

物理モデルを用いたギターにおける グリッサンド音の生成法

古市朝美^{†1} 白木善尚^{†1}

今日、楽曲製作に用いられる音源の多くは、楽器音の波形をサンプリングした PCM 音源が使われている。一方、偏微分方程式を用いて楽器の音響特性を表現し、その偏微分方程式の解に基づく物理モデル音源も実用化されている。物理モデル音源は音高、音色、音程などの操作が容易であり、音の立ちあがりや連続した音の生成等、PCM 音源と比べて自然な楽器音作りが可能である。本報告では、代表的な撥弦楽器であるギター音の生成法、特にグリッサンド音の物理モデル音源の生成法を提案する。更に生成した音源の聴取実験を通して、提案した方法の妥当性の検証を行う。

Glissando guitar sound generation method using a physical modeling

Tomomi FURUICHI^{†1} and Yoshinao SHIRAKI^{†1}

Today, as a sound source for use in making music, PCM sound sources are often used. PCM sound is a sound source sampling the waveform of the instrument sound. Meanwhile, after expressing the acoustic characteristics of the instrument using a partial differential equation, physical model sound source based on the solution of the PDE has also been put to practical use. Using the physical model tone generator, manipulating pitch, timbre, and pitch is easy. Further, compared with PCM sound, using the physical model tone generator, such as generation of successive notes and the start of the sound, natural musical instrument sounds are possible. In this report, generation method of guitar sound which is a plucked string instrument typical, we propose a method for generating a physical model of sound source glissando sound in particular. Through listening experiments sound generated, we evaluate the validity of the proposed method.

1. はじめに

本研究は、楽曲制作の現場におけるキーボード - インターフェースの向上を可能とする技術の確立を目指している。この目標への第一歩として、本報告では、物理モデル音源に基づく撥弦楽器音の生成法、特にグリッサンド音の新たな生成法について検討する。

今日、キーボード(鍵盤)は楽曲製作の現場で最も多く使用されている。キーボードは非常に便利な入力インターフェースである。押せば、誰でもいとも簡単に楽器音を鳴らすことができる。キーボード - インターフェースを用いて、エレクトリック・ピアノやハーブシコード等の鍵盤楽器は勿論、ドラム等の打楽器、サキソフォンやクラリネット等のリード楽器、トランペットやチューバ等の金管楽器も演奏する事が出来る。

ではギターやリュート等の、撥弦楽器の演奏はどうだろうか。その発音系の違いからキーボードを用いて撥弦楽器を演奏する事は前述した楽器に比べて困難であると思われる。本報告の一つの動機はこの困難の低減化にある。研究のねらいは、撥弦楽器の発音系を詳細に解析し実装と検証を重ねることによって、キーボード - インターフェース

の向上を図る点にある。更に、向上したインターフェースを MIDI(Musical Instrument Digital Interface)へと拡張し、近年流行している DTM(Desktop Music)の機能向上にも寄与することを目標としている。

本報告では、フーリエ級数解を用いた物理モデル音源による方法([1], [2])を基にして、代表的な撥弦楽器であるギター音の生成法、特にグリッサンド音の生成方法について検討する。グリッサンド音に着目する理由は、それがギター音の主要な特徴の一つであると思われるからである。具体的には、音高を線形に変化させる方法[3]を基にして、非線形な音高変化を付与可能なグリッサンド音の生成法について検討を行う。そして、生成したグリッサンド音に対して聴取実験を行い妥当性の検証を行った。

2. ギター音の撥弦物理モデル

本章では、ギター音を生成する為に使用した物理モデルの説明を行う。このモデルはアコースティック・ギターの第5弦に対する物理モデルである。

2.1 撥弦の物理モデル

撥弦の代表的な物理モデルは、弦の偏微分方程式を次式

^{†1} 東邦大学大学院理学研究科
Toho University

で表すものである[1], [4].

$$\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx \quad (2.1)$$

ここで、 ρ ：密度、 y ：弦の縦方向の変位、 x ：原点からの横方向の励振位置、 t ：時間、 T ：張力である。

今、境界条件を、

$$x = 0 \quad y = 0 \quad (2.2.a)$$

$$x = L \quad y = 0 \quad (2.2.b)$$

とする。 ω ：振動数とすると、 ω は次式で表される。

$$\omega = \frac{n\pi}{L} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad (2.3)$$

従って、弦の固有振動数 f は

$$f = \frac{1}{2\pi} \omega = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad (2.4)$$

となる。ここで n はモード数である。モード数 $n=1$ であるときを基本振動数といい、両端固定端の最も低い固有振動数である。同様に $n=2$ であるときを第2倍音といい、弦は基本振動数の整数倍を固有値とし、無数の固有振動がある事が分かる。

式(2.3), (2.4)に実際にモデルにしたギターの弦の長さ、張力、密度を入力すると、表1の様に固有振動数が計算できる。

表1 第五弦の固有振動数

Table 1 Natural frequency of the fifth string.

モード数	振動数[Hz]
$n=1$	440.0
$n=2$	880.0
$n=3$	1320.0
$n=4$	1760.0

偏微分方程式(2.1)の解は次式で表される[2].

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(2\pi k f_0 t + \varphi_k) \quad (2.5)$$

ここで、 A はモード毎の振幅である。経過時間毎の各周波数の振幅 A は(2.6)式で表される。

$$A = 10^{\frac{-\alpha}{10}} \quad (2.6)$$

α は任意の基準値と測定した結果の各周波数の音圧である。各周波数成分の振幅をグラフにし、(2.6)式で求めた振幅 A を(2.7)式で近似する。

$$y = e^{-\beta x} \quad (2.7)$$

更に、初期音量の比を百分率で表し、各モードに強度を与えた。(表2参照)

表2 初期音量

Table 2 Initial volume.

時間 [s]	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$
1.0772	96.5	100.0	99.4	91.7

2.2 撥弦の物理モデルを用いたギターの単音生成

2.1 節で述べた方法に基づいてアコースティック・ギターの、単音を MATLAB プログラミングで生成した。図 2.1 は録音し基にしたアコースティック・ギター単音のスペクトログラム、図 2.2 は生成したアコースティック・ギターのスペクトログラムである。また本章ではモード数 $n=6$ で音源を生成した。

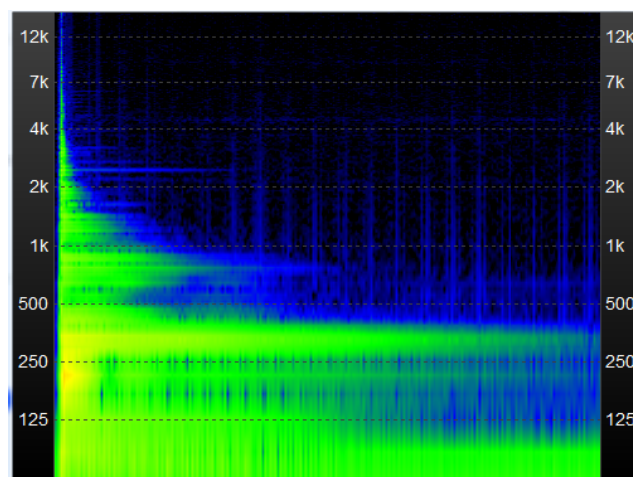


図 2.1 基にしたギター音のスペクトログラム
(解析:Sound Engine)

Fig. 2.1 Spectrogram of guitar sound, which is based.
(Sound Engine: analysis)

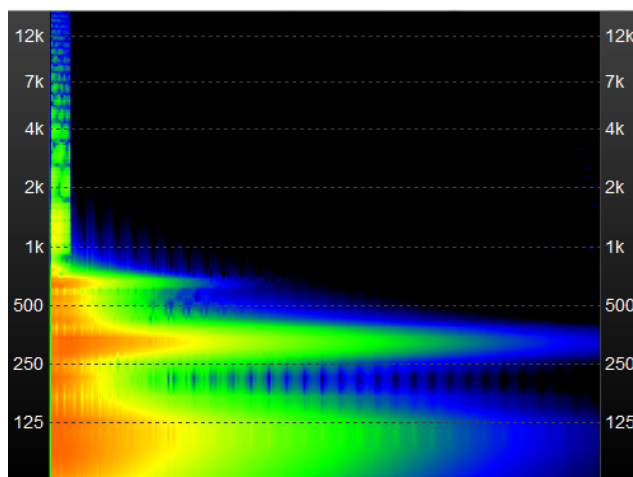


図 2.2 物理モデルを用いたギター音源(単音)の
スペクトログラム(解析:Sound Engine)

Fig. 2.2 Spectrogram (single note) sound guitar using a
physical modeling. (Sound Engine: analysis)

3. 連続的な周波数変化

本章ではグリッサンド奏法とはどのような奏法なのかの解説を行い、そして第2章で示した式を用いたアコースティック・ギターのグリッサンド音の表現方法を考え、実装した過程について述べる。また本章では、巻き弦による音質の変化を考慮しない為にアコースティック・ギターの第1弦をモデルとした。

3.1 グリッサンド奏法

グリッサンド奏法とは音を区切ることなく隙間なく滑らせるように音の高さを変えていく奏法の事である。例えばギターの場合、弦の不特定のある点からある点までの音を指でこすりながら演奏する。それに対してピアノなど音が1音1音途切れる楽器の場合、速い音階奏法の事を指す。

3.2 直線的な周波数変化

文献[3]によると数値化された音高 x と周波数との関係は(3.1)式で表わされる。

$$x = s(a) = \frac{\log a - \log a_0}{\log r}, \quad a = h(x) = a_0 r^x \quad (3.1)$$

s は周波数を音高に変える関数、 h は逆に音高を周波数に変える関数となる。また、最初($t = 0$)の周波数 a 、 $t = T$ であるときの周波数を b として、その間に一定に音高が変化するような形の関数 g_2 を考える。

$$g_2(t) = A \sin 2\pi g_1(t) \quad (3.2)$$

g'_1 は g_2 の周波数であるので、 g_1 が満たす条件は次式

$$g'_1(t) = a, \quad g'_1(T) = b \quad (3.3)$$

および音高が一定に変化、すなわち直線的(線形)に変化する事である。

$s(a) = p$ 、 $s(b) = q$ とすると $s(g'_1(t))$ は $t = 0$ から $t = T$ にかけて p から q に線形に変化する事になるので

$$s(g'_1(t)) = p + \frac{t}{T}(q - p) \quad (3.4)$$

となる。また $s(a)$ は求められているので

$$\frac{\log g'_1(t) - \log a_0}{\log r} = p + \frac{t}{T}(q - p) \quad (3.5)$$

より、

$$g'_1(t) = a_0 r^{p + (q-p)t/T} \quad (3.6)$$

ここで、

$$a = h(p) = a_0 r^p, \quad a = h(q) = a_0 r^q \quad (3.7)$$

より、

$$g'_1(t) = a^{1-t/T} b^{t/T} = a \left(\frac{b}{a} \right)^{t/T} \quad (3.8)$$

となる。これを積分すると、次式を得る。

$$g_1(t) = aT \frac{1}{\log \frac{b}{a}} \left(\frac{b}{a} \right)^{\frac{t}{T}} + C \quad (3.9)$$

ここで、定数差は意味を持たないので、 $C = 0$ とし、また b/a を R と書くことにすれば、

$$g_1(t) = \frac{aT}{\log R} R^{\frac{t}{T}} \quad (3.10)$$

となり、よって次式を得る。

$$g_2(t) = A \sin 2\pi \frac{aT}{\log R} R^{\frac{t}{T}} \quad (3.11)$$

3.3 滑らかで非線形な周波数変化

3.2節の(3.9)式を使用してグリッサンド音を生成すると、直線的な音高の変化しか得られない。しかし(3.8)式より、欲しい周波数変化を持った関数の積分値が周波数変化を与える関数(または数値変化)である事が分かる。以上より、 A, B, C, D を任意の定数とし、所望の非線形周波数変化を

$$g_u(t) = \frac{A}{1 + \exp(C \times t - D)} + B \quad (3.12)$$

として、(3.12)式の数値積分を行う方法を検討した。この方法を使用する事によって、更に積分値の解法が難しい式、または数値だけの式も容易に積分した後の値を算出する事ができる。

本研究で想定した周波数変化はFの音から1オクターブ上のFまで(349.23Hz~698.46Hz)である。また0.5秒間で1オクターブの超階をする場合を想定した。

以上の条件より、(3.12)式の定数 A =(終点の周波数(349.23Hz)-始点の周波数(698.46Hz))-(与えたい周波数まで下げる為の周波数(30Hz))、 B =始点の周波数(349.23Hz)、 C =任意の定数(10)、 D =任意の定数(本研究では8)とした。

3.4 撥弦の物理モデルを用いたギターのグリッサンド音生成

第2章で単音生成に使用した方法と、3.2、3.3節で述べた定式化を用いて、連続的に音高が変化する2つの音を生成した。図3.1は基にしたアコースティック・ギターのグリッサンド音のスペクトラグラム、図3.2は(3.9)式を用いて生成した0.5秒間で1オクターブの超階をするグリッサンド音、図3.3は(3.12)式を用いて0.5秒間で1オクターブの超階をするグリッサンド音である。

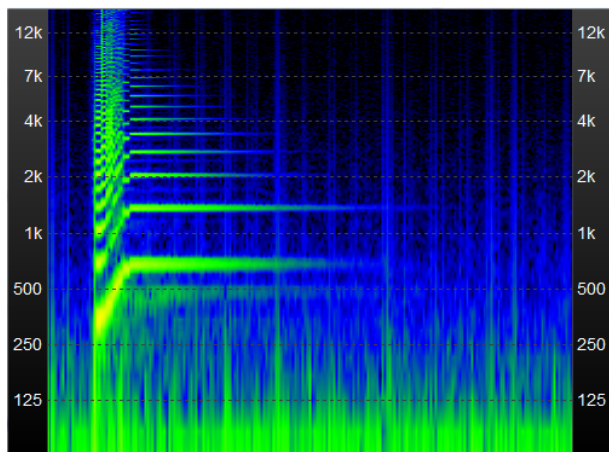


図 3.1 基にしたギター音(第一弦)のスペクトログラム
(解析:Sound Engine)

Fig. 3.1 Guitar sound spectrogram that is based on the first string. (Sound Engine: analysis)

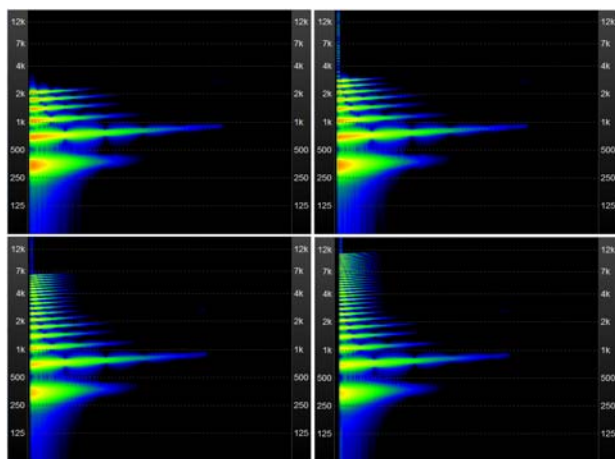


図 3.2 生成した音源のスペクトログラム(12 秒間)
 $n=6$ (左上), $n=8$ (右上), $n=18$ (左下), $n=31$ (右下)

Fig. 3.2 Spectrogram of the sound source that generated
(12 seconds), $n=6$ (upper left), $n=8$ (upper right),
 $n=18$ (lower left), $n=31$ (lower right)

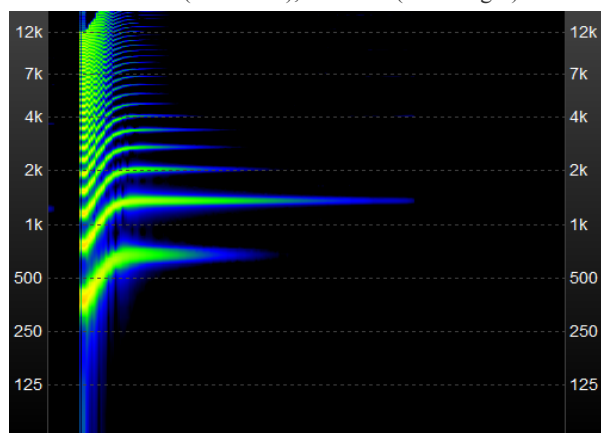


図 3.3 新しいグリッサンド生成関数を用いた物理モデル
合成されたギター音のスペクトログラム

Fig. 3.3 Spectrogram of synthesized guitar sound physical
modeling using new glissando generating function.

4. 聴取実験

第3章で生成したアコースティック・ギターのグリッサンド音と、基にしたギター音を被験者に聞き比べて貰い、本研究で生成したアコースティック・ギターのグリッサンド音についての妥当性の検証を行った。

4.1 実験方法

実験は以下の方法で行った。

実験日 : 2013 年 1 月 28 日 29 日

場所 : 東邦大学 白木研究室

実験 1 は被験者 12 人(内, 男性 9 名, 女性 3 名). 実験 2 では被験者 6 名(内, 男性 4 名, 女性 2 名)である。

・評価実験 1

実験 1 では録音したギター音(グリッサンド)と, グリッサンド生成関数(3.12)式を使って生成した図 3.2 のスペクトログラムで表される音源 4 つをそれぞれ 2 つずつ比較して, より最初に流れた録音したギター音に近いと思った音を, 特に音質, 減衰する感じ, に着目して選択して頂いた。実験 1 と同様, 評価しやすい様に, 音源の質に影響が出ない程度に 4.5 秒程度に音を切り取った。実験には以下の様な進行で流れる, 音源を使用した。

・評価実験 2

実験 2 は録音したギター音の周波数が上がりきるまでの区間の音と, 0.5 秒間で 1 オクターブの周波数変化をする, 図 3.2 のスペクトログラムで表される音源(モード数, 6, 8, 18, 31)を聴き比べて頂き, より録音したギターの音に近い音を選択して頂いた。図 4.1 は評価実験 2 で使用した音源の波形の一部である。

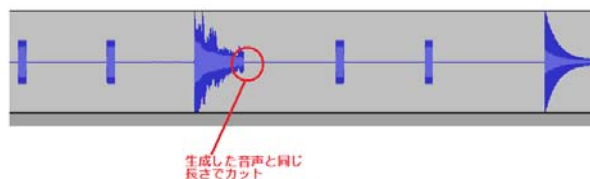


図 4.1 評価実験 2 で使用した音源

Fig. 4.1 Sound source used in the evaluation of the second experiment.

4.2 結果

実験結果は以下の通りである。

表 4.1 評価実験 1 選択された回数

Table 4.1 Experiment 1: The number of times it has been selected.

モード数	選択された回数
$n=6$	12
$n=8$	16
$n=18$	23
$n=31$	21

表 4.2 評価実験 1: 実験ごとの選択された回数

Table 4.2 Experiment 1: The number of times it has been selected for each experiment.

モード数	選択された回数	モード数	選択された回数
$n=18$	7	$n=6$	5
$n=8$	3	$n=31$	9
$n=31$	4	$n=18$	8
$n=8$	4	$n=18$	8
$n=6$	4	$n=31$	8
$n=8$	9	$n=6$	3

表 4.3 評価実験 2 選択された回数

Table 4.3 Experiment 2: The number of times it has been selected.

モード数	選択された回数
$n=6$	2
$n=8$	7
$n=18$	12
$n=31$	15

表 4.4 評価実験 2 実験ごとの選択された回数

Table 4.4 Experiment 2: The number of times it has been selected for each experiment.

モード数	選択された回数	モード数	選択された回数
$n=18$	5	$n=6$	1
$n=8$	1	$n=31$	5
$n=31$	4	$n=18$	2
$n=8$	1	$n=18$	5
$n=6$	0	$n=31$	6
$n=8$	5	$n=6$	1

4.3 考察

実験 1 より、モード数 $n=18$ を選んだ人数が一番多かった。実験後に被験者に判定しにくい実験があったかを訪ねた所、実験 1 が分かり辛かったという意見があった。最初に聴かせた音源と後から比べて頂いた音源のピッチ変化の違いが有りすぎた為でないかと推測される。しかし、 $n=31$ 、と $n=18$ の音源の評価が高かった事から、倍音は適度にあった方が原音に近づく事が分かった。また表 4.2 より 1 対 1 でモード数が多い方が選択した人数が少なかったのは、3 回目の実験だけであった。これより周波数変化が遅い音源に関して、 $n=18$ 近辺のモード数を持った音源は人間にとって自然に聞こえるのではないかと推測する。

実験 2 より周波数変化させている部分だけ聞くと、更にモード数が多ければ多い方が録音したグリッサンド音に近い事が分かった。また 1 対 1 の音源比較でもモード数が多い音源よりもモード数が少ない音源を選んだ人数が多かった事はなかった。周波数変化させている部分だけを比較した方が、よりモード数の多い音源が選ばれ、それがアコースティック・ギターの音源に近かったと推測できる。

今後の課題

まず、グリッサンド生成関数の一般化、汎用性の向上が挙げられる。0.5 秒間で 1 オクターブの変化をする式は考えられたが、もっと遅い周波数変化を持ったグリッサンドや、速い変化を持ったグリッサンドも考えられるようにする必要がある。また誰でも思った様な周波数変化を与えられるように改良するべきである。

次に、周波数変化以外の要因である。まず、フレットに指が当たって発生する、フレットノイズである。本論では触れていなかったが、モード毎の周波数のピークは一定に減衰している訳でなく、途中大幅に音量が上がるポイントが存在していた。また違った条件の基に発生しているノイズの性質を調べて、補う必要がある。

また指を滑らせる事による振動の種類や張力の変化も考慮し、通常の撥弦振動で発音される音と違った音を生成する必要がある。

そして、論文の中では取り上げていなかったが、本論文の末章の参考で触れる非線形解を用いた更に精度が良いと予想される物理モデルのグリッサンド生成も行い、本研究で取り扱った線形方程式と比べる必要がある。

5. 使用機材

第 2 章、第 3 章 ギター音の収録、ギター音の解析
 ソフトウェア：SP4WIN Pro(解析:ハミング窓、次数 10)
 オーディオインターフェース：Focusrite Scarlett 2i4
 マイクケーブル(モノラル→マイクキャノン)：Hexa

NC3FX-NC3MX-3m

アコースティック・ギター：YAMAHA APX500

素材

表板：スプルース

裏板：ナトー/アガチス

棹：ナトー

指板：ローズウッド

下駒：ローズウッド

弦：PHOSHOR BRONZE LIGHT GAUGE GS-800AL

第4章 聴取実験

ヘッドフォン：SONY MDR-CD900ST

謝辞 本研究に携わって頂いた全ての方に、心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 李相信:物理モデルを用いた音の創生, 高知工科大学卒業論文, 2004
- [2] 井上喜雄, 芝田京子:弦楽器の音質解析と創生, 高知工科大学卒業論文, 2005
- [3] 竹野茂治: グリッサンド音の作成について, 新潟工科大学講義ノート, 2007
(<http://takeno.ice.niit.ac.jp/~shige/math/lecture/misc/gliss1/>)
- [4] Nevill.H.Fletcher and Thomas.D.Rossing :楽器の物理学, シュプリンガー・ジャパン, 2002