

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 3 月 31 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560136

研究課題名（和文） 回転・直動二自由度モータのサーボシステムの構築

研究課題名（英文） Development of Servo System using A Rotational/Linear 2 DOF Motor

研究代表者

佐藤 恭一（SATO YASUKAZU）

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30262405

研究成果の概要（和文）：回転と直動の組み合わせ運動は、通常は回転運動を回転型のモータに、直動運動をリニアモータにそれぞれ独立して負担させ、この二つのアクチュエータを結合することにより、二自由度運動を実現している。この二自由度運動を一つのアクチュエータシステムで実現できれば、駆動デバイスの小形化が可能となる。本研究では、出力軸の回転と軸方向のストロークを両立するモータ機構を開発した。さらに、モータ出力軸の回転角度と直動位置を同時にかつ非接触で検出するモータ内蔵型回転・直動センサを開発し、二自由度運動のサーボ機構を構成した。

研究成果の概要（英文）：A rotational/linear 2 degrees-of-freedom switched reluctance motor, 2DOF-SRM, has been developed for the purpose of independent control of rotational and linear actuations by one actuator. This research developed a non-contact and built-in sensor which detected both the angular and linear positions of the output shaft of the motor. Using the 2DOF-SRM and built-in sensor, the servomechanism independently providing each rotational and linear motion by the one actuator was realized.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：機能機械要素・メカトロニクス・モータ・センサ・サーボ機構

## 1. 研究開始当初の背景

回転と直動の組み合わせは、工作機械における穴加工、穴の内径研磨など、多くの産業機械に見られる運動である。通常は、回転運動を回転型のモータに、直動運動をリニアモータに、それぞれ独立して負担させ、この二つのアクチュエータを結合することにより、回転・直動の二自由度運動を実現している。この二自由度運動を一つのアクチュエータ

システムで実現できれば、駆動デバイスの小形化が可能となる。本研究では、リラクタンストルクにより回転力を発生するスイッチトリラクタンスマータ（以下 SRM と記す）に着目し、これに固定子磁極の回転軸方向の磁束密度分布を制御する機能を付加することにより、出力軸の回転と軸方向のストロークを両立するモータ機構を開発する。さらに、この回転・直動の独立した運動を実現する二

自由度モータのロータ自体をセンサターゲットとして、ロータの回転角度と直動位置を同時にかつ非接触で検出するモータ内蔵型回転・直動センサを開発し、二自由度運動のサーボ機構を構成し、産業応用可能なレベルへの高性能化を図るための回転速度制御・直動位置制御のサーボ機構の開発を行う。

## 2. 研究の目的

回転と直動の組み合わせ運動である二自由度運動を一つのアクチュエータで実現することを目的に、永久磁石を用いない回転型モータの一種である SRM に回転軸方向の運動自由度を追加した、回転・直動二自由度 SRM (以下、2DOF-SRM と記す) の開発が進められている。2DOF-SRM では、リラクタンスモータの作動原理により、適切な回転駆動のためにはロータの回転角度の位置検出が必要であり、さらに直動方向位置制御には、ロータの軸方向位置の検出が必要である。そこで、本研究では、2DOF-SRM のロータ自身を光学センサのターゲットとして利用し、モータに内蔵可能とした非接触回転角度・直動位置同時検出センサを開発し、そのセンシング原理と性能、センサを内蔵した 2DOF-SRM の制御方法を提案する。さらに、本研究で開発したセンサをモータに内蔵した 2DOF-SRM のサーボ機構を構築し、二自由度モータシステムとしての性能評価を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 2DOF-SRM の駆動原理

2DOF-SRM の基本構造を図 1 に示す。2DOF-SRM は、SRM の 1 つのロータと 2 つのステータを組み合わせた構造になっている。出力軸の軸受は回転と直動の両運動に対応する。この 2DOF-SRM は基本的な SRM の構造である三相 6/4SRM (ステータ 6 突極、ロータ 4 突極) のトポロジーを継承しており、ロータ角度位置を検出して適切なタイミングで各励磁相 (対向位置にあるコイルの組) を通電することでロータが回転する。出力軸発生トルクは、ステータ 1 とロータで発生するトルクと、ステータ 2 とロータで発生するトルクの和となる。また、ステータ 1 と 2 の励磁相を、同じ励磁タイミングで、電流値のみ差をつけることで、ステータ 1 とステータ 2 がロータを自ステータ内に引き込む軸推力に差を生じ、出力軸の発生推力となる。すなわち、適正な励磁タイミングでの相切り替えにおいて、ステータ 1 と 2 の励磁電流  $i_1$ 、 $i_2$  を制御することによって、次式により出力軸トルク  $T$  と推力  $F$  を独立に制御することができる。

$$\begin{bmatrix} T \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial L_1 / \partial \theta & \partial L_2 / \partial \theta \\ \partial L_1 / \partial x & \partial L_2 / \partial x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1^2 \\ i_2^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $L_1$  と  $L_2$  はそれぞれステータ 1 とロータ、ステータ 2 とロータで構成する磁気回路のインダクタンスで、ロータ、ステータの形状、材質、コイル巻数、ロータ位置により決まる。 $\theta$  はロータ回転角度位置、 $x$  はロータ軸方向位置である。

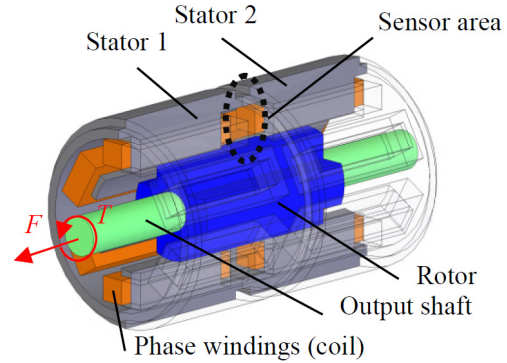


図 1 2DOF-SRM の基本構造

### (2) 二自由度モータ用センサの検出原理

2DOF-SRM の制御には、ロータの回転方向と軸方向の位置情報が必要である。しかし、二自由度の組み合わせ運動のため、ロータの回転角や直動位置を検出するセンサを機械的にロータに取りつけることは難しい。そこで本研究では、円筒形状に加工したロータに特定の色のついた格子状のパターンを印刷し、それを光学センサのターゲットとして、ロータの回転角度と直動位置を非接触で同時検出する、異色光源方式回転角度・直動位置同時検出センサを用いている。

ロータは、磁氣的突極を維持したまま、突極間に樹脂等の非磁性体を充填し、見掛け上円筒状のロータとしている。ロータ回転角度と直動位置の検出方法は、このロータ表面にステータ 1、2 間 (図 1 の破線で囲んだ部分) に搭載した光電センサから光を投射し、その反射光から、角度、位置の情報を得るものである。なお、基本的な原理はロータリエンコーダと同じであり、移動方向の正逆の検知には 90 度パルス位相をずらしたもう一つの検出系が必要であるが、以下ではその一方の移動方向についてのみ言及する。

光電センサには、エミッタ光源色によってターゲット色の反射光のデテクタの反応感度が異なるという特徴がある。異色光源方式センサは、この特徴を利用し回転角度と直動位置を同時に得る。具体的には、赤色光源と緑色光源の光電センサを用いて、それぞれに図 2 に示すセンサの感度閾値を設ける。そして、ロータ円筒表面に図 3 のように赤、緑、黒、白の 4 色が配色されたパターンを着色することで、表 1 のように、赤色光源センサが軸方向目盛を、緑色光源センサが回転方向目

盛をそれぞれ独立に検出し、そのパルス数で回転角度と直動位置を得る。また、往復運動を伴う直動方向に関しては、正常なパルス検出を行うために、直動方向における赤から黒、白から緑の色の変化をグラデーション状にして、隣接する色との境界線をなくしている。したがって、発光スポットが隣接した色へ向かって移動するにつれ、光電センサの受光量は連続的に変化することになる。この光電センサの連続的な出力に対して、異なる2つの閾値を設け、この閾値の範囲で出力を切り替える信号処理を施し、パルス出力を得ている。

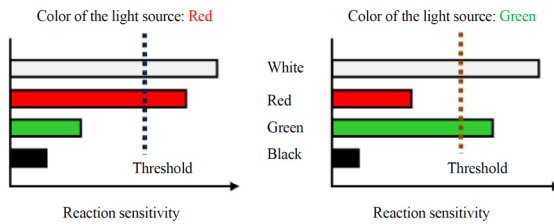


図 2 赤色光源と緑色光源の光電センサのターゲット色別の反射強度

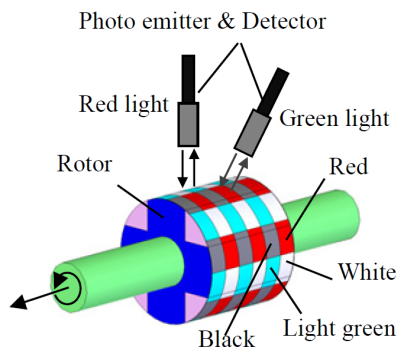


図 3 非接触回転角度・直動位置同時検出センサ

表 1 赤色光源と緑色光源の光電センサの検出ターゲット色

Target color	Red color sensor	Green color sensor
White	○	○
Red	○	×
Green	×	○
Black	×	×

○: detected ×: not detected

### (3) センサ内蔵型 2DOF-SRM の実験装置

2DOF-SRM の制御系では、制御システムを DSP 内に構築し、モータ角度や直動位置に応じた信号を出力する。

直動運動制御では、目標位置を入力し、2DOF-SRM 内蔵のセンサからの直動位置と比較し、PID 制御をかける。その値に応じて、

PWM duty を決定し電流制御を行い、各ステータ間で電流差を生じさせる。回転運動制御も同様に、目標回転数とセンサからの出力軸角度値を比較し、PI 制御をかけ、電流制御を行う。本研究で構築した 2DOF-SRM のサーボ機構の制御システムフローを図 4 に示す。

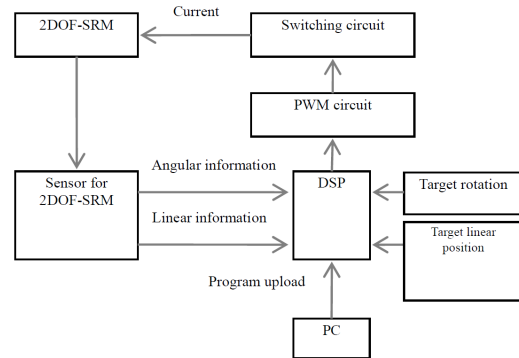


図 4 2DOF-SRM サーボシステムの制御フロー

## 4. 研究成果

### (1) センサ内蔵形 2DOF-SRM の回転・直動同時駆動試験

2DOF-SRM の回転・直動の同時駆動実験を行った。分解能は回転角度  $15^\circ$ 、直動方向 1mm としている。最初に、直動位置用の光電センサが正確に直動位置を検出できるかを試験した。図 5 に非接触回転角度・直動位置同時検出センサの単体試験装置の概略図を示す。外部モータでロータリエンコーダにより回転角度を検出しながらロータを回転し、ロータが直動する代わりに、センサ側を直動させる。センサの直動位置検出の検証は外付けのポテンショメータによる。

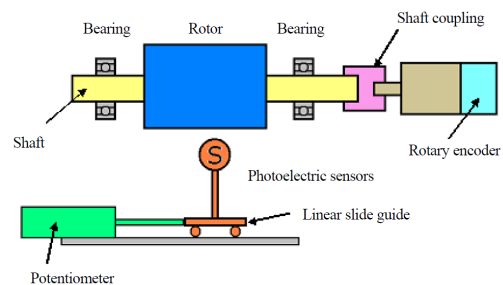


図 5 非接触回転角度・直動位置同時検出センサの単体試験装置

図 6 にセンサの回転角度検出性能を示す。ロータは一定回転速度で、1 回転  $360^\circ$  で角度値をリセットする処理を行っているため、回転角度は  $0^\circ$  から  $360^\circ$  でののこぎり波状に変化する。センサの回転位置出力と検証用のロータリエンコーダの出力は一致しており、回転角度センサとして十分な性能を有し

ていることがわかる。

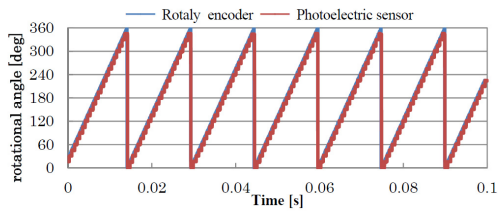


図 6 非接触回転角度・直動位置同時検出センサの回転角度検出性能

図 7 に直動位置検出の性能を示す。センサがロータの軸方向中心位置にあるときを 0mm とし、直動の左右の方向を正負で表す。センサの直動方向移動は手動により行っている。図 7 より光電センサの直動位置検出が検証用のポテンショメータの直動位置検出と一致しているため、光電センサの直動位置検出ができていていることがわかる。

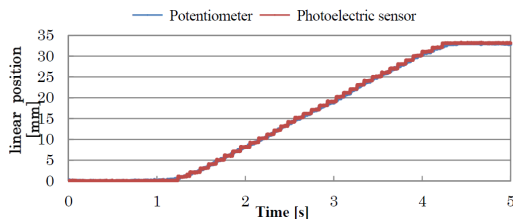


図 7 非接触回転角度・直動位置同時検出センサの直動位置検出性能

## (2) 2DOF-SRM の回転速度・直動位置サーボ系の構築と性能試験

2DOF-SRM の制御系に回転角度・直動位置同時検出センサの検出情報をフィードバックし、モータ出力軸が目標回転速度、目標直動位置に追従する二自由度運動のサーボ系を構築した。

図 8 にロータが直動方向中心位置 ( $x=0$ ) にあるときの目標回転数 1000rpm の回転制御ステップ応答の試験結果を示す。すなわち、直動方向位置を維持したまま、回転速度のみをステップ上に変化させた。

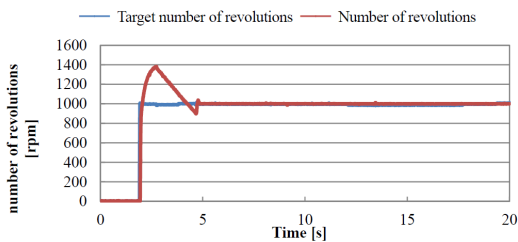


図 8 2DOF-SRM の回転速度サーボ系ステップ応答 (直動位置は  $x=0$  一定で維持)

2DOF-SRM は、モータ軸を回転・直動の両運動に対応する軸受で支持しているものの、見かけ上、空中に浮いているロータを電磁力で回転、直動する構造のため、軸受部のわずかな摩擦を除くと機械的な減衰要素がない。そのため、ロータの慣性に対して単にセンサ検出情報をフィードバック制御するだけでは、十分な減衰が得られず、ステップ応答においてオーバーシュートが生じている。このオーバーシュートは、ソフトウェアによる速度フィードバックにより低減することが可能である。

図 9 に回転速度 1000rpm 一定の状態で、直動方向の目標位置信号に任意波形を設定した時の直動位置サーボ系の応答を示す。図 10 に回転速度 1000rpm 一定の状態で、直動方向変位 20mm のステップ応答させた時の試験結果を示す。

以上より、回転速度制御系と直動位置制御系において独立して二自由度のサーボ系で所望の性能が得られていることが確認できた。

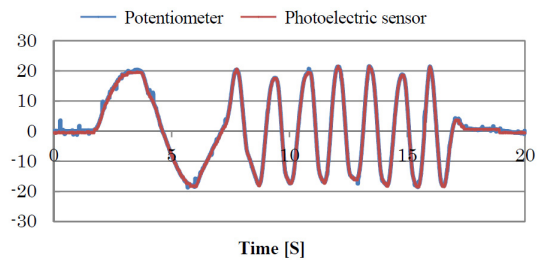


図 9 2DOF-SRM の直動位置サーボ系の応答 (回転速度は 1000rpm 一定で維持)

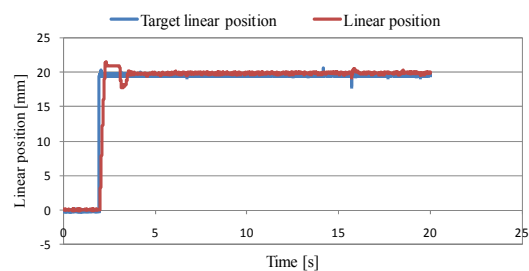


図 10 2DOF-SRM の直動位置サーボ系ステップ応答 (回転速度は 1000rpm 一定で維持)

## (3) 結論

回転運動と直動運動を実現する二自由度モータについて、回転速度と直動位置を独立に制御するサーボ系の構築を目指し、サーボ性能を高める観点からのモータ形状の最適化を行うとともに、出力軸の回転角度と直動

位置を同時にかつ非接触で検出するモータ内に内蔵可能なセンサを開発した。当研究では、レアアースを必要としないリラクタンسモータである SRM の作動原理を応用して回転・直動の二自由度機構を形成する二自由度モータ (2DOF-SRM) により、回転速度・直動位置サーボ系に適した制御方法を検討し、実用化に向けた制御システムの構築を行った。なお、当研究成果については、学会での発表、学会論文へ投稿を準備中である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

①佐藤恭一, ソレノイドに関わる電磁気, 油空圧技術, 査読なし, 第 50 巻, 第 9 号, pp. 32-36, 2011.

〔学会発表〕 (計 1 件)

①佐藤恭一, 動力の伝達・変換・制御, IFPEX2011 カレッジ研究発表コーナー, 2011 年 7 月 20 日, 東京.

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 恭一 (SATO YASUKAZU)  
横浜国立大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号: 30262405

(2) 研究分担者 なし