

サウンド知覚のカオス共鳴によるモデル化に向けて

長嶋 洋一†

†静岡文化芸術大学 〒430-8533 静岡県浜松市中区中央2-1-1

E-mail: †nagasm@suac.ac.jp

あらまし 人間が音楽を聴取する際の知覚認知現象を、聴取する人間の感覚/知覚/認知系に内在する非線形構造の数理的表現と、聴取される音楽に関する音響学/音楽学/心理学/美学に内在する非線形構造の数理的表現とで記述し、これらをカオス系システムの共鳴同期によるインタラクションとして数学的に記述/理解する体系を見出す、という目標に向けた研究のスタート段階での検討について報告する。

キーワード 非線形科学, 音楽情報科学, カオス, 引き込み

Towards sound cognition model by chaotic resonance

Yoichi NAGASHIMA†

†Shizuoka University of Art and Culture 2-1-1, chuo, Naka-ku, Shizuoka, 430-8533 Japan

E-mail: †nagasm@suac.ac.jp

Abstract This is the second report and a discussion for computer music with nonlinear science. The theme is a perception / cognition model with the chaotic resonance.

Keyword Nonlinear Science, Computer Music, Chaos, Entrainment

1. はじめに

筆者は過去に音楽情報科学/Computer Musicの領域において、カオスやニューラルネットのアイデアを作曲や公演(パフォーマーとライブ音楽システムとのインタラクション)に応用したり、マルチメディア知覚心理学のテーマとして、ビートの引き込み現象、映像酔い、筋電情報からのジェスチャ認識、車酔いなどについて研究してきた([1]-[10])。

2011年には、同期理論に関する文献とNLP研究会等の過去の研究をサーベイする中で、断片的であった概念を整理統合して非線形科学のアプローチから音楽情報科学研究を進めるために、(1)関連領域での筆者の研究創作活動の概要報告、(2)内外の関連研究のサーベイ報告、(3)Computer Musicにおける新しいアイデアの可能性、について報告した[11]。

2012年には、音楽領域におけるフラクタル・カオスなどの応用事例を調査するとともに、chaosに関してNLP研究会等の過去の研究を再検討する中で、(1)sonification (auditory display)というアプローチからのchaosの再考察と実験ソフトの制作と検討、(2)「音響を生成するchaos」と「音響を知覚するchaos」との相互作用としてのサウンド現象の考察、という2点について報告した[12]。

本発表ではこれらを受けて、「人間が音楽を聴取する際の知覚認知現象を、聴取する人間の感覚/知覚/認知系に内在する非線形構造の数理的表現と、聴取される音楽に関する音響学/音楽学/心理学/美学に内在する非線形構造の数理的表現とで記述し、これらをカオス系システムの共鳴同期によるインタラクションとして数学的に記述/理解する体系を見出す」、という新たな目標に向けた研究のスタート段階での検討について報告する。

2. これまでの検討内容の概要

2.1. 2011年の検討から

2011年の膨大な文献調査の結果の第一は「NGワード」であり、まず最初に「マッピング」を除外した。Computer Musicの世界では、宇宙線や植物電位や気象情報や経済指標など「時間とともに変動するもの」を音楽情報にマッピングする、という一つの主要な路線(ブーム)があって、当然のことながらカオスもそのソース(発生源)として一時代を築いた。しかし、次のステージに脱皮していくために、まずは安易なマッピングを避けることにした。

また、サーベイしながらメモした「キーワード」の一群として、以下を指摘した(順不同)。

非線形科学、インタラクション(カップリング)、複雑系、自律振動子、非線形振動子、カオス、カオスの淵(縁)、同期/引き込み、時間、テンポ、ビート、リズム、ジャンプ、(ホップ)分岐、アトラクタ、フラクタル、カタストロフィー、自己組織化、散逸構造(非平衡開放系)、リスナー、パフォーマー、コンポーザー、概日周期、活性/抑制因子、自己触媒、確率共鳴、確率同期、先行制御、主体性の逆転、位相縮約、振動場/カオス場、非局所結合、集団引き込み転移、リドルド構造、変調間欠性、ダイナミカルガラス/ガラスアトラクタ、むだ時間

音楽においてはたった1人であっても同時に作曲家であり演奏家であり聴衆である。複数のアンサンブルやコンサート/ライブでの分業となれば、その個々の自律系(内部で多種の自律系が時間遅れを持ちつつ非線形結合している非平衡開放系)がさらに相互作用を起こしている。ここからどのよう

に音楽の躍動が生まれるのかという研究には、生成系だけでなくマルチメディア心理学的アプローチも必要となる。

「引き込み」については、生命現象そのものが常に、外界とも生命体相互にも、引き込み引き込まれつつ存在している。音楽における不連続な多種の階層構造がそれぞれ非線形に相互作用している中で、どうやって音楽たる現象が生まれるのか、という問いに対して、非線形科学から「現象としての音楽」(周波数領域、時間領域の両方)の本質に迫るとともに、時間学的アプローチも必要となると思われる。

2.2. 2012年の検討から

20年前にも行っていたカオス生成プログラムを改良改訂して、カオスの可聴化に対する新しいアプローチを実験検討した。まず、あくまでシンプルなLogistic Function

$$X(n+1) = \mu \cdot X(n) \cdot (1 - X(n))$$

にこだわりつつ、パラメータ μ の設定精度を小数点以下4桁まで精密化し、サウンド生成のサブバッチとして内部的に同時に100個のサインオシレータがそれぞれ毎秒100回の演算結果に対応した周波数で鳴り続け、その全体の複合音響をサウンドとして知覚するシステムとすることで、従来のカオス生成システムでは知覚できなかった長いスパンの変化を聴覚的に聞き分けることができた。

続いて、従来はパラメータ μ に対して微細な変化を与えてきたが、位相空間内での軌道を変位させるという相互作用の可能性のあることから、演算値 $X(n+1)$ を与える、以下の新しいパラメータ λ (正負の値をとる微小量) を定義した。

$$A = \mu \cdot X(n) \cdot (1 - X(n))$$

$$X(n+1) = A + \lambda \cdot (X(n) - A)$$

この新しいカオス相互作用の発想は、軌道を与える $X(n)$ 自身によってカオス状態にある $X(n+1)$ を変化させるというものであり、 $\lambda > 0$ の場合には、粘性のある媒体上での振動における粘性抵抗のようなイメージである。図1が、この可聴化/可視化の機能を強化したソフトで、座標 $(X(n-1), X(n))$ をプロットすることにより、倍周期分岐やカオスに至る振る舞いを刻々とアニメーションのように「見る」ことが出来る。ごく一例を挙げれば、 $\mu = 3.9301$, $\lambda = 0.0079$ の付近で、これまでは発見できなかったような長周期の複雑な振る舞いを容易に認識できた。

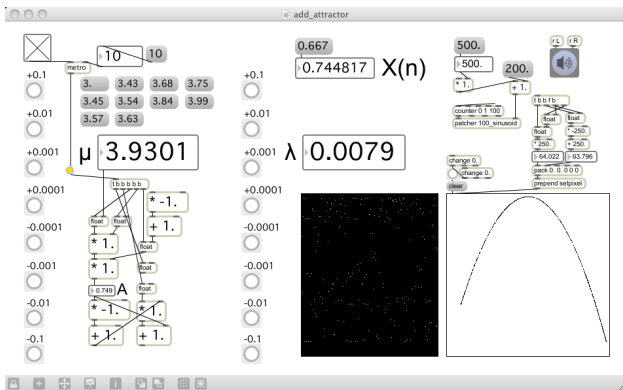


図1 新カオス可聴化ソフトの画面例

カオスの可聴化とともに検討したのは、「音響を生成するchaosと音響を知覚するchaosとの相互作用としてのサウンド現象」という視点である。ここには、(1)音響/音楽の生成ア

ルゴリズム自体にカオスの考え方を適用、(2)耳からの聴覚的知覚に関する生理学的反応モデルにおけるカオス的影響、(3)脳内(高密度・遅延付き離散ニューラルネットワーク)での聴覚的認知機構モデルにおけるカオスの共鳴/同期の枠組み、という3要素の検討が必要となる。

この背景としては、図2のように「作曲」のプロセス自体が、音響イメージを生成するPlayerとそれを客観的に聴取/評価/試行/取捨選択するListenerを内在させている事がある。コンピュータ音楽においては、これらをマルチエージェントのアルゴリズムで実現している。

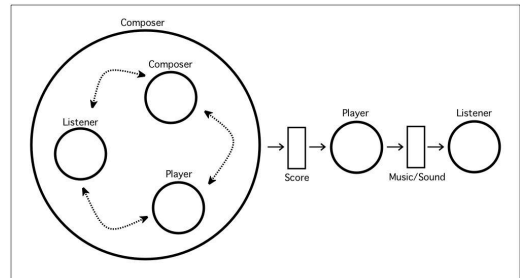


図2 「拡張されたComposer」モデル

そして図3のように「演奏」のプロセス自体にも、楽譜を解釈しアレンジ(ときにアドリブで作曲)する要素、自身の演奏出力フィードバックを客観的に聞いて補正するListenerが存在する。さらに図4のように「聴取」のプロセスでも、もっとも好例としてはJazz音楽の愛好者であれば、音楽演奏におけるコード進行やアドリブフレーズを半ば無意識に分析/追いかけてながら、その後の展開を予想している。この予想をうまく裏切る演奏や解釈がJazzの醍醐味であり、短期記憶スケールで裏切られたものが中期記憶スケールで新たな解釈として整理される快感となる。

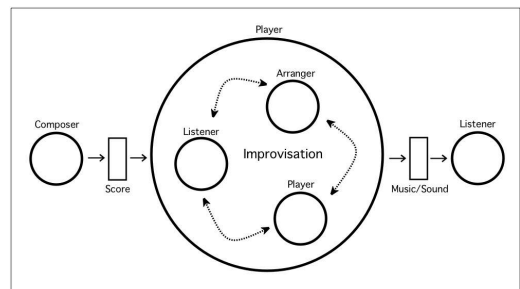


図3 「拡張されたPlayer」モデル

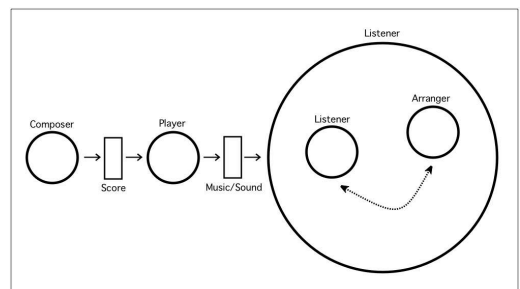


図4 「拡張されたListener」モデル

図5は、上記の古典的モデルから最近のテクノロジーの支援により進化してきた、いわば21世紀型の音楽エンタテインメントの基礎モデルである。作曲家は楽譜の代わりにデータやプログラムを作品として創作し、人間の演奏家に限らないシステムがこれを音楽/音響に変換する。

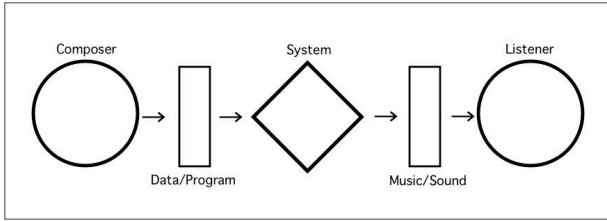


図5 「21世紀の音楽享受」モデル

図5の上流が拡張したクリエイターとなり、下流のリスナーが受動的聴取でなく積極的にシステムに働きかけてインタラクティブに享受、と発展すると、本研究で検討しているカオスのインタラクションの発展系をアルゴリズムとして盛り込むのも容易である。作曲家は音響として確定した音楽でなく、システムの挙動というアルゴリズムをプログラムの形で提供する。これをアクティブリスナーが聴取体験する際にはインターフェースを介して生成される音楽の挙動とインタラクションすることが出来るため、両者のカオスが自然な形で共鳴できる環境が整いつつある。

3. 新たな文献調査とメディア心理学

3.1. 新たな文献調査

2013年後半には、まず、それまでの関連文献([13]-[18])をさらに読み直すとともに、文献中のキーワードなどから派生して新たな文献をWebから探索したりamazonで仕入れたりNLP研究会関連の論文/研究報告を調査して、さらに勉強を進めた([19]-[33])。ここでは、特にサウンドの知覚認知に関する感覚処理/脳内処理に関係した生物リズムとカオス、そしてカオス指標のリアプノフ解析、信号を表現するためのヒルベルト変換などについて調べたが、まだまだ「読書百遍意自ずから通ず」の域には程遠く、NLP研究会への参加を含めて、さらに検討考察を続けていきたい。

3.2. マルチメディア心理学実験について

文献調査とともに筆者の過去の研究を新たな視点で再整理していて気付いたのは、本報告の冒頭に記した研究テーマに対して、縁遠い気がして見落としていた研究([6]-[10])が、実は重要な伏線/予備的研究であった、という事である。

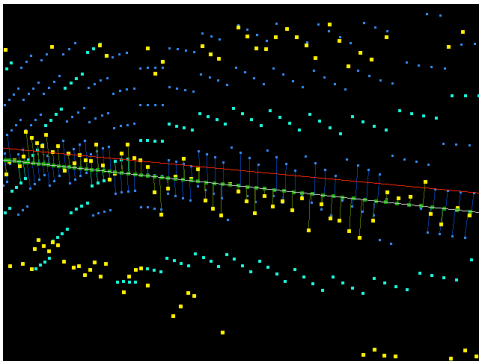


図6 「ビートの引き込み」心理学実験結果の一例

2002-2003年に進めた「音楽的ビートが映像的ビートの知覚に及ぼす引き込み効果」という研究[6]では、主としてメディア心理学/実験心理学の領域からアプローチしたために、「引き込み」という用語が非線形数理学の世界で entrainment と呼ばれているのも知らず、感覚的に“drawing-in effect”と名付けるほど稚拙であったが、しかし「視覚的

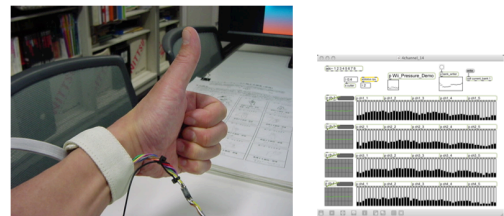
等間隔ビートを身体動作としてタッピング」するところに、聴覚的なBGMとしてごくわずかに8ビートのロックのテンポを漸増漸減変化させると引き込まれる(図6)、という、脳内のマルチメディア知覚認知における引き込みを実証していた。

2006-2007年に進めた「映像酔いとサウンドによる抑止の検討」という研究[7]では、無限に縮小を続けるループ動画の消失点を滑らかに移動させるよう画面全体をアフィン変換して、被験者がその消失点をタブレットペンで追従するタスクにおいて、末端二酸化炭素濃度の時間変化によって「酔い」指標をリアルタイム計測する実験システムを開発した。視覚的注視点である画面内の消失点の移動座標を時間的に先行してサウンド定位として聴覚的に提示した場合の「映像酔い」の抑止効果について調べた(図7)が、これもメディア心理学実験であるものの、脳内の知覚認知機構と、酔い(身体感覚からの予想との相違に起因)、そして短期記憶と予測/予告との関係という意味で、本研究に密接に関係している。

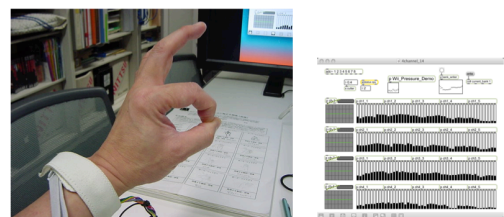


図7 「映像酔い」心理学実験システムの例

2010年に進めた「筋電センサによる手首から先のジェスチャ認識」の研究[8][9]では、Wiiリモコンのストラップに取り付けた4チャンネル筋電センサの情報を200バンドのFFT分析パターンとして学習して再現判定する(図8)実験を進めた。被験者ごとの個性とともに、事前のジェスチャ学習により、29種類のポーズから5種類ほどのジェスチャを良好に判定できる事を確認できたが、身体感覚と脳内パターン認識との調整に、画面に現れる視覚的情報(FFT200バンドの動きを見て微妙に調整する)の役割の検討は本研究にも繋がる。



親指を立てて「グッジョブ！」



親指と人差し指とでマルを作って「OK」

図8 手首筋電情報認識システムの実験例(1)

2011-2012年に進めた「身体に加わる加速度とサウンドの音像移動に関する心理学実験」の研究[10]では、クルマに乗る被験者(瞑目)が音楽を聴取する際に、身体に加わる加速度よりわずかに先行してサウンド定位状態の移動として提示することで「酔い」の抑止に役立つか、を調べた(図9)。映像酔いの検出に利用した末端二酸化炭素濃度センサと、被験者が「快/不快」を印象表示するジョイスティック操作をリアルタイム計測することで、図10のように無意識下の脳内状態をデータから推計できる結果が得られた。この一連の研究の成果は、後述のように本研究にも役立つと期待できる。

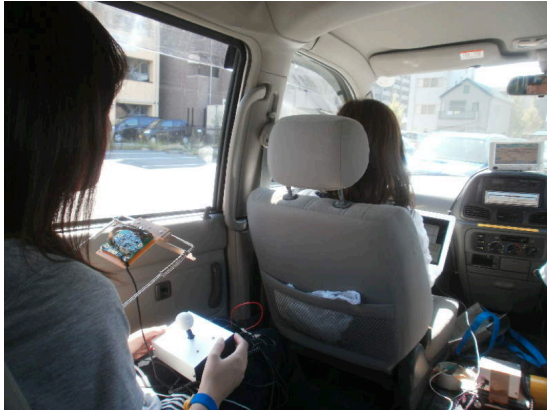


図9 「車酔い vs サウンド予告」の実験風景

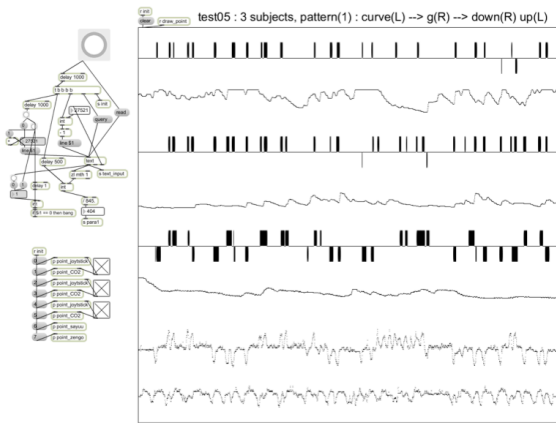


図10 「車酔い vs サウンド予告」の実験結果例

4. ミクロとマクロの架け橋

筆者は著書[34-36]の中で、音源LSIを開発する際に、大規模LSI(DSP)の検証/修正プロセスにおいて、1.5マイクロルールNANDゲートの遅延による誤差を「ピコ秒」スケールのミクロ領域で探索するとともに、15000ゲートのLSI全回路をホストCPUから「秒～分」スケールのマクロ領域でサウンド生成制御して検証することで、「シミュレーションはOK、試作チップでNG」というLSI製造エラーの原因を突き止めて対策した事例を紹介した。これを、上述のマルチメディア心理学実験の研究から得られた視点と絡めると、「音楽を聴取する人間の感覚/知覚/認知系に内在する非線形構造の数理的表現と、聴取される音楽に関する音響学/音楽学/心理学/美学に内在する非線形構造の数理的表現とのインタラクションとして記述/理解」という本研究のテーマに対して、非常に示唆的である。

非線形科学と生物の知覚認知に関する多くの文献は、人間の感覚系ニューロン・脳内ニューロンの挙動において、ミク

ロのレベルで多種の自律システムやカオスの挙動の存在を紹介している。また、音楽心理学や認知科学に関する多くの文献は、最終的には「感情」「感性」に至る人間の高度の心理的プロセスを、fMRIなどにより脳内機能として推定するとともに、マクロなニューラルネットとしてのモデル化(カオスニューロン)を模索している。一般的な脳内機能全般というのはあまりに対象として狭くしているが、筆者がターゲットとしているのは「音楽」「サウンド」「ビート」など、メディア心理学の領域に限定しており、非線形科学として「リズム」「同期」「引き込み」などの現象として馴染みもある。そこで、ミクロ領域でニューロン系・感覚器などのモデル化を目指しながら、マクロ領域の音楽学的・美学的な知見のモデル化も目指し、これらのインタラクションをカオス共鳴という架け橋で結び付けよう、というのが本研究の基本方針となった。

5. 予測・予告の効果

本研究のもう一つの重要なアプローチは「時間」である。音楽やサウンドは時間とともに推移するのは当然であるが、前述のメディア心理学実験/研究の結果から、脳内機能として時間的に先行した「予測・予告」の影響の重要性を確認したところである。これは時間学的には、脳内の短期/中期/長期の記憶構造とも関係した視点である。



図11 「音楽的ビート vs 映像的ビート」の実験風景

「音楽的ビートが映像的ビートの知覚に及ぼす引き込み効果」[6]の実験(図11)では、等間隔の視覚的ビート(静止画)を持つモーフィング動画を実験素材とし、被験者へのタスク「等間隔の視覚的ビートでタッピング」を与えた。典型的な被験者データ(図6・黄色)は、緑色で等間隔の視覚的ビートに対して、青色の音楽ビートの変化(拡大して軸からの距離として表示)の漸増漸減変化に引き込まれるが、その変位は音楽ビートの「裏拍」付近でジャンプして復帰し、鋸歯状波のような変化となった。視覚的情報と聴覚的情報を結び付けている物理量は存在せず、インタラクションは脳内の知覚認知機能の中での相互作用であり、ここにニューロンのカオス共鳴モデルを構築するための足場となる研究結果である。

「映像酔いとサウンドによる抑止の検討」[7]の実験(図12)では、被験者がタブレットペンで視覚的注視点(グルグルと移動する)を追従するタスクにおいて、時間的に先行してその移動をサウンド定位として聴覚的に提示した場合の「映像酔い」の抑止効果について調べた。これは予測を促す予告として設定したが、視覚的情報の予測に聴覚的情報が役立つ、とまで結論付ける事は出来なかった。

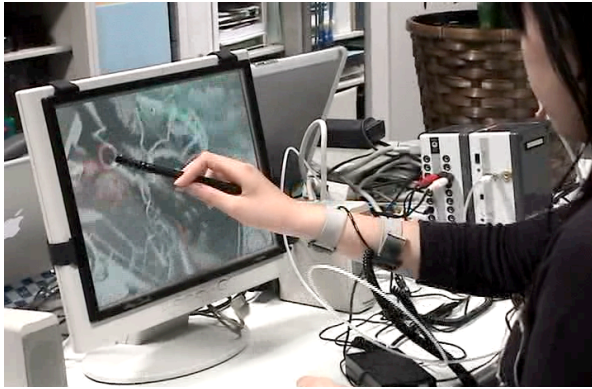


図12 「映像酔いとサウンド」の実験風景

一方、「身体に加わる加速度とサウンドの音像移動に関する心理学実験」[10]では、クルマに乗る被験者(瞑目)が音楽を聴取する際に、身体に加わる加速度よりわずかに先行してサウンド定位状態の移動として提示して「快/不快」の印象表示を求めたが、「酔い」と判定された一群を除く被験者は特性として相反する2群に分かれた。その一方は身体に加わる加速度方向へのサウンド移動を好み、もう一方は身体に加わる加速度と逆方向へのサウンド移動を好んだが、これは「運転手」と「乗客」の立場、即ち能動的聴取と受動的聴取との違いとも考えられる結果である。この研究において確立したメディア心理学・被験者実験の手法(図13)は、本研究において「予測」という脳内機能の探究に役立つと思われる。

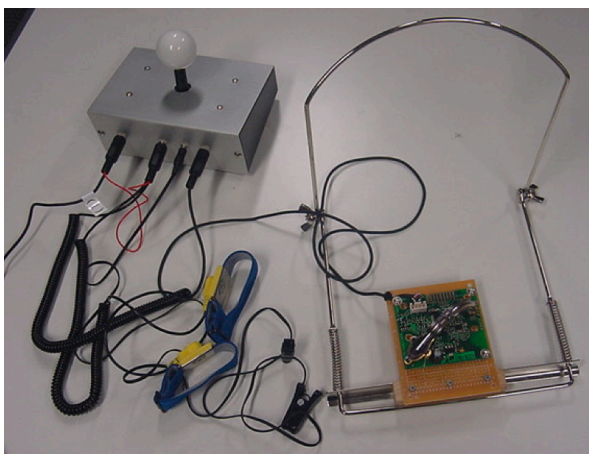


図13 「身体に加わる加速度とサウンド」の実験装置

「筋電センサによる手首から先のジェスチャ認識」[8][9]では、29種類のポーズから5種類のジェスチャを良好に判定できる事を確認できたが、ここで役立ったのが、図14に示す学習・確認モードであった。4チャンネル200バンドFFT分析データは、同じジェスチャであっても被験者ごとにまちまちであったが、自分が登録したジェスチャのデータと照合する段階で、29種類のポーズに対する自分の過去データとのリアルタイム照合結果を動く棒グラフとして提示すると、多くの被験者が無意識に微妙な筋肉コントロール(脱力/緊張/弛緩)を駆使して、短時間に特定のジェスチャに対応する筋電情報を生成するようになった。人間の適応能力と言えはそれまでだが、視覚的情報のフィードバックが脳内の予測機能を活用して身体制御と組み合わせる好例となった。この予測/予告の活用は、本研究の重要な武器となりそうである。

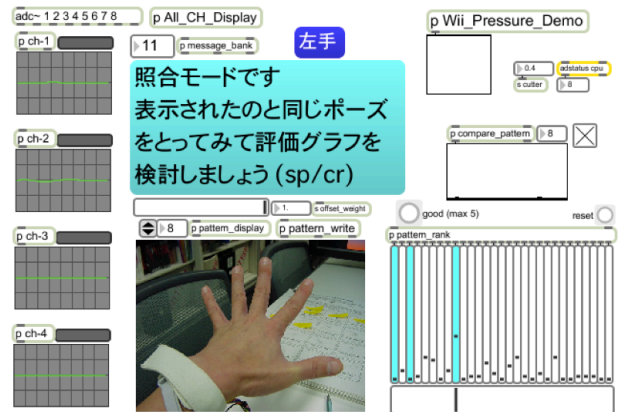
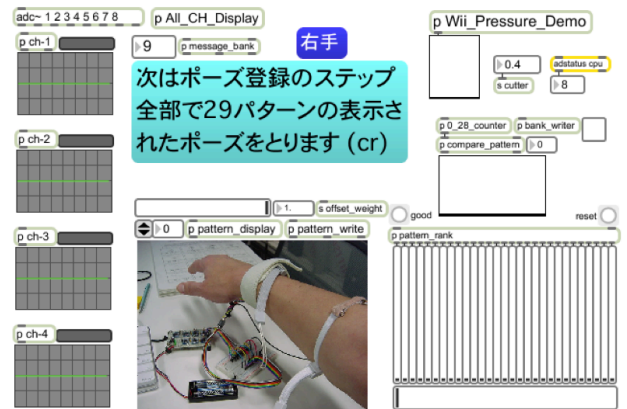


図14 手首筋電情報認識システムの実験例(2)

6. 実験環境について

本研究に関する実験のプラットフォームについては、これまで20年以上にわたって進化し続けている「Max」([37]-[41])を活用する方針である。文献など多くの非線形数理シミュレーションがオフラインで、つまりノンリアルタイムで数値計算・グラフ表示を行ってきているが、本研究においては、知覚認知プロセスに関して、被験者とセンサを通じてインタラクションしたりフィードバックをかける事が重要であり、リアルタイムにマルチメディア処理システムを構築する必要がある。調べてみると、Max6には図15のようにヒルベルト変換のオブジェクトも完備しているようで、簡単な実験のプロトタイピングには好適である。

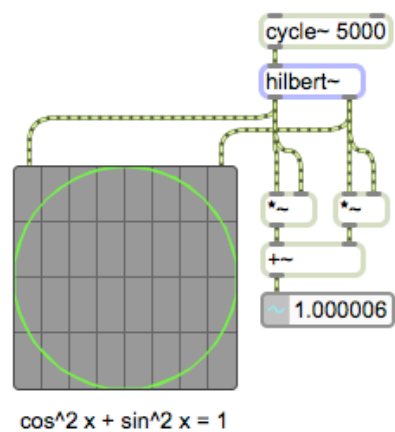


図15 Max6の「hilbert~」オブジェクトの例

7. おわりに

文献[19]を注文したamazonから「この本を注文した人はこちらにも注文している」と推薦されポチっと購入した文献[42] (前半は惹き付けたが後半はやや残念・・・)を本稿執筆直後に4時間半ほどで読破してみると、本研究の「人間が音楽を聴取する際の知覚認知現象を・・・カオス系システムの共鳴同期によるインタラクションとして数学的に記述/理解」というアプローチがあなたがち無謀でもない、と安心できた。

研究はいきなり「音楽」の深みに入ることなく、まずはサウンド知覚については、ピッチ領域で和音/コードの認識(倍音による協和理論は同期に現れる「悪魔の階段」と非常に類似している)から、また時間/リズム領域では拍の分割と絡んだビート知覚(引き込みとスリップが類似)の心理学から攻めたいと考えている。NLP領域の専門家の諸兄から、ぜひ発展的・網羅的な御意見・コメント・アドバイス等をいただければ幸いである。

文 献 等

- [1] Art & Science Laboratory <http://nagasm.org>
- [2] Y. Nagashima, PEGASUS-2 : Real-Time Composing Environment with Chaotic Interaction Model, Proceedings of 1993 International Computer Music Conference, ICMA, 1993.
- [3] Y. Nagashima, Chaotic Interaction Model for Compositional Structure, Proceedings of IAKTA / LIST International Workshop on Knowledge Technology in the Arts, IAKTA, 1993.
- [4] 長嶋洋一, Chaos理論とComputer Music, 京都芸術短期大学紀要 [瓜生] 第16号1993年, 京都芸術短期大学, 1994.
- [5] 長嶋洋一, マルチメディア作品におけるカオス情報処理の応用(研究ノート), 京都芸術短期大学紀要 [瓜生] 第18号1995年, 京都芸術短期大学, 1996.
- [6] 長嶋洋一, 音楽的ビートが映像的ビートの知覚に及ぼす引き込み効果, 芸術科学会論文誌 Vol. 3 No. 1, 芸術科学会, 2003.
- [7] 長嶋洋一, サウンドの空間的予告による映像酔いの抑止について, 情報処理学会研究報告 Vol. 2007, No. 127 (2007-MUS-73), 情報処理学会, 2007.
- [8] 長嶋洋一, 新しい筋電楽器のための筋電情報認識手法, 情報処理学会研究報告 2010-MUS-085, 情報処理学会, 2010.
- [9] 長嶋洋一, 筋電センサの認識に関する新しいアプローチ, 静岡文化芸術大学紀要・第11号2010年, 静岡文化芸術大学, 2011.
- [10] 長嶋洋一, 身体に加わる加速度とサウンドの音像移動に関する心理学実験報告, 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会資料 (技術研究報告) HCS2012-5, 電子情報通信学会, 2012.
- [11] 長嶋洋一, 非線形科学の視点から「コンピュータ音楽」を考える, 電子情報通信学会非線形問題研究会資料 (技術研究報告) NLP2010-133, 電子情報通信学会, 2011.
- [12] 長嶋洋一, カオスに対する聴覚的なアプローチ, 電子情報通信学会非線形問題研究会資料 (技術研究報告) NLP2010-158, 電子情報通信学会, 2012.
- [13] A. Pikovsky, M. I. Rosenblum, and J. Kurths, 徳田功 (訳), 同期理論の基礎と応用, 丸善, 2009.
- [14] 蔵本由紀(編), リズム現象の世界, 東京大学出版会, 2005.
- [15] C. Madden, Fractals in Music, High art Press, Salt Lake City, 1999.
- [16] G. Loy, Musimatics, pp.304-363, The MIT Press, Cambridge, 2006.
- [17] R. L. Devany, An Introduction to Chaotic Dynamical Systems (Second Edition), Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [18] R. L. Devaney, 後藤憲一(訳), カオス力学系入門 第2版, 共立出版, 2003.
- [19] S. H. Strogatz, Nonlinear Dynamics and Chaos, Westview Press, 1994.
- [20] 郡宏, 森田善久, 生物リズムと力学系, 共立出版, 2011.
- [21] 郡宏, 力学系によるアプローチ: 振動現象を具体例として, http://www.cf.ocha.ac.jp/acpro/kori/papers/suri_kagaku_2011.pdf
- [22] 坂口英継, 非線形非平衡物理, <http://www.asem.kyushu-u.ac.jp/qq/qq02/ttt.pdf>
- [23] 郡宏, 振動と同期の数学的思考法I, <http://chronobiology.jp/journal/JSC2012-1-022.pdf>
- [24] 郡宏, 振動と同期の数学的思考法II, <http://chronobiology.jp/journal/JSC2012-2-080.pdf>
- [25] 千葉逸人, 無限次元蔵本モデルの安定性理論, 京都大学数理解析研究所講義録, 第1688巻2010年, 2010.
- [26] 竹内一将, 大自由度力学系の有効次元と示量性, <http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~kyodo/kokyuroku/contents/pdf/1827-13.pdf>
- [27] 董際国, 森田啓義, 整数ロジスティック写像の諸性質: 発散, 収束, 周期性, 電子情報通信学会技術研究報告. NLP2012-112, 電子情報通信学会, 2012
- [28] 長谷川拓海, 坪根正, 安定性変換に基づく未知定常状態の安定化, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J96-A, No. 9, 電子情報通信学会, 2013
- [29] 信川創作, 西村治彦, 堅田尚郁, カオスアトラクタ併合によるcubic離散写像及びカオスニューロン系におけるカオス共鳴, 電子情報通信学会論文誌A, Vol. J95-A No. 4, 電子情報通信学会, 2012
- [30] 平田祥人, 池口徹, カオス時系列解析, http://www.ieice-hbkb.org/portal/doc_508.html
- [31] 金久保正明, カオスニューラルネットワーク, <http://www.sist.ac.jp/~kanakubo/research/neuro/chaosneuralnetwork.html>
- [32] 古賀博之, リアプノフ解析, <http://www.geocities.co.jp/Technopolis-Mars/1795/study/Lyapunov.html>
- [33] Nagano Japan Radio Co., Understanding Analytic Signal & Digital Signal Processing for Software Defined Radio, http://www1.accsnet.ne.jp/~aml00731/c/communicate/Seminar_text.pdf
- [34] 著書 <http://nagasm.org/ASL/books/>
- [35] 長嶋洋一, マイコン技術者スキルアップ事典, CQ出版, 1992.
- [36] 長嶋洋一, コンピュータサウンドの世界, CQ出版, 1999.
- [37] Max6, <http://cycling74.com>
- [38] <http://nagasm.org/ASL/max01/>
- [39] <http://nagasm.org/ASL/max02/>
- [40] <http://nagasm.org/ASL/dspss2002/>
- [41] <http://nagasm.org/ASL/SIGMUS0202/>
- [42] スティーヴン・ストロガッツ, SYNC なぜ自然はシンクロしたがるのか, 早川書房, 2005.