

高速度カメラと構造化照明を用いたスネアドラム打面の振動の可視化*

☆ 安藤元暉, 新美智也, 山田宏樹, 矢田部浩平 (農工大)

1 はじめに

膜鳴楽器は、打面に撃力を加えることで膜が振動し音が鳴る。膜の振動は、複数の振動モードの重ね合わせで表現することができる。我々はこれまで、 piezo 素子を打面に設置して膜の振動から音を直接収録する方法を提案した [1]。この手法では、設置した素子が振動モードに影響を与えることが示唆された。

そこで本研究では、膜に物体を設置しない手法として、構造化照明の投影と高速度カメラを用いた撮影を行い、画像の位相情報からスネアドラムの打面の振動を可視化する方法を検討する。単方向や複数方向の縞を組み合わせた構造化照明を用い、その構造によって得られる情報の違いを確認した。

2 構造化照明を用いた形状測定

物体の形状計測を連続して高速に行うことで、物体の振動を計測することができる [2]。高精度な形状計測には干渉計を用いたものがあるが、高価であり設定も難しい。そこで、干渉縞を生じさせる代わりとしてプロジェクタで縞を投影する手法が存在する。この手法では色やパターンなどを変えて投影を行うことができる。本研究では、プロジェクタでの構造化照明の投影と高速度カメラを用いた振動計測により、スネアドラムの振動の計測を試みる。また、プロジェクタの投影パターンや投影する色を変化させることによって得られる情報の違いについても調査を行う。構造化照明としては、簡素な構造である縞を使用した。投影する構造化照明の縞の種類によって解析手法が異なる。モノクロでは白と黒の縞でしか表せないが、カラーでは 3 種類の縞を投影できる。以下ではそれぞれの解析に使用した手法を記述する。

2.1 3-step algorithm

カラー画像を処理する際には 3-step algorithm という手法を用いる。 2π を N 等分する位相シフトが与えられた正弦波干渉縞パターンを投影し、各パターンの強度から投影パターンの位相変化を検出して 3 次元形状を復元する手法を N -step phase shift algorithm と呼ぶ。位相情報 ϕ を取り出すために、

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \cos(2\pi n/N)} \quad (1)$$

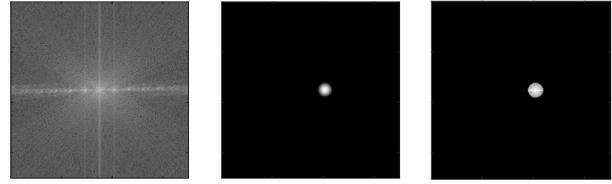


図-1 2次元フーリエ変換によって周波数領域へ変換し(左)、マスク(中央)でキャリア成分周辺を抽出した(右)

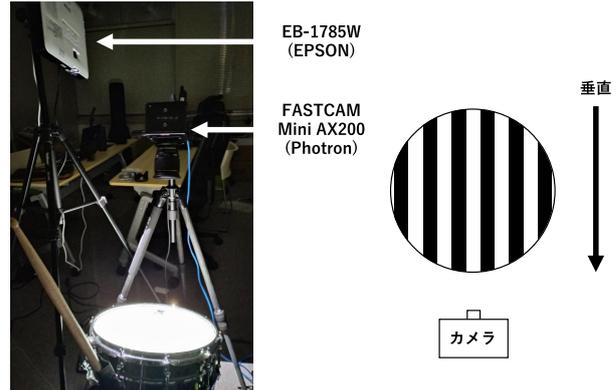


図-2 左は撮影に使用した装置。右はカメラに対して垂直な縞を投影した場合の略図。

を用いる。ただし、 I_n は n 番目の位相シフトを持つ正弦波干渉縞であり、 $N \geq 3$ である。ここで、 $0, \pi/3, 2\pi/3$ だけ位相シフトされた 3 種類の縞を投影していると考え、 $N = 3$ であり、

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}(I_2 - I_3)}{2I_1 - I_2 - I_3} \quad (2)$$

となる。本稿では、 I_1, I_2, I_3 にそれぞれ赤、青、緑を割り当て、カラー画像から位相情報を取り出す。

2.2 Fourier Transform Profilometry

モノクロ画像を処理する際には、Fourier Transform Profilometry (FTP 法) という手法を用いる。対象の画像に対して 2次元離散フーリエ変換を行い、複素周波数スペクトル画像へ変換する。これを図-1 右図のように円状のマスクで抜き出し、縞であるキャリアの周辺成分を抽出する。このキャリア周辺成分から、撃力を加えていない状態のフレームのキャリア周辺成分を取り除くことで、キャリアの変調成分が得られる。この変調成分が縞の歪みに対応するため、形状測定を行うことができるようになる。このように、この手法では空間的な情報を用いて可視化を行う。

*Visualization of vibrations on a snare drum surface using a high-speed camera and structured light. By Motoki ANDO, Tomoya NIIMI, Koki YAMADA and Kohei YATABE (Tokyo University of Agriculture and Technology).

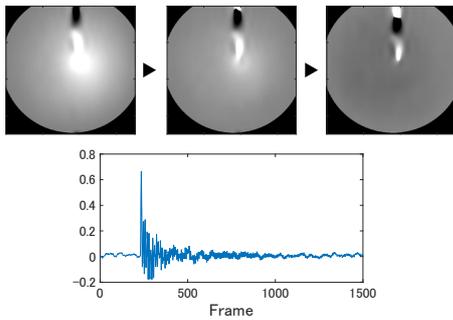


図-3 スネアドラム打面の振動を示した図. 上段は左から右へフレームが進み、打面が振動しているさまを示している. 下段は動画のある一点の変位をプロットした.

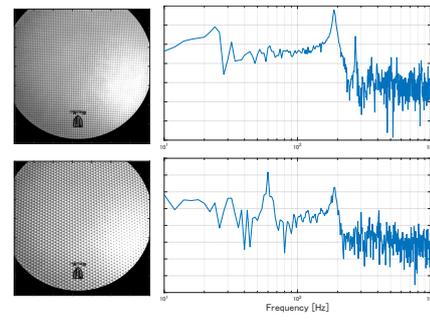


図-5 上段はカメラに対し平行、垂直な縞を両方投影した図. 下段は 120 度ずつ回転させた縞を 3 つ重ねて投影した図. 各段右図はそれぞれのスペクトルである.

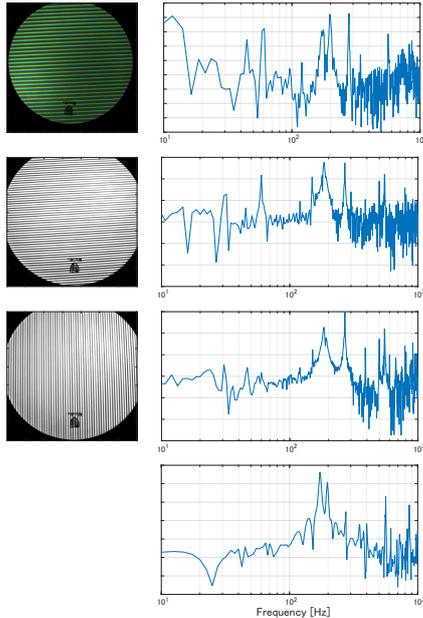


図-4 カラー画像とモノクロ画像の比較. 1, 2 段目はカメラに対して平行, 3 段目は垂直な縞を投影している. 各段右図はそれぞれのスペクトルである. 4 段目はスネアドラムのマイクロホンで収録したスペクトルである.

3 実験

実験に使用した装置を図-2 に示す. 高速度カメラは FASTCAM Mini AX200, プロジェクタは EB-1785W を使用した. カメラはカラー用とモノクロ用の 2 タイプである. 撮影速度は 2000 fps, シャッター速度はカラーが 1/16000 s, モノクロが 1/10000 s である. また, スネアドラムの基音は 178 Hz 前後であった.

3.1 振動の可視化

モノクロで撮影した結果を用いて, スネアドラムの打面の振動を可視化した結果を図-3 に示す. 280 フレーム程から加振された打面が上下を繰り返し, やがて減衰する様子が観察できた.

次に, 3-step algorithm で処理したカラー画像と, FTP 法で処理したモノクロ画像のそれぞれについて, 1 フレーム目と得られた振動のスペクトルを図-4 に示す. いずれも視覚上では, 薄膜のモード振動 [3] のうち中心を山とする (0, 1) モードを確認できた. 加

えて, マイクロホンで収録した場合の 270 Hz にあたる位置に大きなピークが存在しており, これは (1, 1) モードにあたる振動であると考えられる. ただし, カメラに対し平行な縞を投影したものは, 垂直な縞を投影したものに比べノイズが大きく, また 60 Hz とその倍音にあたる部分にピークが存在する. これは使用したプロジェクタのリフレッシュレートが影響しているものと考えられる. また, 画像の輝度から解析を行う 3-step algorithm では, 基音と比較して低周波成分のノイズが大きい. 一方で, 空間的情報を利用する FTP 法は, このノイズの影響を受けにくく, より優れているといえる. 従って, 空間情報を用いる縞解析法であり, プロジェクタの特性を考慮するとカメラに対し垂直な縞であることが望ましい.

3.2 構造化照明による比較

更に振動膜の撮影に優れた構造化照明を検討した. 構造化照明として図-5 に示すように, カメラに対し平行, 垂直な縞を重ねたものと, 120 度ずつ回転させた縞を重ねたものを投影した. いずれも倍音のピークが基音のピークに比べて小さく, 1 方向の縞を投影した場合に比べ低周波成分のノイズが大きく乗っている. これらの結果から, 縞を重ねず単一方向の縞を投影する方が良いという結果が得られた.

4 むすび

本稿では, 構造化照明によるスネアドラム打面の可視化を行い, 手法ごとに得られた結果の比較を行った. 今後は撮影したデータをさらに解析し, 薄膜の計測により適した手法を検討する.

参考文献

- [1] 安藤元暉, 倉科佑太, 山田宏樹, 矢田部浩平, “ピエゾ素子を用いたスネアドラム打面のマルチチャンネル収録,” 音講論集, pp. 1099-1100 (2024.3).
- [2] 橋本涼汰, 矢田部浩平, 及川靖広, “縞投影法を用いた不均一張力ドラムヘッドの振動モード可視化,” 音講論集, pp. 1457-1458 (2022.9).
- [3] R. Worland and W. Miyahira, “Physics of musical drum head damping using externally applied products,” *Proc. Meet. Acoust.*, **35**(1), 9 pages (2018).