

卒業論文 20xx 年度 (令和 xx 年)

リズム予測を用いたネットワーク音楽演奏における遅延の影響の軽減手法  
の提案

慶應義塾大学 環境情報学部  
松藤舜

卒業論文要旨 - 20xx 年度 (令和 xx 年度)

リズム予測を用いたネットワーク音楽演奏における遅延の影響の軽減手法の提案
--------------------------------------

キーワード:

1. 卒業論文, 2. 村井純研究室, 3. RG, 4. LaTeX

慶應義塾大学 環境情報学部  
松藤舜

Abstract of Bachelor's Thesis - Academic Year 20xx

The Use of Rhythm Prediction to Reduce the Effects of Latency in Network Music Performance
--

I can't write English.

Keywords :

1. Thesis, 2. RG, 3. Jun Murai Lab., 4. L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

Faculty of Environment and Information Studies, Keio University  
Shun Matsufuji

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	はじめに . . . . .	1
1.2	本論文の構成 . . . . .	1
<b>第2章</b>	<b>背景</b>	<b>3</b>
2.1	ネットワーク音楽演奏 . . . . .	3
2.1.1	ネットワーク音楽演奏システムの構造 . . . . .	3
2.1.2	演奏者の音声入力 . . . . .	3
2.1.3	デジタル-アナログ変換 . . . . .	4
2.1.4	OpenSound Control . . . . .	4
2.2	ネットワーク音楽演奏における遅延 . . . . .	4
2.2.1	遅延の原因 . . . . .	4
<b>第3章</b>	<b>関連研究</b>	<b>5</b>
3.0.1	Yamaha Syncroom . . . . .	5
3.0.2	JackTrip . . . . .	5
3.0.3	LoLa . . . . .	5
3.1	Adaptive Metronome . . . . .	5
3.1.1	相互メトロノームの実験 . . . . .	6
3.1.2	共通テンポの算出 . . . . .	6
3.2	Tablanet . . . . .	6
3.3	Alexandraki . . . . .	6
<b>第4章</b>	<b>提案手法</b>	<b>7</b>
4.1	概要 . . . . .	7
<b>第5章</b>	<b>実装</b>	<b>8</b>
5.1	ネットワーク音楽演奏システムのアーキテクチャ . . . . .	8
5.2	演奏予測の実装 . . . . .	8
5.3	拍認識の実装 . . . . .	8
5.4	位相修正 . . . . .	8
<b>第6章</b>	<b>評価</b>	<b>9</b>
6.1	評価内容 . . . . .	9

第7章 結論	10
7.1 本研究のまとめ . . . . .	10
7.2 本研究の課題 . . . . .	10
謝辞	11

# 图 目 次

# 表 目 次

# 第1章 序論

本章では本研究の背景，課題及び手法を提示し，本研究の概要を示す．

## 1.1 はじめに

世界的なインターネット，SNS の普及がもたらしたグローバルなコミュニケーションの発展により，世界中のアーティストをつなぐグローバルな音楽のコミュニティが形成している．それだけでなく，2019 年の新型コロナウイルス感染症の広がりによって多くの人々は自宅から行う遠隔のコミュニケーションを強いられ，Apple，Meta を含む多くの企業によるインターネットで人々をリアルタイムでつなげる仮想世界への関心が上がっている．これらの状況を踏まえて今まで以上にインターネットを介した複数の演奏者同士による遠隔にリアルタイムで行う音楽演奏のシステムへの需要が上がっている．こうした遠隔に行う音楽演奏を「ネットワーク音楽演奏」と呼ぶことにする．

ネットワーク音楽演奏においては，遅延は致命的な問題である．遅延があると演奏者同士のタイミングがずれ，リズムが崩れてしまう．相手が演奏している音をリアルタイムで聴き，それに合わせて演奏することが重要な音楽演奏においてはこのような遅延があると演奏は不可能になる．研究によると 80ms 以上になると演奏が困難になる．Yamaha の Syncroom や Zoom の S6 SessionTrak など，このような遅延を減らすシステムは多数開発されてきたが，これらには限界がある．パケットが速く届いてもジッターの関係で安定して情報を処理するまでにバッファは必要であるうえ，人それぞれのネット回線の混雑度，住む場所などで遅延が発生してしまう場合がある．それ以前に光の速さより速く伝達することはできないため，最低限光が地球を回る速度以上の遅延が発生してしまう．

本研究ではネットワーク音楽演奏における遅延を減らすのではなく，遅延を前提として演奏に影響を与えないシステムを提案する．その手法として本研究では演奏相手の演奏を予測し，その予測を再生することで遅延を補償することを提案する．[1] [2] [3] [4] [5] [6] これにより演奏者は相手の演奏の予測を聴き，それに合わせて演奏することで遅延を感じることなく演奏を行うことができる．

## 1.2 本論文の構成

本論文における以降の構成は次の通りである．

2 章では，背景を述べる．3 章では，本研究における関連研究を述べる．4 章では，本研究の提案手法を述べる．5 章では，4 章で述べたシステムの実装について述べる．6 章



では，本システムの実験評価を行い，考察する． 7 章では，本研究のまとめと今後の課題についてまとめる．

## 第2章 背景

本章では本研究の背景について述べる.

### 2.1 ネットワーク音楽演奏

ネットワークを介して複数の演奏者がリアルタイムで演奏を行うことをネットワーク音楽演奏と呼ぶ. 一概にネットワーク音楽演奏と言っても同じローカルネットワークに繋がった小規模なものから, インターネットを介して世界中の演奏者が繋がった大規模なものまで様々なものがある. また演奏者の数も1対1のデュエットから, オーケストラ規模の多くの人を同時に繋げたシステムまで可能である. そのうえ近年では音声だけでなく視覚情報を含めた視聴覚体験を提供するネットワーク音楽演奏のシステムも研究されている.

上記の通りネットワーク音楽演奏には様々なものがあるが, いずれも演奏者の音声をリアルタイムで相手に届けることが重要であり, これには主に二種類の方法がある. 音響情報を VoIP アプリケーションなどで送信する方法と, 音声情報を MIDI や OSC などの記号に圧縮し, 抽象的なデータとして送信する方法である.

本研究では1対1のインターネットを介したネットワーク音楽演奏を想定し, 後者の音声情報を OSC で送信する方法を用いる.

#### 2.1.1 ネットワーク音楽演奏システムの構造

ネットワーク音楽演奏システムは大きく分けて送信と受信の2つの機能からなり, その工程を細分化すると8段階に分けられる.

1. 演奏者の音声入力
2. 入力された音のアナログ-デジタル変換
3. 音響情報の圧縮
4. ネットワークを介した送信
5. ネットワークを介した受信
6. 音響情報の復元
7. 音響情報のデジタル-アナログ変換
8. 演奏者の音声出力

#### 2.1.2 演奏者の音声入力

演奏者が鳴らした楽器情報を取得するには主に二つの方法がある. 一つは楽器の音をマイクで拾い, 音響情報として取得する方法であり, もう一つは MIDI 信号を送る楽器を演奏して抽象的なデータとして取得する方法である.

### 2.1.3 デジタル-アナログ変換

MIDI 楽器を用いて演奏した場合この工程は不要である。音響情報をネットワークを介して送信する場合、音響情報をデジタルデータに変換する必要がある。楽器の音をマイクで拾った後、アナログ-デジタル変換器 (ADC) とデジタル-アナログ変換器 (DAC) が搭載されているオーディオインターフェースを用いてデジタルデータに変換するのが一般的である。

### 2.1.4 OpenSound Control

OpenSound Control (OSC) は音響情報を記号に圧縮し、抽象的なデータとして送信するためのプロトコルである。

## 2.2 ネットワーク音楽演奏における遅延

遅延はネットワーク音楽演奏のしやすさに大きな影響を与える。80ms 以上の遅延があると演奏が困難になると言われている。

音楽演奏はおもに 4 拍単位で「1 小節」と区切られ、その 1 小節を 1 周期と捉えると、遅延というのは以下のモデルのように 1 周期の中で「位相がズレる」ことで表現できる。

$$y = \sin(x + \theta)$$

↑↑あとで編集

### 2.2.1 遅延の原因

遅延は上記「ネットワーク音楽演奏システムの構造」のすべての工程において発生するが、特にネットワークを介した送信と受信の工程において発生する。——外国への遅延

## 第3章 関連研究

本章では本研究における関連研究について述べる。

### 3.0.1 Yamaha Syncroom

従来のネットワーク音楽円増のシステムとして最も顕著なものとして Yamaha の Syncroom がある。これはヤマハ株式会社が開発した低遅延で複数人がオンライン遠隔合奏を行うためのシステムである。

### 3.0.2 JackTrip

JackTrip はフリーで開発されているネットワーク音楽演奏システムである。音声と映像を両方送受信を行うことができるうえ、音響エフェクトの適用、高度な通信設定などの様々な機能を持っている。

### 3.0.3 LoLa

LoLa (LOw LATency audio visual streaming system ) は高度なネットワーク上で音声と映像をリアルタイムで送信するネットワーク音楽演奏システムである。

## 3.1 Adaptive Metronome

Battello らによる Adaptive Metronome[2][3] は、演奏者の演奏をリアルタイムで分析し、演奏者の演奏に合わせてメトロノームのテンポを変化させるシステムである。はじめに実装した Adaptive Metronome は親子構造を持っている。親の演奏者は演奏すると同時にシステムはリアルタイムでその演奏の拍を推定し、子演奏者に音声と拍情報を送信する。子演奏者のシステムはその情報を受取り、親演奏者の演奏に合わせてメトロノームのテンポを変化させる。またこのときメトロノームの音は親から子への遅延を考慮して位相をずれて再生される。

このシステムを用いた実験では 120ms の遅延下での演奏を行ったうえでも、被験者は抵抗を感じることなく演奏することができたという結果が得られた。[2]

### 3.1.1 相互メトロノームの実験

当初の Adaptive Metronome の実験では，親演奏者の演奏を子演奏者が聴き，それに合わせて演奏するという形で実験が行われた．後に Battelo らは親子構造を持たず，相互的に Adaptive Metronome を聞きあう実験を行った．

### 3.1.2 共通テンポの算出

相互的に Adaptive Metronome を聞きあう実験では，親子構造を持たないため，親の演奏者と子の演奏者のテンポと位相が異なる場合がある．このとき 2 人の演奏者の状況を踏まえたうえで両方の演奏が同期するような共通のテンポを算出する必要がある．

## 3.2 Tablanet

Tablanet[6] は，タブラ奏者の演奏をリアルタイムで分析し，演奏者の演奏に合わせてタブラのテンポを変化させるシステムである．

## 3.3 Alexandraki

Alexandraki らによる研究 [4][5] では，演奏者の演奏をリアルタイムで分析し，事前収録した演奏を実際の演奏に合わせて再生するシステムを提案している．

## 第4章 提案手法

本章では提案手法について述べる.

### 4.1 概要

## 第5章 実装

本章では提案手法の実装について述べる.

### 5.1 ネットワーク音楽演奏システムのアーキテクチャ

本システムは従来のネットワーク音楽演奏のシステムに加え, 拍認識部分, 演奏予測, 位相修正の3つの部分を追加している.

### 5.2 演奏予測の実装

—予測手法について記述

### 5.3 拍認識の実装

拍認識には様々な手法が存在する.

### 5.4 位相修正

受信部分において演奏相手の演奏予測を受け取った際, 遅延を考慮して位相をずらして再生する必要がある. これは

## 第6章 評価

本章では，提案システムの評価について述べる．

### 6.1 評価内容



## 第7章 結論

本章では，本研究のまとめと今後の課題を示す．

### 7.1 本研究のまとめ

### 7.2 本研究の課題

# 謝辞

俺に関わった全てに感謝

## 参考文献

- [1] Iorwerth Miriam. *Networked Music Performance: Theory and Applications (English Edition)*. Focal Press, 2023.
- [2] Riccardo Battello, Luca Comanducci, Fabio Antonacci, Augusto Sarti, Stefano Delle Monache, Giovanni Cospito, Enrico Pietrocola, and Filippo Berbenni. An adaptive metronome technique for mitigating the impact of latency in networked music performances. In *2020 27th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, pages 10–17, 2020.
- [3] Riccardo Battello, Luca Comanducci, Fabio Antonacci, Giovanni Cospito, and Augusto Sarti. Experimenting with adaptive metronomes in networked music performances. 69:737–747, 10 2021.
- [4] Chrisoula Alexandraki and Rolf Bader. Real-time concatenative synthesis for networked musical interactions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133:3367, 05 2013.
- [5] Chrisoula Alexandraki and Rolf Bader. Using computer accompaniment to assist networked music performance. 01 2014.
- [6] Mihir Sarkar and Barry Vercoe. Recognition and prediction in a network music performance system for indian percussion. In *Proceedings of the 7th International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, pages 317–320. Association for Computing Machinery, 2007.