

平成 22 年度

学士学位論文

異なる特性を有するギターの音質再現

Tone quality reproduce of guitar with different
characteristic

1110286 松谷 佑

指導教員 福本 昌弘

2011 年 2 月 27 日

高知工科大学 情報システム工学科

要 旨

異なる特性を有するギターの音質再現

松谷 佑

弦楽器，管楽器といった異なる種類の楽器で同じ音階を鳴らした時，楽器の音の鳴らし方の違い，材質の違いによって音色が変化し，音は異なって聴こえる．しかし，2つの同じ種類の楽器で，同じ音階を鳴らした時にも，材質の違い，部品の形状といった固有の特性により音の大きさが変化し，音が異なって聴こえる．

本論文では，異なる特性を持つ楽器の音質再現法を提案している．楽器には特性の異なるエレキギターを2本使用した．まず，異なる特性により，楽器の音にどのような違いがあるのかを調べた．その結果，ギターの振動の大きさが異なり，残響時間に違いが出ることが明らかになった．そこで，振動を吸収する効果のある制振材をギターに貼りつけた．その結果，音質に変化が確認できたが，音質を再現することはできなかった．そこで，適応信号処理を使った．この方法では，ある時間における2つの楽器の音の誤差を算出し，その誤差を最小にするようフィルタの係数を更新することにより音質再現を行っている．適応信号処理の結果，音質再現の効果が制振よりもあることを確認した．しかし，実際の演奏に使うには遅延などの問題が存在することがわかった．

キーワード 残響時間 制振 学習同定法

Abstract

Tone quality reproduce of guitar with different characteristic

Yuu Matsudani

The same type of instruments has different sound. Because material and shape differ from each other.

The method of reproducing a tone quality of musical instruments with different characteristics proposed by this paper. Two electric guitars with different characteristics was used. A reverberation time was changed by characteristic difference. Because the vibration of the guitar was different. Therefore, The damping material was pasted to the guitar. As a result, tone quality changed for vibration deadening. But, the vibration deadening had little effected the tone quality reproduction. Therefore, tone quality was reproduced by adaptive signal processing. A target signal is approached by the adaptive signal processing. This system calculates error margin of signal. Next, the coefficient of the adaptive filter is updated to minimize the error of signal. Target signal is recreated by this repeat. As a result, the adaptive signal processing had effect of the tone quality reproduction more than the vibration deadening. However, a problem of the delay when using to musical performance was caused by the adaptive signal processing.

key words Reverberation time, Vibration deadening, NLMS Algorithm

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の背景と目的	1
1.2	本論文の構成	2
第 2 章	異なる特性が音質に与える影響	3
2.1	はじめに	3
2.2	音の 3 要素	3
2.3	音質の比較方法	4
2.4	比較を行った結果	4
2.5	まとめ	6
第 3 章	異なる特性を持つギターの比較	7
3.1	はじめに	7
3.2	研究に使用した楽器	7
3.2.1	音の鳴る仕組み	8
3.2.2	ギターの弦と音程の関係	8
3.3	ギターの持つ異なる特性	9
3.3.1	木材の比較	10
3.3.2	ピックアップの性能の比較	10
3.4	残響時間の比較	11
3.5	結果の考察	15
3.6	まとめ	15
第 4 章	制振材を使った音質再現	16
4.1	はじめに	16

4.2	制振材について	16
4.3	制振シートが音質に与える影響	16
4.4	問題点	17
4.5	まとめ	17
第 5 章	適応信号処理を使った音質再現	19
5.1	はじめに	19
5.2	音質再現のシステム構成	19
5.3	適応信号処理を行った結果	20
5.4	問題点	24
5.5	まとめ	24
第 6 章	結論	25
6.1	本研究のまとめ	25
6.2	今後の課題	25
	謝辞	26
	参考文献	28
付録 A	適応信号処理	29
A.1	パラメータ推定問題	29
A.2	適応アルゴリズム	29
A.3	学習同定法	30

図目次

2.1	残響曲線	4
2.2	周波数領域の結果	5
2.3	残響時間の結果	5
3.1	guitar1	7
3.2	guitar2	7
3.3	guitar3	7
3.4	エレキギターの音の鳴る仕組み	8
3.5	木材の違いによる反響音の違い	10
3.6	guitar1 のピックアップの拾うノイズ	11
3.7	guitar2 のピックアップの拾うノイズ	11
3.8	6 弦開放弦	12
3.9	5 弦開放弦	12
3.10	4 弦開放弦	13
3.11	3 弦開放弦	13
3.12	2 弦開放弦	14
3.13	1 弦開放弦	14
4.1	制振シートを貼り付けたギター (正面)	17
4.2	制振シートを貼り付けたギター (裏)	17
4.3	制振シートを貼り付けた場合の 6 弦	18
4.4	guitar1 の残響曲線と比較した場合	18
5.1	適応信号処理による音質再現	20
5.2	適応信号処理を使った 1 弦開放弦	21

5.3	適応信号処理を使った 2 弦開放弦	21
5.4	適応信号処理を使った 3 弦開放弦	22
5.5	適応信号処理を使った 4 弦開放弦	22
5.6	適応信号処理を使った 5 弦開放弦	23
5.7	適応信号処理を使った 6 弦開放弦	23

表目次

3.1 ギターの弦の特徴	9
3.2 特性表	9

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景と目的

音楽の演奏に使用する楽器には、弦楽器、管楽器、打楽器など様々な種類があり、それぞれの楽器が奏でる音質は異なる。しかし、同じ種類の楽器であっても、構成している材質の違いにより音質に違いが生じる [1]。また、楽器を構成している部品の形状でも音質に違いが生じることが明らかになっており、これらの音質の違いは、楽器の販売価格にも影響される。よって、理想とする音質の楽器を購入するには、高額な費用を払う可能性がある。そこで、自分が所有している楽器から、理想とする音質を再現することが望まれている、音質再現が可能になれば、自分の楽器を、好きなミュージシャンの楽器の音質にすることができる。またコンサートやライブなどでは、演奏する曲に合わせて楽器を交換する際の手間を省くことができると考えられる。そこで、理想とする音質を再現する方法として、材質を交換することにより、再現する方法が確認されている [2]。しかし、材質交換には費用がかかる、または楽器を構成している材質が希少なものであった場合、入手することが困難といった問題がある。

そこで本研究では、楽器の異なる特性による音質の違いを明らかにした上で、物理的な方法、適応信号処理を使った方法 [3, 4]、の 2 種類の音質再現法を提案し、材質を交換せず異なる特性を有する楽器の音質を再現することを目的とする。

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，異なる特性により楽器の音のどの部分に違いが出るのかを説明する．

第 3 章では，研究に使用した楽器について説明をし，異なる特性による音質の違いを比較する．

第 4 章では，第 3 章で明らかになった音質の違いから，物理的に音質を再現する方法について説明する．また，この再現法での問題点についても説明する．

第 5 章では，適応信号処理による音質再現法について述べ，計算機シミュレーションにより適応信号処理による音質再現の有効性を確認する．

最後に 6 章では，本研究で得られた結果をもとに本研究のまとめと今後の課題について述べる．

第 2 章

異なる特性が音質に与える影響

2.1 はじめに

研究の目的は、異なる特性により、音質が違っている楽器の音質を再現することである。よって、異なる特性により、音質にどのように違いが存在するのか知っておかないと音質再現は行えない。そこで本章では、音質を決定する要因である、音の 3 要素について説明をし、異なる特性により音質のどの要素に違いが出て来るのか説明する。

2.2 音の 3 要素

我々が普段聴く音には「音の高さ」、「音の大きさ」、「音色」という要素が存在し、これらは音の 3 要素と呼ばれる。音の高さとは音程のことをいい、単位は Hz(ヘルツ) で表される。音の大きさは音の鳴っている強さのことをいい、単位は dB(デシベル) で表される。しかし、これだけでは音を聴いてもどの楽器を使っているか判断ができない。そこで、ピアノやバイオリンといった楽器の違いを判断できる要素が音色である。音色は音響学では周波数成分と呼ばれている。音の高さは基音 (基本となる音) のことで、基音に「倍音」が加わって音色が生まれる。倍音は「基音の整数倍」の振動で、倍音がどれだけ含まれているかの違いで様々な音色が生まれる。

2.3 音質の比較方法

まず、異なる楽器で同じ音程の音を鳴らす。よって、音の高さは比較しないものとする。音色は、時間領域で示される音声信号を周波数領域に変換し、含まれている周波数成分で比較を行う。周波数軸への変換にはフーリエ変換を使う。音の大きさは、図 2.1 のように、時間領域で示される音声信号の、音が鳴り終わるまでの波形の頂点をなぞる包絡線を取り、残響時間を比較する。残響時間とは、音響エネルギーが 60[dB] 減衰 (100 万分の 1) するまでの時間と定義されている [7, 8, 9]。また、この包絡線を残響曲線と呼び、音響エネルギーの減衰過程を曲線状に表している。

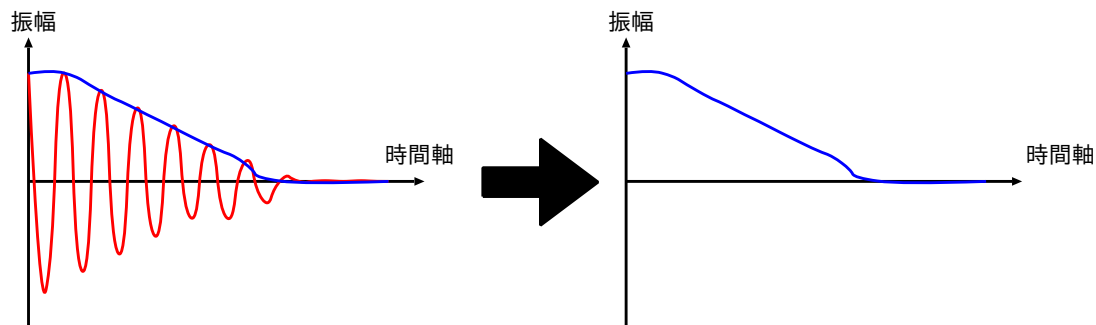


図 2.1 残響曲線

2.4 比較を行った結果

異なる特性を持つ楽器で、同じ音程 (110Hz) を鳴らした時の結果について説明する。図 2.2 は周波数領域、図 2.3 は残響時間の結果である。周波数領域は、音を鳴らして 0.1 秒分、残響時間は音を鳴らして 60 秒分で比較している。

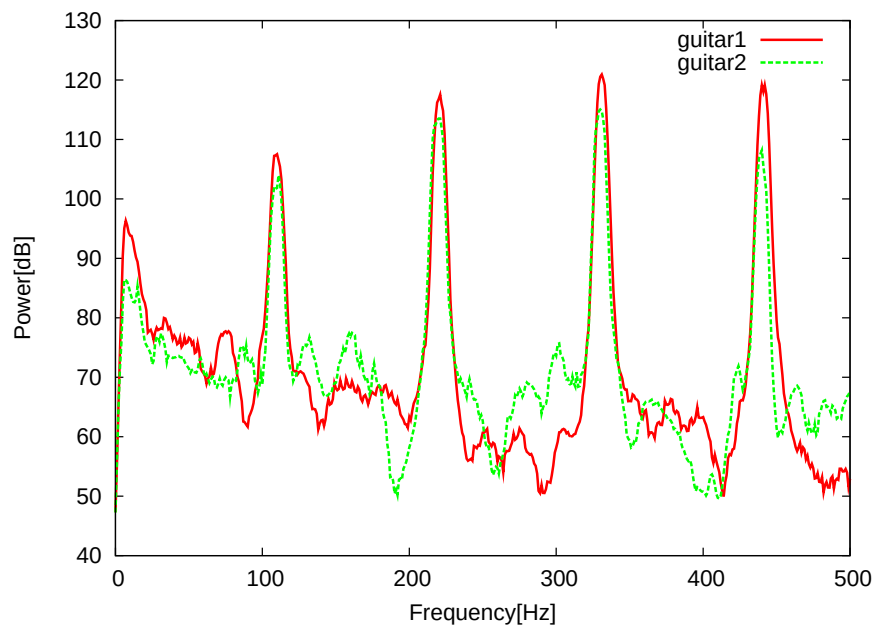


図 2.2 周波数領域の結果

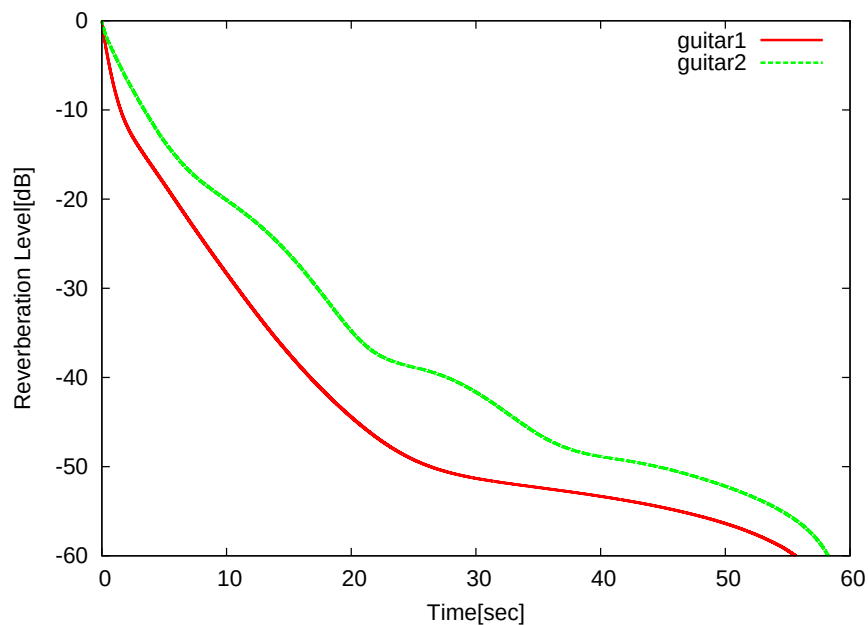


図 2.3 残響時間の結果

この結果から、周波数領域では、周波数成分には、振幅による差は存在するものの、大きな違いがなく、聴こえる音に大きな違いはないことがわかる。しかし、残響時間では、残響曲線に大きな違いが存在することが確認できる。よって、異なる特性による音質の違いは、

残響時間に表れることがわかった。

2.5 まとめ

本章では，異なる特性により，音質にどのような違いがあるのか説明した．まず，音質を決める要因である，音の3大要素の説明を行った．その中でも，異なる特性による影響が表れると思われる音の大きさ，音色に着目し，音色は周波数領域，音の大きさを比較を行った．その結果，周波数成分には大きな違いがないことがわかった．しかし残響時間では残響曲線が大きく異なっていた．このことから異なる特性による音質の違いは残響時間に表れることがわかった．

第 3 章

異なる特性を持つギターの比較

3.1 はじめに

2 章で，音質を決める要因である，音の 3 大要素について説明をし，音の違いは周波数成分ではなく，残響時間に表れることを述べた．そこで，本章では，楽器で鳴らす音程により，音の減衰過程にどのような違いが表れているのか確認する．まず，本研究に使用した楽器の説明をし，音の鳴る仕組みを述べる．次に，残響曲線を求め，音質の比較を行った上で，音質再現の方法を提案する．

3.2 研究に使用した楽器

本研究では同じ形状の，図 3.1，図 3.2，図 3.3 に示す，guitar1，guitar2，guitar3 の 3 本のエレキギターを使用した．今回は guitar1 の音質を再現することを目的とする．



図 3.1 guitar1



図 3.2 guitar2



図 3.3 guitar3

3.2.1 音の鳴る仕組み

エレキギターの音が鳴る仕組みについて図 3.4 に示した。まず、弦を弾くと、弦の振動は減衰を続ける、減衰振動をする。ギター本体に伝わる。ボディに伝わった弦の振動はピックアップという部分で微弱な電気信号に変換される。変換された電気信号は、ギターとコードで繋がっているアンプで増幅され、アンプに内蔵されているスピーカーから音を出す [9]。これがギターの音の鳴る仕組みである。

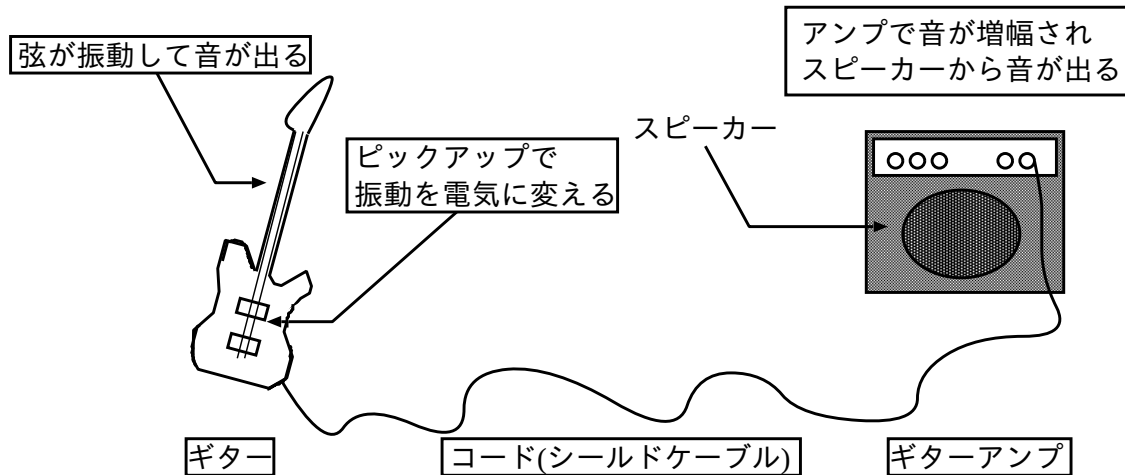


図 3.4 エレキギターの音の鳴る仕組み

3.2.2 ギターの弦と音程の関係

ギターには 1 弦から 6 弦まで 6 本の弦が貼られている。今回使用した弦の太さ、チューニング (調弦) を行った際の各弦の音程を表 3.1 に示す。

表 3.1 ギターの弦の特徴

弦	弦の太さ	音程
6 弦	1.0668mm	82Hz
5 弦	0.8128mm	110Hz
4 弦	0.6096mm	146Hz
3 弦	0.4064mm	195Hz
2 弦	0.2794mm	246Hz
1 弦	0.2286mm	329Hz

この音程は、ギターの開放弦 (弦を指で押さえてない状態) の音程である。この表より、一般的に太い弦は低音、細い弦は高音を鳴らすことがわかる。

3.3 ギターの持つ異なる特性

研究に使用した 3 本のギターはそれぞれ異なった特性を持っている。異なっている部分を、「木材」「重量」「ピックアップ」に分け、木材の種類を A, B, ピックアップの種類を a, b とし、表 3.2 にまとめた。

表 3.2 特性表

ギター名称 部分の名称	guitar1	guitar2	guitar3
木材	A	B	B
重量	3.6kg	2.9kg	2.9kg
ピックアップ	a	b	a

ギターの弦の振動を電気信号に変換するピックアップが、音質に与える影響についても調べるために、guitar3 は、木材は guitar2、ピックアップは guitar1 のものを交換している。

3.3.1 木材の比較

guitar1, guitar2 の木材の特性の比較を行う。ギターのネックの部分を押さえて、反響音を録音した。測定時間は 0.5 秒である。

図 3.5 に示す。

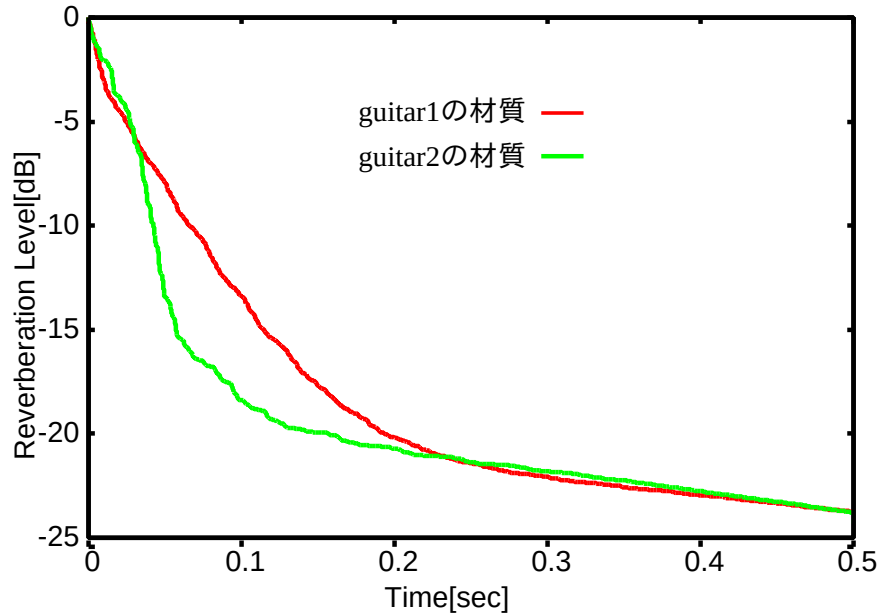


図 3.5 木材の違いによる反響音の違い

この結果から、guitar2 の木材の方が弦振動が持続していることがわかる。よって、guitar2 を鳴らした時に音が持続することが考えられる。

3.3.2 ピックアップの性能の比較

guitar1 のピックアップと guitar2 のピックアップの性能の比較を行う。ピックアップは、ギター本体に伝わった弦の振動を拾う部分であるが、音を鳴らしていない、または鳴り終わった無音状態においても機器や環境のノイズを拾う。そこで、ピックアップが異なれば拾うノイズの量にも変化があると考えられる。guitar1 と guitar2 を弦を弾いていない状態で 10 秒間録音を行う。図 3.6 は guitar1, 図 3.7 は guitar2 の無音状態のノイズ量を示す。また、時間波形で表示している。

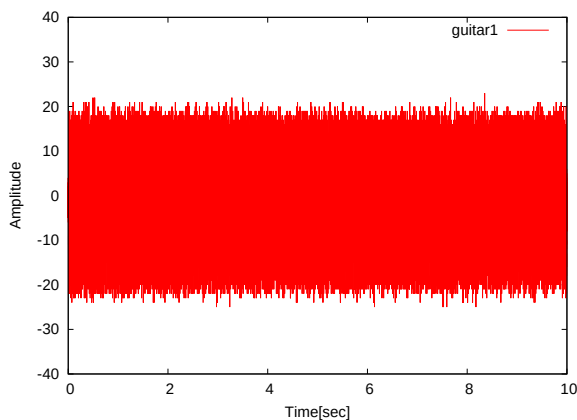


図 3.6 guitar1 のピックアップの拾うノイズ

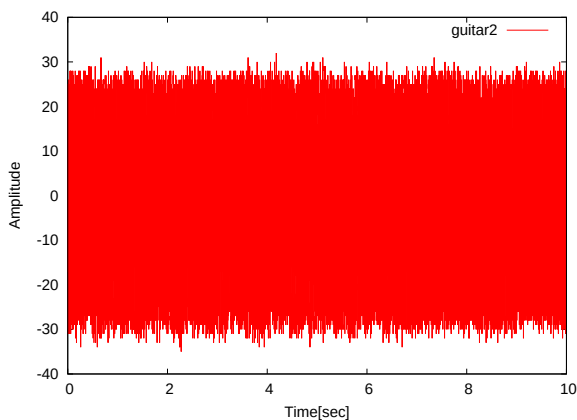


図 3.7 guitar2 のピックアップの拾うノイズ

この結果より，guitar1 に使われているピックアップの方が guitar2 よりも拾うノイズの量が少ないことがわかる．

3.4 残響時間の比較

実際に弦を弾き，残響時間を比較する．比較する範囲は，音が鳴り始めて 60 秒間とし，弦の押さえ方による音質への影響を防ぐため，弦を押さえてない状態で，1 弦から 6 弦までの残響時間を求める．各弦の残響曲線について，6 弦を図 3.8，5 弦を図 3.9，4 弦を図 3.10，3 弦を図 3.11，2 弦を図 3.12，1 弦を図 3.13 に示す．

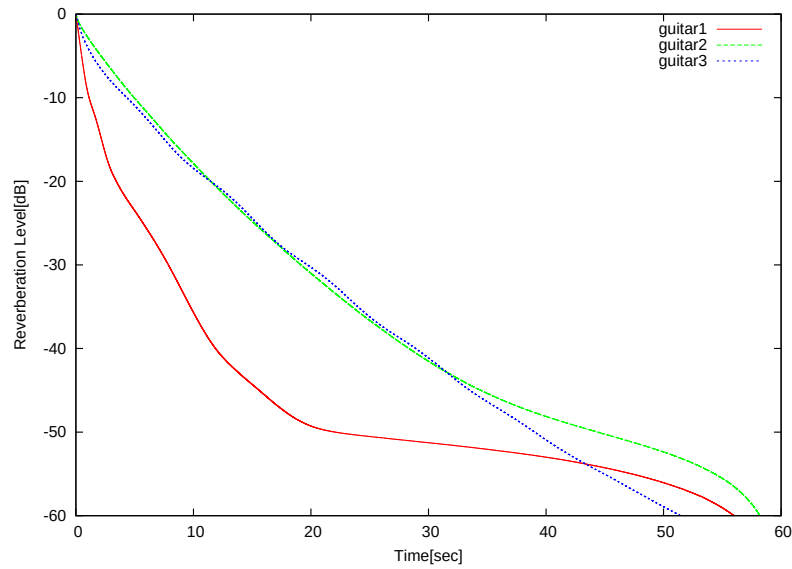


図 3.8 6 弦開放弦

図 3.8 では，guitar1 の残響曲線が，他のギターに残響曲線と異なっている．このことからピックアップを交換しても音質再現の効果が出ないことがわかる

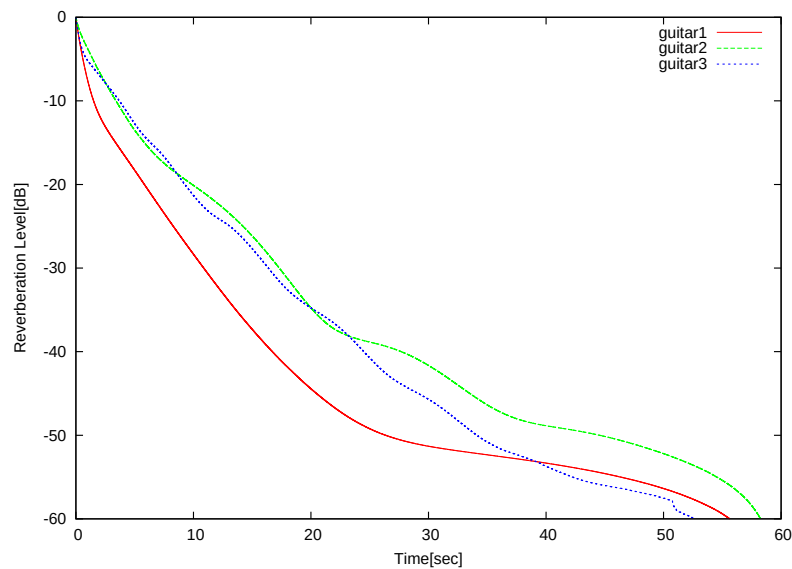


図 3.9 5 弦開放弦

図 3.9 でも，guitar1 の残響曲線が他の 2 本のギターと異なっていることから，6 弦同様ピックアップを交換しても音質を再現できていないことがわかる．

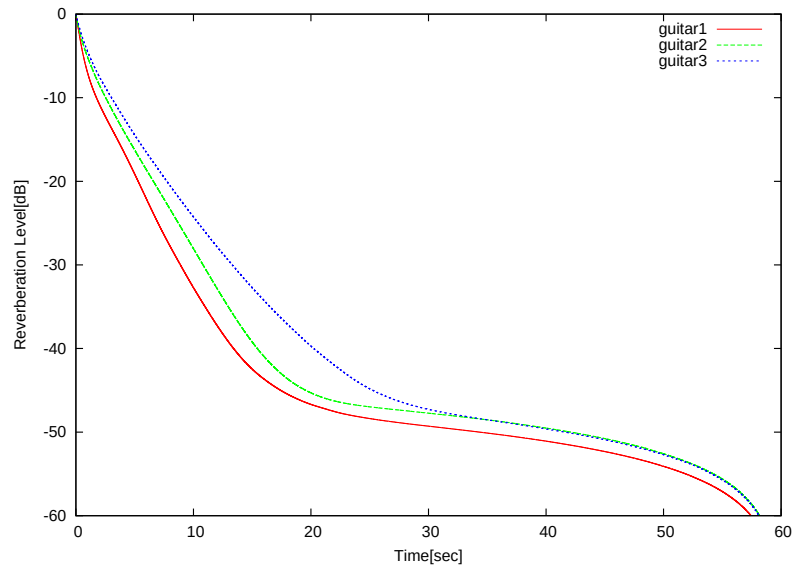


図 3.10 4 弦開放弦

図 3.10 では, guitar2 は, ピックアップを交換した guitar3 よりも音が減衰していることがわかる.

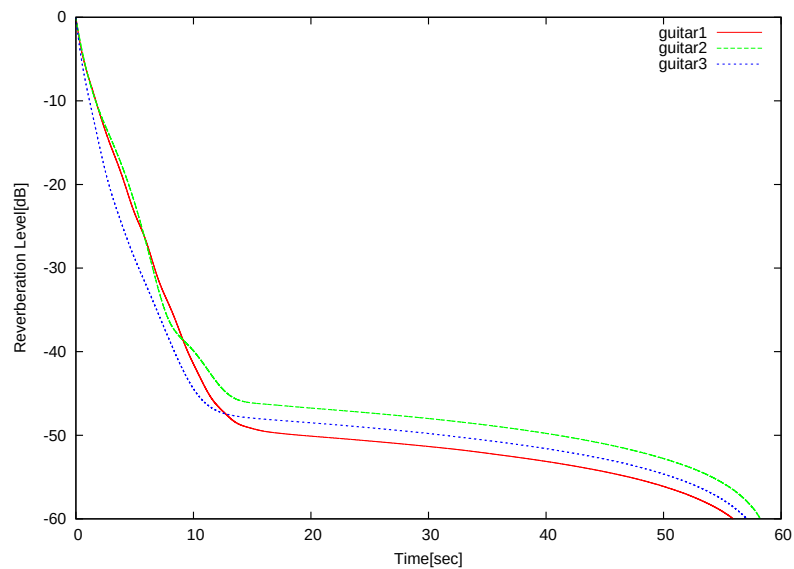


図 3.11 3 弦開放弦

図 3.11 では, どのギターも同じような残響曲線を描いているが, 20 秒以降に着目すると, guitar1,guitar3,guitar2 の順に音が小さいことから, ピックアップを交換することにより, guitar1 の音質に近付いていることがわかる.

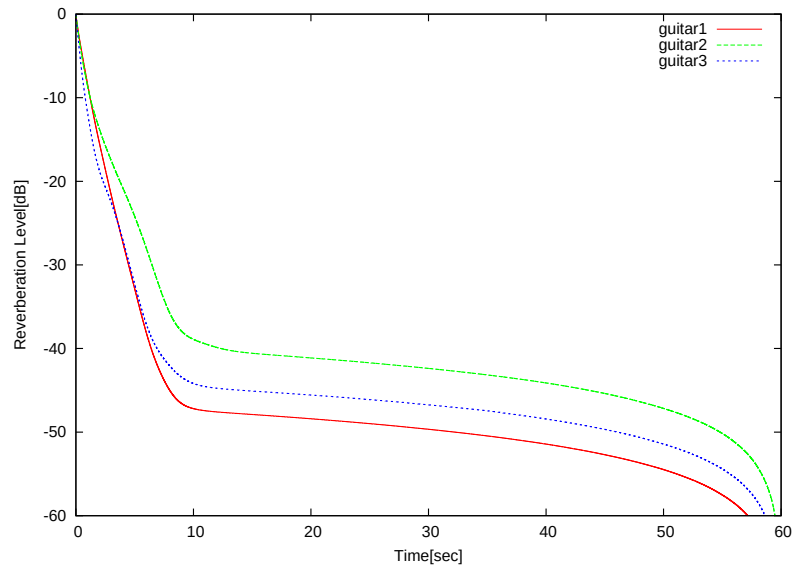


図 3.12 2 弦開放弦

図 3.12 では、これまでに説明した、6 弦から 3 弦の結果よりも、guitar3 の残響曲線が guitar1 に近付いていることがわかる。

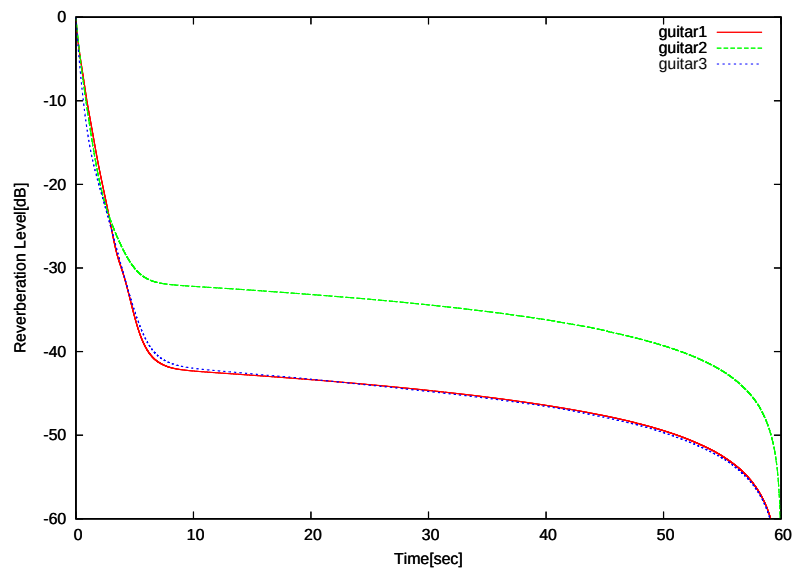


図 3.13 1 弦開放弦

図 3.13 では、guitar3 と guitar1 の残響曲線が重なっていることから、ピックアップを交換することにより音質の再現ができていることがわかる。

3.5 結果の考察

以上の結果より、高音ではピックアップを交換することにより guitar1 の音質が再現できていることが確認できた。しかし、低音ではピックアップを交換した影響が残響曲線に見られなかった。高音で音質再現の効果が確認できた理由として、高音では、材質が異なっても、残響時間に差はなく、ギターの音が聴こえなくなった後の無音状態において、ピックアップの性能が出ていると考えられる。低音でピックアップによる音質再現ができなかった理由として、ボディの材質の違いが残響時間に影響を与えていることが考えられる。guitar1 の方が、早く音が減衰していることから、音質再現をするには本体の振動を抑えなければならない。

3.6 まとめ

本章では、研究に使用した楽器について説明を行った。楽器には特性の異なるエレキギター 3 本を使用し、エレキギターの音の鳴る仕組みを説明した上で、実際に特性の異なるギターの音の残響時間を比較した。その結果、ギターのピックアップが音質に与える影響は、低音よりも高音に表れることがわかり、低音では音質を再現することができなかった。その原因として、ボディの材質の違いが考えられる。次章では、本体の振動を抑える音質再現法について説明する。

第 4 章

制振材を使った音質再現

4.1 はじめに

前章で，異なる特性によるギターの音質の違いを明らかにし，ピックアップを交換しても低音での音質を再現できないことが確認できた．そこで本章では，低音でのギターの振動を抑えるために，振動を吸収する効果のある制振材を使った音質再現法について述べ，どの程度音質再現の効果があるのかについて説明する．

4.2 制振材について

振動を吸収する効果のある制振材を，ギターの表裏に施工した．研究に使用した制振材は，リアルシルトという制振シートと呼ばれるもので，シールのように貼り付けることができるので施工が簡単に行える．また，guitar1 は 3.6kg，guitar2 は 2.9kg の重量を持っており，重量の差により，ギターの振動にも影響が出ていると考え，そこで，重量を同一にするように制振シートを施工した．本体の表を施工した写真を図 4.1，裏の写真を図 4.2 に示す．

4.3 制振シートが音質に与える影響

制振シートを施工する前と制振した後を比較するため，制振シートを貼り付けた場合の 6 弦開放弦の残響曲線を，図 4.3 に示す．このグラフでは，施工した後の残響曲線が，下側にあることから，制振により，振動が軽減されているのが確認できる．



図 4.1 制振シートを貼
り付けたギター (正面)



図 4.2 制振シートを貼
り付けたギター (裏)

4.4 問題点

guitar1 の 6 弦開放弦の残響曲線と比べた結果を、図 4.4 に示す。このグラフより、残響曲線が大きく異なっていることから、音質再現の効果が少ないことが考えられる。また、ギターの重さを同一にするように制振シートを貼り付けたので、これ以上の制振は、ギターの重量が増加し、演奏者に負担がかかってしまうことが予想される。

4.5 まとめ

本章では、低音での振動を抑えるために、ギターの本体に制振材を貼る、といった音質再現法を提案した。その結果、制振シートを貼ることにより、振動が抑えられていることがわかった。しかし、音質再現の対象である guitar1 と比較した場合には、大きな差が存在していたことから、音質再現の効果が少ないということがわかった。

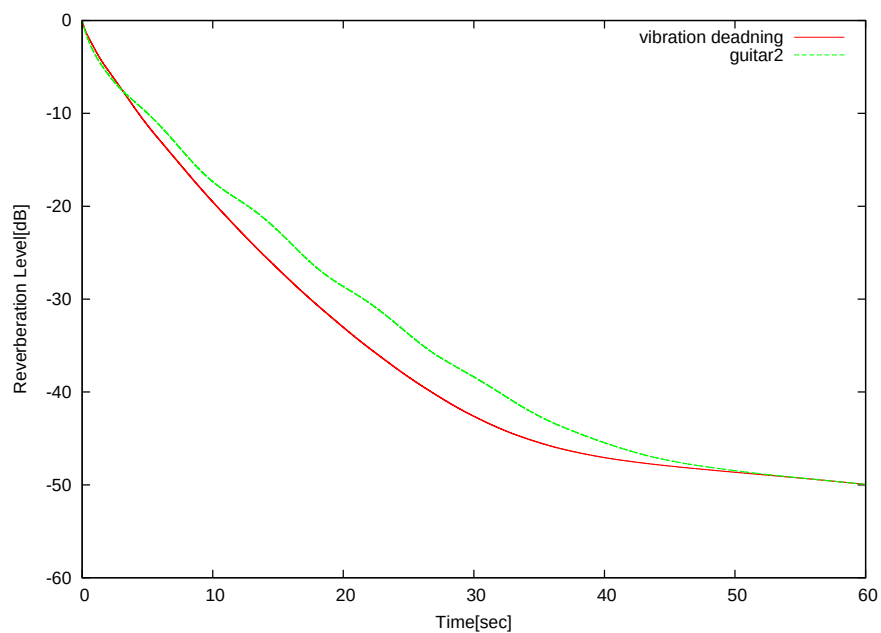


図 4.3 制振シートを貼り付けた場合の 6 弦

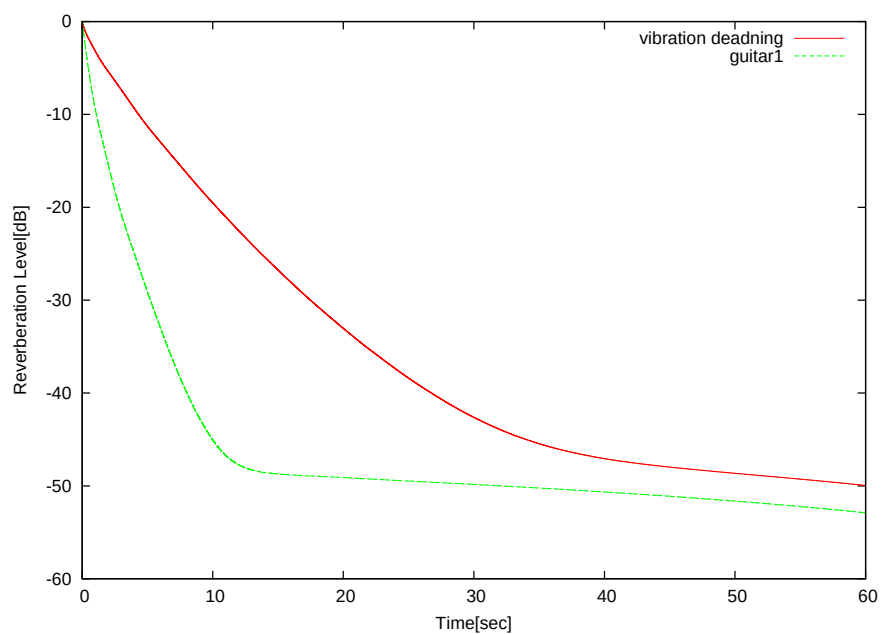


図 4.4 guitar1 の残響曲線と比較した場合

第 5 章

適応信号処理を使った音質再現

5.1 はじめに

前章では，物理的な解決法として，制振材を貼り付けたが，実際の演奏で使った場合，音質再現の効果が少ないという問題点が存在した．そこで，本章では，2つの異なる音声信号を，どちらか片方の音声信号に近付ける処理を行える適応信号処理を使った音質再現法の説明を行う．まず，適応信号処理を使った再現法のシステム構成について説明し，計算機シミュレーションにより適応信号処理による音質再現法の有効性を確認する．

5.2 音質再現のシステム構成

適応信号処理は，ある時刻における2つの音声信号を，片方の音声に近付ける処理が行える．この方法では，ギターの材質に手を加えず，音を加工するので，ボディの振動に関係なく，音質再現を行うことができる．本研究では，学習同定法を使った，音質再現のシステムの構成図を図 5.1 に示す．アダプティブフィルタとは，目標とする音声に近付けることのできる適応アルゴリズムを含んだ FIR フィルタのことである．

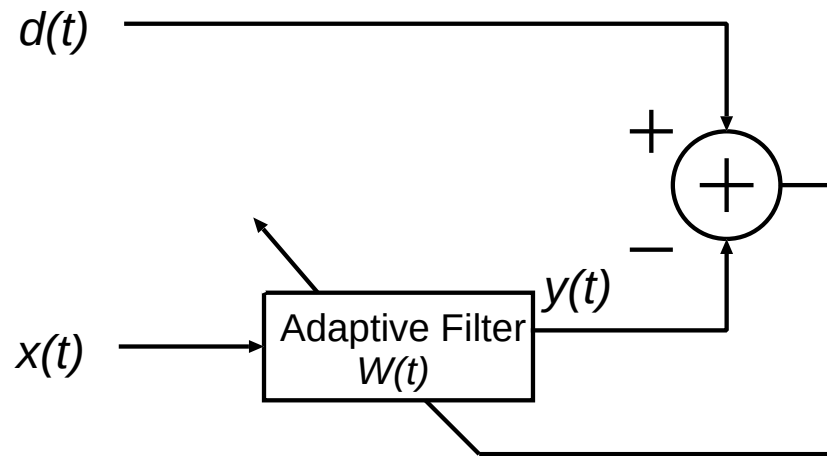


図 5.1 適応信号処理による音質再現

時刻 t における guitar1 の音声信号を $d(t)$, guitar2 の音声信号を $x(t)$, アダプティブフィルタのインパルス応答を $y(t)$ とする. まず, $x(t)$ を推定フィルタに通す. 次に, フィルタから出力された $y(t)$ と $d(t)$ の誤差を減算により求める. その際に, 誤差を最小にするように, 推定フィルタの係数を更新する. 次の時刻 $(t+1)$ に対しても同様の処理を行う. この処理を繰り返すことにより, guitar1 の音質を再現することができる.

5.3 適応信号処理を行った結果

録音した guitar1, guitar2 の音声信号を使い, 計算機シミュレーションにより適応信号処理による音質再現の有効性を確認する. 1 弦開放弦は図 5.2, 2 弦開放弦は図 5.3, 3 弦開放弦は図 5.4, 4 弦開放弦は図 5.5, 5 弦開放弦は図 5.6, 6 弦開放弦は図 5.7 に示す.

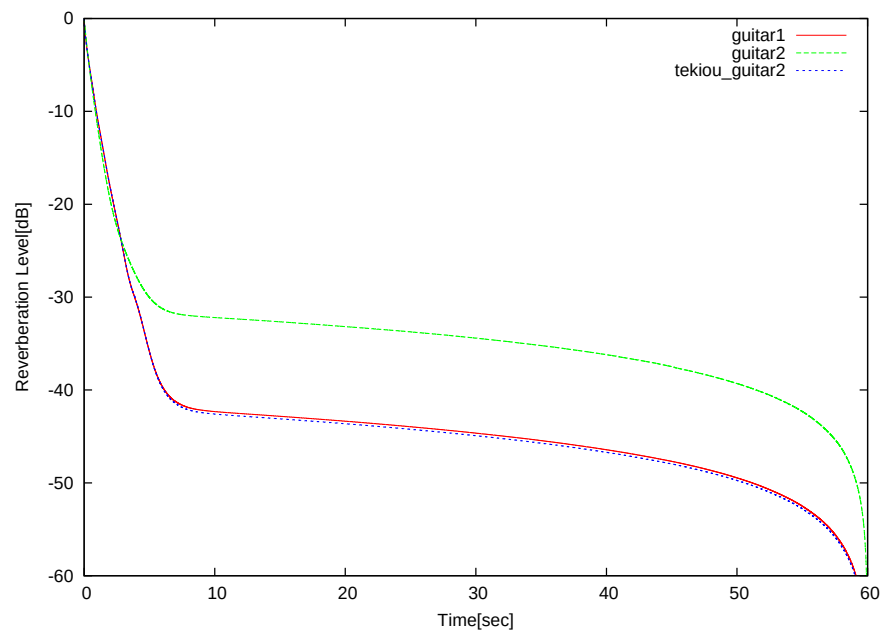


図 5.2 適応信号処理を使った 1 弦開放弦

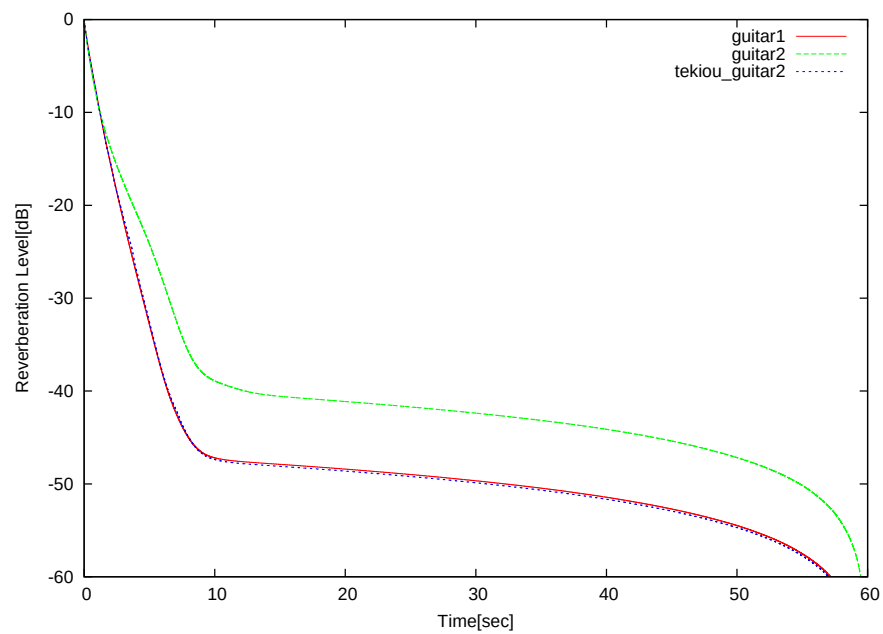


図 5.3 適応信号処理を使った 2 弦開放弦

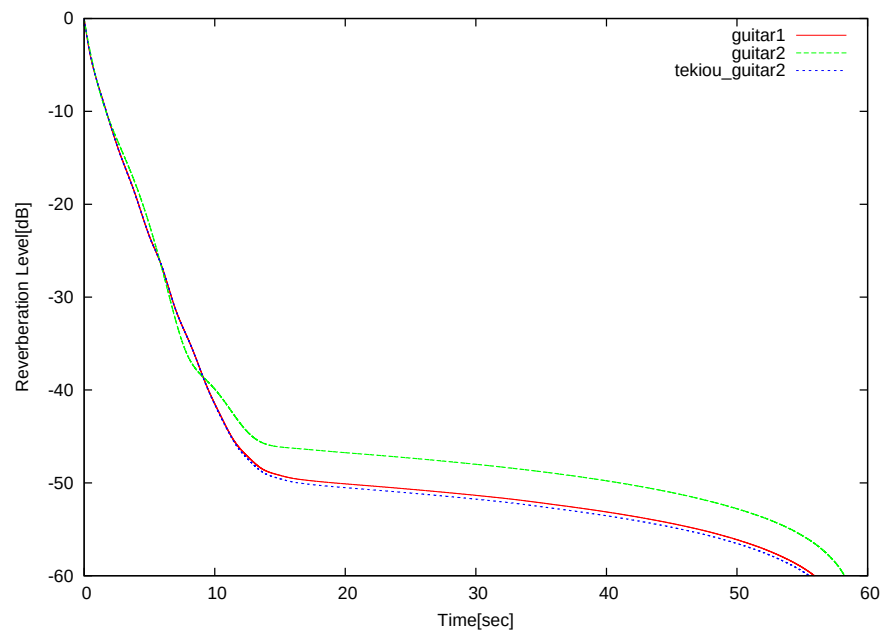


図 5.4 適応信号処理を使った 3 弦開放弦

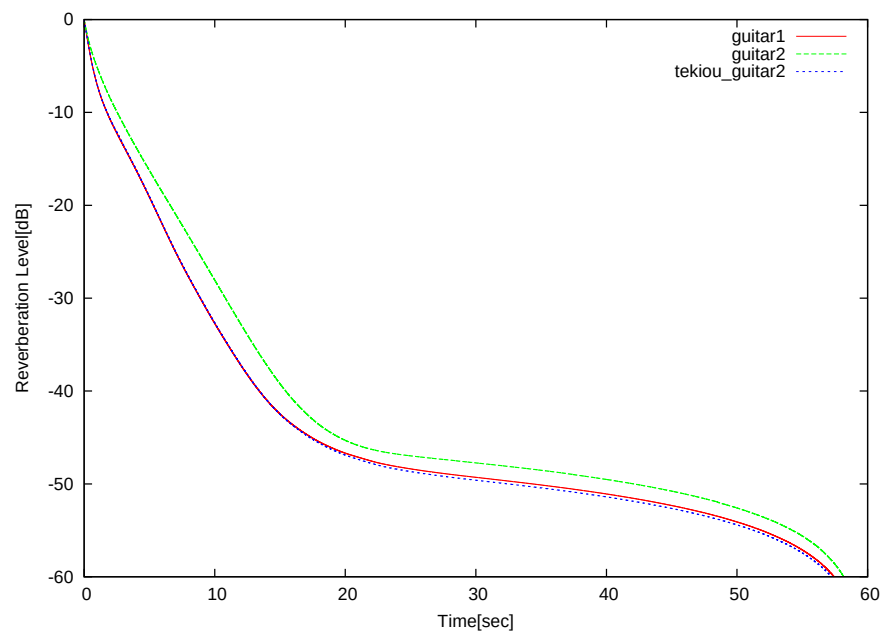


図 5.5 適応信号処理を使った 4 弦開放弦

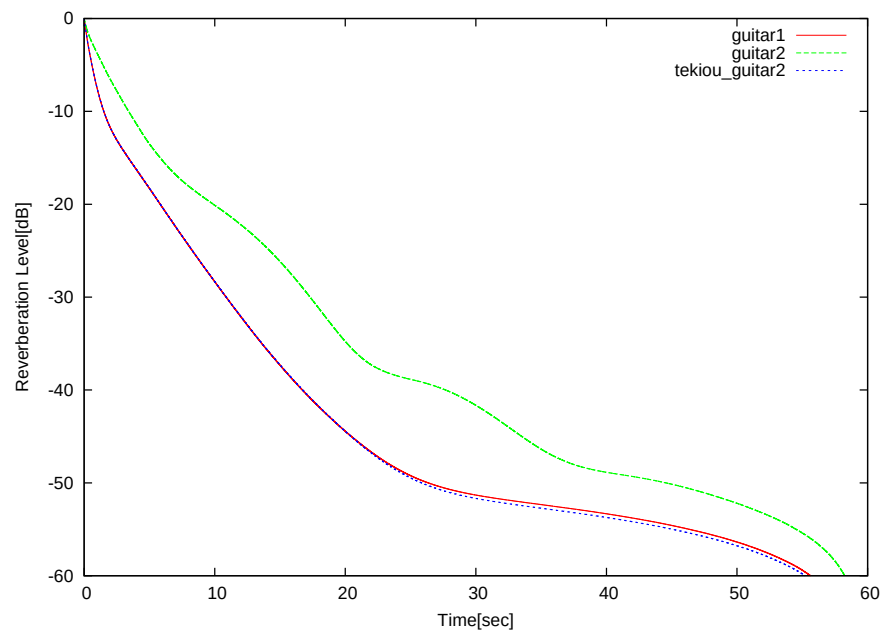


図 5.6 適応信号処理を使った 5 弦開放弦

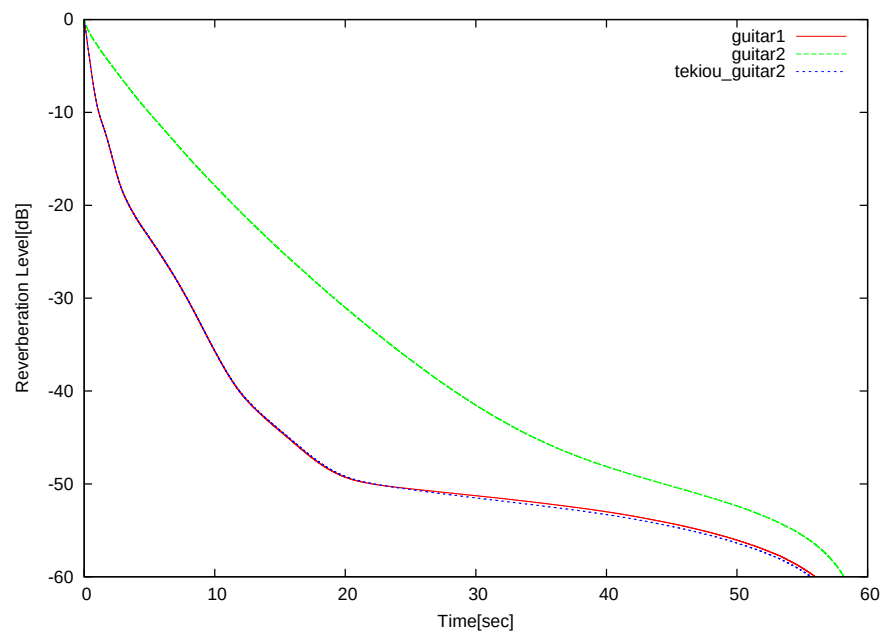


図 5.7 適応信号処理を使った 6 弦開放弦

計算機シミュレーションの結果から、1 弦開放弦から 6 弦開放弦のどのグラフにおいても、guitar1 と適応信号処理を行った guitar2 の残響曲線が重なっていることから、高音ではピックアップを交換せず guitar1 の音質再現ができていることがわかる。また、低音でも、ボディの振動に影響されず、guitar1 の音質を再現できていることが確認できる。

5.4 問題点

計算機シミュレーションにより、適応信号処理を使うことで音質を再現できることがわかった。しかし、適応信号処理では、遅延が発生するため、実際の演奏に使用するのは現段階では難しい。また、予め決まった音にしか再現できないといった問題があり、音程の移動に合わせて guitar1 の音質を再現することができない。

5.5 まとめ

本章では、適応信号処理を使った音質再現法について説明を行った。まず、音質再現のシステム構成の説明をし、計算シミュレーションにより有効性を確認した。その結果、前章で物理的に解決できなかった音質再現が、高音、低音でも可能であることを計算シミュレーションにより確認した。しかし、適応信号処理では、演算による遅延が起こることや、決まった音にしか音質再現ができないことから、実際の演奏に使うには検討が必要である。

第 6 章

結論

6.1 本研究のまとめ

楽器は、固有の特性により、同一の形状でも音質が異なり、楽器の音質を変えるには材質を交換する事により効果が確認されているが、コストがかかる、希少な材質を使用する場合は入手が困難といった問題があるため、本論文では材質を交換せず、異なる特性を持つ楽器の音質を再現する方法を提案した。まず、異なる特性による音質の違いを明らかにした上で、制振材、適応信号処理を使った2つの音質再現を行った。音質再現を行った結果、制振材を使った音質再現法は、実際の演奏に使えるが、音質再現の効果が少ないことがわかった。また、適応信号処理を使った音質再現法では、制振材を使った場合より音質再現の効果が確認できたが、遅延が発生することや、決まった音にしか再現できない、といった問題が存在することから、実際の演奏に使用するには今後も検討が必要である。

6.2 今後の課題

制振材を使った場合よりも、音質再現の有効性が確認できた適応信号処理を、実際の演奏にも使用できるようにすることや、旋律を弾いた際に、音程の動きに合わせて再現できるようにすることを、今後の課題とする。また、今回、学習同定法を行うにあたり、ステップゲインは0.9に固定したままであった。そこで、音質再現に最適なステップゲインについても検討が必要である。

謝辞

本研究を行うにあたり、出来の悪すぎる私に対し、日々の御指導を頂いた福本昌弘教授に心より感謝し、厚くお礼申し上げます。日々マイペースに研究を続け、自分から動こうとせず、論文の添削や梗概の添削などの期限を守らなかった私に対し、先生から頂いた厳しいお言葉は非常に心に付き刺さりました。また、卒研発表用のスライドを作成する際には、家庭があるにも関わらず夜遅くまで何度も何度も添削して頂き、非常に御迷惑をお掛けしました。また、就職活動をする際には自己PRの添削をして頂いたり、OB訪問のきっかけを作ってくれたり、大変お世話になりました。福本先生なしでは私の就職は決まらなかったと思います。研究だけではなく、社会に出てから必要になることをたくさん教えて頂き感謝しています。

副査をして頂いた浜村昌則准教授、吉田真一講師にも感謝致します。梗概の提出が遅れ非常に迷惑をお掛けしました。

佐伯幸郎助教、福富英次助手、大学院修士課程の徳久翔太氏にも深く感謝します。佐伯先生には、テーマを決めるきっかけを作って頂き感謝しています。私物のギターを研究に使わせて頂いたり、研究に様々なアドバイスを頂き、佐伯先生なしでは私の研究は進まなかったと思います。また、全身から激臭を放ちながら梗概を書いてしまい迷惑をお掛けしました。これからは24時間に1回はお風呂に入るようにします。また、いろいろなところに食事に連れていってもらい有難うございます。お寿司に連れていってもらったり、核爆弾のようなおにぎりを作ってくれたことは忘れません。福富先生には、3年生の時から輪講でプログラミングを教えていただいたり、発表のスライド、梗概の添削をして頂いたり、クリスマスにはケーキを頂いたり、大変お世話になりました。3年生の時の輪講では、宿題を全くやらずに、大変御迷惑おかけしました。また、コーヒーをすする音で不快感を与えてしまったことについてもお詫びします。徳久氏には、研究の面倒を見てくれるだけでなく、恵方巻やドーナツ、おにぎりなどさまざまな差入れを頂き、ありがとうございました。また、外食に連れ

ていつて頂いたことを深く感謝します。カレーとナンの味は忘れることができません。徳久氏と、小学校から大学まで学歴が同じだったことを誇りに思います。土佐清水で会った時には是非ともペラ焼き食べに行きましょう。

共に研究を乗り越えた個性あふれる学部4年の皆様にも感謝します。隣の席だった安藝君には、いつも元気を分けてもらったことを感謝します。プログラミングを教えていただいたり、帰り道に車まで積んでいつてもらったり、小説を読まずに半年近く借りていたり、御迷惑をおかけしました。また、安藝君の言うギャグにはいつだって涼しい気持ちにさせて頂きました。夏場のエアコンの故障の際には是非とも力を貸してください。澳本君には、情報学科に3年以上も在学していれば書けて当然の簡単なプログラムを私の代わりに書いてもらったことを感謝します。その度に「プログラムが苦手は言い訳にならない」と厳しいお言葉を頂きました。おかげで私のプログラミング能力は飛躍的に向上し、それらしい事を言えるレベルにまで達することができました。また、いつでもどこでもどんな状況であっても睡眠できるその体質はとても羨ましいと思いました。畠山くんには、いつもあらぬところから澄んだ音色(人によっては不快な音)を奏でてもらい笑いの耐えない研究生生活を送ることができました。その謎の言い回しはどこから湧いてくるのかといつも疑問に思っていました。また、私がいつも食べていたミンティアのおいしさが理解できるのも畠山君だけだと思います。堀本君のシュールな言動にもよく笑わされました。いつも僕が持っていないタイプのミンティアをくれたり、卒研発表前に梗概とかを預かってもらったことに感謝します。しかし、テントウムシの匂いというものが最後までわかりませんでした。いつも舟橋さんには、いつも私よりも遥かに朝早く学校に来るその姿勢に学ぶことは多かったです。

また、私を大学に4年間も通わせてくれた両親にも深く感謝します。

最後に私を支えてくださった全ての人に感謝致します。

参考文献

- [1] N.H.Fletcher, T.D.Rossing(著), 岸憲史, 久保田秀美, 吉川茂 (訳), “楽器の物理学”, シュプリンガーフェアラーク東京, 2002.
- [2] 西村公伸, 藤原 昂: “エレキギターのピックアップ支持部における振動特性と音色制御に関する研究”, 電子情報通信学会技術研究報告. EA, 応用音響 108(306), 11-16, 2008-11-13
- [3] 辻井重男, “適応信号処理”, 昭晃堂, 1995.
- [4] S. ヘイキン (著), 武部幹 (訳), “適応フィルタ入門”, 現代工学社, 1994.
- [5] 三谷政昭, “やり直しのための信号数学”, CQ 出版社, 2005.
- [6] 三井田惇郎, “音響工学”, 昭晃堂, 1995.
- [7] 城戸健一, “音響工学”, コロナ社, 1996.
- [8] 西山静男・池谷和夫・山口善司・奥島基良, “音響振動工学”, コロナ社, 1992.
- [9] “鳴るほど♪楽器解体全書 エレキギターの種類と構造 — ヤマハ株式会社”, <http://www2.yamaha.co.jp/u/naruhodo/13eguitar/eguitar1.html>

付録 A

適応信号処理

A.1 パラメータ推定問題

入出力データからその未知システムの構造とパラメータを推定することをシステム同定と呼び、適応信号処理はその大半がパラメータ (インパルス応答) 推定問題として取り扱われる。

A.2 適応アルゴリズム

ここでは代表的な適応アルゴリズムについて述べる。1960 年、Widrow と Hoff は適応スイッチング回路の研究において、Widrow-Hoff の LMS アルゴリズム (Least Mean Square Algorithm, 以下 LMS アルゴリズムと表記) と呼ばれる適応アルゴリズムを開発した。LMS アルゴリズムは、広い意味で、二乗平均誤差を最急降下法に基づいて最小にする方式で、演算量が少ないという特徴から現在でも代表的な適応アルゴリズムとしての地位を占めている。1967 年にこれとは独立に、野田と南雲が学習同定法の提案を行った。これは、先に述べた LMS アルゴリズムに比べ複雑ではあるが、高速な収束特性を有しており、実用的にも優れた適応アルゴリズムであるといえる。これらのアルゴリズムは、推定すべきパラメータの変化にある程度追従できる特徴がある。しかし、入力信号が有色である場合には、収束速度が著しく劣化するといった欠点が知られている。1960 年、Kalman により離散時間カルマンフィルタが提案された。カルマンフィルタにおいて、状態変数を推定すべき未知パラメータとし、このパラメータが時間的に変動しないと仮定すると、このカルマンフィルタはよく

知られた逐次最小 2 乗アルゴリズム (Recursive Least Square, 以下 RLS アルゴリズムと表記) と一致する. RLS アルゴリズムは, 推定すべきパラメータの個数を N とすると, 1 サンプルあたり N^2 に比例する回数の乗算を必要とする. LMS アルゴリズムや学習同定法の乗算回数が N に比例するのと比較すれば, RLS アルゴリズムは演算量からリアルタイムの処理は困難といえる. 適応アルゴリズムでは演算量と収束速度の関係は一般にトレードオフの関係にある.

A.3 学習同定法

ここでは学習同定法について説明する. 学習同定法は, NormalizedLMS アルゴリズムと呼ばれ, LMS アルゴリズムのパラメータ修正項をフィルタの入力状態ベクトルで正規化されたものとみなすことができる. 時刻 t における適応フィルタの出力 $y(t)$ が未知システムの出力 $d(t)$ に等しいとすると,

$$d(t) = h_N^T x_N(t) \quad (\text{A.1})$$

と表すことができる.

しかし, $h_N = \omega_N$ を満たすためには, すべての入力信号 $x(t)$ に対して式 (A.1) が成り立たなければならない.

そこで式 (A.1) を満たす解集合の代表ベクトルを $h_N(t)$ とする. この解集合は式 (A.1) より, 入力ベクトル $x_N(t)$ に直交しているといえる. さらに, ω_N はこの解集合に含まれているので, $h_N(t)$ はある点から $x_N(t)$ 方向にパラメータ修正したとき, 最も ω_N に近い点といえる.

したがって, $h_N(t)$ を ω_N に更に近付けるためには, 適当に定めたある点よりも ω_N より近い $h_N(t+1)$ を次の修正パラメータの初期値とすれば良い. 以上のことより,

$$\begin{aligned} h_N(t+1) &= h_N(t) + h_N(t+1) - h_N(t) \\ &= h_N(t) + \frac{\omega_N - h_N(t)^T \times h_N(t+1) - h_N(t)}{\|h_N(t+1) - h_N(t)\|} \end{aligned}$$

$$\times \frac{h_N(t+1) - h_N(t)}{\|h_N(t+1) - h_N(t)\|} \quad (\text{A.2})$$

となる．ただし， $\|\cdot\|$ はベクトルのユークリッドノルムを表し，要素の 2 乗和の平方根と定義する．ここで，

$$\frac{h_N(t+1) - h_N(t)}{\|h_N(t+1) - h_N(t)\|} = \frac{x_N(t)}{\|x_N(t)\|} \quad (\text{A.3})$$

$$\begin{aligned} \omega_N - h_N(t)^T x_N(t) &= d(t) - y(t) \\ &= e(t) \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

が成立するので，式 (A.2) は，

$$h_N(t+1) = h_N(t) + \frac{x_N(t)}{\|x_N(t)\|^2} e(t) \quad (\text{A.5})$$

のように変形できる．学習同定法は，式 (A.5) の修正ベクトルにステップゲインを掛け

$$h_N(t+1) = h_N(t) + \alpha \frac{x_N(t)}{\|x_N(t)\|^2} e(t) \quad (\text{A.6})$$

で与えられる．