

蝸牛遅延特性を模擬したオールパスフィルタの設計*

☆飯田大貴, 高津航輝, 山田宏樹, 矢田部浩平 (農工大), 饗庭絵里子 (電通大)

1 まえがき

蝸牛は音の周期情報を処理する感覚器官であり、内耳に位置する。そこでは、高周波音と低周波音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。これまで蝸牛遅延に関する研究が行われてきたが、音楽的な利用に関する研究はされていない。本稿では音楽的利用への準備段階として、蝸牛の群遅延特性を模した、遅延量の調整が可能なオールパスフィルタの設計と評価を行った。

2 蝸牛遅延

蝸牛にはリンパ液が入っており、蝸牛底部にある耳小骨の振動でリンパ液が揺れる。その揺れを基底膜の有毛細胞がとらえて電気信号に変え、蝸牛神経に伝える。基底膜は蝸牛の底部から頂部にかけて細長い台形のような形をしている。この物理的構造により、蝸牛底部付近では周波数の高い信号が最大変位を起こし、蝸牛頂部では周波数の低い信号が最大変位を起こす。このとき、複数の周波数を同時に提示したとしても、低周波が高周波に比べて遅れて処理される蝸牛遅延が生じる。饗庭らによると、蝸牛遅延を増長させた音を聴取した場合には、複数の周波数を同時に提示した音に似た知覚が得られ、蝸牛遅延を補正した音を聴取した場合には、より時間的な音の同時性が曖昧になったような知覚が得られることが示されている [1]。

3 フィルタ設計

本研究では、蝸牛の群遅延特性を模した、遅延量の調整が可能なオールパスフィルタの設計をする。そのために、遅延量を蝸牛遅延の 0.1, 0.2, ..., 1.0 倍にしたフィルタ 10 個を最適化し、得られたフィルタを補間することによって設計する。

オールパスフィルタとは、周波数領域での振幅を変えずに遅延のみを与えるフィルタのことである。実数係数のオールパスフィルタの一般形は、

$$H(z) = \prod_{k=1}^K \frac{(z - \frac{1}{p_k})}{(z - p_k)} \prod_{l=K+1}^L \frac{(z - \frac{1}{p_l})(z - \frac{1}{\bar{p}_l})}{(z - p_l)(z - \bar{p}_l)} \quad (1)$$

である。 p_l は極であり、 \bar{p}_l は極の複素共役である。ま

た、極 p_l を極座標表現すると

$$p_l = x_l e^{(2i\pi f_{c_l}/f_s)} \quad (2)$$

となり、それぞれの極 p_l は動径 x_l と周波数 f_c の 2 つのパラメータで表せる。蝸牛遅延を模擬するには、この 2 つのパラメータを指定し、極 p_l を適切に配置する必要がある。

Dauらによって求められた蝸牛遅延特性は、100 Hz から 10 kHz の周波数の間で定義されており、遅延時間は高い周波数から低い周波数にかけて指数関数的に長くなる [2]。この遅延特性を複数の倍率で模擬するには複数のフィルタを用いる必要があり、パラメータの数が多くなるため設計が難しくなる。そこで、周波数 f_c を特定の値に固定し、動径 x_l のみを最適化することを考える。周波数 f_c は、オクターブバンドフィルタの中心周波数を用いて、表-1 のように設定した。上限を 4000 Hz にした理由は、8000 Hz まで含めて最適化しても中心周波数 8000 Hz のパラメータの最適解が 0 に近い値を取ったからである。また、蝸牛遅延は周波数が高くなるにつれて遅延量が減る特性を持つため、蝸牛遅延の周波数の定義域より小さい周波数を含んで設定した。

3.1 最適化

蝸牛遅延特性を模擬するために、上記の周波数で極の動径 $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_l]$ を最適化する。 $\mathbf{x}_l = [x_l^{(0.1)}, x_l^{(0.2)}, \dots, x_l^{(1.0)}]^T$ であり、各倍率の動径を結合した配列である。 $\mathbf{g}(\mathbf{X})$ は動径 \mathbf{X} を与えると各倍率の群遅延量を返す関数、 \mathbf{Y} は各倍率の蝸牛遅延量を結合した 2 次元配列として、この 2 つの誤差を最小化する。このとき、フィルタの安定性を確保するためのペナルティと、フィルタ特性を扱いやすくするためのペナルティを与える。特に後者のペナルティでは、動径の値を滑らかに推移させる。この最適化問題を

$$\min_{\mathbf{X}} (\|\mathbf{Y} - \mathbf{g}(\mathbf{X})\|_F^2 + \alpha \sum_{m=1}^{10} h(\mathbf{x}_m) + \lambda \sum_{n=1}^{10} \|\mathbf{D}\mathbf{x}_n\|_2^2) \quad (3)$$

のように定式化する。ただし、 $\|\cdot\|_F$ はフロベニウスノルム、 \mathbf{D} は二階差分作用素である。第一項は、設計したフィルタの群遅延が蝸牛遅延特性に近づくようにする。第二項の $h(\mathbf{x}_m)$ は、極の値が 1 を超えな

*All-pass filter design for simulating cochlear delay characteristics. By Hiroki IIDA, Koki TAKATSU, Koki YAMADA, Kohei YATABE (Tokyo University of Agriculture and Technology) and Eriko AIBA (The University of Electro-Communications).

表-1 蝸牛遅延フィルタのパラメータの値

Center frequency [Hz]									
0	15.75	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000
0.900	0.896	0.882	0.989	0.974	0.953	0.813	0.813	0.670	0.671

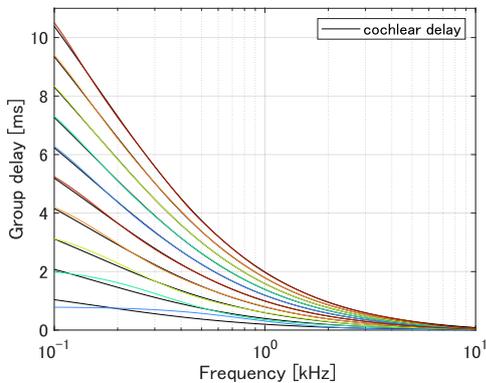


図-1 黒線が Dau らによって求められた蝸牛遅延特性。その上に描写した線が本研究で作成した蝸牛遅延フィルタであり、10 段階の倍率を示す。 $\alpha = 10000, \lambda = 100$, $a = 1.0001$ である。

いようにすることで IIR フィルタを安定にするためのペナルティである。これを以下のように定める。

$$h(\mathbf{x}_m) = \max(0, a|\mathbf{x}_m - 0.5| + 0.5) \quad (a \geq 1) \quad (4)$$

第三項は、動径の 2 階差分の値を大きくさせないことで、各中心周波数の動径 x_l の推移を滑らかにするためのペナルティである。 α, λ はそれぞれのペナルティの強さを調整するパラメータである。

4 実験

最適化により、0.1, 0.2, ..., 1.0 倍率のフィルタが求めた。これをもとに動径の補間を行う。今回は、最適化した動径 x_l の間の点、0.15, 0.25, ..., 0.95 を線形補間し、Dau らの蝸牛遅延特性に同じ倍率をかけた値と作成したフィルタの遅延量の誤差を評価する。この手法によって求められた群遅延特性を図-1 に、求めた蝸牛遅延フィルタの動径 $x_l^{(1,0)}$ を表-1 に示す。図-1 より、低倍率になるにしたがって誤差が大きくなるのが分かる。これは周波数を固定して動径の値を変化させているため帯域幅と遅延時間が同時に変化してしまうことが原因だと考える。

次に、提案手法と滑らかさのペナルティを与えていない場合の動径の推移を比較した。図-2 に動径の推移を示す。提案手法では、動径が滑らかに推移している。蝸牛遅延と作成したフィルタの遅延量の RMSE を図-3 に示す。補間点は最適化点と比較して誤差が多いが、提案手法では滑らかさのペナルティを与えたため補間点での誤差が少なく安定している。

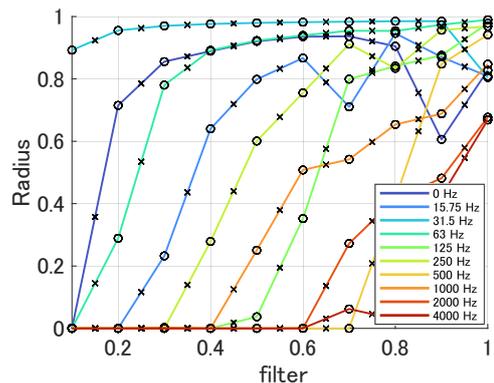
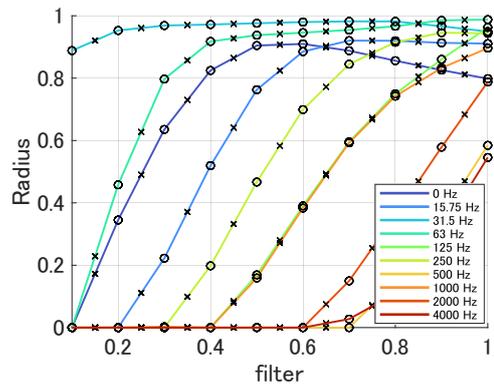


図-2 各フィルタの動径。上図が提案手法、下図が滑らかさのペナルティを与えていない場合。マーカー o は最適化を行った点、マーカー x は補間点である。

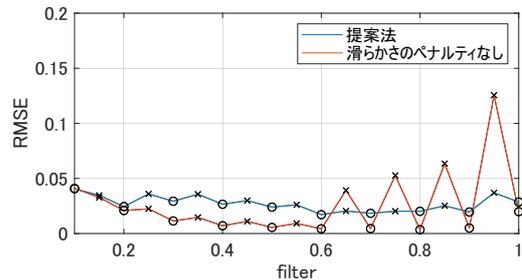


図-3 提案手法と滑らかさに関するペナルティを入れない場合の RMSE。マーカー o は最適化を行った点、マーカー x は補間点である。

5 まとめ

本研究では、フィルタの極を最適化することで蝸牛の群遅延特性を模したオールパスフィルタの設計を行った。また、複数の最適化された蝸牛遅延フィルタの動径 x_l を補間することにより、遅延量の調整が可能な蝸牛群遅延フィルタを設計した。今後は作成したフィルタを用いて主観評価実験を行う。

参考文献

- [1] E. Aiba, M. Tsuzaki, S. Tanaka, and M. Unoki, "Judgment of perceptual synchrony between two pulses and verification of its relation to cochlear delay by an auditory model," *Jpn. Psychol. Res. (JPR)*, **50**(4), 204–213, (2008).
- [2] 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).