

57-20135092 回転パルス信号のひずみ成分除去による回転変動解析精度改善*

中島 隆¹⁾ 飯野 剛¹⁾ 立川 弘一¹⁾ 中嶋 一博²⁾ 鈴木 英男¹⁾

Improvement of Rotation Fluctuation Analysis Accuracies by Removing Harmonic Distortions of Rotation Pulse Signals

Takashi Nakashima¹⁾, Takeshi Iino,¹⁾ Hirokazu Tatekawa,¹⁾ Kazuhiro Nakashima,²⁾ and Hideo Suzuki¹⁾

The most common way of obtaining rotation pulse signals is to use steel gears and electromagnetic, electrostatic, or eddy-current type sensors. Instantaneous rotation frequencies are obtained directly from time periods between adjacent pulses or by use of the analytic signal (Hilbert transform) method. However, the rotation pulse signals usually contain harmonic distortions due to the nonlinear characteristic of the pulse-generation mechanism of the sensor-gear system. The harmonic distortions deteriorate measurement accuracies of rotation fluctuation components and, for the same reason, the highest order of accurate fluctuation component measurement is limited. This paper proposes two methods of removing harmonic distortions. The first is to apply a reversed nonlinear transfer characteristic to a measured rotation pulse signal, and the second is to square and cube a rotation pulse signal and subtract them from the original signal spectrum so that the 2-nd and 3-rd harmonics become minimum. Improvement of fluctuation component measurement (estimation) accuracies are also shown.

KEY WORDS: (Standardized) vibration, noise, power train (Free) rotation fluctuation, analytic signal [B3]

1. ま え が き

エンジンのギアトレインやトランスミッションの回転計測では歯車の近傍に電磁型、静電、うず電流型などのセンサを取り付け、回転周波数を歯数分だけ通倍したパルス信号を得て、パルスの周期や信号の位相の解析から回転速度や回転変動を求める(1-9)。ロータリーエンコーダは取付スペースの制約で使用不可能な場合が多いため、この手法は実機の計測では極めて重要な役割を果たす。また、使用する周波数帯域も通常の振動や騒音の測定帯域と同じでよく、計測システム全体の簡素化も可能となる。

上記の有利な点に対して、このタイプのセンサは対象物までの距離が増すと感度が低下することによる非線形特性を有しており、高調波ひずみを含む。回転パルス波形の基本周波数(f_z)は回転周波数(f_0)と歯数(Z)の積で与えられ、高調波は f_z の整数倍で与えられる。回転変動が存在する場合には、周波数軸上で基本周波数とその高調波(nf_z)の周波数を中心としてほぼ対称な形で側帯波が分布する。歯数が小さい場合や回転変動成分が高次まで存在する場合には、基本波(搬送波)の上側側帯波と2次高調波(搬送波)の下側側帯波との重なりが大きくなる。

解析的信号法では正の基本周波数の両側の側帯波を含む帯域成分を用いて信号の位相を計算する。その時、2次ひずみとその側帯波を含んだ状態で分析すると回転変動成分の推定(計測)精度に誤差が生じる。基本成分とその側帯波は残し2次(あるいはさらに高次)のひずみ成分を低減できれば計測精度を改善することができる。歯数が小さいとき、例えば $Z=20$ の場合に、2次ひずみのために使用帯域が半分まで制限されると、最大10次の変動成分までしか計測できないことになるので、その制限から解放されるための高調波ひずみの除去は極めて重要な課題である。

本論文においては、側帯波を含む主に2および3次ひずみの低減法とその効果について述べる。

2. 回転パルス生成モデル

回転変動量の計測法の精度を検討する1つの方法は、回転変動量が分かっている回転パルス信号を用いることである。ここでも、文献(9)で用いた回転パルス発生モデルを用いることとする。

ギア数72のインボリュート歯形状をFig.1に示す。ただし、横軸は基準ピッチ円半径(72 mm)にギアの回転角度(rad.)を掛けた円弧長、縦軸はギア半径である。合成信号の計算を容易にするために、ギアの歯面は円弧でなくFig.1のように横方向に移動するものとする。図中の矢印はセンサの最大感度幅である。

*2013年5月22日自動車技術会春季学術講演会において発表

1) (株)エー・アンド・デイ (364-8585 北本市朝日 1-243)

2) 音振技術ネット(224-0037 横浜市都筑区茅ヶ崎南 4-14-1-103)

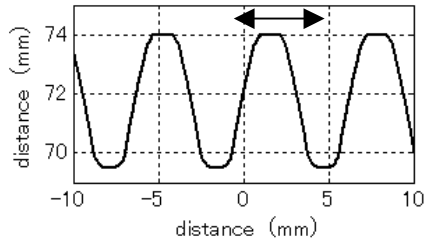


Fig. 1 Tooth shape of the model gear.

Fig. 2 はモデルセンサの感度が Fig. 1 の歯形状に対して幅方向にどのように変化するかを示したものである。感度幅は面でなく線と仮定する。あるいは、歯、センサともに紙面に垂直方向には無限大であるとも考えることもできる。

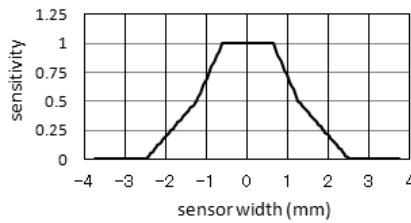


Fig. 2 Sensitivity vs. width characteristic of the model sensor.

Fig. 3 はセンサ表面からの距離に対する感度の変化量を示したものである。センサ表面から 2 mm までは感度がほぼ直線的に低下し、その後は 5 mm で 0.01, 6 mm において零になるように漸近的に低下するものとする。

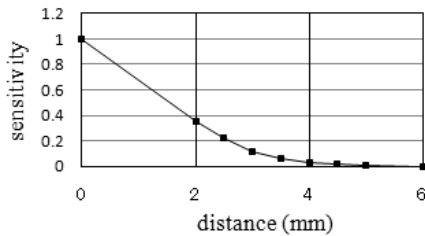


Fig. 3 Sensitivity vs. distance characteristic of the model sensor.

Fig. 2 の有効感度幅 (± 2.5 mm) を 120 分割し、各点から Fig. 1 に示す歯車の高さまでの垂線の長さに、Fig. 2 と Fig. 3 の該当する値を掛けたものをセンサの各点での出力とする。センサの総出力はそれらの和とする。なお、センサ面と Fig. 1 に示すギアの歯の先端とのギャップは 1 mm とする。

ギアの回転数は 30 Hz、サンプリング周波数は 51200 Hz とする。回転変動量は回転 1 次から 72 次まで全ての整数次数成分が存在し、 n 次の変動角度振幅は、 $A(n) = 0.3 \times n^{-1.6152}$ で与えられるものとする。1 次で 0.3 度、72 次で 0.0003 度となる。また、各変動次数成分の位相はランダムに 1 回だけ発生した 72 個の値を毎回用いている (具体的数字は省く)。また、DFT、IDFT では、サンプル点数 (N) を全て 51200 とする。

上述の条件で合成した回転パルス信号を Fig. 4 に示す。パルスの大きさはその周波数とは無関係なので、平均値が 0、最大

値が 1 になるように直流成分と大きさを調整している。山の高さ (1) が谷の深さ (-0.89) よりも大きいことが特徴である。このため、次に述べるように回転パルス信号は高調波ひずみを持つようになる。

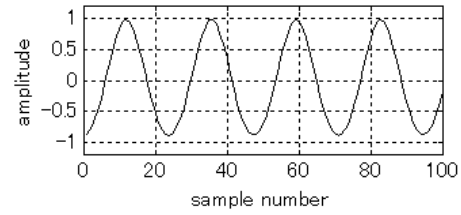


Fig. 4 Synthesized rotation pulse signal.

Fig. 5 は 1 秒間のサンプル列に DFT を適用して周波数スペクトルを求め、10 kHz までを示したものである。2160 Hz の嚙合周波数と 4 次ひずみまでのピークが見られる。2 次ひずみは基本成分より 26.6 dB 低い。回転変動成分が存在するために、周波数変調が発生し多くの側帯波が発生している。この図を見る限り 2 次ひずみの影響を除外して分析するためには 3600 Hz ($= 1.67 f_2$) 程度の帯域までしか使用することができない。

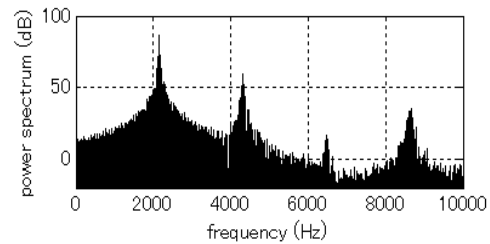


Fig. 5 Power spectrum of the rotation pulse signal.

3. 逆特性法の原理とその効果

3.1 逆特性法

センサの特性とギアの歯型の関係で決まる非線形性により高次のひずみ成分が発生する。この非線形を打ち消すような逆の非線形系を通すことで 2 次ひずみ (あるいはさらに高次のひずみ) とその側帯波を除去できる。この方法を逆特性法と呼ぶ (RNM と略記)。入力 x 対出力 x' の非線形特性は下記の多項式で近似することができる。

$$x'(n) = a_0 + a_1 x(n) + a_2 x^2(n) + a_3 x^3(n) \cdots \quad (1)$$

元信号の各サンプル値 $x(n)$ から式(1)を用いて得られる $x'(n)$ を補正後の信号とする。係数 a_n の決め方は、各係数を最適値を含むと考えられる範囲で変化させ、基本周波数成分と 2 次ひずみ成分のレベル差が最大となるような組み合わせを見出すという単純なアルゴリズムである。ここで、 a_1 は主成分である基本成分に関わるもので $a_1 = 1$ と固定してよい。ここでは、以下の 3 例で最適解の探索を試みる (a_4 以上は無視する)。

Case I : a_0 と a_2 を変化させる ($a_3 = 0$) 。

Case II : a_2 のみを変化させる ($a_0 = a_3 = 0$) 。

Case III : a_2 と a_3 を変化させる ($a_1 = 0$) 。

それぞれの変化範囲は下記の通りである。パルス波の最大振幅を1と正規化したことで係数の最適値の範囲も限定され、探索が容易になる。この例ではパルス波の山の方が高く狭いので a_2 は山を低くする負の範囲で探索すればよい。

a_0 : -0.2~0.2, 0.1 ステップ (総ステップ数 : 41)

a_2 : -0.2~0, 0.02 ステップ (総ステップ数 : 101)

a_3 : -0.2~0.2, 0.05 ステップ (総ステップ数 : 81)

Case II と Case III について、式(1)で与えられる非線形性を Fig. 6 の太線で示す。入力 x の範囲 -1 ~ 1 に対して、非線形性は Case II の場合、山の方を低く、谷を深くするように、Case III の場合は山を低くする度合いが、谷を浅くする度合いに勝るように働いている。

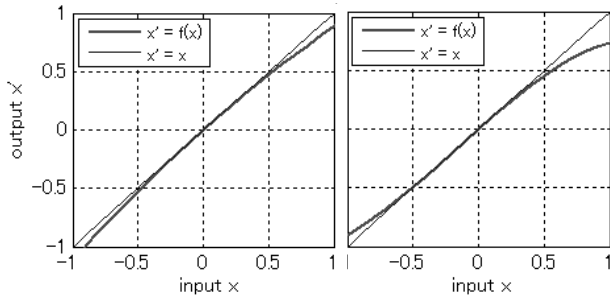


Fig. 6 Relations between x and x' for Cases II (left) and III (right).

Fig. 7 は Case III の場合の逆特性補正後のスペクトルを示したものである。Fig. 5 と比較して 2 次ひずみが大幅に低下している。

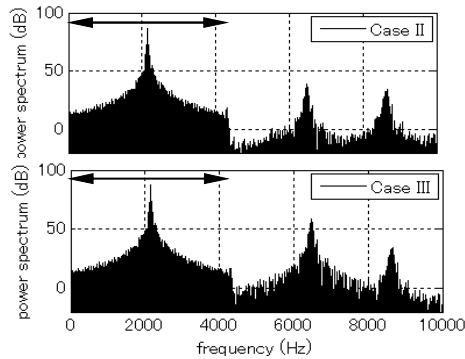


Fig. 7 Power spectra after the removal of the 2nd harmonic and its side-bands by RNM for Cases II and III.

Fig. 8 は Case III の場合について Fig. 7 の矢印で示す帯域のスペクトルに解析的信号法に適用して得られる次数ごとの変動成分の計測誤差を示したものである。縦軸は解析的信号法で求めた振幅値と真値との比をデシベル（自然対数を取り 20 倍）で表現したものである。元信号では高次成分の大きな誤差が目立つが、2 次ひずみを低減した補正後の信号では推定精度が大幅に改善されていることが分かる。Case I, II でも同様の改善効果が得られている。

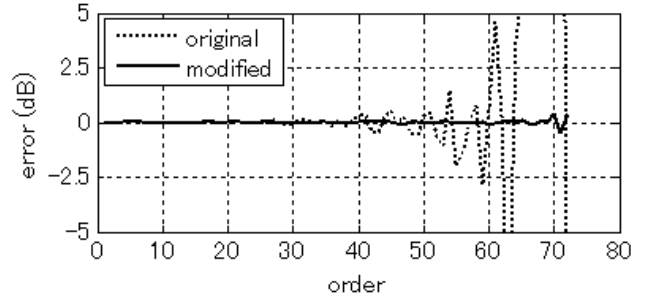


Fig. 8 Measurement errors of fluctuation components before and after the modification of the rotation pulse signal (Case III).

4. スペクトル減算法の原理とその効果

正弦波の 2 乗および 3 乗に関しては下式が成り立つ。

$$\begin{aligned}\cos^2 \theta &= (1 + \cos 2\theta) / 2 \\ \cos^3 \theta &= (3 \cos \theta + \cos 3\theta) / 4\end{aligned}\quad (2)$$

2 乗の場合は直流成分と 2 次ひずみが発生し、3 乗の場合は 1 次成分とその 1/3 の大きさの 3 次成分が発生する。ひずみを含んだ信号でも、2 乗または 3 乗することにより、2 または 3 次ひずみを多く含んだ信号が得られる。元信号のスペクトルからそれを 2 および 3 乗した信号のスペクトルを 2 次および 3 次ひずみが低減するように減算する方法をスペクトル減算法と呼ぶ (SSM と略記)。

元の回転パルス信号を 2 および 3 乗することにより得られる信号のスペクトルを Fig. 9 に示す。

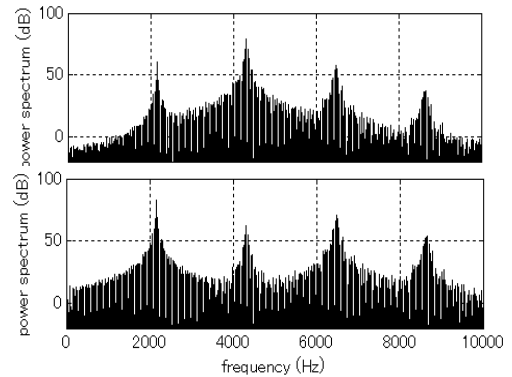


Fig. 9 Spectra of the squared (top) and cubed (bottom) rotation pulse signals.

元信号、2 乗波、および 3 乗波の 2, 3 次ひずみ成分（ピーク値）の複素振幅値をそれぞれ $X_1(2)$, $X_1(3)$, $X_2(2)$, $X_2(3)$, および $X_3(2)$, $X_3(3)$ とする。 $X_1(2)$ と $X_1(3)$ を 0 にするには

$$\begin{aligned}b_1 X_2(2) + b_2 X_3(2) &= X_1(2) \\ b_1 X_2(3) + b_2 X_3(3) &= X_1(3)\end{aligned}\quad (3)$$

を満たす複素係数 b_1 および b_2 を用いて、全てのスペクトルに対して

$$X_{1M} = X_1 - (b_1 X_2 + b_2 X_3) \quad (4)$$

により 2 および 3 次ひずみを低減した元波形の補正後のスペクトルを求めることができる。負 ($N/2 \sim N-1$) のスペクトルは正の複素共役を用いることとする。これを IDFT することにより実時間波形が得られる。

Fig. 10 はスペクトル減算法で得られたスペクトルを示す。2 次, 3 次ひずみともに大きく減衰していることが分かる。逆特性法による Fig. 7 と比較すると, 2, 3 次成分ともに減衰しているので好ましい結果に見える。4 次ひずみの大きさはほとんど変らない。スペクトル減算法の特徴は, 特定の周波数でスペクトルを 0 に設定しているが, その周辺でも低減効果があるということである。

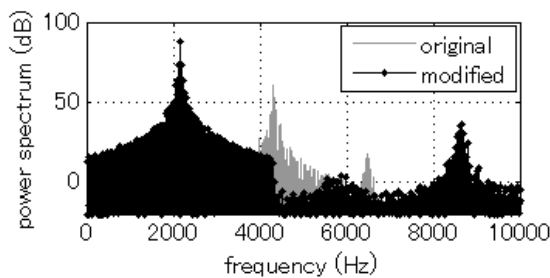


Fig. 10 Power spectra of the original and modified rotation pulse signals by SSM.

スペクトル減算法で得られた時間波形を用いて, 次数成分の大きさを分析した結果を Fig. 11 に示す。補正前の信号と比較すると大幅に精度が向上している。しかし, Fig. 9 と比較すると, 70 次以上で誤差が大きくなっている。この理由として考えられることは, 2 次ひずみが無い場合でも基本波の 72 次の変動成分の側帯波が存在しており, それも含めて強制的に 0 に設定しているためであると思われる。それにしても, 70 次まではほぼ正しい分析ができており, スペクトル減算法の効果は逆特性法と同程度の大きさとなっている。

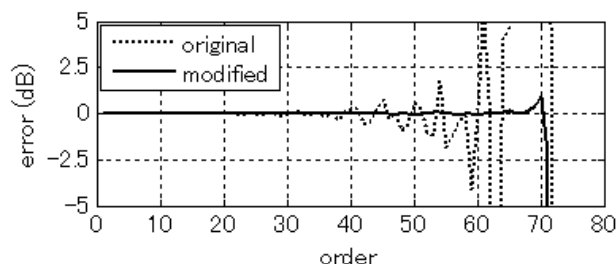


Fig. 11 Measurement errors of fluctuation components of the rotation pulse signal before and after applying SSM.

6. まとめ

本報告では, 2 次ひずみの発生原因の根本に戻って信号に逆の非線形特性を適用することで, 2 次ひずみを低減することを提案した。さらに, 元信号のスペクトルから 2 乗および 3 乗の信号を減算することにより 2 および 3 次のひずみ成分を低減する方法を提案した。実際の回転パルス発生メカニズム

に近い回転パルス発生モデルを用いて, 変動成分の大きさが知られている回転パルス信号に対してこれらの方法を適用した結果, 2 次および 3 次ひずみの大幅な低減が可能であることが分かった。2 次ひずみ低減後の波形に対して, 解析的信号法により各次数成分の大きさを求めて真値との差を評価した結果, ひずみ低減後の信号を用いると各次数成分の大きさの推定精度はほぼ歯数に等しい次数成分まで十分な精度が得られるという大きな効果を確認することができた。2 つの方法を実際の信号に適用した結果, 有効にひずみ成分が低減できることを確認している。

今後はさらに多くの実測データに適用し有効性の確認を行う予定である。

参考文献

- (1) 石原 章, 杉戸 博, 西山利彦: ヒルベルト変換法による歯車回転挙動の測定, 自技会学術講演会前刷集 952, p.105-108 (1995-5).
- (2) 大原康司, 北川福郎, 八百幸誠二, 清水光一: ヒルベルト変換を用いたトランジェント歯車回転挙動計測—加速時噛合い騒音への適用—, 自技会学術講演会前刷集, 117-02, p.5-8 (2002-5).
- (3) Hideo Suzuki, Furong Ma, Hideaki Izumi, Osamu Yamazaki, Shigeki Okawa, and Ken'iti Kido, : Instantaneous frequencies of signals obtained by the analytic signal method, Acoust. Sci. & Tech. Vol.27, No.3, p.163-170 (2006).
- (4) 山口寛樹, 山浦広己, ギヤラトル音解析—ギア噛合いモデルと挙動推定のための信号処理, 自技会学術講演会前刷集, 11-08, p.5-10 (2008-5).
- (5) 中島 隆, 杉崎 誠, 鈴木 英男: 解析的信号法による回転体の瞬時回転速度・位相の計測方法—回転検出器モデルを用いた解析精度の検討—, 自技会学術講演会前刷集, 20-09, p.1-6 (2009-5).
- (6) 中島 隆, 杉崎 誠, 立川 弘一, 水川尚信, 鈴木英男, : 定常回転体の回転変動の解析的信号法による計測精度評価, 自技会学術講演会前刷集, 14-10, p.13-18 (2010-5).
- (7) 中島隆, 立川弘一, 水川尚信, 鈴木英男: 近接した 2 つのセンサを用いたギアの瞬時回転速度および変動解析, 自技会学術講演会前刷集, No. 24-11, p.13-16 (2011-5).
- (8) Hideo Suzuki, Takashi Nakashima, Hirokazu Tatekawa, Hisanobu Mizukawa, and Michael H. Smith, : An Accurate Measurement of Rotation Velocity : Eliminating Measurement Errors Caused by Gear Tooth Shape Unevenness, SAE International, 2011-01-1651(2011).
- (9) 飯野 剛, 立川弘一, 水川尚信, 中嶋一博, 鈴木英男: 2 センサ法を用いた回転上昇または下降時のギアの回転変動解析, 自技会学術講演会前刷集, No. 18-12, p.11-14 (2012-5).