

技術紹介

8 3相リニアステージの開発

Development of 3 phase Linear Stage

中里 憲一	Kenichi Nakazato	航機事業部	第二技術部
小林 義幸	Yoshiyuki Kobayash	航機事業部	第二技術部
中原 隆	Takashi Nakahara	航機事業部	第二技術部

キーワード：リニアモータ、光学系、デジタル制御、位置制御、3相交流

Keywords : Linear Motor, Optical system, Digital control, Position control, 3phase AC

要 旨

一般的に搬送用直動ステージは、広駆動範囲において、高精度な位置制御および定速制御が要求されます。

本開発において、駆動範囲 500[mm] 以上、最大速度 1.3[m/s] 以上、位置制御精度 $\pm 1[\mu\text{m}]$ 以下、位置整定時間 20[ms] 以下、速度リップル 2%(1 σ における値) 以下を達成する直動ステージを開発しましたので、紹介いたします。

本直動(リニア)ステージは、3相リニアモータと光学式エンコーダから成るステージ部と、このステージ部を制御するためのドライバ部から構成されています。

SUMMARY

For the linear stage for carrier, high accuracy position control and constant speed control in wide driving range is generally required.

We have developed the linear stage which attains: more than 500mm in driving range; more than 1.3m/s in maximum speed; under $\pm 1\mu\text{m}$ in position control accuracy; under 20ms in position setting time; and under 2% (value of 1 σ) in speed ripple.

In the following, we introduce the linear stage which consists of the stage part of 3 phase linear motor and optical encoder, and driver part controlling the stage part.

1 まえがき

回転モータとボールネジの組み合わせという従来の直動システムは伝達機構のガタ、剛性の問題から高速駆動、高応答性の実現が難しいという問題がありました。これに対しリニアモータを用いた直動システムはボールネジ等の伝達機構が不要であるため応答性が高く、高速駆動が可能です。

その特長を生かし、半導体／液晶製造装置、部品実装装置、検査装置等では、装置内のXYステージ、搬送装置に長ストロークリニアモータが使われています。

このような用途でのリニアモータには高速であることに加え、速度むら（速度リップル）の低減、位置決め精度の向上が要求されます。

これらの要求を実現するために、ステージ部（主構成部品である長ストローク3相リニアモータおよび光学式エンコーダ）及びこのステージ部を駆動し、位置・速度・加速度制御を行うことが出来る3相モータドライバを開発しました。

2 直動（リニア）ステージ仕様

直動（リニア）ステージの仕様（概要）を表1～3に示します。

表1 直動（リニア）ステージ仕様

項目	仕様	備考
最大速度	1.3 [m/s]	
速度安定性	2 [%]	標準偏差1σの値
位置分解能	1 [μm]	
位置制御精度	1 [パルス]	1パルス=1μm
整定時間	20 [ms] 以下	
動作温度範囲	0～40 [°C]	
湿度	85% RH	結露なきこと

表2 ステージ部(3相リニアモータ)仕様

項目	仕様	備考
最大推力	200 [N]	
定格推力	95 [N]	
負荷質量	100 [Kg]	
推力定数	68 [N/A]	1相当当たりの推力定数
コイルインダクタンス	48 [mH]	1相当当たりのインダクタンス
コイル抵抗	19 [Ω]	1相当当たりの抵抗
漏えい磁束	0.4 [mT]	ステージ中央部
可動範囲	500 [mm]	
温度上昇	63 [$^{\circ}$ C]	定格推力時の温度上昇

表3 ドライバ部仕様

項目	仕様	備考
主電源電圧	AC200 [V]	単相
定格出力電流	2.9 [A(rms)]	
最大出力電流	5 [A(max)]	100ms 以下
駆動方式	3相PWM方式	
PWMキャリア周波数	20kHz	
制御方式	位置、速度、推力	
コマンド入力	シリアル通信	
ディスクリート入力	サーボON、正・逆方向駆動禁止 ゲインLOW、リセット	
ディスクリート出力	サーボREADY、位置決め完了、 アラーム	
エンコーダ形式	2相インクリメンタルエンコーダ	ラインドライバ入力
異常検出	内部電圧、通信異常、モータ異常、 ヒートシンク過熱、過電流、 パラメータ異常、CPU異常	

3 構成

直動（リニア）ステージのブロック図を図1に示します。

ステージ部は3相リニアモータ、光学式エンコーダ、リニアガイド、可動テーブルから構成されています。（写真1、図2参照）

また、ドライバ部は制御部とアンプ部から構成されています。（写真2参照）

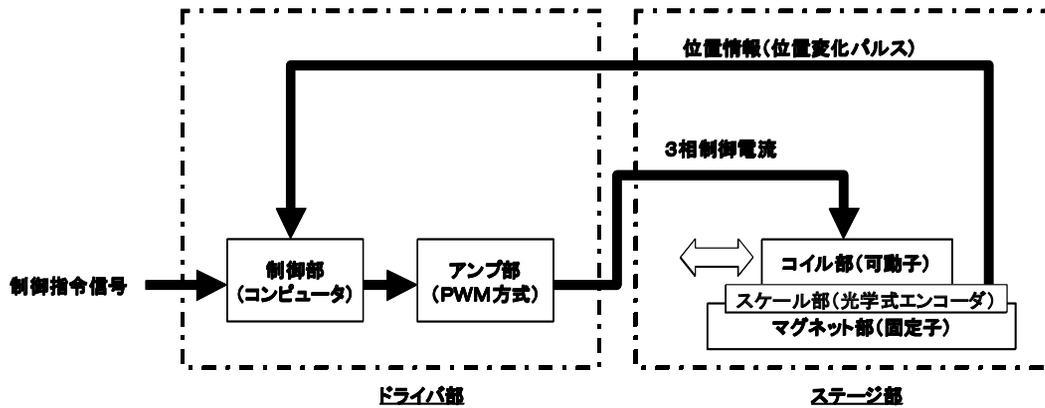


図1 直動（リニア）ステージ・ブロック図

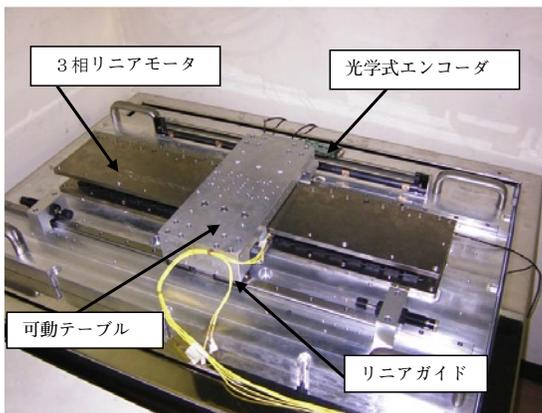


写真1 ステージ部外観

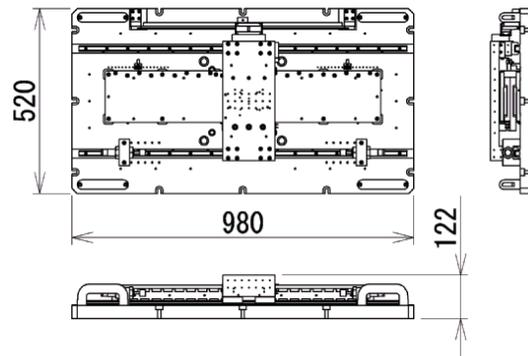


図2 ステージ部外観寸法

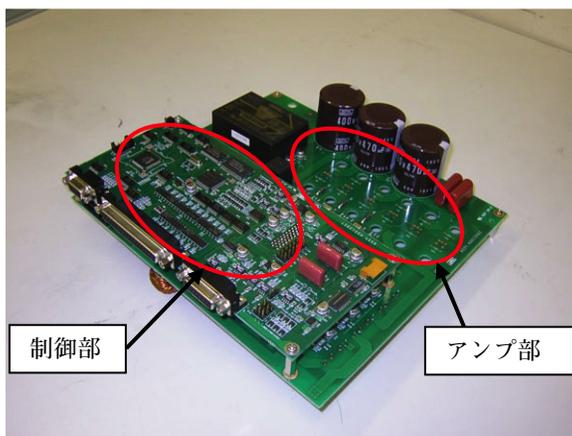


写真2 ドライバ部（基板）

4 開発のポイント

以下に開発時のポイントとなった速度リップルの低減、整定時間の向上について述べます。

4.1 速度リップル

3相リニアモータにはいくつかの方法がありますが、本直動(リニア)ステージでは、速度リップルの原因となるコギング推力の発生しないコアレス Linear DC Motor(LDM)方式を採用しました。

3相リニアモータを構成するためには、まず、マグネットを一定間隔に並べ、磁束密度を空間的に正弦波状に分布させます。3個のコイル(各コイルをU、V、W相と言う)は、マグネットの間隔を 180° (π)としたとき、空間的に 120° ($2/3\pi$)となる位置に配置します。(図3参照)

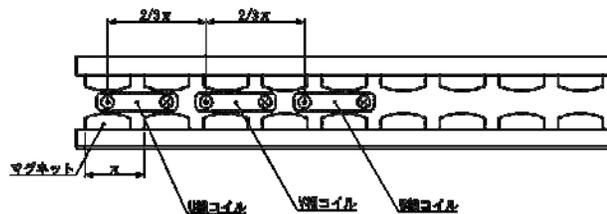


図3 3相リニアモータ構成

この状態で各コイルに 120° の位相差を持った電流を正弦波状に流すことにより一定で変動の無い推力を発生させることができます。

しかしながら、マグネットが発生する磁束密度に空間的な高調波が含まれていると、その分は推力リップルとしてあらわれ、速度リップル等の原因となります。

そこで、マグネット部のパラメータを変更しつつ、その磁束密度の空間的高調波成分を解析し、高調波成分の低減を行いました。

その解析結果の一例を図4-1、4-2および図5(磁束密度の空間周波数成分分析)に示します。

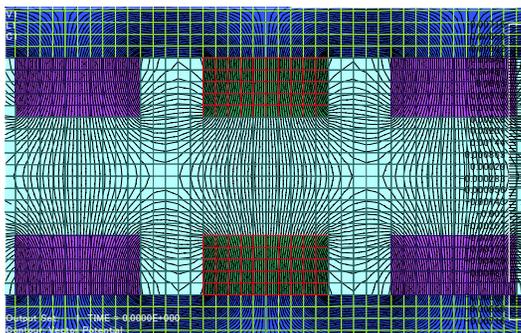


図4-1 磁束線図

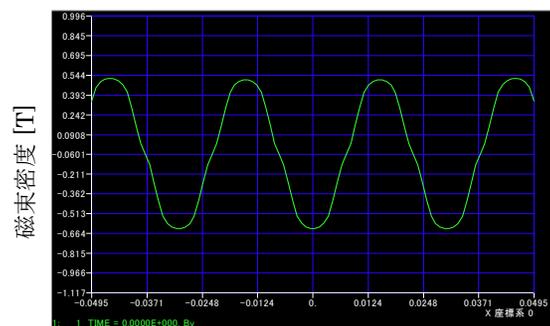


図4-2 磁束密度分布

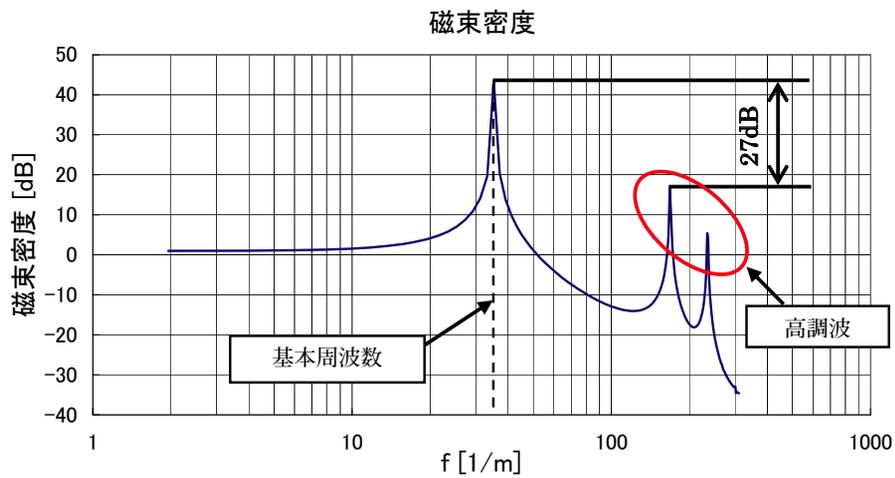


図5 磁束密度の空間周波数成分分析

図5から推力変動の原因となる高調波成分は基本周波数の1/20以下と小さな値となり、速度リップルとして影響しないことがわかりました。

直動ステージで速度リップルの評価を行ったときの速度波形を図6に示します。
この例では速度10[mm/s]で定速制御を行っています。
速度の平均値に対する分布(1 σ)は制御目標の $\pm 2\%$ 以内を達成しました。

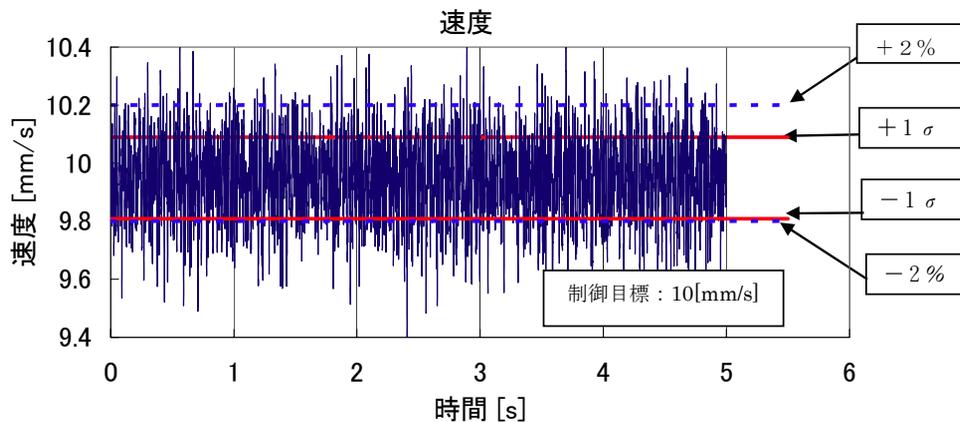


図6 速度波形

4.2 整定時間

フィードバックループのゲインを単純に上げることによる、モータの応答性の改善には限界があります。そこで、モータの応答性をより向上させるために2自由度制御を採用しました。2自由度制御とは、二つ(2自由度)の異なる制御特性を独立に実現するための手法です。本装置では、クローズドループを構成するフィードバック制御と、応答性を向上させるフィードフォワード制御を用いています(図7)。

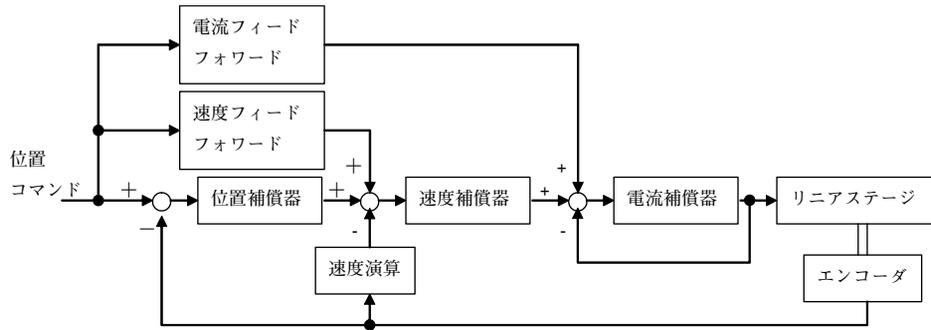


図7 制御ブロック図

このような構成とすることにより、モータの構造共振点の影響を受けることなく、応答性を向上しました。

フィードフォワード制御を行った時の位置のグラフを図8に示します。この例では、100[mm]を駆動するコマンドでの、ステージの動きを示しています。

本リニアステージでは、コマンドが目標値に達してからステージ位置が目標値の±5[μm]以内入までの時間を整定時間としており、その整定時間は、20[ms]を達成することができました。

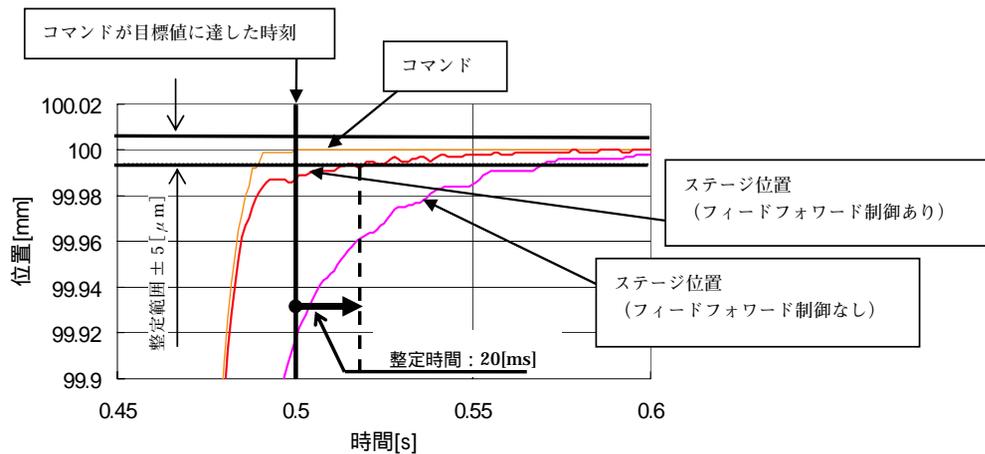


図8 位置制御性

5 むすび

今回、3相リニアモータを使用した搬送用直動ステージを開発し、性能評価を行い、所定の機能・性能を得ることができました。

今後、半導体や液晶製造装置の搬送系を中心に提案を行っていきたいと考えています。

また、更なる性能向上を目指し、ステージの高剛性化、制御則の最適化、制御信号の低ノイズ化等を行い、より高精度なステージや2次元ステージ等の開発を進めていきたいと考えています。