

時変FIRフィルタを用いたフルート音の分析

加藤充美¹、西村明²、安藤由典

1. くらしき作陽大学音楽学部
2. 東京情報大学総合情報学部

筆者らはフルート演奏音の倍音の微細な変動のフルート音の品質への影響を手法として解析信号を用いて研究している。フルート音には、倍音の振幅や周波数の変動とともに息音に起因するノイズ成分が含まれている。これまでの研究から、このノイズ成分は倍音の変動にも影響を及ぼし、その影響も好みによって2つのグループに分かれることなどがわかってきた。我々はこの研究を発展させフルート演奏において演奏者の意図がどのように音に反映し聴取者に伝わるかの研究を進めていくことにした。そのため旋律を色々な表情付けで演奏し、その音の分析・合成を解析信号で行って試聴実験を進めることにしている。本報告では時変FIRフィルタによる倍音分離を利用したフルートの旋律演奏音の分析を紹介する。

解析信号、楽音分析、FIRフィルタ、周波数変調、振幅変調、ノイズ成分

Analysis of flute tones by analytic signal with time variant FIR filter

Mitsumi Kato¹、Akira Nishimura²、Yoshinori Ando

1. Kurashiki Sakuyo University, Faculty of music

2. Tokyo University of Information Science
Faculty of Business Administration and Information Science

We have been studying the influence on the tone quality of flute tones of the fine fluctuation of frequency and amplitude of each harmonic by means of analytic signal. Any flute tone has not only modulation of frequency and amplitude in each harmonic but also noise components created by breath. From our previous research, it has been shown that the noise components affect the fluctuation of frequency and amplitude and that the influence divides subjects into two groups by liking etc. In the following stage, we will develop this research further and will study how the intention of a player to be reflected in sound and to be felt by listeners in flute performances. Therefore, some melodies will be performed by various expressions, analyzed by means of analytic signal and the auditory experiments with synthesis tones with various conditions. In this paper, it is shown the analysis method of flute melody tones by means of analytic signal with time variant FIR filters that separate tones into each harmonic components.

analytic signal, musical tone analysis, FIR filter, frequency modulation, amplitude modulation, noise component

1. はじめに

筆者の一人安藤はフルートやリコーダなどエアリード楽器の演奏音について、倍音の変動やノイズ成分がそれらの楽器音の品質への影響を長年に渡って研究している^{1) 2) 3) 4)}。近年コンピュータの進歩に伴い、以前では実現困難であった精密な音響分析・合成処理がパソコン上で簡単に且つ正確に行える環境が整い、楽器音のより精細な分析研究が可能となってきた。筆者らは安藤の研究を発展させ、フルート音の倍音の微細な変動がそれらの楽器音の品質に与える影響を解析信号の手法を用いて研究してきた^{5) 6) 7) 8)}。

フルートなどエアリード楽器の演奏音には、図1に示すスペクトル例から読み取ることができるように各倍音の間に振幅や周波数の変動による側帯波とともに息音に起因すると考えられるノイズ成分が含まれている。

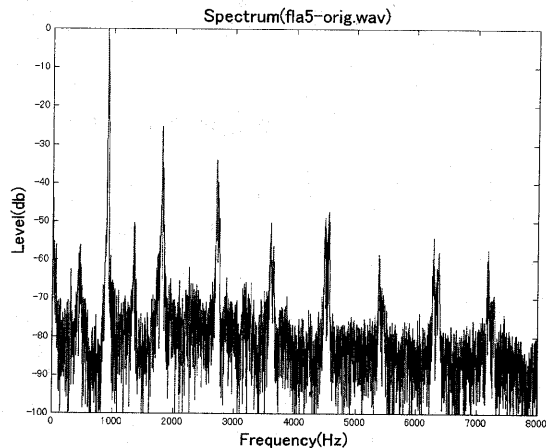


図1. フルートのスペクトル例

この成分はピブラートによる側帯波よりレベルが大きく、振幅や周波数の細かい変動を与える⁸⁾。このような音に対し周波数や振幅の変動とノイズ成分をあわせて分析し、変動の深さなどのパラメータを変化させて合成して試聴する手法として解析信号を用いた分析・合成手法が有効である⁹⁾。

各倍音の変動を高い成分・低い成分に分けて制御して合成試聴実験した結果、変動が多い音を好むグループと少ない音を好むグループに分かれ、またこのグループの分かれ方がフルートの経験に拠らないことなどが解った。また変動も振幅の変動より周波数の変動のほうが影響が大きいことなどが解った。またランダム波形から合成した波形との聞こえとの差から、ピブラートに同期した細かい変動の影響があることなどが示唆された。

我々はこの研究をさらに発展させ、フルート演奏において演奏者の意図がどのように音に反映し聴取者に伝わるかの研究を進めていくことにした。そのために適当な旋律を色々な表情付けで演奏し、その音の分析と合成音に拠る試聴実験を進めることにしている。フルート音の分析・合成には解析信号による手法が適している。旋律演奏音にこの手法を生かすためには、大きく変化する周波数に追従して倍音を位相の歪みがなく分離することが必要である。ここでは、FIRによる時変フィルタによる倍音分離を利用したメロディー演奏音の分析合成を紹介する。

2. 解析信号による周波数分析

解析信号とは、実信号 $x(t)$ に対し次の式で示される信号のことである。

$$y(t) = x(t) + jH[x(t)] \quad \text{①}$$

ここで $H[x(t)]$ は $x(t)$ をヒルベルト変換して得られる信号を表す。 $y(t)$ は複素信号であるから、各時刻の絶対値と位相角をそれぞれ $a(t)$ 、 $\phi(t)$ とすると

$$y(t) = a(t) e^{j\phi(t)} \quad \text{②}$$

と表わすことができる。 $a(t)$ が振幅、 $\phi(t)$ の微分が周波数となるわけである^{10) 11)}。

実際の計算ではヒルベルト変換のインパルス応答が有限の時間で終わるように時間窓を掛けて計算を行う。こうして得られる周波数の分析誤差は 1% 以下になる⁹⁾。

解析信号を利用した分析法は、②式からわかるように、一つの搬送波の変調された信号に対して有効である。従ってフルート音のようにいくつかの倍音からなる音を一括して扱うことはできないのでバンドパスフィルタで個々の倍音に分離し、倍音毎に振幅・周波数を分析する。バンドパスフィルタ

の帯域は、中心周波数を基本周波数の整数倍としバンド幅をピッチ周波数としている。またこのフィルタ処理では位相歪が発生しないように直線位相のFIRフィルタを用いている。旋律演奏音を分析する場合、各音符毎に周波数が大きく異なるので一定の中心周波数のフィルタで倍音を分離することができない。また帯域幅も音符ごとに変える必要がある。従って音を音符ごとに区切って分析するか、あるいは時変FIRフィルタを用いて倍音を分離して分析するかどちらかを採用する必要がある。ここでは時変FIRフィルタを用いて倍音を分離する。

3. 時変FIRフィルタによる倍音分離 3-1 処理の流れ

時変FIRフィルタを利用したフルート旋律演奏音の分析全体の流れを図2に示す。まず基本周波数を推定し、得られた基本周波数に基づいた中心周波数と通過帯域幅のFIRフィルタを構成し倍音を分離する。分離した倍音の解析信号から周波数と振幅を検出するという手順になる。

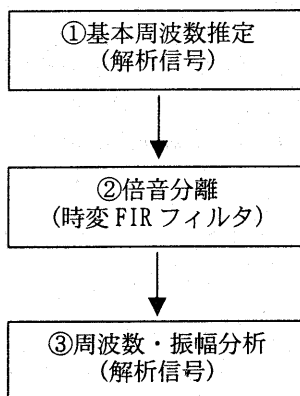


図2. 時変FIRフィルタと解析信号を用いた旋律演奏音の振幅・周波数分析の手順

3-2 時変FIRフィルタ構成の原理

FIRフィルタは任意の特性を構成し易く、また位相歪みが無いフィルタを構成することができる。解析信号を用いた分析では分析結果は位相の歪に敏感なので、倍音の分離には位相歪のないFIRフィルタを用いる必要がある。

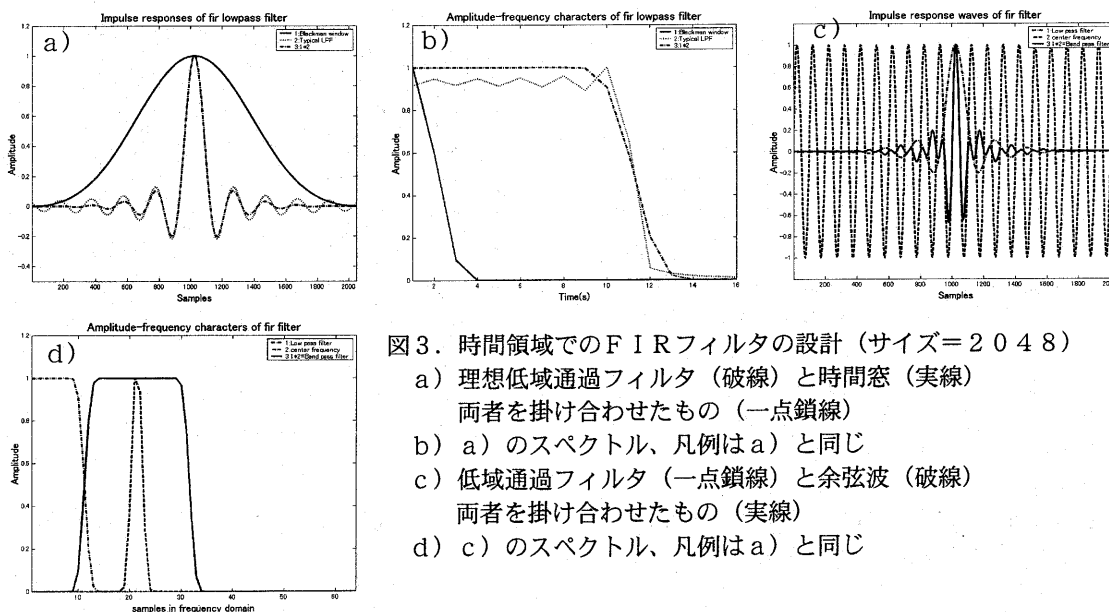


図3. 時間領域でのFIRフィルタの設計 (サイズ=2048)

- a) 理想低域通過フィルタ (破線) と時間窓 (実線) 両者を掛け合わせたもの (一点鎖線)
- b) a) のスペクトル、凡例は a) と同じ
- c) 低域通過フィルタ (一点鎖線) と余弦波 (破線) 両者を掛け合わせたもの (実線)
- d) c) のスペクトル、凡例は a) と同じ

急峻な遮断特性をもつFIRフィルタを構成するためには長いインパルス応答が必要となる。コンピュータでこのような処理を行う場合、計算を効率化するためFFTを用いた巡回畳み込み計算で実現することが多い。この計算方法ではFFTのサイズに相当する時間はインパルス応答波形が一定であり、また分析区間毎の連続性を考慮すると時変フィルタを構成することは困難で

ある。計算の効率は落ちるが直接畳み込み演算をおこなえば、1サンプルごとにインパルス応答波形を変化させることが可能となり、時変フィルタを構成することができる。

倍音分離のための位相ひずみのない時変FIRフィルタを構成するためには、各時刻毎に任意の帯域の帯域通過フィルタを同じ直線位相特性で設計する必要がある。任意の帯域のバンドパスフィルタを設計する方法として、時間窓とFFTを用い構成する方法・繰り返し演算を用いる方法などがある。いずれも計算時間が掛かるので、各時刻毎にフィルタ設計を行うのは実際的ではない。しかし下記の方法で時間領域で係数を計算することにより少ない演算で任意の帯域のバンドパスフィルタを設計することができる。

理想低域フィルタの遮断周波数を f_w 、インパルス応答を $r(n)$ とすると、

$$r(n) \begin{cases} = \sin(2\pi n f_w \cdot (f_s \cdot 2)) / n & n \neq 0 \\ = 1 & n = 0 \end{cases} \quad \text{③}$$

となる。ただし n は整数、 f_s はサンプリング周波数。これを実用的に有限の長さの数列になるように時間窓を掛けると低域通過フィルタのインパルス応答波形が算出できる。この様子を図3の a)・b) に示す。

さらに $r(n)$ に中心周波数 f_c に相当する余弦波を掛けると、中心周波数 f_c 、帯域幅 f_w の帯域通過型FIRフィルタの係数が算出できる。この様子を図3の a)・b) に示す。このときインパルス応答波形が時刻「0」に対して対称になるのでこのフィルタは直線位相になり位相歪みが生じないことになる。このままだと因果性が満たされないので、時間窓の時間の1/2の時間ずらしておく。このとき f_w を基本周波数の1/2、 f_c を基本周波数の倍音次数倍にしておくで倍音の分離のフィルタを構成できる。このように単純な計算でFIRフィルタの係数を計算することができる。

3-3 基本周波数の抽出

3-2に示したFIRフィルタの係数計算方法を旋律演奏音に適用するためには各時刻におけるおおよその基本周波数がわかっているなければならない。このために旋律演奏音から基本周波数を抽出する必要がある。フルートの場合には基本周波数は約260Hz~2100Hzに限定される。そこで低域通過フィルタを音域に対応させてオクターブはなれた3種類用意し、その3つの出力のおおのから解析信号を用いて基本周波数の候補を抽出する。得られた周波数値の変動が設定した時間幅内で設定した範囲の中に入っていればほぼ一定の高さの音があると判断する。そして音があると判断されたものの中で一番低い値を基本周波数とする。得られた結果の例を図4に示す。これは音符ごとの倍音分離のフィルタを作るための情報として使うので、特に大きい変動がない限り一つの音符ないでは一定の値になっている。

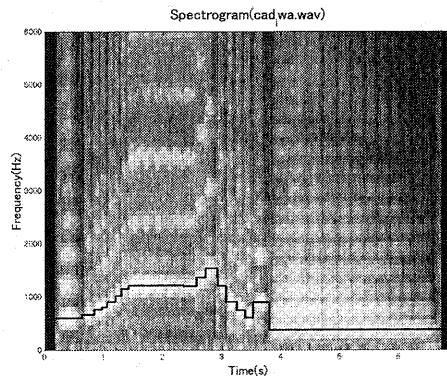


図4. フルート演奏音のスペクトログラムと推定された基本周波数

4. 分析結果

3で示した手順に従って分析した結果を図5・6に示す。FIRフィルタの次数およびヒルベルトフィルタの次数はいずれも2048である。

図5は3-2で示した時変FIRフィルタで倍音を分離した結果の波形とサウンドスペクトログラムの例である。下左図に示す原音の中から第一倍音が分離されている。また音の高さに応

じて帯域幅も変化していることがわかる。

図6は分離された倍音から周波数と振幅を分析した結果である。ここでは第2倍音の結果を示している。この例では比較的短い音が多く、一定の周波数の区間が短い。また長い音でも深いビブラートによって振幅変動がかなり大きく、周波数の変動も大きい。また終わりから2番目の音では意図した音のオクターブ上の音が鳴っている。

5. まとめ

解析信号を用いた楽音分析はフルートなどノイズ成分が重畳した音の分析に有効である。時変FIRフィルタを用いれば旋律演奏音に対しても適用できる。

直線位相の時変帯域通過FIRフィルタも、設計を時間領域で行えば比較的計算が少なく実現でき、また現在のコンピュータの能力があれば直接の畳み込み演算を行って実現することができる。これを用いれば解析信号の手法が旋律演奏音に対しても適用できる。

分析して得られた結果から変動を制御して再合成する場合、周波数については、3-2で抽出した基本周波数の整数倍からの偏差を変動として扱うとよいと思われる。振幅の変動については、周波数と同じように、変動成分をとるための基準となる振幅を定義する必要がある。今後の課題である。

6. 謝辞

本研究に当り、演奏音録音などに協力をいただいた、くらしき作陽大学音楽学部岩崎教授に感

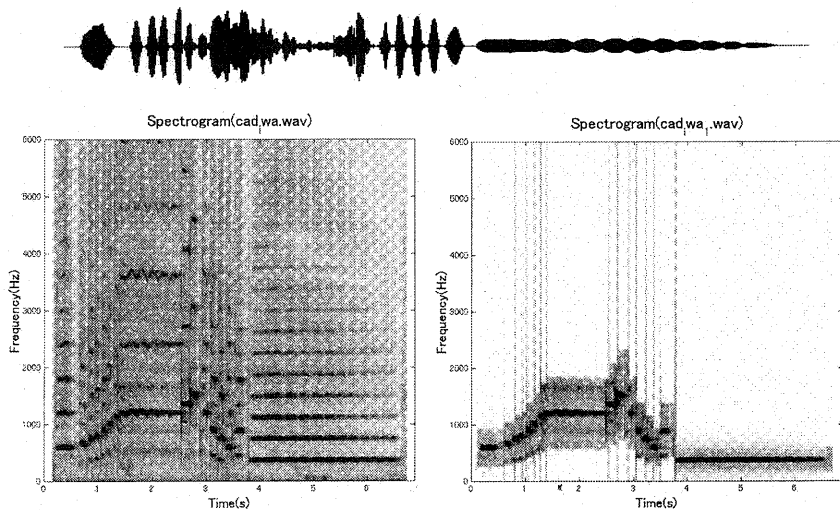


図5. フルート演奏音と分離した倍音の波形とスペクトログラム

上図：分離した第1倍音の波形
下左図：原音のスペクトログラム
下右図：第1倍音のスペクトログラム

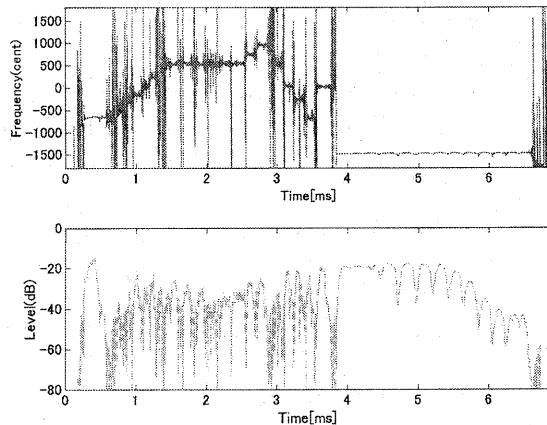


図6. フルート演奏音の第2倍音の分析例

上図：周波数(0セント=1760Hz)
下図：分離した第1倍音

謝いたします。

7. 参考文献

- 1) Yoshinori Ando and TatsurovShima, "Physical properties of the flute tone and its subjective goodness of quality", J. Japanese Musicological Soc., 22, 68-81(1976).
- 2) 国井崇、安藤由典、“楽器音の品質に対応する物理量の抽出(その3) 定常的フルート音における倍音成分の変動について”、日本音響学会講演論文集、Oct.、329-330(1973)
- 3) 安藤由典、山谷英夫、“尺八の筒音における特徴物理量”、日本音響学会講演論文集、Oct.、335-336(1982)
- 4) 安藤由典、坂上敬、“リコーダ音の倍音の不規則変動について”、日本音響学会講演論文集、Oct.、719-720(1994)
- 5) 西村明、加藤充美、安藤由典、“フルート演奏音の分析合成とその好ましさの評価”、日本音響学会講演論文集、Sep.、543-544(1999)
- 6) 西村明、加藤充美、安藤由典、“ビブラートのあるフルート音の分析合成とその好ましさの評価”、音響音響研究会資料、MA99-43、1-8(1999)
- 7) 西村明、加藤充美、安藤由典、“倍音の振幅・周波数変動を合成したフルート演奏音の品質評価”、音響音響研究会資料、MA99-73、1-8(2000)
- 8) Akira Nishimura, Mitsum Kato and Yoshinori Ando
"The relationship between the fluctuations of harmonics and the subjective quality of flute tone", J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 22, 227-238(2001).
- 9) 加藤充美、西村明、安藤由典、“解析信号を用いたフルート音の倍音の周波数分析と合成” 日本音響学会講演論文集、Oct.、729-730(2001)
- 10) 「音・振動のスペクトル解析」、日本音響学会編、金井浩著 コロナ社
- 11) 『Signals, Sound, and Sensation』 William M. Hartmann AIP Press