

89-20125063 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*

飯野 剛¹⁾ 立川 弘一¹⁾ 水川 尚信¹⁾ 中嶋 一博²⁾ 鈴木 英男¹⁾Rotation Fluctuation Analysis of Accelerating/Decelerating Gears
Using Two Closely-located SensorsTakeshi Iino,¹⁾ Hirokazu Tatekawa¹⁾ Hisanobu Mizukawa,¹⁾ Kazuhiro Nakashima²⁾, 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. In our previous papers, a method of removing rotation frequency estimation errors caused by unevenness of tooth shapes of a gear was proposed and examples of numerical analysis using the proposed method were presented. This paper discusses the same topic for cases with accelerating and decelerating rotations. Another difference from the previous paper is to use instantaneous rotation angles instead of instantaneous rotation frequencies.

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

1. ま え が き

車両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速度を歯数分だけ通倍したパルス信号を得て、その周期または周波数の解析から回転速度を求めることが行われる。この際にギアの歯形状に不均一性がある場合にはその影響が計測値に混入し正確な回転速度の計測に支障を来す。文献(1, 2)では、この計測誤差の除去方法として近接した2つのセンサを用いる方法を提案した。そこでは定回転の事例だけを扱ったが実際には回転上昇や下降時の解析も必要である。本報告は回転上昇や下降がある場合について、提案する方法の有効性について回転検出モデルを用いた数値解析により検討する。最後に実測データへの適用例も示す。

2. 2 センサ法の原理と位相変動量への適用

Fig. 1 に示すような近接して配置した2つのセンサを用いて歯の不整形による回転速度の計測誤差を除去する方法については、文献(2)で述べられている(以下、2センサ法と呼ぶ)。まず、定常回転の場合についてその概略を述べる。

2つの離散化された回転パルス信号 $x_1(n)$, $x_2(n)$ から、例えば解析的信号法により、サンプリング点ごとの瞬時回転速度(周波数) $f_1(n)$ と $f_2(n)$ が求められるものとする。この中には真の回転周波数成分と歯車の不整形その他による疑似の回

転周波数成分が含まれている。真の成分 $f_a(n)$ (その他の理由で2つのセンサに同時刻で発生する成分を含む) は $f_1(n)$ と $f_2(n)$ に同時刻に含まれ、疑似成分 $f_{sp}(n)$ はセンサの取付角度差に対応するサンプル数 M (整数とは限らないことに注意) の差を持った状態で含まれる。

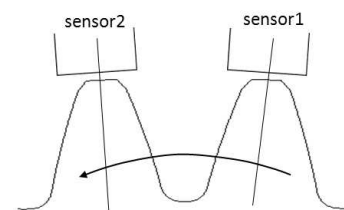


Fig. 1 A rotating gear and two-sensor arrangement of the rotation pulse generation model.

$$\begin{aligned} f_1(n) &= f_a(n) + f_{sp}(n) \\ f_2(n) &= f_a(n) + f_{sp}(n-M) \end{aligned} \quad (1)$$

これらの差をとり、さらに離散フーリエ変換 (DFT) により、

$$\begin{aligned} f_{1-2}(n) &= f_{sp}(n) - f_{sp}(n-M) \\ F_{1-2}(k) &= F_{sp}(k)[1 - e^{-j2\pi kM/N}] \end{aligned} \quad (2)$$

が得られる。ここで、 $f(n-m)$ の N 点離散フーリエ変換は $F(k)\exp(-j2\pi km/N)$ で与えられることを用いている。式(2)から $F_{sp}(k)$ を求め、離散フーリエ変換 (IDFT) することにより、疑似回転周波数成分

$$f_{sp}(n) = \text{IDFT}[F_{1-2}(k)/\{1 - e^{-j2\pi kM/N}\}] \quad (3)$$

*2012年5月23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)

が求められ、 $f_1(n)$ から引き算することにより真の回転周波数成分が得られる。式(3)における割り算で分母が零になる周波数は、 $M=0$ と f_1/M (M はセンサ間の遅れ時間に対応するサンプル数)において発生するが、センサの距離を近づければ対象とする帯域の外に持って行くことができる。

歯形の不均一性の情報は回転の変動分の影響を無視すれば2つのセンサに一定の時間遅れ M (サンプル) を持って現れるので、2つのセンサを用いれば上記の方法により除去することが可能となる。

以上は、定常回転の場合に瞬時周波数を用いて説明しているが、回転周波数が上昇または下降する場合の回転角度についても同様のことが成り立つ。回転数が時間 $0 \sim T$ (s)の間に回転数が f_1 から f_2 (rpm) まで時間に対して直線的に変化し、回転変動成分はそれに重畳されるものとする。変動を含まない場合の回転周波数と総回転角度は連続関数の表現でそれぞれ

$$f(t) = f_1 + \frac{(f_2 - f_1)}{T}t, \quad \phi(t) = 2\pi[f_1 t + \frac{(f_2 - f_1)}{2T}t^2] \quad (4)$$

で与えられる。2つの回転パルス信号の離散化後の総位相はそれぞれ

$$\begin{aligned} \Phi_1(n) &= 2\pi[f_1 n\Delta t + \frac{f_2 - f_1}{2T}(n\Delta t)^2] + \phi_{tr}(n) + \phi_{sp}(n) \\ \Phi_2(n) &= \phi_0 + 2\pi[f_1 n\Delta t + \frac{f_2 - f_1}{2T}(n\Delta t)^2] + \phi_{tr}(n) \\ &\quad + \phi_{sp}(n - M(n)) \end{aligned} \quad (5)$$

で表すことができる。ここで、式(5)中の ϕ_{tr} および ϕ_{sp} はそれぞれ真 (true) および疑似 (spurious) の位相変動成分であり、それ以外の項は一定値とゆるやかに変化する成分である。一定値とゆるやかに変化する成分を除去したあとの位相変動量については式(1)、(2)と全く同じ関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} \phi_1(n) &= \phi_{tr}(n) + \phi_{sp}(n) \\ \phi_2(n) &= \phi_{tr}(n) + \phi_{sp}(n - M(n)) \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 $M(n)$ は回転数が変化するので、一定値でなく時間 (n) の関数として扱う必要がある。回転数を見かけ上一定にするには、一定時間間隔のサンプリングを一定位相 (回転角度) 間隔のサンプリングに変える必要がある。式(5)の [] で与えられる時間と位相の関係が求められれば、もとのパルス信号に対して位相一定のリサンプリングを行うことができる。それによって、 $M(n)$ も一定になり、一定回転の場合と同様に扱うことができる。その後の扱いは文献(2)と同じである。

3. 回転パルス生成モデル

回転パルス信号を用いた回転変動の解析法の精度を評価する上で、回転変動の真値が分かっている回転パルス信号生成モデルを利用することは不可欠と言ってよい(2)。ここでも前回と同様の回転パルス生成モデルを用いることとする。

3.1 歯形状

Fig. 2はギアの歯形状のパラメータとして、モジュール：2 mm、歯数：72、圧力角：20度、頂げき係数：0.25、転位係数：0、などの条件で得られるインボリュート関数を用いる。歯形状の代表的数値は基準ピッチ：6.283 mm、歯先円半径：74 mm、歯底円半径：69.5 mm、歯先円上の円弧歯厚：1.589 mm、歯底隔R：0.76 mm、歯先面取り：0.2 mmを用いて計算した歯形である。ただし、横軸は基準ピッチ円半径にギアの回転角度 (rad.) を掛けた円弧長、縦軸はギア半径である。Fig. 2をモデルギアの歯形状とすることにより、センサ面と平行にすることができ、計算を簡単化できる。なお、図中の矢印は次に述べるセンサの最大感度幅 (5 mm) を示したものである

3.2 センサ感度対幅特性

Fig. 3はモデルセンサの感度が幅方向に対してどのように変化するかの特性を示したものである。横幅が1.25 mm内で感度が1、横幅2.5 mmまで直線的に感度が0.5まで低下、さらに横幅5 mmで感度が0になるように直線的に低下する。センサの感度はFig. 1の紙面に垂直な方向にはないものとする。即ち、感度は面でなく線と仮定する。あるいは、垂直方向には無限大であるとも考えることもできる。

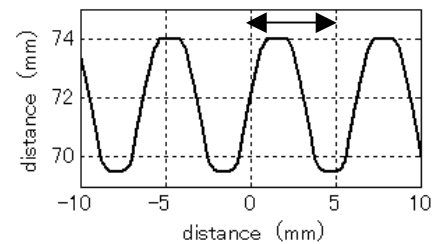


Fig.2 Tooth shape of the model gear.

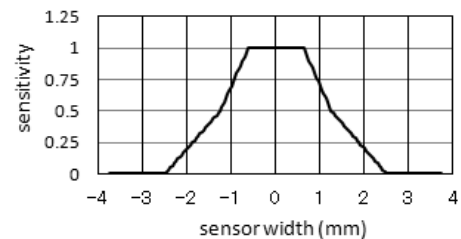


Fig. 3 Sensitivity vs. width characteristic of the model sensor.

3.3 センサ感度対距離特性

Fig. 4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6 mmにおいて感度が零になるように漸近的に低下するものとする。

3.4 センサ出力の計算方法

Fig. 3の有効感度幅 (± 2.5 mm) の各点から Fig. 2に示す歯車の高さまでの垂線の長さに、Fig. 3と Fig. 4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積分値であるが、実際にはセンサの感度幅を等間隔に120分割し和をとっている。なお、センサ面と Fig. 2に示

すギアの歯の先端とのギャップは 1 mm とする。

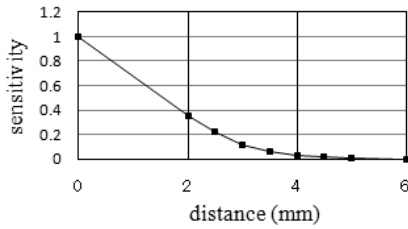


Fig. 4 Sensitivity vs. distance characteristic of the model sensor.

3.5 瞬時位相量の決め方

センサ 1 および 2 の中央部におけるギアの総回転角度 (瞬時位相量) は以下のように与えられるものとする。

$$\begin{aligned}\phi_1(t) &= \phi(t) + \sum A_m \sin(m\phi(t)) \\ \phi_2(t) &= \phi(t) + \sum A_m \sin(m\phi(t)) - \phi_d\end{aligned}\quad (7)$$

ここで、 $\phi(t)$ は式(4)で与えられ、 A_m は m 次の変動成分の位相振幅 (0-peak 値)、 ϕ_d はセンサ間の取付角度差である。時間ごとの回転角度が与えられるとセンサの感度幅の範囲の歯型形状も決まるのでセンサの出力を計算することができる。

3.6 歯の不整形の導入

歯の不整形のモデル化は、18 個ごとに 1 個の割合で異常な歯が存在するものとする。異常な歯の右下がりの最大傾斜部分で $20 \mu\text{m}$ 右シフトする (歯の厚みが増す) ようにしている。1 回転に 4 回異常な歯が到来するので 4 次およびその高調波が発生する。

4. 数値計算および実測結果

4.1 回転および計測条件

ここでは 3. で述べた回転パルス生成モデルを用いて理論値が分かっている回転パルス信号を生成し、2. で述べた手法を適用して得られる結果を理論値と比較して提案する手法が有効であることを確認する。

ギアの回転数は次式に従って上昇するものとする。

$$f_{\text{rot}}(t) = f_1 + (f_2 - f_1) \cdot t / T \quad (8)$$

ここで、 $f_1 = 30(\text{Hz})$ 、 $f_2 = 36(\text{Hz})$ 、 $T = 1(\text{s})$ とする。回転には 0.5 次 (変動振幅: 0.1 度) と、3 次 (変動振幅: 0.1 度) から、24 次 (変動振幅: 0.001 度) までの 3 次ごとの計 9 個の変動成分が加わっているものとする。6 次から 21 次までは次式のように、次数に従って指数的に減衰するものとする。

$$A_{3m} = 1.1393 \cdot (3m)^{-2.2146}, \quad m = 2, \dots, 7 \quad (9)$$

なお、各位相変動成分の基本回転に対する相対位相は全て 0 とする。2 つのセンサは 1 歯間の 0.97 倍の角度差をもって取り付けられているものとする。サンプリング周波数は $F_s = 51,200 \text{ Hz}$ とする。これらの条件のもとに 3. で述べた回転パルス生成モデルを用いて 2 つのセンサ信号を作成する。

4.2 回転パルス信号波形

回転パルス信号波形の例を Fig. 5 に示す。センサ 1 の信号を実線で、センサ 1 と 2 の差の波形を点線で示している。実線のは谷よりも多少細くなっている。左と右の○印はそれぞれセンサ 1 とセンサ 2 の信号が歯の不整形のため他方より大きい部分を示す。そのため、それらに続く谷よりも前者は浅く、後者は深くなっている。

4.3 回転パルス信号のスペクトル (リサンプリングの効果)

Fig. 6 (a), (b) はそれぞれ 4.1 で述べた設定条件で得られる回転パルス信号のリサンプリングの前と後のスペクトルを示したものである。前者は回転によるスペクトルの広がりが見られるが、後者では回転角度軸によるリサンプリングのため、スペクトルの広がりは無くなり、歯の周波数とその側帯波、歯の不整形による低域からのスペクトルが明瞭に観測される。回転パルス信号の 2 次成分は -30 dB 程度であり、パルス発生モデルのセンサ感度の距離特性による 2 次ひずみを含んでいることが分かる。

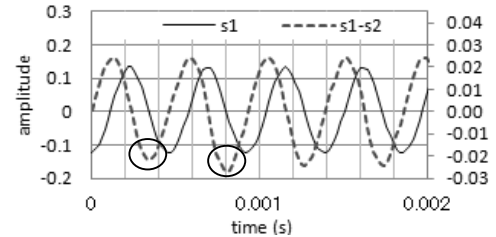


Fig. 5 Rotation pulse signal of sensor 1 and difference between sensor 1 and 2 signals.

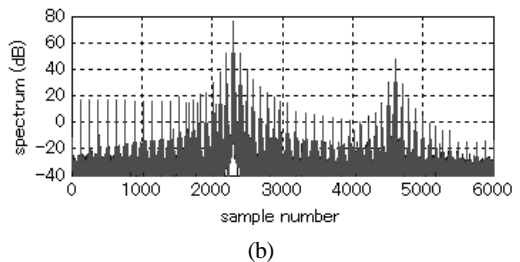
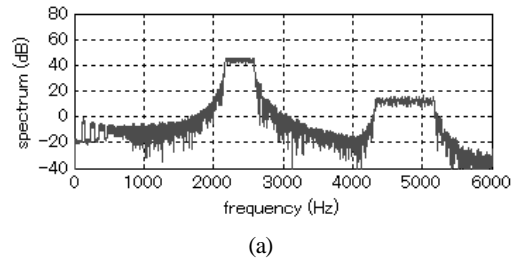


Fig. 6 Spectra of a rotation pulse signal before and after the re-sampling.

4.4 不整形による疑似成分除去前後のスペクトルの比較

Fig. 5(b) の基本回転周波数に対応する最大のスペクトルを中心として 0.5 から 1.5 倍の正の帯域成分のみを残して IDFT を行い、式(6)の位相変動成分を求める。さらに、2. で述べた 2 センサ法を適用し、疑似成分を除去を行う。Fig. 7 に、疑似成分除去前後の位相変動成分のスペクトルを示す。真の変動

成分は変わらずに疑似成分（□で表示される成分）はほぼ完全に除去されている。縦軸は1度が0 dBとなるように正規化されており、0.5次と3次は-20 dBであり、24次の位相変動成分の大きさ（-60 dB）まで十分な精度で求められている。回転変動の成分ごとの大きさを求めるには Fig. 7 の結果で十分であるが、さらに累積回転角度を軸とした変動波形も必要となる場合がある。

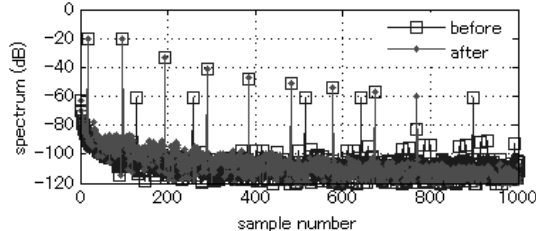


Fig. 7 Spectra of rotation fluctuation before and after the application of the two-sensor method.

4.5 疑似変動成分除去前後の位相変動成分

センサ1の補正前後の位相変動量を重ね書きして Fig. 8 に示す（累積回転数が0から2までの区間のみを示す）。四角の枠の部分の拡大図から、2センサによる補正により歯の不整形による疑似変動成分が除去されて滑らかな曲線が得られていることが分かる。

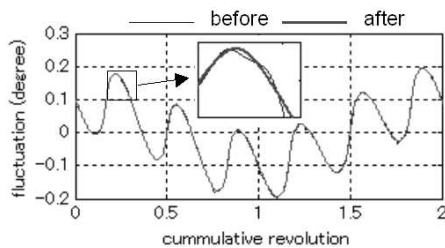


Fig. 8 Rotation angle fluctuations of sensor 1 before and after the application of the two-sensor method.

4.6 位相変動量の計算誤差

位相（回転）変動量の真値が分かっているので、それを得られた変動量から引くことにより誤差を求めることができる。Fig. 9(a)はその結果を示したものである。最初と最後の部分を除けば、誤差は±0.001度以内に十分納まっている。結果は、回転上昇（または下降）があり、さらに歯の不整形による疑似成分が生じるような場合でも、2センサ法により十分な精度で回転変動量を求めることができることを示している。

動的バックラッシュを求める場合には噛み合う2つの歯車の位相差を扱うのでより高精度の解析が求められる。サンプリング周波数を102,400 Hzにしたときの位相変動量の計算誤差を Fig. 9(b)に示す。最初と最後の一部を除けば±0.0003度以内の誤差となっている。

4.7 応用例

Fig.10 に応用例を示す。回転数を2600 rpm から1550 rpm ま

で1.1秒で下降させた。歯数103の歯車に渦電流型のセンサ（電子応用社製PU-05）を2歯ほど離して取り付けした。サンプリング周波数は102,400 Hzである。補正後は3次、5次および7次以上の成分が大幅に低減されている。

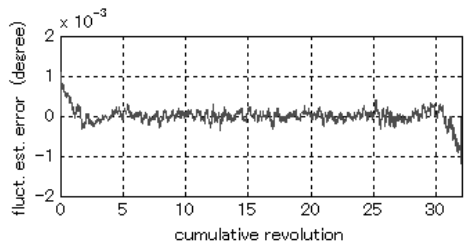
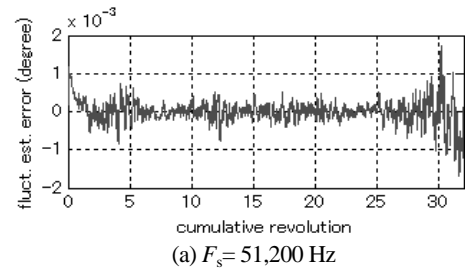


Fig. 9 Rotation angle fluctuation estimation errors.

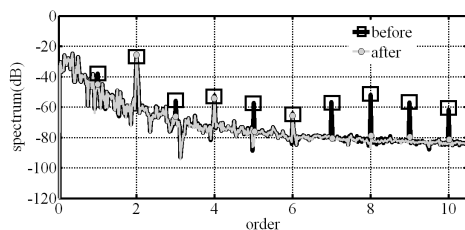


Fig. 10 Angle fluctuation spectra of a decelerating ring gear rotation before and after the application of the two-sensor method.

5. まとめ

歯の不整形性による回転速度および変動の推定誤差を除去するための2センサ法を提案したが、今回は回転上昇がある場合について回転パルス生成モデルを用いて2センサ法を適用し、極めて効果的に疑似回転成分を除去できることを確認した。計算例は回転上昇の場合の結果であるが、回転速度が急下降する実測データにも適用し2センサ法が有効であることを確認した。

参考文献

- (1) 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).
- (2) 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)