

皮膚から音を聞く可能性・第2弾

長嶋洋一^{†1}

概要：筆者はかつて、メディアアートのためのインターフェースとしてコンピュータ制御により人体に電気刺激を与える多チャンネルシステム“PIRIPIRI”を開発した。市販の電気マッサージ機を改造してMIDI制御にて任意の電圧・パルス幅・時間密度・バースト形状の電気信号を電極に送った仕様とは別に、実験中に高電圧に昇圧した生の音楽サウンドを電極に与えてみた際の印象を簡単に報告していたが、バスドラムやベースの重低音は皮膚の深部から骨に響くような反応があり、一方でシンバルなど高音成分は皮膚表面にシャリシャリする反応であった。本研究では“PIRIPIRI”の電気刺激方式でなく、皮膚に多数の小型リニア振動子を配置してMIDI制御にて詳細な振動状態を制御するシステム“VFB10”の実現を目指している。この制御情報をコントロールすることで、皮膚の振動センシングから、聴覚に頼らずサウンドの印象を知覚できる第2のシステムとしての可能性について検討議論してみたい。

キーワード：脳波センサ, MUSE, 新楽器

Listen to sounds by skin - the second approach

YOICHI NAGASHIMA^{†1}

Abstract. This is a tentative report in my research to listen to sounds without ear. When I developed the special system to affect human body with high-voltage electric pulses by a request from IAMAS, I reported that there is a possibility to listen to music by the specially-designed pulses. In this report, I will discuss about the other way to affect human body - not by electrically, but by vibrations.

Keywords: Skin Interface, Tactile, Vibration Feedback, Linear Vibration Actuator

1. はじめに

筆者はこれまで、Computer Musicを中心とするメディアアート領域で活動してきた[1]。2002年にはIAMASから依頼され、メディアアートのためのインターフェースとしてコンピュータ制御により人体に電気刺激を与える多チャンネルシステム“PIRIPIRI”を開発した[2]。このシステムは市販の電気マッサージ機を改造しMIDI制御にて任意の電圧/パルス幅/時間密度/バースト形状の電気信号を電極に送るが、これとは別に、実験中に高電圧に昇圧した生の音楽サウンドを電極に与えてみた際の印象を報告した。バスドラムやベースの重低音は皮膚の深部から骨に響くような反応があり、一方でシンバルなど高音成分は皮膚表面にシャリシャリする反応があり、「これは、聴覚障害者などが生体フィードバックによって音楽を聴くという可能性、あるいは複数の電気刺激を和音のように知覚してそれぞれの音源分離を行うという可能性を示唆している」と指摘した。

本研究では“PIRIPIRI”の電気刺激方式でなく、皮膚に多数の小型リニアアクチュエータ(振動子)を配置してMIDI制御にて詳細な振動状態を制御するシステム“VFB10”を開発した。本稿ではこの“VFB10”の詳細とともに、振動の制御情報をコントロールすることで、皮膚の振動センシングから、聴覚に頼らずサウンドの印象を知覚できる第2のシステムとしての可能性について検討議論してみたい。

2. リニア振動アクチュエータ LD14-002

これまでスマホや携帯のバイブ機能を実現してきた振動モータは図1(左)のようなもので、小型モータの軸に偏心重りを取り付けた構造で、偏心軸が回転することで振動を発生できるが、急速なON/OFF制御は出来なかった。これに対して、図1(右)は日本電産コパル株式会社製の「リニア振動アクチュエータLD14-002」というユニークな製品で、内部の重りが小刻みに往復直線運動する小型/薄型の振動アクチュエータであり、ブラシレス駆動なので電氣的ノイズが出にくい振動体である。



図1 従来の振動モータ(左)とLD14-002(右)
Figure 1 Vib. Motor(left) & LD14-002(right).

触覚Tactileが大きく注目されている昨今、触覚提示フィードバックのデバイスとしてこのリニア振動アクチュエータLD14-002が実際に研究に活用されている[4]ことから、本研究もこのデバイスを採用した。このデバイスはユニポーラ駆動だけでなく、図2にあるようなバイポーラ駆動によって非常に高効率の振動(150Hz付近が共鳴域)を実現できる[5]が、ポート数が多ければソフト的に信号反転

^{†1} 静岡文化芸術大学
Shizuoka University of Art and Culture

すれば図2のトランジスタ回路を省略できるので、本研究では、(1)ホストPCインターフェースにMIDIを使える(ArduinoのようにMIDI受信でデータ落ちしない)、(2)多数のポートを持ち20ピンで10個のLD14-002を同時に並列制御できる、(3)個々のLD14-002の振動周波数の設定精度として16ビット程度を確保できる、という条件を満たすプロセッサとして、Propeller[6-8]を採用することにした。

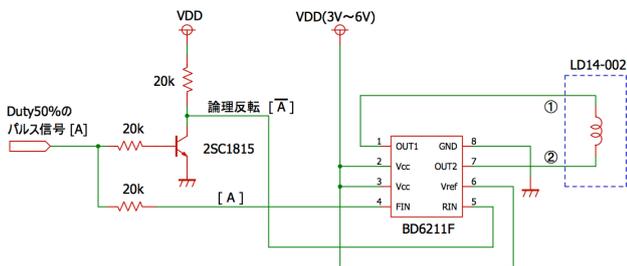


図2 LD14-002のバイポーラ駆動回路例
 Figure 2 Bipolar Driver for LD14-002.

3. PropellerプロセッサとMIDI

Propellerシステムで正しくMIDIを受ける、というシステム(ハードウェアとソフトウェアライブラリ)は既に完成し公開しているのでここでは詳細は省略する[9]。図3は筆者が開発/公開しているPropellerによるMIDI受信回路部分である。これに加えて、ポート0からポート19までの20ビットを図2の駆動信号/反転信号として直接、ドライバIC“BD6211F”の入力に供給(信号レベルは+3.3Vなので直接駆動可能)し、“BD6211F”の出力をリニア振動アクチュエータLD14-002に接続している。駆動用の電源は同時に10個をバイポーラ駆動するため「+5V・4A」タイプとした。動作確認用に、まだ余っているポート20からポート23までの4ビットをLED出力し、処理チャンネル番号を表示した。図4が“VFB10”のシステム基板の全景である。

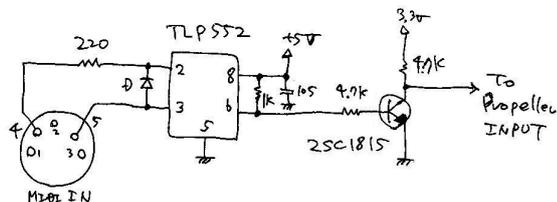


図3 PropellerのMIDI受信回路例
 Figure 3 Propeller MIDI Receiver.

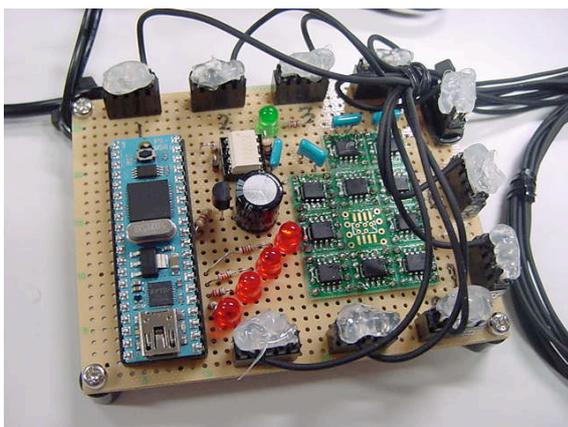


図4 “VFB10”のシステム基板
 Figure 4 Main system board of “VFB10”.

Propellerのプログラミングはメーカー純正のWindows環境IDEだけでなく、Brad Campbell氏が提供するMac/Linux/Windows対応のフリーIDE “bst”(Brad’s spin tool)[10]が登場した事で非常に容易になった[11]。このプログラミングを含む本システムのメイキングについては[12]に紹介し、最終的なソースプログラムは[13]で公開しているので参照されたい。以下はPropellerに固有の高級言語spinで記述した「MIDI受信したチャンネルデータを4個の実験LEDでバイナリ表示」の部分のサンプルプログラムである。

```

CON
    _clkmode = xtall + pll16x
    _xinfreq = 5_000_000

OBJ
    midiIn : "MidiIn03"

PUB start | i, dummy, ch, value
    midiIn.start(27)
    repeat i from 20 to 23
        dira[i]--
        outa[i] := 0
    repeat
        dummy := midiIn.event
        if dummy <> -1
            if (dummy & $FF0000) == $D00000
                ch := (dummy & $0F0000) >> 16
                value := dummy & $00007F
                outa[20] := (value & $01)
                outa[21] := (value & $02) >> 1
                outa[22] := (value & $04) >> 2
                outa[23] := (value & $08) >> 3
    
```

実際にはここに、時分割で10個のリニア振動子の周波数制御を行うライブラリ(アセンブラで記述)が加わるが、Propellerが持っている8個の並列処理用CPU(“Cog”と言う)から、メイン(起動)用に1個、MIDI受信用に1個のCogを使っているため、1個のCogで2個のリニア振動子の周波数制御処理を行うようにすれば、1+1+5=計7個のCogでまだまだ余裕がある。Propellerは並列処理CPUなので、8個のCogがそれぞれフルに働いていても、たった1個のCogだけ走っていても、システム全体の処理性能は変わらない。

4. 振動周波数制御と発熱問題

リニア振動アクチュエータLD14-002をバイポーラ駆動するために、アクチュエータ1個あたり2本の反転信号を生成するPropellerのアセンブラプログラムは[13]にあるが、この実験のためにホスト側で制作したMaxパッチを図5に示す。これは開発用Macの同時2画面のスクリーンショットであり、図5(左)でPropeller開発IDE“bst”を開き、図5(右)でホスト側のMaxパッチを開き、MaxからのMIDIをVFB10が受信して振動周波数を設定して出力した信号を、同じMaxパッチに加えたオーディオ入力に与えている。

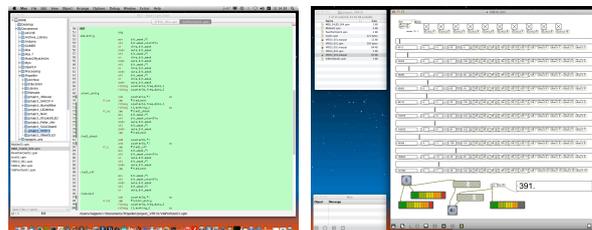


図5 “VFB10”を開発している様子(1)
 Figure 5 Development of “VFB10”(1).

周波数設定精度を確保するために定義したオリジナルMIDIプロトコルは、7ビットMIDIデータを4バイトにわたって最大28ビット精度まで送れるように「MIDIチャンネル=振動子番号」としたMIDIコントロールチェンジメッセージで、例えば1チャンネルの場合には **BO 00 NN ~ BO 03 NN** (NN=0~7F)とした。この矩形波をMSPのオーディオ入力として片チャンネルで再生しつつ、もう片方のチャンネルでMSP内の「rect~」オブジェクトの矩形波を発生させたピッチと比較して、与えるデータと生成される周波数データとの関係を実測で決めてしまうという作戦である。

```
00 05 00 00 - 30.505011 Hz
00 04 00 00 - 38.035999 Hz
00 03 00 00 - 51.041698 Hz
00 02 00 00 - 76.260002 Hz
00 01 00 00 - 152.600006 Hz
00 00 7F 7F - 152.488007 Hz
00 00 7F 00 - 153.716003 Hz
00 00 7E 00 - 154.955994 Hz
00 00 7D 00 - 156.240997 Hz
00 00 7C 00 - 157.360001 Hz
00 00 70 00 - 174.279999 Hz
00 00 60 00 - 203.419006 Hz
00 00 50 00 - 243.889999 Hz
00 00 40 00 - 305.000000 Hz
00 00 30 00 - 406.500000 Hz
00 00 20 00 - 609.000000 Hz
00 00 10 00 - 1217.520996 Hz
```

2つのオシレータの周波数の誤差は、同時に鳴らしてビートを消すように聴覚的に調整することで十分に精緻なデータが取れた。MaxからMIDIとして送る数値(28ビットデータ)と生成される矩形波の周波数とは反比例の関係にあるので、上のような実測データから両者を掛け合わせた「定数」を推定した。Propellerのシステムクロック80.0MHzからアセンブラステップ数で計算できるように思われるが、Propellerのハードウェア並列処理の特性上、8個のCogが共有メモリをアクセスする時間が「7~22クロック」などと幅を持つために、正確な各Cogの処理サイクルは計算できない(本質的にジッタが発生する)からである。

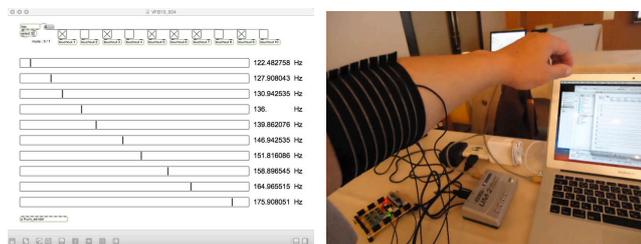


図6 “VFB10”を開発している様子(2)
 Figure 6 Development of “VFB10”(2).

上の16個の実験データを検討して「定数=2499000」と定めた。すると切り捨て誤差を含むわずかな誤差を含んでいるものの、設定周波数をX(Hz)としたければ、MaxからMIDI経由で送るデータは「 $2499000 \div X$ 」という計算でよい。図6(左)はスライダーで小数点以下までの振動周波数をVFB10に与える実験Maxパッチであり、図6(右)はまず2個の振動子を腕に巻いた伸縮ベルトの下に差し込んだ実験の様子である。しかしここで判明したのは、リニア振動アクチュエータLD14-002をバイポーラ駆動する推奨回路[5]をそのまま実装した結果、共振周波数150Hz付近での振動は非常に強力であり、連続駆動した場合には相当の発熱があり、火傷の危険から皮膚に直接装着は無理、という結論であった。

5. 耐熱軍手インターフェース

10個のリニア振動アクチュエータを人体のどこに装着するかは今後の検討課題であるが、まずは図7のホムンクルス(体性感覚野の体の地図)にあるように、手(掌)が最有力である[14]。そこでホームセンターに走り、**パーベキュー用の耐熱軍手(200℃までOK)**を仕入れて、マジックテープをLD14-002に貼って取り付ける、という実験を行った。



図7 手(掌)がもっとも感度が高いセンサ
 Figure 7 The Homunculus.

まずは最初の実験なので、10個のLD14-002を耐熱軍手の5本の指の表と裏に、それぞれの指を挟むように取り付けて、連続振動モードの確認(発熱が伝わらず生理的に問題ない)とともに、電気刺激インターフェースで実験したように、音楽情報に対応して振動するモードの実験を行ったのが、図8の風景である[15]。この音楽情報から振動情報へのマッピング(Maxプログラミング)については次節で紹介する。連続振動による発熱については、装着している指には伝わらず危険は回避できたものの、相当な発熱によってマジックテープの接着ゴム部分が溶けたような臭いが出てきて、この部分が耐久性の課題として浮上した。



図8 耐熱軍手インターフェースの実験
 Figure 8 Experiment with heat-resisting work-glove.

6. 耐熱手袋インターフェースと音楽駆動

耐熱軍手で皮膚への熱的危険性は回避でき、振動は十分に伝達できる事を確認できたので、ここで新たに**溶接用の耐熱グローブ(手袋)**(250℃までOK)を採用することにした。これは内部にムレ避けの繊維がある牛革製のもので、3種類ほど仕入れた中で感触の良好なものを使用した。リニア振動アクチュエータLD14-002の取り付けは、硬化後は350℃程度まで問題ないという2液硬化型のエポキシ接着剤(セメダインハイクイックC)を採用して、図9のように5本の指の根元と、手の甲の部分に設置角度を変えて配置した。これは音楽振動モードとは別に、互いに直交する振動

子をごくわずかな違いの周波数で駆動した時に、ビートによって掌が空間的に並進移動するような錯覚の可能性がある、という予備的実験に対応した配置方針であり、この触覚的な錯覚についても、今後、実験する予定である。



図9 耐熱手袋インターフェースの製作
 Figure 9 Development of heat-resisting glove.

図10は、このようにして完成した10チャンネル振動フィードバックシステムVFB10の全景である。ちなみにシステム基板と振動子に至るケーブルとはコネクタで着脱できるようにしてあるので、この耐熱グローブ・インターフェースは最初のアタッチメントであり、新たに10個のVFB10を配置した次のアタッチメントを製作すれば、人体への装着方法を新しく設計できる。VFB10は1個100円と安価であり、さらに装着にグローブ形状でなくフレーム構造のアタッチメントを3Dプリンタで実現する構想もある。



図10 "VFB10"の全景
 Figure 10 The system "VFB10".

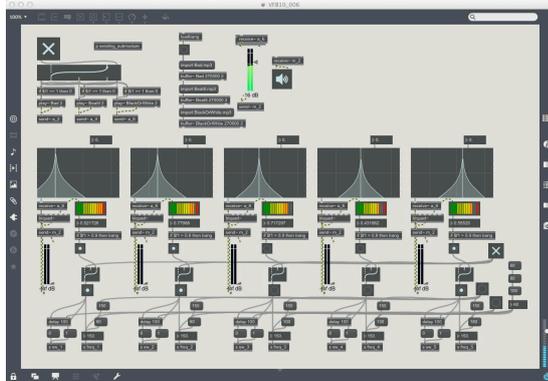


図11 音楽駆動実験のMaxメインパッチ
 Figure 11 Main Max patch of musical drive.

図11は、リニア振動子を実際の音楽データで駆動する実験のためのMaxメインパッチ、図12はそのサブパッチとして個々の振動子に詳細な周波数データを設定送出する部分

である。ここでは具体的にビートの強い音楽素材としてマイケルジャクソンの3曲を使用して、中心周波数を100Hz/200Hz/400Hz/800Hz/1600Hz、Q=11.7に設定した超狭帯域バンドパスフィルタによって、各周波数バンドの積分強度が閾値を超えたら一定時間(60ms/80ms/100ms)だけ振動する、というモードを実装した。5チャンネルの振動子の振動周波数は「ピークの150Hzで共通」と「低域は低く高域は高い」(図12)という2種類を比較実験した[16]。

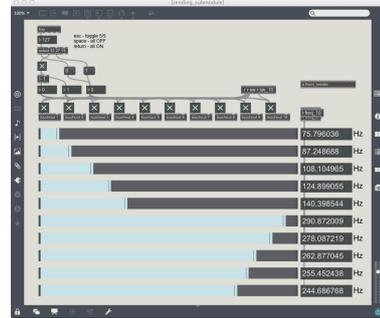


図12 振動制御Maxサブパッチ
 Figure 12 The sub-patch of vibration control.

7. おわりに

皮膚に多数の小型リニアアクチュエータ(振動子)を配置してMIDI制御で振動制御するシステム"VFB10"の開発について紹介した。今後、振動制御情報をコントロールすることで、皮膚の振動センシングから聴覚に頼らずサウンドの印象を知覚できる第2のシステムとしての可能性、さらに触覚の錯覚実験などについて研究を進めていきたい。

参考文献

- [1] Art & Science Laboratory. <http://nagasm.org>
- [2] 長嶋洋一, 電気刺激フィードバック装置の開発と音楽パフォーマンスへの応用. <http://nagasm.org/ASL/SIGMUS0205/>
- [3] 秋月電子, リニア振動アクチュエータ LD14-002. <http://akizukidenshi.com/catalog/g/gP-06838/>
- [4] 植松遥也, 小川大地, 岡崎龍太, 蜂須拓, 梶本裕之. プロジェクトを用いた全身への触覚呈示ディスプレイ. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム(EC2014), 110-113, 2014.
- [5] <http://akizukidenshi.com/catalog/faq/goodsfaq.aspx?goods=P-06838>
- [6] 長嶋洋一, サウンド・インスタレーションのプラットフォームについて, 情報処理学会研究報告 Vol.2007, No.50 (2008-MUS-75)(2008-HCI-128), 情報処理学会, 2008.
- [7] 長嶋洋一, 並列処理プロセッサを活用したメディアアートのための汎用インターフェース, 情報処理学会研究報告 Vol. 2008, No.78 (2008-MUS-76), 情報処理学会, 2008.
- [8] 長嶋洋一, 並列処理プロセッサ"Propeller"によるプラットフォームの検討, 情報処理学会研究報告 2009-MUS-083, 情報処理学会, 2009.
- [9] <http://nagasm.org/ASL/Propeller/diary02.html>
- [10] <http://www.fnarfbargle.com/bst.html>
- [11] <http://nagasm.org/ASL/Propeller2/>
- [12] <http://nagasm.org/ASL/postGainer4/index.html#SIGMUS201605>
- [13] http://nagasm.org/ASL/postGainer4/index.html#Propeller_source
- [14] 長嶋洋一, お触り楽器, 情報処理学会研究報告 (2015-MUS-108), 情報処理学会, 2015.
- [15] <http://www.youtube.com/watch?v=2G3R9eWWuAs> または <http://nagasm.org/ASL/postGainer5/>
- [16] http://www.youtube.com/watch?v=7rvw_5Pshrs または <http://nagasm.org/ASL/postGainer5/>