

2020年度 卒業論文

リズムゲームのリアルタイム評価を用いた  
管楽器の演奏練習支援システムに関する研究

指導教員：渡辺 大地 教授

メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト

学籍番号 M0117206

永藺 朋弥

2021年2月

**2020年度 卒業論文概要**

論文題目

リズムゲームのリアルタイム評価を用いた  
管楽器の演奏練習支援システムに関する研究

メディア学部

学籍番号：M0117206

氏名

永菌 朋弥

指導  
教員

渡辺 大地 教授

キーワード

管楽器、個人練習、リズムゲーム、練習支援

日本において、楽器演奏者や演奏団体の数は年々増加傾向にある。楽器の演奏練習において、複数人で1つの楽曲を演奏する際には他の演奏者とパート練習や合奏を頻繁に行い、互いの音を調整することで楽曲の完成度を高めることが重要である。しかし、中学校や高等学校の部活動時間の短縮や情勢の変化により、1ヶ所に集合して練習を長時間行うことの難易度が上昇した。そのため、集合することなく行うことが可能である個人練習を行うことの重要性が増した。そこで、本研究では管楽器を対象としてリズムゲームの構造を基に任意の楽曲を読み込み、ピッチとタイミングをリアルタイムに視覚化することで個人練習の効果を向上することが可能である演奏練習支援システムを提案した。マイクから取得した音声の周波数スペクトルを用いて入力音のピッチを推定し、その結果を MusicXML 形式で取り込んだ譜面の内容と比較することで演奏の評価を音符ごとに行い、結果を可視化する。本研究では、被験者2名を対象に提案手法を基に開発したアプリケーションを使用した場合と使用しない場合の判定結果を用いて比較実験を行った。その結果、提案手法は従来の練習と比較してより演奏の精度が向上した。

# 目次

<b>第 1 章 序章</b>	<b>1</b>
1.1 目的 . . . . .	1
1.2 論文構成 . . . . .	5
<b>第 2 章 提案手法</b>	<b>6</b>
2.1 提案手法 . . . . .	6
2.2 実行前の事前パラメータ設定 . . . . .	7
2.3 譜面の表示 . . . . .	7
2.3.1 使用する譜面の読み込み . . . . .	8
2.3.2 譜面の描画 . . . . .	8
2.3.3 現在の演奏位置の表示 . . . . .	9
2.4 入力音の認識 . . . . .	10
2.4.1 認識処理 . . . . .	10
2.5 ピッチギャップの算出 . . . . .	10
2.5.1 ノートナンバーと周波数の比較手法 . . . . .	11
2.5.2 倍音の影響とその対処 . . . . .	11
2.5.3 ピッチギャップの算出 . . . . .	12
2.6 音高の可視化 . . . . .	12
2.7 ピッチスコアの算出 . . . . .	13
2.8 タイミングスコアの計測 . . . . .	13
2.9 評価の表示 . . . . .	14
<b>第 3 章 実験</b>	<b>15</b>
3.1 実験前準備 . . . . .	15
3.1.1 実験前準備：実験者 . . . . .	15
3.1.2 実験前準備：被験者 . . . . .	16

3.2	実験 . . . . .	16
3.3	分析方法 . . . . .	17
3.4	実験結果 . . . . .	17
<b>第4章</b>	<b>考察と総括</b>	<b>20</b>
4.1	考察 . . . . .	20
4.1.1	休符のピッチスコアの傾向 . . . . .	20
4.2	実験時の影響 . . . . .	20
4.2.1	提案手法を使用できない環境 . . . . .	20
4.2.2	実験を行った時期の時勢 . . . . .	21
4.3	まとめ . . . . .	21
	<b>謝辞</b>	<b>23</b>
	<b>参考文献</b>	<b>24</b>

# 目 次

2.1	譜面のスクロール前とスクロール後の位置 . . . . .	9
2.2	提案システムの譜面の表示部分 . . . . .	10
2.3	提案システムの音高の可視化表示部分 . . . . .	13
3.1	実験で使用する譜面 . . . . .	16

# 表 目 次

3.1	被験者 A の練習前後の判定ログ . . . . .	18
3.2	被験者 B の練習前後の判定ログ . . . . .	19

# 第 1 章

## 序章

本章では、本論文における研究の問題提起、並びに本論文の構成について述べる。

### 1.1 目的

日本において、楽器演奏者および彼らが所属する演奏団体は近年増加している。

オーケストラやジャズバンド等の演奏団体の種類の中から吹奏楽を例に、現在の演奏者の人口について述べる。一般社団法人 全日本吹奏楽連盟が 2019 年 7 月に発行した会報 [1] によると、2018 年度時点の連盟への加盟団体数は 14,134 団体である。1 団体に所属する人数を全日本吹奏楽コンクール一般部門の参加上限人数の 65 人の半数である 32 人と仮定した場合、日本国内における吹奏楽団体へ所属する者の数は 452,288 人となる。この値は総務省統計局 [2] が 2019 年に発表した兵庫県尼崎市の人口 452,563 人と近似している。

コンクールへの参加や演奏会の開催、仲間内におけるセッションやソロ演奏を行う際には、殆どの場合において練習が必要である。集団で行う合奏の場合、他の奏者と音程を合わせなければ互いの奏した音が干渉し、不協和音の原因となる。そのため、演奏者はパート練習や合奏を多く行うことで互いの音を確認し、より良いハーモニーを作成することを目指す。

しかし、2018 年に文化庁 [3] は「文化部活動の在り方に関する総合的なガイドライン」を策定

し、学校における練習に週2回の休養日や練習時間の短縮などの処置を推奨した。それによって、策定以前より練習や指導に使える時間が減少した。さらに2020年3月からは新型コロナウイルスの流行に対する感染防止策として、東京都は企業や団体に密集、密接、密閉の解消を要請した。これにより、1つの大部屋に大勢が集まり長時間激しい呼吸を行う必要がある合奏やパート練習を行うことが困難となった。この問題は、楽器の発音原理上マスクを外す必要がある管楽器に顕著に現れる。以上より必然的に、演奏者が集まることなく行える個人練習による演奏の習熟の重要性が向上した。

田戸 [4] は『パワーアップ吹奏楽! 練習計画の立て方』にて、個人練習について、楽器の基本的な奏法の確認練習と基礎練習を繰り返してきちんと楽器の音を出せるようにし、パート練習にて曲の演奏を他の奏者と合わせることができるようにする練習としている。また、緒方 [5] は「楽譜の譜読み、技術的な練習」(2012、p20)と述べている。譜読みの定義について、ピアノガイドである北條 [6] は「初めて弾く曲の楽譜を見て、書かれている音符を正確なリズムやある程度の表情を付けながらひとつおとり流して弾けるようにする作業のこと」としている。この内容はピアノの定義について書かれたものであるが、同じ楽器である管楽器全般にも適用できる。技術的な練習の目的は、あらゆる状況において指揮者の指示通りに演奏を行うためである。以上より個人練習の目標は、パート練習を行うために楽譜を一通り正確に演奏できる状態になることであるといえる。

個人練習の目標を達成するためには、楽曲によって異なる楽譜上に記された音にピッチとタイミングを正確に合わせて演奏を行う必要がある。ピッチの調整は音叉やハーモニーディレクター、チューニングメーター（以降、「チューナー」）等の道具で基準の音を視聴覚で確認し、それに合わせて楽器の管や演奏方法を調整する。一般的にはハーモニーディレクターと比べて安価であり、音叉より幅広い音に対応できるチューナーを用いて調整を行うことが多い。タイミングの調整は、ハーモニーディレクターやメトロノーム等の道具を用いて一定のテンポで音を鳴らし、その音に合わせて演奏を行うことでズレを修正する。一般的には、ハーモニーディレクターと比べて安価

であるメトロノームを用いて調整を行うことが多い。

以上の2つの調整には、チューナーとメトロノームという2つの道具の用意が必要である。また、チューナーはあくまでもその時点で鳴っている音に対してのズレを表示するものであり、フルート等の木管楽器の譜面によく現れるトリル等の音の切り替わりが早い部分に関しては演奏を行いながらの確認は難しい。この2つの道具を個人でも手軽に扱える規模で統合し、演奏時のピッチとタイミングのズレを記録し続けながら可視化を行うことで、個人練習中にズレを確認する手間を削減し従来に比べて時間当たりの練習効果を向上できるのではないかと考えた。

尾崎ら [7] は鍵盤楽器の習熟にゲーム的要素を取り入れたシステムを開発し、習熟に有効であるという結論を出した。この実験は楽器未経験者、五線譜を読めない被験者への習熟度向上を意図したものであり、入力に成功すると次の音符に入力位置が移動するという処理を行っている。そのため、楽譜に並ぶ音符の音高確認に用いることは可能だが楽曲の通し練習には向かないものであった。手塚ら [8] はリコーダーの演奏技能の習得支援を目標に、初学者向けに楽曲に合わせて運指を表示するソフトウェアを開発した。このソフトウェアの表示形式は、判定の基準となる線に向かって音符が移動する形式である。この形式は、目線の動きが実際の演奏時と異なるため演奏時の状況の再現性が低い。森下ら [9] はピッチ練習やロングトーン練習等の基礎練習に着目し、ロングトーン練習を対象としてリアルタイムに音程の確認、表示を行い評価をサーバに記録するシステムを開発した。福田ら [10] は MIDI ピアノと MusicXML 形式の譜面を用いて、譜面の複雑な部分に対して表記上の簡略化とそれによって除去された音符の発音を行うシステムを開発した。安井ら [11] はドラムの基礎演奏に対して打叩時刻、欠落音、打叩強度の3点を視覚化し、基礎演奏練習の支援を行うシステムを開発した。澤ら [12] はウッドベースの実時間運指検出システムの設計および開発を行い、その派生として運指をカメラで撮影し運指ミスを検出するアプリケーションを開発した。この方式は手や指のポジションによって鳴る音高が一意に定まる楽器に対して有効である。

尾崎ら、福田らは鍵盤楽器を、安井らは打楽器であるドラムを、澤らは弦楽器であるウッドベースをそれぞれ対象にし、練習を支援するシステムの開発を行った。以上4種の研究は管楽器を対象に行ったものではないため、管楽器の練習支援の手法は述べていない。手塚ら、森下らは管楽器を対象として練習支援システムを開発したが、どちらも運指の確認やロングトーン練習など基礎技術の向上をねらったものである。そのため、楽曲によって内容に変動が起こる実際の譜面を用いた演奏練習を行うことを想定していない。以上より、管楽器を対象とした任意の譜面を用いた演奏練習の支援を対象とした研究は過去に存在しない。

ピッチとタイミングのズレを客観的に評価するためには、正確なピッチとタイミングと演奏した音のピッチとタイミングを比較して評価を行う仕組みが必要である。本研究では、リズムアクションゲームの仕組みを使用した。福永ら [13] はリズムアクションゲームについて、楽曲のリズムに合わせた「譜面」と呼ばれる視覚的な記号に沿ってプレイヤーが操作を行い、その正確さによって得点が記録されるゲームと定義している。便宜上、以降リズムアクションゲームを「リズムゲーム」と表記する。

本研究の目的は、使用者の演奏に対してリズムゲームの評価システムを基に正確な音からのピッチ、タイミングのズレをスコアとして表示する演奏の評価機能を持ち、使用者が選択した任意の譜面を対象に評価機能を使用できる管楽器を対象とした演奏練習支援システムの提案である。

提案手法は、マイクから取り込んだ音声の周波数スペクトルを用いて入力音のピッチを推定し、その結果を MusicXML 形式で事前に取り込んだ譜面の内容と比較することで演奏を評価するといったものである。本研究では、提案手法を基に開発したアプリケーションを使用して練習を行った場合と使用せずに従来の練習を行った場合の判定結果を用いて比較実験を行った。その結果、提案手法を用いた練習は従来の練習と比較してより演奏の精度の向上につながった。

## 1.2 論文構成

本論文は、全 4 章で構成する。第 2 章では、問題を解決するための提案手法について述べる。第 3 章では、提案手法の効果を図るための評価実験の内容およびその結果について述べる。第 4 章では評価実験の結果から得た考察と、総括を述べる。

# 第 2 章

## 提案手法

### 2.1 提案手法

1 章で述べた通り、現在の吹奏楽の個人練習ではピッチと発音タイミングのズレを客観的かつ定量的に確認することは難しい。本研究ではその 2 つのズレの確認を客観的かつ定量的に行うことを可能にするため、PC のマイク機能を用いてピッチと発音タイミングを識別する練習支援システムを提案し、開発を行った。このシステムには以下の 6 つの機能がある。

1. 譜面の表示
2. 入力音の認識
3. 音高の視覚化
4. ピッチの正確さを示す値（以降、「ピッチスコア」）の算出
5. タイミングの正確さを示す値（以降、「タイミングスコア」）の算出
6. 各音符の評価値の表示

各機能の説明については以降の節で解説を行う。

## 2.2 実行前の事前パラメータ設定

システムの実行前に、使用者の周囲の環境に合わせたパラメータを入力する必要がある。必要なパラメータは以下の4種である。

- 使用者が用いる楽器の種類
- 練習対象の譜面
- 環境音除去フィルタの閾値
- マイクを介することによる入力遅延の量

環境音除去フィルタとは、マイクからの入力音から環境音を除去するために周波数スペクトルを通すハイパスフィルタのことを指す。各種パラメータは、使用者が事前に手動で入力を行う。楽器の種類は、予め組み込まれている選択肢から使用する楽器名を選択することによって入力する。練習対象の譜面については、2.3.1 節にて解説を行う。環境音除去フィルタの閾値は、使用者がフィルタの強度をスライダー状の UI で調節する。この際、実際に楽器から音を出すことで認識状況を確認することができる。入力遅延の量は 0.1 秒単位で調節を行い、その遅延量で実際に演奏を行うことでズレを可視化するという流れを繰り返し、適切な値であるかを調整する。

## 2.3 譜面の表示

譜面の表示機能は、使用する譜面の読み込み、譜面の描画、現在の演奏位置の表示の3つによって成り立つ。

### 2.3.1 使用する譜面の読み込み

本システムは MusicXML 形式で書き出された楽譜から音符の音高、拍子、テンポを読み込み使用した。

MusicXML とは Good[14] が設計した、インターネット上への音楽の出版に対応するために XML の書式に基づいて一般的な西洋音楽の楽譜の記述を表すための形式である。MakeMusic 社 [15] によると、本論文の執筆時点で Finale や Cubase、MuseScore 等 250 を超える数の DTM ソフトウェア、楽譜作成ソフトウェアが MusicXML 形式をサポートしている。また、スコアメーカー [16] 等の PDF 形式の楽譜の読み込みと MusicXML をサポートしているソフトウェアを用いることで、紙に印刷された楽譜を MusicXML に変換することが可能になる。

### 2.3.2 譜面の描画

演奏画面への遷移直後に、選択した譜面の内容を 4 小節ごとに生成し、横方向の座標を一致させて縦に並べる。この際、選択した楽器と譜面によっては音符の位置が五線の範囲を超え、上の行の五線より下に表示された音符と下の行の五線より上に表示された音符が重なって表示されて可視性が失われることを想定した。その防止のために、五線の上下にそれぞれ五線と同じ幅の余白をマージンとして確保する。

実際の譜面は演奏する譜面の内容の表記が紙面上に全て存在する。しかし、画面上に譜面を表記する場合はディスプレイのサイズや解像度によって同時に表示できる譜面の最大量が変動する。表示される譜面の量が減少した場合、演奏者が画面にまだ表示がない音符の予測を立てることが困難になる。そのため、画面上に表示する譜面を 2 行までとし演奏位置が終端を過ぎた時点でスクロール動作により次の譜面を表示する形式とした。

演奏画面に実際に表示される譜面の範囲は、現在の演奏位置を含む行とその次の行の 2 行であ

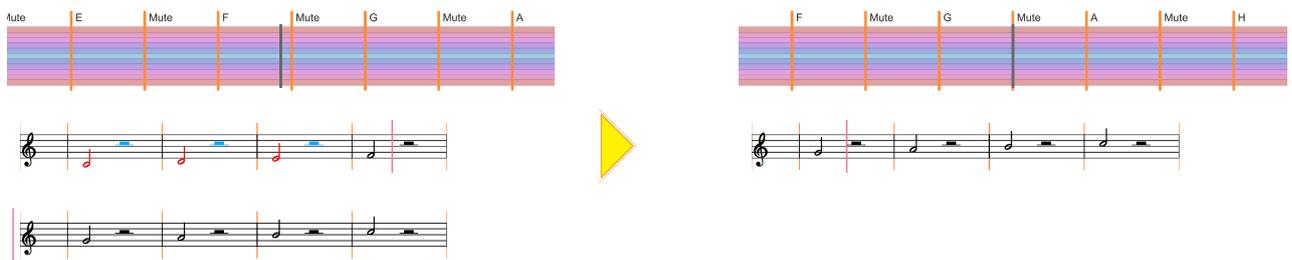


図 2.1 譜面のスクロール前とスクロール後の位置

る。この 2 行を、演奏画面の底部から  $\frac{2}{3}$  程度の領域に表示する。現在の演奏位置が上の行の表示対象である小節の範囲を超えた時点で、生成した譜面全体を下の譜面の位置が上の譜面の位置まで移動する分の距離を線形にスクロールする。図 2.1 にスクロール前後の譜面の様子を示す。

### 2.3.3 現在の演奏位置の表示

奏者の視線移動の流れが実際の譜面使用時とシステム使用時で異なる場合、練習時の感覚で実際の譜面の演奏を行う際に齟齬が生じる。その齟齬を極力低減するため、DJMAX TECHNIKA や Cytus α [17] 等のリズムゲームが実装している静止しているノートに判定ラインが近づいていく表現技法を採用した。また、2.3.2 節で述べた譜面表記の量の関係上、現在演奏中の行のみに判定ラインを表示すると演奏位置が次の行に移動した時点で判定ラインの位置が瞬間的に移動し、

例として上の行の判定ラインが上の行の終端小節の 8 割部分に表示している場合、同時に下の行の判定ラインは始端小節の開始線から 2 割分左の位置に表示する。

2.3.2 節と 2.3.3 節を踏まえて、本実験で使用するアプリケーションに実装した譜面の表示部分を図 2.2 に表す。図 2.2 に含まれているオレンジの線が 2.3.3 節で記述した判定ラインである。音符の色の変化については、2.9 節にて後述する。

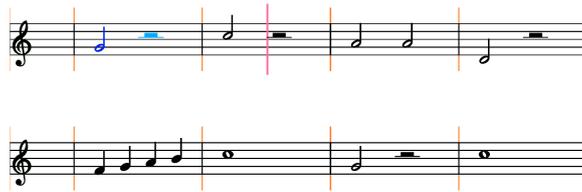


図 2.2 提案システムの譜面の表示部分

## 2.4 入力音の認識

入力音の認識機能は、マイクから取得した楽器音を周波数スペクトルに変換し、システムで利用する入力周波数（以降、「入力周波数」）を抽出するものである。入力の際に行う処理は、以下の流れである。

### 2.4.1 認識処理

UnityEngine.Microphone[18] を用いて、入力音声の周波数スペクトルを取得する。次に、周波数スペクトルの各成分を環境音除去フィルタに通し、強さがフィルタの閾値以下である成分を検索対象から除外する。除外した結果から成分が強い順に入力周波数  $I\{I_0, I_1, I_2, \dots\}$  とする。ただし、 $I$  は最大で 3 つとする。

## 2.5 ピッチギャップの算出

2.6 節、2.7 節では、双方で目標音が表示する周波数と入力周波数の差を使用する。この差の呼び方を本論文ではピッチギャップと定め、この節に算出方法を記述する。

### 2.5.1 ノートナンバーと周波数の比較手法

Yang ら [19] が示すノートナンバーから周波数への変換公式を用いてノートナンバーを周波数に変換することで、入力周波数とノートナンバーが示す周波数の差を算出することができる。

(2.1) 式はノートナンバーを引数に持ち周波数を求める関数  $f(x)$  の定義である。

$$f(x) = 440 \cdot 2^{\frac{x-69}{12}}. \quad (2.1)$$

### 2.5.2 倍音の影響とその対処

『楽典 理論と実習』[20]によると、倍音とは、弦楽器や管楽器を用いてある周波数の音（基音）を発生した際に付随して発生する、その周波数の整数倍の周波数が示す音のことである。例として、100Hz の音を発生した際には付随して、200Hz、300Hz……といった倍音が発生する。加藤ら [21] の研究にて提示があるフルートの倍音構造を見ると等間隔で強いスペクトルを確認することができる。高橋ら [22] の研究によると、楽器の種類によってその倍音構造は異なり、周波数スペクトルの波形も合わせて変化する。

倍音の影響によって周波数スペクトルの強さの順序が入れ替わり実際に入力された音と検出結果の音の認識がオクターブ単位でズレることがある。そのため、楽器音から基音を推定する際はノイズとなる倍音の成分を除去する必要がある。斎藤ら [23] は DSP を用いることでくし形フィルタによる音階推定にリアルタイム性を持たせた。しかし、DSP を用いるという条件がある以上使用する機材への依存性が高まるため、本研究では別の手法を用いた。

本研究での対処法は、目標音のノートナンバー  $T$  に 12 の整数倍を加算した値の集合  $O$  の内、最も入力周波数に近い値を入力周波数に最も近いオクターブの目標音（以降、「至近目標音」として以降の比較に用いる、というものである。副作用として、ノートナンバー 60 と 72 のような

オクターブ違いの音を同じ音として認識してしまうため、低いドと高いドのようなオクターブが違う同じ音への変化に対応を行うことができない。

### 2.5.3 ピッチギャップの算出

$I$  の要素ごとに  $G_i$  を求め、 $G_i$  の集合  $G$  からピッチギャップ  $D$  を算出する。 $G_i$ 、 $D$  の算出に用いる計算式を (2.2) 式に示す。

$$\begin{aligned} G_i &= I_i - f(O_{\arg\min_j |I_i - f(O_j)|}), \\ D &= G_{\arg\min_k |G_k|}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

## 2.6 音高の可視化

音高の可視化機能は、入力音と目標音のピッチの差の量を可視化して表示する機能である。

画面内に上下左右の表示領域が線対称のグラフとして表示し、縦軸の値は 2.5 節にて算出したピッチギャップ  $D$ 、横軸の値は演奏開始からの経過時間である。縦軸の表示領域の上限が指す周波数  $U$  は (2.3) 式で、下限が指す周波数  $L$  は (2.4) 式で算出可能である。中央の基準値は縦軸が  $D = 0$ 、横軸が現在の経過時間である。 $U$ 、 $L$ 、 $D$ 、グラフの表示領域の高さ  $H$  から実際に線が描かれる位置  $P$  を (2.5) 式で算出する。なお、入力音がない場合はグラフ上の線が途切れる。また、目標音が休符の場合は音を認識している間、線の描画位置をグラフの下限の位置に固定している。

ピッチギャップを位置として表示する関係上、目標音が時間経過により変化するとグラフの基準も変化する。

$$U = \frac{f(T+1) + f(T)}{2}. \quad (2.3)$$

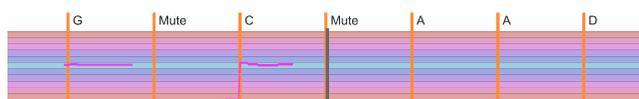


図 2.3 提案システムの音高の可視化表示部分

$$L = \frac{3f(T) - f(T-1)}{2}. \quad (2.4)$$

$$P = \begin{cases} \frac{DH}{U-2f(T)} & (D > 0). \\ \frac{DH}{L-2f(T)} & (D \leq 0). \end{cases} \quad (2.5)$$

図 2.3 は、実際のアプリケーションにて行っている表示部分である。

## 2.7 ピッチスコアの算出

ピッチスコアは 0 から 5 の整数で表し、0 に近いほど目標音の周波数と入力周波数の差が小さいことを示す。ピッチスコアは、以下の処理を用いて求める。

演奏中、1/60 秒が経過する度にその時点の  $D$  を算出し、(2.6) 式を用いて  $R$  を算出する。

$$R = \begin{cases} D \times \left\lfloor \frac{6}{f(T+1)-f(T)} \right\rfloor & (D > 0) \\ D \times \left\lceil \frac{6}{f(T-1)-f(T)} \right\rceil & (D \leq 0) \end{cases} \quad (2.6)$$

目標音の開始時間から次の目標音の開始時間までを目標音の判定区間とし、その間に算出した全ての  $R$  の平均値の小数点以下を切り捨てた値を目標音のピッチスコアとした。

## 2.8 タイミングスコアの計測

タイミングスコアは「Good」、「Miss」の 2 段階で表す。入力周波数が示すノートナンバーと前フレームの入力周波数が示すノートナンバーが一致しないフレームで音が変わったと判断し、そ

のフレーム時点の経過時間と音符の開始時間を比較して差が許容時間以下であればその音符のタイミングスコアを「Good」とし、一定時間内に変化が無ければ「Miss」とする。本実験では、許容時間を音符の開始時間  $\pm 0.2$  秒とした。

## 2.9 評価の表示

2.7 節で確定したピッチスコアを音符の色を変化させることで表現し可視化する。ピッチスコア  $V$  と用いる色相の範囲を指定する変数  $B$  を用いて 2.7 式から色相  $H$  を算出し、事前に固定値を入力した彩度  $S$ 、明度  $V$  と合わせて音符の色とする。本実験では  $B = 200, S = 30, V = 89$  とした。

$$H = B + V \cdot \frac{360 - B}{5}. \quad (2.7)$$

タイミングの可視化は、2.6 節の機能で十分対応出来ていると判断したため追加しない。

図 2.2 は、可視化処理後の音符を含んだ図である。第 1 小節 1 音目の  $V$  が 2 であったため、2.7 式より  $H = 264$  となり、音符の色の値は  $HSV = (264, 30, 89)$  となる。

## 第 3 章

# 実験

### 3.1 実験前準備

#### 3.1.1 実験前準備：実験者

実験者は事前に 2 章をもとに実験用アプリケーションを用意し、以下の 2 つの準備を行う。本実験で用いるアプリケーションの作成に当たって、Unity を使用した。

- 実験で演奏する譜面（以降、「テスト譜面」）を MusicXML 形式で用意する。
- 実験協力者が使用する楽器の基音、調をデータセットへ入力する。

テスト譜面の内容を、図 3.1 に示す。テスト譜面のテンポは 4 分音符=120、拍は  $\frac{4}{4}$ 、8 小節である。1 小節目から 4 小節目、7 小節目以降は 2 分を最小単位として構成し、5 小節目から 6 小節目にかけては使用する楽器の基音 +5 から 4 分ごとに楽譜上の表記で 1 音ずつ上昇する構成としている。テスト譜面で用いる最低音は基音 +2、最高音は基音 +12 である。

また、後述する被験者を A、B の 2 グループに分ける。



図 3.1 実験で使用する譜面

### 3.1.2 実験前準備：被験者

被験者は実験開始前に、使用する楽器でのウォーミングアップを済ませて平常時と同一の演奏が行える状態にする。また、テスト譜面を閲覧して演奏する内容を認識する。テスト譜面の閲覧を開始してから実験の開始まで、実際に楽器を用いての演奏練習は行わない。その次に、実験用アプリケーションに含まれるフィルタ機能とタイミング調整機能で実験を行う環境に合わせてキャリブレーションを行い、実験に入る。

## 3.2 実験

実験は以下の流れで進む。

1. 練習前評価記録
2. 練習
3. 練習後評価記録

被験者は始めに実験用アプリケーションを用いてテスト譜面を 1 回演奏する。この際、実験用アプリケーションは演奏中の各音符のピッチスコアとタイミングスコアを全て時系列順に記録する。

次に、テスト譜面の演奏を 5 分間練習する。この際、A グループは実験用アプリケーションを用いて可視化された評価を確認しながら行い、B グループは従来通りメトロノームとチューナー

を用いて練習を行う。

その後、実験用アプリケーションを用いてテスト譜面を 1 回演奏し、記録データを実験者が用意したフォームに送信して終了となる。

### 3.3 分析方法

被験者 1 人の練習前評価と練習後評価に対し、ピッチ評価とタイミング評価に対してそれぞれ以下の操作を行う。

- ピッチ評価：全音符のピッチ評価値の平均値  $E$  を算出する。
- タイミング評価：Good を 0、Miss を 1 と変換し、全タイミング評価の平均値  $F$  を算出する。

被験者全員の練習前評価と練習後評価の  $E$ 、 $F$  をそれぞれ比較し、練習前の値より練習後の値が小さければ効果があったとみなす。グループ内の人数に対するグループ内の効果があった人数の割合が A グループの方が B グループより大きい場合、提案手法に効果があったといえる。

### 3.4 実験結果

被験者 A の各音符の評価スコアを表 3.1 に示す。被験者 A は A グループに属し、ホルンを用いて本実験を行った。被験者 B の各音符の評価スコアを表 3.2 に示す。被験者 B は B グループに属し、トロンボーンを用いて本実験を行った。

紙面の都合上、各表内の項目名に略称を用いるため、各項目名についての説明を記述する。番号は、実験に使用した譜面にある音符に対して、始端から 1, 2, 3... の順に割り振った数字である。ノートはその音符が示す音のノートナンバーを示す。休符である場合は「休符」と記述する。ピッチの項目はピッチスコアの値を示し、タイミングの項目はタイミングスコアの値を示す。そ

表 3.1 被験者 A の練習前後の判定ログ

番号	ノート	ピッチ		タイミング	
		練習前	練習後	練習前	練習後
1	60	0	0	Good	Good
2	休符	0	2	Good	Miss
3	65	0	0	Good	Miss
4	休符	1	2	Miss	Miss
5	62	0	0	Good	Good
6	62	2	0	Miss	Good
7	55	0	1	Miss	Miss
8	休符	1	2	Miss	Miss
9	58	1	0	Miss	Good
10	60	1	0	Miss	Miss
11	62	1	0	Miss	Miss
12	64	0	0	Miss	Good
13	65	0	0	Miss	Good
14	60	3	0	Good	Good
15	休符	2	2	Miss	Miss
16	65	0	0	Good	Good
<i>E</i>		0.75	0.5625		
<i>F</i>				0.625	0.5

それぞれの練習前、練習後の項目はそれぞれの時点における記録譜面の結果の内容を示す。

表 3.1 より、被験者 A の場合は練習前後で *E*、*F* がどちらも減少した。表 3.2 より、被験者 B は練習前後で *E* が増加し、被験者 B の *F* に変動はなかった。以上より、提案手法を用いたグループ A では練習による技能の向上を確認し、既存の手法を用いたグループ B では練習による技能の向上を確認できなかった。

表 3.2 被験者 B の練習前後の判定ログ

番号	ノート	ピッチ		タイミング	
		練習前	練習後	練習前	練習後
1	70	4	3	Miss	Miss
2	休符	0	1	Miss	Miss
3	75	1	0	Miss	Miss
4	休符	1	2	Miss	Miss
5	72	1	1	Miss	Miss
6	72	4	2	Good	Good
7	65	0	3	Miss	Miss
8	休符	1	2	Miss	Miss
9	68	4	5	Good	Miss
10	70	3	4	Miss	Miss
11	72	3	1	Miss	Miss
12	74	1	3	Miss	Miss
13	75	0	0	Good	Good
14	70	4	5	Miss	Miss
15	休符	1	2	Miss	Miss
16	75	0	3	Miss	Good
<i>E</i>		1.75	2.3125		
<i>F</i>				0.8125	0.8125

# 第 4 章

## 考察と総括

### 4.1 考察

#### 4.1.1 休符のピッチスコアの傾向

表 3.1、表 3.2 にて、休符であるノートのピッチスコア全てに練習前後を比較して減少がなかった。これは、休符に関しては演奏技能の向上が一切確認できないことを示す。音符であるノートのピッチスコアには減少があり、被験者 A の結果では  $E$  が減少しているため音符に関する演奏技能の向上は確認できる。以上の点から、演奏者は練習の際に提案手法の有無に関係なく、音符の発音の練習を重視して休符の音の切れを軽視している可能性がある。

### 4.2 実験時の影響

#### 4.2.1 提案手法を使用できない環境

本実験で楽器音の入力に用いたマイクは MAONO AU-903[24] である。実験用アプリケーションの開発中に、IdeaPad Flex 550[25] の内蔵マイクを用いて動作テストを行った際、マイクが楽器音よりもノイズの音量を大きく認識し入力音を正しく取得することができなかった。現状では、使用するマイクがノイズ低減機能を備えていない場合はノイズを除去するシステムをマイクからアプリケーションへの入力間にフィルタとして挿入する必要がある。また、何らかの条件により

楽器音より環境音が大きい状況では提案手法を用いることはできない。

#### 4.2.2 実験を行った時期の時勢

実験を行った時期に日本では新型コロナウイルス感染症が流行しており、緊急事態宣言の発令により統計的に有効である数の被験者を募ることができなかった。流行が収まった状況下で再度同条件で実験を行えば、より正確な結果を得ることができると考える。

### 4.3 まとめ

楽器の演奏練習において、複数人で1つの楽曲を演奏する際には他の演奏者とパート練習や合奏を頻繁に行い、互いの音を調整することで楽曲の完成度を高めていく。しかし、何らかの理由によってそれらを頻繁に行うことが難しい状況下では個人練習によって演奏の習熟度を上げることが重要である。

そこで、本研究では管楽器を対象としてリズムゲームの構造を基に任意の楽曲を読み込み、ピッチとタイミングをリアルタイムに視覚化することで個人練習の効果を向上することが可能である演奏練習支援システムを提案した。マイクから取得した音声の周波数スペクトルを用いて入力音のピッチを推定し、その結果を MusicXML 形式で取り込んだ譜面の内容と比較することで演奏の評価を音符ごとに行い、結果を可視化する。本研究では、被験者2名を対象に提案手法を基に開発したアプリケーションを使用した場合と使用しない場合の判定結果を用いた比較実験を行った。この実験結果より、提案手法を用いた練習はそれを用いない練習より実力が向上することがわかった。しかし、入力音と実際の楽器音が異なって認識される現象を確認したことや、実験を行った時期の時勢によって被験者が統計的に十分である数集まらなかったため、実験から得た結論に対して疑念が残る結果となった。

被験者に実験システムの使用感を聞いたところ、一定範囲内の小節を指定してその区間のみ練

習を行うことができる機能やト音以外の記号を用いた譜面への対応、スラーやタイ等の音楽記号への対応を望む声が上がった。今後の展望としては、ト音以外の記号を用いた譜面の対応を行い、実験に参加可能な楽器の種類を増加させた上で入力音の認識部分の再構成を行い、時勢が落ち着いた時点で再度比較実験を行う予定である。

# 謝辞

本論文の執筆にあたり、実験に協力頂いた被験者の皆様、テーマや手法についてアドバイスを頂いた教員や学生の皆様、論文を添削して頂いた令和2年度の渡辺研究室大学院生の皆様、オンラインの状況下でありながら共に作業を行い苦しみや喜びを分かち合った4年次学生の皆様、そして、共同研究者として論文の添削やテーマへのアドバイスを行い、細かな相談を受けてくださった阿部先生と渡辺先生へ、この場を借りて感謝を述べさせていただきます。

誠にありがとうございました。

# 参考文献

- [1] 一般社団法人全日本吹奏楽連盟. すいそうがく 一般社団法人 全日本吹奏楽連盟会報 No.211. 2019.
- [2] 総務省統計局. 統計でみる市区町村のすがた 2019. 2019.
- [3] 文化庁. 文化庁活動の在り方に関する総合的なガイドライン. [https://www.bunka.go.jp/seisaku/bunkashingikai/kondankaito/bunkakatsudo\\_guideline/h30\\_1227/pdf/r1412126\\_01.pdf](https://www.bunka.go.jp/seisaku/bunkashingikai/kondankaito/bunkakatsudo_guideline/h30_1227/pdf/r1412126_01.pdf). 参照: 2020.12.24.
- [4] 田戸正彦. パワーアップ吹奏楽! 練習計画の立て方. 株式会社ヤマハミュージックエンタテイメントホールディングス, 2019.
- [5] 緒形まゆみ. まゆみ先生の吹奏楽お悩み相談室. 株式会社 音楽之友社, 2012.
- [6] 北條聡子. 譜読みとは? コツややり方・ピアノ練習の3つのステップ. <https://allabout.co.jp/gm/gc/443306/>. 参照: 2020.12.24.
- [7] 尾崎昭剛, 原尾政輝. ゲーム的要素を取り入れた鍵盤楽器習熟支援システム. 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション, Vol. 2010-HCI-139, No. 2, pp. 1-5, 2010.
- [8] 手塚正道, 川島芳昭, 石川賢. ソフトウェア教材による楽器演奏練習の支援効果—学習者の視点に着目したリコーダー練習支援ソフトウェアの効果—. 宇都宮大学教育学部教育実践総合センター紀要, No. 32, pp. 9-16, 2009.

- [9] 森下孟, 小口宙暉, 國宗永佳, 桐原礼, 本間喜子. ロングトーン練習に着目した初学者向け学校吹奏楽練習支援システムの開発. 信州大学教育学部附属次世代型学び研究開発センター紀要教育実践研究, No. 17, pp. 41–50, 2018.
- [10] 福田翼, 中村栄太, 糸山克寿, 吉井和佳. 楽譜簡略化と自動補完伴奏によるピアノ演奏練習支援システム. 研究報告音楽情報科学 (MUS) , Vol. 2017-MUS-114, No. 21, pp. 1–4, 2017.
- [11] 安井希子, 三浦雅展. ドラム基礎演奏の練習支援システム (システム論文特集号). 日本音響学会誌, Vol. 71, No. 11, pp. 601–604, 2015.
- [12] 澤光映, 竹川佳成, 寺田努, 塚本昌彦. 演奏ルールを用いたウッドベースのための実時間運指取得システムの設計と実装. コンピュータ ソフトウェア, Vol. 27, No. 1, pp. 56–66, 2010.
- [13] 福永大輝, 越智景子, 大淵康成. キー音を用いたリズムアクションゲームにおける譜面の自動生成. 研究報告エンタテインメントコンピューティング (EC) , No. 10, pp. 1–4, mar 2020.
- [14] Michael Good. Musicxml in commercial applications. *Music Analysis East and West*, No. Computing in Musicology, 14, pp. 9–20, 2006.
- [15] Inc MakeMusic. ソフトウェア - musicxml. <https://www.musicxml.com/ja/software/>. 参照: 2020.12.18.
- [16] Ltd. Kawai Musical Instruments Mfg. Co. スコアメーカーとは? — kawai コンピュータミュージック. <https://cm.kawai.jp/products/smz/whatssm/>. 参照: 2020.12.5.
- [17] Rayark Inc. Cytus α - サイトス アルファ -公式サイト. <https://cytusalpha.com/>. 参照: 2020.12.22.
- [18] Unity Technologies. Unity スクリプトリファレンス. <https://docs.unity3d.com/ja/current/ScriptReference/>. 参照: 2020.12.5.
- [19] R. Yang, J. Bian, and L. Xiong. Frequency to midi converter for musical instrument microphone system. In *2012 2nd International Conference on Consumer Electronics*,

*Communications and Networks (CECNet)*, pp. 2597–2599, 2012.

- [20] 石桁真礼生, 末吉保雄, 丸田昭三, 飯田隆, 金光威和雄, 飯沼信義. 楽典 理論と実習. 株式会社音楽之友社, 1965.
- [21] 加藤充美, 西村明, 安藤由典. 解析信号を用いたフルート音の倍音の周波数分析. 情報処理学会研究報告音楽情報科学 (MUS) , No. 16(2000-MUS-039), pp. 43–50, 2001.
- [22] 高橋公也, 池田研介. 管楽器吹鳴の非線形現象とその解釈をめぐって. 物性研究, No. 64, pp. 26–88, 1995.
- [23] 齋藤努, 松井孝誌, 本多英基, 田所嘉昭. くし型フィルタに基づく dsp を用いたリアルタイム音階検出. 計測自動制御学会論文集, Vol. 34, No. 6, pp. 504–509, 1998.
- [24] MaonoTechnology Co.Ltd. マルチパターンポッドキャストリングマイク. <http://ja.microphonefactory.com/microphone/pc-microphone/multi-pattern-podcasting-microphone.html>. 参照: 2020.1.17.
- [25] Lenovo. Ideapad flex 550(14) 製品仕様. <https://www.lenovo.com/jp/ja/notebooks/ideapad/flex-5-series/IdeaPad-Flex-5-14ARE-05/p/88IPF501453>. 参照: 2020.1.17.