

平成 23 年度  
学士学位論文

# 最小 2 乗法を用いた補正による クリッピングノイズの軽減

Mitigation of the clipping noise by the compensation  
using a Least square method

1120243 泰地 優太

指導教員 福本 昌弘

2012 年 3 月 1 日

高知工科大学 情報システム工学科

# 要 旨

## 最小 2 乗法を用いた補正によるクリッピングノイズの軽減

泰地 優太

録音機器は入力できる最大の信号があらかじめ決まっており、音声を録音する際に入力された電気信号が録音機器の最大入力を超えた場合はクリップという現象が起こる。クリップした信号が連続する場合、クリッピングノイズと呼ばれる音割れや雑音が聴こえるため、クリッピングノイズを軽減する必要がある。しかし、クリップ部分の波形は切り取られてしまい記録されないため、波形を完全に元の形に戻すことはできない。再録音ができない音声だった場合、クリッピングノイズが発生したままの音声となる。

コンプレッサやリミッタを使うことでクリップの発生を予防できる。しかし、突然の過大な信号入力には対応できないため、クリッピングノイズを軽減する必要がある。クリッピングノイズを軽減する手段として近似補間を用いた方法が挙げられる。しかし、クリップした部分の傾きが急な場合は補間した波形が原音と大きく異なり、原音を再現できないという欠点がある。

本研究では、補正によるクリッピングノイズの軽減を目的とする。手法として、近似補間ではなく最小 2 乗法を用いた補正を行い、クリップ部分と前後の波形を差し替えることにより、クリッピングノイズを軽減させる。処理を行うことでクリップした部分が無くなることを確認し、処理した音声を被験者実験により評価している。また、補間法の一つであるニュートン補間法で補間を行った結果と比較を行い、それぞれの結果の違いを確認している。

**キーワード** 最小 2 乗法 クリッピングノイズ 補正

# Abstract

## Mitigation of the clipping noise by the compensation using a Least square method

Yuuta Taichi

In recording sounds, the phenomenon called as the clip is occurred in the case of the input signal is over the maximum input of a recording device because the maximum input signal to a recording device is fixed in advance. When clipped signals occur sequentially, the cracking sound and the noise are heard called as the clipping noise. Therefore, the clipping noise is required to avoid. However, the clipped wave could be corrected completely because the original sound of a clip portion is not recorded. In the case of a sound could be rerecorded, a recorded sound includes the clipping noise.

Using a compressor or limiter, the clipping could be avoid. However, these method can not support sudden excessive input signal. With this reason, it is necessary to reduce a clipping noise. There is a method using approximation interpolation as a means to reduce a clipping noise. Unfortunately when inclination of the clipped portion is sudden, the interpolated waveform differs from an original sound.

In this paper, the method of reducing the clipping noise using compensation have proposed. In a proposed method, clipping noise is made to reduce by substituting a clip portion based on the least-squares method. As an experiment to evaluate a proposed method, a compensated sound with a proposed method is listened actually and the questionnaire is conducted. Moreover, a result from interpolating with the Newton's interpolation method is compared to a result using proposed method and the difference

of these results is confirmed.

***key words***    Least square method, Clipping noise, Compensation

# 目次

|              |                            |           |
|--------------|----------------------------|-----------|
| <b>第 1 章</b> | <b>序論</b>                  | <b>1</b>  |
| 1.1          | 背景と目的 . . . . .            | 1         |
| 1.2          | 本論文の構成 . . . . .           | 2         |
| <b>第 2 章</b> | <b>クリッピングノイズによる問題</b>      | <b>3</b>  |
| 2.1          | はじめに . . . . .             | 3         |
| 2.2          | 既存のクリップ予防法と問題点 . . . . .   | 4         |
| 2.3          | 既存のクリッピング軽減法と問題点 . . . . . | 5         |
| 2.4          | まとめ . . . . .              | 6         |
| <b>第 3 章</b> | <b>最小 2 乗法を用いた補正</b>       | <b>7</b>  |
| 3.1          | はじめに . . . . .             | 7         |
| 3.2          | 最小 2 乗法 . . . . .          | 7         |
| 3.3          | 最小 2 乗法を用いた補正 . . . . .    | 9         |
| 3.4          | まとめ . . . . .              | 11        |
| <b>第 4 章</b> | <b>クリッピングノイズ軽減の検証と比較</b>   | <b>12</b> |
| 4.1          | はじめに . . . . .             | 12        |
| 4.2          | 補間と補正の結果 . . . . .         | 12        |
| 4.2.1        | ニュートン補間法 . . . . .         | 17        |
| 4.2.2        | 最小 2 乗法による補正 . . . . .     | 21        |
| 4.2.3        | 両方式の比較 . . . . .           | 24        |
| 4.3          | RMS による誤差判定 . . . . .      | 25        |
| 4.4          | 主観評価 . . . . .             | 26        |
| 4.5          | まとめ . . . . .              | 30        |

## 目次

|              |                   |           |
|--------------|-------------------|-----------|
| <b>第 5 章</b> | <b>結論</b>         | <b>31</b> |
| 5.1          | 本研究のまとめ . . . . . | 31        |
| 5.2          | 今後の課題 . . . . .   | 32        |
|              | <b>謝辞</b>         | <b>33</b> |
|              | <b>参考文献</b>       | <b>35</b> |
| <b>付録 A</b>  | <b>QR 分解</b>      | <b>36</b> |

# 目次

|      |                                    |    |
|------|------------------------------------|----|
| 2.1  | クリップした波形 . . . . .                 | 4  |
| 2.2  | ニュートン補間を用いた補間方法 . . . . .          | 5  |
| 3.1  | 補正点の選択 . . . . .                   | 10 |
| 3.2  | 最小 2 乗法を用いた補正 . . . . .            | 10 |
| 4.1  | エレキギターの原音 . . . . .                | 14 |
| 4.2  | エレキギター原音のクリッピングした音 1 . . . . .     | 14 |
| 4.3  | エレキギター原音のクリッピングした音 2 . . . . .     | 15 |
| 4.4  | 音楽の原音 . . . . .                    | 15 |
| 4.5  | 音楽原音のクリッピングした音 1 . . . . .         | 16 |
| 4.6  | 音楽原音のクリッピングした音 2 . . . . .         | 16 |
| 4.7  | エレキギターのクリッピングした音 1 の補間結果 . . . . . | 17 |
| 4.8  | エレキギターのクリッピングした音 2 の補間結果 . . . . . | 18 |
| 4.9  | 音楽のクリッピングした音 1 の補間結果 . . . . .     | 18 |
| 4.10 | 音楽のクリッピングした音 2 の補間結果 . . . . .     | 19 |
| 4.11 | 補間結果とクリップした波形の比較 . . . . .         | 19 |
| 4.12 | 補間結果と原音波形の比較 . . . . .             | 20 |
| 4.13 | エレキギターのクリッピングした音 1 の補正結果 . . . . . | 21 |
| 4.14 | エレキギターのクリッピングした音 2 の補正結果 . . . . . | 22 |
| 4.15 | 音楽のクリッピングした音 1 の補正結果 . . . . .     | 22 |
| 4.16 | 音楽のクリッピングした音 2 の補正結果 . . . . .     | 23 |
| 4.17 | 補正結果とクリップした波形の比較 . . . . .         | 23 |
| 4.18 | 補正結果と原音波形の比較 . . . . .             | 24 |

## 図目次

|                      |    |
|----------------------|----|
| 4.19 全体の比較 . . . . . | 25 |
|----------------------|----|



# 表目次

|     |                                           |    |
|-----|-------------------------------------------|----|
| 4.1 | RMS による誤差判定 . . . . .                     | 26 |
| 4.2 | クリッピングノイズ軽減度アンケート (エレキギターの音声 1) . . . . . | 27 |
| 4.3 | 原音の再現度アンケート (エレキギターの音声 1) . . . . .       | 27 |
| 4.4 | クリッピングノイズ軽減度のアンケート (音楽の音声 1) . . . . .    | 28 |
| 4.5 | 原音の再現度のアンケート (音楽の音声 1) . . . . .          | 28 |
| 4.6 | クリッピングノイズ軽減度アンケート (エレキギターの音声 2) . . . . . | 28 |
| 4.7 | 原音の再現度アンケート (エレキギターの音声 2) . . . . .       | 29 |
| 4.8 | クリッピングノイズ軽減度のアンケート (音楽の音声 2) . . . . .    | 29 |
| 4.9 | 原音の再現度のアンケート (音楽の音声 2) . . . . .          | 29 |

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 背景と目的

音声を録音する際に用いられる録音機器は、拾った音声を電気信号へと変換し、増幅器で適切な大きさに増幅させ、信号を入力する。しかし、録音機器はあらかじめ入力信号の最大入力幅が決められており、入力する電気信号が最大入力幅を超えてしまった場合には、入力した信号の波形の一部が切り取られる、クリップという現象が起こる [1]。このクリップした信号が連続する場合、人にはクリッピングノイズと呼ばれる音割れ等の不快な音が聴こえてしまう。このクリッピングノイズは除去する必要があるが、クリップ部分の切り取られた波形は記録されていないため、クリッピングした波形を完全に元の波形に戻すことは不可能である。クリップの予防法として、あらかじめコンプレッサやリミッタを用いて振幅の調整を行うことで予防することができる。しかし、予期していない過大な入力によって最大入力幅を超えてしまう可能性がある。生録音など、その音声を再録音できない場合にはクリップしたままの音声になってしまう。そこで、クリッピングノイズを軽減する方法が必要となる。

クリッピングノイズを軽減する方法として近似補間を用いた方法が挙げられる [2]。この方法はクリップ部分の前後に補間点を取り、補間点の傾きから失った波形を再現する方法である。しかし、補間点の傾きが急な波形の場合は補間した波形が原音と大きく異なり、原音を再現できないという欠点がある。また、多項式補間の場合は次数が高くなるにつれ、補間誤差が大きくなるルンゲ現象が起こるため、補間に用いることのできるクリッピング前後のデータの個数が制限されるといった問題もある [3]。

## 1.2 本論文の構成

そこで本研究では、クリッピング軽減法として従来の近似補間ではなく、最小 2 乗法を用いた補正によってクリップ部分と前後の波形を変えることにより波形の補正を行い、クリッピングノイズを軽減することを目的とする。最小 2 乗法を用いた補正によるクリッピングノイズ軽減方法の検証、従来の補間法の一つであるニュートン補間法との比較、主観評価による原音との比較を行う。

## 1.2 本論文の構成

本論文の構成について述べる。

第 2 章では、クリッピングノイズの原因と問題点、既存の予防方法、既存のクリッピングノイズ軽減方法について述べる。

第 3 章では、最小 2 乗法について説明し、本研究で使用した補正方法について述べる。

第 4 章では、最小 2 乗法を用いた補正による結果から有効性の確認を行い、従来の方法であるニュートン補間法による補間結果との比較、RMS を用いた原音との誤差測定、クリッピングノイズ軽減の検証を行っている。

第 5 章では、これまでの検証結果から本研究の結論と、今後の課題について述べる。

## 第 2 章

# クリッピングノイズによる問題

### 2.1 はじめに

録音機器にはあらかじめ電気信号の最大入力範囲が決められており，入力範囲を越えた場合，電気信号の波形の一部が切り取られるクリップという現象が起こる．切り取られた波形は記録されていないため元の形が分からず，元の波形に戻すことは不可能である．このクリップがクリッピングノイズの原因である．クリップした音声をそのまま再生すると，クリップした信号が連続する場合，人にはクリッピングノイズと呼ばれる音割れや雑音といった音が聞こえてしまい，原音の音質劣化につながる．これは再度録音することによって解決できるが，例えば生録音のような取り直しができない状況であればクリップしたままの音声になってしまうため，このクリッピングノイズを軽減する必要がある．図 2.1 にクリップした波形を示す．クリッピングノイズ軽減法の一つに近似補間を用いたものがあるが，この方法では原音を再現できない場合や，原音との誤差が大きくなる場合がある．本章ではまずクリッピングノイズが発生する原因と問題点について述べ，次に既存のクリップ予防法について述べる．そして既存のクリッピングノイズ軽減法の一つとして，ニュートン補間法の説明と問題点を述べる．

## 2.2 既存のクリップ予防法と問題点

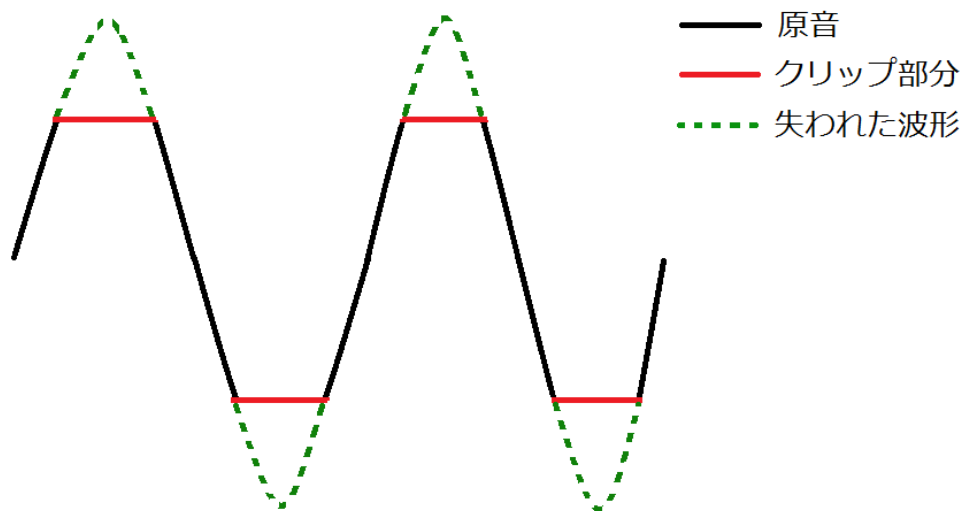


図 2.1 クリップした波形

## 2.2 既存のクリップ予防法と問題点

既存の予防法にはコンプレッサ，リミッタがある．この既存の予防法の説明と問題点について述べる．リミッタは，振幅があらかじめ設定した値に達すると振幅を圧縮する処理を行い，クリップを予防する．しかし，あらかじめ設定した値に対して予期しない過大な振幅が入力された場合，振幅を圧縮しきれずにクリップしてしまうという問題がある．

コンプレッサは，リミッタと同様に過大な振幅の入力信号を圧縮することでクリップを予防する．リミッタとの違いとして，圧縮の時間を遅らせることが可能であり，これを利用することで音声を強調することができる [4]．しかし，リミッタと同様にあらかじめ設定した値に対して予期しない過大な振幅が入力された場合，振幅を圧縮しきれずにクリップしてしまうという問題がある．

## 2.3 既存のクリッピング軽減法と問題点

クリッピングノイズの軽減法として、多項式近似による近似補間がある。この近似補間法の一つであるニュートン補間法を用いたクリッピングノイズ軽減法の説明と問題点を述べる。ニュートン補間は、近似多項式  $f_N(x)$  は  $p_N(x)$  の  $x = x_i$  における微分係数である [5]。ニュートン補間の定義式は

$$f_N(x) = \sum_{j=0}^N F[x_0, x_1, x_2, \dots, x_i] p_{i-1}(x) \quad (2.1)$$

となる。この方法はクリップ部分の前後から補間点を取り、補間点の傾きを元に失った波形を再現することでクリッピングノイズを軽減する。しかし、補間点の傾きが急な角度である場合は補間した波形が原音の波形と大きく異なり、原音を再現できないという問題がある。また、多項式補間であるため、次数が高くなるにつれて補間誤差が大きくなるルンゲ現象という現象が起こる。補間に使用するデータ点を増やすと次数が高くなるため、補間に用いることのできるクリッピング前後のデータの個数が制限されるという問題もある。ニュートン補間法の説明を図 2.2 に示す。

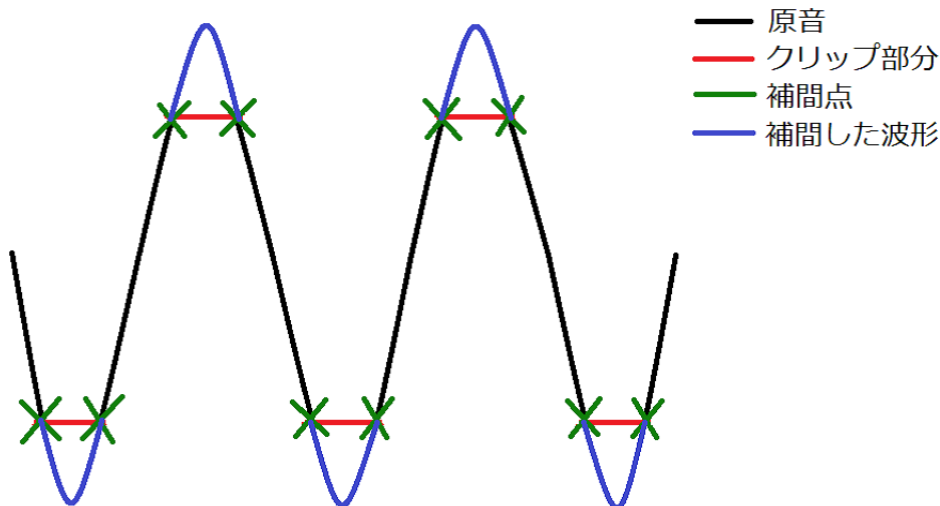


図 2.2 ニュートン補間を用いた補間方法

## 2.4 まとめ

図 2.2 のようにクリップ部分の前後から補間点を取り，補間点の傾きをもとに波形を補間する．ニュートン補間法はクリッピング部分のみを補間の対象としている．このため，クリッピング部分以外の波形は変わらない．

## 2.4 まとめ

本章では，クリッピングノイズの起こる原因と問題点を述べた．また，クリップ予防法の説明と問題点，従来のクリッピングノイズ軽減法の一つであるニュートン補間法の定義と問題点を述べた．ニュートン補間法では補間点の傾きが急な角度の場合，補間した波形が原音の波形と大きく異なることがある．さらに，ルンゲ現象によるデータの個数制限による問題もある．次章では，クリッピングノイズ軽減法として提案する最小 2 乗法を用いた補正について述べる．

## 第 3 章

# 最小 2 乗法を用いた補正

### 3.1 はじめに

既存の近似補間法を用いたクリッピングノイズ軽減法では、クリッピング部分の前後の補間点の傾きが急な角度であった場合、原音と大きく異なる波形になってしまう。また、多項式補間の場合は次数が高くなるとルンゲ現象が起こるため、補間に用いることができるデータの個数が制限されるといった問題がある。そこで本研究では、最小 2 乗法による補正を用いてクリップ部分と前後の波形を変えることにより、クリッピングノイズの軽減を行う。本章ではまず最小 2 乗法について説明し、最小 2 乗法を用いたクリッピングノイズ軽減法を述べる。

### 3.2 最小 2 乗法

最小 2 乗法は対象とするデータ全てからの 2 乗誤差が最小となる近似曲線を計算する方法である [6]。求める近似曲線  $f(x)$  を多項式

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (3.1)$$

として表現したとき、係数  $a_0, a_1, \cdots, a_n$  を最小 2 乗法を用いて算出することができる。 $m$  個のデータから最も誤差の 2 乗和が小さくなるように係数を導出する。実データとして、点の座標

$$(x_0, y_0), (x_1, y_1), \cdots, (x_m, y_m) \quad (3.2)$$



### 3.2 最小 2 乗法

が与えられたとき，連立方程式

$$\begin{cases} y_0 = a_0 + a_1 x_0 + a_2 x_0^2 + \cdots + a_n x_0^n \\ y_1 = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_1^2 + \cdots + a_n x_1^n \\ \vdots \\ y_m = a_0 + a_1 x_m + a_2 x_m^2 + \cdots + a_n x_m^n \end{cases} \quad (3.3)$$

が成り立つ．このとき，誤差の 2 乗和  $G$  は

$$\begin{aligned} G &= \sum_{i=0}^m \{y_i - f(x_i)\}^2 \\ &= \sum_{i=0}^m \{y_i - (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + \cdots + a_n x_i^n)\}^2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

となる． $G$  を最小とするにはそれぞれの係数  $a_0, a_1, \dots, a_n$  について偏微分を行い，それぞれの値を 0 にする必要がある．つまり，

$$\frac{\partial G}{\partial a_0} = \frac{\partial}{\partial a_0} \left[ \sum_{i=0}^m \{y_i - (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + \cdots + a_n x_i^n)\}^2 \right] = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial G}{\partial a_1} = \frac{\partial}{\partial a_1} \left[ \sum_{i=0}^m \{y_i - (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + \cdots + a_n x_i^n)\}^2 \right] = 0 \quad (3.6)$$

$\vdots$

$$\frac{\partial G}{\partial a_n} = \frac{\partial}{\partial a_n} \left[ \sum_{i=0}^m \{y_i - (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + \cdots + a_n x_i^n)\}^2 \right] = 0. \quad (3.7)$$

式 (3.5)~(3.7) をそれぞれ整理すると，

$$a_0 \cdot m + a_1 \sum_{i=0}^m x_i + \cdots + a_n \sum_{i=0}^m x_i^n = \sum_{i=0}^m y_i \quad (3.8)$$

$$a_0 \sum_{i=0}^m x_i + a_1 \sum_{i=0}^m x_i^2 + \cdots + a_n \sum_{i=0}^m x_i^{n+1} = \sum_{i=0}^m (x_i y_i) \quad (3.9)$$

$\vdots$

$$a_0 \sum_{i=0}^m x_i^n + a_1 \sum_{i=0}^m x_i^{n+1} + \cdots + a_n \sum_{i=0}^m x_i^{2n} = \sum_{i=0}^m (x_i^n y_i) \quad (3.10)$$

となる．ここで

$$A = \begin{bmatrix} m & \sum_{i=0}^m x_i & \cdots & \sum_{i=0}^m x_i^n \\ \sum_{i=0}^m x_i & \sum_{i=0}^m x_i^2 & \cdots & \sum_{i=0}^m x_i^{n+1} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \sum_{i=0}^m x_i^n & \sum_{i=0}^m x_i^{n+1} & \cdots & \sum_{i=0}^m x_i^{2n} \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$

### 3.3 最小 2 乗法を用いた補正

$$\mathbf{x} = (a_0, a_1, \dots, a_n)^T, \quad (3.12)$$

$$\mathbf{b} = \left( \sum_{i=0}^m y_i, \sum_{i=0}^m (x_i y_i), \dots, \sum_{i=0}^m (x_i^n y_i) \right)^T \quad (3.13)$$

とおくと、式 (3.8)~(3.10) は連立方程式

$$A\mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (3.14)$$

と書くことができ、式 (3.14) を正規方程式と呼ぶ。ただし、 $^T$  は行列の転置を表す。 $\mathbf{x}$  は求めたい近似曲線  $f(x)$  の係数であるので、正規方程式を解くことで近似曲線を導出することができる。

最小 2 乗法を用いた補正と従来の多項式補間の大きな違いは、最小 2 乗法ではクリップ部分の前後点も含めて波形を変化させる、という点である。このためクリップしていないデータ点も影響を受けてしまうが、補間式の次数を上げることなく、より前後のデータと関連を強めた補正を行うことができる。

### 3.3 最小 2 乗法を用いた補正

最小 2 乗法による補正ではクリップ部分の前後点も含めて波形を変化させることが可能である。これは、最小 2 乗法の特徴としてニュートン補間法のように全てのデータ点を通る必要がない事、ルンゲ現象の影響を受けないことが挙げられるためである。これらの特徴を利用し、最小 2 乗法を用いて得た近似曲線をクリップ部分とその前後に差し替えることで補正を行う。このためクリップしていないデータ点も影響を受けてしまうが、より前後のデータと関連を強めた補正を行うことができる。最小 2 乗法を用いた補正の過程である、補正点の選択を図 3.1 に示す。また、最小 2 乗法を用いて補正を行ったものを図 3.2 に示す。

### 3.3 最小 2 乗法を用いた補正

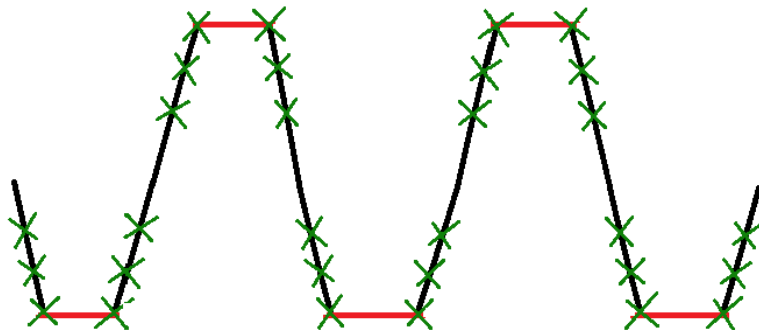


図 3.1 補正点の選択

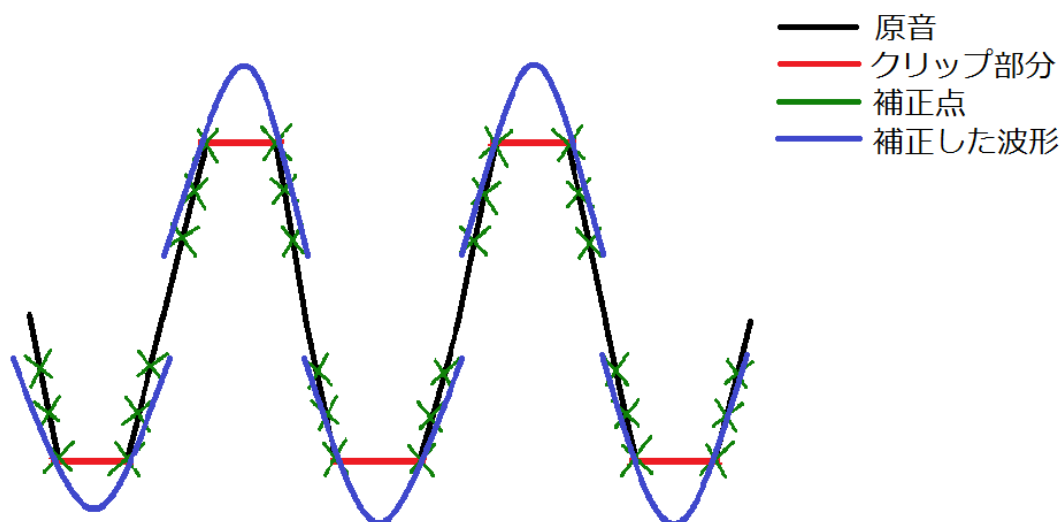


図 3.2 最小 2 乗法を用いた補正

### 3.4 まとめ

図 3.1 から、ニュートン補間法と同じくクリップ部分の前後から補正に使用する点を取っていることが分かる。しかし、補間と違いルンゲ現象の影響を受ける心配がないため、補正に使用するデータ点の個数を多くすることが可能である。本研究ではクリップ部分の前後 5 点ずつから補正に使用するデータ点を取っている。また、補間との違いとして図 3.2 から最小 2 乗法を用いて補正を行った波形が補正点を通過していないこと、クリップ部分だけでなくその前後の波形も含めて補正を行っていることが分かる。

### 3.4 まとめ

本章では、最小 2 乗法の説明と本研究で用いたクリッピングノイズ補正方法の説明を述べた。次章では従来の補間法であるニュートン補間法を用いた補間結果の評価と原音との比較、本研究で用いた補正方法による補正結果の評価と原音との比較、クリッピングノイズ軽減の比較を行い、最小 2 乗法を用いた補正の有効性を評価する。

## 第 4 章

# クリッピングノイズ軽減の検証と 比較

### 4.1 はじめに

本章では，クリップした音声に対してのクリッピングノイズ軽減法として，最小 2 乗法を用いた補正が有効かを検証するため，ニュートン補間法を比較の対象とし，ニュートン補間法を用いた補間の検証と原音との比較，本研究で用いた補正方法による補正の検証と原音との比較，RMS による評価，クリッピングノイズ軽減の比較を行う．

検証として，エレキギター 1 弦解放弦の音をクリップさせたものと，音楽の音をクリップさせたものに対して補間，補正を行う．そしてそれぞれの結果をクリップしている波形と比較する．また，クリッピングノイズ軽減の比較と原音との比較では，まず補間，補正を行った波形と原音の波形を比較し，どの程度原音に近いのか調べるために RMS によって原音との誤差を求め，比較する．また，主観的な評価方法として被験者実験を行い，アンケートを取る．被験者は 20 代男性，6 人を対象として評価を行った．

### 4.2 補間と補正の結果

本研究では，クリップ部分と前後の波形を最小 2 乗法を用いて求めた曲線に差し変えることにより，補正することでクリッピングノイズの軽減を行う．また，近似補間法の一つであるニュートン補間法と比較し，システムの有効性を検証する．そこで，それぞれの方法

## 4.2 補間と補正の結果

でクリッピングノイズを軽減し、どのような違いがあるのかを検証する．今回の検証では、ニュートン補間法はクリップ部分の前後 2 点から 3 次関数で補間を行い、最小 2 乗法を用いた補正はクリップ部分の前後 5 点から 3 次関数で近似曲線を求め、求めた曲線をクリップ部分と前後の波形に差し替えることで補正を行う．今回の検証では、エレキギター 1 弦開放弦の音と打楽器による音楽をマイクで録音したものを原音として使用する．また、原音を 7.0dB 増幅させ、一定の振幅数以上または以下の波形を切りとったものをクリップした音 1 として使用し、原音を 11.0dB 増幅させて同じ処理を行ったものを、クリップした音 2 として使用する．使用したエレキギターの原音の波形を図 4.1 に、エレキギターの原音をクリップさせた音 1 を図 4.2 に、エレキギターの原音をクリップさせた音 2 を図 4.3 に、音楽の原音を図 4.4 に、音楽の原音をクリップさせた音 1 を図 4.5 に、音楽の原音をクリップさせた音 2 を図 4.6 に示す．エレキギターの音のデータ数は 220,563 個、音楽の音のデータ数は 293,376 個である．

## 4.2 補間と補正の結果

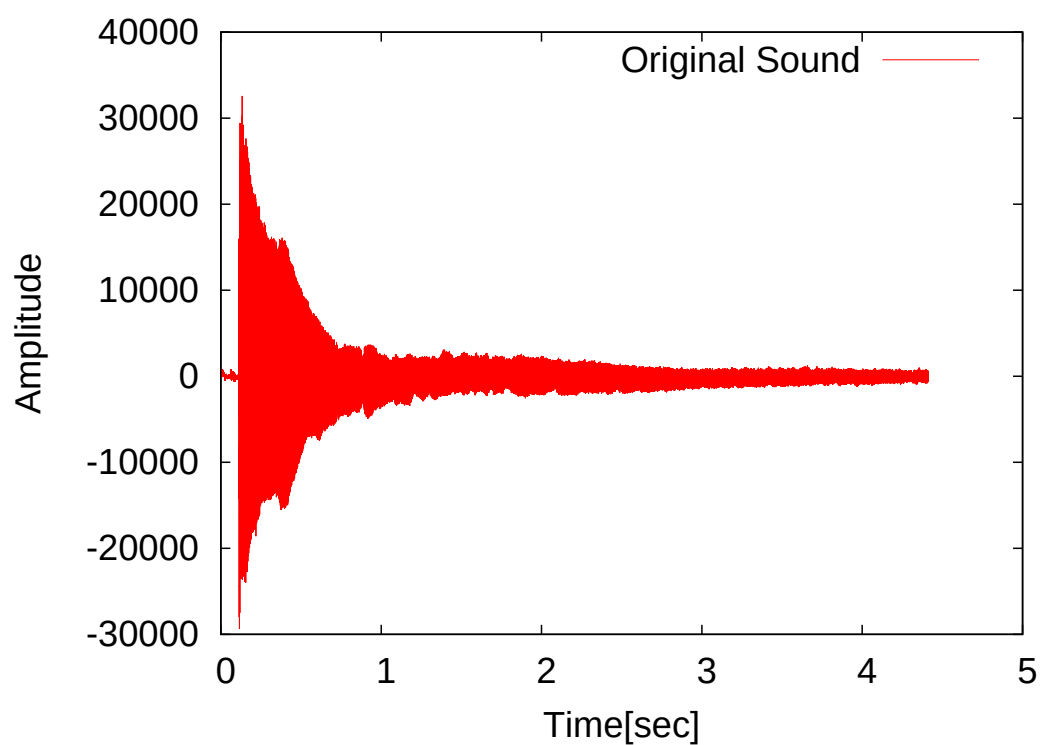


図 4.1 エレキギターの原音

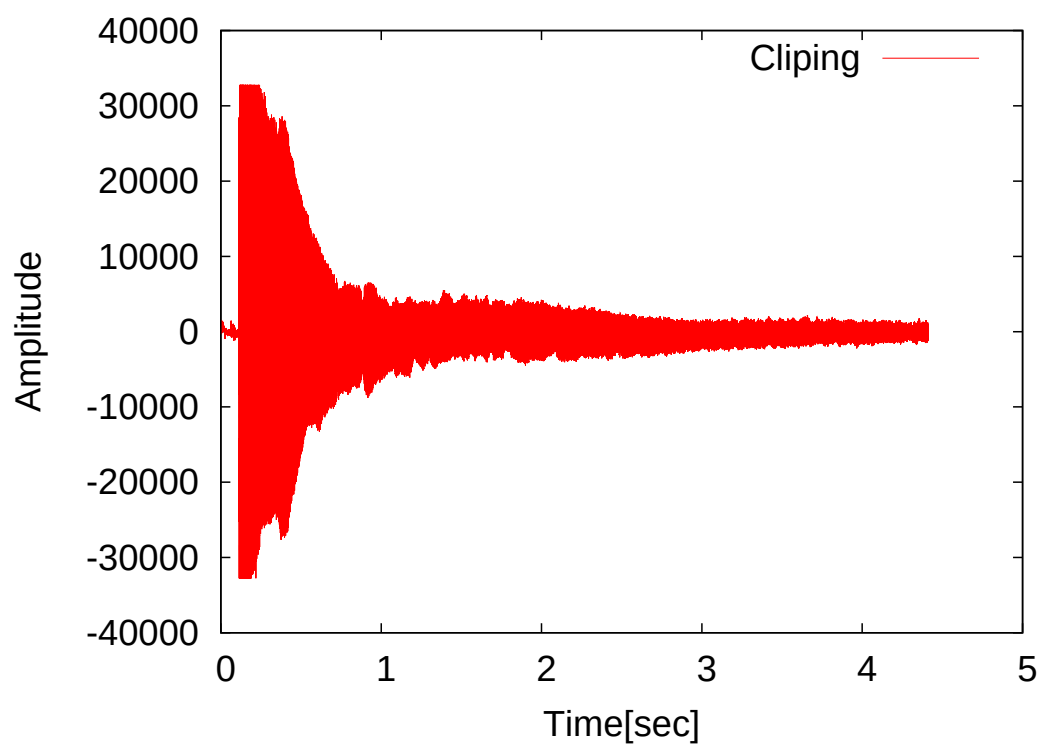


図 4.2 エレキギター原音のクリッピングした音 1

## 4.2 補間と補正の結果

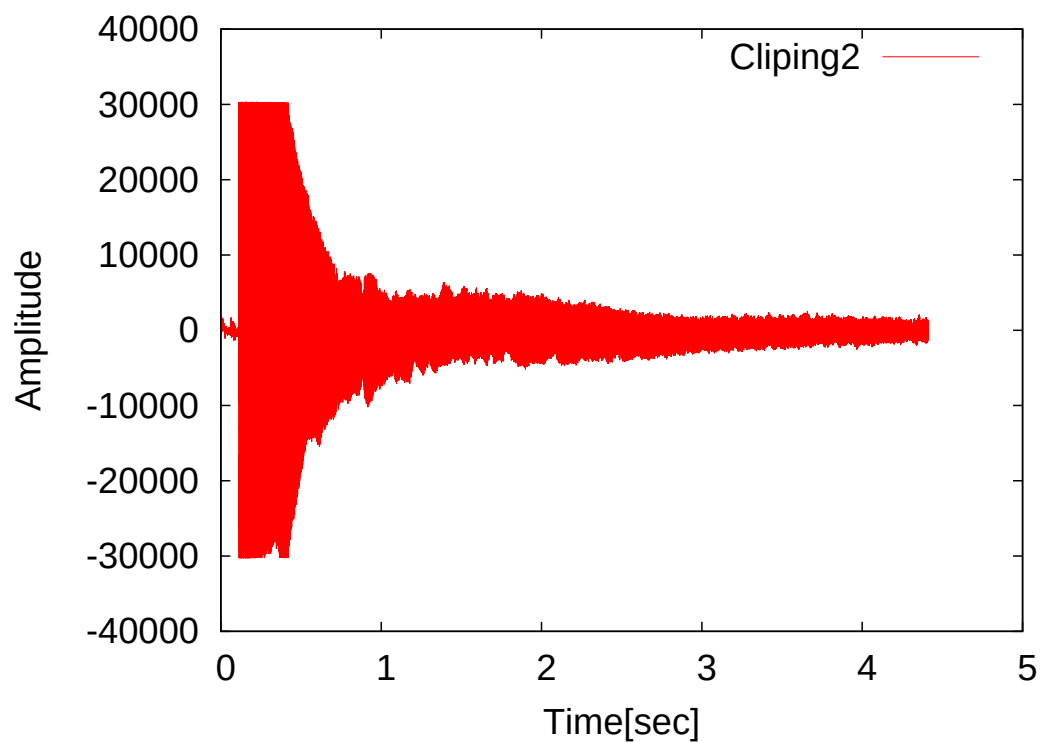


図 4.3 エレキギター原音のクリッピングした音 2

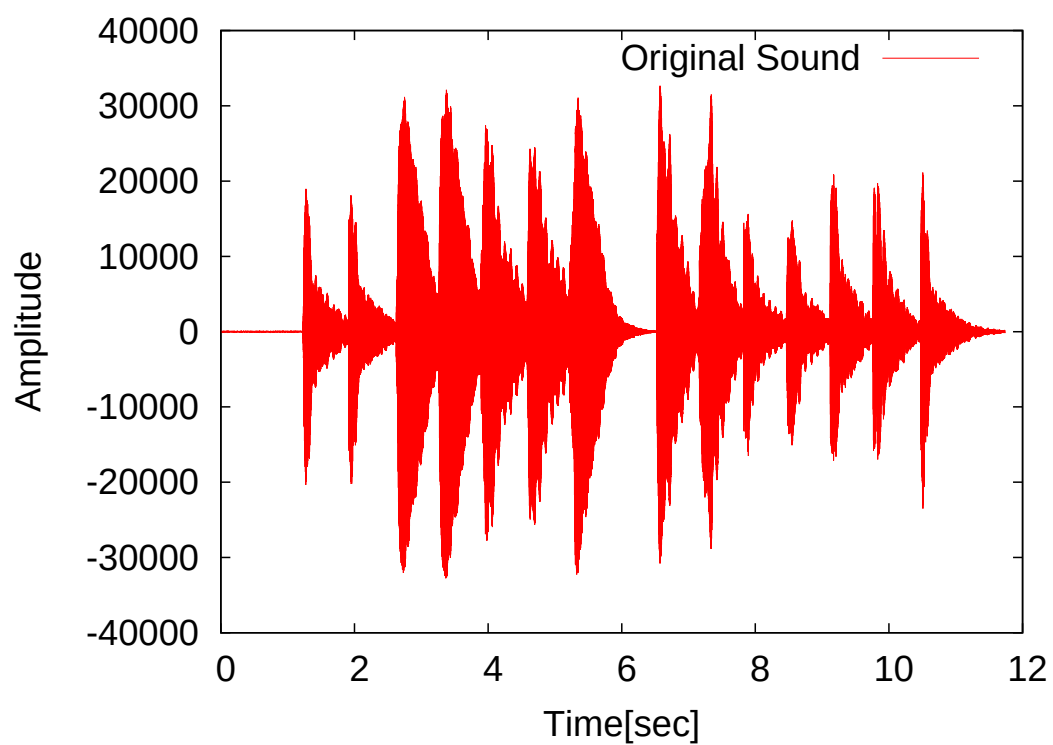


図 4.4 音楽の原音



## 4.2 補間と補正の結果

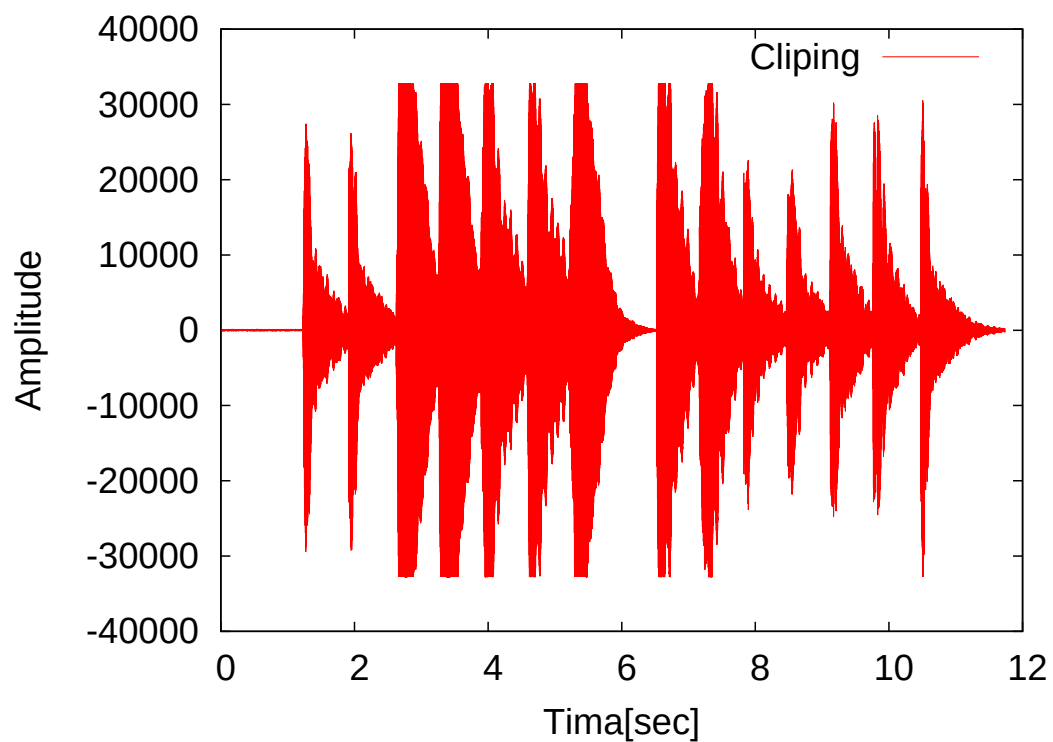


図 4.5 音楽原音のクリッピングした音 1

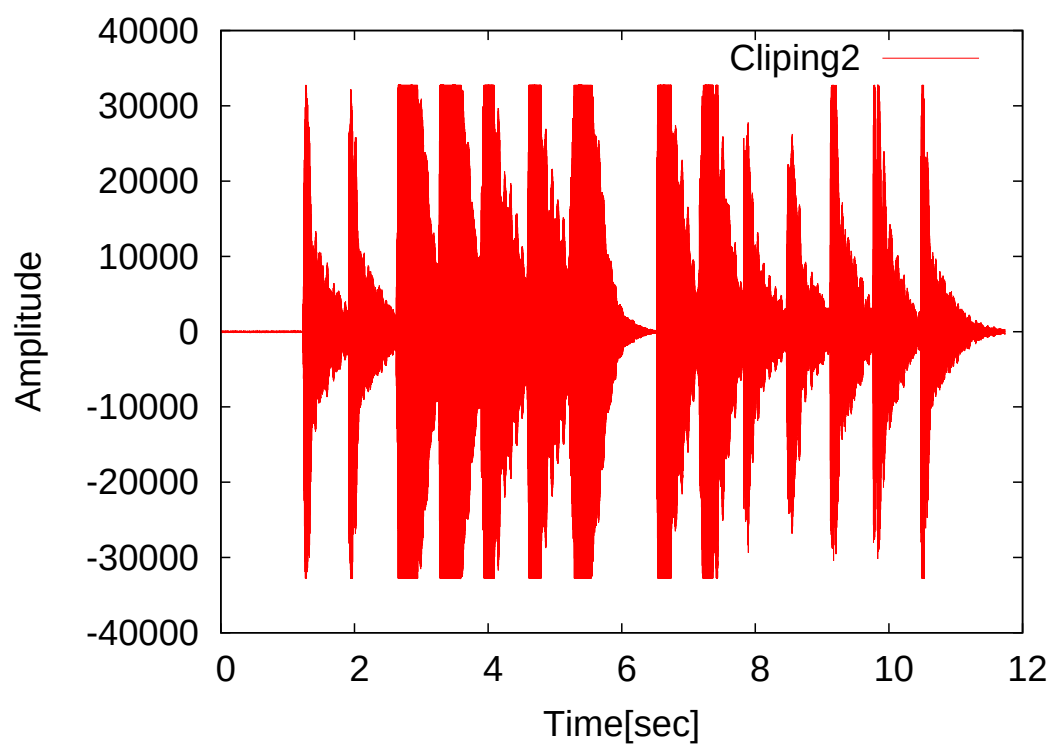


図 4.6 音楽原音のクリッピングした音 2

## 4.2 補間と補正の結果

### 4.2.1 ニュートン補間法

従来の補間法であるニュートン補間法でクリッピング部分を補間することでクリッピングノイズを軽減できているかの検証を行う。図 4.2 の波形をニュートン補間法で補間を行ったものを図 4.7 に、図 4.3 の波形をニュートン補間法で補間を行ったものを図 4.8 に、図 4.5 の波形をニュートン補間法で補間を行ったものを図 4.9 に、図 4.6 の波形をニュートン補間法で補間を行ったものを図 4.10 に示す。また、補間結果とクリップした波形の一部を比較したものを図 4.11 に示す。

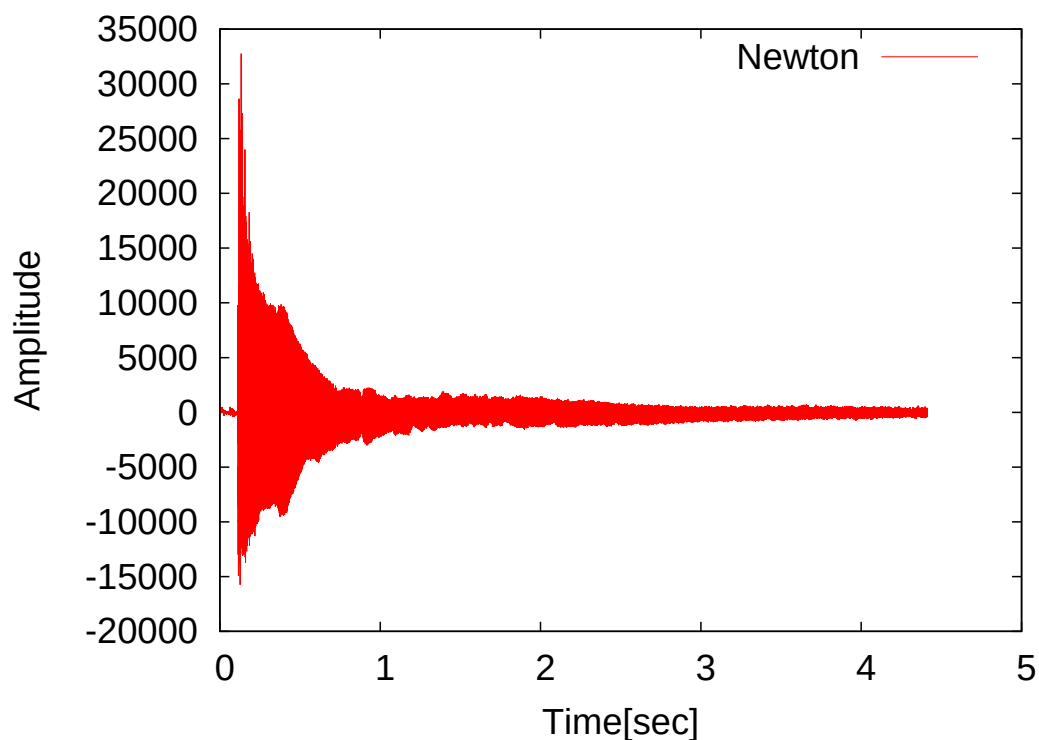


図 4.7 エレキギターのクリッピングした音 1 の補間結果

## 4.2 補間と補正の結果

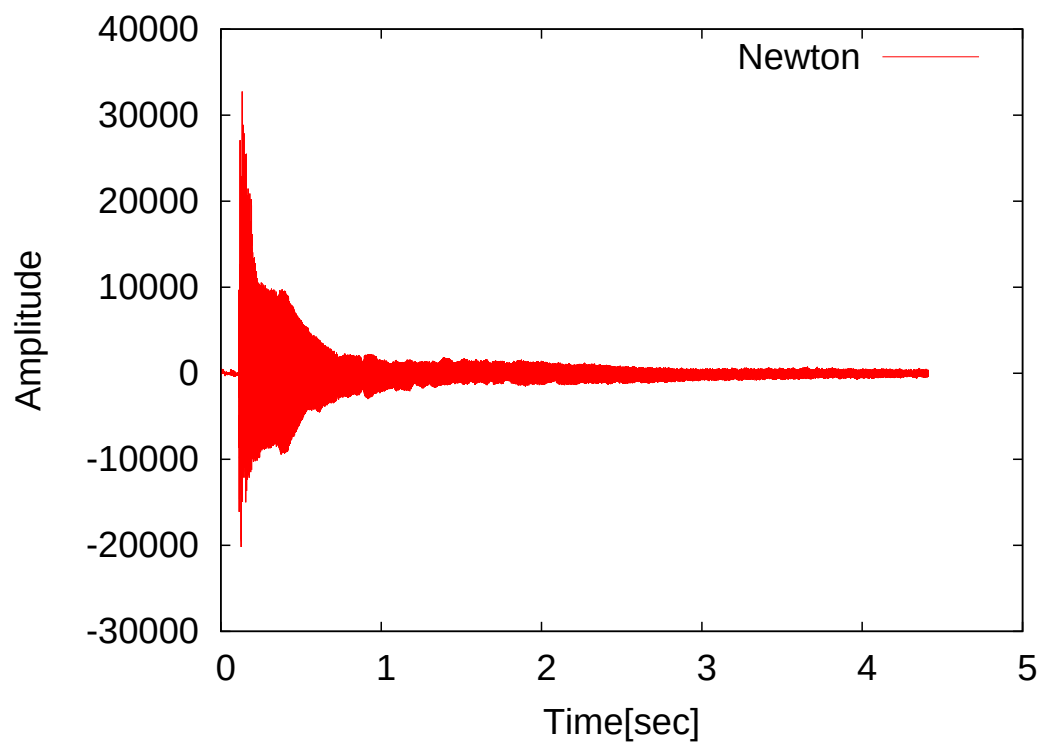


図 4.8 エレキギターのクリッピングした音 2 の補間結果

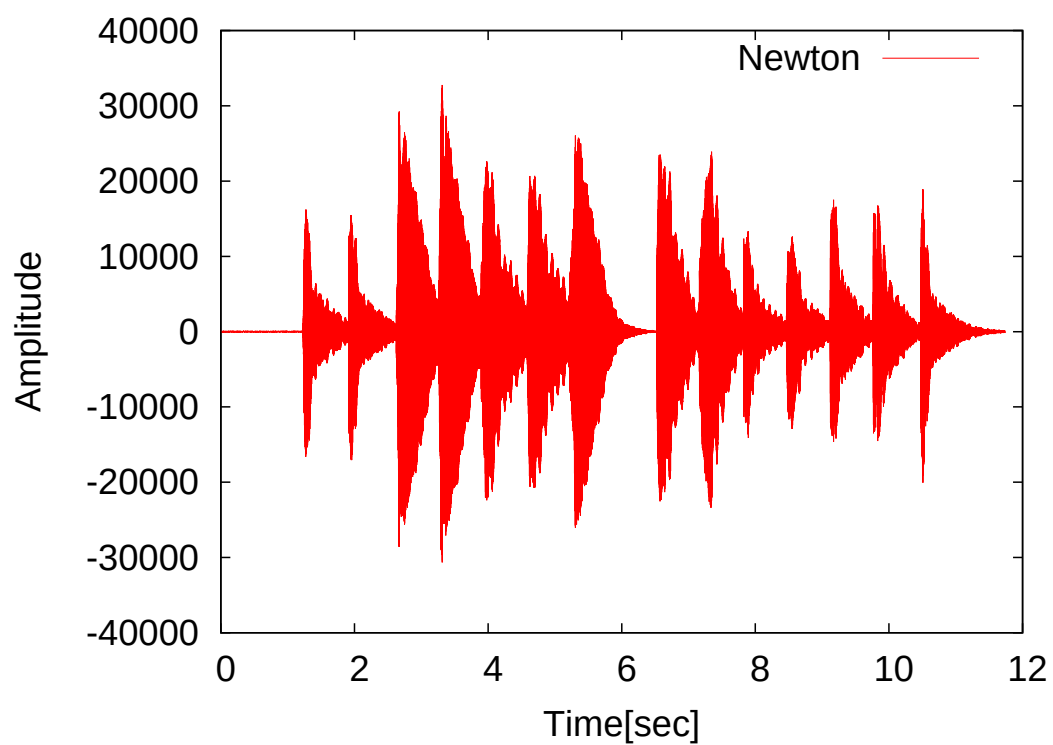


図 4.9 音楽のクリッピングした音 1 の補間結果

## 4.2 補間と補正の結果

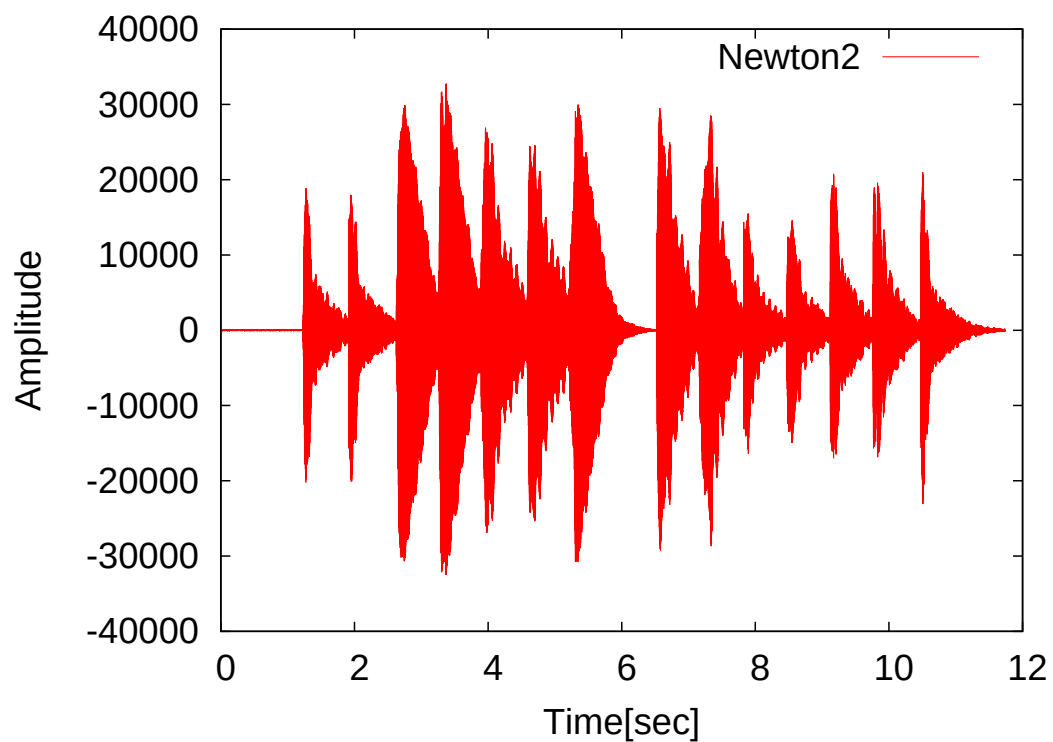


図 4.10 音楽のクリッピングした音 2 の補間結果

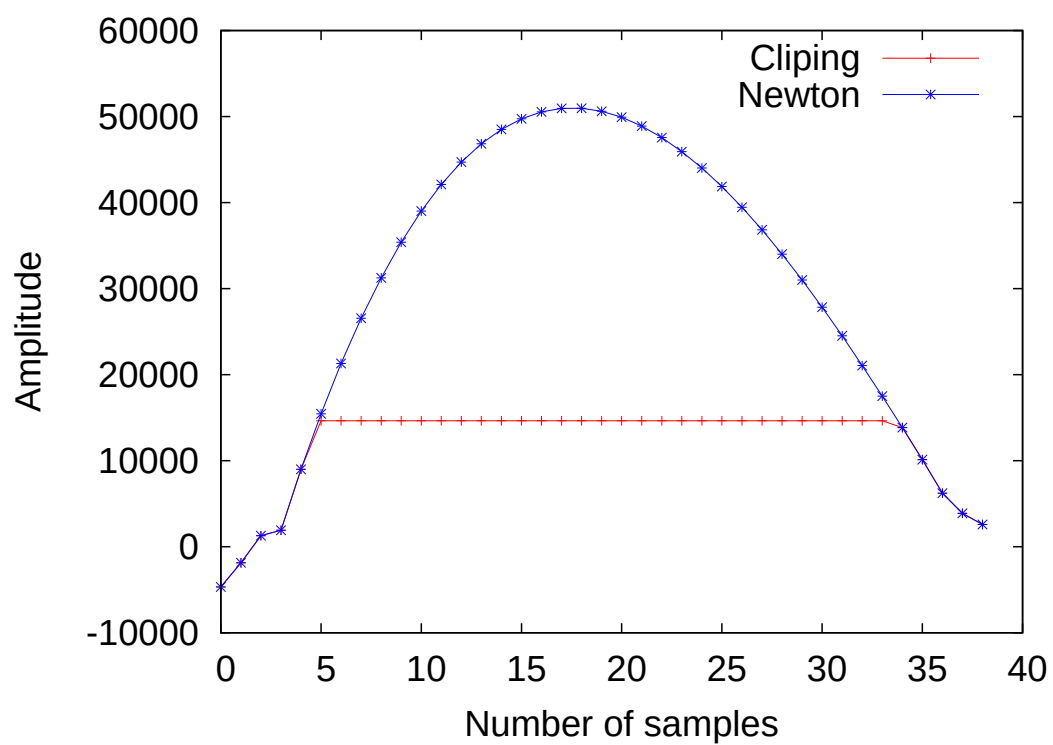


図 4.11 補間結果とクリップした波形の比較

## 4.2 補間と補正の結果

図 4.11 から、ニュートン補間法はクリッピング部分を有効に補間できている事が分かる。また、近似補間の特徴である補間点全てのデータ点を通過していることが分かる。

ニュートン補間法により、クリッピングノイズが軽減されているか、原音に近い波形になっているかを検証するため、原音の波形と比較する。図 4.11 と同じ部分の原音の波形と、ニュートン補間法によって補間した波形の比較を図 4.12 に示す。

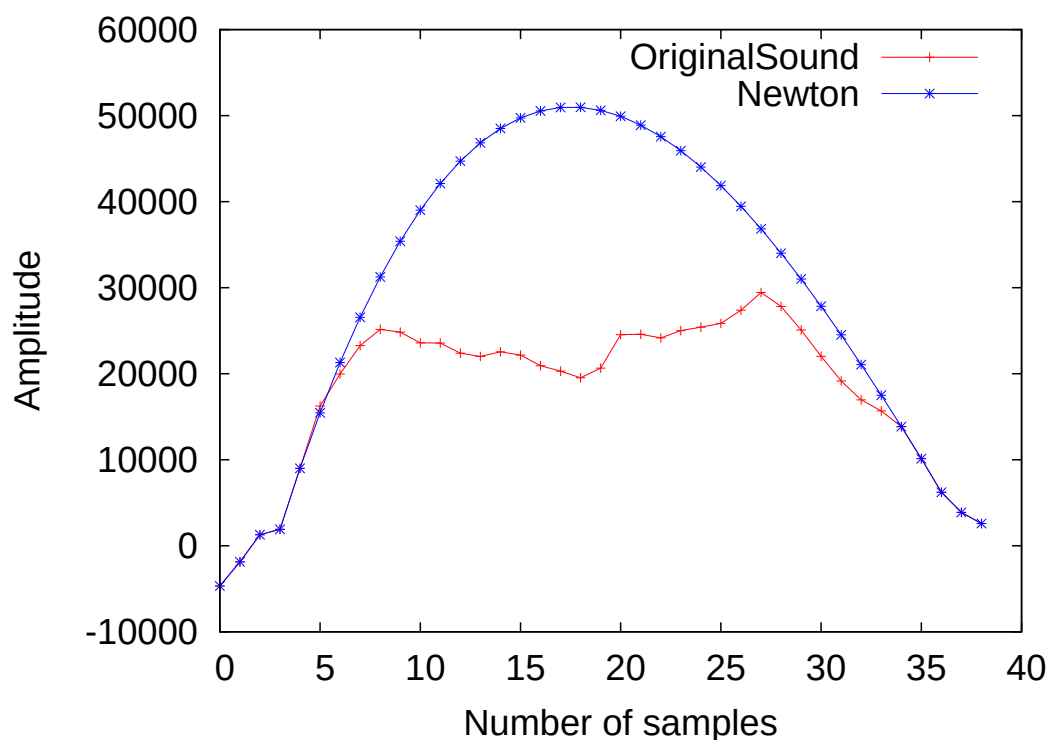


図 4.12 補間結果と原音波形の比較

図 4.12 から、ニュートン補間法の特徴である補間点の前後は原音と同じであるという事が分かる。また、補間部分は原音との誤差が大きく、原音を再現できていないことが分かる。この理由として、クリップ部分前後点の傾きが急な角度であったこと、補間に用いたデータ点の個数が少ないことが挙げられる。

## 4.2 補間と補正の結果

### 4.2.2 最小 2 乗法による補正

最小 2 乗法を用いた補正により，波形を変えることでクリッピングノイズを軽減できているかの検証を行う．図 4.2 の波形を最小 2 乗法を用いて補正を行ったものを図 4.13 に，図 4.5 の波形を最小 2 乗法を用いて補正を行ったものを図 4.15 に示す．また，補正結果とクリップした波形の一部を比較したものを図 4.17 に示す．

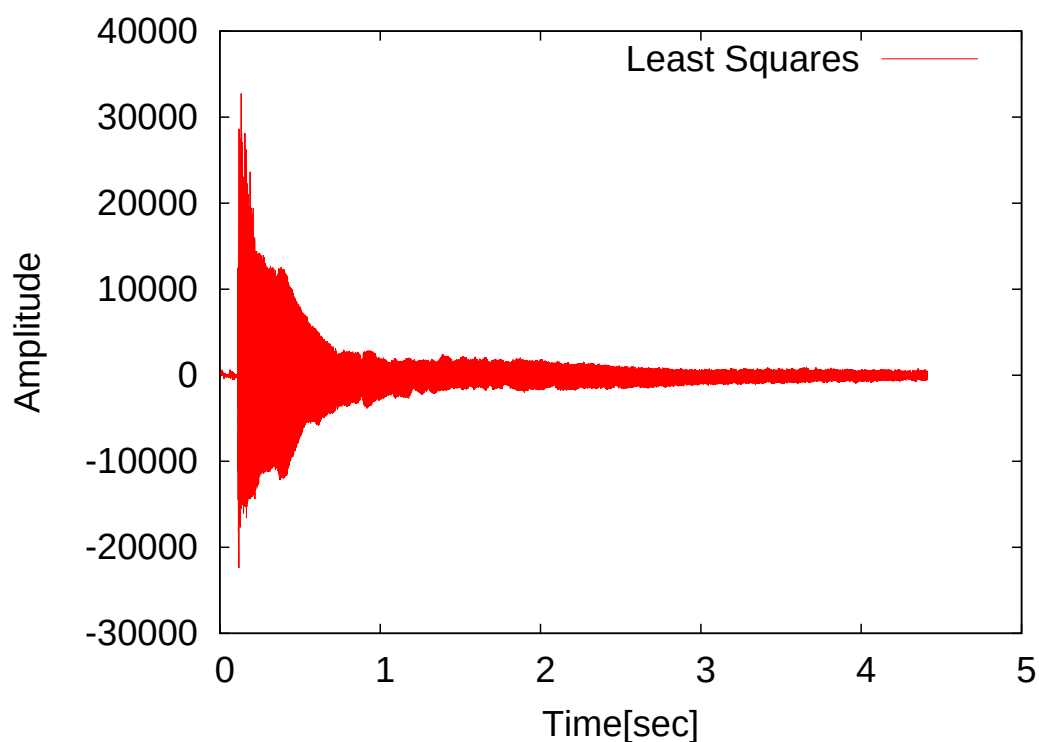


図 4.13 エレキギターのカリッピングした音 1 の補正結果

## 4.2 補間と補正の結果

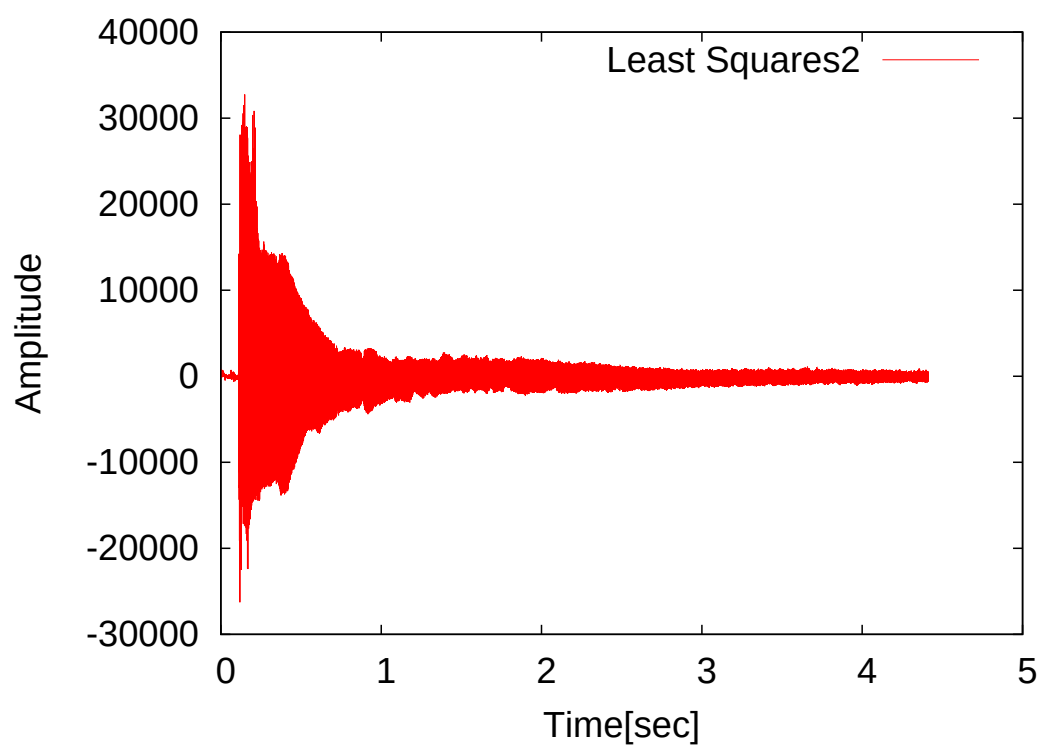


図 4.14 エレキギターのカリッピングした音 2 の補正結果

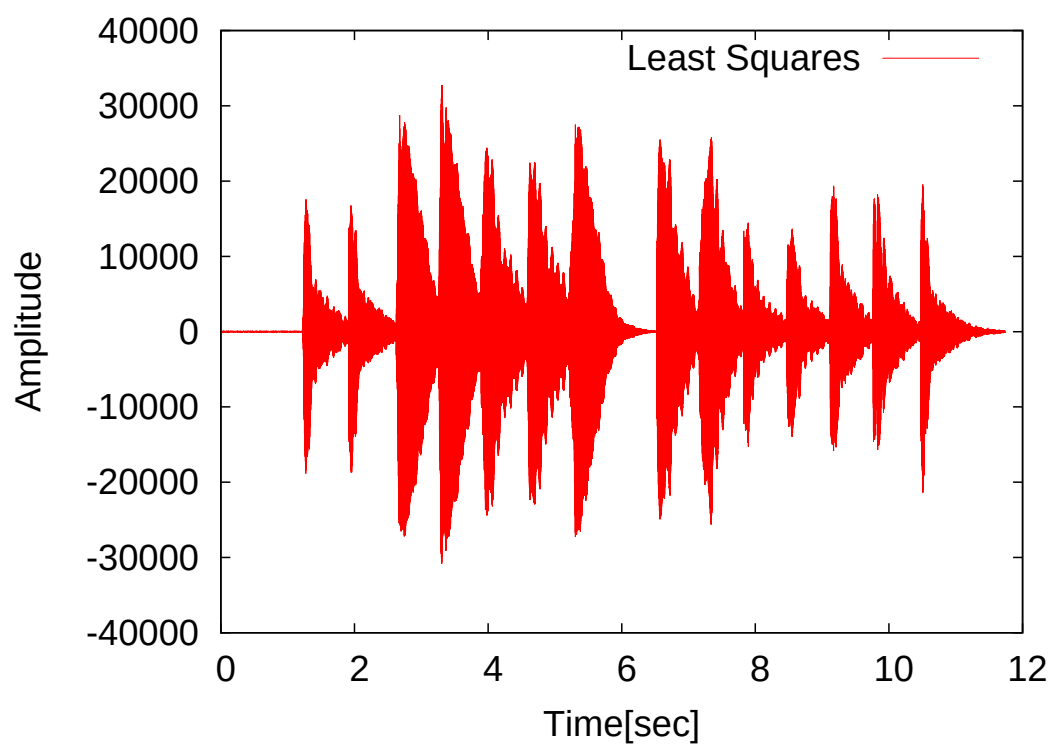


図 4.15 音楽のカリッピングした音 1 の補正結果

## 4.2 補間と補正の結果

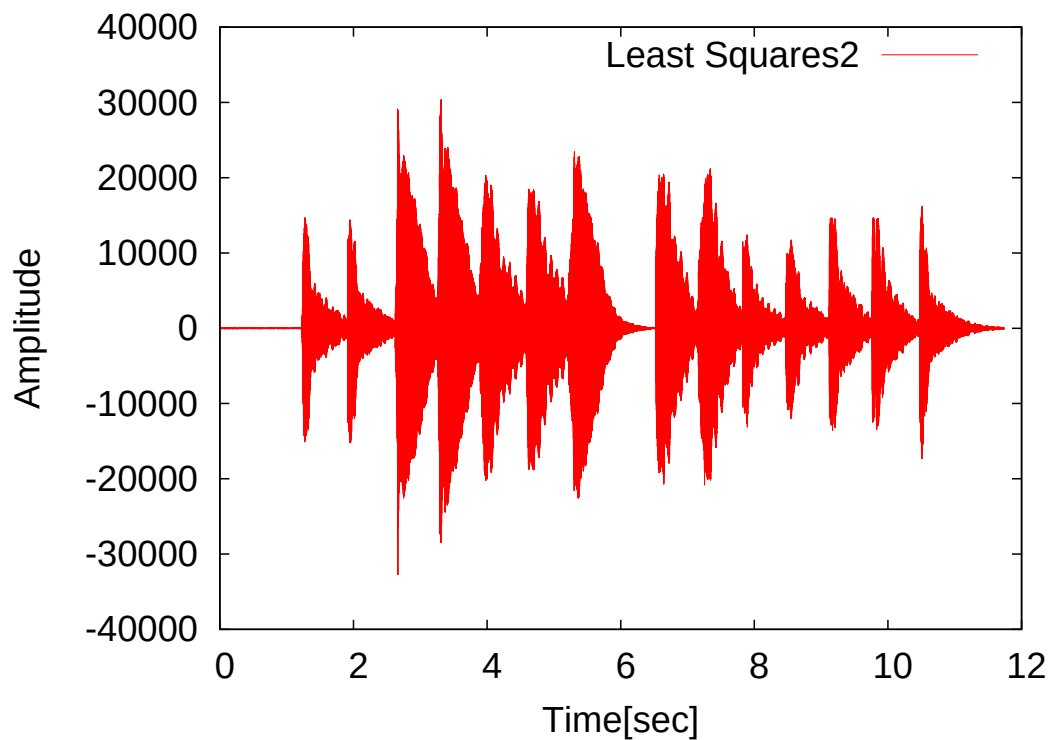


図 4.16 音楽のクリッピングした音 2 の補正結果

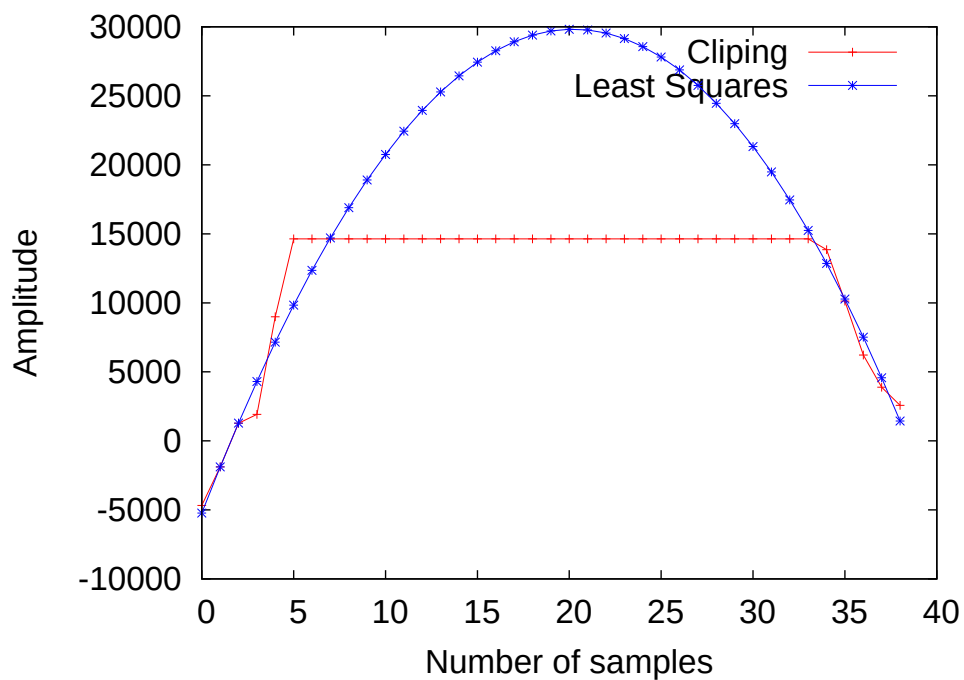


図 4.17 補正結果とクリップした波形の比較



## 4.2 補間と補正の結果

図 4.17 から，最小 2 乗法による補正でもクリッピング部分を有効に補正できていることが分かる．また，クリッピング部分の前後点に変更を加え，新たな波形として差し替えていることが確認できる．

最小 2 乗法を用いた補正により，クリッピングノイズが軽減されているか，原音に近い波形になっているかを検証するため，原音の波形と比較する．図 4.17 と同じ部分の原音の波形と，最小 2 乗法を用いて補正した波形の比較を図 4.18 に示す．

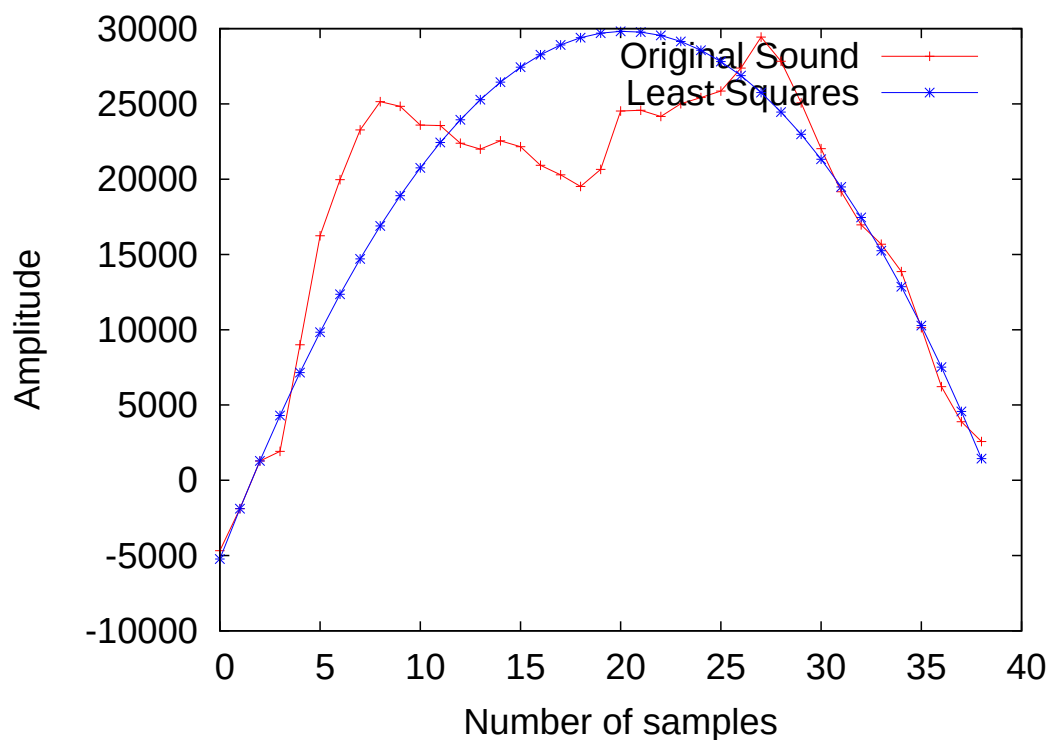


図 4.18 補正結果と原音波形の比較

図 4.18 から，部分的に原音に近い波形を作ることができていることが分かる．

### 4.2.3 両方式の比較

従来の方であるニュートン補間法と，今回用いた最小 2 乗法による補正の違いを検証するため，それぞれの波形を比較する．ニュートン補間法による補間結果，最小 2 乗法による補正結果，原音，原音をクリッピングさせたものの一部を図 4.19 に示す．

### 4.3 RMS による誤差判定

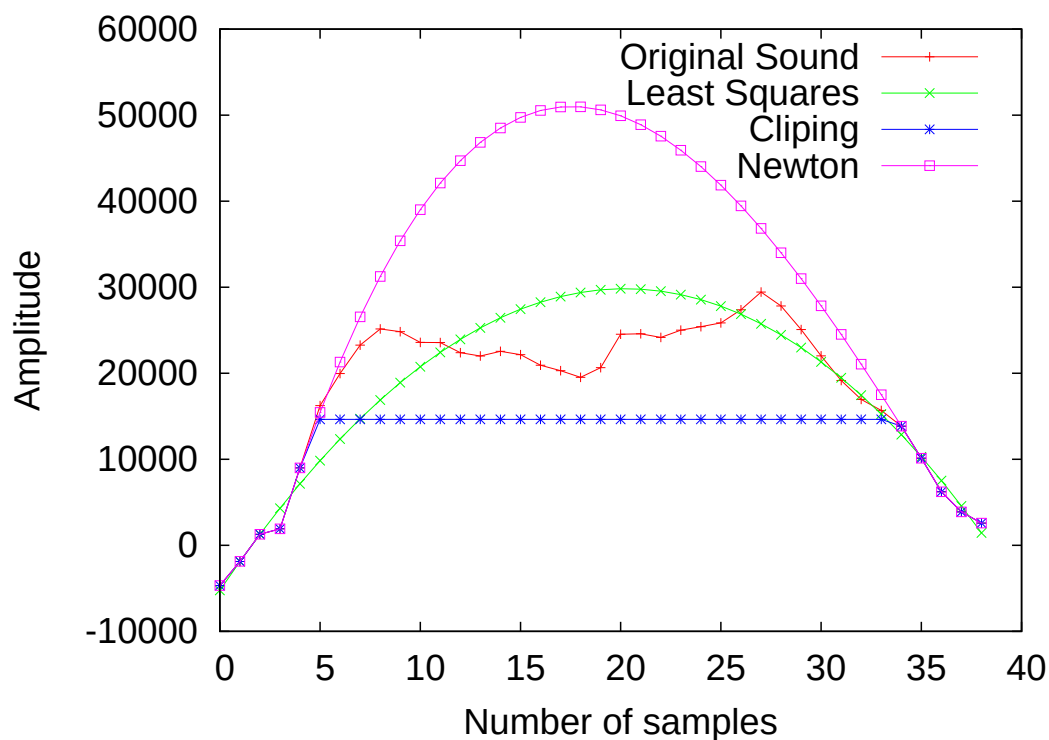


図 4.19 全体の比較

図 4.19 から、どちらの方法でもクリップ部分が無くなっており、最小 2 乗法を用いた補正結果の波形が、ニュートン補間法による補間結果の波形より部分的に原音に近いことが確認できる。また、ニュートン補間法ではクリッピングしている部分のみを補間しており、最小 2 乗法による補正ではクリッピングしていない部分の波形も変化していることが確認できる。

### 4.3 RMS による誤差判定

ニュートン補間法による補間結果と、最小 2 乗法による補正結果が原音とどの程度近いのかを検証するため、それぞれの波形と原音との誤差を RMS を用いて算出し、比較する。RMS とは、2 乗平均平方根のことであり、信号の大きさの測定方法の一つである。今回は補間した波形と原音、補正した波形と原音それぞれの値の差を RMS を用いて測定し、原音との差の大きさを比較する。測定した誤差が小さいほど原音に近いといえる。誤差の結果を表 4.1 に示す。

#### 4.4 主観評価

表 4.1 RMS による誤差判定

|              | ニュートン補間法   | 最小 2 乗法による補正 |
|--------------|------------|--------------|
| クリップしたギター音 1 | 8734.16482 | 5233.15385   |
| クリップしたギター音 2 | 5471.41124 | 9868.44043   |
| クリップした音楽 1   | 116.78826  | 1197.03466   |
| クリップした音楽 2   | 2358.30093 | 3446.87365   |

表 4.1 から、場合によってニュートン補間法で補間した波形より、最小 2 乗法を用いて補正した波形の方が値が小さく、原音の波形との誤差が少ない事が確認できる。このことから、最小 2 乗法を用いた補正によってニュートン補間より原音に近い波形を作ることができる事が分かる。しかし、クリップ部分が増加すると誤差も増加することが確認できる。

#### 4.4 主観評価

最小 2 乗法による補正がどの程度クリッピングノイズを軽減できているか、原音に近づけているかを検証するため、被験者実験によるアンケート評価を行う。評価の方法として、まず被験者に原音と原音をクリッピングさせた音を聞いてもらう。その後、クリッピングさせた音をニュートン法による補間と最小 2 乗法による補正を行ったものをそれぞれ聞いてもらい、クリッピングノイズの軽減度、原音の再現度についてアンケートに答えてもらう。アンケート中ではニュートン補間法による補間を行った音声を A、最小 2 乗法による補正を行った音声を B としている。また、クリップした音は音声 1、クリップ部分を増やした音は音声 2 としている。被験者にはクリッピングノイズを軽減できているか、原音を再現できているかについて 3 段階で評価してもらう。今回の被験者は 20 代男性 6 名としている。

#### 4.4 主観評価

エレキギターの音 1 のクリッピングノイズ軽減度アンケート評価の結果を表 4.2 に，原音再現度のアンケート評価の結果を表 4.3 に示す．音楽の音 1 クリッピングノイズ軽減度アンケート評価の結果を表 4.4 に，原音再現度のアンケート評価の結果を表 4.5 に示す．エレキギターの音 2 のクリッピングノイズ軽減度アンケート評価の結果を表 4.6 に，原音再現度のアンケート評価の結果を表 4.7 に示す．音楽の音 2 クリッピングノイズ軽減度アンケート評価の結果を表 4.8 に，原音再現度のアンケート評価の結果を表 4.9 に示す．

表 4.2 クリッピングノイズ軽減度アンケート (エレキギターの音声 1)

|   | 不快感がある | 少し不快感がある | 不快感はない |
|---|--------|----------|--------|
| A | 0      | 1        | 5      |
| B | 0      | 4        | 2      |

表 4.3 原音の再現度アンケート (エレキギターの音声 1)

|   | 明らかに異なる | 多少原音に近い | 原音に近い |
|---|---------|---------|-------|
| A | 0       | 0       | 6     |
| B | 0       | 0       | 6     |

#### 4.4 主観評価

表 4.4 クリッピングノイズ軽減度のアンケート (音楽の音声 1)

|   | 不快感がある | 少し不快感がある | 不快感はない |
|---|--------|----------|--------|
| A | 0      | 0        | 6      |
| B | 0      | 6        | 0      |

表 4.5 原音の再現度のアンケート (音楽の音声 1)

|   | 明らかに異なる | 多少原音に近い | 原音に近い |
|---|---------|---------|-------|
| A | 0       | 1       | 5     |
| B | 0       | 4       | 2     |

表 4.6 クリッピングノイズ軽減度アンケート (エレキギターの音声 2)

|   | 不快感がある | 少し不快感がある | 不快感はない |
|---|--------|----------|--------|
| A | 0      | 6        | 0      |
| B | 2      | 4        | 0      |

#### 4.4 主観評価

表 4.7 原音の再現度アンケート (エレキギターの音声 2)

|   | 明らかに異なる | 多少原音に近い | 原音に近い |
|---|---------|---------|-------|
| A | 0       | 5       | 1     |
| B | 3       | 3       | 0     |

表 4.8 クリッピングノイズ軽減度のアンケート (音楽の音声 2)

|   | 不快感がある | 少し不快感がある | 不快感はない |
|---|--------|----------|--------|
| A | 2      | 4        | 0      |
| B | 5      | 1        | 0      |

表 4.9 原音の再現度のアンケート (音楽の音声 2)

|   | 明らかに異なる | 多少原音に近い | 原音に近い |
|---|---------|---------|-------|
| A | 0       | 6       | 0     |
| B | 3       | 3       | 0     |

## 4.5 まとめ

表 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 から, 原音に近い音になり, 不快感も少ないという評価が多いことが分かる. また, 表 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 から, クリップ部分が増えると違和感を感じる音になってしまい, 原音と異なる音になっていることが分かる. これは RMS の比較結果からも確認でき, 誤差の増加と比例していることが分かる.

原因のひとつとして, 補正を行った部分の波形と元の波形がスムーズに繋がっていない可能性がある. クリップ部分が増えるにつれ, スムーズに繋がっていない部分も増えるために違和感を感じる音になると考えられる. この問題の対処法として, 窓関数と重複加算を利用する方法が挙げられる. 補正した波形に対して窓関数を使うことで波形の両端を滑らかにし, 重複加算を用いて足し合わせることで, 波形同士をスムーズに接続できると考えられる.

## 4.5 まとめ

本章では, ニュートン補間法と比べて最小 2 乗法を用いた補正が有効であるかの検証のため, それぞれの結果の波形を原音の波形, 原音をクリップさせた波形と比較した. また, クリッピングノイズを軽減できているかを検証するために被験者実験によるアンケート評価を行った. 有効に補間, 補正できているかの検証では, どちらの方法でもクリップ部分が減少していることが確認でき, 最小 2 乗法を用いた補正のほうが部分的に原音に近い波形となることが確認できた. また, RMS による誤差の判定では, ニュートン補間法を用いて補間した波形よりも最小 2 乗法を用いて補正した波形の方が数値上の差が少ない場合があり, より原音に近いという結果となった. しかし, クリップ部分が増加すると誤差も増加することが分かった. 実験によるアンケート評価では, 不快感は少なく, 原音にも近いという結果となったが, クリップ部分の増加によって誤差が増えるにつれ, 波形同士の不連続な接合部分が多くなり, 不快感のある音となることが分かった.

# 第 5 章

## 結論

### 5.1 本研究のまとめ

クリッピングノイズ軽減法として、近似補間法を用いた手法が使用されている。この方法はクリッピング部分の前後の波形から、クリッピングすることによって失われた波形を推定、補間することでクリッピングノイズを軽減する。しかし、この方法ではクリッピング部分の多いデータの場合、補間した波形と原音の波形が大きく異なり、原音を再現できない。また、クリッピング部分の前後のデータを用いる個数も制限される。これは、多項式補間であるために次数を高くするとルンゲ現象が発生し、補間誤差が大きくなるためである。

本研究では、クリッピングノイズ軽減法として最小 2 乗法を用いた補正法を使用し、従来の補間法であるニュートン補間法を用いた補間結果の評価と原音との比較、本研究で用いた補正方法による補正結果の評価と原音との比較、クリッピングノイズ軽減の比較を行い、最小 2 乗法を用いた補正の有効性を評価した。

ニュートン補間法を用いた補間結果の評価と原音との比較では、クリップ部分は有効に補間されていたが、原音の波形との誤差が大きく、原音を再現できていないことが確認できた。この理由として、クリップ部分前後点の傾きが急な角度であったこと、補間に用いたデータ点の個数が少ないことが挙げられる。

最小 2 乗法を用いた補正結果の評価と原音との比較では、クリップ部分を有効に補正し、ニュートン補間法よりも部分的に原音に近い波形にできることを、波形や RMS を用いた測定結果から確認できた。また、ニュートン補間法との違いとして最小 2 乗法による補正ではクリッピングしていない部分の波形も変化していることが確認でき、クリッピング部分の前



## 5.2 今後の課題

後のデータと関連の強い補正を行う事を確認した。しかし、クリップ部分が増加すると原音との誤差が大きくなることが分かった。

クリッピングノイズ軽減の検証では、被験者にあらかじめ原音を、その後クリッピングした音声と最小2乗法によって補正した音声を聴いてもらい、どの程度クリッピングノイズを軽減できているか、原音に近い音声になっているかを検証した。結果として、不快感が少なく、原音にも近い音になっていることを確認できたが、RMSによる比較結果と比例してクリップ部分が増加するにつれ、不快感が大きくなることが確認できた。この問題の対策として、窓関数と重複加算を用いた方法を提案したが、検証が必要である。

## 5.2 今後の課題

本論文では、最小2乗法を用いた補正によるクリッピングノイズ軽減の検証を行った。しかし、他の音声でも有効に補正されるか、他の従来の補間法と比較して原音に近くなっているかといった点が確認できておらず、さらに検証が必要なことが課題として挙げられる。また、補正部分と元の部分をスムーズに接続するための方法として、窓関数と重複加算を用いた方法を提案したが、この方法でどの程度問題が解消できるのか検証することが必要である。

# 謝辞

本研究を行うにあたり、要領が悪くマイペースな私を見捨てることなく御指導して頂き、様々な助言を下さった福本昌弘教授に深く感謝致します。また、本研究の副査をしていただきました坂本明雄学郡長、酒居敬一講師にも感謝致します。研究発表の際、知識不足だったために質問に答えることができず、大変申し訳ありませんでした。今回の失敗を活かし、次からは何事も十分に準備をしておくようにします。

福本先生には研究の他にも、就職活動や単位の取得など幅広く御指導を頂きました。特に研究室に配属された直後から、就職活動について多くのアドバイスを頂いたおかげで無事に内定を頂くことができたことにも感謝しています。また、研究活動においても飲み込みの悪い私に対し、何度も分かるまで教えて下さったことを感謝致します。進行具合などを気にかけて下さっていたにも関わらず、私の計画性の無さや精神的な弱さから、大変な迷惑をかけ続けてしまったことをお詫びします。本当に申し訳ありませんでした。ずっと親身になって応援し続けて頂いた事には感謝しきれません。何よりもいつまでも学生気分だった私に、社会に出るために必要なものや私に足りないものをたくさん教えていただきました。先生から教えていただいたことを忘れず、まともな一社会人となって働いていきます。

また、研究活動やイベントなど様々なことでお世話になりました、佐伯幸郎助教と福富英次助手にも深く感謝致します。研究活動においては、梗概や発表の練習など、あらゆる面で助けていただきました。ときには徹夜で御指導頂いた事もあり、特にプログラミングに関しては、最初から最後までお二人にお世話になりっぱなしでした。大変感謝しております。本当にありがとうございました。お二人からは専門知識だけでなく、幅広く多くのことを教わりました。特に佐伯先生の相手の心を掴んで笑わせる話術は、これから営業という仕事をする私にとって一つのお手本となりました。

また、同研究室の卒業生である平田雄一氏にも深く感謝致します。ご飯を食べに連れて行って頂いたり、家まで送って頂いたりと日常でいろいろとお世話になりました。就職して

## 謝辞

も頑張ってください。

同研究室3年生の皆さんには、先輩として何もしてあげられなかったことをお詫びいたします。オープンキャンパスの準備や学校のイベント、授業等で助けられてばかりでした。先輩らしくない先輩ですいませんでした。来年度からは後輩ができ、就職活動に卒業研究にと忙しくなると思いますが、先生方から多くを学び、悔いのない学生生活を送ってください。

最後になりましたが、私の大学生活を支えていただいた家族や先生方に加え、関わったすべての方に御迷惑をおかけした事をお詫びすると共に、深く感謝致します。

# 参考文献

- [1] 横山克哉, “AV 機器測定技術”, 昭晃堂, 2000
- [2] 畠山貴至, “クリッピング歪み軽減法の比較”, 平成 22 年度プロジェクト研究報告書, 2011
- [3] 市野良典, “オーディオ機器”, コロナ社, 1991.
- [4] 若林駿介, “レコーディング技法入門”, オーム社、1993.
- [5] 奈良久, 早川美浦, 阿部亨, “数値計算法,” 朝倉書店, 1991.
- [6] 石井直樹, “音声工房を用いた音声処理入門”, コロナ社, 2004.

## 付録 A

# QR 分解

QR 分解は、行列  $A(n * m, n > m, \text{rank}(A) = m)$  を直交行列  $Q(n * n)$  と、上三角行列  $R(n * m)$  の積に分解する手法である。  $A$  の  $i$  列を列ベクトル  $a_i$  で表す。  $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ 。  $\text{rank}(A) = m$  なので、  $m$  本の直交ベクトル  $b_i$  が取得できる。 これらを整理すると

$$\begin{cases} a_1 = b_1 \\ a_2 = b_2 + x_{1,2}b_1 \\ a_3 = b_3 + x_{1,3}b_1 + x_{2,3}b_2 \\ \vdots \\ a_m = b_m + x_{1,m}b_1 + \dots x_{m-1,m}b_{m-1} \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

となり、次の関係が分かる。

$$A = (a_1, a_2 \dots a_m) = (b_1, b_2 \dots b_m) \begin{bmatrix} 1 & x_{1,2} & \dots & x_{1,m} \\ 0 & 1 & \dots & x_{2,m} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} = BX \quad (\text{A.2})$$

(A.3)

$$B = (b_1, b_2 \dots b_m), X = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,2} & \dots & x_{1,m} \\ 0 & 1 & \dots & x_{2,m} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

(A.5)

ここで  $B$  を直交化するため、  $BX$  の間に、対角行列

$$D = \text{diag}(\|b_1\|, \|b_2\| \dots \|b_m\|), D_{-1} = \text{diag}(1/\|b_1\|, 1/\|b_2\|, \dots, 1/\|b_m\|) \quad (\text{A.6})$$

を挟む．ここで

$$A = BX = BD^{-1}DX = QR, Q = BD^{-1}, R = DX \quad (\text{A.7})$$

となる． $n * m$  行列の列ベクトルは， $n$  次元空間の  $m$  本の世紀直交規定をなし， $R$  は上三角行列である． $Q$  を直交行列にしたいので，直交する  $(n - m)$  本の単位ベクトルを適当に選択し，並べた各列に並べた行列を  $Q_1$  とする．すると

$$A = (Q, Q_1), (R, 0) \quad (\text{A.8})$$

となり，目的の QR 分解を得られる．