

弦楽器の物理モデルを用いた新奇性のある楽音の生成

城所 帆昂

Hotaka Kidokoro

法政大学大学院情報科学部コンピューター科学科

hotaka.kidokoro.5u@stu.hosei.ac.jp

Abstract

Recently computer progressed. But, generating novelty sound by computer is not performed. This study aim at generating novel sound of a string instrument. Sound require recognizable tone interval, comfortable sound when play chords and changeable timbre to a performance. To meet these requirements, we use model based on a mechanism of a musical instrument. Spring-mass model used for vibration of a string. We express a variety of movement by making a model every performance techniques. By adjusting parameters of a model, express virtual musical instruments having difficult realization.

1 仮想楽器

本研究では新奇性のある発弦楽器の楽音を生成することを考えている。ここで楽音とは、音楽の中で用いることのできる音を指す。ただ単に音を生成するだけでは、その音が楽音として適しているのかどうかはわからない。例えば、周波数が110Hz音に対して、5倍の成分しか存在しないと、基本周波数は110Hzか、550Hzか判断しづらくなり、音高がわかりづらくなってしまふ。このような音で演奏をしたときに正しいメロディを聞き手に伝えられない可能性がある。また、非整数倍の成分や高域の倍音成分が強すぎると、和音として重ねたときにきれいに響かず、違和感を覚えることもある。他にも、波形が時間的に変化しない音はブザーのような電子音ととらえられてしまいやすい [1]。

今回は楽音としての条件を、和音として重ねた時に違和感がないこと、波形が時間的に変化すること、演奏に沿ってある程度音色を変更できることとする。本研究では演奏に沿って音色を変化させることができるという点に注目して、多くの奏法を持つ発弦楽器を想定して研究を行う。発弦楽器の特徴として波形が時間ごとに少しずつ変化していくことや、アタックが強いことがあげられる。本研究では上記三つの楽音の条件を満たし、発弦楽器の特徴を持つ新奇性のある楽音の生成を目指す。

1.1 楽音の生成

現在、楽音の生成によく用いられている方法の一つとしてフィルタや変調による楽音の生成がある [2]。しかし、この手法で今回の目的の一つである時間ごとに少し

ずつ波形が変化する音を生成することを考えると、多くのパラメータでの制御や周期の長い信号での変調などを行うことになる。そこで、本研究では条件を満たすために実際の楽器の構造をもとにモデルを作成し、それを用いて様々な制約から実現の難しい楽器を仮想楽器としてシミュレートする。仮想楽器に考えられるものとして、加工の難しい素材で弦や胴を作るなどの楽器の構造レベルでの仮想楽器や、実際には身体的な制約から難しい奏法といった演奏レベルでの仮想楽音があげられる。

物理モデルによる弦のシミュレートはこれまでも盛んに行われてきた。非線形性を考慮した弦モデルでのシミュレートでは基本周波数が少しずつ下がることがわかっている。しかし、従来の多くの方法では弦のパラメータを時間に対して均一なものとして扱っている。そこで、今回のモデルでは様々な奏法への対応と発弦楽器らしい音色の変化を実現できることを目標とする。

2 モデルの構成

本研究で生成する仮想楽音の方針として、発弦楽器の特徴を強調するような楽音の生成を行うことを考える。発弦楽器の特徴として音の立ち上がりが強調整された音色、倍音成分が多いことによる明るい音色があげられる。これらの特徴を持つ楽音を生成できるモデルを考える。

楽音の生成には実際のギターの演奏に基づく表1の演奏情報を考慮できるようにする [3]。弦の比重はパラメータの変更で弦の中で比重の変化を指定できることを考える。これにより弦の太さが場所ごとに違うような仮想的な弦をシミュレートできる。これを0にした場合は均一な比重となる。入力された弦長、比重、目的の基本周波数から式(1)に従って弦の張力を決定する。

(図1)は今回考えたモデルの構成である。右手、左手、振動、共振の四つで構成されていて、右手、左手モデルは演奏のモデルに対応し、振動、共振モデルは楽器の構造のモデル化に対応する。構造と奏法を分けてモデル化することで、それぞれの組み合わせによって仮想楽音のバリエーションを増やすことができるという利点がある。出力となる音は弦上のある一点の動きを波形として出力する。これはエレキギターのピックアップに相当する。

表 1. 演奏情報

弦長	L[m]
シミュレーション時間	t[s]
基本周波数	f[Hz]
比重	ρ [kg/m]
發弦, 擦弦点	L/n
押弦の位置	L/n
触弦の位置	L/n
押弦の開始, 終了時刻	t/N
触弦の開始, 終了時刻	t/N
ピックアップの位置	L/n

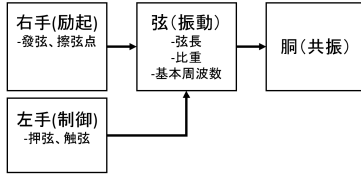


図 1. モデルの構成

2.1 振動のモデル化

本研究では弦のモデル化にばね質点モデルを用いる。これは、弦をいくつものばねと質点で近似したモデルである。このモデルでは弦全体の動きを計算できるので、弦をはじく位置の指定や、弦の振動の出力を複数箇所の足し合わせにする作業などが容易に行える [4]。また、質点ごとに別々のパラメータを設定することで、弦の場所によって性質の異なる弦をシミュレートできる。

弦を複数の質点としたとき、各点の質量を m 、弦の張力を T 、左右の点と変位の差をそれぞれ x_1 、 x_2 とする。最右項は弦の伸びが大きい場合の振動の変化に対応し、 β の値を調整することで弦の特性を表現する。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -T(x_1 - x_2) - \beta(x_1 - x_2)^3 \quad (2)$$

今回のモデルでは發弦楽器の変化していく波形を減衰によって再現している。運動方程式の減衰項では二つの減衰を考える。一つは空気などとの摩擦によっておこる粘性減衰であり、これは弦の振動全体に作用し、音の長さに大きく影響する。もう一つの減衰は弦の分子間での摩擦によっておこる内部減衰である。これは音色の高周波数成分のみ作用する。これにより時間ごとに音色が変化していく様子を表現できる。粘性抵抗は速度に比例する項で表現される。このときの係数を r_1 とする。内部抵抗は加速度に比例する項で表現される。このときの係数を r_2 とする。ここで、 v_t 、 a_t は時間ごとの速度、加速度をあらわす。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -T(x_1 - x_2) - \beta(x_1 - x_2)^3 - r_1 v_t - r_2 a_t \quad (3)$$

また、發弦楽器や打弦楽器に見られる基本周波数の減衰を再現するために、張力が場所ごとに変化することを考慮する。これにより、定常状態の音程よりもアタックの音程が少しだけ高くなる。これが發弦楽器のアタックを特徴的なものに行っていると考えられる。

張力は弦の伸びが大きい場所ほど大きくなり、伸びが小さい場所では小さくなる。これを再現するために、以下の式によって場所ごとの張力を計算する [5][6]。 T_0 は弦が振動していないときの張力である。

$$T = T_0 + EA(-ds - dx)/dx \quad (4)$$

E はヤング率、 A は弦の断面積をあらわす。上の式に境界条件を与えて、差分法により振動の計算を行う。

2.2 両手のモデル化

右手モデルでは發弦楽器を演奏する際にははじく場所にあたる。本研究では弦がはじかれた瞬間の形を指定して振動モデルの初期条件とすることで、はじく場所の変化をモデル化する。はじく場所や、はじく点の変形のしかたによって弦の振動の様子が変化する。はじく点を一点だけにすると、細いピックではじいたような倍音成分の強い音を得られる。反対にはじく点を広くすると指ではじいたような倍音成分の弱い、柔らかい印象の音を得ることができる。

發弦点にピックや指からの力を加えることでこれを再現する。發弦が行われる数ステップ間は發弦点での変位を以下の式によって計算する。 f_p は發弦の力をあらわし、この数値を変化させることで、振動し始める瞬間の弦の形が変化し音の強弱に伴う音色の変化を表現する。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -T_x(x_1 - x_2) - \beta(x_1 - x_2)^3 - r_1 v_t - r_2 a_t + f_p \quad (5)$$

左手モデルでは、演奏の際の左手の動きをモデル化する。本研究では指が弦に触れている触弦状態と、弦を完全に押さえている押弦状態を考慮する。これによりハーモニクス奏法、スライド奏法などをシミュレートをする。

ハーモニクスは触弦をモデル化で実現する。触っている点での振動を制限する項を運動方程式に追加する。弦に指が触れている間の変位の計算をこの式で行い、弦からゆびが離れた時刻から通常で式で変位を計算する。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -T(x_1 - x_2) - \beta(x_1 - x_2)^3 - vR \quad (6)$$

このときに指を離すまでの時刻を短くするとハーモニクス奏法となり、弦の端を押さえたままにするとミュート奏法のような音になる。このとき生成される楽音の基本周波数は抑えた点によって変化する。

スライドは押弦をモデル化することで再現できる。押さえている点での振動をなくすことで実現する。押弦の位置を時間で移動させるとスライドを再現できる。また、押さえる位置を少しずつ前後に動かすことでビブラート奏法を再現することもできる。

押弦、触弦の位置は弦長の整数分の一で決める。押弦、触弦のタイミングとそれぞれの離弦のタイミングはシミュレーション時間の整数分の一で決定する。

2.3 共振のモデル化

共振のモデル化では音場シミュレーションを行う必要がある。しかし、想定する音場のすべての点での波動方程式を解く必要があり、計算量が膨大になってしまう。それに対して楽器の胴の共振での音色はそれほど大きく

変動しないので、今回は楽器のインパルス応答を用意し、モデルで得られた振動に畳み込む。今回用意したインパルス応答はギターアンプ用のアコースティックギターの胴のインパルス応答である。

3 仮想楽器の楽音生成

3.1 仮想楽器のシミュレート

実際に仮想楽器の楽音を生成の例を紹介する。これらの楽音は差分法で生成した。一つの例として、弦の太さを工夫することでより鋭い音色を持つ楽音の生成を考える。ここでは太さが場所によって異なる弦をはじいたときの音を生成した。(図2)はこの弦のシミュレートをして生成した楽音のスペクトルである。この場合基本周波数に対し、高い周波数の成分がまばらに強く出るため、金属的で鋭い音色を持った音が生成される。また、弦の太さの変化の仕方を変えると、その音色も変化する。(図3)は異なるパターンの弦のシミュレートのスペクトルである。このパターンでは高い周波数が抑えられ、鈍く丸い印象の音色を持った音が生成される。また、基本周波数の倍音成分以外の成分が含まれ、二つの音が鳴っているような音だとわかる。このことから今回のモデルでは太さの変化のパターンを変更することで目的に応じて多様な音の生成が可能であることがわかる。例えば、リズムを刻むような演奏の場合は(図2)のような音色が適していると考えられる。

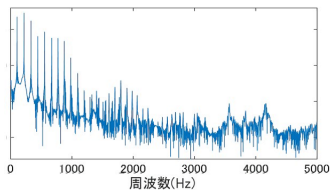


図 2. 太さが変化する弦のスペクトル

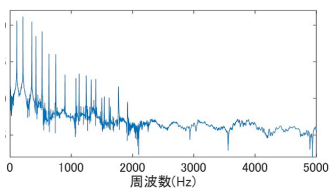


図 3. 太さが変化する弦のスペクトル

3.2 奏法のシミュレート

奏法についてもいくつかのシミュレートを行い、奏法によって音色を変化させることができているかを観察する。まず、同じ音を小刻みに何度も演奏するトレモロ奏法をしながら発弦点を変化させる奏法を考える。この奏法は右手モデルの発弦点とはじく強さを時間ごとに変化させることで再現できる。発弦点を弦の端に近い点 (sul-pont) から弦の真ん中に近い点 (sul-tast) へと変化させる奏法をシミュレートした。(図4)はこのときの楽音のスペクトログラムである。初めは弦の真ん中をはじいているので、偶数倍の成分が弱いですが、発弦点が端に移動するにつれて、だんだんと偶数倍の成分が強くなっていくことが観察できる。これは実際の楽器での発弦点の

変化による音色の変化と一致する。この奏法は実際に行うことを考えると、熟練の奏者でないと難しい奏法であるが、仮想楽器を用いることで簡単に再現できる。

別の例として、仮想弦を用いてスライド奏法をシミュレートした。スライド奏法は弦を弾いた後に、弦をおさえる位置をずらすことで、音程を連続的に変化させる奏法である。この奏法は左手モデルで押弦の位置を時間的にずらしていくことで再現している。(図5)はこのシミュレートによって生成した楽音の基本周波数の変化を示した図であるこの図から押弦点の変化に伴い音の基本周波数が変化する様子が観察できた。

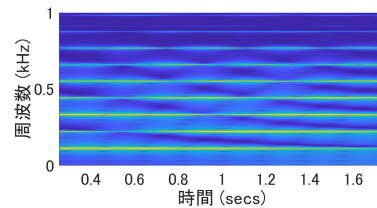


図 4. トレモロ奏法のスペクトログラム

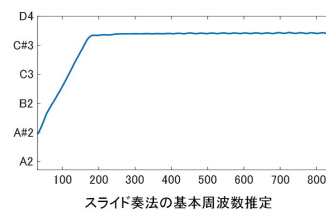


図 5. スライド奏法の基本周波数推定

3.3 演奏のシミュレート

弦の太さが場所によって異なる弦を6本持つようなギターを想定した仮想楽音を用いて演奏音を生成した。6本の弦の変化のパターンは同じものとする。このときのスペクトログラムを(図6)に示す。演奏音する楽譜は、5度チューニングされた6弦の楽器を想定した演奏になっている。これにより弦楽器らしいフレーズを感じられるよう考慮した。また、ハーモクス奏法や和音の演奏を取り入れることで、奏法に対応できているかを確認した。スペクトログラムを観察すると、3秒付近から倍音成分が少なくなり、ハーモクス奏法を表現できていることがわかる。これにより奏法に応じて音色の変化をつけられていることがわかる。和音の演奏ではうなりなどの大きな違和感なく音が重なっていることを確認できた。よって、楽音としての条件を満たした新奇性のある楽音での演奏ができているといえる。

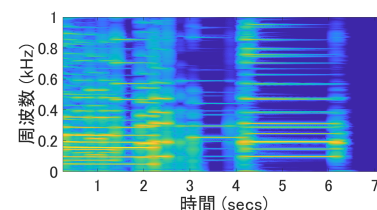


図 6. 演奏音のスペクトログラム

4 考察

4.1 モデルの妥当性

本研究でのモデルが実際の物理法則に沿っているかを判断するためにハーモニクス奏法の再現を観察する。生成した楽音のスペクトルと実際のハーモニクス奏法のスペクトルを比較した図を(図7)に示す。どちらの音もスペクトルから奇数倍の倍音成分が抑えられ、純音に近い丸い音になっていることがわかる。よって、実際の楽器のようなふるまいを得られているので、今回のモデルで実際の弦のふるまいをモデル化できていると考えられる。

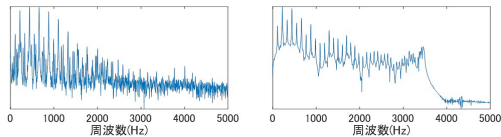


図7. ハーモニクス奏法とシミュレーションの比較

4.2 非線形性を持つ張力

弦の伸びを考慮した張力による音色への影響を観察する。実際の弦の基本周波数の推移は緩やかな右下がりになることが知られている[7]。(図8)はエレキギターと、今回の仮想楽音の基本周波数推定の比較である。どちらも右下がりのグラフになっていて、音程の変化を再現できている。これによる音色の変化がブザーのような楽音ととらえられることのない、自然な楽音を実現している。

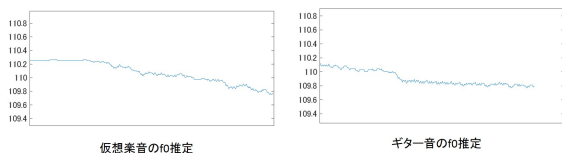


図8. エレキギターと仮想楽音の基本周波数推定

5 まとめ

本研究ではバネ質点モデルを用いて、發弦楽器の楽音を生成した。非線形性の張力を考慮することで、發弦楽器の基本周波数の減衰を再現できた。また、粘性減衰と内部減衰を考慮することで弦の振動の時間的な変化を再現した。触弦、押弦をモデル化することで様々な演奏技法のシミュレートが可能になった。また、バネ質点モデルを用いることで弦の比重などを場所ごとに細かく設定することが可能になり、多様な楽音を生成することが可能になった。また、モデルのパラメータを調整することで数種類の仮想楽音と仮想楽器による演奏音を生成した。仮想楽音での演奏で正しいメロディ判別できることや、演奏中の奏法の変化に対応して音色が変化すること、和音が違和感なく聞こえることを確認できた。

より楽音のバリエーションを増やす方法として、胴の部分のシミュレートを行うことで、複雑な形の胴を持つ楽器などの構造レベルでの仮想楽音の生成を行うことも可能になると考えられる。また、今回のモデルは一次元の振動しか考慮できていないため、太い弦の二次元方向

の振動は考慮できない。これを考慮することでピアノのようになりを持つ楽音を生成可能になる。今回のモデルに含めきれなかった実際の楽器のパラメータとして、押弦の強さや向き、弦高などがある。これらも三次元のモデルを考えることで考慮できると考えられる。

今後、生成した楽音の新奇性の評価を行っていく必要がある。新奇性については、表2のような尺度を用いてアンケートを行い、結果を多次元尺度構成法で解析し、実際の楽音と生成音の距離を測ることで新奇性を評価できると考えられる[8]。

表2. 評価尺度

明るい	暗い
はっきりした	ぼんやりした
かたい	柔らかい
強い	弱い
澄んだ	濁った
鋭い	丸い
深みのある	金属的な
快い	不快
厚みのある	薄い
繊細な	荒れた
抜けのいい	こもった
冷たい	暖かい
かすれた	つやのある
大きい	小さい
やせた	広がりのある
静かな	つんざくような
なめらかな	ゴロゴロした

参考文献

- [1] HELMHOLTZ H.L.F, On the Sensation of Tone, As a Physiological Basic for the Theory of Music, 1954
- [2] JULIUS O, SMITH III, Viewpoints on the History of Digital Synthesis, 2005
- [3] C. McKay, A survey of physical modelling techniques for synthesizing the classical guitar, 2003.
- [4] 中嶋, 他, 擦弦の過渡状態に関する数値シミュレーション, 音響学音楽音響研究資, 2011, pp.7-12
- [5] G. V. Anand, Large-amplitude damped free vibration of a stretched string, J. Acoust. Soc. Amer., vol. 45, no. 5, pp. 1089-1096, 1969.
- [6] T. Tolonen, Modeling of tension modulation nonlinearity in plucked strings, IEEE Trans. Speech Audio Processing, vol.8, no.3, pp.300-10, May, 2000
- [7] K. A. Legge and N. H. Fletcher, Nonlinear generation of missing modes on a vibrating string, J. Acoust. Soc. Amer., vol. 76, pp.5-12, July 1984.
- [8] 難波, 他, 音の評価のための心理学的測定法, コロナ社, 東京, 1998