

精密加工工場内における雑音分散値推定法を考慮した 有色性駆動源カルマンフィルタアルゴリズムを用いた雑音抑圧法

Noise Suppression using Colored Driving Source Type Kalman Filter Algorithm
for Noisy Factory Environment

寺島 大雅*

守谷 英純*

名取 隆廣†

*Hiromasa TERASHIMA

*Hidesumi MORIYA

†Takahiro NATORI

若御子 雅英‡

田邊 造*

古川 利博†

‡Masahide WAKAMIKO

*Nari TANABE

†Toshihiro FURUKAWA

1 はじめに

現在、精密加工工場内での精密加工工場内雑音は工場内で働いている人々に悪影響を及ぼすことが容易に想像できる。例えば、工場内での製造過程において監督者が作業者に指示を与えたり、注意する際に発せられた音声は精密加工工場内雑音によって相手に伝わりにくくなるだけでなく、指示が伝わりにくくなることで作業効率の低下や事故の原因となる。また、精密機械から発せられる警告音や異常音が精密加工工場内雑音に埋もれてしまい聞こえにくくなると、不良品の増加はもとより機械の故障による生産ラインの停止につながるおそれがある。そのため、劣化音声信号からクリアな音声信号を抽出する手法は、近年さまざまな手法が提案されている [1],[2],[3]。

本論文では、精密加工工場内で用いる雑音抑圧装置の開発を目指すため、コストが低くモバイル性が高いローパワーな単一マイクロフォンによって劣化音声信号を得た後に、その劣化音声信号を雑音抑圧装置によって雑音抑圧した信号をイヤホンから出力するアルゴリズムについて議論する。

ANC (Adaptive Noise Canceller) は単一マイクロフォンを用いた代表的な雑音軽減手法である [3]。しかしながら、この手法はピッチ検出が必要となるため、ピッチ検出法によって雑音抑圧能力が左右される問題が存在している。

この問題を解決する手法として、線形予測を用いた手法が提案されている [1]。この手法は、シンプルであるため実用的な反面、音声信号に依存するパラメータを必要とする問題点が存在している。

一方、上記の手法とは異なる手法として、高い雑音抑圧能力を有することが知られているカルマンフィルタを用いた手法が提案されている [2]。この手法は、(Step 1) 音声信号を AR システムのパラメータ (以後、AR 係数と称する) を用いてモデル化することで AR 係数を推定する。(Step 2) Step 1 で推定した AR 係数を用いた状態方程式および音声信号に雑音が加わった劣化音声信号を用いた観測方程式から構成される状態空間モデルに対して、カルマンフィルタ理論を適用さ

せることより雑音を抑圧している。しかしながら、この手法は AR システムの次数決定問題に起因する AR 係数推定精度の劣化が雑音抑圧能力に依存するため、クリアな音声信号を推定することが困難な場合が存在する。

この問題を解決する手法として、著者らは AR 係数を必要としない有色性駆動源カルマンフィルタを用いた雑音抑圧法を提案した [5]。しかしながら、この手法は雑音分散値を経験的に求める必要があるため実環境への対応が困難となる可能性も考えられる。

本論文では精密加工工場内雑音に対しての雑音分散値を自動的に求め、有色性駆動源カルマンフィルタによりクリアな音声信号を推定する雑音抑圧法を提案する。この提案手法は、(Step 1) 劣化音声信号の相関によって音声区間と雑音区間を判定し、(Step 2) 劣化音声信号のスペクトルおよび雑音区間の精密加工工場内雑音のスペクトルを用いてスペクトルサブトラクション法より雑音分散値を推定した後に、(Step 3) 音声信号のみからなる有色性駆動源を有する状態方程式、および音声信号と雑音からなる観測方程式で構成される状態空間モデルに対して、有色性駆動源カルマンフィルタアルゴリズムを用いることで雑音抑圧を実現している。

提案手法の特徴は、(1) 茅野市精密加工企業の工場内にて、DSP ボードを用いてリアルタイムに Step 1~Step 3 を実装することに成功し、かつ (2) 高い雑音抑圧能力を実現していることである。

2 問題設定

劣化音声信号 $r(n)$ は、クリアな音声信号 $d(n)$ に精密加工工場内雑音 $v(n)$ が加わることより、次式

$$r(n) = d(n) + v(n) \quad (1)$$

で表わされる。ここで、精密加工工場内雑音 $v(n)$ は $E[v(n)] = 0$ であり、音声信号 $d(n)$ との相関 $E[d(n) \cdot v(n)] = 0$ となる。また $E[v(n)^2] = \sigma_v^2$ とおくこととする。ただし $E[\cdot]$ は期待値を表す。

本論文は、音声信号 $d(n)$ に精密加工工場内雑音 $v(n)$ が加わった劣化音声信号 $r(n)$ のみからクリアな音声信号 $d(n)$ のみを推定することで工場内での作業環境の改善を目的とする。

* 諏訪東京理科大学

† 東京理科大学

‡ 株式会社ミクロン精工

3 提案手法

本章では相関およびスペクトルサブトラクション法により雑音分散値の推定を行い、有色性駆動源カルマンフィルタを用いることで劣化音声信号のみからクリアな音声信号を推定する雑音抑圧法を提案する。

3.1 Step 1 : 音声区間・雑音区間の判定

本節では、自己相関関数を用いた VAD (Voice Activity Detection) [6] について説明する。この手法は音声信号と精密加工工場内雑音それぞれの相関値のピークが異なることに注目し、音声区間と雑音区間の判別を可能とするものである。

劣化音声信号 $r(n)$ は、 L サンプルのオーバーラップ分を含めた $2L$ サンプル分のフレームに分割される。窓長が $2L$ の窓関数 $h(n)$ を適用すると、次に示す窓かけをした劣化音声信号 $\hat{r}_i(n)$ を得る。

$$\hat{r}_i(n) = \begin{cases} h(n) \cdot r(n) & (1 < n < L) \\ h(n) \cdot r(n - L) & (L < n < 2L) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 i はフレーム番号を示す。

i フレーム目の劣化音声信号 $\hat{r}_i(n)$ と τ サンプルずらした i フレーム目の劣化音声信号 $\hat{r}_i(n + \tau)$ との自己相関関数 $r_{rr}(\tau)$ は

$$\begin{aligned} r_{rr}(\tau) &= \frac{\sum_{n=0}^{2L-1-\tau} \hat{r}_i(n) \hat{r}_i(n + \tau)}{2L - \tau} \\ &= \frac{\sum_{n=0}^{2L-1-\tau} \{d_i(n) + v_i(n)\} \{d_i(n + \tau) + v_i(n + \tau)\}}{2L - \tau} \end{aligned} \quad (3)$$

のように表される。また、音声信号 $d(n)$ と精密加工工場内雑音 $v(n)$ は問題設定において無相関を仮定したことより、式 (3) は

$$\begin{aligned} r_{rr}(\tau) &\approx r_{dd}(\tau) + r_{vv}(\tau) \\ &\approx r_{dd}(\tau) \quad (\tau \neq 0) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ここで $r_{dd}(\tau)$ 、 $r_{vv}(\tau)$ は

$$\left. \begin{aligned} r_{dd}(\tau) &= \frac{1}{2L - \tau} \sum_{n=0}^{2L-1-\tau} d_i(n) d_i(n + \tau) \\ r_{vv}(\tau) &= \frac{1}{2L - \tau} \sum_{n=0}^{2L-1-\tau} v_i(n) v_i(n + \tau) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

である。

式 (5) の精密加工工場内雑音 $v_i(n)$ の自己相関関数は、 $\tau \neq 0$ の場合無相関となり、 $r_{vv}(\tau) \approx 0$ が成り立つため音声信号の自己相関値のみが抽出可能である。このことから雑音の影響を受けずに自己相関 $r_{rr}(\tau)$ を用いて劣化音声信号 $r(n)$ に含まれる音声信号の自己相関値が検出可能となる。

ここで入力信号の音量によって自己相関の値が変動してしまう理由から劣化音声信号のパワーを用いて正規化した自己相関の式は

$$r'_{rr}(\tau) = \frac{\sum_{n=0}^{2L-1-\tau} \hat{r}_i(n) \hat{r}_i(n + \tau)}{\sum_{n=0}^{2L-1} \hat{r}_i^2(n)} \quad (6)$$

となる。また、式 (6) より求めた自己相関 $r'_{rr}(\tau)$ は、時間差 τ が大きくなるにつれて自己相関の計算に用いるサンプル数が少なくなるため、振幅が減少する。よって、式 (6) をさらに改良することにより、 τ の値による振幅の変動を補正した式を以下に示す。

$$r''_{rr}(\tau) = \frac{1}{2L - \tau} \frac{\sum_{n=0}^{2L-1-\tau} \hat{r}_i(n) \hat{r}_i(n + \tau)}{\sum_{n=0}^{2L-1} \hat{r}_i^2(n)} \quad (7)$$

式 (7) より導出された劣化音声信号の相関値 $r''_{rr}(\tau)$ より i フレームにおけるピーク値 $p(i)$ を検出する。

$$p(i) = \max \{ r''_{rr}(\tau) \} \quad (\tau = 1 \cdots 2L) \quad (8)$$

ここで $\max\{\cdot\}$ は劣化音声信号の相関値のうち最大値を見つける処理である。

音声区間は雑音区間よりも高いピーク値が得られることが期待できることから、式 (8) より導出されたピーク値と以下に説明する閾値 $\sigma(i)$ を用いることにより、劣化音声信号 $\hat{r}_i(n)$ が音声区間かもしくは雑音区間かの判別をする。

閾値 $\sigma(i)$ は、まず先頭 3 フレーム分のピーク値の平均値を初期の閾値とする。そして、 i フレーム目のピーク値が 1 フレーム前の閾値より小さかった場合、1 フレーム前で計算した 3 フレーム分のピーク値の中で最も過去にある値を破棄し、 i フレーム目のピーク値と過去 2 フレーム分の自己相関値の平均値を i フレーム目の閾値 $\sigma(i)$ として各フレーム毎に更新する。

最終的な音声区間と雑音区間の判別は、ピーク値 $p(i)$ が閾値 $\sigma(i)$ よりも小さい場合を雑音区間、ピーク値 $p(i)$ が閾値 $\sigma(i)$ よりも大きい場合を音声区間とした。また、音声区間が 3 回続いた場合のみ次のフレームも音声区間とした。

次節では雑音分散値推定のために、音声区間または雑音区間として判断された劣化音声信号 $\hat{r}_i(n)$ の処理方法について議論する。

3.2 Step 2 : 雑音分散値の推定

本節では雑音分散値の推定法について説明する。定常的な雑音の場合、雑音分散値は前節で雑音区間として判別された区間の信号を用いて導出が可能である。しかしながら実環境を想定した場合、必ずしも雑音が定常であるとは限らない。そこで提案手法では、フレームごと雑音分散値を導出する。また音声区間として判別された区間の雑音分散値も正確に推定するために、スペクトルサブトラクション法 [7] を用いて暫定的な推定音声スペクトルを導出し、時間領域において劣化音声信号から推定音声信号を減算することにより、音声区間の雑音を推定することで雑音分散値を導出する。

i フレーム目の劣化音声信号 $\hat{r}_i(n)$ の $2L$ 点における離散フーリエ変換 (DFT) を計算すると

$$|R_i(k)| = |D_i(k)| + |V_i(k)| \quad (9)$$

と表わされる。ここで、 $|R_i(k)|$ 、 $|D_i(k)|$ 、 $|V_i(k)|$ はそれぞれ劣化音声信号の周波数スペクトル、音声信号の周波数スペクトル、精密加工工場内雑音の周波数スペクトルであり、 i はフレーム数、 k は周波数番号とする。前節で判別した雑音区間および音声区間それぞれの処理方法について以下に示す。

3.2.1 雑音区間

雑音区間として判別された区間には音声信号が含まれていないため、精密加工工場内雑音スペクトルは劣化音声スペクトルに等しい。

よって、推定雑音スペクトル $|\hat{V}_i(k)|$ は

$$|\hat{V}_i(k)| = |R_i(k)| \quad (10)$$

となる。

3.2.2 音声区間

音声区間ではスペクトルサブトラクション法を用いて音声スペクトルの推定をする。

スペクトルサブトラクション法は、劣化音声信号のスペクトル $|R_i(k)|$ から、雑音スペクトル $|\hat{V}_i(k)|$ を減算することで推定音声のスペクトル $|\hat{D}_i(k)|$ を得る手法である。ここで精密加工工場内雑音スペクトル $|\hat{V}_i(k)|$ はパフファなどに格納しておいた 1 フレーム前の精密加工工場内雑音スペクトルを用いることとする。しかしながらこの場合、劣化音声信号のスペクトルから直接 1 フレーム前の精密加工工場内雑音スペクトルを減算すると、音声区間に含まれる精密加工工場内雑音スペクトルとは異なるため臨む結果を得ることができない可能性がある。そこで提案手法では、過去の精密加工工場内雑音スペクトル $|\hat{V}_{i-1}(k)|$ を現フレームの劣化音声スペクトル $|R_i(k)|$ を用いて平滑化することで、音声区間に含まれる精密加工工場内雑音スペクトルに近づけている。

$$|\hat{V}_i(k)| = \alpha \cdot |\hat{V}_{i-1}(k)| + (1 - \alpha) \cdot |R_i(k)| \quad (11)$$

ここで、 α は平滑化定数である。

式 (11) より導出された精密加工工場内雑音スペクトルを用いて推定音声スペクトルは次式により求める。

$$|\hat{D}_i(k)| = [|R_i(k)|^\gamma - \beta \cdot |\hat{V}_i(k)|]^\frac{1}{\gamma} \quad (12)$$

ここで、 γ はスペクトルサブトラクション法のパラメータであり、 $\gamma = 2$ の場合はパワースペクトルサブトラクション法となる。また重み β は、精密加工工場内雑音スペクトルが劣化音声スペクトルよりも小さくなるまで精密加工工場内雑音スペクトルの値を半分に続けることにより、推定した精密加工工場内雑音スペクトルが劣化音声信号のスペクトルより大きくなり右辺の値がマイナスになる問題や、劣化音声スペクトルから精密工場内雑音スペクトルを引きすぎてしまうことにより発生するミュージカルノイズの問題を改善している。

推定音声スペクトルを時間信号に戻すために、以下のようにより劣化音声スペクトルを用いて位相を計算する。

$$\hat{D}_i(k) = |\hat{D}_i(k)| \cdot \exp\{j\angle R_i(k)\} \quad (13)$$

推定音声信号スペクトル $\hat{D}_i(k)$ を離散フーリエ逆変換 (IDFT) により、周波数領域から時間領域に変換を行う。そして次のように多重加算を行い、推定音声信号 $\hat{d}(n)$ を得る。

$$\hat{d}(n) = \hat{d}_i(n + L) + \hat{d}_i(n) \quad (1 < n < L) \quad (14)$$

最終的に推定雑音分散値 $\sigma_v^2(n)$ は以下のように求められる。

$$\sigma_v^2(n) = \begin{cases} E\{[r_i(n) - \hat{d}_i(n)]^2\} & \text{音声区間} \\ E[r_i^2(n)] & \text{雑音区間} \end{cases} \quad (15)$$

3.3 Step3 : 音声信号の推定 [5]

本節では、有色性駆動源カルマンフィルタを用いた音声信号推定について説明する。

有色性駆動源カルマンフィルタにおける L_p 次元の状態ベクトル $\mathbf{x}_p(n+1)$ を

$\mathbf{x}_p(n+1) = \begin{bmatrix} d(n+1), d(n), \dots, d(n-L_p+2) \end{bmatrix}^T$ と定義したとき、AR システムのコンセプトを用いずに音声信号のみで状態方程式を表わすと
[状態方程式]

$$\mathbf{x}_p(n+1) = \Phi_p \mathbf{x}_p(n) + \delta_p(n+1) \quad (16)$$

となる。ここで、 $(L_p \times L_p)$ 行列の状態遷移行列 Φ_p と L_p 次元駆動源ベクトル $\delta_p(n)$ は次式となる。

$$\Phi_p = \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (17)$$

$$\delta_p(n+1) = \begin{bmatrix} d(n+1), 0, \dots, 0 \end{bmatrix}^T$$

このとき、式 (17) の $(L_p \times L_p)$ 行列の提案手法の状態遷移行列 Φ_p は、0 と 1 のみで構成されているシフト行列となっていることにより、状態遷移行列 Φ_p の演算量が少ないことが容易に想像できる。また、駆動源ベクトル $\delta_p(n)$ は式 (17) に示すように音声信号 $d(n)$ のみで構成されていることから有色性駆動源となる。

次に、式 (1) より音声信号に精密加工工場内雑音を加わって構成された劣化音声信号を観測方程式 $y_p(n+1) = r(n+1)$ で表わすと
[観測方程式]

$$y_p(n+1) = r(n+1) = \mathbf{m}_p^T \mathbf{x}_p(n+1) + \epsilon_p(n+1) \quad (18)$$

ようになる。 L_p 次元観測ベクトル $\mathbf{m}_p$ と雑音 $\epsilon_c(n+1)$ は次式となる。

$$\mathbf{m}_p = \begin{bmatrix} 1, 0, \dots, 0 \end{bmatrix}^T, \quad \epsilon_p(n+1) = v(n+1) \quad (19)$$

提案手法は式 (16) の状態方程式と式 (18) の観測方程式から状態空間モデルを構成し、有色性駆動源型カルマンフィルタアルゴリズムを用いて雑音抑圧を実行することでクリアな音声信号の推定をしている。提案手法のアルゴリズムを表 1 に示す。

4 実装評価

本章では、提案手法の有効性を明白にするために、従来手法を AR 係数を用いたカルマンフィルタアルゴリズムである Kim らの手法 [2] として、提案手法と比較する。

今回、実験方法として (1) 実際に茅野市精密会社・株式会社ミクロン精工の工場内 (図 1 参照) にて、私たちが用意した文章を 20 代女性に読んでもらい、(2) 精密加工工場内雑音で劣化した 20 代女性の音声サンプル周波数 32kHz で録音した後に、(3) TEXAS INSTRUMENTS 社製品 TMS320C6713DSK の DSP ボード (図 2 参照) に録

表 1: 提案手法のアルゴリズム

Step 1: 自己相関による VAD

$$r''_{rr}(\tau) = \frac{1}{2L-\tau} \frac{\sum_{n=0}^{2L-1-\tau} \hat{r}_i(n) \hat{r}_i(n+\tau)}{\sum_{n=0}^{2L-1} \hat{r}_i^2(n)}$$

$$p(i) = \max \{r''_{rr}(\tau)\} \quad (\tau = 1 \cdots 2L)$$

Step 2: スペクトルサブトラクション法

$$|\hat{D}_i(k)| = \begin{cases} [|R_i(k)|^\gamma - \beta \cdot |\hat{V}_i(k)|]^\frac{1}{\gamma} & (p(i) > \sigma) \\ 0 & (other) \end{cases}$$

$$\sigma_v^2(n) = \begin{cases} E[\{r_i(n) - F^{-1}[\hat{D}_i(k)]\}^2] & (\text{音声区間}) \\ E[r_i^2(n)] & (\text{雑音区間}) \end{cases}$$

Step 3: 有色性駆動源カルマンフィルタ

[Initialization]

$$\hat{x}_p(0|0) = \mathbf{0}, \quad P_p(0|0) = I, \quad r_{\epsilon_p}(n+1) = \sigma_v^2(n)$$

$$R_{\delta_p}(n+1)[i, j] = \begin{cases} \frac{1}{L_p-1} \sum_{l=0}^{L_p-1} r^2(n-l) - \sigma_v^2(n) & (i, j = 1) \\ 0 & (other) \end{cases}$$

$$1. P_p(n+1|n) = \Phi_p P_p(n|n) \Phi_p^T + R_{\delta_p}(n+1)$$

$$2. \mathbf{k}_p(n+1) = \{P_p(n+1|n) \mathbf{m}_p\} \cdot \{\mathbf{m}_p^T P_p(n+1|n) \mathbf{m}_p + r_{\epsilon_p}(n+1)\}^{-1}$$

$$3. \hat{\mathbf{x}}_p(n+1|n) = \Phi_p \hat{\mathbf{x}}_p(n|n)$$

$$4. \hat{\mathbf{x}}_p(n+1|n+1) = \hat{\mathbf{x}}_p(n+1|n) + \mathbf{k}_p(n+1) \cdot \{y_p(n+1) - \mathbf{m}_p^T \hat{\mathbf{x}}_p(n+1|n)\}$$

$$5. P_p(n+1|n+1) = \{I - \mathbf{k}_p(n+1) \mathbf{m}_p^T\} P_p(n+1|n)$$

$$6. n = n+1 \quad \text{go back Step 1.}$$

音した音声を入力する。(4)そしてDSPボード内のFlashから雑音抑圧するコードを6713DSPに呼び出し、実行することでリアルタイムに処理し音声信号の推定をしている。

また提案手法の有効性を確認するために、従来手法と提案手法をDSPへ実装を行った結果に対して、(i)波形評価、(ii)主観評価、(iii)演算量評価を用いて性能比較を行っている。

4.1 波形評価

音声信号に精密加工工場内雑音を加わった劣化音声信号(図4)に対して、従来手法[2]と提案手法の結果を図5、図6に示す。なお図7は提案手法のVADの結果である。

自己相関によりVADを行った結果(図7)について考察すると、VADを行った際、雑音区間であれば劣化音声信号をそのまま出力をし、音声区間では信号を出力しないようにしているため図7では音声区間、雑音区間がはっきり判別出来ていることが確認できる。



図 1: 実験風景 (録音時)



図 2: DSP ボード実装時

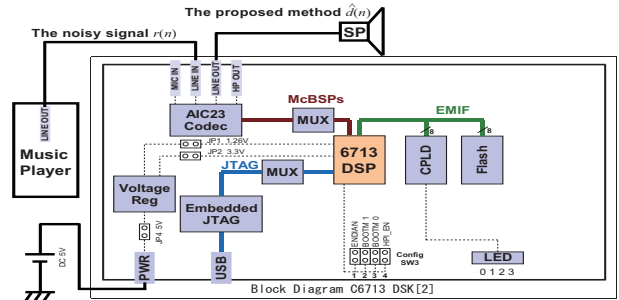


図 3: DSP ボードのブロック図

また図5、図6から提案手法は従来手法よりも精密工場内雑音に対して良好な抑圧することが可能であり、クリアな音声信号を推定することが出来ていることが確認できる。

このことにより、提案手法はStep 1 および Step 2 によって正確な雑音分散値推定を可能とすることで Step 3 にて高性能な雑音抑圧を可能にしている。

4.2 主観評価

音質を評価するために、MOS(Mean Opinion Score)評価を用いて主観評価を行った。これは表2に示す5段階評価基準に従って、50人(男性25人、女性25人)に比較評価してもらい、この結果の平均値を評価結果として図8にまとめたものである。

図8のMOS結果より、提案手法は従来手法よりも高い値となった。このことから、提案手法は高音質を維持しながら高い雑音抑圧能力を実現していることがわかる。

4.3 演算量評価

本節の演算量評価では、従来手法と提案手法の乗算回数を表3に示すとともに、その乗算回数を演算量として比較した結果を図9に示す。

図9の結果より従来手法はAR次数(もしくは状態遷移行列 Φ_c のサイズ) L_c の増加に対して単調増加するが、提案

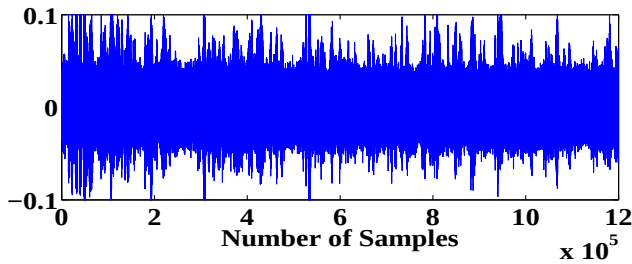


図 4: 劣化音声信号

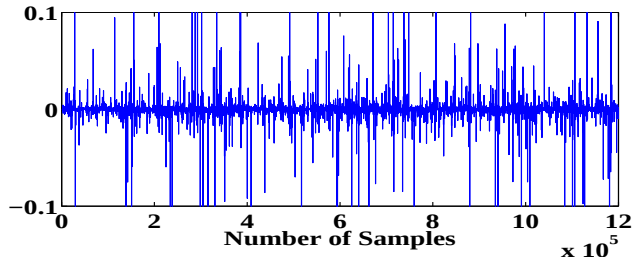


図 5: 従来手法 [2]

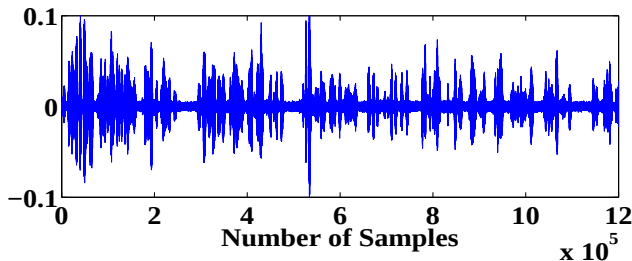


図 6: 提案手法

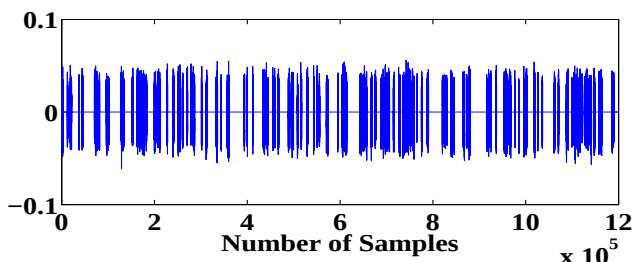


図 7: 自己相関結果

手法は状態行列 Φ_p のサイズ L_p に関係なく常に一定である。このことにより、提案手法は従来手法と比較して高速な雑音抑圧法といえる。

5 まとめ

本論文は、(Step 1) 相関によって音声区間と雑音区間の判定を行い、(Step 2) スペクトルサブトラクション法により雑音分散値を推定した後に、(Step 3) 音声信号のみからなる有色性駆動源を含む状態方程式、および音声信号と雑音からなる観測方程式を構成した状態空間モデルに対して、有色性駆動源カルマンフィルタアルゴリズムを用いることで雑音抑圧を行う手法を提案した。

提案手法は、精密加工工場内という実環境において、Step 1 と Step 2 により、精密加工工場内雑音の分散値を推定した後に、有色性駆動源カルマンフィルタアルゴリズムを用いることで少ない演算量でかつ、音質を犠牲にすることなく高性能な雑音抑圧を実現している。

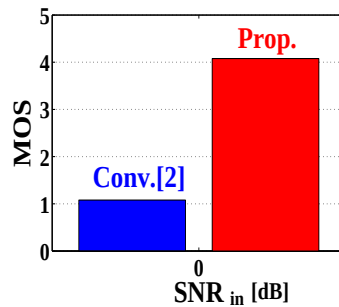


図 8: MOS 評価

表 2: MOS 評価基準

基準	評価値
非常に良い	5
良い	4
普通	3
悪い	2
非常に悪い	1

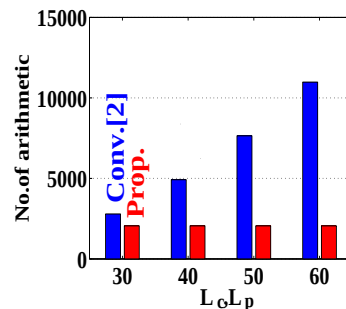


図 9: 従来手法 [2] 及び提案手法の乗算回数

表 3: 乗算回数比較表

Computing or Solving	Multiplications	
	Conv.[2]	Prop.
Step1	0	2048
Step2	0	0
Step3	$3L_c^2 + 3L_c$	3
Total	$3L_c^2 + 3L_c$	2051

以上のことより、DSP ボードによる実装評価の結果を含め、提案手法は従来手法よりもシンプルで実用的な手法と考えられる。

参考文献

- [1] 川村 新, “線形予測分析に基づく騒音抑圧法”, 電子情報通信学会誌 Vol.J85-A No.4 pp.415-423 April 2002
- [2] W, Kim, “Noise Variance Estimation for Kalman Filtering of Noisy Speech”, IEICE TRANS. INF. & SYST., VOL. E84-D, NO.1 January 2001
- [3] 梶川 嘉延, 野村 康雄, “2次元経路モデルを必要としないアクティブノイズコントロールシステム”, 信学論 Vol.J82-A No.2 pp.209-217 February 1999.
- [4] R.E.Kalman, “A new approach to Linear Filtering and Prediction Problems”, Trans.ASME-journal of Basic Engineering, Vol.82,no.series-D,pp.34-45,1960.
- [5] N. Tanabe, T. Furukawa, S. Tsujii, “Robust Noise Suppression Algorithm with the Kalman Filter Theory for White and Colored Disturbance”, IEICE Trans. Fundamentals, vol.E91-A, No.3, March 2008.
- [6] 山口 晶大, はじめての DSP 活用大全, CQ 出版社, 2006.
- [7] 岡崎 雅嗣, 国本 利文, 小林 隆夫, “信号の非定常性を考慮したスペクトルサブトラクション”, 電子情報通信学会技術研究報告, pp.41-46, September 2003