

卒業論文

「Waveform Media」



中村 優介

慶應義塾大学 総合政策学部

学籍番号 70906162

2013年1月

指導教員 田中浩也准教授

目次

第1章 はじめに

- 1.1 概要 2
- 1.2 背景 2

第2章 関連研究

- 2.1 「Speaker」 7
- 2.2 「3Dprinted Records」 8

第3章 設計

- 3.1 音声記録媒体の歴史 10
- 3.2 音に関する前提知識 18
- 3.3 要求される機能 21

第4章 実装

- 4.1 Rec&Restriction.pd（録音・再生ソフト） 25
- 4.2 CircleMaker.pde（音声波形展開図生成ソフト） 27
- 4.3 SoundTxtMaker.pde（画像処理ソフト） 29
- 4.4 実装実験 30

第5章 評価実験 43

第6章 今後の展望 50

参考資料 51

図引用 52

謝辞 53

第1章 はじめに

1.1 概要

人の声等の音から3次元オブジェクトを制作し、その3次元オブジェクトから元のメッセージを再び再現することが出来るという一連のシステム、ソフトウェアを開発した。このシステムでは2秒間の録音に対してその音声データより波形の断面図を多数生成し、それらを繋げることで元の音声データの波形を再現する。またそうして再現された波形オブジェクトをカメラで撮影し、その画像をソフトウェアに読み込ませることで元の音声を再び再生することを可能としている。

1.2 背景

近年レーザーカッター（図1.2-a）や3Dプリンタ（図1.2-b）等といったデジタルファブリケーションを支援する工作機械が比較的安価になったことで、それらを利用する人々の裾野が広がってきていると言える。それと同時にそれらの工作機械を利用することを前提としたソフトウェア、つくることを支援するためのソフトウェアが一般のユーザーによって多く開発、公開されており様々なパーソナルファブリケーションを実現するための環境が試行錯誤されている。

こうした時代の流れにおいて注目すべき点は、それらのソフトウェアは決して営利企業に属するプロフェッショナルな人々によって開発された製品ということではなく、一般のユーザーが個人の「おもしろいものをつくりたい!」という衝動によって開発を行なっている点であることだ。

こうした一般ユーザーの衝動は今に始まったことではなく、Do it yourself (DIY) という言葉に表されるように以前より存在していた。しかしながらDIYを行うには非常に専門的な知識であったり、工作を行う為の熟練した「技」が必要とされていたことから一部のエクストリームユーザー（極端な利用者）らがごく限られたコミュニティで活動をしていた。この問題を解決するのが先に述べたレーザーカッターや3Dプリンタ等といったCNC（Computer Numerically Controlled コンピュータ数値制御）工作機械（図1.2-c）や、

Arduino（図1.2-d）やProcessing（図1.2-e）等の開発環境の一般普及だ。CNC工作機械の大きな特徴は、コンピュータ上で制作したデータをもとに加工を自動で行なってくれることから熟練した身体的工作スキルを持たない人であっても美しい造形物を比較的容易につくることが可能となるということだ。

ArduinoやProcessing等の開発環境の普及もCNC工作機械と同様に「ものづくりの一般化」へ大きく貢献している。従来はAdobe社のIllustratorやPhotoshop等の高価で使用方法の限られたソフトウェアによってデータを作成するというのが一般的であったが、最近はそのような設計支援ソフトウェアまでも自らつくってしまおうと考えてしまう人が多く出現している。その大きな理由としては、ソフトウェアの制作が比較的容易になったということがあげられる。

ここではその代表とも言えるArduinoとProcessingについて紹介しよう。Arduinoとは電源回路、基準発振器、USBポート等が予め同一の基板に載せられたマイコンボードであり、プログラムの書き換えも専用のソフトウェアで簡単に行うこと出来る電子工作のスタートアップキットのようなものである。Arduinoを利用することで、電子工作に触れたことのない人であっても電子工作に挑戦することが可能となった。またProcessingとは

『Processing（プロセッシング）は、Casey Reas と Benjamin Fry によるオープンソースプロジェクトであり、かつてはMITメディアラボで開発されていた。電子アートとビジュアルデザインのためのプログラミング言語であり、統合開発環境 (IDE) である。視覚的なフィードバックが即座に得られるため、初心者がプログラミングを学習するのに適しており、電子スケッチブックの基盤としても利用できる。Javaを単純化し、グラフィック機能に特化した言語といえる。』 - [Wikipedia Processing](#)より

というものであり、こちらも初心者に適しているかつ高度なプログラムが組める。

以上の要因により現在メイカームーブメントという現象が流行っている。

こうした背景の中、筆者もなにか一連の体験をつくりだしたいと考え、今回の作品を制作した。本作品「Soundwave Media」は情報の物質化や普段別の目的（身につけたり飾る等）で使えるような記録媒体を目指しており、人の声を実際の物質とすることでメッセージの価値や音の楽しさをユーザーに感じてもらえる仕組みとなっている。またファブ

リケーションするデータを物質的ではない人の声からつくることからユーザーは特殊な技能の習得を必要とされず「こんなメッセージを伝えたいなあ」などと考えながら楽しくつくることが出来るという点も特徴としてあげられる。

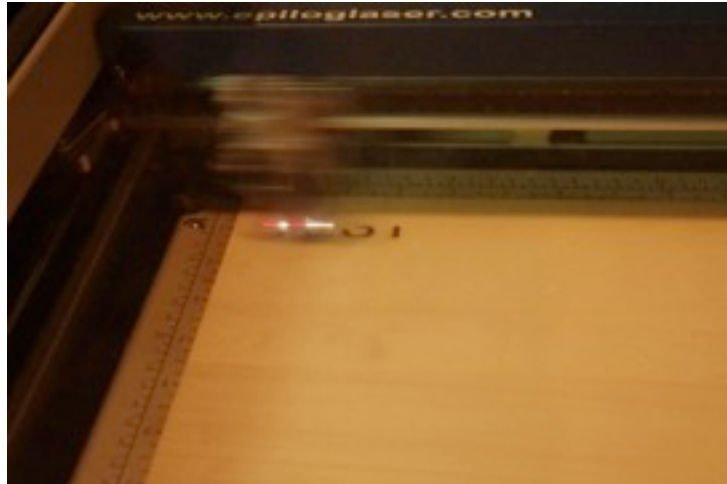


図1.2-a レーザーカッター



図1.2-b The MakerBot Replicator



図1.2-c CNCミリングマシン

```

Arduino - 0011 Alpha
File Edit Sketch Tools Help
Sketch
/* Blink
 *
 * The basic Arduino example. Turns on an LED on for one second,
 * then off for one second, and so on... We use pin 13 because,
 * depending on your Arduino board, it has either a built-in LED
 * or a built-in resistor so that you need only an LED.
 *
 * http://www.arduino.cc/en/Tutorial/Blink
 */

int ledPin = 13; // LED connected to digital pin 13

void setup()      // run once, when the sketch starts
{
  pinMode(ledPin, OUTPUT); // sets the digital pin as output
}

void loop()      // run over and over again
{
  digitalWrite(ledPin, HIGH); // sets the LED on
  delay(1000);                // waits for a second
  digitalWrite(ledPin, LOW);  // sets the LED off
  delay(1000);                // waits for a second
}

Done compiling
Binary sketch size: 3008 bytes (of a 32768 byte maximum)
32
  
```



図1.2-d Arduino



図1.2-e Processing

第2章 関連研究

本研究の関連研究として、音声から作品をつくりだしたり、デジタルファブリケーションによって音声記録媒体を制作するといった研究を紹介する。

2.1 「Speaker」 by Computational Design Lab

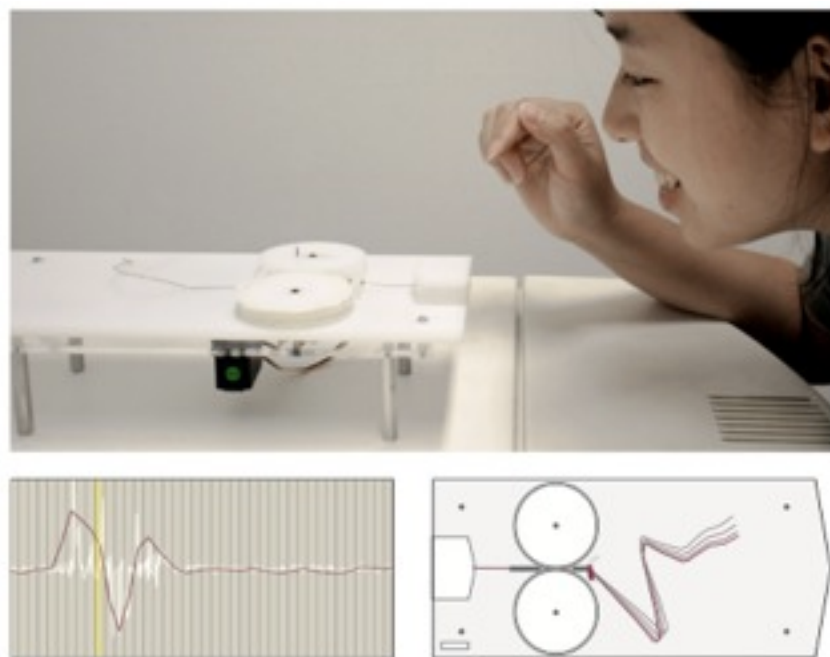


図2.1-a 「Speaker」筐体



図2.1-b 「Speaker」によってつくられたアクセサリ

「Speaker」はアメリカのカーネギーメロン大学に属するComputational Design Labが制作したインタラクティブアートである。

マイクに向かってメッセージを発すると、その音声波形をもとにワイヤーを自動で曲げ音声波形の形にしてくれるというものである（図2.1-a）。そうしてつくられた波形型ワイヤーはその後ピアス等といったアクセサリーとして身につけることができる（図2.1-b）。

「Speaker」はインタラクティブな作品であるが、つくられるモノの設計データがユーザーの声であるという点から物質に「自分の声からできた」という価値を持たせ、さらに日常的に使用することの出来るアクセサリーに落とし込んでいることから実用性も有している。このデータをつくる楽しさと出来上がるモノに価値があるという「Speaker」は筆者の研究が目指すところであり、また研究のアイディアの素ともなった。

2.2 「3D Printed Records」 by amandaghassaei



図2.2-a 「3D Printed Records」

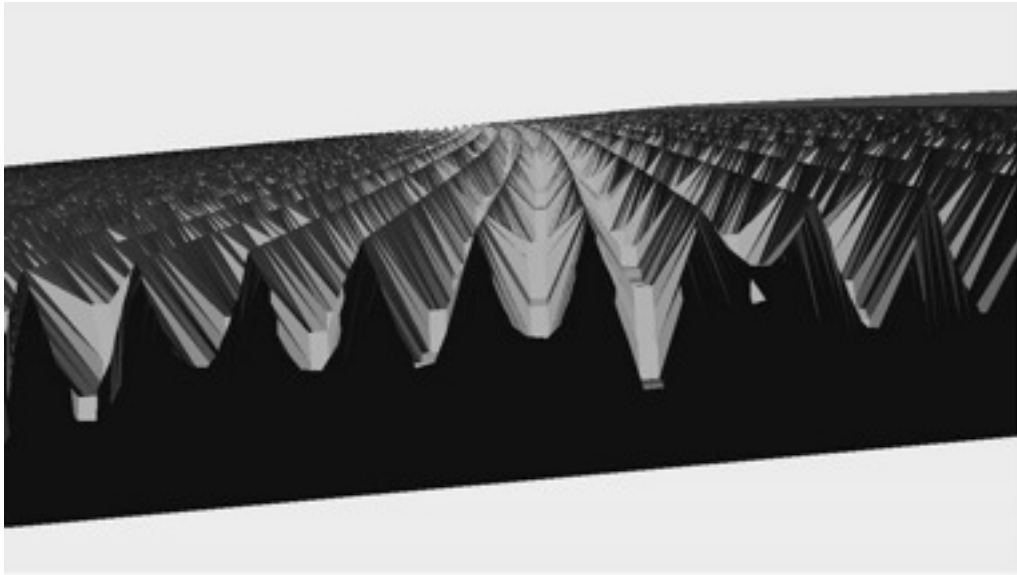


図2.2-b 3Dデータ拡大図

「3D Printed Records」とはその名の通り3Dプリンタによってレコードをつくるというものだ（図2.2-a）。仕組みとしては、ソフトウェアによってrawオーディオデータからレコードの溝の形状を計算し自動的に3Dプリンタで利用可能な3次元メッシュのデータ（図2.2-b）をつくり出すというものである。あとはその3次元データを高精細3Dプリンタによって出力すればレコードをつくるのが可能なのだ。

「3D Printed Records」はデジタルファブリケーションによって音声記録媒体を制作するという研究モチベーションが筆者の研究モチベーションと同様であった為、関連研究としてあげることとする。

第3章 設計

本章では、作品を制作するにあたっての前提知識や要求される機能を述べることとする。

3.1 音声記録媒体の歴史

まず、音声記録媒体を制作する上で欠かせないのが歴史を知ることである。過去をさかのぼり、音声記録媒体の種類や歴史に対する知識を得たことによって「Waveform Media」という従来とは異なる音声記録媒体の制作に繋がったといえる。

3.1-1 オルゴール

完全な記録媒体というわけではないが、任意のメロディーを何時でも好きなときに、また小型のものであれば好きな場所で聴くことができるという点から録音、再生の原点としてオルゴールをあげることにする。オルゴールの始まりとされているのは14世紀、紐で引っ張ることにより鐘を鳴らし人々に時を知らせるカリヨン（カロヨン）を自動化した自動カリヨンと呼ばれるものとされている。

それが15世紀始めにゼンマイが考案されたことにより小型化が進み、さらに音を鳴らす仕組みとして鐘から櫛歯が使用されるようになりオルゴールが誕生した。この櫛歯を弾く方式を用いて造られたオルゴールの原型が、1976年、スイスの時計職人アントワーヌ・ファールによって造られた。

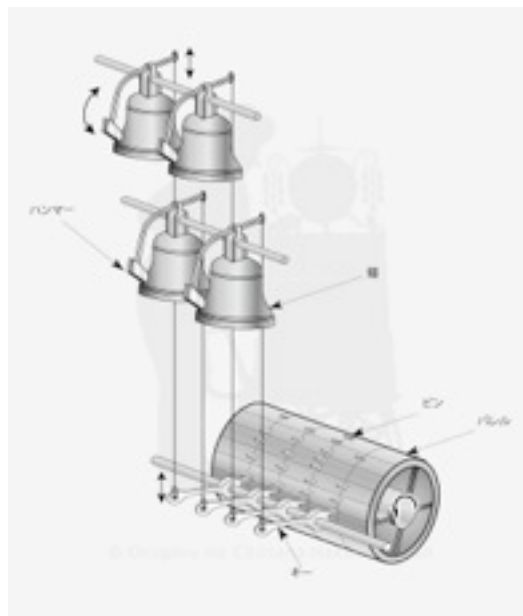


図3.1-a カリヨンの仕組み



図3.1-b 世界最古のオルゴール（アントワーヌ・ファール作）

3.1-2 レコード

■ 蝋管再生機（フォノグラフ）

レコードの原点は、1877年、トーマス・エジソンが開発した蝋管再生機（フォノグラフ）である。仕組みは蝋を円柱状にしたものに対して、人の声で薄膜を振動させ先についた針がその振動を溝として彫るというものだ。刻まれた溝は人の声の大きさに応じており、大きい声を記録した場合はより深い溝として刻まれる。この蝋管式は、記録媒体の耐久性が低い（蝋でつくられているため落とすと割れてしまう、ほこりに弱い等）等の理由で、新たな方式のものが登場することとなる。



図3.1-c フォノグラフ

■蓄音機（グラフォフォン）

1885年、ベルリナーがアレクサンダー・グラハム・ベルらと共に録音と再生の針を別にした、保存のきかない錫箔（すずはく）をワックスに塗り替えたり等の改良をフォノグラフに加え誕生させたものがグラフォフォンである。



図3.1-d グラフォフォン

■蓄音機（グラモフォン）

前述したフォノグラフ、グラフォフォンは共に音の振動を張りの圧力の強弱として刻む縦振動の記録再生方式であった。それに対しベルの元を去ったベルリナーは1887年、音の振動を横振動に変換してシリンダーに刻む方法を考えた。横振動での記録再生に成功したベルリナーは、その後円盤状のものに振動を刻むというグラモフォンを開発した。

このグラモフォンがフォノグラフ、グラフォフォンに対して記録媒体の複製の容易であったことなどからその将来性を支持された。



図3.1-e グラモフォン

■フィルモン

フィルモンとは、1937年に日本フィルモン社が開発したベルト状の樹脂（音帯）に100本近くの溝を刻んで音声を記録した媒体である。形状はセルロイド系の合成樹脂を主成分とする幅35ミリ×長さ約13メートルのエンドレステープ（無端帯）で、30分以上の録音が可能であった。



図3.1-f フィルモン

■ソノシート

1958年、フランスのS.A.I.P.というメーカーにて開発された塩化ビニールでできたレコード盤である。1950～60年代、レコードがまだまだ高価であった時代にレコードより圧倒的に安い（レコードが2000円前後であったのに対しソノシートは数百円程度）ことから普及した。しかしながら材質がフィルムであるということから耐久性が低く、またノイズも取り込んでしまう為に品質はそれほどよくなかったとされる。



図3.1-g ソノシート

3.1-3 磁気記録

■テレグラフオン

世界初の磁気記録は1888年、オリバン・スミスが考案した針金への録音技術である。しかしながら彼がこの技術を実現させるということにはなかった。磁気記録を実現させたのは1898年、デンマークのヴォルデマール・ポールセンだ。彼は円柱に鋼線を巻きつけ、鋼線を挟むように読み取りヘッド（軟鉄のコアにコイルを巻いた電磁石）を取り付けたテレグラフオンを開発した。コイルに音声信号を載せた電流を流しながら円筒を回転させると、コアから出る磁束が鋼線を次々と磁化してゆき情報が記録されるという仕組みとなっている。再生はこれと逆のしくみで、円筒を回転すると磁化された鋼線の磁束の変化により、ヘッドのコイルに電流が流れる。この電流をコイルと振動板からなる受話器に送って音声を再生させるのだ。

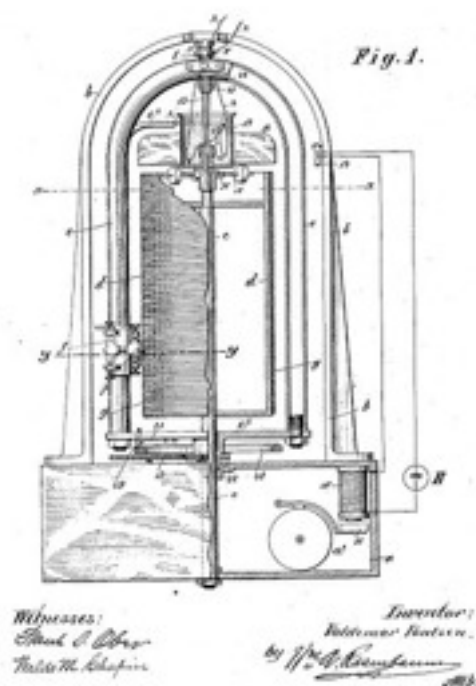


図3.1-h ポールマンが考案したテレグラフオン

■テープレコーダー

この後しばらくは音質向上の困難さやワイヤー伸びの問題を伴い、この技術はあまり一般的なものとはならなかった。1928年この磁気記録媒体をより扱いやすく耐久性のあるプラスチックテープにしたのはドイツのフリッツ・フロイマーだ。彼がつくりあげたこのテープレコーダーの原型をもとに、様々な企業が開発を加え1939年～1941年ごろに音質が飛躍的に改善され実用に耐えうる長時間高音質録音が可能となった。



図3.1-i オープンリール

■8トラック

8トラック（8トラック・カートリッジテープ）は、カートリッジ式の磁気テープ再生装置および媒体の一種を指す名称であり、1965年、リアジェット社の創業者、ビル・リアが中心となり開発された音声記録媒体だ。



図3.1-j 8トラック

■CD (Compact Disc)

1981年、SONYとフィリップス社によって開発されたデジタル情報を記録するためのメディア。「1時間の記録でよいから、自動車のダッシュボードに入る小さいディスクを」というコンセプトのもとに開発され、レコードに代わる次世代のメディアとして普及した。仕組みとしては、直径12 c mのディスク基板にアルミ膜と保護膜をつけた光ディスクで（8 c mのものもある）、基板表面に細かいピット（凹み）をつけて0・1からなる16ビットのデジタル信号を記録している。凹みの境界部で光が乱反射を起すため、反射光に強弱ができ、これを読み取って再生しており、読み取りヘッドが非接触のためディスク面を傷つけることが少ない特徴がある。



図3.1-k CD (Compact Disc)

■MD (Mini Disc)

ソニーが1992年に発表した、デジタルオーディオの光学ディスク記録方式、および、その媒体である。基本的にはCDと同じ構造であるが、大きく異なるのは、人間の耳では聞くことの出来ない大きな音と同時に聞こえるごく小さな音や高低音をカットしているという点である。これによりCDの約5分の1にまで情報を圧縮することに成功したのだ。



図3.1-l MD (Mini Disc)

3.2 音に関する前提知識

本研究で音を扱うにあたり、そもそも音とはこういった仕組みで発生しているのかといったことや音をコンピュータ上で扱うにはどうしたらよいのか等といった前提知識を述べる。

3.2-1 音の基礎知識

■音とは？

音とは空気の振動である。振動によって空気の中に圧力が平均（大気圧）より高い部分と低い部分とができて、それが波（音波）として伝わってゆくのだ。圧力の高低の変化により我々の耳の鼓膜が振動することで音が聞こえるという仕組みとなっている。

（波というと進行方向に対して垂直に振れるものを想像しがちだが、音波は縦波（疎密波）と言われ進行方向と同じ向きに振れる波である（図3.2-a））

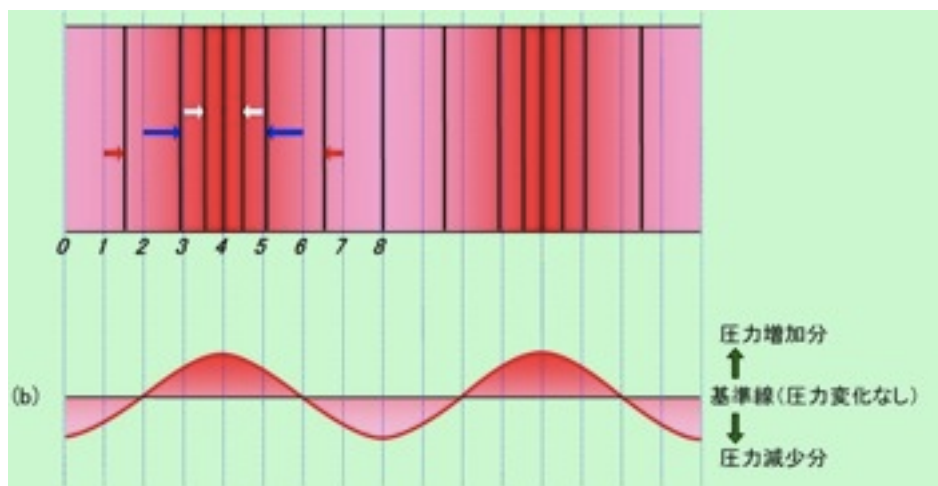


図3.2-a 縦波と横波の関係（雑科学ホームより）

■音の大きさ

同じ高さの音の場合、圧力の高低差が大きいほど、大きな音に感じる。この圧力の高低差の1/2を振幅と呼び、振幅が大きいほど大きな音に聞こえるのだ（図3.2-b）。

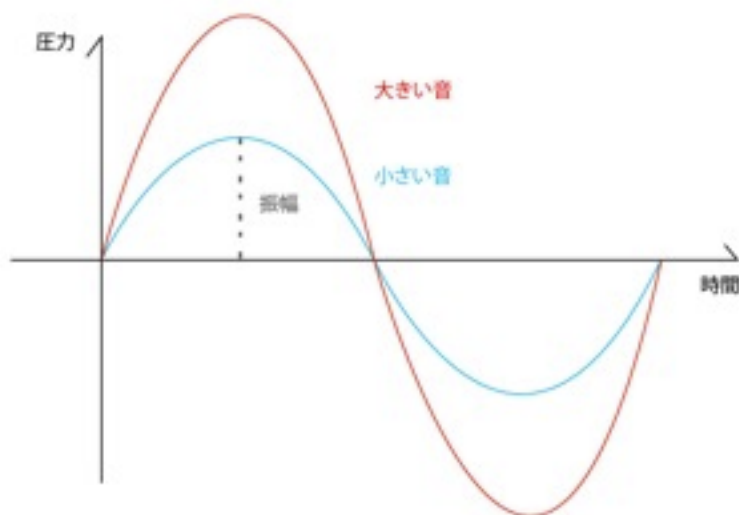


図3.2-b 音の大小

■音の高さ

音が耳に達すると圧力の高低の変化により鼓膜が振動する。一定の時間内で、圧力の高低の変化の回数を振動数といい、振動数が大きいほど高い音に感じる（図3.2-c）。振動数の単位には、Hz(ヘルツ)をもちいる。（人間が耳で聞くことができる周波数は個人差はあるものの、20～20,000Hzといわれている）。

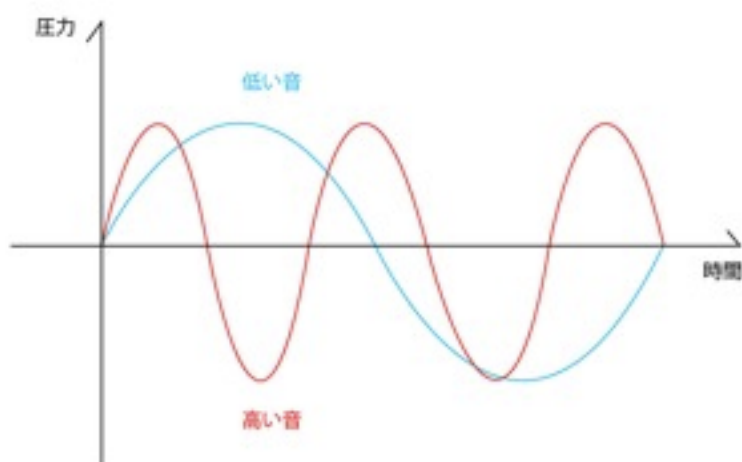


図3.2-c 音の高低

3.2-2 音のデジタル化

■圧力変化を電圧変化に

音をデジタル化するには、まず、マイクを用いて電気信号に変換する。マイクは空気の圧力変化を電圧に変換する装置であり、マイクを通して音が連続した電圧値をもつアナログ信号に変換が出来る。

■デジタル化

音は時間的に連続し、なおかつ、その圧力の値も連続的に変化する。このように、時間的、数値的に連続なデータ（アナログ値）をコンピュータで扱えるような不連続な値（デジタル値）に変換をすることをデジタル化という。

■サンプリング（時間的離散化）

連続的に変化するデータ（アナログ値）を、コンピュータでは処理できないので、一定時間ごとに電圧値を測定し不連続な値に変換する。この作業をサンプリングという（図3.2-aにあるように指定した時間における各電圧値（赤い点）を読み取る）。

1秒あたりの測定回数をサンプリング周波数と呼ぶ。このサンプリング周波数は、電話の場合が8000Hz、CDの場合が44,100Hzとなっている。

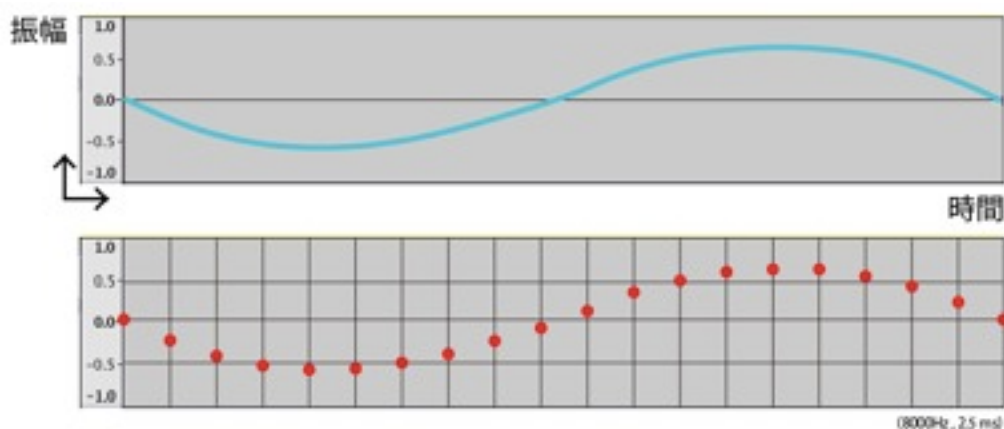


図3.2-d サンプリング（8000Hz、25ms）

3.3 要求される機能

まず「Waveform Media」の大まかな流れとして、

- 1.音を録音し数値化する
- 2.数値化した音声をもとにファブリケーションするための展開図を生成する
- 3.レーザーカットする
- 4.ファブリケーションしたオブジェクトを撮影する
- 5.撮影された画像から再び音の数値を生成する
- 6.数値化されたデータから音声を再生する

という5つの段階を想定した。

以上のことをふまえ、以下では要求される機能を述べてゆく。

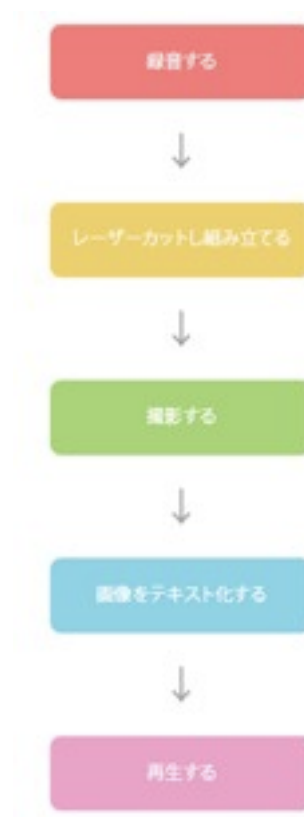


図3.3-a 「Waveform Media」の流れ

3.3-1 音声の数値化

前述した通り、音は波として扱われる。それをデジタルなデータとして扱う場合、音を数値化してやる必要がある。本研究では、その部分をPuredataで行うこととした。

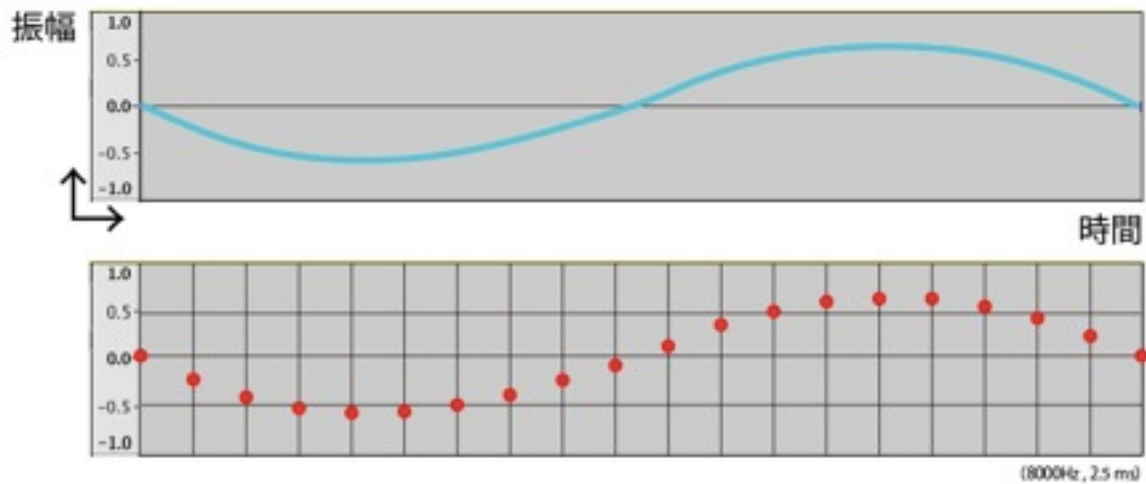


図3.3-b サンプリング

これにはPuredataにて録音を済ませた後、「Record 配列名 write ファイル名.txt」というパッチを設置することとする。

3.3-2 数値化された音声から波形の展開図を生成

数値化された音声を、実際のオブジェクトとして3次元にする手法としてはいくつかある。3Dプリンタによって3次元オブジェクトとしたり、レーザーカッターによって2次元の音声波形をそのまま切り出したり、音声波形を円が積層したオブジェクトとして捉え断面図の円を切り出して積層させたりすることによって表現することが可能である。

しかし3Dプリンタで3次元オブジェクトを生成するには、3Dプリンタの加工範囲や精度の問題から困難であったり、レーザーカッターによって2次元の音声波形をそのまま切り出した場合強度に問題が生じることから今回は「音声波形を円が積層したオブジェクトとして捉え断面図の円を切り出して積層させたりする」という手法（図3.3-c）をとることとした。

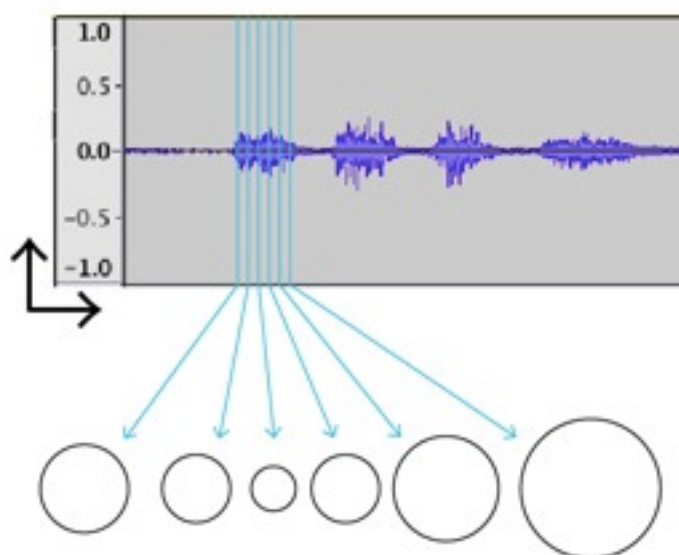


図3.3-c 波形の表現方法

3.3-3 ファブリケーションしたオブジェクトを撮影する

撮影に関してはなるべく画像処理を行いやすいよう、背景を白とする通常の撮影ブースを用い、高い解像度を得られるデジタルカメラで撮影を行うこととする。

3.3-4 撮影された画像から再び音の数値を生成する

撮影された画像から再び音の数値を生成する為には、画像処理を用いることとした。波形オブジェクトは背景が白色となるように撮影されていることから、白色でない部分（今回は黒）を画像から抽出し、その部分に一致する数値を割り当てるという手法（図3.3-d）をとることとした。

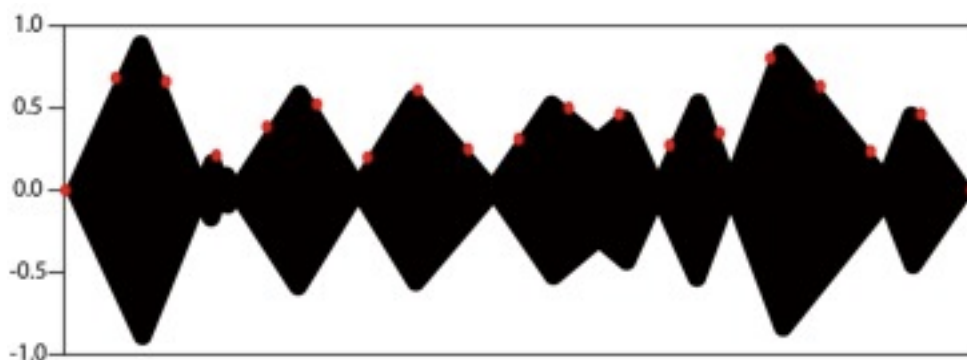


図3.3-d 画像処理方法

上の図を参考として説明をすると、黒い物体が読み込んだ画像であり、赤い丸が画像の色を黒だと判別しその部分に対応する数値を採取するという仕組みとなっている。

3.3-5 取り出した数値を音声として再生する

さきの機能により採取された数値から、再び最初に録音したメッセージを再生する必要がある。それにはテキストを読み込むという処理と読み込んだテキストから音を再生するという機能が必要になるのだが、その部分は再びPuredataにて行うこととする。

第4章 実装

4.1 Rec&Restration.pd（録音・再生ソフト）

まずはメッセージを録音しその音声波形データをテキストファイルとして出力するソフトと、波形オブジェクトを撮影し画像処理ソフトにてテキストファイルにしたものを再生するソフトウェアを実装した。この2つの処理はどちらもPuredataにて行えることから録音・再生を統合して1つのソフトとしている。

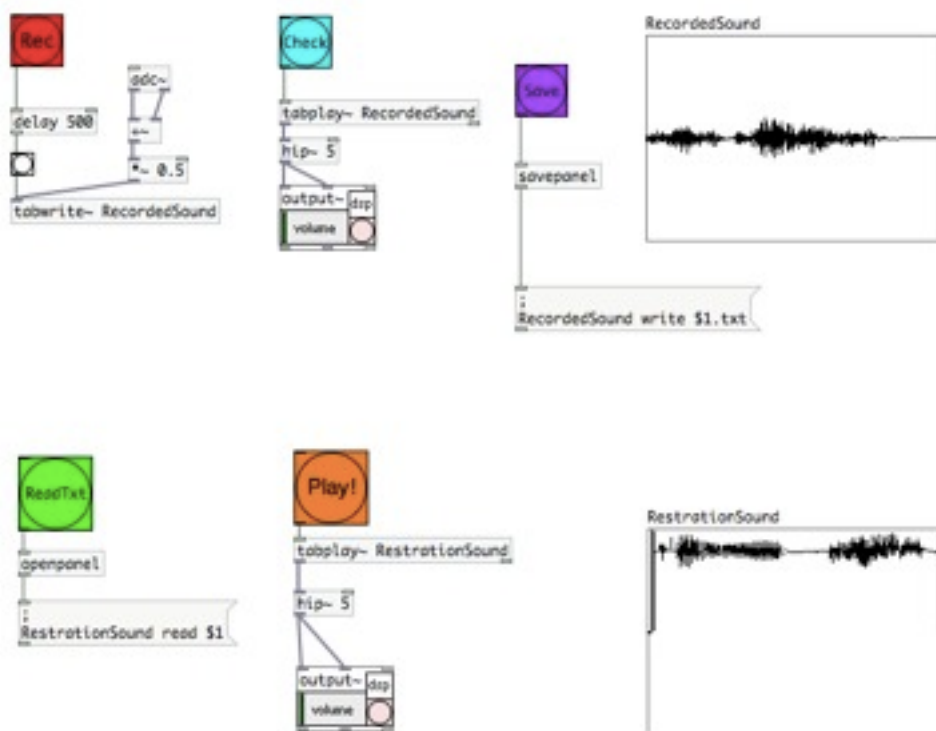


図4.1-a 「Rec&Restration.pd」操作画面

録音はUIの上半分が担っている（図4.1-a）。まずは「adc~」というパッチを設置し、マイクから録音することを可能にしている。そして「Rec」と記されているパッチは単なるbangであり2つのbangの間に「delay 500」というパッチを挟むことで「Rec」を押してから500ミリ秒遅れて録音が始まるようになっている。

録音された音は「tabwrite~ RecordSound（配列名）」と記されたパッチによって任意の配列へと音声データを格納している（格納された音声データは右側のグラフに表示される）。

上部中央の「Check」と名付けられたbangは録音された音を再生することが出来るものだ。これによって録音した音を確認し、納得のゆく音が録れるまで何度も録音することが出来る。「hip~5」は5Hzをカットオフ周波数とするハイパスフィルタ (high pass filter) であり、耳に聞こえる「音」はそのまま素通りするがDC成分（直流オフセットあるいは極端に周波数の低い成分）は通れなくなっている。スピーカやヘッドフォンに直流電圧が長時間加わるとボイスコイルが発熱してしまうので、このようなフィルタを入れることで保護している。

納得のゆく音が録れたら上部右側の「Save」bangをクリックし音声データをテキストファイルとして出力する。この際任意の名前、保存場所を指定することが出来るよう

「savepanel」パッチを設置している。そして「;RecordSound（配列名） write \$1.txt」というパッチによって、配列に格納された音声データをテキストファイルとして保存することが出来るようにしている。

再生はUIの下部が担っている。「ReadTxt」と名付けられたbangと「openpanel」により読み込みたいファイルを選択することが出来るウィンドウが開く。そして読み込みたいテキストファイルが選択されたら「;RestrictionSound（配列名） read \$1」というパッチによって任意の配列へと音声データを読み込んでいる（その際下部右側にあるグラフに視覚化される）。「Play!」というbangを「tabplay~ RestrictionSound（配列名）」繋げることで任意の配列に格納された音声データより音を再生出来るようにしている。

4.2 CircleMaker.pde（音声波形展開図生成ソフト）

録音ソフトによりテキスト化された音声データを、物質化するために設計図データを作成する必要がある。本研究では「音声波形を円が積層したオブジェクトとして捉え断面図の円を切り出して積層させたりする」という手法をとる為、テキストファイルの数値を1つずつ円として並べることとした。音声波形展開図生成ソフトはProcessingで制作している。

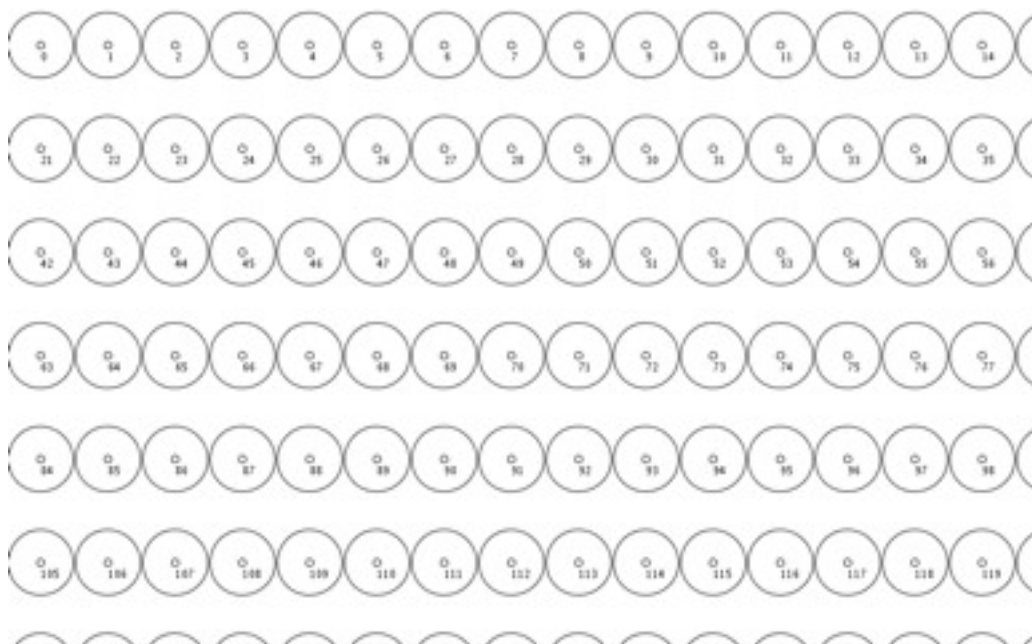


図4.2-a 「CircleMaker.pde」実行画面

仕組みは「CircleMaker.pde」と同じディレクトリに存在するテキストファイルを読み込み、そこに記されている文字列を実数へと変換し数値を配列へと格納する。そして配列に格納されている数値を半径として順番に円を描画するといったものだ（図4.2-a）。その際中心には紐を通すための小さな円と組み立てるときにわかりやすいようナンバリング付与もされるようになっている。

このデータよりレーザーカットを行い組み立てると（図4.2-b）のようになる。

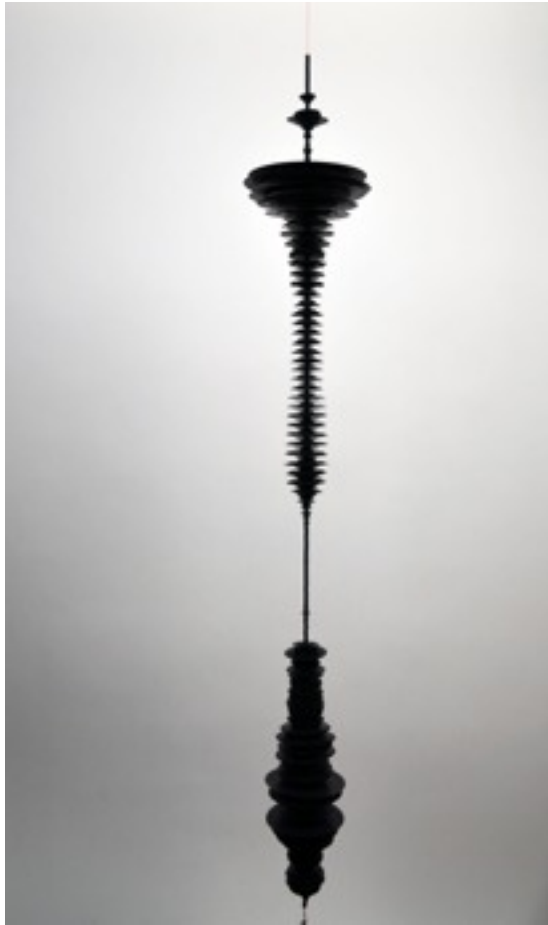


図4.2-b 組み立てられた波形オブジェクト

4.3 SoundTxtMaker.pde（画像処理ソフト）

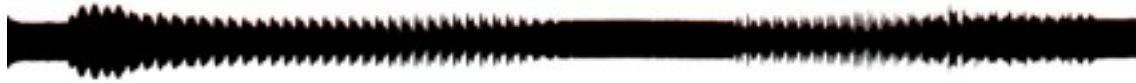


図4.3-a 「SoundTxtMaker.pde」実行画面

画像処理ソフトはProcessingにて制作している。任意の画像を読み込み、その画像の黒色の部分の位置を識別し数値化するというものである。

画像の選択は、実行画面をクリックするとファイル選択画面が開くのでそこでjpg、png、gif、tgaのいずれかを選択することが出来るようになっている。

画像が読み込まれると、 $x=0 \sim ww$ （ウインドウ横サイズ）まで左から順番に黒の位置を判別してゆく。黒と判別されるとその部分のy座標を配列に格納する（図4.3-b）。

（Puredataで読み取りやすいよう、黒と判別された部分のy座標を $y=0$ を1、 $y=hh/2$ （ウインドウ縦サイズ/2）を0、 $y=hh$ を-1と変換して配列に格納するようにしている）

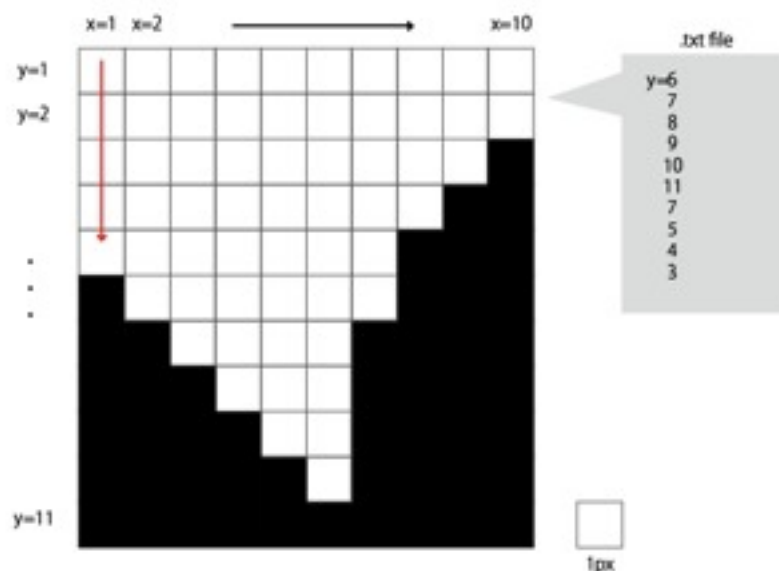


図4.3-b 画像処理の仕組み

4.4 実装実験

上で示したソフトウェアが完成するまで、筆者は多くの実験を繰り返した。ここではその実験過程を示すこととする。

実験1 ボリュームのみを採取し、波形化したサンプル

■仕組み

まずはPuredataにてボリューム情報のみを取得して波形を描くことができないかということを実験した。Puredata側の仕組みとしては、まずマイクより音量情報を1秒間に100回（100ミリ秒）で取得する。そしてその数値データを整数（int）とする。さらに無音の情報を保っていたとしても、PCに内蔵されたマイクがPC本体の音等の余計な音量を取得してしまうため、その音量情報からほぼ無音の状態には0となるようある程度の数値をマイナス（今回は-30）した。そうした音量情報をリアルタイムでProcessingにOSC通信によって送信する（図4.4-a）。

送信される音量情報はProcessingにて受信し、その音量にしたがって波形をリアルタイムで形成する。このリアルタイムで形成された波形は、ファブリケーション後の完成図を示している。納得のいく形となったら「Clear」というボタンを押し描画画面をまっさらにし、「Generate」ボタンを押す。すると先ほど形成された波形を輪切りにしたファブリケーションデータが表示される。そして「SavePDF」を押せばPDFデータとして保存されるので、これをIllustratorで読み込み、レーザーカットをすればよい（図4.4-b）。

■結果

音量情報のみで形成された波形は振動数等の音を構成する情報を含んでいない為、再生することは出来なかった。

（図4.4-c）は少ないボリュームデータより、波形をアクセサリーとしたものである。再生は出来ないものの見た目は非常によい為最終的にはこのような小さなサイズで実現したいという思いがこの時芽生えた。

実験2 2次元的な波形

■仕組み

前回の試作よりボリュームを採取する方法では本実験を成功させることが不可能だと判明した為、採取するデータを根本的に見なおすこととした。まずPuredataには元より音声情報を正確に取得するということが可能であることから、Puredataよりその情報を取得することとした。具体的な方法として、「adc~」というパッチを用いてマイクで捉えた音を波形データ（左右2系統）として取得する。取得した波形データを「tabwrite~」というパッチにより配列として記録させ、さらにその波形データを視覚的に確認することが可能となるよう作業画面に配列と同様の名前をつけたグラフを設置する。次にその波形データをテキストファイルとして出力するために「配列名 write 出力させたいテキスト名」というメッセージパッチを設置した。これにより、Puredataの設定にて指定した任意のサンプリングレートかつ配列を設置する際に指定した任意の波形データ取得数でデータを取得することが可能となる。今回は電話と同様のサンプリングレートである8000Hzで2秒間、つまり16000個の波形データを取得することとした。

そしてProcessing側であるが、毎回膨大な数の「波形の輪切り」をレーザーカットし、それを組み立て撮影していたのでは正しく音が再生出来るのかという問題を解決するのに非常に時間がかかってしまう為、ファブリケーションの手間を省き最初から2次元的な波形として捉えられるようにすることとした。その為に波形データのテキストファイルを読み込み、単純にその値をグラフのように表示させるよう描画部分は以下のようにした。

（v[]とは、読み込んだテキストファイル（文字列）を実数化した配列）

```
-----  
for (int i=1; i < lines.length; i++) {  
  stroke(0,0,0)  
  noFill();  
  v[i] = Float.parseFloat(lines[i]);  
  ellipse(t,0,1,((v[i-1]+0.5)*500));  
}
```

こうして描画された波形データをPDFとして出力させる（図4.4-d）。

■結果

出力させたPDFを撮影が行いやすいよう4枚に分割して印刷をした。この2次元的な波形を撮影し再生処理を行ったところ、クリアな音質ではないが最初に録音した「こんにちは」と判別が可能な程に音声を再現することに成功した。

これにより音声情報取得の部分の仕組みは完成し、残すは波形を輪切りにしたデータをレーザーカッターによってカットしファブリケーションした波形オブジェクトから再生出来るようにするという部分となった。



図4.4-d 2次元的に表現された音声波形のPDF

実験3 サンプリングレートを5000として0.8秒、4000枚の波形オブジェクトを作製

■仕組み

今回は前回の実験をもとに、実際に波形オブジェクトを製作し、そこから音声再生出来るのかという実験を行うこととする。したがって、Puredataによる音声情報の取得部分は前回同様の仕組みとしProcessingによるファブリケーションデータの生成に関する部分を変更した。前回は波形データによる元の音源の再現性を実験するために2次元の波形が生成されるようにしたが、今回はファブリケーションまでを行うことを目的としたため、Puredataによって生成されたテキストデータの値から波形の断面図が作成されるようにした。

まずはloadStringsによって同ディレクトリ内にあるtxtファイルを配列として読み込む。その後その配列に格納された数値をもとに丸を描画する。その際、元のデータの数値が非常に小さいためその数値に200をかけている。さらにファブリケーションの際に、レーザーカッターのエアーによって切りだされた円が吹き飛ばされてしまい順序が不明になってしまうことを改善するために、それぞれの円が何番目かというナンバリングがされるようコードを改変した。

■結果

こうしてレーザーカッターにて切りだされた波形オブジェクトを組み立てたところ、見た目は完全に元の波形を同様なものとなった（図4.4-f）。さらにその波形オブジェクトを撮影し、再生ソフトにて再生したところ「こんにちは」とまではいかないものの、以前のものに比べると大分元の音声に近づいていることがわかった。

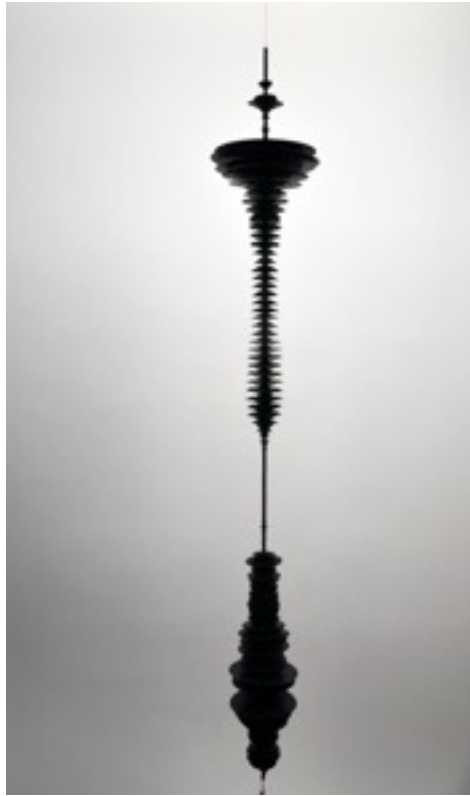


図4.4-e 組み立てられた波形オブジェクト

実験4 波形生成のアルゴリズムを変更

■仕組み

実験3をうけて、現状の波形生成アルゴリズムではさらなる音質の向上が困難と判断し新たな波形生成アルゴリズムを考案した。

以前のものは、録音された音声テキストより円を生成するには絶対値を用いてマイナスをすべてプラスとして扱っていた（図4.4-f）。

それをマイナスの部分にいくつか数値を足しておくことですべてプラスとなるようにし、波形オブジェクトとしても元の波形の形を完全に維持することが出来るようになった（図4.4-g）。

■結果

こうしてレーザーカッターにて切りだされた波形オブジェクトを組み立てたところ、外観は（図4.4-e）と比較すると波形感が無くなった（図4.4-h）。しかしその波形オブジェクトを撮影し、再生ソフトにて再生したところ「こんにちは」と聞こえるようになった。

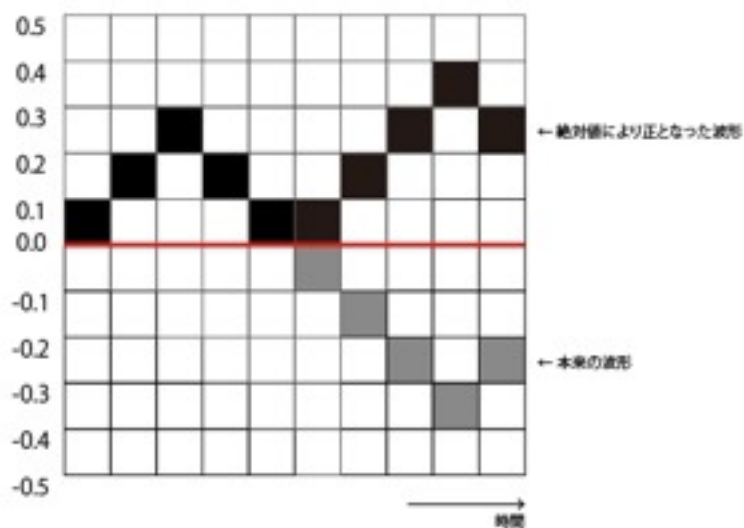


図4.4-f 今までの波形生成アルゴリズム

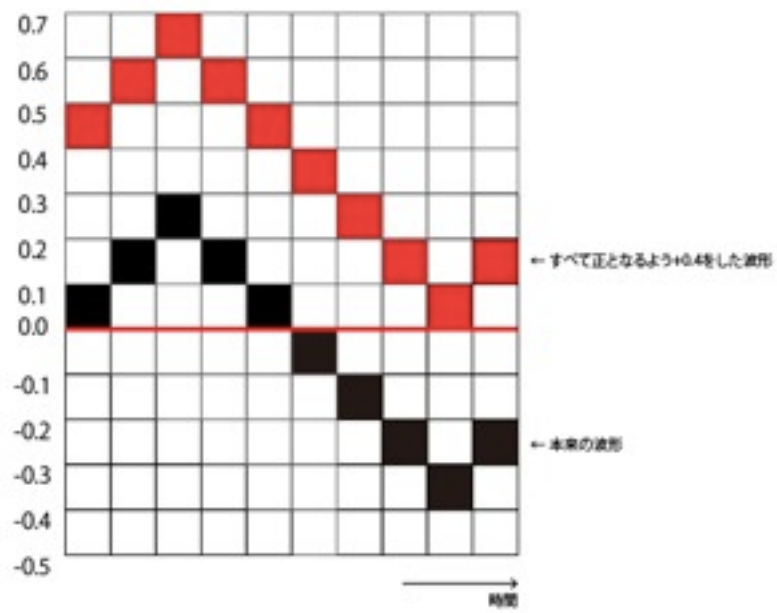


図4.4-g 新たな波形生成アルゴリズム



図4.4-g 新たな波形生成アルゴリズムによって制作された波形オブジェクト

実験5 波形オブジェクトの枚数を1/10にしたもの

■仕組み

これまで製作してきた波形オブジェクトは録音時のサンプリングレートを守っていた為、波形を製作するための波形断面図が数千枚となっていた。これらを元の音質を保ちつつ、波形オブジェクトのサイズを小さくすることは出来ないものかと考えることとした。その方法としてProcessingによりテキストデータを波形断面図とする際に、利用する数値を10個に1個とし元の波形の10分の1とし実験してみた。

```
-----  
if (f%10==0) {  
  描画  
}  
-----
```

■結果

ファブリケーションを行う時間、波形オブジェクトのサイズは10分の1となったものの、音の再現性は非常に低く「こんにちは」という言葉を発する際の呼吸の雰囲気ほどしか判別可能とならなかった（図4.4-h）。



図4.4-h サイズを1/10とした波形オブジェクト

実験5 撮影に関する実験

今回の撮影後その画像から音声を再生する場合、重要となってくるのは円一枚一枚で再現されたオブジェクトをいかに正確に撮影することが出来るかということである。今回は以下の3つの方法を実験した。

- ・デジタルカメラで一枚のみ撮影
- ・複数枚撮影し合成した実験
- ・パノラマ撮影が可能なiPhoneアプリによる実験

■実験5-1 デジタルカメラにて1枚のみ撮影した場合

まずはデジタルカメラにて1枚のみ撮影し、それを画像処理ソフトにて読み込んだ場合だ。なるべく背景に余計なものが写り込まないように撮影ブースにて撮影を行った（図4.4-i）。

結果は「こんにちは」とは判別することが出来ず、なんとなくの雰囲気ほどしか判別することが出来なかった。



図4.4-i 全体が映るように1枚で撮影された波形オブジェクト

■実験5-2 複数枚撮影し合成した実験

次に波形オブジェクトを10部分ほどに分割して考え、綺麗に写っているところのみを使用しそれらを写真編集ソフト（今回はAdobe社のPhotoshopCS5を使用）によって合成して一枚の写真を作り、それを画像処理ソフトにて読み込んだ場合だ。このように複数枚撮影することにより、元の繊細な波形を再現することに成功している（図4.4-j）。

結果はすべての実験の中で最も再現性が高く、「こんにちは」と判別することが可能であった。



図4.4-j 複数枚の画像を合成させた波形オブジェクト

■実験5-3 パノラマ撮影が可能なiPhoneアプリによる実験

遠くから波形オブジェクトを一枚のみ撮影するのではなく、知覚からパノラマ撮影を行えば正確に全体を撮影することが出来るのではないかという考えのもとiPhoneのアプリによって撮影を行った。今回使用したのは「Video2pano」（図4.4-k）というアプリで、撮影した動画からパノラマ写真を作成するというものだ。



図4.4-k 「Video2pano」アイコン

結果はiPhoneで撮影を行うとどうしても手振れ等の影響により、正確に撮影するということが困難であった（図4.4-l）。これにより撮影した写真を画像処理ソフトにて読み込んだ結果、「デジタルカメラにて1枚のみ撮影した場合」と同程度の再現性しか得られず「こんにちは」と判別することは出来なかった。



図4.4-I 「Video2pano」によって撮影された画像

第5章 評価実験

実際に制作した波形オブジェクトから生成された「こんにちは」という音声をYoutubeに投稿し、被験者に聞いてもらいその音声がなんと言っているのかということを書いてもらうということを評価とした。

この実験1は、再現した音声が本当にもとの音声を再現することができるのかという今回のプロジェクト成立の為の最も重要な要素を観察するために行っている。

また、実験2にてユーザーに実際に「Waveform Media」を体験してもらうことで本研究の目的である「データをつくる楽しさ」を調査した。

■実験1

・実験方法

Youtubeに投稿した再現音声を30人の被験者に聞いてもらい、「どのように聞こえるか」ということと「声の主を判別することが出来るか」ということを調査した。声主の判別方法としては、ひと通り音声を聞いてもらった後に通常録音した「こんにちは」を聞いてもらい、その音声が再現した音声と一致しているように感じるかということを確認するという形式をとった。



図5-a Youtubeにアップロードされた動画

・結果

なんと聞こえたか

こんにちは	26人
それ以外（おおふな、くりひら、かむら、てんぷら）	4人

声色判別

判別成功	7人
判別失敗	23人

以上の結果から、メッセージの内容自体は再現することに成功しているということが言えるが声色の再現までは到達していないということが判明した。

■実験2

・実験方法

5人の被験者に実際に録音してデータを作成するところまでを体験してもらい、ソフトに関する感想（1.メッセージの内容 2.録音の長さについて 3.録音というデータづくりに対してどう思うか）を聞いた。さらにそこから1人の被験者を選び、録音からファブリケーション、再生までを実際に体験してもらいヒアリングを行った。

・結果

被験者1. 女性

メッセージの内容

おはよう

録音の長さについて

ちょうどいい

データづくりの感想

とても簡単だった



図5-b 被験者1による「おはよう」の波形

被験者2. 男性

メッセージの内容

おばあちゃん

録音の長さについて

短い

データづくりの感想

録音した音声を簡単に確認できるから楽しみながらやり直すことが出来た

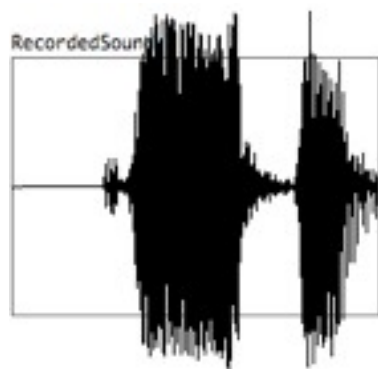


図5-c 被験者2による「おばあちゃん」の波形

被験者3. 女性

メッセージの内容

スタート

録音の長さについて

短い

データづくりの感想

時間が短いから狙った音を録音するのが難しい

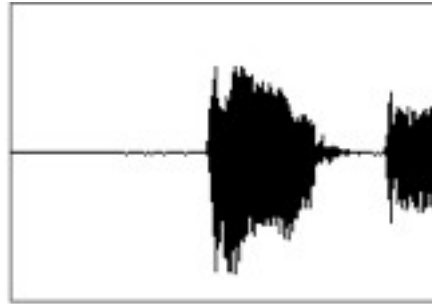


図5-d 被験者3による「スタート」の波形

被験者4. 男性

メッセージの内容

おはよう

録音の長さについて

少し短い

データづくりの感想

音が目に見えるのは楽しい

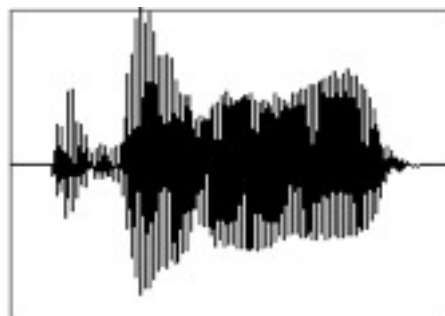


図5-e 被験者4による「おはよう」の波形

被験者5. 男性

メッセージの内容

ありがとう

録音の長さについて

特になし

データづくりの感想

録音時間よりも録音のタイミングが難しいから上手く狙った位置に波が入りづらい



図5-f 被験者5による「ありがとう」の波形

以上の結果より、録音する内容が一言に限定されることに対して少し物足りないということ、録音のタイミングが難しいということが判明した。しかしながら実際の録音の様子を観察すると自らの声でデータをつくりそれを視覚的にグラフで確認できることから、被験者が形を気にしながら納得ゆくまで楽しんで録音を行う傾向にあることが判明した。

次に被験者4の男性を選び、実際にファブリケーションと録音再生を行った。



図5-g 被験者4が録音を行なっている様子



図5-h 被験者4が波形オブジェクトを組立始めた様子



図5-i 完成間近の波形オブジェクト



図5-g 被験者4が制作した「おはよう」の波形オブジェクト

- ・結果

<ソフトウェアの使用感>

- ・ボタンを押すだけでいいから良いと思うが、一つのソフトに統合できていたらなおよし

<実際に作ってみて感じたこと>

- ・やっぱり音が形になるのは面白い（デジタルと違ってそれぞれの形が違ってくるのかも）
- ・音を物質として持ち運べるのが面白い
- ・音の仕組みを初めて知った
- ・デジタル→アナログ→デジタルの流れが新しい
- ・途中面倒になることもあるが自分の声を作っていると普通に楽しい
- ・実際にプレゼントとかにできたら絶対嬉しいと思う、ロマンがある
- ・短い単語でも組立に結構時間がかかる
- ・もっと小さくなると写真撮るところとかも楽になるのかなと感じた
- ・強度がもっとあるといいかも

<その他>

- ・作ってみてデータを作るといことがいかに難しいかがわかった
- ・総じてCDとかUSBとかの媒体のすごさが実感できた

以上の意見を得ることが出来た。問題としてやはり組立に非常に時間がかかること（今回は8時間）が挙げられるが、少しずつ自らのメッセージが完成してゆく様子を見ると被験者のモチベーションが上がっていた。また音の仕組みについて全く理解をしていなかった被験者が音の仕組みを理解することができ、さらにそこから転じてCDやUSB等のデジタルな記録媒体について興味を抱いた点に教育的な観点の可能性を感じた。

第6章 今後の展望

本研究には未だ改善すべき部分がいくつか存在する。

まず音質の向上だ。評価実験からもわかったが、現状ではまだ誰の声なのかというところまで判別することは困難となっている。これには撮影方法の見直し、波形オブジェクトのスケール変更実験により改善されることが予測される為今後試してゆきたいと考えている。

次に正確な撮影方法の模索だ。現在最も有効とされる方法は、実装実験で述べたように「複数枚撮影し合成する」という方法だ。しかしこれでは慎重に撮影を行わなければならなかったり、写真を合成するという手間が発生してしまう。この問題を改善するためにはiPhone等で利用可能な専用の撮影ソフトウェアを実装すればよいと考えられる。

具体的にはパノラマ撮影の応用で、波形オブジェクトを撮影する際に真正面からしっかりと撮影することが出来ている部分のみを利用しそれらを自動で繋げるのだ。この撮影・合成の手間を省くことに成功すれば「Waveform Media」の一連の流れは大幅にスムーズになるだろう。

最後に、小型化だ。現在録音時のメッセージを判別することができる波形オブジェクトの最小サイズは約60cmである。これでは飾ることは出来ても身につけることは困難になってしまう。（図4.4-c）のようにアクセサリーとして実際に身につけられるようにするには、材質の検討や波形生成のアルゴリズムを改善する必要があると考えられる。

参考文献

- [1] Computational Design Lab , <http://code.arc.cmu.edu/>
- [2] amandaghassaei.com , <http://www.amandaghassaei.com/>
- [3] レコード産業界の歴史 / 社団法人 日本レコード協会 2006.12.9
- [4] オーディオ50年史 日本オーディオ協会, 1986.12
- [5] AVテープの種類 (社団法人 日本記録メディア工業会 | 消費者の皆様へ) 2006.12.9
- [6] TDKテクノマガジン , <http://www.tdk.co.jp/techmag/inductive/200806/index2.htm>
- [7] 京都オルゴール博物館 , <http://www.orgel-hall.com/museum/002main.html>
- [8] CyberLibrarian , <http://www.asahi-net.or.jp/~ax2s-kmttn/index.html>
- [9] Sony History , <http://www.sony.co.jp/SonyInfo/CorporateInfo/History/SonyHistory/2-08.html>
- [10] オルゴールの小さな博物館 , http://www.musemuse.jp/Musemuse_Comment/illustration_carillon.html
- [11] Audio-technica GalleryTalk , <http://www.audio-technica.co.jp/corp/gallery/>
- [12] 雑科学ノート <http://hr-inoue.net/zscience/home.html>

図引用

- [図1.2-b] The MakerBot Replicator , <http://www.makerbot.com/blog/2012/01/09/introducing-the-makerbot-replicator/>
- [図2.1-a] 「Speaker」 筐体 , <http://code.arc.cmu.edu/projects/speakerwire/>
- [図2.1-b] 「Speaker」 によってつくられたアクセサリ , <http://code.arc.cmu.edu/projects/speakerwire/>
- [図2.2-a] 「3D Printed Records」 , <http://www.instructables.com/id/3D-Printed-Record/>
- [図2.2-b] 3Dデータ拡大図 , <http://www.instructables.com/id/3D-Printed-Record/>
- [図3.1-a] カリヨンの仕組み , http://www.musemuse.jp/Musemuse_Comment/illustration_carillon.html
- [図3.1-b] 世界最古のオルゴール（アントワーヌ・ファールブル作） , <http://www.orgel-hall.com/museum/002main.html>
- [図3.1-c] フォノグラフ
- [図3.1-d] グラフォフォン
- [図3.1-e] グラモフォン , <http://www.audio-technica.co.jp/corp/gallery/gallerytalk23.html>
- [図3.1-f] フィルモン
- [図3.1-g] ソノシート , <http://www.asahi-net.or.jp/~ax2s-kmtn/av/audio.html>
- [図3.1-h] ポールマンが考案したテレグラフォン , http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:US_Patent_661,619_-_Magnetic_recorder.jpg
- [図3.1-i] オープンリール
- [図3.1-j] 8トラック
- [図3.1-l] MD（Mini Disc） , <http://www.asahi-net.or.jp/~ax2s-kmtn/av/audio.html>
- [図3.1-k] CD（Compact Disc） , <http://www.kaskus.co.id>
- [図3.2-a] 縦波と横波の関係 , <http://hr-inoue.net/zscience/topics/sound/sound.html>

謝辞

本研究を進めてゆくにあたり、多くの方にご協力いただきました。

指導していただけただけでなく、時には問題を解決するために共に考えていただいたりするなど常に私の道標となるような存在でいらしゃってくれた田中浩也先生、ありがとうございました。

私の拙いプログラムを助けてくれた升森君、自分にはない女性的な視点から私の制作したソフトウェアを使用し作品を制作してくれた中澤さん、芹澤さん、ありがとうございました。

そして様々な課題に共に取り組んだり、時には研究の新たな視点を与えてくれる等多くの苦楽を共にしてきた田中浩也研究室の皆様、本当にありがとうございました。

最後に、4年間という長い間様々な面から私をサポートしてくれた家族、そして学生生活を共に支えあった友人に感謝をしたいと思います。