

研究報告

USB 接続デバイスを用いたシンセサイザーの開発 A DEVELOPMENT OF THE SYNTHESIZER USING A USB DEVICE

辻一郎
Ichiro TSUJI

概要

本論文は、自動作曲 [1]、デジタル信号処理（音響合成）及び、音場再生を統合したシンセサイザーシステムを提案する。USB 接続デバイスから出力される5つのPWM (Pulse Width Modulation) 信号をコンピュータ上のプログラムから制御して自動作曲を行うことができる。USB 接続デバイスから出力されるPWM 信号と制御信号をそれぞれ1つずつ、USB オーディオ I/F を介してコンピュータに取り込み、デジタル信号処理を行うことができる。デジタル信号処理されたPWM 信号は、再度、USB オーディオ I/F から出力される。さらに、4つのPWM 信号と1つのデジタル信号処理されたPWM 信号は、アンプに入力して5つのスピーカーで臨場感ある音場が再生できる。本論文では、本システムの構成内容を説明し、実際にスタジオで動作する本システムを評価する。

This paper proposes a synthesizer system that combines automatic composition, digital signal processing (audio synthesis), and sound-field playback. Five PWM (pulse-width modulation) signals, outputted by a USB device, can be controlled by the program using a computer and automatic composition can be performed. One PWM signal and one control signal outputted from the USB device are inputted to the computer via a USB audio interface; thereafter, digital signal processing can be carried out. After digital signal processing of the PWM signal, it can then be outputted by the USB audio interface. The four PWM signals and the processed PWM signal are inputted to an amplifier, and thereafter, to five speakers, producing a sound field that creates the feeling of presence. This paper describes the components of this system and evaluates a working system in a studio.

表 1. 演奏方法の種類

ポート	演奏方法
port 0	ランダムモード 1、LFO モード、無音状態
port 1	ランダムモード 2、LFO モード、無音状態
port 2	ランダムモード 3、LFO モード、無音状態
port 3	リズムモード 1、無音状態
port 4	リズムモード 2、無音状態

1. 本システムの構成

図 1 に本システムの構成を示す。本システムは、シンセサイザー部とデジタル信号処理部で構成される。シンセサイザー部は、Km2net 社¹の USB 接続デバイス USB-FSIO30[2] から5つのPWM 信号と制御信号が出力される。これらの信号は、USB I/F を介してコンピュータで制御される。デジタル信号処理部は、USB 接続デバイス USB-FSIO30 からPWM 信号と制御信号をそれぞれ1つずつ、TASCAM 社²の USB オーディオ I/F US-322 を介してコンピュータに取り込む。取り込まれたPWM 信号は、デジタル信号処理されて再び USB オーディオ I/F US-322 を介して出力される。制御信号は、デジタル信号処理部のフィルターとエフェクターを制御するために用いられる。4つのPWM 信号と1つのデジタル信号処理されたPWM 信号は、マルチチャンネルアンプで増幅して5つスピーカーから再生される。

2. PWM 信号の種類と分析

Km2Net 社の USB 接続デバイス USB-FSIO30 は、PWM 信号を出力できる5つのポートがあり、Microsoft

¹ <http://km2net.com/>

² <http://tascam.jp/>

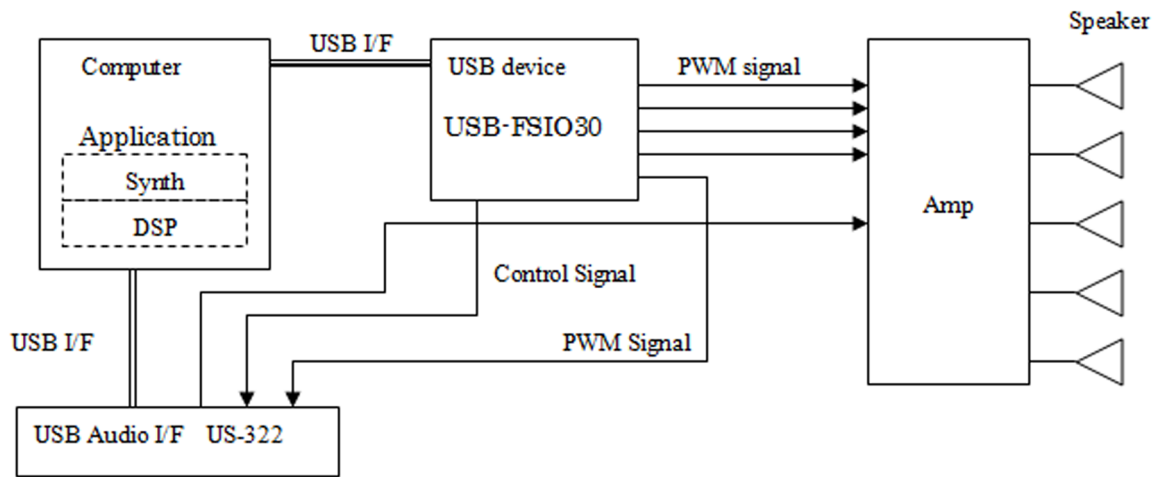


図 1. 本システムの構成

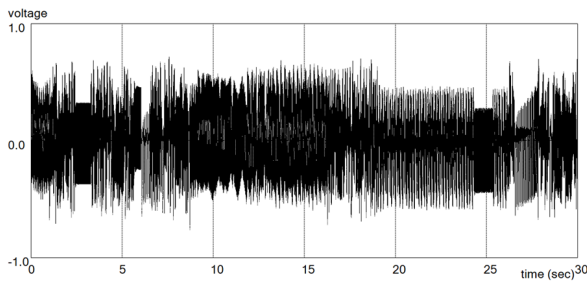


図 2. ランダムモード 1 の時間波形

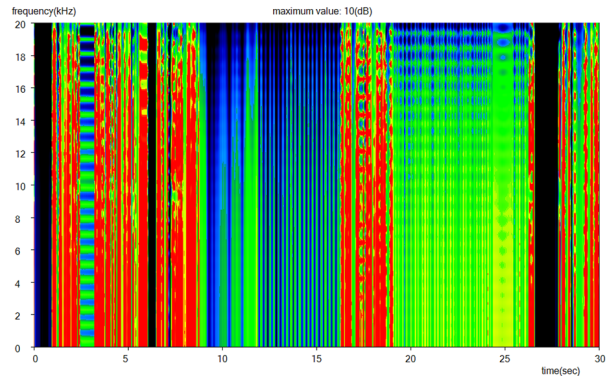


図 3. ランダムモード 1 のパワースペクトル

表 2. シンセサイザー部の主な機能

シンセサイザー部の機能	内容
音源制御	ランダム信号制御、リズム信号制御 (手動)
シーケンサー	演奏データ作成と実行、ランダム信号制御、リズム信号制御、LFO による変調信号制御、エンベロープジェネレータ制御
シーケンサーデータの表示	演奏情報の表示
シーケンサーデータの編集	演奏方法の種類とエンベロープの種類編集

社³の Visual Basic 2010 Express でコーディングが可能な Dynamic Link Library が用意されている。よって、プログラムが容易に作成することができる。コンピュータで USB 接続デバイス USB-FSIO30 を制御するためのアプリケーションを作成した。USB 接続デバイス USB-FSIO30 から出力される PWM 信号の出力ポートを port 0、port 1、port 2、port 3、port 4 とし、演奏方法の種類を表 1 に示す。port 0 は、ランダムモード 1、LFO

(Low Frequency Oscillator) モード及び、無音状態により演奏を行う。port 1 は、ランダムモード 2、LFO モード及び、無音状態により演奏を行う。port 2 は、ランダムモード 3、LFO モード及び、無音状態により演奏を行う。port 3 は、リズムモード 1 と無音状態により演奏を行う。port 4 は、リズムモード 2 と無音状態により演奏を行う。ランダムモード 1、ランダムモード 2 及び、ランダムモード 3 は、ランダム信号と LFO による変調信号をランダムに用いて演奏する。port 0、port 1 及び

³ <https://www.microsoft.com/ja-jp/default.aspx>

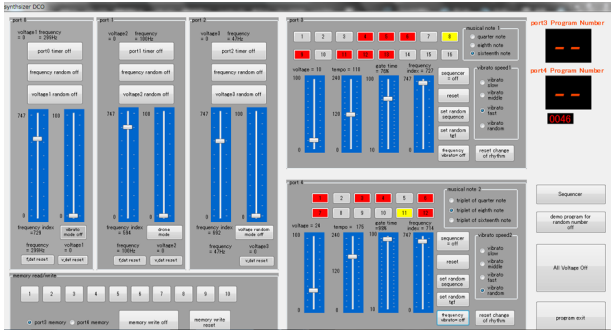


図 4. 音源制御

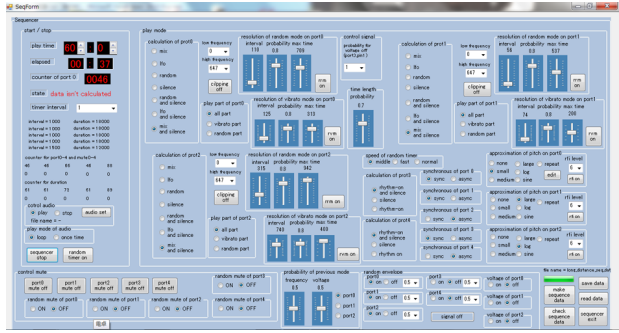


図 5. シーケンサー

表 3. 計算方法の種類

ポート	計算方法
port 0	mix, random, LFO, silence, mix and silence,
port 1	random and silence, LFO and silence
port 2	
port 3	rhythm-on and silence, silence, rhythm-on
port 4	

表 4. 周波数変換の種類

ポート	周波数変換
port 0	none, small, medium, large, log,
port 1	sine, repeat
port 2	

表 5. エンベロープの種類

エンベロープ	番号	内容
方形窓	0	1
サイン関数 1	1	0 度から 90 度までのサイン関数
サイン関数 2	2	90 度から 0 度までのサイン関数
サイン関数 3	3	0 度から 90 度、90 度から 0 度までのサイン関数
サイン関数 4	4	90 度から 0 度、0 度から 90 度までのサイン関数

した。このオーディオデータを用いて、自己回帰係数が 48 次の burg 法によりパワースペクトルを求めた。1 フレーム、100msec (4410 サンプル) のオーディオデータの周波数分析を行い、1 フレームのオーディオデータを 20msec (882 サンプル) シフトして、20msec の新しいオーディオデータを入力する。これを繰り返して 30 秒間、周波数分析を行った。1 フレームのオーディオデータ $x(n)$ のサンプル数を N 、フレーム番号を f 、シフト数を s として、 $x(n)$ は次式で表される。

$$x(n) \quad (n = f \cdot s, f \cdot s + 1, f \cdot s + 2, \dots, f \cdot s + (N - 1), f = 0, 1, 2, \dots, 1495, s = 882, N = 4410) \quad (1)$$

port 2 において、ランダム信号を発生する際、周波数と電圧の演算方法が異なり、各ポートの出力信号の音色が異なる。LFO による変調信号は、周波数と電圧の値をランダムに設定して周期的に振動させる。LFO モードは、LFO による変調信号を用いて演奏する。port 3 のリズムモード 1 は、16 ステップを基本とした 4 拍子のリズム信号を用いて演奏する。port 4 のリズムモード 2 は、12 ステップを基本とした 3 拍子のリズム信号を用いて演奏する。port 3 と port 4 は、シンセサイザー部のシーケンサーで、変拍子を考慮したリズムパターンが自動計算される。port 0 からランダムモード 1 で出力される信号の時間波形を図 2 に示し、パワースペクトルを図 3 に示す。サンプリング周波数 44.1kHz、直線量子化 16 ビットでランダムモード 1 の出力信号をデジタル化

3. シンセサイザー部の主な機能

シンセサイザー部は、音源制御、シーケンサー、シーケンサーデータの表示及び、シーケンサーデータの編集からなる。シンセサイザー部の主な機能を表 2 に示す。音源制御は、ランダム信号の制御とリズム信号の制御を行う。演奏者により、ランダム信号の周波数と電圧の制御とリズム信号の制御が行える。シーケンサーは、コンピュータにより、演奏データ作成と実行、ランダム信号の制御、リズム信号の制御、LFO による変調信号の制御及び、エンベロープジェネレータの制御を行う。シーケンサーデータの表示は、演奏情報を表示することができる。シーケンサーデータの編集は、演奏方法の種類とエンベロープの種類が編集できる。音源制御のスクリーンショットを図 4、シーケンサーのスクリーンショットを

表 6. ランダムステップによる演奏時間の例

演奏時刻 (msec)	0~6000	6000~12000	12000~15000	15000~16800
演奏の時間間隔 (msec)	6000	6000	3000	1800
1 ステップ (msec)	1500	500	100	200

同期

	演奏の時間間隔									
Allports	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

非同期

port0	2	3	4	5	6	7	8	9	1	10
port1	3	4	5	6	7	8	9	1	2	10
port2	4	5	6	7	8	9	1	2	3	10
port3	5	6	7	8	9	1	2	3	4	10
port4	6	7	8	9	1	2	3	4	5	10

図 6. 演奏の時間間隔

図 5 に示す。

3.1. シーケンサーの主な機能

シーケンサーは、演奏者がコンピュータに演奏データを計算させるための、計算方法を設定できる。ここで言う計算方法とは、各演奏方法を用いて自動的に演奏データを作成する自動作曲方法のことである。この計算方法により、演奏データを計算して実行する。計算したデータは、保存、読み込みが可能。ただし、ランダム信号の演奏データは保存できないものとする。計算方法の種類を表 3 に示す。port 0 において、mix は、ランダムモード 1 と LFO モードによる演奏方法を計算し、random は、ランダムモード 1 による演奏方法を計算し、LFO は、LFO モードによる演奏方法を計算する。silence は、演奏を無音状態 [3] にする。mix and silence は、ランダムモード 1、LFO モード及び、無音状態による演奏方法を計算し、random and silence は、ランダムモード 1 と無音状態による演奏方法を計算し、LFO and silence は、LFO モードと無音状態による演奏方法を計算する。port 1 において、mix は、ランダムモード 2 と LFO モードによる演奏方法を計算し、random は、ランダムモード 2 による演奏方法を計算し、LFO は、LFO モードによる演奏方法を計算する。silence は、演奏を無音状態にする。mix and silence は、ランダムモード 2、LFO モード及び、無音状態による演奏方法を計算し、random and silence は、ランダムモード 2 と無音状態による演奏方法を計算し、LFO and silence は、LFO モードと無音状態による演奏方法を計算する。port 2 において、mix は、ランダムモード 3 と LFO モードによる演奏方法を計

算し、random は、ランダムモード 3 による演奏方法を計算し、LFO は、LFO モードによる演奏方法を計算する。silence は、演奏を無音状態にする。mix and silence は、ランダムモード 3、LFO モード及び、無音状態による演奏方法を計算し、random and silence は、ランダムモード 3 と無音状態による演奏方法を計算し、LFO and silence は、LFO モードと無音状態による演奏方法を計算する。port 3 において、rhythm-on and silence は、リズムモード 1 と無音状態による演奏方法を計算する。silence は、演奏を無音状態にする。rhythm-on は、リズムモード 1 による演奏方法を計算する。port 4 において、rhythm-on and silence は、リズムモード 2 と無音状態による演奏方法を計算する。silence は、演奏を無音状態にする。rhythm-on は、リズムモード 2 による演奏方法を計算する。

port 0、port 1 及び、port 2 において、ランダム信号と LFO による変調信号の周波数と電圧の設定は、Visual Basic 2010 Express のコントロールの 1 つであるタイマーを用いて設定する。ランダム信号は、それぞれ、周波数の設定をするタイマーの速度を変更することができる。LFO による変調信号は、周波数と電圧の設定をするタイマーの速度を変更することができる。ただし、周波数と電圧の値は、同時に設定される。これにより、音色を変化させることができる。さらに、port 0、port 1 及び、port 2 において、音色に変化を与えるため、周波数変換 [4] を行うことができる。7 種類の周波数変換を行うことができ、これを表 4 に示す。none は、

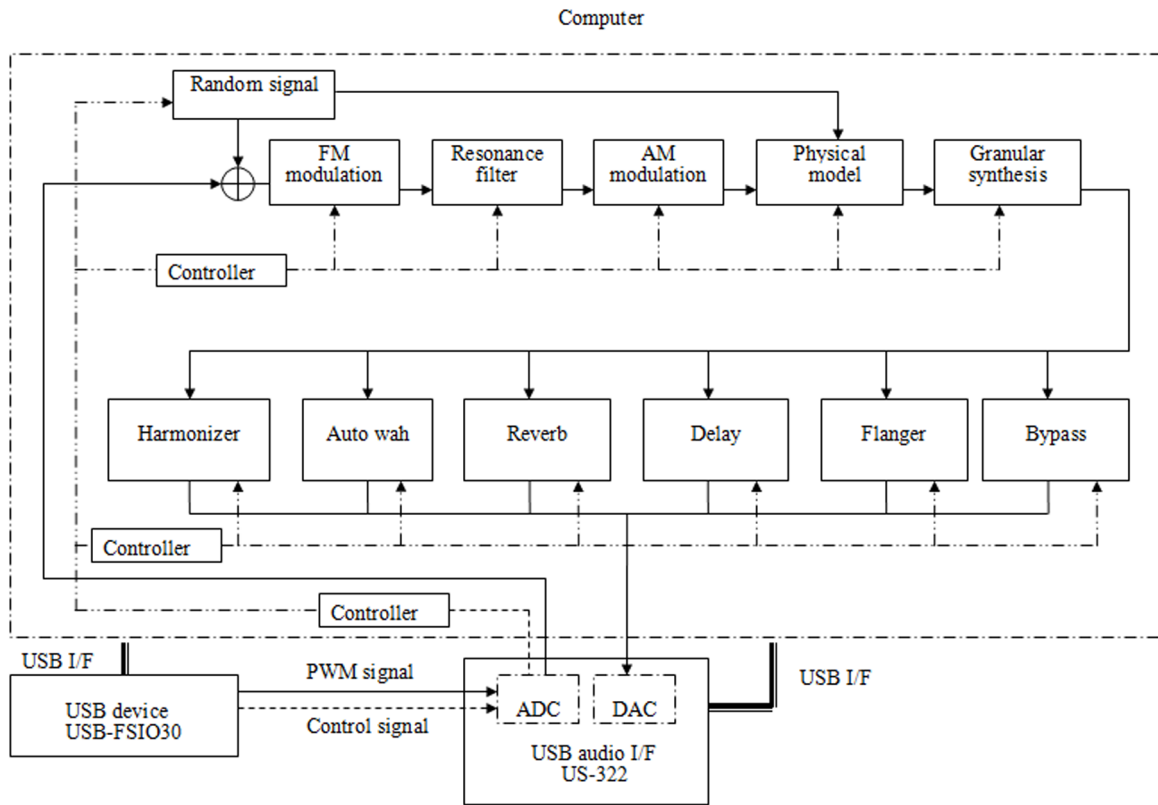


図 7. デジタル信号処理部

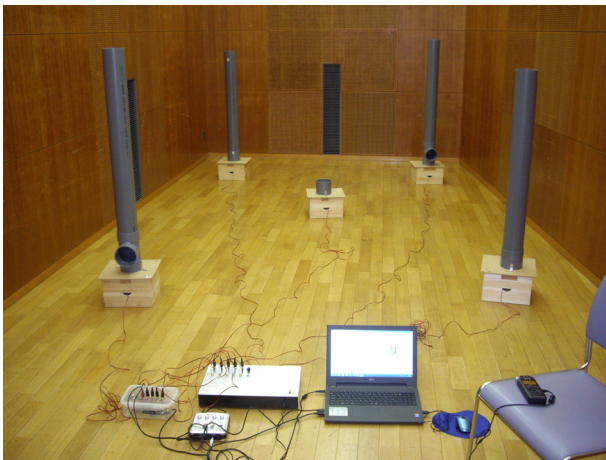


図 8. 実際の演奏

周波数変換を行わない。small は、周波数の値を 10 の倍数に変換する。medium は、周波数の値を 20 の倍数に変換する。large は、周波数の値を初期値 50 を加算した 100 の倍数に変換する。log は、周波数の値を対数関数を用いて変換する。sine は、周波数の値をサイン関数を用いて変換する。repeat は、演奏者が 20 の周波数の値を設定できる。演奏時、repeat に設定された値を繰り返し周波数の値として設定する。周波数のゲートの長さ

も変更可能である。

エンベロープジェネレータは、全てのポートにおいて、シーケンサーの演奏最小区間を 1 ステップとして 5 ステップ以上の時、5 種類のエンベロープを周波数と電圧に次式により設定することができる。ただし、エンベロープジェネレータが有効になる確率を求めてエンベロープの種類を設定する。エンベロープの種類を表 5 に示す。e はエンベロープの種類を表し、rnd は、0 以上、1 未満の単精度実数型の乱数を表し、CInt は、整数型変換関数を表す。

$$e = CInt(3 \times rnd) + 1$$

(エンベロープジェネレータが有効)

$$e = 0$$

(エンベロープジェネレータが無効) (2)

シーケンサーの演奏最小区間である 1 ステップを 1000msec として定期的に演奏できるほかに、1 ステップの時間を、ランダムに変化させて演奏ができる。例えば、シーケンサーの演奏時刻である 6000msec から 12000msec の区間を 1 ステップを 500msec にして演奏することが可能である。ここでは、ランダムにステップの時間を変化させることをランダムステップと呼ぶことにする。このランダムステップによる演奏時間の例を

表 6 に示す。さらに、ランダムステップによる演奏を各ポート毎に、異なるランダムステップで演奏できる。各ポートのランダムステップが同じ場合（同期）と異なる場合（非同期）の演奏の時間間隔の並び方の例を図 6 に示す。図 6 で表される番号は、同期の場合の演奏の時間間隔の順番を表し、この間のランダムステップの時間は一定である。図 6 より、非同期の場合は、全てのポートで演奏の時間間隔が 1 つずつずれていき、輪唱のような形式をとる。また、各ポート毎に同期と非同期の選択が可能である。

4. デジタル信号処理部の主な機能

USB 接続デバイス USB-FSIO30 の port 0 からの PWM 信号とデジタル入出力ポートからの制御信号をそれぞれ 1 つずつ USB オーディオ I/F US-322 を用いてコンピュータに取り込み、デジタル信号処理を行う。デジタル信号処理された PWM 信号は、USB オーディオ I/F US-322 を介して出力される。これらの処理をオープンソースビジュアルプログラミング言語の Pure Data⁴ を用いて作成した。デジタル信号処理部の構成を図 7 に示す。USB 接続デバイス USB-FSIO30 のデジタル入出力ポートからのパルス信号を制御信号とし、これをデジタル信号処理部に入力する。デジタル信号処理部に入力した制御信号を用いて、各フィルター [5],[6] の on と bypass の切り替えと各エフェクター [7] の on と off の切り替えを行う。port 0 の演奏方法であるランダムモード 1 と LFO モードが発生する度にパルス信号が USB 接続デバイス USB-FSIO30 のデジタル入出力ポートから出力されるようになっている。

5. 実際の演奏

実際にスタジオで本システムを稼働させた写真を図 8 に示す。USB 接続デバイス USB-FSIO30 の port 1、port 2、port 3 及び、port 4 から出力される 4 つの PWM 信号を 6 入力 6 出力可能なアンプに入力した。USB 接続デバイス USB-FSIO30 の port 0 からの PWM 信号とデジタル入出力ポートからの制御信号を USB オーディオ I/F US-322 を介してコンピュータに入力した。コンピュータでデジタル信号処理された PWM 信号を USB オーディオ I/F US-322 を介して同じアンプに入力した。アンプからの出力信号は、5 つのスピーカーで再生した。スピーカーは、下方から上方に音が鳴るように床に設置した。さらに port 1、port 2、port 3 及び、port 4 の PWM 信号を再生する 4 つのスピーカーは、正方形を描くように角に配置し、直径 10.6 cm、高さ 100cm の塩化ビニールパイプをスピーカーの上に装着した。塩化ビニールパイプにより固有振動を発生させ、PWM 信号に

効果音を付加することができる。port 0 の PWM 信号を再生する 1 つのスピーカーは、その重心に配置した。下方から上方に向けて音を再生し、左右前後とその重心にスピーカーを配置することにより、臨場感ある音場を再生することができた。演奏内容は、筆者の作品“Attack with PWM signals”から Long Distance Part 3、Advanced Pulse、Neurotransmitter の 3 曲を演奏した。

6. まとめ

本システムによるシンセサイザーの開発は、シーケンサーの自動作曲により、演奏者が予測できない音響効果を生み出す可能性がある。さらに、デジタル信号処理部により独創的な音響合成を作り出す可能性がある。よって、新しい音楽を製作する上で有効な手段であると思われる。今後は、シーケンサーによる演奏データ作成とデジタル信号処理部における音響合成の再検討及び、オーディオシステムとしての応用が、更なる本システムの発展に必要と思われる。

7. 参考文献

- [1] C. Roads (青柳龍也ほか) コンピュータ音楽—歴史・テクノロジー・アート—, 東京電機大学出版局, 2001.
- [2] 小松博史 かんたん! USB で動かす電子工作, オーム社, 2011.
- [3] マイケルナイマン (椎名亮輔訳) 実験音楽—ケージとその後, 水声社, 1992.
- [4] 小方厚 音律と音階の科学, 講談社, 2007.
- [5] 松村誠一郎 *Pd Recipe Book — Pure Data* ではじめるサウンドプログラミング, BNN 新社, 2012.
- [6] A. Farnell *Designing Sound*, The MIT Press, 2010.
- [7] 美山千香士 *Pure Data* チュートリアル&リファレンス, ワークスコーポレーション, 2013.

8. 著者プロフィール

e辻 一郎 (Ichiro TSUJI)

1966 年生まれ。平成 3 年国士舘大学電気工学科卒業。同年、(株)日本電気ホームエレクトロニクス入社。コンピュータ周辺機器の開発に従事。平成 10 年退社。現在、(株)イズミ エクセル事業部物流課に勤務。

⁴ <https://puredata.info/>