

蝸牛遅延特性を模擬した IIR オールパスフィルタのリアルタイム実装*

☆飯田大貴, 山田宏樹, 矢田部浩平 (農工大)

1 はじめに

蝸牛は音の周波数情報を処理する感覚器官である。そこでは、高周波と低周波が同時に入力された際に、低周波音が遅れて処理される「蝸牛遅延」と呼ばれる現象が起きる。蝸牛遅延を考慮した信号処理を音楽に適用することで、新しい音響効果を生み出す可能性がある。そこで我々は以前、蝸牛の群遅延特性を模したオールパスフィルタを設計し、音楽的利用の検討を行った [1, 2]。以後、このフィルタを「蝸牛遅延フィルタ」と呼ぶ。図-1 に蝸牛遅延フィルタの周波数特性と Dau らによって求められた蝸牛遅延特性を示す [3]。高周波では遅延が少ないのに対し、100 Hz 付近で約 10 ms の遅延があることが分かる。

本稿では、蝸牛遅延フィルタを幅広く活用するために、VST プラグインを実装する。これにより、蝸牛遅延フィルタをリアルタイムで適用することができる。しかし、蝸牛遅延フィルタを適用すると音が遅延してフィードバックされるため演奏に影響が及ぶ可能性がある。そこで、蝸牛遅延フィルタをリアルタイムで適用することにより、演奏のタイミングにどのような影響が生じるか実験を行う。

2 蝸牛遅延フィルタのリアルタイム実装

蝸牛遅延フィルタは、極と零点の配置を最適化することにより実装した [1]。このフィルタは急峻な蝸牛遅延特性を再現するために次数が 21 次と高次になっており、また極が単位円周に近いところに存在している。そのため、丸め誤差が著しく増大し、不安定性を引き起こす可能性がある。これを解決するために、フィルタを 2 次のセクションに分割して双 2 次フィルタを直列接続することによって実装した。また、零点と極点を適切にペアリングすることで、安定したフィルタ特性を得ることができた。

このフィルタをリアルタイムで適用するために、VST プラグインを作成する。VST プラグインは、音楽の録音、編集、ミキシングを行う DAW 内で使用され、リアルタイムで音を加工することができるオーディオエフェクトである。本稿では、MATLAB の Audio Toolbox を用いて蝸牛遅延フィルタの VST プラグインを実装した。実装した蝸牛遅延フィルタの VST プラグインを音源に適用し、DAW 上で正常に動作することを確認した。

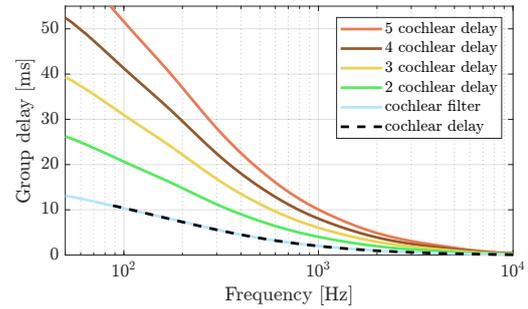


図-1 蝸牛遅延フィルタと蝸牛遅延特性。青線が蝸牛遅延フィルタ、緑線が 2 倍の蝸牛遅延フィルタ、黄線が 3 倍の蝸牛遅延フィルタ、茶線が 4 倍の蝸牛遅延フィルタ、赤線が 5 倍の蝸牛遅延フィルタ、黒点線が Dau らによって求められた蝸牛遅延特性を示す。

表-1 使用器具

	製品名	メーカー
DAW	Cubase12	Steinberg
オーディオ I/F	OCTA-CAPTURE UA-1010	Roland
ヘッドホン	MDR-CD900ST	SONY
ギター	LSS54	Tokai

3 蝸牛遅延フィルタの演奏への影響

蝸牛遅延フィルタを楽器に適用することで、特徴的な音色を付加することができる [2]。しかし、音が遅延してフィードバックされるため演奏に影響が及ぶ可能性がある。そこで、楽器の演奏音に蝸牛遅延フィルタを適用し、フィルタの遅延が演奏にどのような影響を与えるかを調査した。具体的には、ギター演奏における蝸牛遅延フィルタの影響を調査する。比較対象として、単純な遅延を与えた音を用いた。

3.1 実験条件

使用器具を表-1 に示す。オーディオインターフェースから出力された音を被験者に提示する際には、スピーカーではなくモニターヘッドホンを使用した。これは、被験者に楽器の生音が極力聞こえないようにし、スピーカーと被験者との距離による遅延を防ぐためである。また、システム遅延を計測するために、オーディオインターフェースのループバックを利用して測定した。その結果、遅延は 29.365 ms であった。一般的な演奏では、30 ms から遅延を認知するため、フィルタ未適用時は遅延の影響はない [4]。

実験では、フィルタの適用具合によって演奏にどのような影響が生じるかを調査する。適用具合を調整する際には、複数のフィルタを用いることになる。

*Real-time implementation of IIR all-pass filter simulating cochlear delay characteristics. By Hiroki IIDA, Koki YAMADA and Kohei YATABE (Tokyo University of Agriculture and Technology).

表-2 実験条件

条件	
被験者	4名のギター経験者
BPM	120
演奏	4分音符 (15小節)
奏法	ブリッジミュート (スタッカート)
ポジション	6弦 5フレット

表-3 実験条件の略称

略称	条件
Raw	フィルタを適用していない条件
CD1 - CD5	1~5個の蝸牛遅延フィルタを適用
L30 - L120	30 ms, 60 ms, 90 ms, 120 msの遅延

このとき、フィルタの適用個数によって、計算による遅延時間差が生じることが考えられる。そこで条件を揃えるために、プラグインにフィルタのオン/オフスイッチを作成した。フィルタのスイッチをオフにした場合、フィルタの処理は行われるが出力音はフィルタが適用されない。これにより、フィルタを使用しない場合でもフィルタ適用時と同じ計算による遅延時間が生じるように設計した。

3.2 ギター演奏と遅延評価の方法

ギター演奏における蝸牛遅延フィルタの影響を調査する。表-2に示す試行を蝸牛遅延フィルタの個数および楽器の遅延時間を変更して行い、メトロノームとのずれを計測した。このとき、被験者はテンポ確認のために1小節分のメトロノームを聞いた後、演奏を開始し、実際にはさらに1小節演奏した後に録音を開始した。これは、演奏が安定した状態で録音を開始するためである。また、図-2にギターのスペクトルを示す。演奏したギターは、110 Hz 付近に基本周波数があるため、蝸牛遅延フィルタの影響を受けやすい。また、演奏の拍頭は録音した波形の包絡線を求め、包絡線のピーク検出をすることで求めた。

この一連の試行を表-3に示す10種類の条件に対して行った。フィルタの個数は、予備実験を行い音の変化が十分に分かる個数とした。遅延量は、遅延を認知し始める30 msを下限、演奏が困難になる120 msを上限として設定した[4]。10種類の条件について、被験者には条件を知らせないようにした。

3.3 結果と考察

図-3に各実験条件におけるメトロノームと演奏の拍頭間の差の実験結果を示す。図から、生音の演奏タイミングがメトロノームより早くなっていることが分かる。これは、被験者の演奏の癖として常に前乗りで演奏する傾向があることや、ブリッジミュート奏法で実験したため、高音が出にくいことから早く弾きたくなることが理由であると考えられる。点線と比較すると、蝸牛遅延や遅延を長くするにつれてタイミングが遅

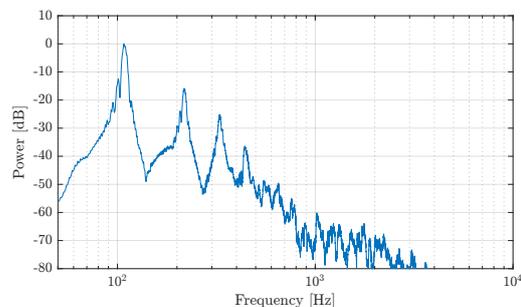


図-2 演奏したギターのスペクトル密度。6弦の5フレットを演奏したため、110 Hz 付近に基本周波数がある。

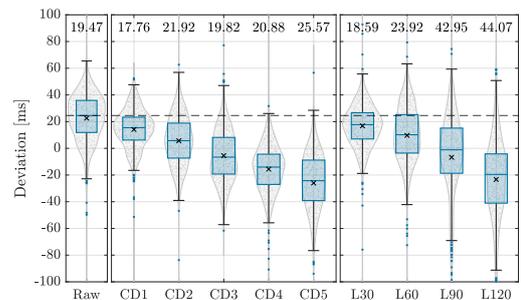


図-3 メトロノームと被験者の演奏のずれ。横軸に実験条件、縦軸にメトロノームの拍頭と演奏音の拍頭の差を示す。点線は生音の中央値を示す。上部に各データの標準偏差を示す。青色の点は外れ値、×印は平均値を表し、箱ひげ図にバイオリンプロットを重ね描きした。

れ、ばらつきが多くなることが分かる。3倍の蝸牛遅延と30 msの遅延を比較すると、蝸牛遅延の方がタイミングが遅れ、ばらつき具合が大きい。このことから、低周波成分がタイミングにより大きく影響する傾向があると考えられる。また、5倍の蝸牛遅延と120 msの遅延を与えた場合を比較すると同程度にタイミングが遅れが生じることが分かる。このことから、蝸牛遅延特性を5倍に増長したようなフィードバックは大きくタイミングを遅らせることが分かった。

4 むすび

本稿では、蝸牛遅延フィルタのVSTプラグインを作成した。5倍の蝸牛遅延と120 msの遅延を与えた場合を比較すると、同程度にタイミングが遅れが生じることが分かった。今後は、リアルタイム蝸牛遅延フィルタを用いた応用先の検討を行う。

参考文献

- [1] 飯田大貴, 高津航輝, 山田宏樹, 矢田部浩平, 饗庭絵里子, “蝸牛遅延特性を模擬したオールパスフィルタの設計,” 音講論集, pp. 851-852 (2023.9).
- [2] 飯田大貴, 山田宏樹, 矢田部浩平, 饗庭絵里子, “蝸牛遅延特性を模擬したIIRオールパスフィルタの音楽的利用の検討,” 音講論集, pp. 1069-1070 (2024.3).
- [3] T. Dau, O. Wegner, V. Mellert, and B. Kollmeier, “Auditory brainstem responses with optimized chirp signals compensating basilar-membrane dispersion,” *J. Acoust. Soc. Am.*, **107**(3), 1530-1540, (2000).
- [4] 西堀佑, 多田幸生, 曾根卓朗, “遅延のある演奏系での遅延の認知に関する実験とその考察,” 情報処理学会研究報告, **2003**(127), 37-42 (2003).