

## 2つの学習ループを持つ繰返し制御による トルク脈動抑制制御法—加速度センサ利用—

Suppression Control Method for Torque Ripple of PMSM with two Repetitive Controllers  
- Using Acceleration Signal of Motor Frame -

服部 知美\*  
Satomi HATTORI

Abstract : Variable speed drive systems of the servo motor with PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motors) have been widely used for industry applications, home electric appliances, and so on, due to the progress of the power electronics. Moreover, it is used in the fields where the high speed and high accuracy control is required, because the PMSM can realize the same high performance DC motor. However, structural imperfectness of PMSM and its control system produce torque ripple, which causes the mechanical vibration (frame vibration), the rotational speed ripple, the acoustic noise and so on.

In this paper, we propose a suppression control method for the torque ripple of PMSM utilizing the feedforward compensation control, and a generation method of compensation signals for the feedforward control by the repetitive control and the Fourier transform, using a vibration signal acquired by the acceleration sensor attached to the motor frame. In the proposed system, only one frequency component of the torque ripple signal is inputted to the repetitive controller, the stability of the repetitive control system can be improved. The effectiveness of the proposed method is confirmed by experimental results.

### 1. はじめに

近年の電力変換・制御技術の進歩や永久磁石材料の性能向上, 制御装置を構成する部品の価格低下により, 保守性・制御性・耐環境性に優れ, 小型化・高効率運転が可能である永久磁石型同期モータ (PMSM : Permanent Magnet Synchronous Motors) の適用範囲が拡大している。特に, 中小容量機においての PMSM を用いた AC サーボシステムは急速に普及し, 産業用・家電用として数多く使用されている。

PMSM は 3 相電機子電流の合成ベクトルを永久磁石の磁束ベクトルに直交させることにより, 高性能なトルク制御を実現することができる。しかし, 以下に記述するようなトルク脈動が発生することが知られている<sup>[1]-[3]</sup>。

1. 界磁磁極の構造上, 界磁の空間分布に高調波が存在するために発生するトルク脈動
2. 磁極の突極性により発生するコギングトルク
3. PWM インバータの上下アームの短絡防止時間に起因するトルク脈動

4. 電流検出回路のアナログ処理部での各相アンプのゲインの不均衡やオフセットにより発生するトルク脈動

その結果, これらのトルク脈動と機械系の構造により, 様々なモードの振動が発生し, 騒音の発生や機械特性の劣化, さらには, 速度変動により制御精度の悪化の原因となることがある。

トルク脈動の対策として, 制御による対策<sup>[4]</sup>, モータ本体に施す方法<sup>[5], [6]</sup>等が報告されているが, ばらつきがある個々のモータに対して, 十分なトルク脈動補償を行うにはさらなる微調整が必要となる。

筆者らはこれまでに, PMSM (SPMSM : Surface Permanent Magnet Synchronous Motors, IPMSM : Interior Permanent Magnet Synchronous Motors) が発生するトルク脈動のうち機械系や負荷にとって特に有害な周期的なトルク脈動に焦点をあて, そのトルク脈動をフィードフォワード補償信号によって抑制する制御系を基本として, それに用いる補償信号をモータフレーム振動 (加速度センサ利用) あるいは速度脈動 (エンコーダ利用) とフーリエ変換, 繰返し制御を利用した学習制御により獲得する方法について検討してきた<sup>[7], [8]</sup>。しかしながら, 本手法では 1 つの振動 (トルク脈動) 成分ごとに補償信号の学習, 保存 (メモリ化) を

行うため、全成分に対する補償信号の獲得に時間を要する。複数の成分に対する補償信号の同時学習が可能になれば、補償信号の獲得時間を短縮することができるが、同時に学習できる成分の個数は、DSP システムの能力に依存する。

本論文では、今までに提案してきた手法のアルゴリズムを改良し、2つの振動（トルク脈動）成分に対する補償信号同時学習を可能にするシステムを検討し、本手法の有効性を実機実験により確認する。

## 2. トルク脈動抑制制御系

電流制御系および加速度センサ、フーリエ変換および繰返し制御を基本としたトルク脈動抑制制御系の構成図を図1に示す。なお、本論文ではSPMSMを用いる。また、フレーム振動を抑制することによりトルク脈動が抑制されているかを確認するために、トルクメータを観測用に用いる。本制御系では、SPMSMの界磁が作る磁束の方向を $d$ 軸とし、それよりも $\pi/2$ 進んだ位相に $q$ 軸をとる。SPMSMは電流制御ループによって制御され、指令電流値 $i_{qcmd}$ にほぼ比例するトルクが発生する。

ここで、 $\alpha_F$ はフレーム振動、 $\alpha_{F\_n1}$ 、 $\alpha_{F\_n2}$ は $\alpha_F$ の $nf$ 振動成分（モータ駆動周波数 $f$ の $n$ 倍の周期で発生する振動成分）、 $i_{qc\_n1}$ 、 $i_{qc\_n2}$ はそれぞれ $\alpha_{F\_n1}$ 、 $\alpha_{F\_n2}$ に対する補償信号、 $\theta_{re}$ は回転子の回転角度、 $T_r$ はフーリエ変換および繰返し制御の周期である。以下に、各部について説明する。

### 2.1 トルク脈動検出

SPMSM駆動時には、1章で説明したように、制御系の特性や不完全性、回転子構造の形状などによって、モータ回転速度に同期した周期的なトルク脈動が発生する。このトルク脈動は、回転子に速度脈動を与えると同時に、モータフレームに反作用トルクとして働き、フレームに振動を引き起こす。したがって、フレームに取り付けた加速度センサによって検出される信号を用いて、フレーム振動を直接的に抑制すれば、振動の原因となる周期的なトルク脈動が抑制されると同時に、間接的に回転子速度脈動をも抑制することができると思われる。

トルク脈動に起因するフレーム振動は、機械系の特性により様々な方向に発生する。加速度センサの取り付け位置および方向は、トルク脈動に起因する振動が発生する場所で、機械的な特性を考慮して決定する。加速度センサの信号には、高周波ノイズが含まれているので、ローパスフィルタ

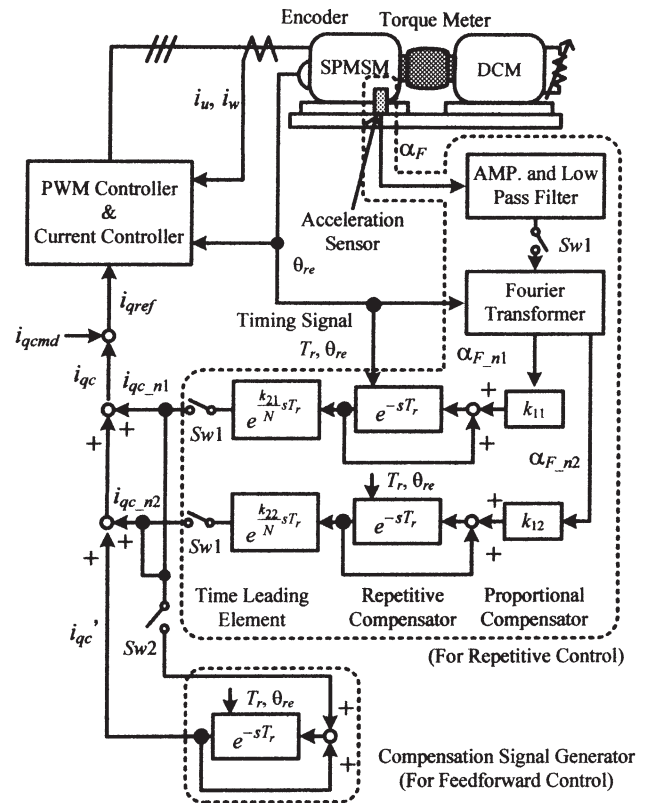


図1 トルク脈動抑制制御系構成図

に通して除去する。

図2にSPMSM駆動時に発生するモータフレーム振動とトルクをFFT解析装置により解析した結果の一例を示す( $f=12.5\text{Hz}$ )。同図より、トルク脈動に起因する振動を含め、種々の振動が発生していることがわかる。

### 2.2 フーリエ変換による特定振動成分抽出

SPMSM駆動時のモータフレームには、トルク脈動に起因する振動成分のみならず、外部からも様々な振動力が加わるため、フレームに取り付けた加速度センサから検出される信号には、様々な振動成分が混在する。さらに、機械系の特性が複雑であるシステムでは、全ての周波数成分に対して繰返し制御系を安定に動作させるのは不可能である<sup>[9]</sup>。そこで、フーリエ変換により、検出信号（振動加速度信号）からトルク脈動に起因する周期的な振動成分のみを抽出し、振動成分ごとに繰返し制御を実行する。

一般に、振動（トルク脈動）の周期は電源周波数と一致するとは限らず、整数倍となる場合があるので、振動の周期を $T_r (=N_r T)$  ( $T=f^{-1}$ ) とする。例えば、 $N_r=2$ の場合、振動の周波数成分は $0.5f, 1f, 1.5f, 2f, \dots$  となり、 $0.5f$ が振動の基本波である。加速度センサにより検出されるモータフレーム信号 $\alpha_F(t)$ が(1)式のようにフーリエ級数で表

わされるとすれば、そのフーリエ係数  $a_n, b_n$  はそれぞれ(2), (3)式によって与えられ、 $nf$  振動成分  $\alpha_{F\_n}(t)$  は(4)式で表わされる。ただし、 $n = m/N_r$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ )である。したがって、(2)~(4)式を利用すれば、様々な振動成分が混在する振動加速度信号から特定の振動成分のみを抽出することができる。

$$\alpha_F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) \quad (1)$$

$$a_n = \frac{2}{T_r} \int_0^{T_r} \alpha_F(t) \cos(n\omega t) dt \quad (2)$$

$$b_n = \frac{2}{T_r} \int_0^{T_r} \alpha_F(t) \sin(n\omega t) dt \quad (3)$$

$$\alpha_{F\_n}(t) = a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) \quad (4)$$

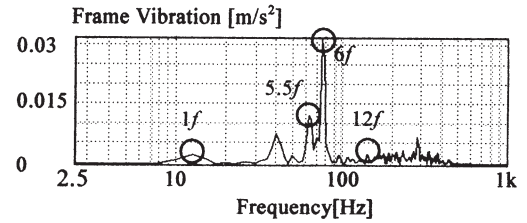
本研究では、上述の演算を DSP (デジタルシグナルプロセッサ) を用いてリアルタイムで実現する。振動加速度信号は A/D 変換ボードを用いて DSP に入力される。また、本論文で提案する手法では、2つの振動成分に対して同時に補償信号学習を行うため、フーリエ変換により2つの振動成分  $\alpha_{F\_n1}, \alpha_{F\_n2}$  を同時に抽出する。

### 2.3 繰返し制御系

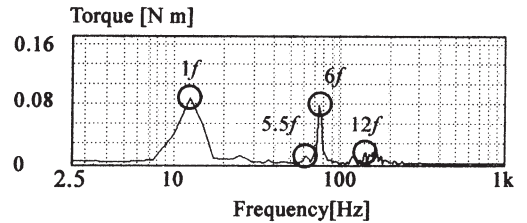
本研究では、モータの回転に同期する周期的なトルク脈動抑制を目的としているので、周期的振動の抑制に有効な制御法である繰返し制御を利用する。ここで、繰返し制御系の周期をフーリエ変換の周期と同じく  $T_r$  とする。

図1中、補償信号学習ループの繰返し制御器では、加速度センサおよびフーリエ変換器で検出された  $nf$  振動成分  $\alpha_{F\_n1}(\alpha_{F\_n2})$  を補償するように、 $q$  軸補償信号  $i_{qc\_n1}(i_{qc\_n2})$  を  $\theta_{re}$  の関数として発生させる。この補償信号により、フレーム振動が減少する方向の振幅・位相で電流指令値  $i_{qref}$  が変調される。比例補償器の定数  $k_{11}(k_{12})$  は振動  $\alpha_{F\_n1}(\alpha_{F\_n2})$  の減衰特性を決定し、時間進み補償の定数  $k_{21}(k_{22})$  は  $k_{11}(k_{12})$  の符号と合わせて補償信号の位相を調整し、繰返し制御系を安定化させるものである。補償信号  $i_{qc\_n1}(i_{qc\_n2})$  の生成過程の原理図を図3に示す。補償信号  $i_{qc\_n1}(i_{qc\_n2})$  は繰返し制御が実行されると(図1中の Sw1: オン)、 $nf$  振動成分  $\alpha_{F\_n1}(\alpha_{F\_n2})$  の減衰とともに徐々に形成される。なお、繰返し補償器はメモリ特性を持つ補償器であるため、Sw1 をオフにしても安定した補償信号を出力する。

本研究では、繰返し補償器を DSP で実現する



(a) FFT Analysis for Motor Frame Vibration



(b) FFT Analysis for Motor Torque

図2 モータフレーム振動およびトルク FFT 解析結果 (SPMSM 駆動時)

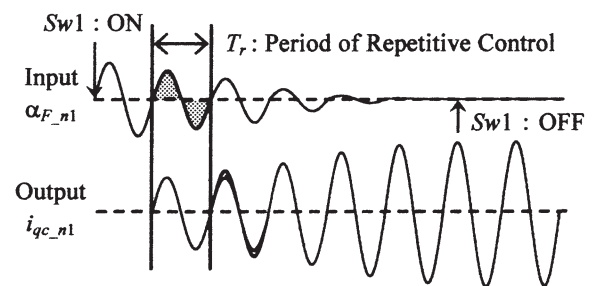


図3 繰返し制御による補償信号生成過程 (原理図)

ため、それを離散値系(メモリ数  $N$ )で設計する。また、フーリエ変換および繰返し制御を実行する上で必要なタイミング信号として、回転子の磁極位置情報  $\theta_{re}$  を用いる。

### 2.4 補償信号発生器

図1に示すトルク脈動抑制制御系では、繰返し補償器(メモリ)を補償信号学習のための繰返し補償器(2.3節)としてだけでなく、学習した補償信号を格納し、それをフィードフォワード補償信号として出力する補償信号発生器としても使用する。

補償信号学習時には(図1中の Sw1: オン)、フーリエ変換により抽出された2つの  $nf$  振動成分  $\alpha_{F\_n1}, \alpha_{F\_n2}$  に対して繰返し制御が実行され、振動抑制と同時に補償信号が生成される。この補償信号は、繰返し制御の1期間 Sw2 をオンすることにより補償信号発生器のメモリに加算書き込みされる。その直後に Sw1 をオフすると同時に、繰

返し制御中の補償信号をクリアする。この動作をトルク脈動抑制を必要とする 2 つの成分ごとに繰り返すことによって、補償信号発生器の中に選定したすべての振動成分（トルク脈動成分）を同時に抑制する補償信号が生成される。その補償信号をオープンループで用いて（補償信号発生器のみ使用； $Sw1, Sw2$ ：オフ）フィードフォワード制御を実行することにより、複数の振動成分（トルク脈動成分）を同時に抑制することが可能である。また、必要に応じて一部のトルク脈動成分に対して繰返し制御を再開し、補償信号を更新することができる。

なお、得られた補償信号をモータの動作点を特定するデータと共に保管しておけば、本補償信号発生器のみを利用したフィードフォワード補償トルク脈動抑制制御が実現できる。ただし、補償信号を出力するタイミング信号として、磁極位置情報  $\theta_{re}$  を用いる。

3. 実験結果

実験システムとして用いた機械系システムを図 4 に示す。SPMSM と負荷用 DCM は同一フレーム上に固定し、そのフレーム上に加速度センサを取り付けた。また、フレーム振動を抑制することによりトルク脈動が抑制されているかを確認するために、トルクメータを観測用に用いた。実験パラメータを表 1、繰返し制御系のパラメータを表 2 に示す。なお、フーリエ変換、SPMSM 駆動、繰返し制御を行う上で必要なモータ磁極位置を検出するために、ロータリーエンコーダを用いた。

3.1 繰返し制御によるトルク脈動抑制

図 1 に示すトルク脈動抑制制御系を  $Sw1$ ：オン、 $Sw2$ ：オフの状態を用いて、 $1f, 6f$  トルク脈動成分に対して補償信号を学習しながら、それらを抑制する実験を行った。その結果を図 5 に示す。図 5(a), (b) はそれぞれトルク脈動抑制制御前および制御中のフレーム振動、 $1f, 6f$  振動成分、 $1f, 6f$  補償信号、 $u$  相電流の各波形である。図 6 に制御前

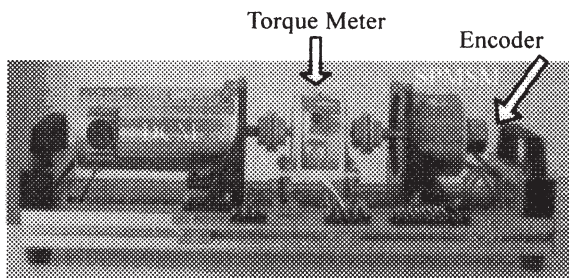


図 4 実験システム

表 1 供試パラメータ

SPMSM			
定格電圧	100[V]	極対数	4
定格電流	2[A]	$R_a$	1.25[Ω]
定格容量	350[W]	$L_a$	0.004[H]
定格回転数	2500[rpm]	$\Phi_a$	0.056[Vsec/rad]
DCM (負荷)		インバータ	
定格電圧	100[V]	キャリア	10[kHz]
定格電流	4.8[A]	電源電圧	80[V]
定格回転数	2500[rpm]	制御周期	100[μsec]
電流制御系		DSP (PE-Expert II)	
$i_{qcmd}$	1.5[A]	CPU	150[MHz]
$f$	12.5[Hz]	PWM	25[MHz]
定常トルク	0.40[Nm]		
エンコーダ	4096[pulse/rev.]		
トルクメータ	0.96mV/V(1900×10 <sup>-6</sup> ひずみ)		
加速度センサ (感度)	10[mV/(m/s <sup>2</sup> )] ±1[dB]		

$R_a$ ：巻線抵抗,  $L_a$ ：巻線インダクタンス  
 $\Phi_a$ ：巻線鎖交磁束数  
 PE-Expert II：マイウエイ技研株式会社製

表 2 繰返し制御系パラメータ

メモリ数： $N$	480	
制御周期： $T_r$	$4T (T = 1/f)$	
比例補償器： $k_{11} (k_{12})$	0.0005	
時間進み補償器： $k_{21} (k_{22})$	$1f$	0
	$5.5f$	10
	$6f$	5
	$7.25f$	4

および制御中のフレーム振動とトルクを FFT 解析装置により解析した結果を示す。

図 5(a)より、フレーム振動から  $1f, 6f$  振動成分がフーリエ変換により抽出されていることがわかる。同図(b)より、 $1f, 6f$  振動成分を用いて補償信号を学習し、この補償信号を用いて電流を変調することにより、 $1f, 6f$  振動成分が抑制されていることが確認できる。これらの図より、 $1f, 6f$  振動（トルク脈動）成分に対する補償信号が同時に学習でき、振動抑制と同時にトルク脈動が抑制されていることが確認できる。

図 6(a)より、 $1f$  振動成分は多少の変化だが振動成分が抑制されほぼ平らになっていることがわ

かる。6f 振動成分は、制御前には 0.03[m/s<sup>2</sup>]以上あったが、かなり抑制されていることが確認できる。また、同図(b)より、1f トルク脈動成分は、

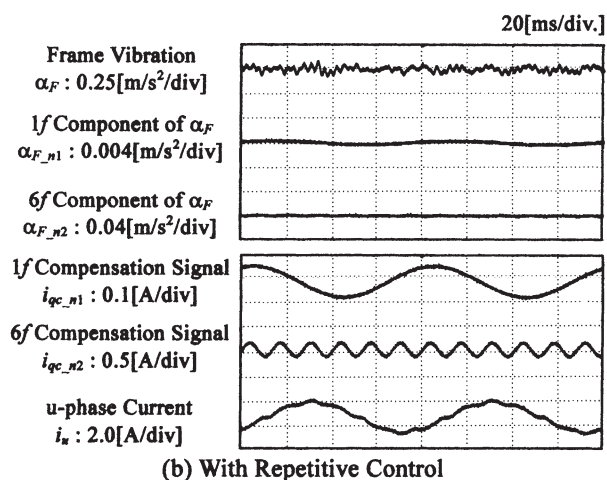
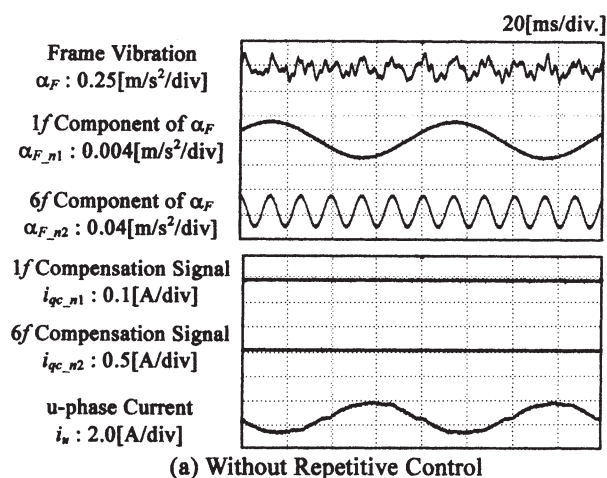
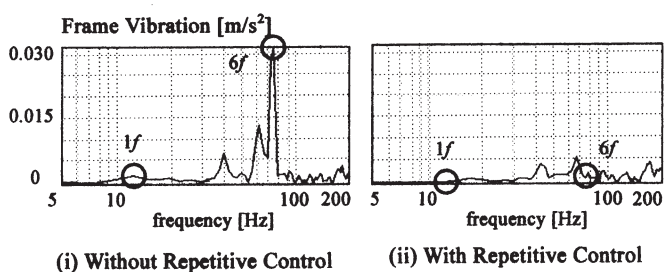
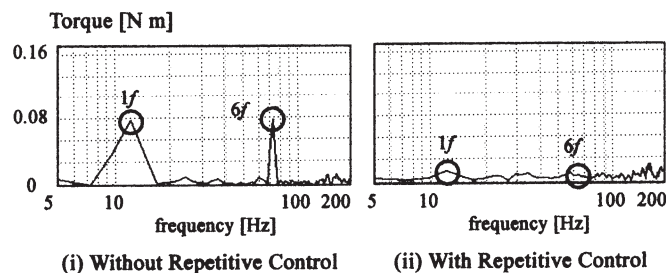


図5 繰返し制御実験結果



(a) FFT Analysis of Frame Vibration



(b) FFT Analysis of Torque

図6 フレーム振動、トルク FFT 解析結果 (繰返し制御実験結果)

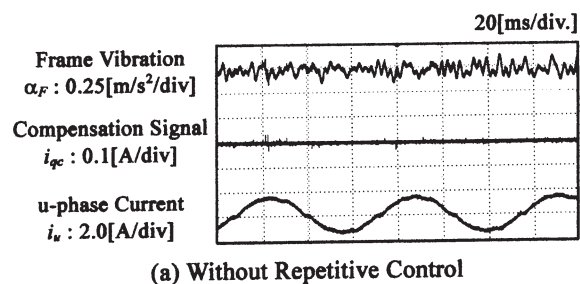
制御前には 0.08[N m]程度あったが、かなり抑制されていることがわかる。また 6f トルク脈動成分も同様に抑制されていることが確認できる。

実機実験より、繰返し制御系 (補償信号学習ループ) を 2 つにしても繰返し制御系は安定に動作し、有効な補償信号が学習できることを確認した。

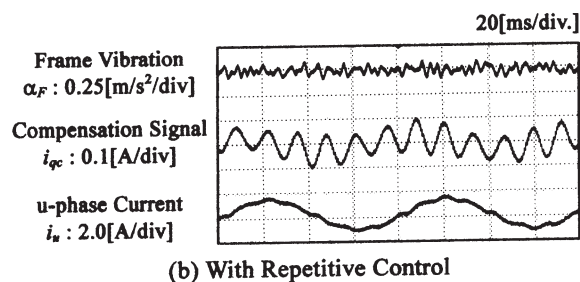
### 3.2 フィードフォワード制御によるトルク脈動抑制

2.4 節で説明したように、トルク脈動抑制を必要とする 2 つの成分ごとに補償信号の学習をし、その補償信号を補償信号発生器に保存した。その補償信号をオープンループで用いる (図 1 に示すトルク脈動抑制制御系 ; Sw1, Sw2 : オフ) フィードフォワード制御によるトルク脈動抑制制御を行った。トルク脈動抑制対象を、1f, 5.5f, 6f, 7.25f とした場合の結果を図 7 に示す。なお、本実験では、まず 3.1 節と同様に、1f, 6f トルク脈動成分に対する補償信号の学習を行い、その補償信号を補償信号発生器に保存後、5.5f, 7.25f トルク脈動成分に対して補償信号の学習、保存を行った。

その結果を図 7 に示す。図 7(a), (b) はそれぞれトルク脈動抑制制御前および制御中のフレーム振動、補償信号、u 相電流の各波形である。ここで示す補償信号は 4 つの成分が合わさったものである。図 8 にトルク脈動抑制制御前および制御中のフレーム振動とトルクを FFT 解析装置により解析した結果を示す。図 8(a) より、1f, 5.5f, 6f, 7.25f すべての振動成分が抑制されていることが確認できる。また、同図(b)より、1f, 5.5f, 6f トルク脈動成分は効果的に抑制がされていることが確認できる。しかし 7.25f トルク脈動成分は振動



(a) Without Repetitive Control



(b) With Repetitive Control

図7 フィードフォワード制御実験結果

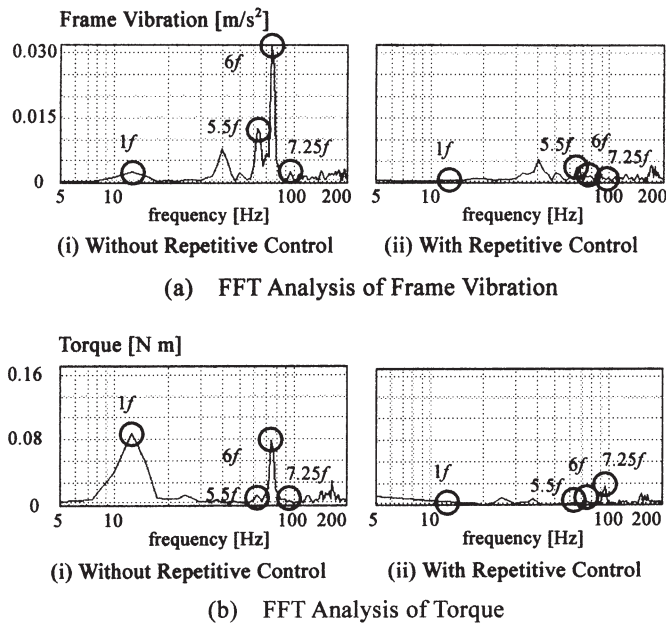


図8 フレーム振動，トルク FFT 解析結果  
(フィードフォワード制御実験結果)

成分の抑制とは反対に増加していることがわかる。その一因としては、フレーム振動の発生原因がトルク脈動による成分はフレーム振動を抑制することによりトルク脈動を抑制できると考えられる。しかし反対に、トルク脈動に起因しないと考えられる振動成分は、フレーム振動を抑制するためにトルク脈動が増加するのではないかと考えられる。

#### 4. あとがき

筆者らが今まで検討してきたトルク脈動抑制制御系<sup>[7], [8]</sup>では、DSP能力の限界により、複数のトルク脈動成分に対する補償信号の学習は不可能であった。本論文では、従来のアルゴリズムを改良することにより、繰返し制御系（補償信号学習ループ）を2つにすることを検討した。実機実験より、繰返し制御系を2つにしてもトルク脈動抑制制御系は安定に動作し、同時に2つのトルク脈動成分に対して補償信号の学習ができる（同時に2つのトルク脈動成分抑制）ことを確認した。また、補償信号発生器を利用したフィードフォワード制御を行うことにより、3つ以上の振動成分を同時に抑制できることも確認した。繰返し制御系を2つ作成したことにより、1つの場合に比べて補償信号学習時間を短縮することが可能となった。

さらに、フレーム振動を抑制することにより、トルク脈動も抑制されるかを確認するために、ト

ルクの観測を行った。その結果、フレーム振動の発生原因がトルク脈動によると考えられる成分（ $1f$ ,  $6f$ など）は、フレーム振動を抑制することによりトルク脈動を抑制できると考えられる。反対に、トルク脈動に起因しないと考えられる振動成分（ $7.25f$ など）に関しては、フレーム振動を抑制するためにトルク脈動が増加することがわかった。

トルク脈動とフレーム振動の関係性を明らかにし、より効果的なトルク脈動抑制制御システムを構築することが今後の課題である。

#### 謝 辞

本論文は2007年度卒業研究のテーマとして行った研究の成果をまとめたものである。担当した卒研生、仲野滋則君、松本展浩君の努力に感謝します。

#### 参考文献

- [1] 神谷，執行，牧野，松井：DSPによる同期型DDモータの高精度トルク制御，電学誌D，Vol.110，No.2，pp.117/124（1990）
- [2] 山本，篠原：PWMインバータ駆動ACサーボモータのデッドタイムを考慮した解析法と電圧誤差補償，電学誌D，Vol.116，No.9，pp.924/933（1996）
- [3] 花本，池田，田中，望月：周期性外乱を有するブラシレスDCモータの微小振動抑制制御，電学誌D，Vol.117，No.3，pp.335/341（1997）
- [4] 小坂，松井，谷口，百目鬼：リラクタン্সモータのトルク振動抑制法の考察，電学誌D，Vol.118，No.2，pp.150/157（1998）
- [5] 梨本，佐竹，河井，横地，大熊：スリット回転子を用いたリラクタン্সモータのトルクリップル低減法，電学誌D，Vol.117，No.8，pp.1008/1014（1997）
- [6] 北村，石原，戸高：二次元有限要素法によるスキューを考慮した直流ブラシレスモータの磁界解析，電学誌D，Vol.118，No.2，pp.253/259（1998）
- [7] 服部，石田，堀：フーリエ変換を利用した繰返し制御によるブラシレスDCモータのトルク振動抑制制御，計測自動制御学会論文集，Vol.36，No.5，pp.438/447（2000）
- [8] 服部，石田，堀：フーリエ変換を利用したパラメータ自動調整機能付き繰返し制御によるPMSMの振動抑制制御，電学誌D，Vol.121，No.3，pp.347/355（2001）
- [9] 蘇，石田，堀：加速度センサを利用した繰返し制御による3相HB形ステッピングモータの振動抑制制御 - フィードフォワード補償信号学習法 - ，電学誌C，Vol.120，No.1，pp.53/360（2000）