

騒音信号と適応フィルタを用いた旋削びびり振動検出手法

三好 由記博*

Chatter Detection Method in Turning with Sound Signal and Adaptive Filter

Yukihiro Miyoshi*

Abstract: The method to calculate the damping ratio of the system relevant to chatter vibration and to identify the time series model using the adaptive filter are reviewed, integrated, and applied to detect the chatter vibration with sound signal in turning operation. Using the sound signal in turning experiment the recursive adaptive filter is related to ARMA (2,1) discrete model to trace the damping ratio, successfully detecting the chatter vibration.

Key words: chatter vibration, turning, damping ratio, adaptive filter, time series model

1. まえがき

切削加工中に発生するびびり振動は、加工品を使用不能な不用品とするばかりでなく、工作機械の軸受けあるいは工具切れ刃に損傷を負わせる危険性があり、切削加工において回避しなければならない異常現象の一つである。

びびり振動には強制振動と自励振動とがあるが、特に問題になるのは切削過程そのものに起因する自励振動であり、その発生機構として再生びびり振動が知られている。びびり振動、特に切削過程に起因する自励びびり振動を防ぐには、対応する加工内容について事前に予備加工を行って発生限界を調べておくことが現実的な対応であるが、びびり振動の発生は、工作物や工具のわずかな締め付けの違い、材料の硬さのばらつきなど、事前には知ることが難しい要因に左右されるため、加工前にその発生を完全に予知することは困難である。

切削加工中にびびり振動の発生を検知あるいは予測して、加工条件の変更あるいは加工の停止を行うことができれば好ましい。加工条件の変更等はNC装置の制御あるいはプログラムの問題であり、ここではまず切削加工中にびびり振動の発生を検知することが可能であるかどうかを調べることにする。

びびり振動の発生検出に使用する信号には、切削力、

加速度、騒音、AEなどが考えられるが、ここではセンサーの扱い易さ、信号処理の容易さなどを考慮して騒音信号を使うことにする。騒音信号を使用する場合には、切削音以外の周囲の音が検出に影響しないように注意する必要がある。NC旋盤、マシニングセンタ等のNC工作機械は周囲がカバーで覆われていて外部の影響を受けにくく、またセンサ実装時には刃先近くにマイクを設置することから、外部の騒音の影響を受けにくいと想定できる。

騒音信号に含まれるびびり振動の特徴パラメータ即ち減衰比の検出には適応フィルタと時系列モデルを使うことにする。適応フィルタのモデリング方法¹⁾、フィルタパラメータを時系列モデルに対応させる方法、さらに時系列モデルを連続系の減衰比に対応させる方法は、既に確立した手法であるが、ここではNC旋盤での旋削加工を対象として、それらの確立した手法を統合して、騒音信号を使ったびびり振動の検出が可能かどうかを検討する。

2. びびり振動のモデル

丸い棒状の工作物と切削工具（以下バイト）を使った旋盤の切削加工の振動モデルは図1のように考えることができる。ただし図1では簡単のために振動方向を x 軸方向として図示してある。被削材の質量、バネ定数、減衰係数、変位を m_1, k_1, c_1, x_1 、バイトの質量、バネ定数、減衰係数、変位を m_2, k_2, c_2, x_2 、切削過程に起因するバネ定数、減衰係数を k_c, c_c とする。また、以下のモデルではびびり振動が発生するまでの状態を線形系

* 国土館大学理工学部理工学科機械工学系 教授
Professor, Mechanical Engineering Course, School of Science and Engineering, Kokushikan University

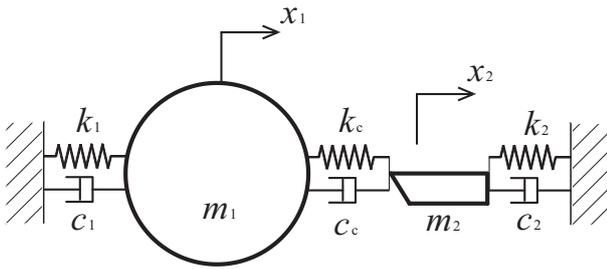


図1 切削振動モデル

として扱う。

なお以下では、工作物に比較してバイトの剛性が十分に大きいと仮定し、 k_2 、 c_2 で構成される振動系は剛体とする。また工作物とバイト間の減衰は小さいと仮定して考慮しない。バイトと工作物間のバネはバイトの食い込みに応じて反力すなわち切削力を発生させる。このバイト・工作物間に生じる力の変動分 F_c は現時点の工作物変位 $x_1(t)$ と工作物1回転前の工作物変位 $x_1(t-\tau)$ を用いて以下のように表される。ただし τ は工作物の回転周期である。

$$F_c = -k_c(x_1(t) - \mu x_1(t-\tau)) \quad (1)$$

式(1)の力の変動は再生効果と呼ばれる。1自由度振動系の再生効果を含んだ運動方程式は以下のように表される。

$$m_1 \ddot{x}_1(t) + k_1 x_1(t) + c_1 \dot{x}_1(t) = -k_c(x_1(t) - \mu x_1(t-\tau)) \quad (2)$$

工作物回転周期 τ を一定として式(2)の右辺を左辺に移行・変形し、かつ右辺にランダムな力変動 f_n を追加して、運動方程式が以下のように表現できたとする。ただし、時間表記は省略し、変位の添え字1も省略する。

$$m_1 \ddot{x} + kx + c\dot{x} = f_n \quad (3)$$

さらにこの運動方程式を、再生効果を含んだ状態での固有円振動数 ω_0 と減衰比 ζ を使って以下のように書き直す。 ε はノイズである。

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x = \varepsilon$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m_1}}, \quad \zeta = \frac{c}{2\sqrt{m_1 k}}, \quad \varepsilon = \frac{f_n}{m_1} \quad (4)$$

式(4)を伝達関数で表せば以下となる。

$$G(s) = \frac{X(s)}{E(s)} = \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (5)$$

3. 適応フィルタを使った減衰比の推定

標準Z変換(インパルス不変変換)を使えば、式(5)の系は以下の離散系へ変換される。ただし、 T は離散化の際のサンプリング周期である。

$$G(z) = \frac{X(z)}{E(z)} = \frac{1}{\omega_0 \sqrt{1-\zeta^2}} T e^{-\zeta\omega_0 T} \sin(\omega_0 T \sqrt{1-\zeta^2}) z^{-1} \\ = \frac{1}{1 - 2e^{-\zeta\omega_0 T} \cos(\omega_0 T \sqrt{1-\zeta^2}) z^{-1} + e^{-2\zeta\omega_0 T} z^{-2}} \quad (6) \\ = \frac{\theta_0 - \theta_1 z^{-1}}{1 - \phi_1 z^{-1} - \phi_2 z^{-2}}$$

すなわち、離散モデルとしてARMA(2,1)

$$x_i = \phi_1 x_{i-1} + \phi_2 x_{i-2} + \theta_0 \varepsilon_i - \theta_1 \varepsilon_{i-1} \quad (7)$$

が対応することになり、自己回帰パラメータと減衰比の間に以下の対応関係が成立する。

$$\omega_0 = \frac{1}{T} \sqrt{\frac{(\ln(-\phi_2))^2}{4} + \left(\cos^{-1} \frac{\phi_1}{2\sqrt{-\phi_2}}\right)^2} \quad (8)$$

$$\zeta = \frac{\ln(-\phi_2)}{-2\omega_0 T} \quad (9)$$

また、フィルタ設計でしばしば用いられる双1次変換

$$s = \frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})} = \frac{2(z-1)}{T(z+1)} \quad (10)$$

を使うと式(5)の系は離散モデルARMA(2,2)に対応づけられる。

$$G(z) = \frac{\frac{T^2}{4 + 4\zeta\omega_0 T + \omega_0^2 T^2} (1 + 2z^{-1} + z^{-2})}{1 - \frac{8 - 2\omega_0^2 T^2}{4 + 4\zeta\omega_0 T + \omega_0^2 T^2} z^{-1} + \frac{4 - 4\zeta\omega_0 T + \omega_0^2 T^2}{4 + 4\zeta\omega_0 T + \omega_0^2 T^2} z^{-2}} \quad (11) \\ = \frac{\theta_0 - \theta_1 z^{-1} - \theta_2 z^{-2}}{1 - \phi_1 z^{-1} - \phi_2 z^{-2}}$$

$$x_i = \phi_1 x_{i-1} + \phi_2 x_{i-2} + \theta_0 \varepsilon_i - \theta_1 \varepsilon_{i-1} - \theta_2 \varepsilon_{i-2} \quad (12)$$

この場合、自己回帰パラメータと減衰比の間に以下の対応関係が成立する。

$$\omega_0 = \frac{2}{T} \sqrt{\frac{1 - \phi_1 - \phi_2}{1 + \phi_1 - \phi_2}} \quad (13)$$

$$\zeta = \frac{1 + \phi_2}{\sqrt{(1 - \phi_1 - \phi_2)(1 + \phi_1 - \phi_2)}} \quad (14)$$

なお、いずれの場合もs平面の虚軸がz平面の単位円に写像され、安定限界は同じである。ここでは、次数の低いARMA(2,1)を使ってモデル化を行う。

切削加工中の騒音データにARMA(2,1)モデルを連続して逐次あてはめていく目的で適応フィルタを使う。式(7)のARMA(2,1)モデルの同定には以下の再帰型適応フィルタを使う。

$$\begin{aligned}
 y_k &= a_{1,k}x_{k-1} + a_{2,k}x_{k-2} + b_{1,k}y_{k-1} \\
 \varepsilon_k &= x_k - y_k
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

フィルタ係数を推定できればARMA (2,1) モデルの係数を以下の関係から求め、さらに固有円振動数と減衰比を計算することができる。

$$\begin{aligned}
 \phi_1 &= a_{1,k} + b_{1,k} \\
 \phi_2 &= a_{2,k} \\
 \theta_1 &= -b_{1,k}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

フィルタ係数の推定には逐次の更新演算が必要である²⁾。

$$\begin{aligned}
 a_{i,k+1} &= a_{i,k} + 2\mu\varepsilon_k \alpha_{i,k} \quad i=1,2 \\
 b_{1,k+1} &= b_{1,k} + 2\nu\varepsilon_k \beta_{1,k}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 \alpha_{i,k} &= u_{k-i} + b_{1,k} \alpha_{i,k-1} \quad i=1,2 \\
 \beta_{1,k} &= y_{k-1} + b_{1,k} \beta_{1,k-1}
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

逐次更新の繰り返し演算では適切な初期値の設定も重要である。本研究ではデータ取得直後の500データをモデル推定の対象から除外し、その500データにYule-Walker方程式³⁾をあてはめて2次自己回帰過程の係数を計算し逐次計算の初期値とする。信号の分散を c_0 、自己共分散を c_1 、 c_2 とすれば2次のYule-Walker方程式の解は以下となる。

$$\begin{aligned}
 \phi_1 &= \frac{c_1(c_0 - c_2)}{(c_0 - c_1)(c_0 + c_1)} \\
 \phi_2 &= \frac{c_0 c_2 - c_1^2}{(c_0 - c_1)(c_0 + c_1)}
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

4. 実験装置および切削結果

旋削加工中のびびり振動の検出可能性を検証するために、NC旋盤を用いて旋削加工を行い、加工中の騒音データを収集する。

図2に切削実験を行ったNC旋盤の内部を示す。細長い工作物をバイトで削ってマイクロフォンで切削加工中の騒音を検出する。NC旋盤ではバイト切れ刃が下向きのため図2の写真では切れ刃は見えない。マイクロフォンは、バイトに固定したカバーに取付けてあり、カバー内部に小型コンピュータを装着すれば外部との信号接続なしで異常検出も可能である。

今回の実験では、削り始め直前からの騒音信号をデータロガーに記録して後にオフラインで解析している。実験装置の構成を表1に示す。

加工条件は表2に示す内容である。工作物右端に支持用のセンタをあて、ドライ切削で工作物の右端から切削を行い加工中に騒音データを記録する。直径40mmの工作物を切込み1mmで削ってびびり振動が発生するまで、直径を2mmづつ小さくしていく。今回の実験では、工作物直径17mmの段階で切込み1mm、送り0.1mm/rev

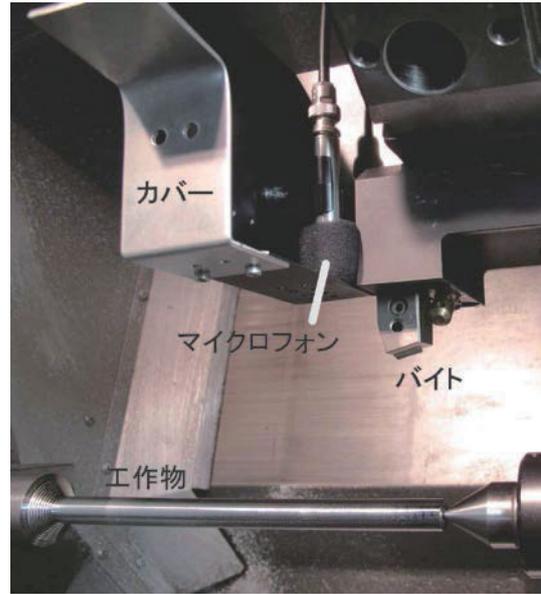


図2 切削実験装置 (NC旋盤内)

表1 実験装置の構成

項目	内容
マイクロフォン	マイクロフォン(MI-1235) プリアンプ(MI-3111) センサアンプ(SR-2210)(ゲイン 20dB)
データロガー	GL7000 入力レンジ±10V サンプリング周波数 10kHz フィルタ 5kHz

表2 加工条件

項目	内容
バイト	横切刃角 15°, 前, 横すくい角-6° シャンク 20×20
チップ	サーメット, チップブレーカ:SH
工作物	S45C, (初期)直径 40×長さ 350
切削条件	切削速度 120m/min 切込み(半径) 1mm 送り 0.2, 0.15, 0.1mm/rev
加工距離 (軸方向)	~217mm(最後Φ17→Φ15のとき) 直径Φ2mm減少ごとに 1mm減少

で切削したときにびびり振動が発生した。目視によれば、削り始め(右端)から約4mmでびびり振動が発生し、削り始めから約10mmではかなり強いびびり振動へと成長している。

図3にはびびり振動が発生した後の工作物を示す。また図4には工作物右端3mm, 7mmの位置からそれぞれ工作物の左方向へ測定した工作物軸方向の表面あらさ

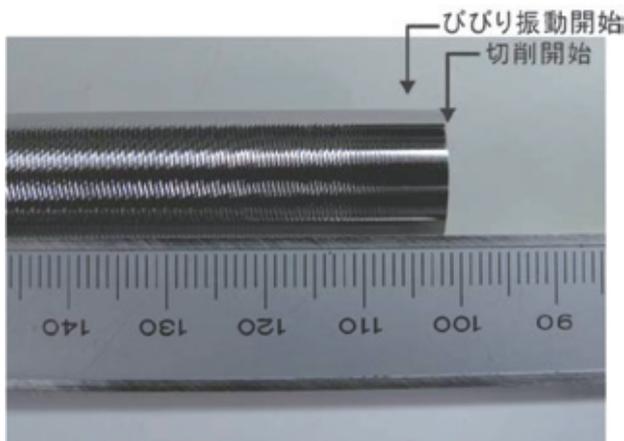


図3 びびり振動発生後の工作物

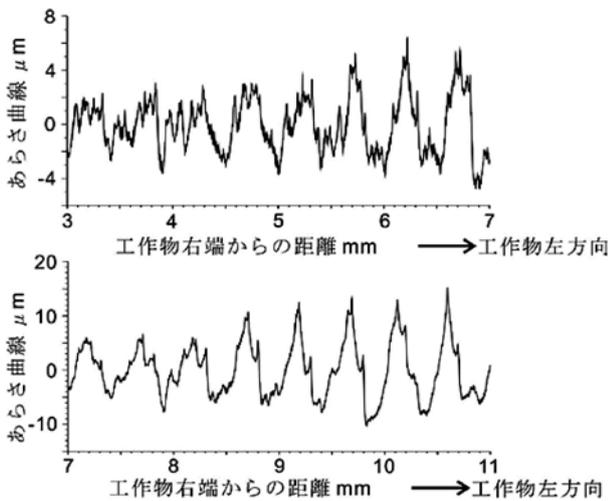


図4 びびり振動発生後の工作物のあらさ曲線

を示す。あらさ曲線を見ると、工作物右端から4～5mmの間でびびり振動が始まっていると判断できる。

5. 減衰比の推定

「3. 適応フィルタを使った減衰比の推定」で示した手法をデータロガー内の騒音データに適用して減衰比の推定を試み、またびびり振動の発生検知が可能であるかどうかを調べた。

適応フィルタの係数更新では式(17)に表れる定数 μ 、 ν を以下のように設定した。この定数は逐次推定の安定性に影響し、値が小さいほど安定して精度も良いが適応性が悪くなる。適応性を良くするために値を大きくすると途中で適応フィルタが不安定になる危険性がある。本研究では、最初の500データの共分散 c_0 と、ある定数 μ_0 を使って μ の値を $\mu = \mu_0 / c_0$ と定める。 μ_0 の初期値は $\mu_0 = 0.005$ とし、新しい1データごとに $\mu_0 \leftarrow 0.9999 \times \mu_0$ として少しずつ値を小さくしていく。ただし最小値は $\mu_0 = 0.0005$ で止めることとする。 ν は最初に $\nu = 0.01 \times \mu$ と設定し、その後は変化させない。

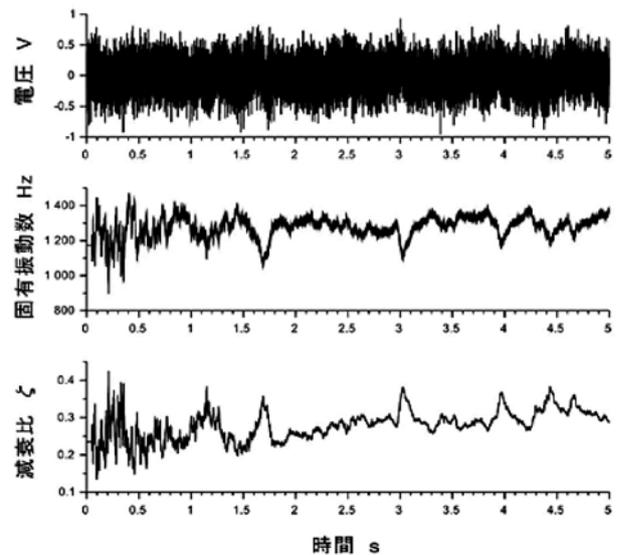


図5 びびり振動が発生していない時点での減衰比推定結果

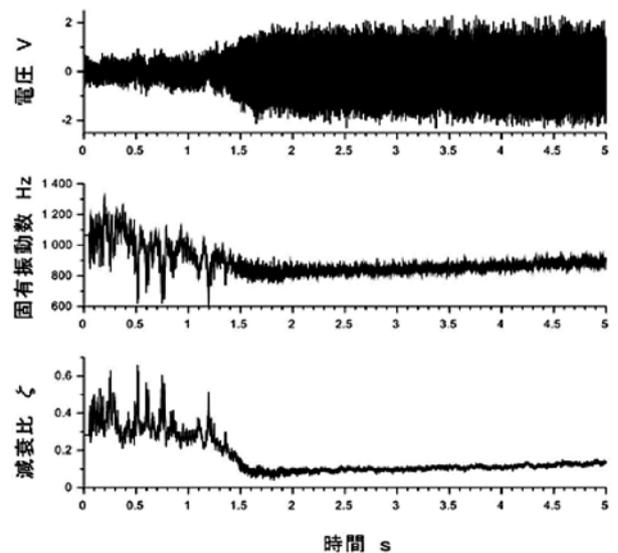


図6 びびり振動が発生した場合の減衰比推定結果

直径19mmの工作物を切込み1mm、切削速度120m/min、送り0.15mm/revで切削したときにびびり振動は発生していない。その場合の、騒音データ、固有振動数の推定値、減衰比の推定値の時間変化を図5に示す。

データ取得後、大きな減衰比が連続して推定されており、びびり振動が発生していないことを示唆する結果となっている。

直径17mmの工作物を切込み1mm、切削速度120m/min、送り0.1mm/revで切削したとき、目視では、削り始めから約4mmでびびり振動が発生し、その後、10mm程度で強いびびり振動へと成長している。このときの、騒音データ、固有振動数の推定値、減衰比の推定値の時間変化を図6に示す。データ開始から約1.3秒で

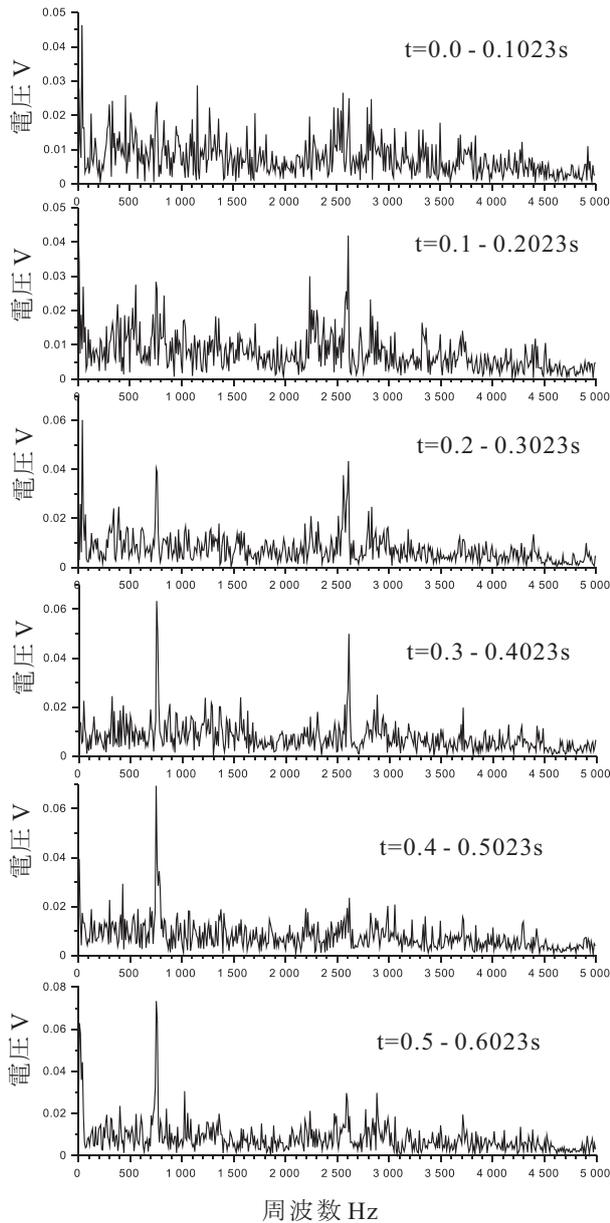


図7 振動取得初めからのスペクトルの変化

減衰比が減少しはじめ約1.5sで完全に低下している。この近傍でのびびり振動の発生が示唆されている。

本研究では、切れ刃が工作物にあたる直前から騒音信号の取り込みを始めているため、図5、図6の横軸の

どこが切削開始であるかについて、多少誤差を含んでいる。また、次のようなことも考えられる。切れ刃角15°で切込み1mmの場合、刃先のノーズ半径を考えなければ、切れ刃が工作物の角に接してから定常の切込みに達するまでに工具は0.27mm軸方向に移動する。図6のデータを取得した切削では工具が工作物軸方向に1秒あたり4.24mm移動する。したがって、このことより切削開始時点の定義に0.06s程度のあいまいさが生じる。そこで、データ取得直後のスペクトルを調べて切削開始をできるだけ正確に決めることにする。図6の騒音データについて0.1024秒ずつのスペクトルを計算すると図7のようになる。各スペクトルは1024データを高速フーリエ変換してその絶対値を表示したものである。図7のスペクトルは0.3秒から700Hz近傍のピークが一定の強さに達している。そこでスペクトルの形を考慮して切削開始をデータ取得始めから0.3秒後と考えることにする。これを考慮すると、図6の減衰比の変化からびびり開始は切削開始後、約1秒となり、距離に換算すると切削開始から約4mm強となる。この結果は図3において目で定めたびびり振動開始位置とよく対応しており、適応フィルタを使って減衰比の変化を追跡して、ほぼ正しくびびり振動の発生を検出できることがわかる。

6. ま と め

びびり振動系の減衰比を時系列モデルの自己回帰係数から計算する方法、適応フィルタの逐次推定を使って時系列モデルの係数を同定する方法を復習し、かつ統合して、びびり振動の発生を旋削加工中の騒音信号から検知する方法を検討した。実験データを使って検知手法を検証した結果、騒音信号と適応フィルタを用いて旋削加工中のびびり振動発生を検出可能であることを確認した。

参考文献

- 1) Bernard Widrow, Samuel D. Stearns, Adaptive Signal Processing, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1985, p.99.
- 2) Akira Kikuchi et al., Applications of Adaptive Digital Filtering to the Data Processing for the Environmental System, IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. ASSP-27, No.6, December 1979.
- 3) G.E.P.Box and G.M.Jenkins, Time Series Analysis forecasting and control, Holden-DAY, San Francisco, 1970, p60