

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：53901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820077

研究課題名(和文)非接触ローラ形搬送装置の磁気力補償による高速高精度位置決め制御

研究課題名(英文)High-speed and high-precision positioning control by magnetic force compensation of non-contact roller transport device

研究代表者

田中 淑晴(Tanaka, Toshiharu)

豊田工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：70455137

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：磁気歯車を伝達機構として用いた場合、磁気歯車間に磁気力特性が位置決め精度に影響を及ぼす。そのため、磁気歯車間の磁気力による特性を調査した。その内容は、オープンループ制御による特性、磁気歯車間距離の影響、定ステップ幅による特性、非線形ばね特性である。特に、磁気歯車間距離の影響では、その距離が近いと磁力による剛性が高くなるため、反応が良くなる。その一方、距離が遠くなると外乱となる磁力の反発力が小さくなるため、位置決め精度が良くなる結果を得た。非線形ばね特性では、直動転がり案内などと同様の挙動を示したが、軸受の特性が影響している可能性がある。

研究成果の概要(英文)：In case of using magnetic gears as transmission device, characteristics of magnetic force of the gears influence positioning accuracy. Therefore, the characteristics between magnetic gears are investigated. Their measurements for catching the characteristics are behavior by open-loop control, influence of gap between gears, step response by constant amplitude, and nonlinear spring behavior. In particular, the response is good because the stiffness is high if the gap is small. The positioning accuracy is good because the disturbance of magnetic force is small, if the gap is large. Nonlinear spring behavior shows same characteristic of linear motion ball bearing. There is possibility of influence of bearings.

研究分野：位置決め

キーワード：磁気歯車 位置決め

### 1. 研究開始当初の背景

半導体ウェハや薄鋼板などの搬送に用いられる搬送装置では、さまざまな性能の向上が求められている。特に、高精度化、高効率化、高速化などによるコスト削減については、非常に強い要求がある。

高精度化については、機械的接触の摩擦による位置決め精度の悪化を防ぐため、従来の歯車とベルトなどを用いた構造から、リニアモータや静圧空気案内を用いた装置の研究開発が進められている。この装置は機械的接触が無いことから、位置決め精度の向上だけでなく機械部品が摩耗せずランニングコスト低減の役も担っている。しかし、リニアモータ駆動は巻線を有する可動子などが発熱するため高精度な位置決めに向きとされる。また、駆動のために数アンペア～数十アンペアと大きな電流を必要とし、省エネルギー化に対して課題がある。

以上の経緯を踏まえ、マグネット駆動方式の非接触式搬送装置に着目した。本装置は容易に大型化ができ、駆動部が非接触かつ非常に簡単な構造であるため長期にわたりメンテナンスフリー化が可能となる。また、リニアモータと比較して、省エネルギーで駆動することができる。しかし、一般的にこのタイプの装置は搬送のみが目的であり、次工程への引渡しにおけるコンベア同士の速度強調のための制御手法は検討されているが、高精度位置決めを目的とした制御については検討されていない。また、マグネットの駆動歯車と被動歯車の間にヒステリシスを生じ、高精度な位置決めと短時間での静定が困難となる。

### 2. 研究の目的

マグネット歯車を利用した非接触式搬送装置において、搬送のみの目的であった装置を位置決め装置として活用するために、摩擦制御技術で培った補償技術をマグネット歯車の磁気による特性に援用し、高精度かつ短時間で静定する手法を検討する。本研究に用いた実験装置の概略図を図1に示す。デジタル分解能 40,000P/R のロータリエンコーダ付 AC サーボモータと駆動軸が連結され駆動歯車を取り付けられている。その駆動歯車と直交となるように従動歯車が配置され、その従動軸にデジタル分解能 200,000P/R の計測用ロータリエンコーダ(以後「エンコーダ A」とする)が取り付けられている。サーボモータのエンコーダを用いてフィードバック制御が行われる。コントローラからは 16 ビット D/A 変換器を通じて指令値が出力される。使用した磁気歯車の伝達トルクは、メーカーカタログ値から、歯車間距離が 0.5、1.0、2.0 mm のときにそれぞれ 0.5072、0.4032、0.2560 Nm である。フィードバック制御時は近似微分器を用いた PID 制御を採用した。

本研究では主に高速高精度位置決めを目的とする磁気歯車を用いたローラ形搬送装

置の設計と製作、磁気力が位置決めに及ぼす影響の解明、直動転がり案内の非線形な摩擦を補償するために提案された非線形摩擦モデルの磁気特性への援用適性の検証、磁気力を補償することによって高速高精度な位置決めを達成することを目的とする。

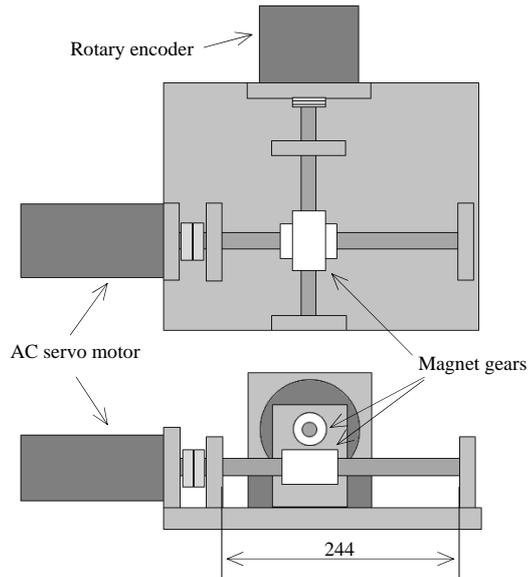


図1 実験装置概略図

### 3. 研究の方法

#### (1) 磁気歯車を用いた搬送装置の設計製作

一般的なローラ形搬送装置の被動軸は、その数が多いためエンコーダが取り付けられていない。搬送物体の正確な位置決めができないため、位置決め装置として採用されることは殆どない。本研究では、磁気歯車間の磁気力による特性を把握するため、被動軸の角度位置の測定のみを目的としてロータリエンコーダ(以後、「エンコーダ B」とする)を取り付けてある。また、当初は搬送装置をモデル対象としたため、被動軸を 3 本設置(磁気歯車対 3 組)したが、それぞれの特性が重なり合い、複雑な挙動特性を示したため、被動軸は 1 本(磁気歯車対 1 組)とした。

#### (2) 磁気歯車間の特性解明

磁気歯車間のトルク伝達における挙動特性を解明するため、以下の実験を行う。

- (a) オープンループ制御
- (b) 磁気歯車間距離の影響
- (c) 定ステップ幅による特性
- (d) 非線形ばね特性

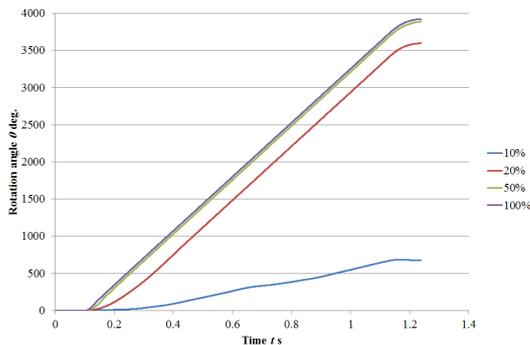
### 4. 研究成果

#### (a) オープンループ制御

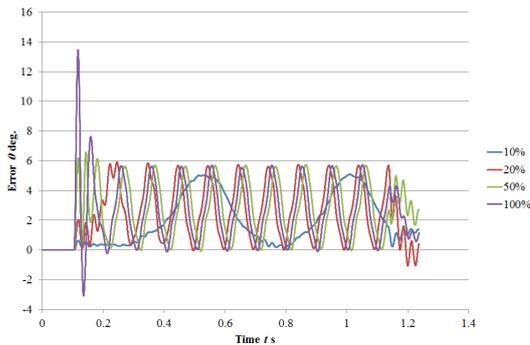
トルク指令をサーボモータの定格トルクの 10%、50%、100%としたステップ応答試験の結果を図2(a)にエンコーダ A が測定した角度、同図(b)にエンコーダ A とエンコーダ B の差を示す。また、振幅を定格トルクの 10%とした正弦波トルク指令を与えたときの結果の一例を図3に示す。

図2(a)において、0.1秒にトルクのステップ入力が行われ、定格トルクの20%のトルク指令の結果から、ほぼトルクが飽和する特性であることがわかった。また、同図(b)ではエンコーダ1とエンコーダ2との間で $5^{\circ}_{p-p}$ の誤差が周期的に生じている。これは、磁気歯車が直交している個所の取付精度が偏差として表れたのではないかと推察している。

図3において、トルク飽和しない定格トルクの10%を振幅とした正弦波トルク指令を与えたとき、一方向へとドリフトする特性が明らかとなり、また、トルク指令の方向反転時に磁気歯車間で大きな伝達誤差があることがわかった。



(a) 回転角度；エンコーダ A



(b) エンコーダ A と B の偏差

図2 ステップ応答（オープンループ制御）

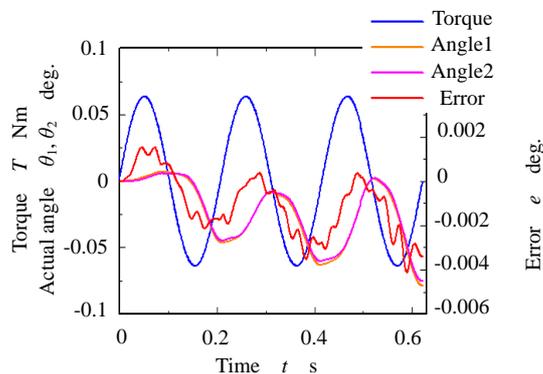


図3 正弦波トルク指令の結果

### (b) 磁気歯車間距離の影響

磁気歯車間の距離を 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5mm としたとき、それぞれ 5 回のステップ応答試験を行った結果を図 4 に示す。目標ステップ角度は  $9^{\circ}$ （破線）であり、制御器の PID の各ゲインの値は全て P:10, I:0.02, D:0.7 とした。この制御ゲインは、歯車間距離が 0.5mm のときに静定時間が短く定常偏差が小さくなるように決定した。また、実験のステップ開始位置は毎回同じ位置としている。全ての結果において、ステップ指令入力後、約 5ms の応答遅れがあった後にモータ軸の回転が確認され、約 150ms には目標位置付近にて静定している。また、磁気歯車間の距離が 0.5mm のときには、比較的スムーズに立ち上がっているのに対して、歯車間距離が大きくなるにつれて段差が生じ大きくなることを確認できる。また、ステップのピーク位置の生じる時間が、歯車間距離が大きくなるにつれて遅くなっていることが分かる。その一方で、動作開始からの立ち上がりは歯車間距離が大きいのほど速くなった。これらは、歯車間距離が小さいと従動側歯車の磁気力の反発を受けやすく、距離が大きいとその影響が小さくなるためであると考えられる。

次に、図 3 同様に歯車間距離を変化させたステップ応答試験において静定時の位置をまとめたものを図 5 に示す。各歯車間距離において、それぞれ 10 回ずつの結果を示す。図中の数字は標準偏差を示し、黒塗丸印は平均値  $m$  を表す。平均値は 0.5, ..., 2.5mm の順に、それぞれ 8.90, 8.50, 8.51, 8.50, 8.87 $^{\circ}$  となり、歯車間距離が 0.5mm と 2.5mm のときに他の距離と比較して良い結果となった。これは、歯車間距離が小さいときは歯車間の磁気力によるばね剛性に相当するものが高く、歯車間距離が大きい場合には、従動側の磁気力による外乱としての力の影響が小さくなるため、両者の結果が良好となり、歯車間距離が 1.0, 1.5, 2.0mm のときは半端な距離であるため結果が悪くなったと推察される。標準偏差についても同様に歯車間距離が 0.5mm と 2.5mm のときの結果が良い結果を得ているのは、上述と同様の理由であると考えられる。

### (c) 定ステップ幅による特性

PID 制御を行い、目標角度を  $9^{\circ}$  として階段状にステップし 1 回転させたときの 5 回分の測定結果を図 6(a) にトルク、同図(b) に目標位置からの誤差を示す。45 $^{\circ}$  の周期ごとに特性が変化している。これは、磁石列が 8 極であるため、その影響が出ているものと考えられる。また、角度誤差は磁力の反発力によって、定常偏差を無くすることができずに生じている。制御ゲインを大きくし、定常偏差を無くすことを試みたが、ステップ時にオーバゲインとなり制御不能となってしまう。そのため定常状態と過渡状態での制御ゲインの使い分けなどの制御手法を検討する必要がある。

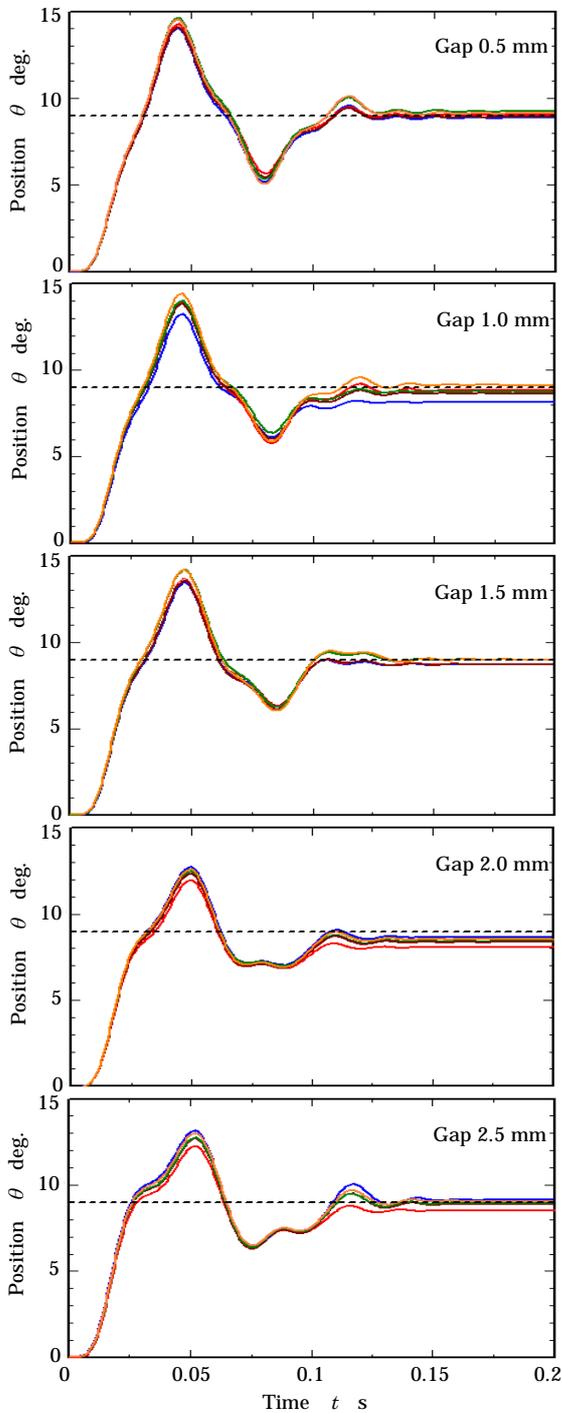


図4 ギャップごとのステップ応答の結果

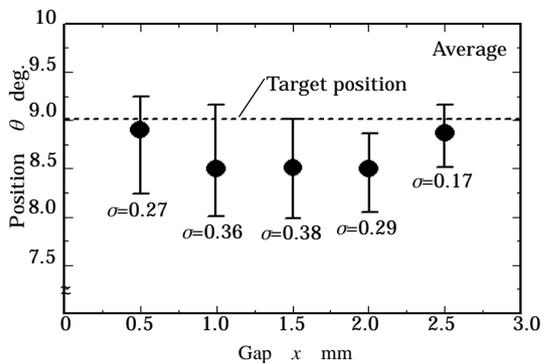
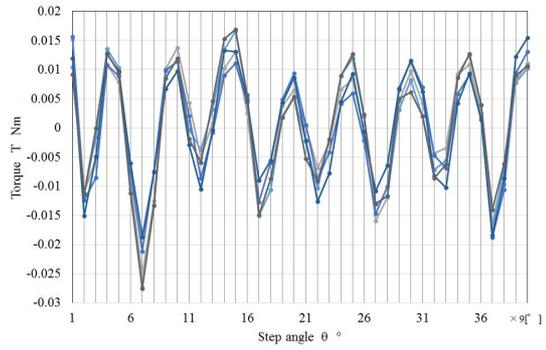
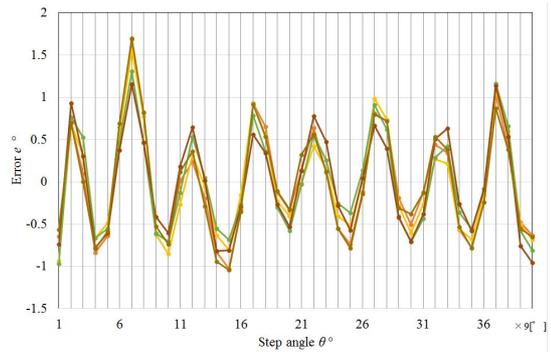


図5 ステップ応答時の静定位置



(a) トルク

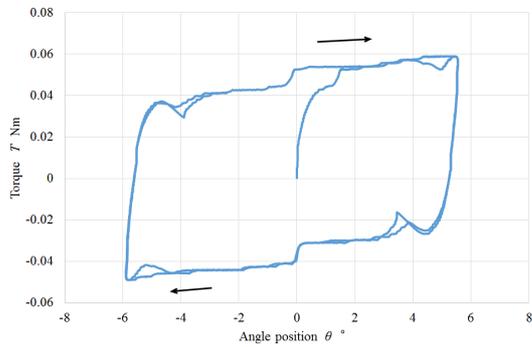


(b) 偏差

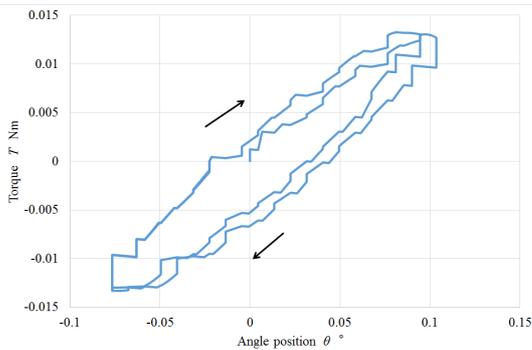
図6 ステップ応答 (PID 制御)

(d) 非線形ばね特性

PID 制御を用いて、慣性モーメントの影響を除くため低い周波数である 0.1Hz とした角度の正弦波駆動の結果を図 7 に示す。矢印は運動方向を示す。同図(a)は大きい角度領域、同図(b)は小さい角度領域である。この結果から、直動転がり案内やボールねじなどの挙動と同様に、ヒステリシスループを描くことが分かった。しかし、磁気歯車軸を支える軸受に転動体が用いられているため、この影響が除去できずにいるため、一部、その影響が及んでいると考えられる。この点については、今後、エアベアリングを導入するなどによって対策を施したいと考えている。



(a) 大きい角度領域



(b) 小さい角度領域

図7 トルクと角度の関係

研究者番号：70455137

(2)研究分担者

(3)連携研究者

大岩孝彰 (OIWA Takaaki)

静岡大学・工学部機械工学科・教授

研究者番号：00223727

伊藤和晃 (ITO Kazuaki)

豊田工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：10369986

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計2件)

1) 田中淑晴, 服部将士, 伊藤和晃, 小谷明, 大岩孝彰: 磁気歯車を用いた精密位置決め (第2報), 日本機械学会東海支部講演会, 508, (2016)USB.

2) 田中淑晴, 伊藤和晃, 小谷明, 大岩孝彰, 服部将士, 磁気歯車を用いた精密位置決め, 第21回高専シンポジウム, Pa-115, (2016)Web掲載

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)

取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

田中淑晴 (TANAKA, Toshiharu)

豊田工業高等専門学校・機械工学科・准教授