

### 量子化誤差と製造誤差による素子バラツキの影響を低減させた高精度マルチコイルモータの実現

松尾, 遥 / MATSUO, Haruka

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

58

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2017-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00014193>

# 量子化誤差と製造誤差による素子バラツキの影響を低減させた高精度マルチコイルモータの実現

REDUCING AN INFLUENCE OF QUANTIZATION ERROR AND A CHARACTERISTIC VARIATION DUE TO MANUFACTURING VARIABILITY FOR DRIVING A HIGH PRECISION MULTI-COIL-MOTOR

松尾遥

Haruka MATSUO

指導教員 安田彰

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

For the high precision driving, a multi-coil-motor (MCM) driven by digital-direct-drive-technology has been proposed. However, it is not suitable for driving MCM, since this digital-direct-drive-technology aims driving of speaker. This paper proposes two methods for a high precision driving. First method is a honeycomb-structured space vector delta-sigma modulation which can realize a multilevel quantization on a rotating coordinate system. Second method is a full-search dynamic three-phase multi-coil-motor matching which can reduce the influence of variations of a manufacturing of stator coils.

**Key Words** : Realization of high precision motor, Reduction of torque ripple, Reduction of quantization error, Reduce the influence of element variations, Multi-Coil-Motor, Space vector modulation

## 1. 研究背景

近年モータはあらゆる分野で使用されており、中でも高品質な製品の製造には高精度なモータが不可欠である。塗装機や研磨機に使用されるモータの精度が悪くモータが振動してしまうと、塗装ムラや光沢ムラが生じてしまう。モータが振動する原因は多岐にわたるが、筆者らは量子化誤差と製造誤差に注目し、これらの誤差の低減に有力なデジタル直接駆動[1]と、Multi-Coil-Motor (MCM) [2]を用いた高精度駆動[3][4][5]についての手法を提案していた。しかしデジタル直接駆動技術は元々スピーカ駆動を想定したシステムであるため、モータ駆動を想定したシステムではない。そこで本論文ではデジタル直接駆動技術をモータ駆動に最適化したシステムを提案することで、更なる高精度モータの実現を目指す。

## 2. 従来手法

高精度なモータ駆動を目的とし、デジタル直接駆動技術によって駆動されるMCMが提案されている。デジタル直接駆動技術はマルチレベルのPDM信号を生成する $\Delta\Sigma$ 変調器と、製造誤差による素子バラツキの影響を低減させる信号処理Noise-Shaping Dynamic Element Matching (NSDEM) [6]によって構成される。

## (1) Multi-Coil-Motor (MCM)

MCMはインナーロータ型の永久磁石同期モータの構造を基に図1のようにステータコイルを複数に分割し、同じ鉄心に重ねて巻く構造をしている。

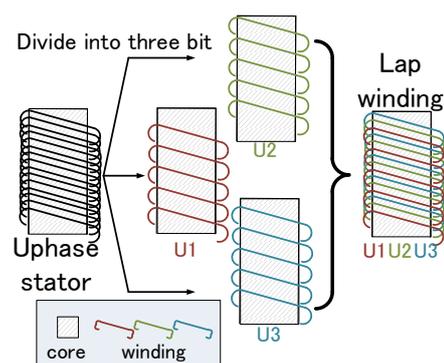


図1 MCMのステータコイル

本論文で使用するMCMはU, V, Wの3相のコイルを3つに分割した構造とする。駆動するコイルを複数にしたため、マルチレベルの駆動信号をドライバ回路で加算せず2値の信号のまま出力することが可能である。回路内で信号を加算する必要が無いため低電圧で各相に高分解能な電流を流すことができる。また各コイルが開放端巻線で独立しているため、MCMを駆動するドライバ回路ではフルブリッジ回路が採用されている。負荷に各コイル

を独立して正、負、0（駆動しない）の3値で駆動することができるため、低出力時において駆動するコイルを減らすことでドライブ回路でのスイッチング損失が低減され低出力時の高効率駆動が可能である。

### (2) $\Delta\Sigma$ 変調器

3相3コイルのMCMを駆動するためにU,V,Wの3相のSin波を $\Delta\Sigma$ 変調器によって3レベルの信号に量子化する。 $\Delta\Sigma$ 変調器は図2のようにループフィルタと量子化器によって構成されている、量子化器によって発生した量子化誤差をループフィルタによって高帯域にシフトするノイズシェーピングが大きな特徴である。またオーバーサンプリングとマルチレベル量子化によって、一般的な1レベルのPWM駆動に比べて高調波や量子化誤差が低減され低騒音、振動の高精度駆動が実現できる。

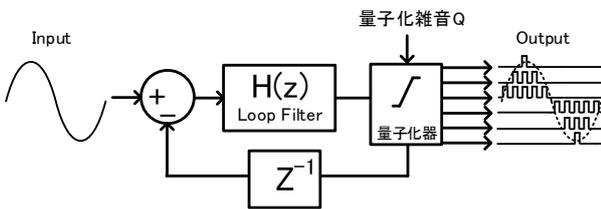


図2  $\Delta\Sigma$ 変調器構成図

### (3) Noise-Shaping Dynamic Element Matching (NSDEM)

$\Delta\Sigma$ 変調器によって生成されたマルチレベルの信号でMCMを駆動すると、MCMの各コイルの製造誤差による素子バラツキの影響が無視できなくなる。図3のように入力に対して出力が非線形となるため、高精度駆動の妨げとなる。この素子バラツキの影響を低減させる信号処理としてデジタル直接駆動技術はNSDEM[6]を搭載している。NSDEMはループフィルタとソート回路、セクタ回路で構成されている。各相に搭載された複数の素子の使用回数をループフィルタでカウントし、ソート回路を用いて駆動する素子を使用回数の少ない順番に並び替える。並び替えられた順番からセクタ回路によって駆動するコイルを選択する。デジタル直接駆動においてNSDEMは各相に搭載されており、各相の3つのコイルの使用回数が均一になるように駆動コイルを選択することでバラツキの影響を低減させる信号処理である。

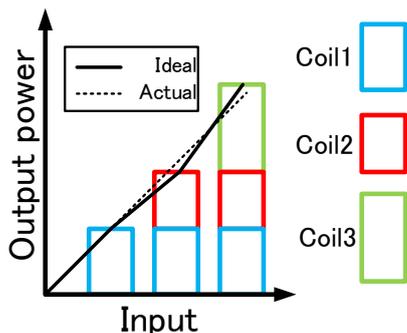


図3 素子バラツキによる出力の非線形性

### (4) Dynamic Three-phase Multi-coil-motor Matching (DTMM)

前述したNSDEMは、素子バラツキの影響を低減するために各コイルの使用回数を均一化することが目的であった。そこで使用回数の均一化を早めるために1つの相の電流が生成する磁界を、他の2つの相の逆向きの電流が生成する磁界で代用する信号処理であるDTMMが提案[4][5]されている。例えば図4(a)のようにU相のコイルに正の電流を流した際に生じる磁界と、図4(b)の様にV相とW相のコイルに負の電流を流した際に生じる合成磁界の向きと大きさは理想的には等しくなる。そのためU相成分を表す組み合わせは従来のNSDEMのU1,U2,U3の3通りに加えて図4(b)の様な2相を用いる組み合わせを加えると、12通り存在する。これはU相だけでなく、V相とW相も同様である。 $\Delta\Sigma$ 変調器から受け取った信号を基に各相がこの12通りの中から使用回数の少ないコイルを使用する組み合わせで駆動することで、図5のようにバラツキの平均を出力することになる。その結果トルクむらを含む周波数スペクトラムが低減[4]し、回転むらの低減[5]が実現できる。

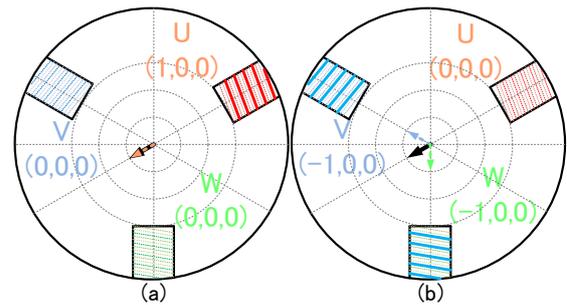


図4 U相成分を表す合成磁界

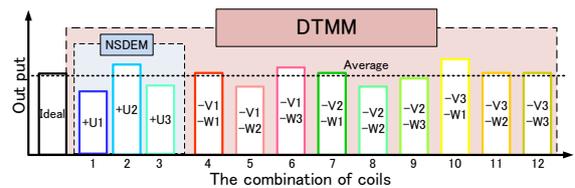


図5 バラツキの平均化

### (5) デジタル直接駆動技術

デジタル直接駆動技術の全体図を以下に示す。

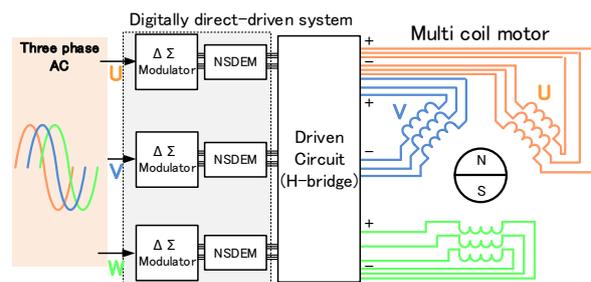


図6 デジタル直接駆動技術によるMCM駆動



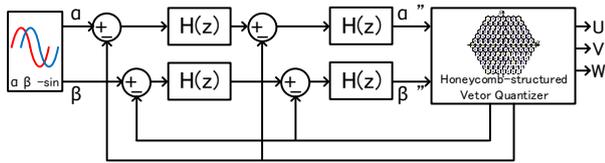


図8 HSDSM 構成図

HSVDSM では2次元平面座標に対応する $\alpha$ と $\beta$ の2相信号を3相3レベルに量子化する．基本的な構成は一般的な $\Delta\Sigma$ 変調器と同様である．量子化器からフィードバックした量子化値との差分をとることで量子化誤差を算出する．量子化誤差を複数のループフィルタに通すことでノイズシェーピングを行う．ループフィルタから出力された $\alpha''$ と $\beta''$ をハニカム構造型ベクトル量子化器に入力する．ベクトル量子化器は $\alpha''$ と $\beta''$ が指し示すベクトルの値に最も近い量子化値 $V_0\sim V_{126}$ へと量子化する．例えば図9の場合 $\alpha''$ と $\beta''$ が指し示す合成ベクトルは $V_{30}$ として量子化される．

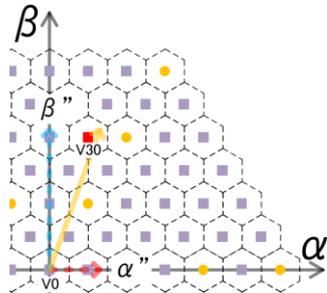


図9 ベクトル量子化の例 ( $V_{30}$ )

あらかじめ用意されているテーブル(表1)を参考に3相3レベルの信号が出力される．またこの時 $V_{30}$ の $\alpha$ 軸と $\beta$ 軸の値を量子化値としてフィードバックする．このようにMCMをフルブリッジ回路で駆動することを想定して2次元平面座標に対応した2相の信号を適切に量子化することで，3相独立したマルチレベル $\Delta\Sigma$ 変調器と比べて量子化誤差を大きく減らすことができる．その結果HSVDSMをMCM駆動に使用することで，トルクむらの原因となる量子化誤差が大きく低減され，更なる高精度駆動が可能となる．

しかしHSVDSMはマルチレベルの信号を出力するため，駆動する各コイルの素子バラツキの影響により信号特性が劣化してしまう．この素子バラツキの問題は従来のマルチレベル $\Delta\Sigma$ 変調器でも想定されており，前述したNSDEMを用いる事で対策をしている．しかしHSVDSMは従来の $\Delta\Sigma$ 変調器と違い，2次元平面座標系に対して量子化を行っているため，各相を独立して1次元に対してシャッフリングを行うNSDEMを後段に搭載してもバラツキの影響を低減することができない．そこで全ての相を含めて使用するコイルをシャッフリングする新しい信号処理を提案し，後段に接続することで素子バラツキの影響を低減させる．

## (2) Full-search Dynamic Three-phase Multi-coil-motor Matching (FDTMM)

HSVDSMを用いた量子化誤差を低減した高精度MCM駆動を実現するために，各コイルの素子バラツキの影響を低減する必要がある．そこで前述したDTMMを基に，2次元平面座標系に対して使用回数の少ないコイルを最も多く使用している駆動コイルの組み合わせを探索するFull-search Dynamic Three-phase Multi-coil-motor Matching (FDTMM)を提案する．

これは前述したDTMMのように，ある合成磁界を生成する組み合わせが複数存在することに注目した信号処理である．例えばハニカム構造型ベクトル量子化器によって生成される $V_{30}$ に注目する．表1より $V_{30}$ を生成するために駆動するコイルの組み合わせは

$$V_{30\_1} = \{+V_1, -W_1, -W_2, -W_3\} \quad (1)$$

である．式(1)の組み合わせは， $V_{30}$ を生成する際に駆動するコイルがなるべく少なくなるような組み合わせである．この他にも前述したDTMMのように異なる相のコイルを使用する組み合わせや，磁界を打ち消すような組み合わせなどを含めると $V_{30}$ を再現する組み合わせは複数存在する．その一部を下記に示す．

$$V_{30\_2} = \{+U_1, +U_2, +V_1, +V_2, +V_3 - W_1\} \quad (2)$$

$$V_{30\_3} = \{-U_1, +U_2, +V_1, -W_1, -W_2, -W_3\} \quad (3)$$

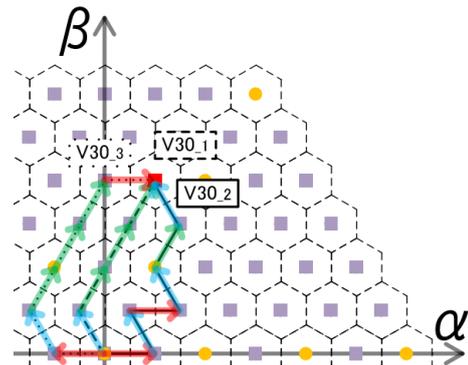


図10  $V_{30}$ を再現するコイルの組み合わせの例

式(2)，(3)と図10に示したように， $V_{30\_2}$ ， $V_{30\_3}$ は $V_{30\_1}$ と比べて駆動するコイルの数や相が違う．しかし最終的な合成磁界は3種類とも同じ向き，大きさの合成磁界を生成する．このように3値で駆動するMCMは一つの合成磁界を再現するのに，複数の駆動コイルの組み合わせが存在する．これは $V_{30}$ だけでなく $V_0\sim V_{126}$ いずれも同様である．

FDTMMの構成を図11に示す．各コイルが正か負で使用されると，それぞれに対応したループフィルタが加算される．Max moduleでは各ループフィルタから受け取った使用回数の値の中で，最大の値をSelector moduleに送る．さらに，Selector moduleは前段のハニカム構造型空間ベクトル変調器(HSDSM)から再現する合成磁界を表す $V_x$  ( $x=0\sim 126$ )の信号を受け取る．



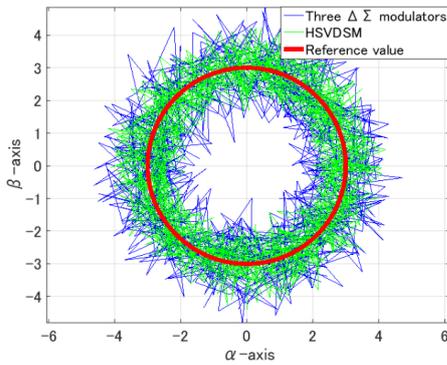


図 13 2次のループフィルタ出力値 ( $\alpha''$ ,  $\beta''$ )

次にMCMモデルから算出されたトルクの周波数解析を行う。なおこのMCMモデルは表2に示したようにコイルの素子バラツキを考慮してある。マルチレベルのPWM変調、 $\Delta\Sigma$ 変調器、 $\Delta\Sigma$ 変調器+NSDEM、HSVDSM、HSVDSM+FDTMMの5つの駆動方式を比較した。PWM変調は3レベルに分割された有限のデジタルPWMである。キャリア周波数を4[kHz]とし、パルス幅は100分割である。 $\Delta\Sigma$ 変調器、NSDEM、HSVDSM、FDTMMのクロック周波数は400[kHz]とした。負荷はMCMの定格負荷である0.12[Nm]とし、回転速度は120[rpm]で制御をかけずに同期で回転させた。結果を図14、その拡大図を図15に示す。

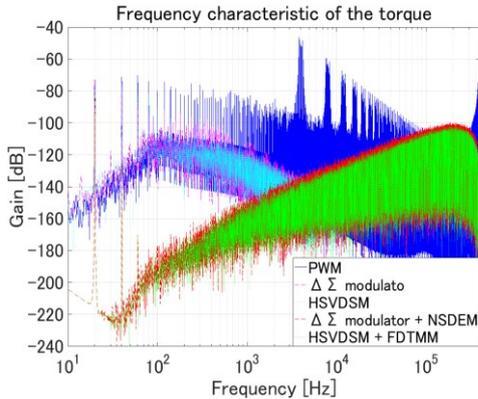


図 14 トルクの周波数解析 (シミュレーション)

青：PWM 紫： $\Delta\Sigma$ 変調器 水：HSVDSM  
赤： $\Delta\Sigma$ 変調器+NSDEM 緑：HSVDSM+FDTMM

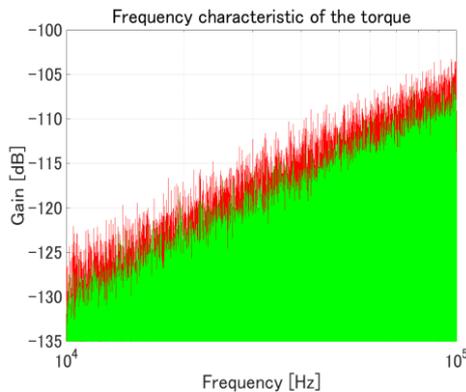


図 15 図 14の拡大図 (10 [kHz] ~ 100 [kHz])

赤： $\Delta\Sigma$ 変調器+NSDEM 緑：HSVDSM+FDTMM

トルクは直流成分のみであることが望ましい。直流成分以外の周波数帯に存在するスペクトラムが大きくなるほど、トルクむらが大きくなってしまふ。素子バラツキに対して対策を施していないPWM変調、 $\Delta\Sigma$ 変調器、HSVDSMは低周波においてコイルの素子バラツキの影響からノイズフロアが上昇していることが確認できる。これに対して $\Delta\Sigma$ 変調器+NSDEMとHSVDSM+FDTMMは駆動コイルをシャッフリングし使用回数の少ないコイルを優先的に使用することでコイルの素子バラツキに対してノイズシェーピングをかけている。この二つの方式を比較すると提案手法であるHSVDSM+FDTMMの方が図15より全体的に約6[dB]スペクトラムが低減されていることが確認できる。これは提案手法のベクトル量子化によって量子化誤差の影響が低減されたことが大きな要因である。

## 5. 実測

提案手法であるHSVDSMとFDTMMをFPGAボードで実装し、実物のMCMを駆動する。測定条件はシミュレーションと同様で表2の通りである。また測定環境を図16に示す。

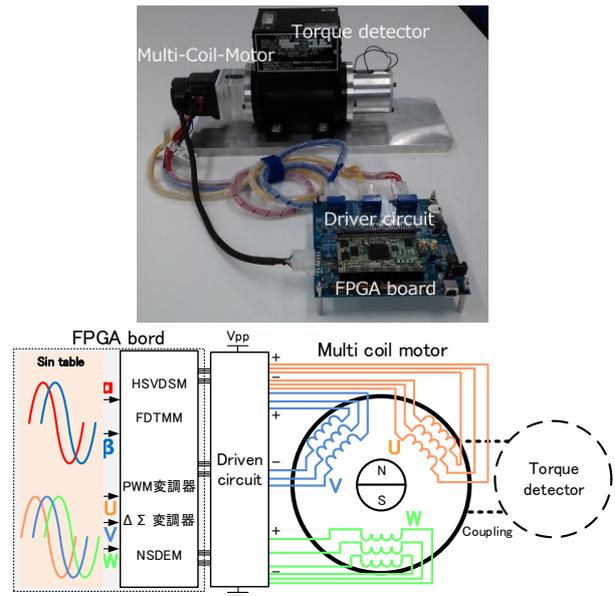


図 16 実測環境 上：写真 下：イラスト

シミュレーションと同様にPWM変調、 $\Delta\Sigma$ 変調器、 $\Delta\Sigma$ 変調器+NSDEM、HSVDSM、HSVDSM+FDTMMの5つの駆動方式について測定を行う。トルクメータからMCMのトルクを測定し、FFT解析することで周波数特性の比較を行う。トルクメータの測定可能な周波数帯域が低いため、今回の測定ではPWM変調器はキャリア周波数を1[Hz]とし、パルス幅を10分割とした。 $\Delta\Sigma$ 変調器、NSDEM、HSVDSM、FDTMMのクロック周波数は10[Hz]に設定した。モータの駆動周波数は0.1[Hz]とし、回転速度は1.2[rpm]と信号処理、モータの回転の両方とも非常に低速駆動での測定となった。モータの回転が低速で不安定な

め、トルクメータの負荷を最大にし、軸を固定してトルクの測定を行った。結果を図 1 7 に示す。

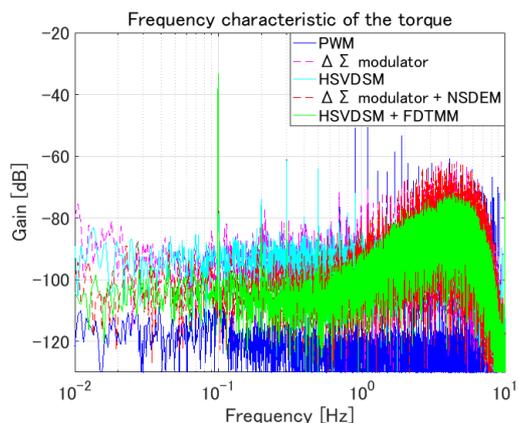


図 1 7 トルクの周波数解析 (実測)

青：PWM 紫： $\Delta \Sigma$ 変調器 水：HSVDSM

赤： $\Delta \Sigma$ 変調器+NSDEM 緑：HSVDSM+FDTMM

軸を固定しているためロータが回転せず、トルクが直流ではなく交流として表れる。そのため駆動周波数である 0.1 [Hz] が回転磁界のトルクとしてスペクトラムに表れている。またクロック周波数 10 [Hz] に対してノイズシェーピング特性が確認できる。この時 HSVDSM の方が  $\Delta \Sigma$  変調器に比べて量子化誤差の影響が低減されているため、ノイズシェーピングの頂点が低減している。シミュレーションと同様に  $\Delta \Sigma$  変調器と HSVDSM はバラツキの影響によって駆動周波数 0.1 [Hz] 付近のノイズフロアが上昇しているが、NSDEM や FDTMM を搭載することで素子バラツキの影響が低減され、ノイズフロアも低減していることが確認できる。PWM 変調と比べると、他の駆動方式のノイズフロアが上昇している。これは低速で信号処理を行ってモータを駆動したため、コイルのヒステリシス特性により相互変調歪が現れているためだと考えられる。PWM 変調は PWM 周期に対してのみスペクトラムが現れるため相互変調歪は直流成分のみに現れる。しかし  $\Delta \Sigma$  変調器等のノイズシェーピング特性をもつ信号処理においてはスペクトラムが連続して多数現れるため、これら全ての相互変調歪が広い帯域で現れているのだと考えられる。トルクメータで測定をするため信号処理を低速で行っているため、本来これらの駆動方式はどれも高速クロックで動作することが想定されている。そのため実働には大きな影響はないと考えられる。図 1 7 より、トルクむらの少ない高精度なモータを評価するには、回転磁界を示す 0.1 [Hz] 帯以外の周波数成分は少ないことを示す必要がある。そこで駆動周波数 0.1 [Hz] に対して 3 次、5 次、7 次、9 次、11 次、13 次の高調波を足し合わせた THD 特性を比較する。結果を表 3 に示す。表 3 より  $\Delta \Sigma$  変調器と NSDEM を組み合わせた従来方式の THD 特性に対して、提案手法である HSVDSM と FDTMM を組み合わせた THD 特性が大きく改善されている事が確認できる。

表 3 THD 特性の比較

	THD
PWM	0.2179
$\Delta \Sigma$ 変調器	0.0736
$\Delta \Sigma$ 変調器+NSDEM	0.0078
HSVDSM	0.0836
HSVDSM+FDTMM	0.0046

## 6. 結論

本論文では更なる高精度駆動を目的とし、量子化誤差を低減する HSVDSM と、製造誤差による素子バラツキの影響を低減させる FDTMM を提案した。これらをシミュレーション、および実測からトルクむらの成分が減少していることを確認した。これは HSVDSM が従来の  $\Delta \Sigma$  変調器と比較してトルクに直結する 2 次元平面座標系に対して適切に量子化ができているためである。また提案手法はセンサなどのフィードバック信号を用いておらず、バラツキが未知の場合でもこの適応できることも大きなメリットである。これらの結果から、本提案手法を精密さの要求される加工機などに適応することで、高品質な製品の製造が可能となる。

今後は要求される精密さに適してコイルの使用個数を増減することで精度と効率の両立を目指したい。

謝辞：本研究を行うにあたり、多くのご指導と助言をして頂いた安田彰教授、研究環境の維持管理を行ってくださった吉野理貴様、研究への様々なアドバイスをしてくださった西勝聡様、同研究室の皆様へ深く感謝いたします。また、この場をお借りしまして多大なる協力を頂いた科学技術振興事業団 (JST) 様、株式会社オリエンタルモータ様に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) Ishikawa, T. et al. :A Highly Directional Speaker with Amplitude-Phase Control Using a Digitally Direct-Driven System, 2014 IEEE International Conference on Consumer Electronics, pp.135-136, 2014
- 2) 原島昇：デジタル直接駆動モータシステムの大出力化に関する研究，法政大学大学院理工学・工学研究科紀要，Vol55, 2014
- 3) Motoyama, Y. et al. :Improvement of voltage resolution of a motor driver circuit by a multi-coil drive, Future Energy Electronics Conference, 2015 IEEE 2nd International, pp.1-5, 2015
- 4) Matsuo, H. Motoyama, Y. Yasuda, A. :Realization of High Precision Multi-coils-motor, Future Energy Electronics Conference, 2015 IEEE 2nd International, pp.1-5, 2015
- 5) Matsuo, H. et al. :Driving a High-Precision Multi-coils-motor by Reducing an Influence of Manufacturing Variations, Journal of Energy and Power

Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 48-55, 2017

- 6) Yasuda, A. Tanimoto, H. Iida, T. :A Third-order Modulator using second-order nose-shaping dynamic element matching, IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 33, pp. 1879-1886, 1998
- 7) Jacob, B. Baiju, M. R. :Space-Vector-Quantized Dithered Sigma Delta Modulator for Reducing the Harmonic Noise in Multilevel Converters, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 4 pp. 2064-2072, 2014

8) 本山佳樹, et al. : Reduction of current harmonics by Space Vector PDM using multicoils motor, 電気学会, モータドライブ/家電・民生合同研究会, 電気学会研究会資料, MD 2016(40・42-54), pp. 1-4, 2016

9) MathWorks:Simulink,

<http://jp.mathworks.com/products/simulink/>

10) 松尾遥, et al. : マルチコイルモータのモデルに関する一提案, 電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集(CD-ROM), 2015