

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：32611

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K11605

研究課題名（和文）P.ブーレーズ「レボン」の仮想空間リアリゼーション

研究課題名（英文）Virtual Space Realization of P. Boulez's "Repons"

研究代表者

今井 慎太郎（IMAI, Shintaro）

国立音楽大学・音楽学部・准教授

研究者番号：80439554

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：P.ブーレーズ作曲《レボン》を仮想空間における自由な位置で聴取できるソフトウェアの開発を行い、ソースコードと共にインターネットにて一般公開した。研究成果には以下の提案が含まれる。オブジェクトオーディオの考え方を拡張した録音時におけるマイクアレイの構築方法、およびソフトウェア上でインタラクティブなマルチチャンネル・ミキシングとバイノーラル化を行うアルゴリズム、さらに音楽的な破綻を来さないようにアルゴリズムへ加えた調整である。また、聴取位置と方向の変化を演奏表現の一部と捉えることで、新たな楽曲解釈を提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空間性をテーマにした芸術音楽作品は歴史上さまざまなものが見られるが、それらを仮想空間で実現する試みは、前例を見つけるのが難しい。少なくとも《レボン》については、世界初のものとなった。また、昨今進展の著しいメタバースや空間コンピューティングのコンセプトは、音楽表現においても新しいプラットフォームとなり得る。したがって、本研究はそれを見越した、芸術音楽における新しい表現と実装方法のたたき台として、あるいは従来のサラウンド録音を拡張するアーカイブ化の手法として、学術的また社会的な意義がある。

研究成果の概要（英文）：Software that allows users to listen to P. Boulez's "Repons" at any position in a virtual space has been developed and released to the public on the Internet, along with the source code. The results of the research include: a method of constructing a microphone array for recording that extends the concept of object audio; algorithms for interactive multichannel mixing and binauralization in software; and adjustments to the algorithms to prevent musical breakdowns. In addition, by considering changes in listening position and direction as part of the performance expression, a new interpretation of the music was presented.

研究分野：コンピュータ音楽

キーワード：空間音響 イマーシブオーディオ レボン ブーレーズ

1. 研究開始当初の背景

P. ブーレーズ作曲《レポン》は、空間的に配置された楽器群とリアルタイムに変形された電子音響が呼応する、20世紀最大の西洋芸術音楽作品のひとつである。その特性上、聴取位置によって異なる音楽体験を得られるものの、多くの技術的な困難が伴うため上演の機会は非常に限られる。加えて、筆者がコンサート上演に取り組むにあたり、ブーレーズが構想した理念は、様々な物理的制約から、現実空間では達成することが不可能なのではないかとの問いが浮かんた。それらが研究開始当初の背景である。

2. 研究の目的

本研究は、対象楽曲を仮想空間内で上演し、任意の位置で聴取した場合の音場と音像をバイノーラル技術により再現するインタラクティブなリアリゼーションを行うことで、作品の理念の達成を試み、また新たな聴取体験をもたらすのを目的とする。それにより、かつて様々な作曲家が試みながらほぼ不首尾に終わった、作曲のパラメータとして空間を扱うことが、仮想空間であれば有効であるのを現代の作曲家に示すことができるとするなら、本研究は新しい音楽表現の可能性を拓く非常に意義深いものになると考える。さらに、空間性をテーマとする音楽作品のアーカイブ化について、従来の録音に替わるモデルケースとなることを目指す。

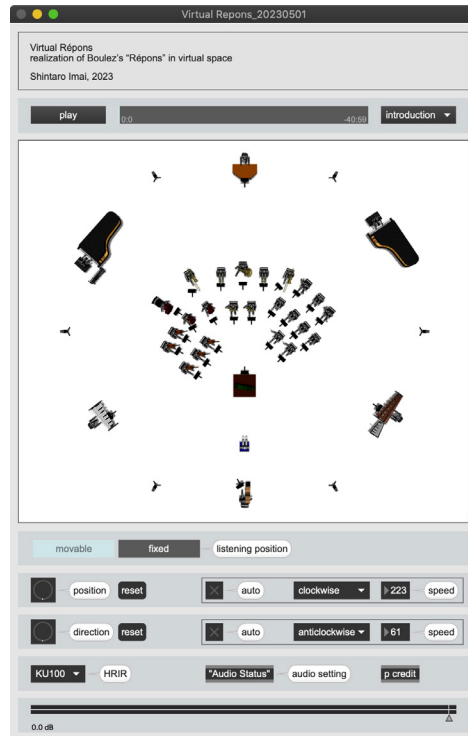
3. 研究の方法

構成論的方法を用いる。オブジェクトオーディオの考え方を基盤として、録音方法を検討し、試験録音を行う。試験録音の検証を踏まえて、対象楽曲の録音と編集を実施する。インタラクティブなマルチチャンネル・ミキシングとパンニング、およびバイノーラル化を行うアルゴリズムについて検討する。それに基づき、ソフトウェアを実装する。聴取により検証し、音場や印象の再現性はもとより、音楽的な破綻を来さないよう、アルゴリズムに調整を加える。また、なるべく多くの環境でソフトウェアを実行できるよう、アルゴリズムの軽量化やオーディオファイルの品質や数の調整を行う。ソフトウェアはオープンソースとして広く公開し、第三者による検証を促す。

4. 研究成果

P. ブーレーズ作曲《レポン》を仮想空間における自由な位置で聴取できるソフトウェアの開発を行い、ソースコードと共に一般公開した（www.kcm-sd.ac.jp/vr/）。研究成果には以下の提案が含まれる。オブジェクトオーディオの考え方を拡張した録音時におけるマイクアレイの構築方法、およびソフトウェア上でインタラクティブなマルチチャンネル・ミキシングとバイノーラル化を行うアルゴリズム、さらに音楽的な破綻を来さないようにアルゴリズムへ加えた調整である。

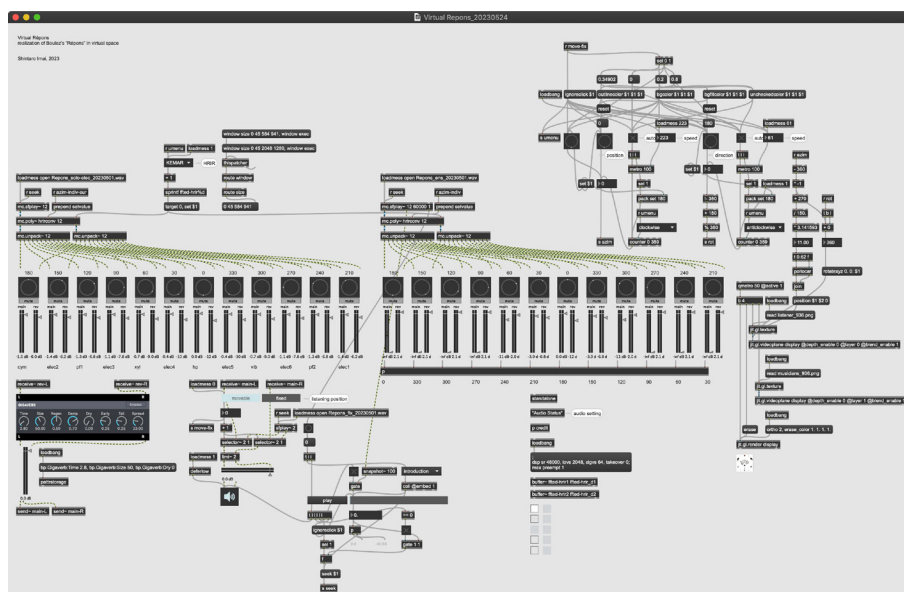
オブジェクトオーディオでは、単一音源の位置情報をパンニングに適用することで、出力チャンネル数に依らない音の空間化を実現する。本研究では、アンサンブルおよびソロ楽器をそれぞれ取り囲むように、単一指向性のマイクロフォンでアレイを構築して録音を行った。そしてその全体を連動させてパ



ソフトウェア画面

ンニングを行う手法をとった。録音時の使用マイクロフォン数は、アンサンブルに 12 本、6 つのソロ楽器に各 8 本の、計 60 本である。これは、単一指向性マイクロフォンで音場を隙間なくカバーするために必要だった。

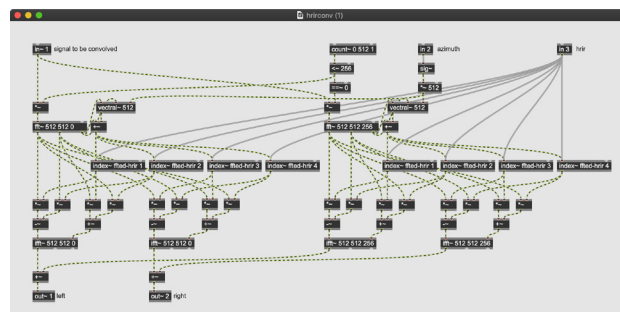
マルチチャンネルオーディオのミキシングと空間化は、次のように行う。仮想の聴取位置と各マイクロフォン設置位置の座標を用いて角度と距離を算出し、パンニング値と距離減衰を適用する。その上でバイノーラル処理を行う。しかし楽器 60 チャンネルにエレクトロニクス 6 チャンネルを加えた計



ソフトウェア内部第一階層

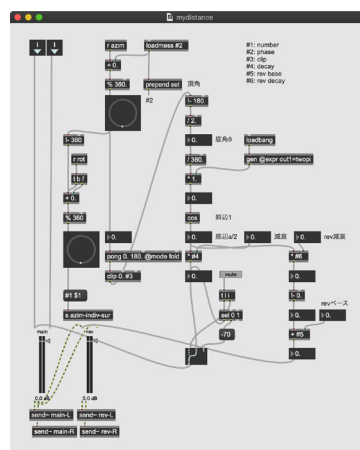
66 チャンネルのバイノーラル処理は、一般的なコンピュータには負担が大きすぎる。そのため、一度 DBAP (Distance-Based Amplitude Panning) で空間化した後に、15 度ごと計 24 程度のバイノーラルフィルタを適用する方法を試みた。しかしソロ楽器のマイクロフォンについて、位置による違いが顕著ではなかったため、1 本のみを使用することにした。よって、アンサンブル 12 チャンネル、ソロ楽器とエレクトロニクス各 6 チャンネルの計 24 チャンネルを個別にバイノーラル処理することが可能となった。そのことで、方向についてより良好な定位を得ることができた。

バイノーラル処理は、既存のバイノーラルパンナーを用いるのではなく、公開されている頭部伝達関数 (HRTF) のインパルス応答 (HRIR) を、リアルタイムに畳み込むことで実現した。開発環境の Cycling '74 Max にて、時間領域で畳み込みを行うオブジェクトが用意されている。しかし処理の負担が大きいため、FFT を用いた周波数領域での畳み込みを実装した。さらに処理を軽微化するため、HRIR は事前に FFT 処理を行い、360 度分の実部と虚部を 1 つのテーブルに読み込んで、必要な部分を適宜用いた。



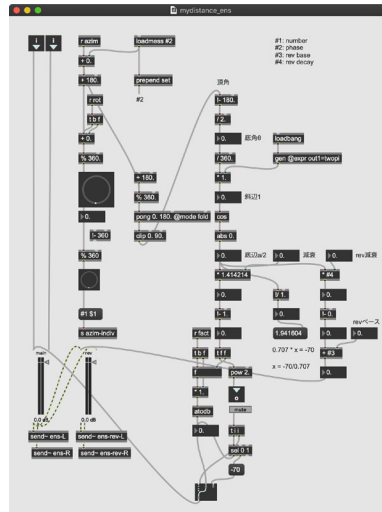
FFT による HRIR の畳み込み

距離減衰について、実世界と同様に 2 倍の距離でマイナス 6dB というパラメータを単純に適用すると、遠方に位置するソロ楽器が聞こえづらくなる。実際に上演する際は、そうしたことを防ぐために、ソロ楽器を適宜アンプリファイすることで対処している。ここでソロ楽器の減衰は、最大で -1.5dB にすることで、音楽的な破綻の回避と距離による変化を両立させた。さらに聴取位置について、同様の理由で、アンサンブルとソリストの中間となる円周上に限定した。また、距離減衰に応じてリバーブ量を増やすことで、遠近感を高めた。



距離減衰とリバーブ調整

アンサンブルに用いた 12 チャンネルについて、距離減衰を適用しながらすべてを使用すると、方向や位置による違いが減少して感じられた。また実際の演奏では、奏者の身体によるマスキング効果がある。そこで、円周の反対側に位置するチャンネルは適宜消音することにした。また、距離減衰の値を極端に設定することで、正面からの音を特に強調するようにした。これはアンサンブルとソロ楽器の分離を図るために必要だった。



アンサンブル用にカスタマイズ

ソフトウェアはオープンソースとし、第三者による検証が容易になるよう心がけた。またソフトウェアの完成後に、オプションとして、自動で聴取位置や角度を回転させるモードを用意したところ、ブーレーズが音楽表現でたびたび用いていた「渦」のモチーフを拡張するような聴覚効果を得られた。聴取位置と方向の変化を演奏表現の一部と捉えることで、新たな楽曲解釈を提示できると考える。

現実空間での演奏に比較すると、聴取位置の変更による新鮮な感覚は、今回の研究成果では得られなかった。音楽といえど、その体験には多分に視覚的な要因が大きいことを再確認した。また、パンニングをヘッドトラッキングと連動させることで効果が高まるかどうかの検証は、今後の課題としたい。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

バーチャル・レボン P.ブーレーズ作曲《レボン》の仮想空間リアリゼーション <https://www.kcm-sd.ac.jp/vr/> 研究成果となるソフトウェアを上記Webサイトにダウンロード形式で公開している。

6 . 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7 . 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------