

創作ノート

計算機による音生成の異なるあり方を探る
『Electronic Delay Time Automatic Calculator』の制作
Electronic Delay Time Automatic Calculator
that explores an alternative way to generate sound by a computer

松浦知也

Tomoya MATSUURA

九州大学大学院芸術工学府

Graduation School of Design, Kyushu University

城一裕

Kazuhiro JO

九州大学芸術工学研究院

Faculty of Design, Kyushu University

概要

本稿では、時間を分割する機能を持ったコンピューターとしての回路彫刻作品「Electronic Delay Time Automatic Calculator」について、その詳細を述べる。本作品は電気パルスの遅延フィードバックという、マスタークロックを持たない異なる時間構造の表現を、メディア考古学的視点より考察するものである。コンピューターを用いた音生成の黎明期に存在した、CSIRACやFerranti Mark 1という、PCM形式によらずに音をデジタル的に直接生成する先例を足がかりに、ソフトウェアとハードウェアの不可分性および、時間の定量的な記述に着目し、今日計算機を用いて音を生成することの意味を再考する。

1. はじめに

本稿では、時間を計算する機能のみを持ったコンピュータとしての回路彫刻作品「Electronic Delay Time Automatic Calculator」(以下、EDTAC)の制作を通じて、今日計算機を用いて音を生成することの意味を再考する。

計算機を用いた音の生成手法の一つとしてプログラミングがある。90年代後半からMaxやPuredata、Super-Colliderといった音楽・マルチメディア処理のためのプログラミング言語が登場し、個人のコンピューターでもリアルタイム信号処理が手軽にできるだけの処理速度と価格の低下を背景にプログラミングによる音の生成の敷居が下がり(久保田, 榎木, and 佐々木 2001)、既存の音楽の再生産ではないオルタナティブな音楽が作り出されてきた(カスコーン 2005)。

一方、より近年ではAlgorave(Collins and McLean 2014)に代表されるその場でコードを書きダンスミュー

ジックを生成するライブパフォーマンスのように、プログラミングと大衆音楽文化が接近している例もある。これはプログラミングによる音生成の領域を広げる一方で、既存の音楽の規範に再度制限を受けることになると内省されてもいる(Bell 2018)。

かつて電子音楽家のオヴァル(マーカス・ポップ)は、自分専用の音楽制作ソフトウェア・オヴァルプロセスの制作に際して「～音楽制作ソフトウェア環境は、普遍性という潜在的側面を持っていながらも、過去の音楽的遺産、伝統的な音楽の理解方法のコンテナとして機能しているに過ぎない。したがって、現代のオーディオ分野における音楽ソフトは、古い音楽的観念の残骸を包括する、普遍的でコンセプチュアルな容器なのだ。」(Pop 2001)と述べたように、現在の音プログラミング環境もまた、既存の音楽の再生産を繰り返す、新たな容器になりつつある。

この状況に対し本稿では、さらなるオルタナティブな音生成の方法を探るため、歴史をさかのぼりメディアのありえた可能性を提示するメディア考古学のアプローチ(フータモ 2015)に基づき、メディアとしての計算機を俯瞰し、計算機を用いた音生成の異なるあり方を探る。その中では、計算機上での音生成の黎明期におけるいくつかの試みを参照することで、現在普遍的に用いられている符号化方式としてのパルス符号変調(PCM)に依拠しない、音の生成手法、音のプログラミング手法を検討する。

具体的には、音のプログラミングを「音を出すために任意の時間イベントを再現性を持って制御できるシステムを作ること」とし再定義し、その中で、コンピューターの構造時間を離散化せず任意の長さに区切ることを、回路を用いた彫刻作品という形式で実装した。

以下本稿では、まず背景としてPCMの説明とその

問題点の指摘に触れ、計算機の黎明期に置ける PCM 以外の音生成の試みについて触れる。その上で PCM 形式のデータ操作以外の行為も含む広義の音プログラミングの再定義をし、時間の長さを操作する音プログラミングの提案を行う。加えて、作品の提示形式として参照した、音を出す回路彫刻作品、計算そのものに美学を見出す作品の 2 種類の関連作品群を挙げる。その後作品自体の詳細な構造の解説を行う。考察では本作品で実現できたこと、できなかったことを整理した上で今後の展開の可能性について議論する。

2. 背景

2.1. パルス符号変調

現在、コンピュータで音を合成するための記述方法は、電話を始めとして音声通信の分野で発展したパルス符号変調 (PCM) 方式である。

PCM 方式とは音圧信号を一定の時間間隔で区切り (離散化) 数列にし、その値である音圧もまた一定の間隔で分割し (量子化)、バイナリデータとして扱う表現方法である (谷口, 中川, and 福田 2015)。この方式は Reeves が 1937 年に長距離通信のために音声をパルスで表す方式を開発し (Reeves 1942; Vardalas 2012)、Oliver や Shannon らが Nyquist と Hartley の研究を (Nyquist 1928; Hartley 1928) をベースにして理論化がなされている (Shannon 1948; Oliver, Pierce, and Shannon 1948)。

PCM は、単なる録音再生に際してはサンプリング周波数を十分に確保すれば人間が知覚できる範囲の音声を表現できる。しかし Puckette は PCM 方式で信号処理を行うときに、音声信号を乗算する際には人間の聴覚の上限までサンプリング周波数を確保していても知覚できる副作用 (折り返し歪) が発生しうる、という限界を指摘した上で、例えば直線の集合として波形を表す形式を用いれば、鋸歯状波のように、理論上には無限に高い周波数成分が僅かに含まれることで PCM 形式では表現しきれない波形を記述できるといった例を挙げ、PCM 以外の形式でのデジタル信号処理の可能性について言及している (Puckette 2015)。

2.2. PCM 以外の音生成の方式

コンピュータ音楽の歴史の中では、それまで Xenakis や Koenig らの音価レベルでのプログラミングに続き、1957 年に Mathews らが開発した MUSIC-I が、非リアルタイムではあるものの PCM 方式に基づく形で直接音の波形を計算して出力した最初のシステムとされている (Nishino and Nakatsu 2016)。

この音価レベルの操作の時代と PCM に基づく波形の生成の登場までのあいだに電子計算機を用いて音を直接生成しているが PCM 方式ではない例として、オー

ストラリアで最初の電子計算機 CSIRAC (CSIR Mk1)、イギリスの初期の商用コンピュータ Ferranti Mk 1 があり、Doornbush はコンピュータで初めて音楽を演奏した例を CSIRAC としている (Ariza 2011; Doornbusch 2004; Doornbusch 2016)。

CSIRAC や Ferranti Mark1 はメインメモリに音響遅延線メモリという、データを音のパルス列として循環させる一時記憶装置を用いており、またデバッグ用途にバイナリデータを直接スピーカーに出力する Hooter という機能を持っていた。CSIRAC の開発者である Pearcey らはこの機能を逆転的に利用して、メモリに一定の間隔でデータを並べてスピーカーに出力すれば任意の周波数の音を出力する事ができ、同時にメモリ内のデータを書き換えることでメロディを演奏させることを 1951 年に試みている。

この例は、プログラミングを用いて任意の音高やリズムを再現出来たのだから音楽のプログラミングとして捉えることができるものの、0・1 のパルスを用いているため今日の PCM に基づく音プログラミングのように任意の音圧波形を再現することはできない。

2.3. 音プログラミングの再定義

以上で見たように、音のプログラミングは今日考えられている以上に多様なものであり、異なる方式での音プログラミングを探求することは表現の拡張につながると思われる。そこでまずは音のプログラミングの定義を改めてし直す。

メディア研究者の Wendy Hui Kyong Chun は何をもってプログラミングが達成されたかは曖昧であることを指摘する。

ソフトウェア、もしくはそれらしいものは、悪名高くも難しい概念だ。コンピュータサイエンスにおけるソフトウェアの定義の今の所の共通認識は”コンピュータにある特定のタスクの実行を指示する命令の集まり”だ。命令の集まりというとき、その材料性は不安定だ。実際、ソフトウェアは解剖していけば行くほどにどんどん剥がれ落ちていってしまう。(Chun 2005, 27p, 筆者訳)

世界で最初の電子計算機と呼ばれる ENIAC の構造はデータフロー方式といって、ケーブルで個別の計算ユニットをつなぎ替えることによってプログラミングを行っている。「*a new ENIAC was created each time it was used* (使われるたびに新しい ENIAC が作られていたのだ)」と表現される (Chun 2005, 28p) ように、回路の組み換えのようなハードウェアの操作もプログラミングと呼ぶことができる。

Chun の挙げるような最大公約数的な定義を音の生成という目的に絞り、本稿では音のプログラミングを音を出すために任意の時間イベントを再現性を持って制御できるシステムを作ることと定義する。

この定義は音価の操作と音圧の操作という時間スケールに境界線を引かず、その目的が音を生成することかどうかで識別する。

2.4. 時間の長さを操作する音プログラミング

本研究では、先の定義に従いながらも、CSIRAC で行われていたように既存のコンピューターではそのアーキテクチャの制約から実現できないものに新しい表現の可能性があると考え、時間を任意の長さの列に区切ることとしての音プログラミングを試みた。

チューリングマシン、有限状態機械、プッシュダウン・オートマトンといった今日のコンピューターの基礎になっている計算モデルには時間の概念が無い。それらは1計算ステップごとにメモリー内のデータを動かすことだけを考えており、できるだけ高速なクロックが存在することが理想的になる。そしてコンピューター内で時間に依存するイベントを制御するときには、時間の長さをマスタークロックという最小単位を積み重ねる事で表現する。

だが音、音楽の生成という目的のためならば、始めから時間操作をすることを前提にしてコンピューターの構造を考えることは意義がある。その最も単純な実現方法として、マスタークロックの速度自体を自己変更する、不均一なメトロノームとも言えるシステムが考えられる。

そして、EDTAC はこのシステムそれ自体の直接的な提示を、ハードウェアを手作りすることで提示するものである。

2.5. 参考作品

このようなシステムを直接的に表現するためにハードウェアを作るアプローチについて、音を生成する電子回路を直接パーツ同士をはんだ付けすることで視覚的にも表現する回路彫刻作品や、計算のプロセスそのものに美学を見出す作品群を参考にした。

2.5.1. 音を出す回路彫刻

音を生み出す電子回路を基板などではなくパーツ同士を直接はんだ付けして彫刻のように見せる作品を作る人物としては Peter Vogel が代表的である。壁一面に電子彫刻を設置し、取り付けられた光センサをもとに来場者が彫刻に落とす影によって音に変化するインタラクティブな作品『The Sound of Shadows』(2011) など

がある (Branwyn 2016)。また Vogel は基本的にアナログな電子部品を用いるがマイクロコントローラーなどより現代的なパーツを用いる Eirik Brandal や (Brandal 2015)、より楽器との中間とも言える作品を作る Ioana Vreme Moser などがある (Moser 2017)。

2.5.2. 計算そのものに美学を見出す作品

1970 年頃からコンピューターの普及が個人にも進み、コンピューターを用いた作品が増えてきた。高橋士郎は動く彫刻、キネティックアートの文脈からマイクロコンピュータと流体素子で空気圧をコントロールし物を動かす作品を制作しているが、その中で空気圧バルブを論理回路として利用して笛と打楽器を演奏する『ニューマチックコンピュータ』(1970) を制作している。空気チューブを差し替えることで音階などのプログラミングが行えるとされる (高橋 1987)。

またより現代の例では、コンピューターの高度なブラックボックス化という背景もあり演算のプロセスそのものを見せる様な作品が出てきている。

Ralf Baecker は 5 つの相互接続された信号処理、信号生成モジュールを水晶やシリコンといった今日のコンピューターを構成する基本的素材をそのまま用いることでコンピューターにおける計算プロセスを材料レベルまで還元して提示する作品『Irrational Computing』を発表している (Baecker 2011)。

CW&T は 1 ビットのメモリーを 1Hz のマスタークロックで操作するだけの極めて限られた機能のコンピューターを手作りの小さな電子回路、蛍光灯、ケーブル、スイッチといったミニマルな素材で視覚的に提示する作品『1Bit 1Hz CPU』を制作している。作品に備えられたトグルスイッチを操作すると 1 秒周期のクロックが通過したタイミングでスイッチのオン・オフが蛍光灯に反映される。通常数メガヘルツにも及ぶコンピューターの駆動クロックを敢えて遅くすることで普段意識しないコンピューターの中の計算プロセスを露わにしている (CW&T 2011)。

また山本は任意のアルゴリズムの実行を論理珠算という 4 種類のシンプルな珠の移動操作で表現し、それを実行すること自体をパフォーマンスとして行う事で、計算の本質を動的なプロセスにあることを見せる『算道』を発表している (山本 and 三輪 2015)。

3. 作品解説

本作品は電線及び光ファイバーで相互接続された 3 つのハードウェアで構成される。一つ目は電気パルスを受け取り、一定時間後に出力する遅延回路、二つ目は電気パルスを受け取り LED を切り替えるカウンター回路、最後は電鍵音響器 (テレグラフ・サウンダー) を

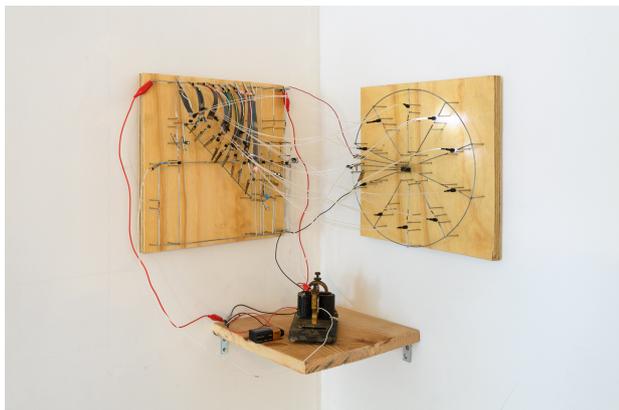


図 1: EDTAC の展示の様子。

電気リレーとして改造したものである。遅延回路及びカウンター回路は 40cm 四方ほどの木の板の上に針金を取り付け、電子部品を一つ一つはんだ付けしたものになっている。

3.1. システム概要

3.1.1. 遅延回路

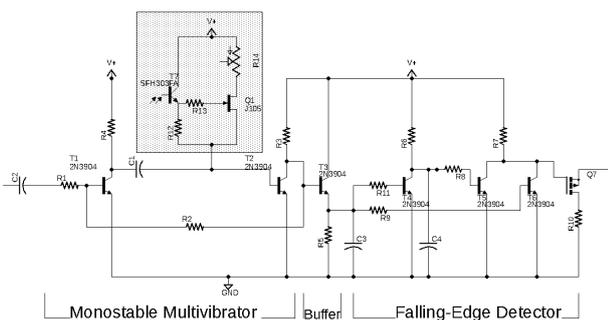


図 2: EDTAC の遅延回路の回路図。網点部分が遅延時間を決める抵抗部。

図 2 は遅延タイマー部の回路図である。回路は単安定マルチバイブレータ部分、次の回路への電流量を確保するバッファ部分、入力電圧が 5V から 0V に降下した時に短いパルスを出力する回路である。

単安定マルチバイブレータは回路図左側の入力に短いパルスが入力された時に一定時間出力電圧が電源電圧まで引き上げられ、一定時間後に 0V に戻る。時間はコンデンサーの容量 C (回路図内では $C1$) と抵抗値 R (回路図内では $R14$ に相当する) によって決まり、その時間は $\ln 2 \cdot CR \approx 0.69CR$ で決定される。

$C1$ は回路に一つだけ固定されており、回路図網点部分が作品写真における黒い帯状のパーツに相当する。図中 $T7$ となっているフォトトランジスタ (光センサーの一種) が受光しているあいだだけ図中 $Q1$ の FET の

入力電圧が上がり、電源から $R14$ の抵抗値に応じた電流が $Q1$ を通じてタイマー部に流れ、コンデンサを充電する。

全体として、まず入力部にパルス電圧が加わると、マルチバイブレータ回路の出力が 5V に上がり、 C と R に応じた時間のあと 0V に降下し、その時回路から短い電気パルスが出力される。

3.1.2. カウンタ回路

カウンタ回路には汎用 IC の一つである CD4017B を用いている。CD4017B は 10 進カウンタと呼ばれる機能を持ち、入力端子、0~9 までの出力端子、桁上り出力、リセット入力端子、電源端子を持つ。電源を入れたときには出力 0 が電源電圧 (本作品では 5V) になっており、他の出力は 0 である。入力にパルス電圧が加わる度に 5V を出力端子が 1、2、3 と順番に切り替わり、9 の次には 0 に戻る。この時桁上り出力が同時に 0 から 5V になる。リセット端子に 5V を印加すると出力が強制的に 0 に戻るが、本作品では桁上りとリセット機能は用いていない。

回路は単純にそれぞれの出力に LED が取り付けられており、入力パルス電圧が加わる度に点灯する LED がひとつずつ切り替わる。

3.1.3. 電鍵音響器

電鍵音響器 (テレグラフ・サウンダー) とはモルス信号を用いた電信の受信機として用いられていた機器である。入力端子に電流を流すと電磁石によって打鍵音が出る。本作品では打鍵部に銅箔テープで接点を作り、リレースイッチとして用いると同時に音を出すための装置として用いている。

3.2. 全体の動作の概要

以上で説明した 3 つの装置を相互接続することで (図 3 右上を参照)、全体として以下のような動作を行う。

1. 遅延回路に電気パルスが入ってきて、一定時間後にパルスを再出力する。
2. 出力されたパルスが電鍵音響器を鳴らす。
3. 電鍵音響器とスイッチが働き、遅延回路とカウンタ回路の 2 つをトリガーする
4. カウンタ回路は入力されると光る LED を切り替える。今回の場合は 10 個の LED を 1 つずつ切り替える。
5. LED は光ファイバーで、遅延回路のフォトトランジスタに繋がれていて、紙と黒鉛でできた抵抗に流れる電流を切り替える。

6. 光ファイバーが有効にした抵抗値が遅延回路の遅延時間を変化させる。
7. 1に戻る。

以上の流れを踏むことで EDTAC は 10 種類の抵抗値に応じた時間の長さごとに電鍵音響器がトリガーされ、音が鳴る。10 回の不均一な時間間隔（以下、シーケンスと呼ぶ）の打鍵を規則的に繰り返し続け、同じ抵抗値を用いて同じ LED とフォトトランジスタの組み合わせを光ファイバーで繋げば理論上は再現性のあるシーケンスが得られることになる。

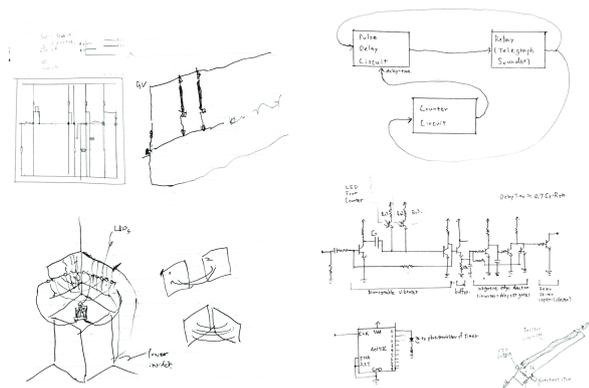


図 3: EDTAC 制作スケッチより。左上：回路レイアウト検討と抵抗モジュールの接続イメージ、左下：展示イメージ、右上：各モジュールの関係性、右下：回路図スケッチと抵抗モジュールの最終版スケッチ。

3.3. 作品発表

本作品は筆者が 2018 年 9 月から 11 月まで滞在した School for Poetic Computation Fall 2018 Class の中で制作され、11 月 10,11 日に行われた Student Showcase にて展示された。

展示に際して、壁に取り付け可能なフックを回路彫刻背面に取り付け、部屋の隅に直角に並ぶように設置した。回路のすぐ下に電鍵音響器が置けるような棚を設置してある。

またその後 2018 年 12 月 20 日に九州大学大橋キャンパス音響特殊棟にて行われた音楽イベント **FREQ x HARDCORE AMBIENCE** の中で、演奏の一部として EDTAC を使用した。パフォーマンスはじめに電源を入れ、演奏中終始稼働している状態になっており、EDTAC の電源を切ると共にパフォーマンス終了となった。SFPC のときのように取り付けられる壁面が無かったため、回路は譜面台に立てかける形で、電鍵音響器は水平にした譜面台の上に設置した。演奏はじめは電鍵音響器の生音を使用していたが、演奏途中からはマイクで増幅してすぐ傍に置いてあるスピーカー

から拡声した。またメトロノームのような使い方として、演奏中に EDTAC の打鍵のタイミングに合わせるように自転車のベルを鳴らすことを行った。

4. 考察

4.1. 制作上の理想と実際

当初は EDTAC は遅延時間を抵抗値 R とコンデンサの容量 C の組み合わせから事前に計算することができるように作っていた。元々単安定マルチバイブレータの遅延時間は $-\ln(0.5)RC \approx -0.693RC$ と理論上の計算ができるが EDTAC ではそうはなっていない。これは単安定マルチバイブレータが出力後に初期状態に復帰するためには電源から負荷抵抗 R_l を通じてコンデンサを充電するが、この充電にもまた R_l に応じた時間がかかるからだ(図 4 参照)。これを回避する方法としては例えば CMOS ロジックゲートで単安定マルチバイブレータを構成して負荷抵抗を 0 にすることで充電時間を限り無く短くするなどが考えられる。

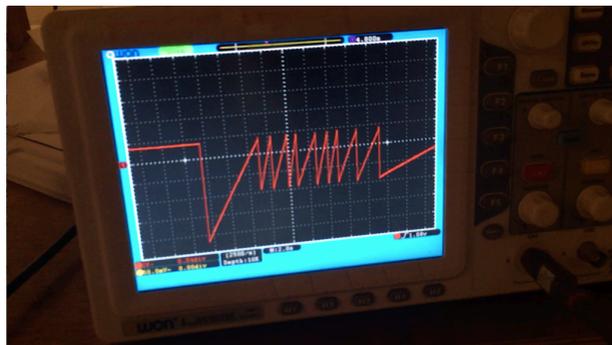


図 4: 実験中に遅延時間を決める抵抗部分(回路図の C1 右側)の電位を測った写真。静止状態ではじめにトリガーをしたときは -4V まで電位が下がっているがその後はコンデンサの充電完了前に次のトリガーが入力されているため -2V ほどまでしか下がっていない。

その上で、光ファイバーでつなぐ LED とフォトトランジスタの組み合わせを変えることで、相対的な抵抗値の違いに応じたシーケンスを生成できるので音を出すために任意の時間イベントを再現性を持って制御できるシステムを作ることという音プログラミングの定義、また既存のコンピューターでは実現できない時間構造という当初の思想は達成できたと言える。

4.2. PCM との対比、プログラミングとしての発展性

EDTAC が区切る時間の長さは抵抗値とコンデンサの容量という物理的なパラメーターで指定されるため、そのプログラムは完全に離散化されていない。PCM と

対比したときに、理論的に言えば時間の最小単位が存在しないということが大きな違いとして挙げられる。

ただし、今回制作した LED を一つずつ切り替えるシステムではより複雑なシーケンスを得るためには欲しい時間シーケンスの数だけ LED を増やさなければならぬことになる。LED が同時に複数個点灯するバイナリカウンタやジョンソンカウンタ、グレイコードカウンタのようなアルゴリズムのカウンタ回路を用いる事で少ない LED の個数で複雑なシーケンスを得ることができるだろう。

またそのように複雑なシーケンスの実現のためにはカウンタ回路の再制作が必要など、プログラミングを用いた表現の特徴である小さな基本処理を組み合わせ再利用する事で最終的に複雑な処理を実現する、モジュール性には欠けていて発展性が少ない。この点は音プログラミングの最大公約数的定義を歴史的経緯から考察するプロセスをとった結果として、プログラミングが可能にする表現の特徴への着目が足りていなかったことが理由として挙げられ、今後の課題である。

5. まとめ

本稿では時間を計算する機能のみを持ったコンピュータとしての回路彫刻作品「Electronic Delay Time Automatic Calculator」(以下、EDTAC)の制作を通じて、今日計算機を用いて音を生成することの意味を再考した。かつてオルタナティブな音の生成の手段となっていた音のプログラミングが既存の音楽の再生産になりつつある現状を踏まえ、メディア考古学のアプローチで音のプログラミングの歴史を遡り、PCM という普遍的な符号化形式が使われる前の事例を見ることで、広義の音のプログラミングを「音を出すために任意の時間イベントを再現性を持って制御できるシステムを作る」と再定義した。そして異なる音プログラミングの可能性として既存のコンピュータの構造では実現できない、時間の長さを操作する音プログラミングを提案し、そのシステムの提示そのものを回路彫刻作品という形式で行った。作品は遅延回路、カウンタ回路、電鍵音響器の3つで構成され、電気パルスが遅延時間を自己の出力をトリガーに変化させながらフィードバックすることで再現性のある、不均一な打鍵を行う。

本制作によって、計算機を用いて音を生成することの意味を再考する、という当初の目的自体は達成したものの、モジュール性・小さな処理の組み合わせと再利用といったプログラミングが可能にする表現の特徴への着目は欠けていたことは今後の課題である。

6. 謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科研費・若手研究(A)ポストデジタル以降の音を生み出す構造の構築[17H04772]に関する調査の助成及びかけはし芸術文化振興財団の支援を受け実施された。また本作品は松浦が2018年9月から11月まで滞在したSchool for Poetic Computation 2018 Fall Classの中で制作された。

7. 参考文献

- Ariza, C. (2011, 9). Two Pioneering Projects from the Early History of Computer-Aided Algorithmic Composition. *Computer Music Journal* 35(3), 40–56.
- Bell, R. (2018, nov). Limits in Algorithmic Dance Music. *Dancecult* 10(1).
- Branwyn, G. (2016). The Interactive Sound Art of Peter Vogel. <https://makezine.com/2016/01/31/the-interactive-sound-art-of-peter-vogel/>. 2019年1月24日閲覧.
- Chun, W. H. K. (2005, jan). On Software, or the Persistence of Visual Knowledge. *Grey Room* 18, 26–51.
- Collins, N. and A. McLean (2014). Algorave: A survey of the history, aesthetics and technology of live performance of algorithmic electronic dance music. In *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, London, United Kingdom, pp. 355–358. Goldsmiths, University of London.
- Doornbusch, P. (2004, mar). Computer Sound Synthesis in 1951: The Music of CSIRAC. *Computer Music Journal* 28(1), 10–25.
- Doornbusch, P. (2016). How Australia played the world's first music on a computer. <https://theconversation.com/how-australia-played-the-worlds-first-music-on-a-computer-60381> 2019年1月20日閲覧.
- Hartley, R. V. L. (1928, jul). Transmission of Information. *Bell System Technical Journal* 7(3), 535–563.
- Nishino, H. and R. Nakatsu (2016). Computer Music Languages and Systems: The Synergy Between Technology and Creativity. In *Handbook of Digital Games and Entertainment Technologies*.
- Nyquist, H. (1928, apr). Certain Topics in Telegraph Transmission Theory. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* 47(2), 617–644.

- Oliver, B. M., J. R. Pierce, and C. E. Shannon (1948, nov). The Philosophy of PCM. *Proceedings of the IRE* 36(11), 1324-1331.
- Pop, M. (2001). オヴァルプロセス講義 オヴァルのメソッドとその音楽的アプローチ. In *ポスト・テクノ (ロジー) ミュージック—拡散する「音楽」、解体する「人間」*, Chapter 2 - 5, pp. 220-243. 大村書店.
- Puckette, M. (2015). The sampling theorem and its discontents. <http://msp.ucsd.edu/Publications/icmc15.pdf>. keynote speech in ICMC 2015.
- Reeves, A. H. (1942, feb). Electric signaling system.
- Shannon, C. E. (1948, jul). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal* 27(3), 379-423.
- Vardalas, J. (2012). Your Engineering Heritage: Pulse Code Modulation: It all Started 75 Years Ago with Alec Reeves - IEEE-USA InSight.
- カスコーン, キ. (2005). 失敗の美学 現代のコンピュータ音楽における「ポスト・デジタル」的傾向. *ユリイカ 特集*ポスト・ノイズ 越境するサウンド* 37(58-69). 長壁純子訳.
- フータモ, エ. (2015). *メディア考古学: 過去・現在・未来の対話のために*. NTT 出版. 太田純貴訳.
- 久保田, 晃., 野. 樺木, and 敦. 佐々木 (2001). *ポスト・テクノ (ロジー) ミュージック—拡散する「音楽」、解体する「人間」*. 大村書店.
- 高橋, 士. (1987). *キネチックアートの製作*. 多摩美術大学研究紀要 3, 149-156.
- 山本, 一. and 眞. 三輪 (2015). 算道 - 演算によって計算が表出する瞬間 -. *先端芸術音楽創作学会 会報* 7(3), 13-18.
- 谷口, 文., 克. 中川, and 裕. 福田 (2015). *音響メディア史 (「シリーズ」メディアの未来, 5)*. ナカニシヤ出版.

8. 参考作品

- Peter Vogel, 1980 *Moving Lights* <https://bitforms.art/archives/vogel/moving-lights>
- Eirik Brandal, 2015 *hexagon #1* <https://eirikbrandal.com/hexagon-1/>
- Ioana Vreme Moser, 2017 *Zurkubuk* . *Nux Stridens* <http://ioanavrememoser.com/post/165450875252/zurkubuk>

- Ralf Baecker, 2011, *Irrational Computing* <http://www.rlfbckr.org/work/irrational-computing/>
- CW&T ,2011, *1 Bit 1Hz CPU* <https://cwandt.com/products/1-bit-1hz-cpu>

9. 著者プロフィール

松浦知也 (Tomoya MATSUURA)

SoundMaker: 音・音楽を作るためにその生成・記述のシステム自体を作ることから始めるアプローチを取る音楽家・サウンドアーティスト。近作はメディア考古学的視点から有りうるオルタナティブな音表現の可能性を追求し物理モデリングシンセサイザーを再物理化するインスタレーション『Aphysical Unmodeling Instrument』やオーディオフィードバックを用いた電子楽器 Exidiophone の開発とそれを用いたソロ演奏、蓮沼執太フルフィルでの演奏など。1994年神奈川県生まれ。2017年東京藝術大学音楽学部音楽環境創造科を卒業。学士(音楽)。現在九州大学大学院芸術工学府修士課程に在籍、2018年秋に School for Poetic Computation に留学。

城一裕 (Kazuhiro JO)

1977年福島県生まれ。東京藝術大学芸術情報センター [AMC] 助教、情報科学芸術大学院大学 [IAMAS] 講師を経て、2016年3月より九州大学芸術工学研究院准教授。山口情報芸術センター [YCAM] 専門委員(非常勤)。博士(芸術工学)。専門はメディア・アート。音響学とインタラクティブデザインを背景とした現在の主なプロジェクトには、参加型の音楽の実践である「The SINE WAVE ORCHESTRA」、ありえたかもしれない今をつくりだす「車輪の再発明」、音・文字・グラフィックの関係性を考える「phono/graph」などがある。



この作品は、クリエイティブ・コモンズの表示 - 非営利 - 改変禁止 4.0 国際 ライセンスで提供されています。ライセンスの写しをご覧ください。 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> をご覧くださいか、Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA までお手紙をお送りください。