

量子ゲート回路を応用した音楽作成システムの開発 —量子のコンセプトに基づいた音楽生成—

1. 背景

社会におけるコンピュータの役割は、情報通信の基盤としてはもちろん、アートやエンターテインメントなどの人間の感性が関わる活動を支援する役割としてもその重要性を増している。中でも音楽においてはその録音、演奏の用途はもちろん、作曲においても種々のアルゴリズム作曲においてコンピュータが本質的な役割を果たしてきている。そして現在、本質的に新しい計算原理である量子コンピューティングへの期待が高まる中、量子コンピューティングならではの音楽生成の可能性が期待される。

2. 目的

量子ゲート回路を応用した音楽作成原理を提案し、その原理に基づく量子ゲート作曲ソフトウェアを開発する事により、量子コンピューティングの音楽応用を開拓する事を目的とする。その目的のため、以下の二つの課題に取り組む。

A(原理追及の課題): 量子ゲート回路を応用した音楽作成原理の構築と提案。これは、『音』と『量子ビット』とのマッピング、及び『音楽の進行』と『ゲート操作』の対応付けを行う事である。

B(アプリケーション開発・パフォーマンス形態追求の課題): 量子ゲート回路を応用した作曲・パフォーマンスのための環境の構築。これは具体的なアプリケーション開発に対応する。

3. ソフトウェア開発内

- ① 量子ゲート操作に伴って変化する量子ビットの波動関数の時間発展そのものを音楽表現に応用するアプローチ(測定を前提としないアプローチ)。
- ② 量子ゲート操作に伴う量子状態に対しての測定(波束の収縮)の結果として得られる量子状態を用いるアプローチ(測定に基づくアプローチ)

①測定を前提としないアプローチでのソフトウェア実装

このアプローチでは1量子ビットによって1音を表現する。1量子ビットの状態はブロッホ球によって可視化されるが、本プロジェクトでは、ブロッホ球のxy平面内の角度 ϕ の一周を1オクターブ中の音名と対応させた。 $\pi/6$ 刻みでの離散値はピアノの鍵盤の音に対応する(図1)が、それ以外の角度では、ピアノの鍵盤の音名には当てはまらない音(広い意味での微分音)になる。図2のように、2量子ビットを音符ビット、残りの3つを観測ビット(直接音名には変換しないビット)とし

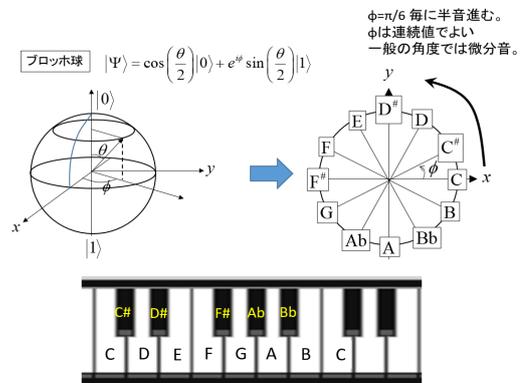


図1. 測定を前提としないアプローチにおける音名と量子ビットの対応付け

たとして、各量子ビットに対して1量子ビットゲート(位相回転ゲートなど)、また任意の2観測ビット間か1つの音符ビットと1つの観測ビットの間で制御 NOT(CNOT)ゲートを次々に設ける。このゲートの設置は、SuperCollider+Foxdot をベースに開発したライブコーディングシステム上で即興的に行う。この操作が作曲に対応する。すると、各ゲートを通る度に量子状態が変わるが、これに伴う音符ビットの変化を音名の変化(音楽)と捉え、リアルタイムに音が再生される。

ここで音符ビットと観測ビットの間に CNOT ゲートを設ける事で、音符ビットと観測ビットの間に量子もつれをもたらす事ができる。また図2のように2量子ビットを音符ビットした場合、これらの2音は和音として解釈される。一般には観測ビットの状態(|000)から|111)までの8状態)によって音符ビットの状態が異なるため、観測ビットの状態としてどのフレームを選ぶかで音楽が変わってくる事になる。

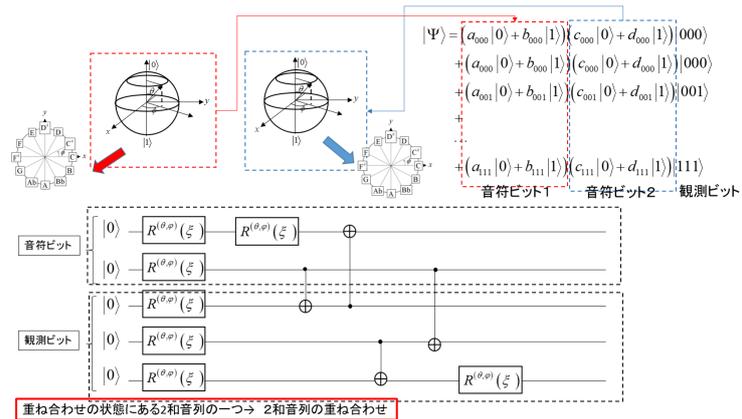


図2. 測定を前提としないアプローチにおける『音楽進行』と『量子ゲート操作』の関連付け(2音符ビットの場合)

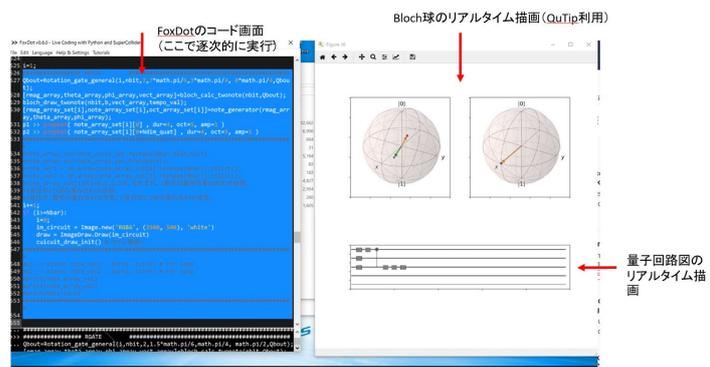


図3. Foxdot をベースに構築した量子ライブコーディングの画面。左が観客に見せるコーディング画面であり、ここでリアルタイムにゲート配置を行う。右上には、実行したゲートに伴う音符ビットのブロッホ球が、右下には量子回路図がリアルタイムに描画される。

図3が SuperCollider+Foxdot をベースに開発したライブコーディングシステムの画面である。左が観客に見せるコーディング画面であり、ここでリアルタイムにゲート配置を行う(そのような命令文を書き、実行する)。右上には、実行したゲートに伴う音符ビットのブロッホ球が、右下には量子回路図がリアルタイムに描画される。

この環境のもと、様々な即興的演奏が可能になるが、例えば、音符ビットと観測ビットが量子もつれを形成した後は、観測ビットに対して位相回転ゲートを加える事によっても音符ビットの状態は間接的に変わる事など、量子力学特有の非局所的な性質を利用した音楽生成を行う事が出来る。また、2音符ビット、3観測ビットの場合、8個の重ね合わせ状態の中から異なる状態をその都度選択してループ再生する事で、変化にとんだ音楽再生を得る事

ができる。これは、「楽譜」としてのゲート配置は同じでも測定時のフレームの選び方で多様な音楽を生成できるという意味で、音楽の楽しみ方において聞く側の能動的な介入が可能になる事を意味する。

① 測定に基づくアプローチ でのソフトウェア実装

測定に基づくアプローチにおいて量子ゲート操作を音楽進行にマッピングするための構成を幾つか提案したが、その一つが「デジタル式音名表現による量子ゲート音楽表現」である。ここでは、図4(左)に示すように1音を3量子ビットで表現する。1、2、3番目の量子ビットはそれぞれV度、II度、III度間隔の音の上げ下げに対応しており、結果として|0>から|7>までの状態は5度圏における音の並びに対応している(図4(右))。

このスキームを前提に、代表的な量子アルゴリズムの一つである位相推定アルゴリズムをもとにした「位相変調音楽生成モデル」を提案し、量子回路シミュレータ Qiskit と音楽プログラミング言語 Takt の実装を行った。基本的な音名の流れは、各音を構成する3量子ビット系内部で与えている位相回転ゲートの位相で決まっている。一方で、ある音から次の音に対しての制御位相ゲートの存在が、この基本的な音名の流れ(元々の曲)を乱す役割を持っている事になる。

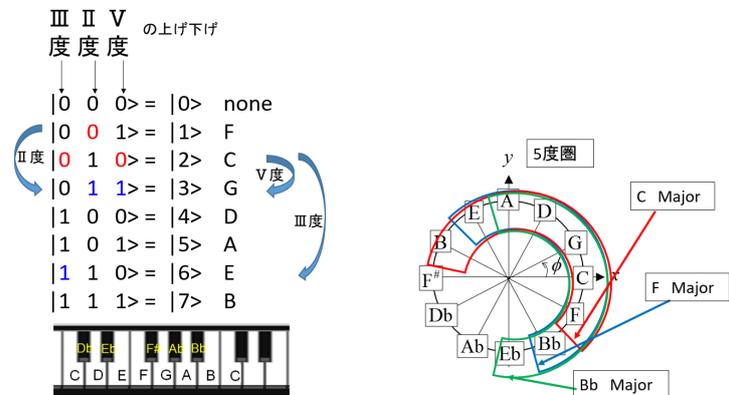


図4. デジタル式音名表現(左)と5度圏(右)

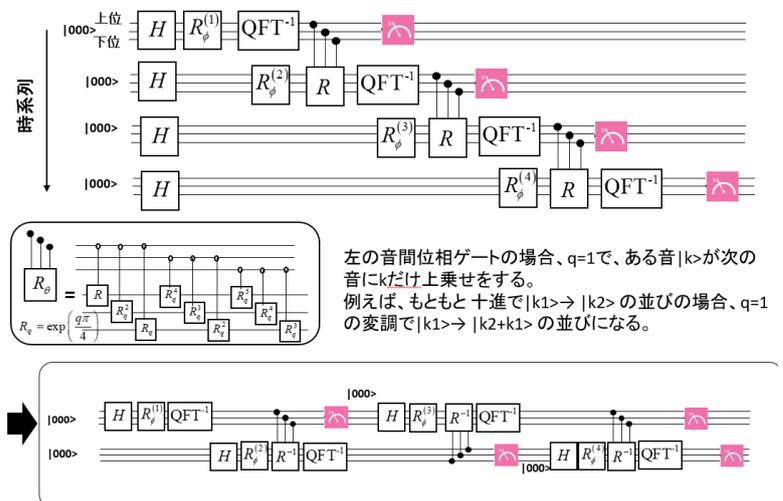
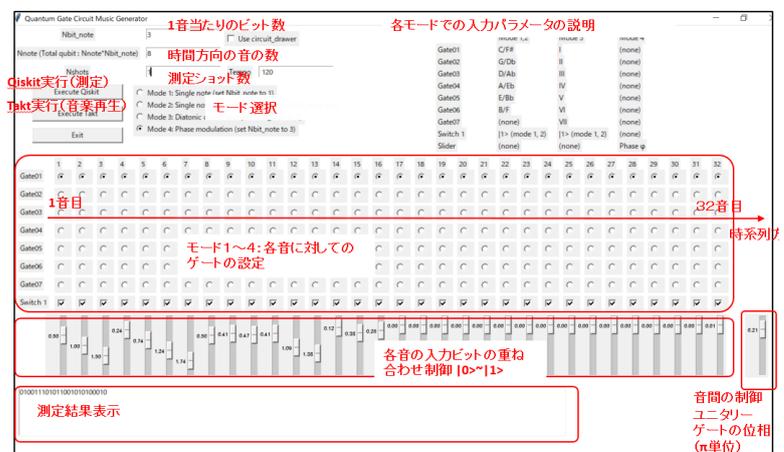


図5. 位相変調音楽生成モデル



モード1: 1量子ビット1音対応モデルによる確率的総音列生成モデル
 モード2: 2量子ビット1音対応(音高+音値)モデルによる確率的総音列生成モデル
 モード3: 3量子ビット1音対応モデルに基づくダイアトニックコードトーン生成モデル
 モード4: 3量子ビット1音対応モデルに基づく位相制御音楽生成モデル

図6. 測定に基づくアプローチにおける統合的 GUI 画面

これは、言い換えると、元々の曲が主題であり、制御位相ゲートによって変調された曲はその主題の変奏であると位置づける事が出来る。

この、測定に基づくアプローチでは、ゲート式量子コンピュータのシミュレータ Qiskit によって量子ゲート回路の記述、シミュレーションの実行と測定結果の抽出を行い、その測定結果を音楽プログラミング言語 Takt に取り込んで音楽再生を行う複合的なシステムとして開発したため複雑であり、一般のユーザーがコードを書き換える事は想定しにくい。そのため、この複合的なシステムを一元的に操作するために Python 言語で Tkinter ライブラリを用いる事により、GUI(グラフィカル・ユーザー・インターフェイス)を構築した(図6)。

4. 新規性・優位性

量子力学を音楽作成に応用する試みについては、いくつかの提案が本プロジェクトと同時進行的に海外でなされている。例えば IBM の James L. Weaver 氏による、ゲート式量子計算を対位法の作曲に応用している例や、セルビアの Quantum Music というプロジェクトにおける音楽家と物理学者の議論などがある。本プロジェクトの成果はこれらの他の試みよりも、量子ゲート操作をよりダイレクトに音楽に応用し、また、一般のユーザーが気軽に利用できるソフトウェアとして開発を行ったという意味で、多くのユーザーへの価値と社会へのインパクトが期待される。

5. 期待されるユーザー価値と社会へのインパクト

開発したソフトウェアのユーザーとして次の3つの層に期待している。①量子ゲート型量子コンピューティングの学習者。量子ゲート操作の結果を数字やグラフ、プロット球だけではなく、「音」で把握する事は、量子ゲート型量子コンピューティングの学習者にとっての理解の助けとなる事が考えられる。②様々なジャンルの音楽家。芸術音楽の現在の形の一つである現代音楽の分野においては、数学の考え方を取り入れる、偶然性を取り入れる、など、現在に至るまで様々な実験的な音楽の試みが行われている。本プロジェクト提案の成果は、新しい音楽作成(作曲)原理として、実験音楽の新しい裾野を開拓したいと考える音楽家にもインパクトを与え、価値を提供できるものである。③また、本プロジェクトで開発した、測定を前提としないアプローチについては、ライブコーディングシステムを用いる事でコーディングから音再生までを統合的に実現しているが、近年のライブコーディングへの注目の高まりから、ライブコーディングに関する日本語の書籍や、Web での解説記事等も大変多く見られるようになってきている。本プロジェクトはそのような時代の流れに乗っており、既存のライブコーディングユーザーに対しても、新しい音楽表現の在り方として本プロジェクトの成果を訴求できると考えられる。

6. 氏名(所属)

相馬聡文(神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻)