

仮想環境におけるオーケストラ演奏の学習

得能 さやか 守田 了

山口大学 工学部

あらまし

世界中で親しまれているオーケストラ演奏を仮想環境において実現する。一般に、仮想環境において音楽の演奏をシミュレーションする研究は行われているが、奏者が演奏を学習する研究は行われていない。また、建築の分野における音場シミュレーションのようにホールを設定した場合であっても、各奏者の楽器の配置までは考慮されていない。本研究では、各奏者の空間的な位置関係を考慮して奏者が演奏中に左右の耳に聞こえてくる演奏を再構成する。奏者は左右の耳に聞こえてくる演奏と指揮情報から、学習を通して曲を正確に演奏することを学ぶ。実際に、弦楽5重奏であるモーツァルト作曲弦楽セレナード第13番ト長調 K. 525 を、周りの奏者と指揮者とのインタラクションを通して練習するシミュレーションを行う。

キーワード：オーケストラ, 楽器の配置, 学習

Learning Orchestra Play on Virtual Environment

Sayaka TOKUNOU Satoru MORITA

Faculty of Engineering, Yamaguchi University

Abstract

We realize the orchestra that is popular in all over the world on the virtual environment. Generally, there are the researches about the music performed on the virtual environment but are not the researches that the player learns the music performance on the virtual environment. The position of players is not considered in the case of building the hall on the virtual environment. In the paper, we generate the sound that the player listens to with the left and right ears. The player learns to play the orchestra while listening to the sounds that the other players play and seeing the conductor. We simulate that five players learn to play Serenade No. 13 in G major k. 525 composed by Mozart through the practices.

keyword : Orchestra, Learning, Virtual Environment

1 はじめに

近年、コンピュータの進歩により現実世界をコンピュータ上である仮想空間に構築する研究が多く行われている。本研究では、世界中で親しまれているオーケストラをコンピュータ上である仮想空間に構築し、対話的な演奏を実現する。

対話的な演奏に関する研究として、セッションシステムに関する研究がある。セッションシステムとは、相手となる人間の演奏そのものに反応して即興演奏を行うシステムである。即興演奏のために楽譜は存在せず、主にジャズを対象とした研究が行われている。テンションパラメータを用いた演奏システム [1] や、ネットワークを用いたセッションシステム [2] の研究が行われている。これに対し、各奏者が楽譜を持ち指揮者との相互対話を通してオーケストラ演奏を行う研究 [3] が行われている。この研究では、ネットワークを介して指揮者が各奏者に対して指示を与え、奏者はその指示に従って演奏を行う。しかし、楽器の配置や他の奏者の演奏といった環境とのインタラクションは考慮されていない。

本研究では、周りの奏者の演奏と指揮者とのインタラクションを通して演奏を練習するシミュレーションを行う。建築の分野における音場シミュレーション [4] のようにホールを設定した場合であっても、各奏者の楽器の配置は考慮されていない。演奏練習のシミュレーションのなかでは、各奏者を空間的に配置し演奏中に奏者の左右の耳に聞こえてくる演奏を構成する。練習の方法として、模範解を与える教師の存在を必要とせず環境とのインタラクションを通して学習が行える強化学習 [5] を用いる。音の順番が正確に与えられた楽譜を見ながら、奏者は学習を通して曲の中で音を出すタイミングを学習する。小人数のアンサンブルがオーケストラの基本となるため、シミュレーションでは弦楽 5 重奏を用いる。

2 音の再構成

対話的な演奏を実現するために、演奏中に奏者の左右の耳に聞こえてくる演奏を再構成する必要がある。各楽器と奏者の空間的な位置関係を考慮した演奏を再構成する。空間的な位置関係を考慮するために、音源と奏者の距離、奏者に対する音源の方向を求める。音源と奏者の距離から音が左右の耳に到着

する時間と音の減衰を計算し、耳の指向性から耳に聞こえてくる音を計算する。各楽器の音の指向性は各楽器ごとに異なり、ある程度正確なデータを必要とするために考慮しない。音源の位置から発せられた音に対して左右の耳に聞こえてくる音の簡易なシミュレーションを行う。音源はすべて指向性のない点音源と考え、音源の形式は wavfile とする。

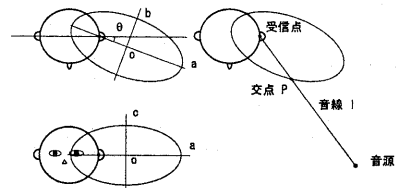


図 1: 耳の指向性

音源と耳の位置関係から距離が求まり、音速を $343.5m/s$ とすると音源から発せられた音が耳に到達する時間が計算される。点音源からの音の減衰が距離の 2 乗に反比例 [4] することから、音源から発せられた音が耳の位置に到達したときの音の減衰率を計算する。耳の指向性を図 1 に示す楕円球を用いて、斜め前方の耳の指向性が最も高いことから簡易にシミュレートする。音源と耳である受信点を結ぶ音線と楕円球との交点を求める。受信点と交点との距離を、その音源方向に対する耳の指向係数 $Q (0 < Q \leq 1)$ とする。

音源から耳へ音が到達するのに要する時間、距離による音の減衰、耳の指向性をすべての楽器位置と左右の耳に対して計算することによって、演奏中に奏者の左右の耳に聞こえてくる演奏を再構成する。

3 演奏の学習

左右の耳に聞こえてくる演奏をもとに奏者が演奏を行うためには、楽譜と指揮情報から楽譜を正確に演奏することが必要になる。音を出す順番が正確に与えられた楽譜を見ながら、演奏における音を出すタイミングを学習する。音を出すタイミングを合わせることは、実際のオーケストラの中で最も基本的なことであり、難しいことである。指揮者はテンポに関する指示を学習者に対して与えるが、直接学習者に対して指示を出すことはしない。学習の流れを

図2に示す。学習者である奏者は、左右の耳に聞こえてくる演奏と指揮情報から行動を選択して演奏を行う。選択した行動は楽譜とともに評価され、学習者へ状態行動に対する報酬が与えられる。学習者が演奏した演奏は、他の奏者の演奏と混ざり全体の演奏として学習者の左右の耳に聞こえてくる。学習者は聞こえてくる演奏と指揮情報から次の行動を選択し、演奏を行う。このように、特定の教師を持たずに良い振舞に対して報酬を与えながら環境とのインタラクションを通して学習する方法は、強化学習 [5] と呼ばれる。

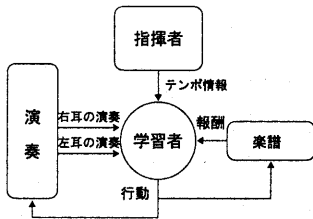


図 2: 学習の流れ

強化学習を行うためには学習の時間ステップの単位と、状態の取り方を決める必要がある。時間ステップの単位は、物理的な時間ではなく演奏における任意の音符の長さとする。左右の耳に聞こえてくる演奏とその時間ステップにおける正確な楽譜位置から状態を決定する。

まず、左右の耳に聞こえてくる演奏を前節で述べた方法によって再構成する。スペクトル分布を求めるためのフーリエ変換を、左右の耳に対して別々に行う。指揮者のテンポ情報をもとに、1ステップ分の音データ数を取り出し変換を行う。wavfile のサンプリング・レートが 44100Hz であるとき、時間ステップの単位を 32 分音符、テンポを 4 分音符を一分間に 120 個演奏できる速度とした場合、1ステップ分のデータ数は 2756 個になる。フーリエ変換のデータ数が 1ステップ分のデータ数に足りない場合には、足りない部分のデータに 0 を入力する。左右の耳に聞こえてくる演奏から、一定以上のスペクトルを持つ音を抽出しスペクトル分布を求める。フーリエ変換後、左右の耳に聞こえてくる演奏のスペクトル分布から、観察する周波数範囲における最大スペクトルを求める。この左右の耳に聞こえてくる演奏の最

大スペクトルの平均から、基準とするスペクトルを求める。次に状態として観察する周波数範囲を任意の数で等分割し、分割した範囲における基準とするスペクトル以上のスペクトルの存在を調べる。これを左右の耳に聞こえてくる演奏に対して調べ、この結果を演奏の状態とする。基準とするスペクトルは、各時間ステップごとにフーリエ変換を求め直すために学習を通して一定ではない。しかし、状態として観察する周波数の範囲とその分割数、最大のスペクトルから基準スペクトルを求める方法は学習を通して一定である。例えば、100Hz から 1900Hz までの範囲を 6 等分し、100Hz から 1900Hz の範囲の中で左右の耳に聞こえてくる演奏の最大スペクトルの平均を $\frac{1}{3}$ 倍したスペクトルを基準スペクトルとする。

各時間ステップにおける楽譜位置は、小節番号とその小節の何ステップ目という情報を与える。32 分音符を時間ステップの単位としたときの例を図 3 に示す。印の付いた音符の楽譜位置は、2 小節目の 10 ステップ目である。このようにして、左右の耳に聞こえてくる演奏と楽譜位置から状態が決定される。



図 3: 楽譜位置

強化学習の方法として Q 学習法 [5] を用いる。Q 学習法のアルゴリズムを以下に示す。

$Q(s, a)$ を任意に初期化する

各エピソードに対して繰り返し：

s を初期化

エピソードの各ステップに対して繰り返し

Q 値から方策 f に従って行動 a を選択する

行動 a を取り、 r, s' を観察する

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha[r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)]$$

$s \leftarrow s'$;

s が終端状態なら繰り返しを終了

$Q(s, a)$ は、状態 s のときに a の行動を選択する価値であり、 α, γ は学習パラメータである。行動を選



図 4: 音データの形式

択するための方策 f として, 式 (1) に示すような Q 値に基づくボルツマン (Boltzmann) 分布を用いた方法により確率的に行動を選択する.

$$B(a|b) = \frac{\exp \frac{Q(s,a)}{T}}{\sum_{b \in A} \exp \frac{Q(s,b)}{T}} \quad (1)$$

実行し得る行動の集合を A とするとき, $B(a|b)$ は状態 s で行動 a を選択する価値であり, T は温度定数である. T が大きいほど行動をランダムに選択し, 逆に T が 0 に近づくほどランダムに選択せずに Q 値に基づいた行動を選択する.

一回の演奏は学習者が自分の楽譜をすべて演奏し終えるか, 学習する曲の範囲が終了したときに学習が終了する. 音を出すタイミングを学習するために, 学習者が選択する行動は, 現在の音をのばすか, 次の音に移るかの 2 通りとする. 次の音に移るという行動を選択した場合には, 楽譜の音データの中から次の音を読み込む. 音データの形式は図 4 に示す形式をとる. アルファベットは音の高さを示し, '+' は 1 オクターブ上の音であることを示している. 0 は休符を表している. 学習者が選択した行動は楽譜をもとに評価され, 各ステップごとに状態行動に対する報酬を学習者へ与える. 報酬は間違った行動を選択した場合には -1, 正しい行動を選択した場合には 0 とする. また, 演奏の終了の時刻と同時に学習者が演奏を終えられたときには +1 の報酬を与える. この行動評価は, 各時間ステップにおいて学習者が選択した行動のみを評価の対象としている. 本研究では, 音の高さは評価せず音を出すタイミングだけを評価している. 楽器別にサンプルされた音を wavfile 形式でライブラリとして保管し, 行動選択により決まる音をライブラリから選び音源として用いる.

本研究における演奏の学習のアルゴリズムを以下に述べる.

(1) 学習者と学習におけるすべてのパラメータ, 状

態の観察方法を決定する.

- (2) Q 値を任意に初期化する.
- (3) 学習者は楽譜から最初の音を読み込み, 指揮のテンポ情報をもとに 1 ステップ分の左右の耳に聞こえてくる自分の音を含んだ演奏を構成する.
- (4) 構成された音と楽譜位置から状態を決定する.
- (5) 状態から方策 f を用いて行動を選択する.
- (6) 選択した行動と楽譜から報酬を決定する.
- (7) 報酬を用いて Q 値の更新を行う.
- (8) 選択した行動から次ステップの演奏を行い, 次ステップでの演奏を構成する.
- (9) 構成された音と楽譜位置から次ステップでの状態を決定する.
- (10) (5)~(9) を 1 回の演奏が終了するまで繰り返す.
- (11) (3)~(10) を Q 値が収束するまで繰り返す.

4 オーケストラ演奏のシミュレーション

シミュレーションでは, 耳の指向係数を計算するための楕円球は比率を (3 : 2 : 2) とし, 楕円の中心 O から受信点までの距離を楕円球の長径の $\frac{1}{2}$, 受信点の z 軸を中心に 30 度回転させた楕円球を用いて計算を行う. 耳の指向性を図 1 に示す楕円球を用いて, 斜め前方の耳の指向性が最も高いことから簡易にシミュレートする. シミュレーションで行ったすべての学習におけるすべての s, a に対して, $Q(s, a) = 0$ と初期化する. s は学習における状態, a は行動である.

楽曲として, モーツァルト作曲弦楽セレナーデ第 13 番ト長調 K.525 『アイネ・クライネ・ナハトムジーク』[6] の 1 楽章を用いる. 編成は弦楽 5 重奏である. 小人数のアンサンブルがオーケストラを演奏する上での基本となるため, シミュレーションでは弦楽 5 重奏を用いる. 学習する楽譜の範囲は 5 小節とする. 学習で使用する冒頭の 5 小節の楽譜を図 5 に示す. 各奏者の配置は図 6 に示すように, 客席側から見て左から 1st Violin, 2nd Violin, Viola, Violoncello, Contrabass を配置する. 楽器の配置に決まった形は無いため, ここではより一般的と思われる楽器配置を用いる.



図 5: モーツァルト作曲:弦楽セレナーデ第 13 番『アイネ・クライネ・ナハトムジーク』1 楽章

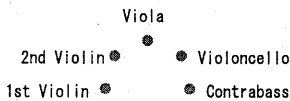


図 6: 奏者の配置

まず始めに, 図 7 に 1st Violin 奏者 1 人を学習者として 500 回の学習を行ったときの結果を示す. $\alpha = 0.1$, $\gamma = 1.0$ を学習パラメータとする. 方策 f における温度定数 T を 0.3 とし 125 回の演奏を終えるごとに $\frac{1}{2}$ 倍とする. 学習パラメータは経験的に学習が収束できる値を選んで学習を行う. 時間ステップの単位は 32 分音符とする. テンポを, 1 分間に 132 個演奏できる速度とする. wavfile のサンプリング・レートに 44100Hz 用いているため, テンポが 132 のとき 1 ステップ分の音のデータ数は 2544 個, フーリエ変換のデータ数は 4096 個である. 音のデータ数がフーリエ変換のデータ数に足りないため, 足りない部分のデータには 0 を入力する. 100Hz から 1900Hz の周波数範囲を 6 等分し, 各時間ステップごとに最大スペクトルの $\frac{1}{3}$ を基準スペクトルとして状態を決定する. 状態を決定するために観察する周波数範囲は, 人間が楽器の主音として認識している範囲を簡単にとらえている. グラフは, 各演奏ごとの時間ステップ数と報酬の合計を表している. 時間ステップ数は 5 小節をすべて演奏できたことを示す 160 に収束し, 報酬の合計は +1 に収束している. 各時間ステップごとに前節で述べた評価の方法により報酬が与えられる. 演奏が終了するまでに行動選択を誤らなければマイナスの報酬は受け取らない. 学習する楽譜の範囲の終了の時刻と同時に学習者が演奏を終えられたときには +1 の報酬を受け取るため, 楽譜を全て正確に演奏することができたときの 1 回の演奏

における報酬の合計は +1 となる. 学習者が行った演奏を楽譜に書き直したものを図 8 に示す. 学習の初期段階では原曲とかけはなれた演奏を行い, 5 小節の学習範囲を最後まで演奏できていない. 学習を重ねることで演奏できる範囲が長くなり, 正確な演奏へ近付いていることが確認できる.

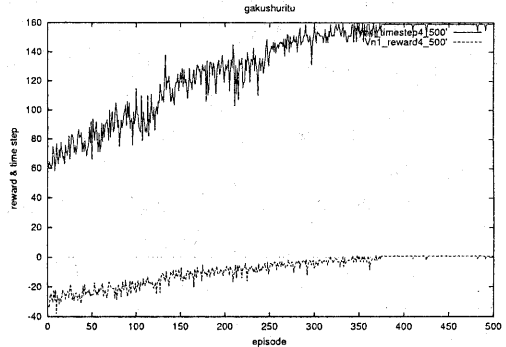


図 7: 学習者を 1 人として状態を 6 分割したときの学習の結果



図 8: 100 回, 200 回, 300 回, 400 回目に学習者が行った演奏を楽譜化した結果

次に 5 人全員を学習者として, 600 回の学習を行った時の 1st Violin 奏者の結果を示す. 図 9 は 100Hz から 1900Hz の周波数範囲を 6 等分して状態を求めたときの結果, 図 10 は同じ周波数範囲を 3 等分して状態を求めたときの結果であり, 各場合における各演奏ごとの時間ステップ数と報酬の合計を表している. どちらも各時間ステップごとに最大のスペクトルの $\frac{1}{3}$ を基準スペクトルとして状態を決定する. 学

習パラメータを $\alpha = 0.5$, $\gamma = 1.0$, 方策 f における温度定数 T を0.3とし, 150回の演奏を終えるごとに $\frac{1}{2}$ 倍とする。時間ステップの単位は32分音符, テンポ情報は図7のシミュレーションと同じである。図9と図10からわかるように, 状態の種類を少なくとった方が演奏の変化に対する状態の変化が少なくなるために, 速く学習を終えている。正確な楽譜位置を状態としているため, 演奏の状態の種類が少い場合でも状態を区別して学習を行うことができる。しかし, 状態の観察方法を粗くすればするほど耳に聞こえてくる演奏ではなく楽譜位置に依存した行動選択を行い, 他の奏者の演奏といった環境とのインタラクションは少なくなる。

これらの結果から, 学習者の人数を変更した場合や状態の取り方を変えた場合においても, 左右の耳に聞こえてくる演奏をもとに楽譜と指揮情報から正確な演奏の練習がシミュレーションされている。

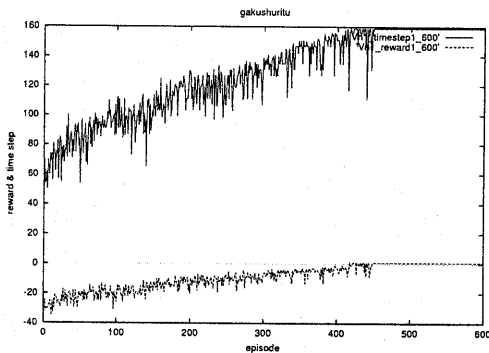


図9: 学習者を全員として状態を6分割したときの学習結果

5 おわりに

シミュレーションの結果, 学習者は左右の耳に聞こえてくる演奏をもとに, 楽譜と指揮情報から楽譜を正確に演奏を行うことができるようになった。学習者が一人の場合に限らず全員が同時に学習を行った場合でも, 全員が楽譜を正確に演奏することができるようになる。このシミュレーションでは曲の途中におけるテンポの変化にも柔軟に対応して学習を行うことができる。

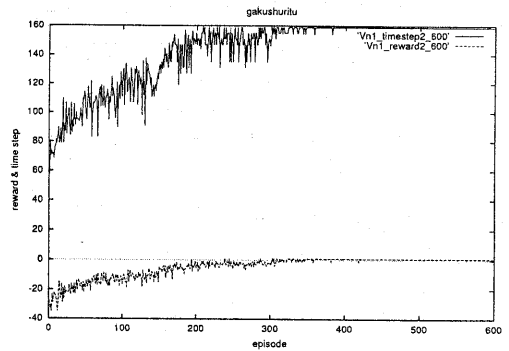


図10: 学習者を全員として状態を3分割したときの学習結果

各奏者の空間的な位置関係を考慮して奏者が演奏中に左右の耳に聞こえて来る演奏を再構成し, 奏者は耳に聞こえてくる演奏と指揮情報から, 練習を通して楽譜を正確に演奏することを学ぶことができた。

参考文献

- [1] 青野 裕司, 片寄 晴弘, 才脇 直樹, 井口 征士: テンションパラメータを用いた協調型演奏システム -JASPER-, 情報処理学会論文誌 Vol. 35 No. 7 pp. 1469-1481, 1994
- [2] 後藤 真孝, 日高 伊佐夫, 松本 英明, 黒田 洋介, 村岡 洋一: 仮想ジャズセッションシステム VirJa Session, 情報処理学会論文誌 Vol. 40 No. 4 pp. 1910-1921, 1999
- [3] 三輪 明宏, 守田 了: 指揮者と奏者の相互対話に基づく仮想演奏空間, 信学技報 MVE96-93, 1997
- [4] 前川 純一: 建築・環境音響学, 共立出版, 1990
- [5] R. S. Sutton, A. G. Barto: Reinforcement Learning, Mit Press, 1998
- [6] MOZART: SERENADE No. 13 K. 525, 音楽之友社, 1952