ効果 位置決め 微動 非接触支持 ピエゾ素子

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年の微細加工技術としてフォトリソグラフィを用いた MEMS デバイス製作が発達してきた。デバイスの品質は製作工程での位置決め能力が鍵であり、例えば露光では走査型トンネル顕微鏡の技術で描画する手法も現れるなど、特に高精度な位置決めが欠かせない。

ところで、MEMS デバイス加工でも現状は工作機械のテーブルと同様にボールねじ+リニアガイドで構成される位置決め要素が多く利用されているが、ねじや案内精度の改善で位置決め精度を上げるには限度があり、制御も複雑化してコスト高になるなど負の側面が多い。

代表者は自律的に空気静圧力を生成するスクイーズ効果で平板物体を数十  $\mu\text{m}$  浮上支持できることを確認している。本効果の特徴は静圧力の調整が可能なことである。本研究はこの特徴を位置決め駆動力として利用することで MEMS デバイス製作のような電気化学的手法を用いる新しい微細加工法に肝要な高精度位置決めが非接触支持によって容易に達成できると考える。

(2) 高精度位置決めを達成する鍵は運動精度の向上であるが、静止摩擦力と動摩擦力の違いで生じるスティックスリップがこれを妨げる大きな要因である。つまり、摩擦排除が研究課題の核心であり、摩擦の無い状態で位置決めを確実に可能にすることが問われる。スクイーズ効果の静圧力を生かすことでこの問いを解決し、高精度位置決めへの有用性が期待される。

### 2. 研究の目的

スクイーズ効果の性質を生かして支持と微動の両方を非接触で可能にし、高精度位置決めに真価を発揮する微動テーブルの開発が目的でありその内容を下記に記す。

(1) スクイーズ効果を良好に生成すれば高い静圧力を得られるがその課題として加振面、被加振面双方に高い面精度を要し、加えて両面間の平行度を高精度に保つ必要がある。そこで平行度を高精度に保つためのメカニズムを構築する。

(2) 変位ストロークを大きくするため浮上圧力を高めて大きな浮上変位を得られるようにする。

(3) ストロークと剛性のバランス効率を評価し、最適なテーブル側部の傾斜角度を見出して本機構で検出可能な最小変位（変位分解能）を明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) テーブルの支持と微動を静圧力制御、つまり空気膜厚の調整で可能にするのが本研究の特徴であり、そのためにテーブルをくさび状に支持できるように工夫する。具体的には逆ハの字形に加工し、底面両側に被加振パッドを取り付け、左右対称に静圧力を加えることで自重とバランスして静止支持させる。

(2) 加振機構に設置角度調整機構を付加することを検討する。加振機構とベースの間にゴニオステージを組み込み、装置を構築する。平行度の調整はテーブルの浮上高さを試行錯誤的に調べることで行う。

(3) テーブルが非接触支持された状態での揺動を調べる。その手法としてテーブル中央に振幅を計測するためのターゲットを設置し、静電容量型変位計で鉛直方向と計測位置高さの異なる水平方向 2 か所を計測する。

(4) テーブル微動試験を行い、位置決め性能を評価する。側部支持の傾斜角度が異なるテーブルごとに試験と評価を実施する。試験は振幅に対するステップ応答で行い、長ストローク、微小ステップ変位、高分解能変位での位置決め性能を評価する。

### 4. 研究成果

(1) 微動テーブルと加振機構を設計・製作した。従前機構では不可能だった加振面の設定角度を調整できるようにしたことで被加振面との平行度を容易に高めることが可能になった。そこで本研究で開発した機構と従前機構においてテーブル浮上変位や負荷容量を比較評価した。図 1 の浮上変位、図 2 の負荷容量のいずれも、本研究で開発した機構では改善を示した。

(2) スクイーズ効果の性質上、テーブルは加振に励起されて揺動する。そこでテーブル側部の傾斜角度や平行度の違いが揺動特性として表れることが予測されたため加振振幅変化に対するテーブル振幅や周波数をもとに揺動評価を行った。図 3 にテーブル振動の周波数解析を示す。

(a)の鉛直振動に着目すると加振と同期する 2kHz とその倍の 4kHz も卓越することが分かった。一方、(b)、(c)は水平方向の上部、下部振動の結果を示す。加振と同期する 2kHz 成分はほとんど

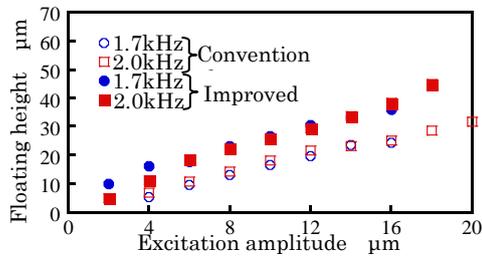


Fig.1 Floating height

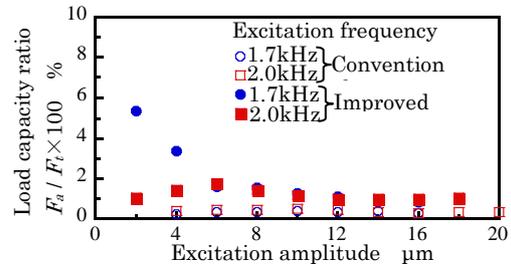


Fig.2 Load capacity

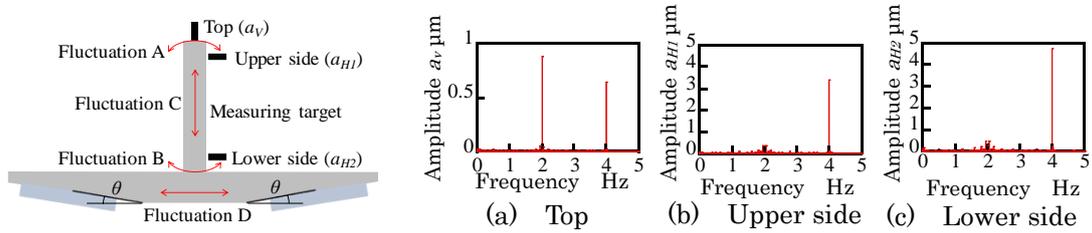
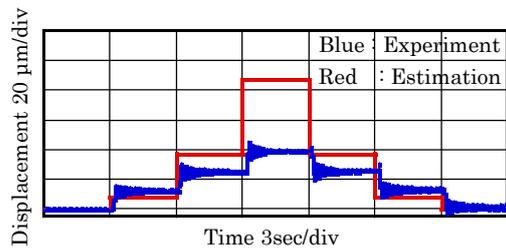


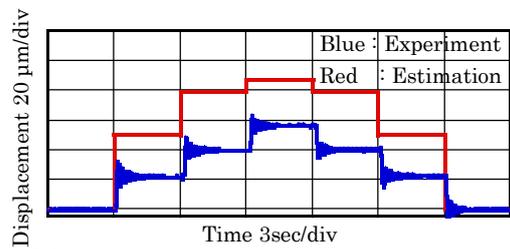
Fig.3 Table amplitude evaluation by FFT analysis

表れず 4kHz 成分が大きく卓越している。つまり水平方向は加振の 2 倍の周波数で振動していることが分かる。(a)で 4kHz 成分が表れる理由はテーブルの支持部角度によって水平振動の鉛直方向成分が生じるためでありテーブルの左右方向への揺動を示している。テーブル振動は鉛直方向で 2kHz、水平方向では 4kHz が卓越することが分かった。また、テーブル側部の傾斜角度が大きいと水平揺動が抑制されることから角度が支持剛性に関係することが示唆された。

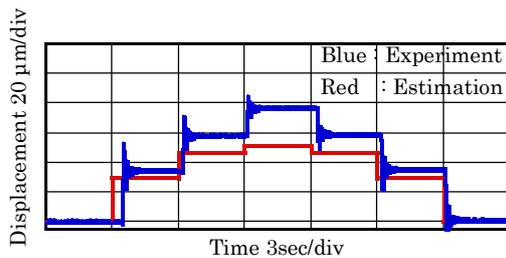
(3) テーブルの位置決め性能を評価するため長ストローク微動試験を実施した。加振振幅は階段状に変化させ、ステップ応答を観察した。また微動変位を膜厚変化から幾何学的に推定することを試みた。



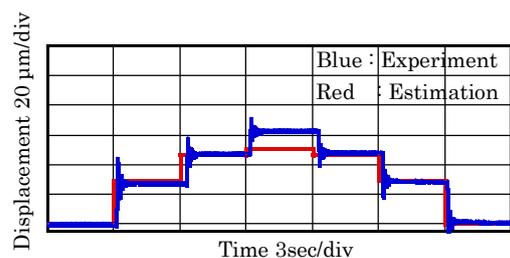
(a)  $\theta = 8^\circ$  : Center  $\rightarrow$  Left  $\rightarrow$  Center



(b)  $\theta = 8^\circ$  : Center  $\rightarrow$  Right  $\rightarrow$  Center



(c)  $\theta = 10^\circ$  : Center  $\rightarrow$  Right  $\rightarrow$  Center



(d)  $\theta = 10^\circ$  : Center  $\rightarrow$  Right  $\rightarrow$  Center

Fig.4 Step response (Long stroke)

図 4(a), (b)にテーブル側部傾斜角度が  $8^\circ$  の結果を示す。実際の変位と推定変位が大きく乖離している。また送り方向によっても実際の変位に違いがみられる。推定変位はテーブルが中央に静止した状態での浮上変位をもとに算出ているが実際は微動するために加振面と被加振面の平行度にずれが生じることが一因と推定される。また送り方向でも平行度のずれによって変位が異なる結果になったと考える。一方, (c), (d)に示す  $10^\circ$  や  $12^\circ$  では推定と実際の変位は比較的近くなっている。また送り方向によらず同等の変位を示した(左方向の結果は割愛)。この理由としてテーブルが送りによって左右にシフトしても比較的良好的に平行度が保たれたと推定される。今回はテーブル長手方向に対する加振機構の角度調整を行ったが幅方向に対しても調整を行うことで平行度が維持されて推定変位に近い位置決め性能を得られると推察する。なお、ステップ変位が増減する定性的な特徴は推定と実際で一致することが確認された。

(4) (3)と同様に位置決め性能を評価するためステップ変化量を長ストロークの 1/10 に設定して小ステップ変位での応答を調べた。

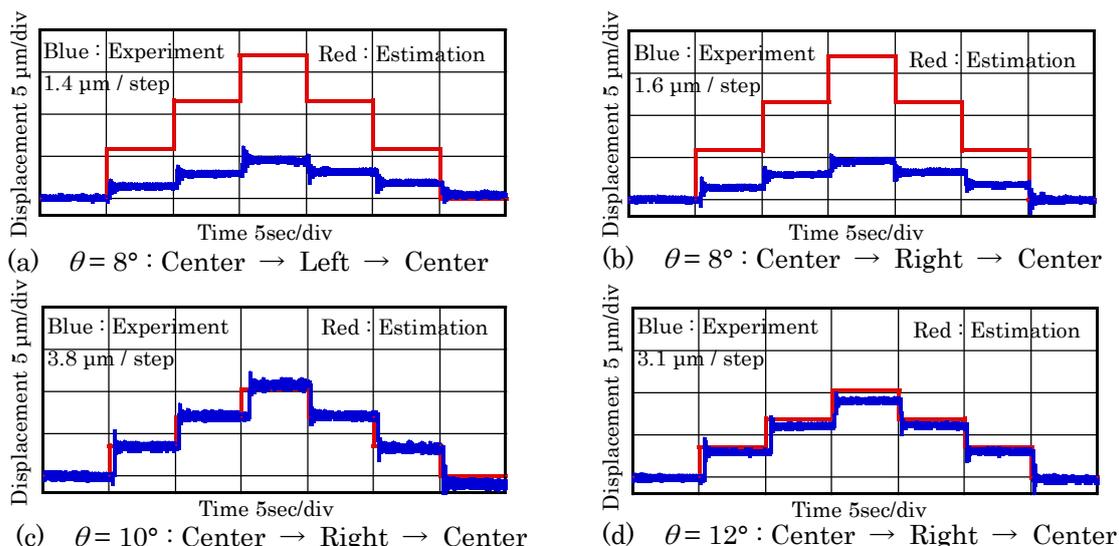


Fig.5 Step response (Short step)

図 5(a), (b)にテーブル側部傾斜角度が  $8^\circ$  の結果を示すが長ストロークと同様に推定変位と実際変位が乖離する. 一方で左右の送り方向によらず同等のステップ変位を得た. 微動によって平行度にずれが生じるが変位が小さいため送り方向への影響は軽微であると考えられる. また(c), (d)に示す  $10^\circ$  や  $12^\circ$  では推定と実際が良好に一致した. 長ストロークでも比較的両者は近かったが, 変位が小さいため平行度のずれがわずかにとどまり, このような結果を得たと推察する. さらに推定変位の算出は幾何学的な手法だが一通りの妥当性を示しているとも言える.

(5) (4)からさらにステップ変化量を 1/2 に設定して高分解能微動としての応答を調べた.

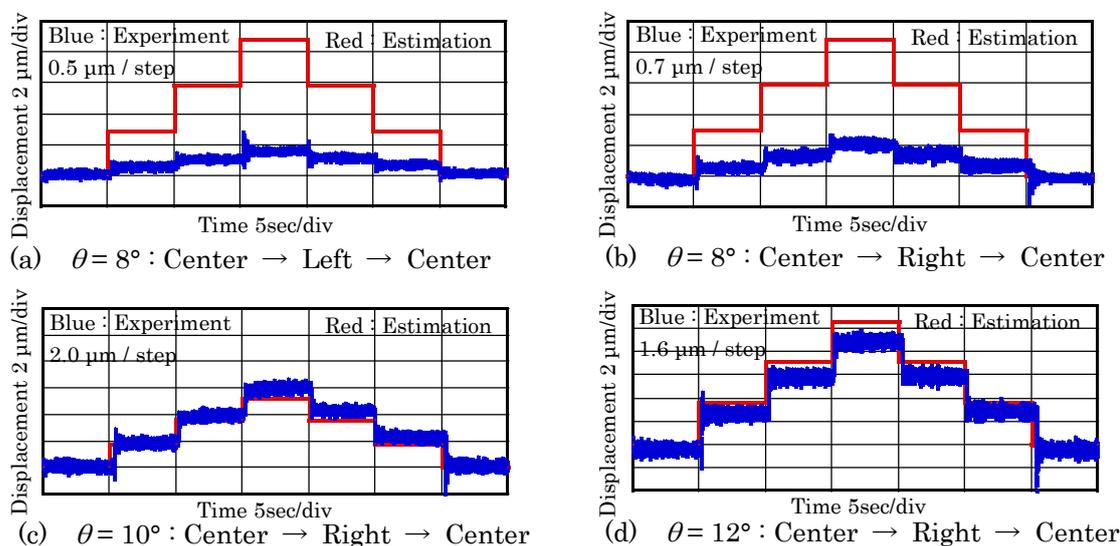


Fig.6 Step response (High resolution step)

図 6(a)~(d)に結果を示すが, 図 5 と同様の位置決め性能を得た. (a)では 1 ステップ変位が  $0.5\mu\text{m}$  だが確実に応答している. これらよりごく小さい変化量に対してもステップ変位の識別が可能であり, 高分解能微動としての位置決めが達成されていることが分かる.

(6) 本研究を統括して, ユニークな逆ハの字型のテーブルを考案し, また加振機構の傾斜角度を調整可能にする装置を製作した. そして, スクイズ効果を用いた非接触支持と摺動摩擦を排除した位置決めの基本性能を示すことができた. 本効果によって支持と微動を両立する機能の達成は画期的な成果であると考えられる. 今後は安定した位置決め性能を得るためより精確な平行度調整手法を検討したい.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yuuma Tamaru, Kensuke Kawata and Hiroki Shimizu	4. 巻 16
2. 論文標題 Design and Prototyping of Biaxial Flexible Support Table for Fine Positioning Through Controlled Magnetic Attraction Forces	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 588-597
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2022.p0588	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 田丸雄摩, 牛島智大, 清水浩貴
2. 発表標題 浮上力制御を利用したスクイーズ効果支持微動テーブルの開発（第4報） - テーブル揺動特性の評価 -
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田丸雄摩, 牛島智大, 清水浩貴
2. 発表標題 浮上力制御を利用したスクイーズ効果支持微動テーブルの開発（第5報） - 長ストローク微動特性 -
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田丸雄摩, 東福修太郎, 清水浩貴
2. 発表標題 浮上力制御を利用したスクイーズ効果支持微動テーブルの開発（第3報） - 平行度調整による支持性能向上の検討 -
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuma Tamaru, Tetsuya Matsumoto and Hiroki Shimizu
2. 発表標題 Development of Fine Feed Table for Non-Contact Support and Positioning with Squeezed-Air Effect
3. 学会等名 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東福修太郎, 田丸 雄摩, 清水 浩貴
2. 発表標題 スクイーズ効果支持微動テーブルの性能向上
3. 学会等名 九州学生会第51回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuma TAMARU, Tomohiro USHIJIMA and Hiroki SHIMIZU
2. 発表標題 Positioning Properties of Fine Feed Table for Non-contact Support with Squeezed-air Effect
3. 学会等名 The 19th International Conference on Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田丸 雄摩, 牛島 智大, 清水 浩貴
2. 発表標題 浮上力制御を利用したスクイーズ効果支持微動テーブルの開発 (第6報) - 小ステップ変位微動特性 -
3. 学会等名 2022年度精密工学会秋季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	清水 浩貴  (Shimizu Hiroki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------