

高精度トルク計測システム



Dr. Sven Kuhn (スベン・クーン博士)
Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
Im Tiefen See 45, D-64293 Darmstadt (ドイツ、ダルムシュタット)

1 はじめに

環境ガイドラインに適したエコドライブというコンセプトを追求すると、常に試験装置に対する要求の増加を伴うこととなる。エンジンとトランスミッションの組み合わせを設計し最適化する作業では、駆動軸を対象とした極めて動的で分解能の高いトルク計測が必要不可欠となる。ストレインゲージを備えた最新のトルク変換器は、再現性の面で非常に優れた性能を示す。トルク計測システムの全体的な精度は、基本的に機械的擾乱変数および未補正の温度と湿度が及ぼす影響によって決まる。計測体や補正不可能なストレインゲージアプリケーションに起因する総合誤差としての分解能限界は、回転式トルク変換器、DC アンプ、アナログ信号処理、および周波数アナログ信号転送などで現在使用されている電子機器の計測能力の可能性を超えている。

計測チェーンを分析すると、温度勾配および非直線性温度係数により、熱電圧が擾乱量に誘発されたかなり大きな計測信号エラーを生み出すことが判明するが、こうした信号誤差は現在に至るまで補正されていない。変換器に対する過負荷やダメージも、付加的な計測値誤差の結果となる。

本論文の主題は、搬送波増幅器を使用した非接触トルク計測システム T12 の開発である (図 1)。温度の計測信号に対する影響は計測ブリッジの高レベルな対称性によって最適化され、それでも残っている温度の影響はさらにデジタル補償によって補完される。信号をデジタルで処理して転送することにより、回転軸上においても、非回転式トルク変換器が持つ現行の高精度を実現することが可能となる。

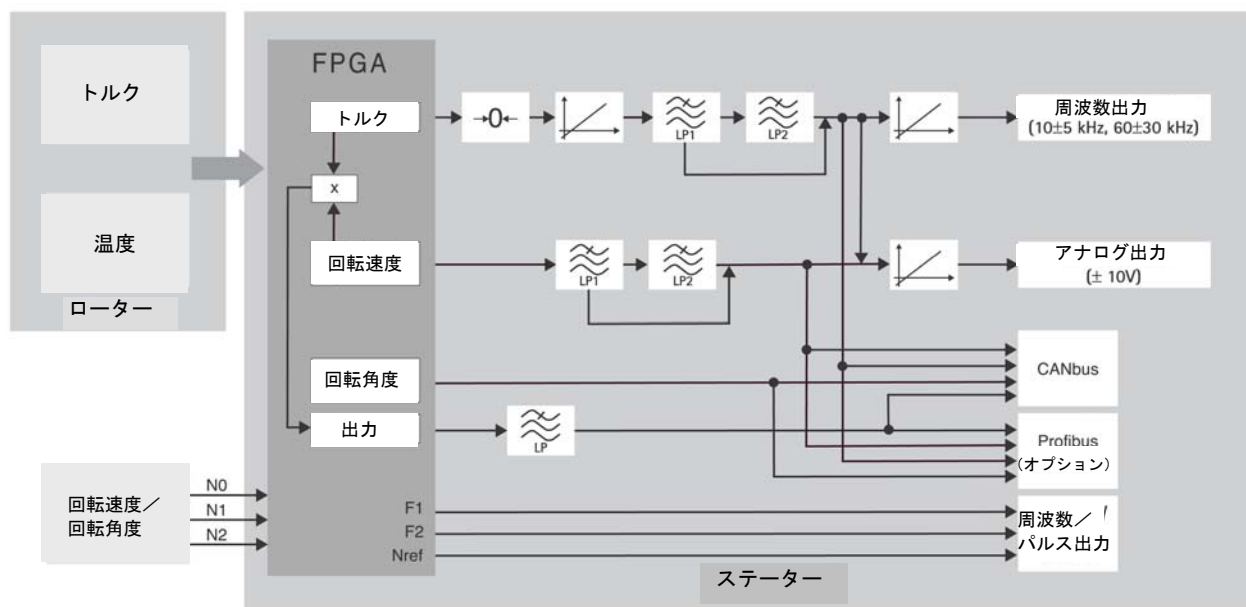


図 1: トルクフランジ T12 の信号フロー図

2 トルク変換器の構成

高精度のトルク計測では、精度クラス 0.03 の変換器がトランスファ標準器として使用される。こうした変換器は、半径方向または軸方向のシヤーの原則にしたがって作動する計測体であり、抵抗ストレインゲージの計測ブリッジにおける抵抗の変化によってトルクのマッピングを行う [1]。ブリッジ回路内のストレインゲージは、ゼロ信号およびスパンに対する温度効果が受動的に補正されるような配列になっている。こうしたパッシブな変換器からの信号は、固定された搬送波増幅器を使用した参照計測中に評価される。このような増幅器では信号振幅は通常 1 Hz 未満に制限される。

回転軸上の計測では、非接触動力と信号の転送が必要不可欠である。こうしたアクティブな変換器には、ローター内に一次電子機器が内蔵されており、ストレインゲージブリッジの計測信号を処理し、その信号を固定部分、つまりステーターに転送している。現在までのところ、電力消費量が小さく形状も小さい DC アンプがローター内で使用されている。

3 トルク計測技術における影響量

変換器の精度は、計測信号と、背景ノイズおよび周囲環境の影響との重ね合わせによって定義される。系統的な特性と無作為特性は常に区別される (図 2)。

系統的なコンテンツは、適切な補正アルゴリズムによって、一次または二次電子機器内で修正することが可能である。無作為エラーには、未確定の信号成分がすべて含まれる。例えばフィルタリングなどの手法によって変換器の計測周波数範囲を小さくしない限り、静特性曲線の無作為エラーを低減することは不可能である。フィルターを使用した場合でも、温度および湿度の影響に起因する無作為のコンテンツを低減することはできない。こうしてトルク変換器の無作為特性が、未補正の系統的な特性と共に補正済みシステムの精度を決定する。無作為特性の特性量 u_{zn} は、十分な数の計測から得られた計測結果の変化として決定される [2]。

これ以外の計測信号エラーの原因としては、過負荷による変換器の故障がある。こうした故障はゼロ信号が間違っている場合や再校正の実施中のみ検出される。

特性エラー量の比較を可能にするため、すべての無作為エラーおよび系統的なエラーは $\vartheta_0 = 30^\circ\text{C}$ における変換器の公称信号範囲 u_N に関連づけられ、低減されたエラーとして表示される。

$$F_Z = \frac{u_Z}{u_N} \cdot 100\% \quad [1]$$

以下の各特性を検証する。

- 系統的な特性値

- 動特性
- ゼロ信号 u_0 、公称信号範囲 u_N
- 非直線性およびヒステリシス誤差 d_{lin}, h
- ゼロ信号に対する温度の影響 α_N
- ゼロ信号に対する湿度の影響 φ_N

- 無作為エラー

- トルクに起因する無作為エラー u_{zM}
- 擾乱変量に起因する無作為エラー $u_{z\vartheta}$ 、 $u_{z\varphi}$
- 背景ノイズ u_{ze}

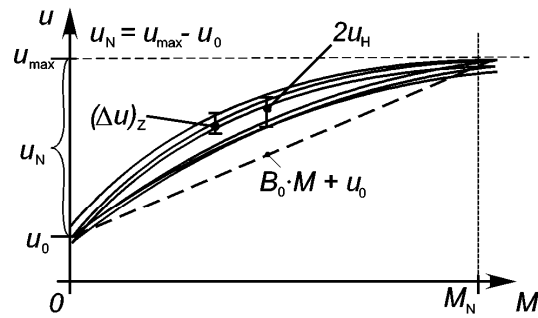
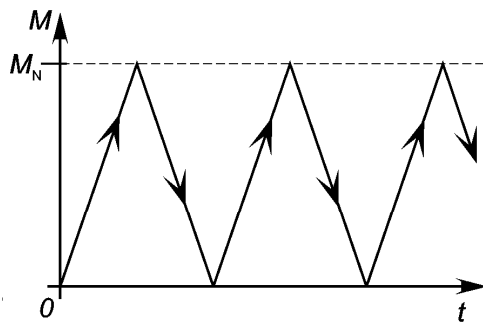
図 2 に、無作為エラーおよび系統的なエラーがトルク変換器の静特性曲線に及ぼす影響の概要を示す。

補正済みのセンサシステムが残余エラーを示す。このエラーは非補正の系統的な特性 (例えば熱電圧および湿度の影響など) および無作為エラーから構成されている。系統的な特性 u_{sys} の補正 k の程度は使用する補正の方法に依存するが、無作為の残余エラー u_Z は、無作為エラーの合計によってのみ形成される。この合計は、変換器の不確かさとして定義される。

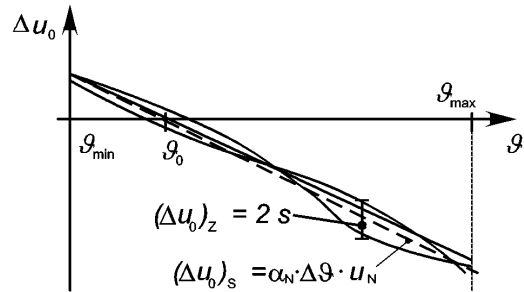
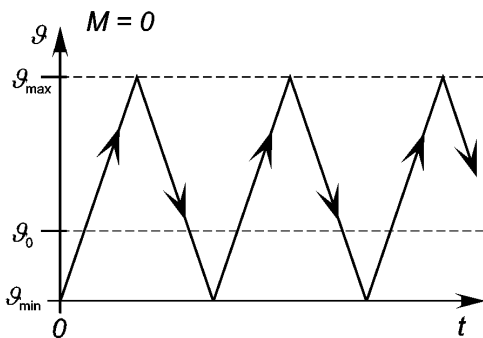
$$u_Z = \sqrt{u_{Ze}^2 + u_{ZM}^2 + u_{Zg}^2 + u_{Z\varphi}^2}$$

[2]

静特性曲線



付加的な温度の影響



温度がスパンに及ぼす影響

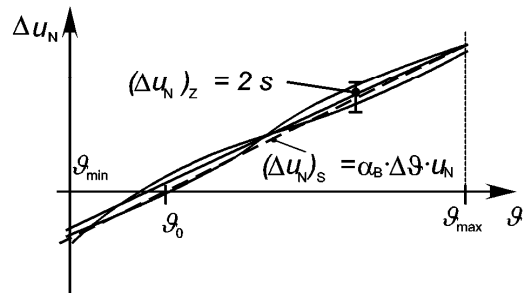
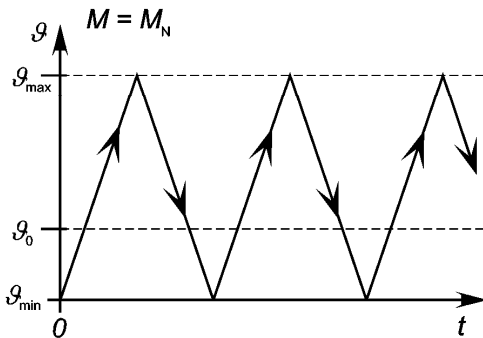


図2: 系統的なエラーおよび無作為のスタティックセンサエラー

4 エラー修正の方法

特性曲線の温度依存性および変換器の非直線性は、補正可能な特性と見なされている。これらのエラーは、ハードウェア面で適切な措置を講ずるか、またはソフトウェア的には適切なアルゴリズムによって修正が可能である。ここでは、ハードウェア的な解決策の方が望ましい。温度の影響は、計測ブリッジの対称性およびパッシブな補正手段によって大幅に低減できる。変換器温度の計測および多項式の近似によるデジタル補正は、非常に高い再現性精度を持つ温度計測に依存している。こうした理由から、この方法は残余エラーの修正のみに使用されている。湿度効果の作用は、機械的な設計によって最小限に抑える必要がある。ストレインゲージおよびローターの電子機器が、ある程度密閉された予備の追加スペースに配置されているのはこうした理由による。

エラーを分析すると、搬送波増幅器を使用してエラー評価を行う場合には、DC アンプを内蔵したアクティブな変換器よりも、パッシブなトルク変換器の方が再現性ははるかに良いことが分かる。周波数範囲における影響をさらに詳細に検証したところ、こうした挙動の原因が判明した。ストレインゲージの接続は、ライン抵抗と熱電圧源の直列接続である。変換器全体にわたって温度が均一に配分されている場合には再現可能なローターの温度依存性が実現し、これはデジタル補正が可能である。温度勾配が発生する場合は、ストレインゲージブリッジのはんだ接合部および DC アンプのすべての接合部に未補正の熱電圧が発生する。こうした影響をできるだけ低く抑えるためには、回路全体を対称に配列する。それでも、残余エラーは存在する。銅とコンスタントンの間を結ぶ一対のはんだ接合部で、間隔が 1 mm の場合における残余エラーを以下に示す。

$$u_{th} = 42,5 \frac{\mu V}{K} \cdot \Delta \vartheta$$

$$\Delta \vartheta = 0,1 K$$

$$\Rightarrow u_{th} = 4,25 \mu V = 0.07 \%$$

この所見は、計測対象全体の温度差を $\Delta \vartheta = 10 K$ とした場合、5VDC の印加電圧に該当する。熱電圧は、計測信号に対する低速の追加的な影響として作用する。周波数領域における干渉のグラフ（図 3）では、0 Hz に近い周波数において干渉が認められる。

追加的で補正不能な干渉信号は、抵抗器のサーマルノイズおよび増幅器に使用されている半導体に起因するものである。以下の rms 値 u_r は、抵抗ノイズに対して生成されたものである。

ノイズ電圧：

$$u_r = \sqrt{4k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f}$$

温度：	= 300 K
ブリッジインピーダンス：	= 1,4 k Ω
帯域幅：	= 6 kHz
ボルツマン定数：	= $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

$$\Rightarrow u_r = \sqrt{4k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f} = 373 \text{ nV} = 0.0062 \% \quad (6 \text{ mV の公称信号範囲に対して})$$

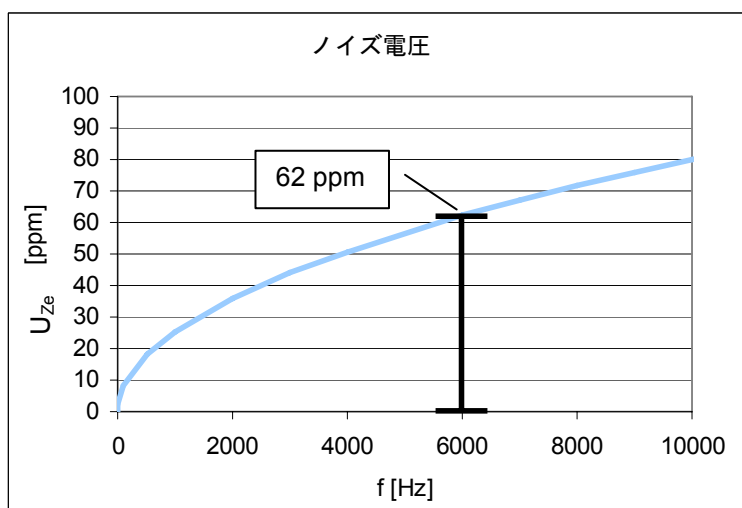


図 3: 周波数領域内のノイズ電圧

搬送波増幅器を使用することにより、トルク信号は、 $0\text{ Hz} \sim f_g = 6\text{ kHz}$ という本来の周波数範囲から、2つの側波帯を持つ 13.2 kHz から 25.2 kHz までの周波数範囲に混合される（図4）。この時点で、帯域通過フィルターを使用することにより、熱電圧のDC電圧効果および抵抗ノイズの一部を抑える機会が得られる。これで補正不能なエラーのほとんどが消去される。 $f_{TF} = 19.2\text{ kHz}$ の高い搬送周波数を選択すると、非常に良好なトルク変換器の動特性が確保できる。その結果、帯域幅は 6 kHz (-3 dB) となる。

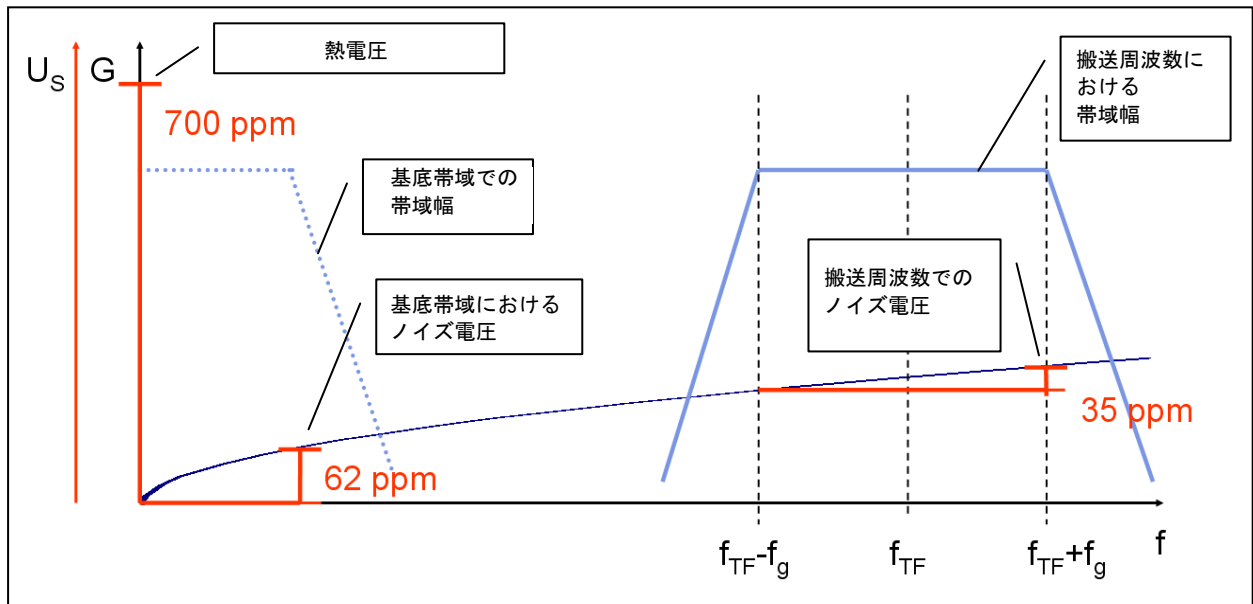


図4： 搬送波増幅器によるノイズ指数

5 結果

搬送波増幅器による計測では、補正不能な無作為エラーを大幅に削減できることが実証された。これが、T12 トルクフランジを精度クラス 0.03 として明確に示すことが可能な唯一の方法である。下に示した計測結果は、smarttorque® シリーズの 3 kNm の変換器を使用して記録したものである。 10°C から 60°C までの3つの温度サイクルにおけるゼロ信号の温度曲線（図5a）は、温度効果の無作為コンテンツが $u_{Zg} = 0.003\%$ 未満であることを示している。静特性曲線の再現性（図5b）も、 0.008% 付近のヒステリシスでは、ほぼ $u_{ZM} = 0.002\%$ 程度に収まっている。再現性に関する限り、校正器（calibration machine）が持つ不確かさがここで達成されている。検証済みの変換器の非直線性はヒステリシスよりも小さい。

この高精度トルク機能は、smarttorque® シリーズにおける、回転速度と回転角度センサ技術によるものだ。その結果として、ユーザーに回転軸における最も重要なパラメータ：トルク、回転速度、回転角度、回転出力、温度を提供する計測システムが得られた。

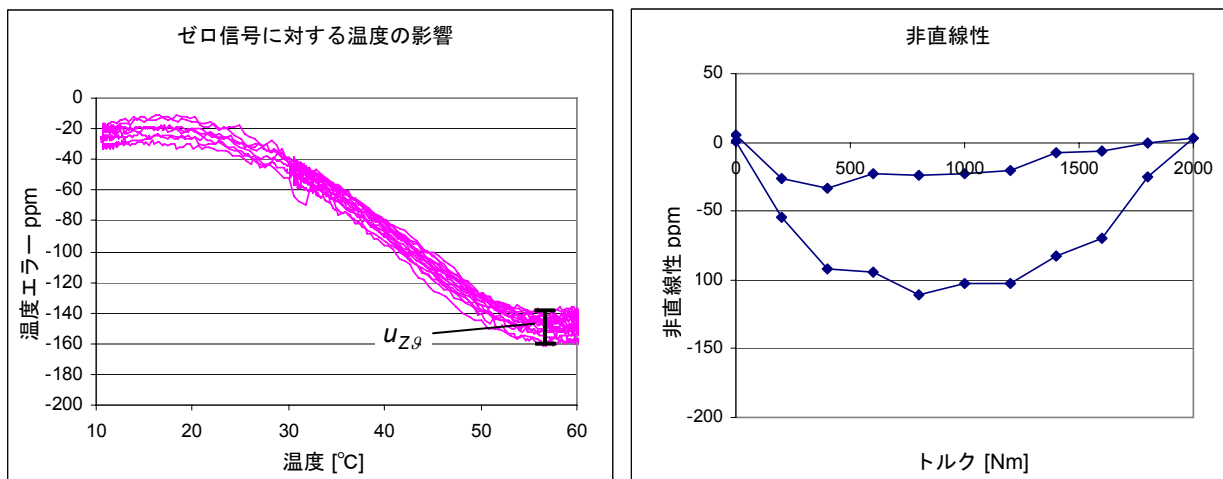


図5 a) ゼロ信号に対する温度の影響 b) 非直線性

計測値の有効性は、ローターの自己診断機能に依存している。障害がある場合には警告信号を出力したり計測値を無効と識別できるように、システムは常に計測ブリッジの運転状態および搬送波増幅器の最も重要ないくつかの機能を監視している。また変換器の最大負荷も記録されているため、過負荷による損傷も検出することが可能である。計測信号は、最大で 6 kHz までの帯域幅において、計測可能な周波数出力およびアナログ出力で出力される。同時に、CAN および Profibus 上の 2 つのチャンネルに対して毎秒 4.8 kS までのサンプリング速度を実現することができる。CAN を経由した T12 トルクフランジの拡張機能をパラメータ化するには、ソフトウェアの支援を利用する。これにより、すべての設定へのアクセスが可能になり、標準的な計測および分析作業が実行できる。また、ユーザー管理機能を使用すると、通常ユーザーモードで重要なパラメータを隠したりロックすることも可能である。

6 参考文献

- [1] Schicker, R.; Wegener, G.: Drehmoment richtig messen. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 2002.
- [2] o.V.: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. Hrsg.: DIN. Berlin, Wien, Zürich: Beuth 1995.
- [3] Lenk, A.: Heuristische Fehlermodelle für Meßgeräte. Studie Meßwerterfassung 3/89. Technische Universität Dresden. Institut für Technische Akustik 1989.