

# 高速度カメラによるエレキギター弦振動の測定とピックアップ出力の推定\*

☆ 新美智也, 安藤元暉, 山田宏樹, 矢田部浩平 (農工大)

## 1 はじめに

エレキギターに用いられる磁気ピックアップは、弦振動を電気信号に変換する。ピックアップの出力応答は非線形で、弦振動と複雑な関係を持つ。また、ピックアップが発生させる磁気が弦振動に影響を与えることも知られている [1]。ピックアップ直上の弦の運動を測定することで、弦とピックアップの双方の影響を調べることができると考えられる。

本稿では、弦の振動の測定のために、デフォーカスを利用した高速度カメラによるエレキギター弦の二次元振動の測定手法を提案する。提案手法は、弦の振動への影響を抑えた非接触な測定を可能にする。また、得られた測定データからピックアップ出力信号をシミュレーションした。出力信号と録音した音源との比較を行い、提案手法の妥当性を検証した。

## 2 磁気ピックアップモデル

磁気ピックアップは永久磁石とコイルで構成される。振動する弦は、永久磁石に由来する磁気回路を横切る。このとき、弦振動によって磁束量に変化が生じる。その変化によって生じる起電力を出力する。

本稿では、McDonald によって提示されたピックアップの単純モデルを用いる [2]。ピックアップ直上の弦振動において、 $x(t)$  を水平方向の振動変位、 $y(t)$  を垂直方向の振動変位として、ピックアップコイルに誘起される起電力  $V(t)$  は

$$V(t) = \alpha x(t) \frac{dx(t)}{dt} + \beta \frac{dy(t)}{dt} \quad (1)$$

のように求められる。ただし、 $\alpha$ 、 $\beta$  は透磁率や弦の半径などの物理量によって決まる定数である。式 (1) より、ピックアップ直上の振動変位を用いて、ピックアップ出力信号をシミュレーションできる。

## 3 弦振動のデフォーカス測定

提案手法では単一の高速度カメラと被写界深度が浅いレンズを使用する。被写界深度が浅いレンズを用いることで、図-1 のように、ピント面以外はぼやけた状態で撮影される。弦の表面は光をよく反射するため、画像上の光量ピーク位置を検出することで弦の二次元的なトラッキングが可能となる。

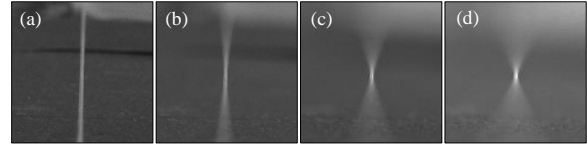


図-1 絞りの違いによる撮影画像の違い。(a) から (d) にかけて絞りは小さくなり、だんだんと計測点のみが白く浮かび上がる様子が確認できる。

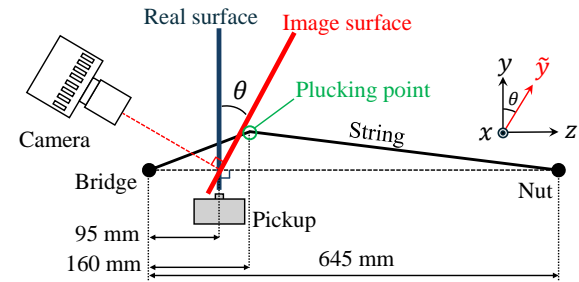


図-2 カメラとギターの座標と位置関係。Image surface はカメラによって撮影される画像面を表す。

### 3.1 座標設定

カメラを  $z$  軸上に設置すると、測定したい点がブリッジに隠れてしまい、ピックアップ直上の弦振動を撮影することができない。そのため、図-2 に示すように、カメラは弦に対して斜めから見下ろす形で設置する。このとき、実際の振動面 ( $x$ - $y$  平面) と画像上の面 ( $x$ - $\tilde{y}$  平面) に仰角  $\theta$  のずれが生じる。画像上の面での  $\tilde{y}$  方向の変位を  $\tilde{y}(t)$  とすると、両者の関係は、

$$y(t) = \frac{\tilde{y}(t)}{\cos \theta} \quad (2)$$

となる [3]。提案手法は式 (2) に基づいて補正を行う。

### 3.2 画像処理

撮影された画像から光量ピークの検出を行う。弦をモノクロで撮影すると、図-1 (d) のようにピント面に位置する弦のみが白く浮かび上がる。ここで、ノイズの影響を抑えるために、主に縦方向に Gaussian フィルタをかける。このとき、画像上で最も明るい点を検出することで、撮影時点での弦の二次元的な位置情報が得られる。また 1 画素より細かい位置情報の検出を可能とするために、画像にサブピクセル処理をかける。弦が静止した状態の画像を基準とし、位置情報の差を二次元振動変位として出力する。

\*Measurement of electric guitar string vibration by high-speed camera and estimation of pickup output.  
By Tomoya NIIMI, Motoki ANDO, Koki YAMADA and Kohei YATABE (Tokyo University of Agriculture and Technology)

表-1 使用機材

	製品名	メーカー
エレキギター	SA360NQM	Ibanez
ピックアップ	Single (S) middle pickup	Ibanez
弦	EXL120 3rd (0.41 mm)	DADDARIO
高速度カメラ	FASTCAM Mini AX200	Photron
レンズ	35 mm F1.4 DG HSM	SIGMA
オーディオ I/F	UMC1820	Behringer
DAW	FLstudio	Image-line

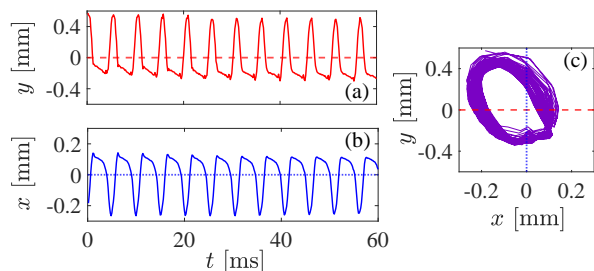


図-3 エレキギター第3弦の弦振動測定結果. 撥弦から60 ms 間のデータを用いた. それぞれ, (a) 弦の垂直方向変位, (b) 弦の水平方向変位, (c)  $x$ - $y$  平面から見た弦振動の軌跡を表す.

## 4 実験

実験で使用した機材を表-1 にまとめる. 弦は基本周波数が 196 Hz に合うようチューニングし, 撥弦はブリッジから 160 mm の位置から, 厚さ 0.8 mm のピックアップで行った. 弦以外を光量ピークとして検出しないよう, ピックアップを黒い紙で覆った.

カメラとギターの位置関係は図-2 のようにする. カメラは, ピックアップに対して  $\theta$  は  $12/\pi$  rad となるよう配置した. このとき, 画像の中心に測定点が来るように設定することで, レンズによる歪みの影響を抑えた. 高速度カメラの撮影条件は, フレームレートは 6400 fps, 絞り値は F1.4, 画素数は縦横共に 128 pixel とした. また, 画像の明滅がないように太陽光を光源として用いた. 弦振動変位の測定と同時に, 実際の音源の録音を行った. サンプルングレートは 44.1 kHz, ビット深度を 16 bit とした.

### 4.1 弦振動の二次元変位の測定結果

弦が静止状態の位置を基準とし, 弦がピックアップから離れた瞬間の  $t$  を 0 ms として変位の解析を行った. 図-3 は撥弦直後から, 60 ms 後までの実験結果である. 図-3 (a), (b) はそれぞれ,  $y$  方向,  $x$  方向の変位が示されている. また, 図-3 (c) は  $x$ - $y$  平面からみた弦振動の軌跡が示されている. この結果から, 撥弦直後に弦が楕円軌道を描いていることが確認された. これは, 小林らの研究報告と同様の結果である [3].

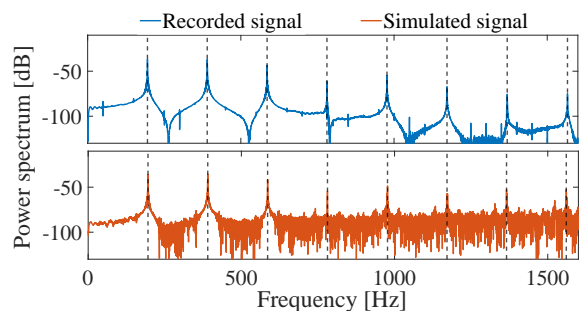


図-4 録音源とシミュレーションのパワースペクトルの比較

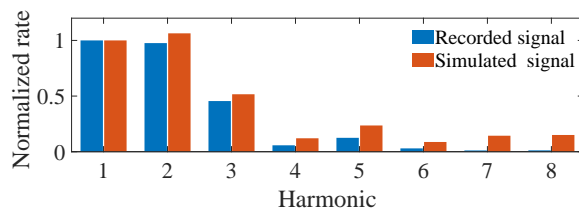


図-5 基音で正規化した各倍音成分の大きさ

## 4.2 起電力のシミュレーションと録音源との比較

測定した振動変位を式 (1) に代入し, ピックアップ出力信号をシミュレーションする. そして撮影と同時に録音した音源信号との比較をした. 図-4 に両者のパワースペクトルを示す. これらの差は, 3 倍音までは 2% 以内に収まった. また, 録音信号に比べシミュレーション信号はノイズが多い結果となった. 図-5 では, 基音成分と各倍音成分の大小関係の比較を行った. 図-4 の結果から周波数成分の大きさを計算し, 各倍音成分を基音で正規化した結果を示す. 録音信号では, 2 倍音成分が基音成分に比べ, 2.5% 程度抑えられた. しかし, シミュレーション信号では基音成分よりも 2 倍音成分が約 6% 大きい結果となった. さらに, シミュレーション信号は高周波の成分が比較的大きくなった. この要因については, 今後検討を行う.

## 5 むすび

本稿では, エレキギターの弦振動における新たな測定手法を提案した. また, 得られた弦振動からピックアップ出力をシミュレーションし, 録音音源との比較を行った. 今後は, 提案手法を用いて, ピックアップの有無による弦振動の挙動の違いを調べる.

### 参考文献

- [1] 原圃正博, “電磁型変換器の弦振動応答の部分音に見られる唸,” 日本音響学会誌, **45**, 101-106 (1989).
- [2] K. McDonald, “Electric guitar pickups,” *Princeton University lecturer note* (2007).
- [3] 小林透, 若槻尚斗, 水谷孝一, “単一の高速度カメラを用いる弦の二次元横振動の非接触計測法,” 電子情報通信学会論文誌 A, **95**, 548-554 (2012).