

データレコーダ Genesis HighSpeed とレゾルバを使用した回転角計測

データレコーダ Genesis HighSpeed とレゾルバを使用した回転角計測

概要

レゾルバは、モータ制御アルゴリズムに必要なロータ角度位置を計測するために、同期モータドライブで常時使用されるセンサです。堅牢なため、レゾルバは、自動車や航空宇宙用途など機械的なストレスや振動にさらされる過酷な環境で一般的に使用されます。計測位置は、通常、信号復調器、電圧制御発振器、およびトラッキングループなどの複数のブロックを1つのチップに実装したレゾルバ/デジタル変換器によって取得されます。この文献は、追加のハードウェアを必要とせず、HBM Genesis HighSpeed データレコーダの高速電圧入力チャンネル及び、レゾルバによって回転角を計測する方法について解説します。

1. レゾルバのハードウェア構成と出力信号

レゾルバは、絶対回転角センサとして使用される小型電子機器です。ステータは、磁気軸が直交する2つの電磁コイルからなり、ロータは1つの電磁コイルで構成されています。ほとんどの場合、ステータとロータの電磁コイルの極対数は1 ($p=1$)に等しくなっています。したがって、本文では、機械的なロータ位置は、電気的なロータ位置と等しいと考えます。

ロータには、[2,10] kHz の範囲の周波数（印加電圧周波数 f_{ecc} と呼ばれる）の正弦波電圧が供給され。ブラシレスレゾルバは、図 1 および図 2 に示すように、回転トランスを使用してロータに電力を供給します。

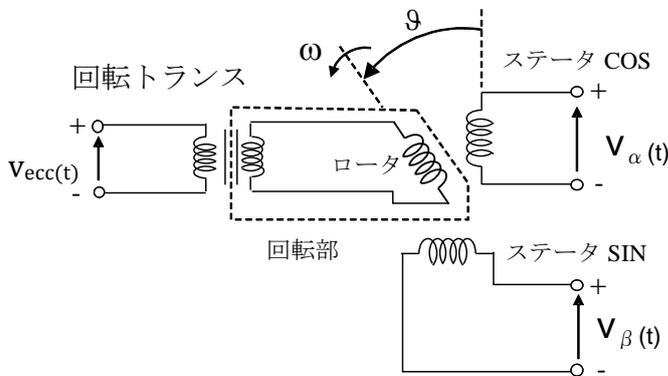


Fig. 1: ロータ電源用の回転トランスを備えたブラシレスレゾルバの電気回路図



Fig. 2: ブラシレスレゾルバのロータ(左)とステータ(右)

回転トランスの一次側には、(1)式であらわされる振幅 V_{ecc} 、及び周波数 f_{ecc} の印加電圧が供給されます。

$$v_{ecc}(t) = V_{ecc} \cdot \sin(\omega_{ecc} \cdot t) \quad (1)$$

ここで、 $\omega_{ecc} = 2 \cdot \pi \cdot f_{ecc}$ は印加電圧の信号波形を示します。

ロータコイルとステータコイル間のカップリングは、ロータ位置 θ に依存します。その結果、ステータコイルに誘起される電圧は以下であらわせます。

$$v_{\alpha}(t) = K \cdot \cos \theta \cdot \sin(\omega_{ecc} \cdot t) \quad (2)$$

$$v_{\beta}(t) = K \cdot \sin \theta \cdot \sin(\omega_{ecc} \cdot t) \quad (3)$$

ここでの K はステータとロータの間のカップリング係数とコイルの巻数比に依存します。

(2)式、(3)式より、ステータコイルの出力電圧は、ロータ位置に関する情報を含みます。ステータ出力電圧を Fig. 3 に示します。一定の回転速度が $\omega_m = 2 \cdot \pi \cdot 50$ (rad/s) で、レゾルバは 1 kHz で印加されています。

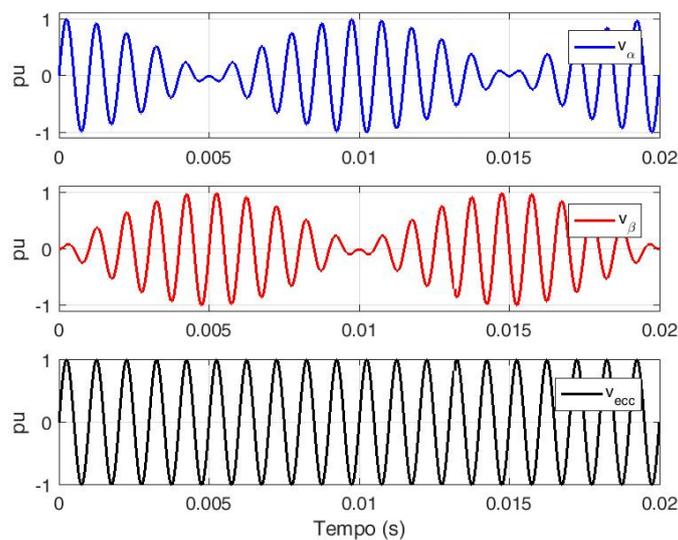


Fig. 3: 安定時の回転速度が $\omega_m = 2 \cdot \pi \cdot 50$ (rad/s) でレゾルバが 1 kHz で印加されている例.

この α, β 電圧は、レゾルバ印加電圧周波数で変調されたロータ位置の余弦値および正弦値です。したがって、次章で説明するように、印加電圧周波数を除去するために復調が必要です。

2. レゾルバからの信号から回転角 (シミュレーション)

シミュレーションの条件として、印加電圧は V_{ecc} に、周波数は 10kHz に設定されています。回転速度を 3000rpm でのレゾルバの出力を Fig. 4 に示します。

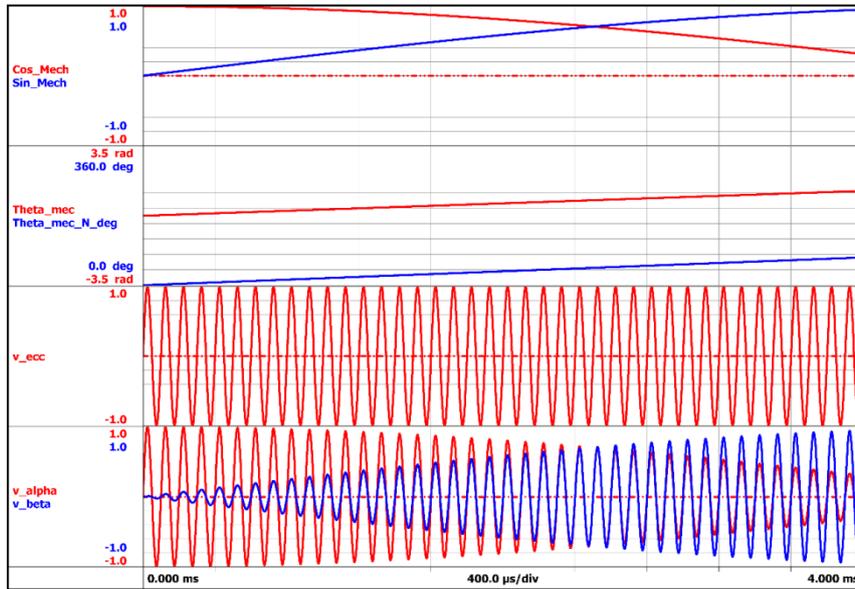


Fig. 4: 3000rpm での定速回転運転のシミュレーション結果 (ズーム) 上から：ロータの位置の余弦値、正弦値、ロータの回転角(rad, deg)、印加電圧、 α β 演算値

前述したように、適切な復調によってロータの位置を算出することができます。そのためには、 α β 出力値に (4),(5)の印加電圧をかけます。:

$$v_{\alpha, \text{demod}}(t) = V_{ecc} \cdot K \cdot \cos \vartheta \cdot [\sin(\omega_{ecc} \cdot t)]^2 \quad (4)$$

$$v_{\beta, \text{demod}}(t) = V_{ecc} \cdot K \cdot \sin \vartheta \cdot [\sin(\omega_{ecc} \cdot t)]^2 \quad (5)$$

復調は、印加電圧 $V_{\alpha, \text{demod}}$ と $V_{\beta, \text{demod}}$ の移動平均値により計算されます。印加電圧周期の半周期 ($0.5T = 0.5/F_{ecc}$)を使用する代わりにデータレコーダ Genesis の強力なサイクル検出機能を使用して演算します。

$$\cos_{\text{demod}}(t) = \text{cycle mean}[v_{\alpha, \text{demod}}(t)]_{0.5\text{cycle}_{ecc}} = K' \cdot \cos \vartheta \quad (6)$$

$$\sin_{\text{demod}}(t) = \text{cycle mean}[v_{\beta, \text{demod}}(t)]_{0.5\text{cycle}_{ecc}} = K' \cdot \sin \vartheta \quad (7)$$

$\cos_{\text{demod}}(t)$ と $\sin_{\text{demod}}(t)$ の振幅は同値ではないですが、係数 K' は同値になります。したがって、電気角で結果を直接提供する Perception 関数の空間ベクトル逆変換によって、ロータ位置を容易に得ることができます。上記、空間ベクトル逆変換を使った方法での Perception によるシミュレーション結果を Fig.6~7 に示します。

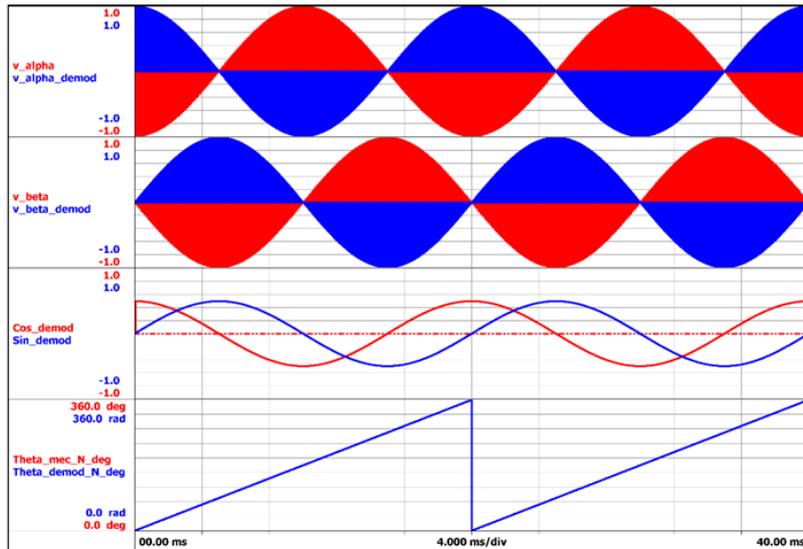


Fig. 5: 3000rpm での定速回転運転のシミュレーション結果 上から： v_α 、 v_β 演算値、 V_α demod, V_β demod, \cos_{demod} , \sin_{demod} , 実回転角および演算での回転角

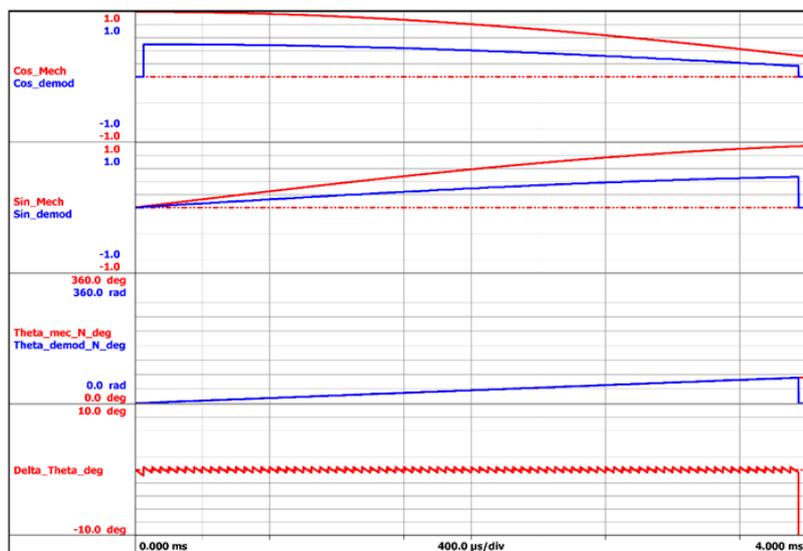


Fig.6: 図 8 : 3000rpm (ズーム) での定常運転のシミュレーション。上から： \cos_{demod} 、 \sin_{demod} 、実回転角と演算での回転角、実回転角と演算での回転角との間の誤差

実回転角と演算での回転角の誤差を Fig.7 に示します。このエラーは、非常に小さい振幅値 (1° 以下) のノコギリ波です。

18000rpm の速度に対するシミュレーション結果を図 8 に示します。位置は、印加電圧周波数 (時間ベースのサンプリング) に依存する固定サンプリングレートで演算されるので、高速回転になると、演算での回転角との誤差は増加します。

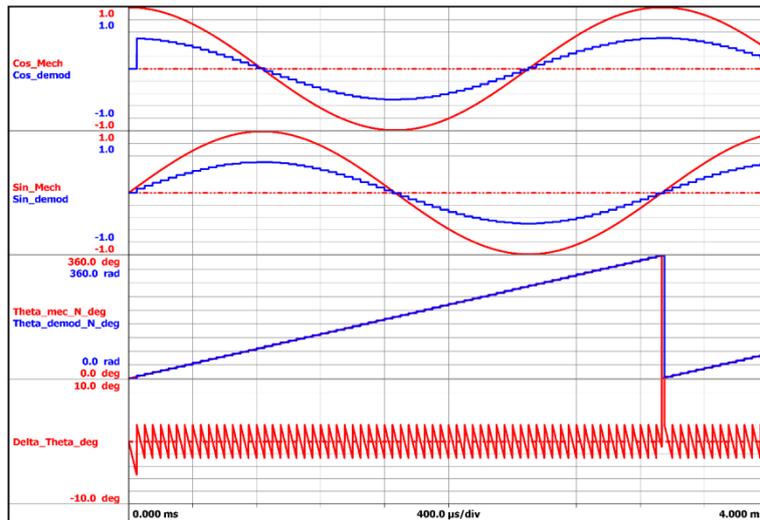


Fig.7: 18,000rpm での定速回転運転のシミュレーション。上から： \cos_{demod} 、 \sin_{demod} 、実回転角と演算での回転角、その誤差

オフセットの影響は、データレコーダによって計算される d, q 変換量の誤差要因になる可能性があるため、非常に重要です。その影響を軽減するために、復調された正弦および余弦関数(6)および(7)にローパスフィルタ(LPF)を通します。本シミュレーションでは、カットオフ周波数が 1kHz の 2 次ベッセル LPF が採用されています。

$$\cos_{\text{demod}2}(t) = LPF[\cos_{\text{demod}}(t)]|_{\text{Bessel}, 1\text{kHz}} \quad (8)$$

$$\sin_{\text{demod}2}(t) = LPF[\sin_{\text{demod}}(t)]|_{\text{Bessel}, 1\text{kHz}} \quad (9)$$

LPF は Fig.9 でわかるように、明らかに位相遅延を起こします。

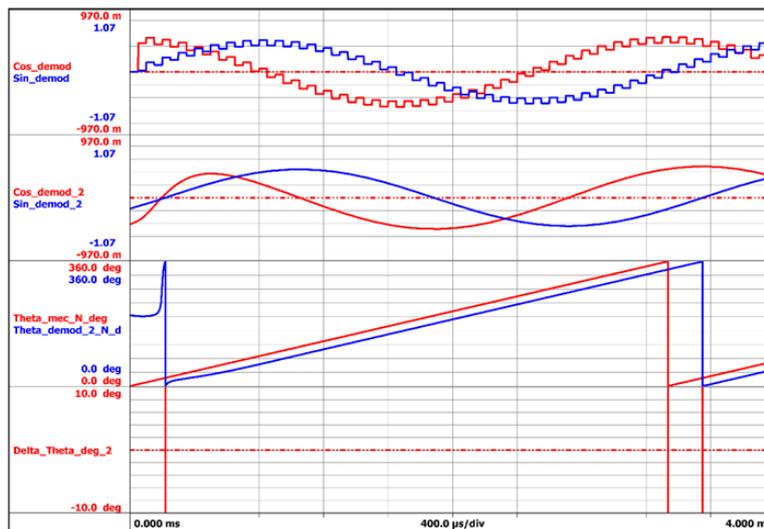


Fig.8: α チャンネルの+7%オフセットと、 β チャンネル上の+7%のオフセット条件において、18000 rpm の定速運転シミュレーション。上から： \cos_{demod} 、 \sin_{demod} 、フィルタされた $\cos_{\text{demod}2}$ 、 $\sin_{\text{demod}2}$ 、実ロータ回転角(赤色)、およびフィルタされた正弦値および余弦値から得られる新しい回転角(青色)

位相遅れは、以下の近似式を用いて補償することができます。

$$\vartheta_{delay} = \left(\frac{1}{\omega_{LPF}} + 0.5 \frac{1}{f_{ecc}} + \tau \right) \cdot \omega_{mec} \quad (10)$$

ここで、 ω_{LPF} (rad/s)は LPF カットオフ周波数、 ω_{mec} (rad/s)はシミュレーションによって定義される 1 サイクルにわたる平均値として計算される回転速度、 τ は追加補償時間 $6 \mu\text{s}$ 。

Fig.9 に示すように、(10)で提案された補償が有効であり、実角度とシミュレーションによる角度間との誤差は、非常に小さい振幅 (0.2°) になります。

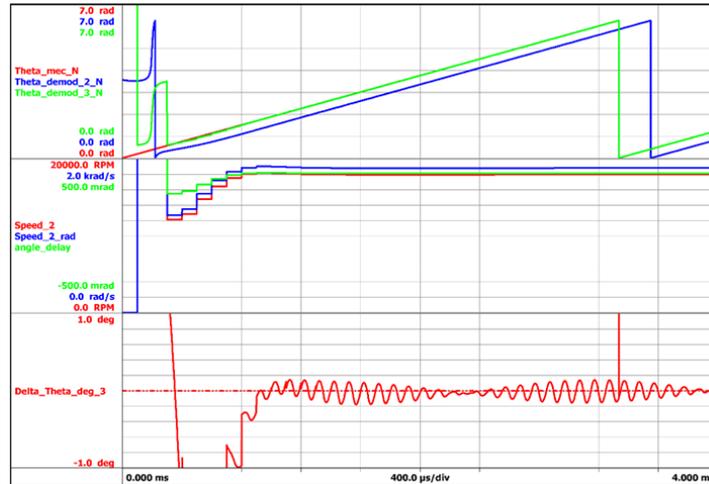


Fig.9: α チャンネルの+7%オフセットと、 β チャンネル上の+7%のオフセット条件において、18000 rpm における定速回転速度のシミュレーション結果 上から：実際のロータ回転角(赤)、位相補正なしで演算されたロータ回転角(青色)、位相補正付きの新しい回転角(緑)、計測された速度(rad/s と rpm)および位相遅延(緑)、位相補正で得られた実回転角とシミュレーション結果の回転角間の誤差

3. 実験結果

上述の方法は実際に、図 16 に示すように、データレコーダ GEN7t と LTN レゾルバを用意し実験にて確認しました。

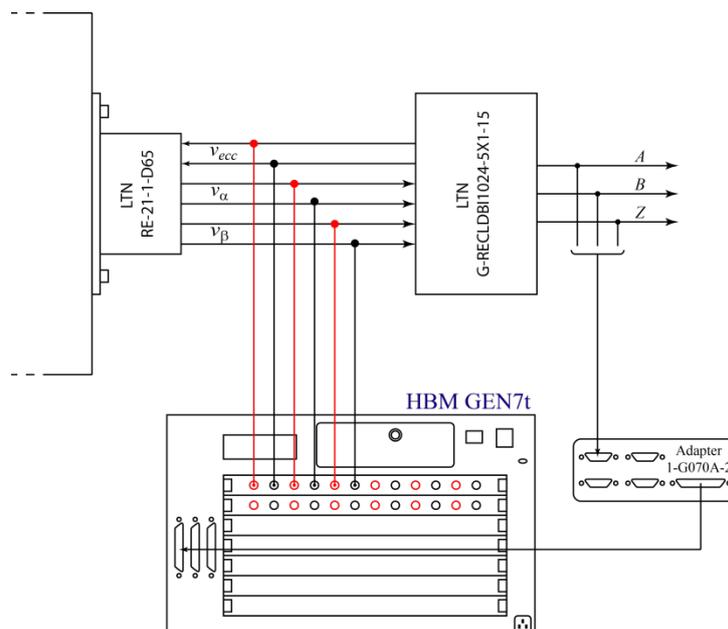


Fig. 10: データレコーダ GEN7t を使用したレゾルバテストの配線図

印加電圧 V_{ecc} 及びレゾルバ出力 v_{α} v_{β} は、高速取得ボード GN610B の 3 つの電圧チャンネル（18 ビット分解能、サンプルレート 2MS/s、精度 0.1%）から取り込まれます。レゾルバ信号は、3 つのエンコーダ信号（A、B、Z）を生成するレゾルバ/エンコーダ変換ボードに適用しています。

この 3 つのエンコーダ信号はデータレコーダの 1 つのデジタルポートを使用して取り込まれています。エンコーダ信号は、回転角演算結果の評価のリファレンスとして使用されました。

実験の回転速度は低速で、結果を Fig.11-12 に示します。 .

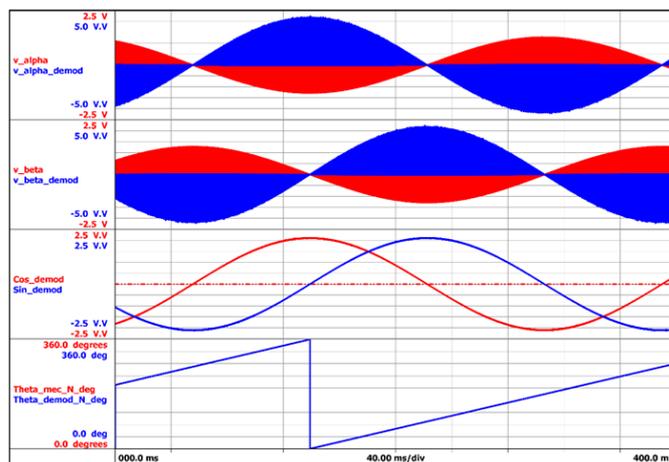


Fig.11: 実験結果 上から： v_{α} (赤), v_{α} demod (青), v_{β} (赤), v_{β} demod(青)、復調された信号 $\text{COS}_{\text{demod}}$ 、 $\text{SIN}_{\text{demod}}$ 、エンコーダ回転角(赤)と演算での回転角(青)

エンコーダからの回転角と演算から回転角との間の誤差がはっきりと認識できます。このエラーはおそらく、レゾルバ出力とエンコーダ信号を処理する回路上での遅延によって生成されるものと理解します。 .

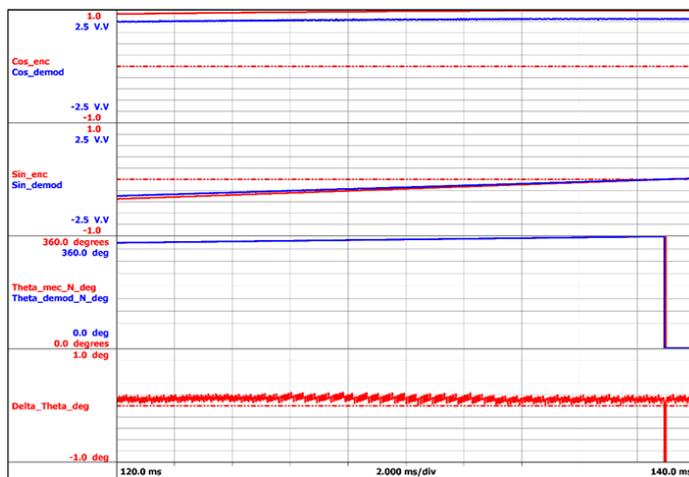


Fig. 12: 実験結果 上から：エンコーダ回転角余弦値(赤)、復調余弦値 $\text{COS}_{\text{demod}}$ (青)、エンコーダ回転角の正弦値(赤)、復調正弦値 $\text{sin}_{\text{demod}}$ (青)、エンコーダ回転角(赤)と演算での回転角(青色)、エンコーダ回転角と演算での回転角間の誤差実験結果

ローパスフィルタは、オフセットと高周波ノイズによる誤差を補正するため復調された余弦値と正弦値 (\cos_{demod} , \sin_{demod}) に適用することができます。図 13 は、フィルタおよび位相補正を用いて得られた実験結果を示します。

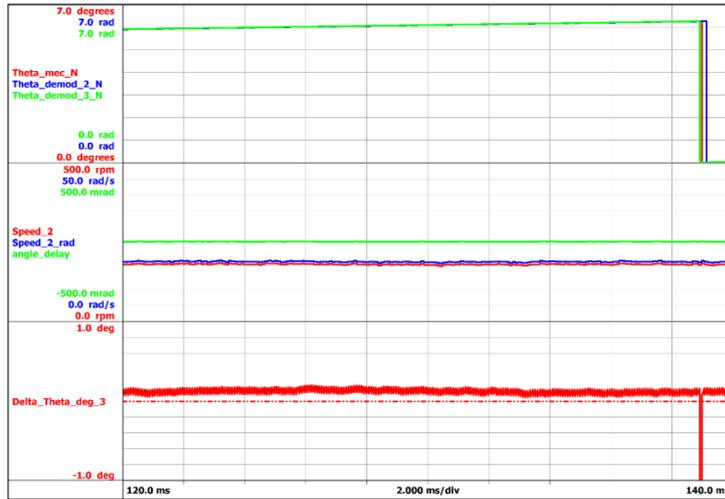


Fig. 13: 実験結果-上から：実際のロータ回転角(赤)、位相補正なしで演算されたロータ回転角（青色）、位相補正付きの新しい回転角（緑）、計測された速度（rad/s と rpm）および角度遅延（緑）、位相補正で得られた新しい回転角と実回転角間の誤差

位置誤差の拡大図を Fig.14 に示します。フィルタリングによって得られる誤差は、印加電圧 V_{ecc} のサイクル検出によって生成されるサージパルスを完全に除去できています。フィルタリングの後に得られるノコギリ波形の誤差は、エンコーダ量子化の影響によってのみ生成されています。

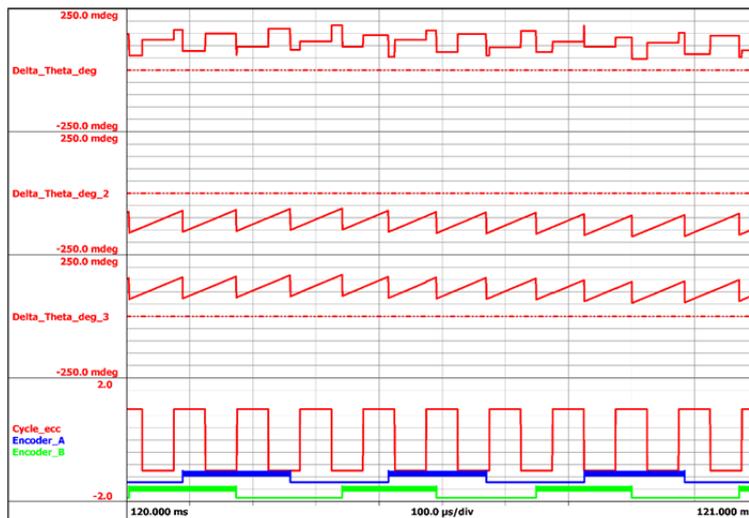


Fig.14: 実験結果 上から: エンコーダ回転角と演算での回転角間の誤差、エンコーダ回転角と位相補償なしの新しいエンコーダ回転角との誤差、エンコーダ回転角と位相補償付きの新しいエンコーダ回転角間の誤差、印加電圧信号の周期検出とエンコーダチャンネル A、B

4. 結論

この本資料では、適切な復調方法を使用してレゾルバで回転角を計測する方法を紹介しました。レゾルバ出力信号を高速データアキュイジションシステムで取り込み、復調された正弦および余弦信号にローパスフィルタを適用して、オフセットの影響を排除し、サンプリング速度に応じた適切な位相遅延を補償することができました。