

## 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(2) --- 心理学実験システムの開発とレイテンシの計測 ---

長嶋洋一 (SUAC/ASL)

概要：聴覚的情報と視覚的情報を同時に視聴する「マルチメディアコンテンツ」の感覚間調和に関して、新たな視点でビートを「周期的に繰り返すリズムのノリが知覚されるアクセント部分」と再定義した。その上で、音楽的ビートが映像的ビートの知覚に及ぼす局所的な「引き込み効果」を提唱し、これを解析・検証するための実験システムを制作し被験者テストの実験・評価を行った。音楽情報科学の視点から、コンピュータを用いた音楽心理学/知覚認知心理学の実験で重要となる、実験システムのレイテンシ(遅延)についても詳細に検討・考察した。ここでは第2報として、心理学実験システムの開発、特に映像刺激と音楽刺激の素材制作の詳細報告と、レイテンシ計測実験の報告を行った。

## Drawing-in Effect on Perception of Beats in Multimedia (2) --- Development of Experiment System and Measurement of Latency ---

Yoichi Nagashima ( nagasm@computer.org )

Abstracts : This research is about "the interaction of beats" in multimedia. Like a music video, the case where the beat of music and images synchronizes completely, it is generally natural and comfortable for people. In this research the tempo between images and music is slightly different. I produced the experiment system to generate visual beats and musical beats with slightly different tempo in real-time, and tested with many human subjects. I will report and discuss about this.

### 1. はじめに

人間はリズムとともに生存/生活している。心理学の領域では、音楽/音声などの聴覚情報、映画/ビデオなどの視覚情報、ダンス/身振りなどの身体運動情報に対して、時間的に繰り返すリズムを知覚・認知する人間の心理的メカニズムが探究されてきた。また音楽情報科学の領域でも、リズム・ビート・拍子などの時間的要素を対象としたテーマにおいて、聴覚情報はもちろんのこと、視覚情報や身体運動情報と一体となったマルチメディア情報・マルチモーダル情報が研究の対象となってきた([1]-[67])。また、村尾は新しい音楽ビートの感じ方のモデルとして、Togo Beat, Toe Beat, Heel Beat を提唱した [61][62]。

本研究では、聴覚的・視覚的情報を同時に視聴するマルチメディアコンテンツの感覚間調和 intersensory harmony に関して、新たな視点でビートを「周期的に繰り返すリズムのノリが知覚されるアクセント部分」と再定義した。その上で、音楽的ビートが映像的ビートの知覚に及ぼす局所的な「引き込み効果」(非線形システムの同調現象である引き込み現象 entrainment とは異なる)を提唱し、これを解析・検証するための新しい実験システムを制作し、被験者テストによる実験・評価を行った。また音楽情報科学の視点から、コンピュータを用いた音楽心理学/知覚認知心理学の実験で重要となる、実験システムのレイテンシ(遅延)についても詳細に検討・考察した。

既に音楽知覚認知学会2003年度春季研究会において本研究に関して「リズムについて」「ビートについて」「従来の心理学実験の問題点の検討」「村尾のタゴビート」「全体の実験計画」等について詳しく述べたので本稿ではこの部分は省略する(文献[68]を参照のこと)。本稿ではこの第2報として、心理学実験システムの開発、特に映像刺激と音楽刺激の素材制作の詳細報告と、レイテンシ計測実験の報告を行う。

### 2. 研究の概要とビートの引き込み効果

対象とする映像と音楽のテンポは一定とし、音楽の拍子はいわゆる「エイトビート(8/8)」に統一した。本研究における「ビート」は、たんに「リズムのアクセント部分」というだけでなく、「ノリのあるリズムのアクセント部分」と定義した。ノリにより、このビートの繰り返しを知覚する人間は「気持ちいい」心理状態(情緒的反応)になる、という部分が重要である。

対象とする音楽はヒールビートであり、聴覚の時間的分解能から比較的狭い時間幅であると考えられる。これに対して身体的ビートは、マーチングバンドの行進ステップと演奏しているマーチ音楽のビートを調べた研究により、その時間的な幅が広いこと、経験者と初心者との個人差が大きいことが報告された[24]-[26]。視覚的ビートについては、視覚の時間的分解能と視覚の反応速度や残存時間(残像)の効果により、聴覚より広い心理的ビート時間幅を持つとも考えられる。村尾の分類で言えばタゴビートないしトッビートの性格をより強く持っている可能性がある。本研究においては、映像的ビートとを映像の中に明らかな視覚的アクセントが周期的に存在し、その連なりが繰り返しによりリズムを作り出すタイミング、とまず定義した。一般には映像が瞬間的に激しく動く場所がアクセントであると思われがちであるが、突然の動き出しは予期できないので、ノリのあるビートとはならない。逆にほぼ一定で動いている映像が周期的に静止し、しかもその繰り返しパターンが予測される関係性を持つ場合には、周期的に出現する静止部分をビートとして容易に知覚できる。ブレイクダンスの静止姿勢のアクセント感はこの原理をそのまま実現した好例である。そこで本研究の心理学実験のための映像素材(視覚的刺激)については、ムービーという動画の中で、周期的に動きと静止がなめらかに交互に繰り返す、というリズムを構成し、ここからノリのある映像的ビートを被験者に提

供した。本稿ではこの部分について詳しく後述する。

本研究で提唱する「引き込み効果」を「ウォークマンで音楽を聞きながら一定のテンポでウォーキングしている」という例で解説する。歩行運動の場合には、運動ビートの瞬間が、さっきは地面から離れる瞬間(つま先の蹴り出し)が音楽ビートと一致していたのが、次第に面を強く蹴る瞬間、さらに足の裏が着地して地面を叩く瞬間、と少しずつ前倒しされていく。しかし、いずれも時間的に幅を持つ運動ビートの幅の中なので許容され、乗れる。そしてズレがいよいよ大きくなると、例えば音楽の表ビート(BDのビート)と同期していた運動ビートが、今度は自然に音楽の裏ビート(SDのビート)に「乗り換えて」またまた両者の同期したビートを楽しむ、という現象が起きる。細かく見れば、さっきまで足の裏が着地して地面を叩く瞬間と一致していた音楽のビートがずれたと知覚されると、音楽の裏表の反対側のビートがこれから足の裏が着地して地面を叩く瞬間にほぼ近くなり、このずれは次第に縮まって一致してきて、さらに地面を強く蹴る瞬間へ、地面から離れる瞬間(つま先の蹴り出し)へ、と一致しながらノリが続く。結果として、音楽のビートのテンポも運動のビートのテンポもともに変化しない(非線形現象の用語「引き込み現象」entrainmentではない)にもかかわらず、運動ビートの許容幅の中で音楽ビートとの一致を自然に楽しむことで、音楽ビートに対して見てみると、しばらくは表ビートで乗り、やがて裏ビートで乗り、また次に表ビートでのノリに、と(無意識的に)乗り換えている。一致していると解釈することで気持ちいい、という瞬間に着目して運動のビートを見ると、そこでは少しだけ速いテンポの表ビートに引き寄せられて局所的に微小に加速し、やがて後から来る裏ビートに乗り換えてまた加速し、という速度の微小なギザギザ変化を繰り返すことになる。これが「引き込み効果」である。

### 3. 実験システムの概要

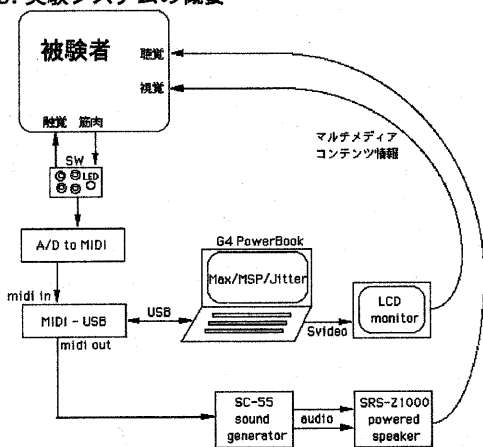


図1 心理学実験のシステム全体図

本研究では図1のような心理学実験システムをデザインして実験を行った。被験者はLCDモニタ内の映像のビートに合わせてマイクロスイッチでタッピングを行

い、全データはMax/MSP/Jitterにより開発した心理学実験システム内にデータとして自動記録された。なお、実験システムのうち、心理学実験の被験者インターフェースの開発、被験者ごとの対応機能、実験結果データの3次元可視化(図2)については、来月にFIT2003で詳細に報告する予定なので本稿では省略する。

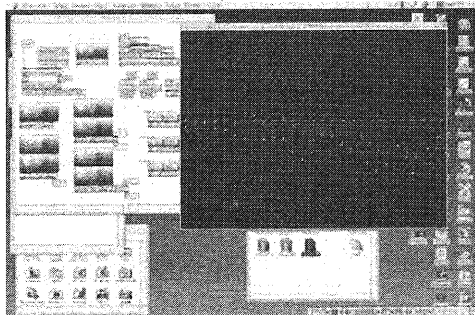


図2 データの3次元可視化システムの画面例

### 4. 映像素材の制作

ここでは、本研究の心理学実験において使用した映像素材の制作について述べる。まず最初に従来の心理学・認知科学の研究において心理学実験に用いられた視覚的刺激の問題点を検討する。次に実際の映像素材をQuickTimeムービーとして制作した過程を紹介し、さらに心理学実験システム内での再生環境を報告する。

#### 4-1. 視覚的刺激の問題点の検討

従来の研究で視覚的刺激として使用されてきたものに、モニタ上の抽象的な図形の明滅やLEDランプ等を瞬間的に点灯させるフラッシュタイプがある。しかしこれは、音楽知覚との同期というよりは視覚的刺激の変化に対する反射神経・運動神経のテストという性格が強くなる問題点が指摘された。また、既知の知覚心理学的報告との関係にも注意する必要がある[7][9][13][15][19]。

従来の研究で用いられた他の視覚的刺激としては、指揮棒の先端が描く放物線や、単純な幾何学図形の軌道上を運動する輝点により、ビート点への到達を予測させる軌跡追跡タイプがあった。しかしこれは単純な視覚的刺激の繰り返しで、短時間で飽きがきたり眠気を催しやすい。本研究では実験時間としておよそ2-3分間の間に起きる心理的知覚現象を計測するために、その間ずっと被験者の注意(興味)を喚起するような、自然で一般的な映像が視覚刺激の素材として要求される。

従来の研究で一般的な映像を使用したものに、風景などの静止画や、映画のワンシーンなどの映像を強制的に切り替える瞬間をビート(アクセント)とする、映像スイッチタイプがある。しかし人物写真とか風景写真のショットを一定時間ごとに切り替えた場合、新しいショットが提示されるとサッカーカードsaccadeという眼球運動(強制的にピクッと動く)が起きる。このサッカーカードの瞬間は視覚的に抑制されて目は見えない状態である(これにより視野のプレ感覚を抑制する)[19]。映像や画像を瞬間的に切り替えるこのような視覚的刺激の場合、被験者は短い注視時間でかつ長いサッカー距離

をもった画面走査を行い画面全体のおおまかな情報を掴もうとする。被験者の視線はめまぐるしい移動を強制され、意味的な繋がりがない(余計な先入観や意味を排除)ために集中を持続して画面を注視することは非常に困難となる。

映像において画面を切り替える手法としては、瞬間的にスイッチングするだけではない。より自然に画像を切り替えるための代表的な方法(エフェクト)としては、(1)ワイプ、(2)クロスズーム、(3)クロスディゾルブ(クロスフェード)、(4)モーフィング、等がある。(1)のワイプの場合、各種のワイプパターンが知られているが、いずれも画像そのものの情報に加えて、ワイプの運動パターンと運動方向という新しい情報が追加されるために視覚的刺激としては適当ではない。(2)のクロスズームにおいても、画像そのものの情報に加えて、ズームインとズームアウトという運動の知覚情報が追加されるために、視覚的刺激としては適当ではない。(3)のクロスディゾルブ(クロスフェード)の場合には運動成分はなくなるものの、輝度変化や透明度変化により前後の画像が接続されるために、肝心の映像変化のアクセントである視覚的ビートが時間的に曖昧になる欠点がある。

ところで(4)のモーフィングについては、前後の静止画に似た性質の画像(例えば、ほぼ同じポーズとアングルの犬の画像同士)であれば、モーフィングの対応点(鼻から鼻、尻尾から尻尾など)を指定することで、スムーズに前後の画像が繋がる。これはほとんどサッカーボールの運動を起こさず、視点を固定しつつも注意を喚起する有効な素材である。また、モーフィングしている最中にはいわば運動中の状態で、モーフィングのスタートとエンドの部分は静止していることで、これを繰り返すことはリズムを生み出し、うまく編集することでノリのある映像的ビートを構成できる可能性がある。そこで本研究の心理学実験においては、映像素材としてこのモーフィングを採用した。

#### 4-2. QuickTimeムービーの制作

以上の状況と考察を受けて、本研究では以下のように被験者テスト(心理学実験)のためのサンプル映像をQuickTimeムービーとして制作した。

映像の素材は、幾何学図形などの作画的な図形でなく、人間にとって自然な静止画の風景写真をベースとするために、筆者がかつて映像作品の制作のために取材撮影した約500体の地蔵のデジカメ写真を用いた。取材地は静岡県奥浜名湖地方にある奥山半僧坊・方広寺(五百羅漢で知られる名刹)である。作業はまず、500枚を越えるデジカメ写真から、(1)画面中央に地蔵が1体だけ写っている、(2)周囲に自然の風景(森林や土手など)、(3)個々の地蔵は全て異なったもの、という条件で240枚を選んだ。人とか動物の写真でなく地蔵としたのは、(a)単なる風景でなく中心に地蔵というテーマがあると被験者が集中できる、(b)人間や動物などでは個人的・個人的な嗜好で反応して実験誤差を生む、(c)地蔵は全て石で出来ているために基本的なテクスチャが共通で、無個性の同等キャラクタと知覚しやすい、(d)ほぼ中央に無個性の地蔵があると切り替え時に視線が画面全体を無駄に走査しない、等の理由による。

次に、この240枚のVGA(640\*480ピクセル)静止画データから作為なく撮影順に隣接した2枚を次々に取り出し、シェアウェア「Morpher」(M.Fujimiyama氏制作)を利用して以下の設定条件でモーフィングムービーを制作した。

1. モーフィング前後のそれぞれの地蔵の17箇所(頭頂、両目、鼻、口、顎、両耳上、両耳下、両肩、胴体両脇、胴体両底部、底部中央)を個別にクリックして対応づける
2. モーフィングは等速でなく、最初と最後が減速され途中が加速されS字カーブ特性の「Natural Mode」を指定する
3. スタート画像と最終画像との間を30段階に分割してモーフィングを行い(全体としては31フレームのムービー)、レンダリングには最高画質モードを指定する
4. フレーム速度を10fpsとし(ムービーの長さは約3秒)、画質は無圧縮で最高画質モードを指定する

これによって240枚の静止画から隣接する2枚を選んで1本のムービーが作られ、次のムービーは最終画像をスタートとして次の1枚の画像と組み合わせることで、ムービーは全部で239本となった。画像無圧縮指定のために全てのムービーのサイズは同一(約19MB)である。モーフィング速度として単純なニア特性でなく、最初と最後が減速され途中が加速されるS字カーブ特性の「Natural Mode」を指定したことは重要であり、結果として視覚的ビートのノリを生み出す「自然な静止時間」が得られた。上記の設定条件では標準的なG4Macコンピュータ1台で1本のムービーのレンダリング処理に3-4時間かかり、239本のムービー制作の期間は45台のMacで約1週間であった。

239本のQuickTimeムービーが完成した後に、シェアウェア「Play it Cool!」(Bridge 1 Software社)を利用して、隣接する静止画同士が結合するように全て連結し、全体として1本のムービー(4552MB)となった。例えば静止画[A]から静止画[B]までのモーフィングムービーの最後は静止画[B]であり、ここに静止画[B]から静止画[C]までのモーフィングムービーを連結することで[A]→[B]→[C]という滑らかなムービーとなり、これを240枚の静止画が順に登場するようにした。モーフィング速度をS字特性として静止画の付近では減速している事と、静止画は結合した両方のムービーに共通で2フレーム連続している事により、ムービー全体を見た場合には、静止画部分を(ブレイクダンスと似た感覚で)映像的ビートと見た場合には、ビート部分の候補時間帯が広くなり、ピンポイント限定の反射神経テストのような従来の提示映像刺激に比べ自然な実験素材を実現できた。

このVGAサイズ無圧縮のQuickTimeムービーはDVD-R(4.3GB)にも入らないサイズとなったため、実際に実験で利用する素材ムービーとして、ソフトウェア「Premiere」(Adobe Systems社)を使用し圧縮した。再圧縮の設定条件は以下である。

1. 画素数を320\*240ピクセルと1/4に設定する
2. 画像圧縮プロトコルとして「フォトJPEG」形式(画質:50パーセント)を指定する
3. 速度(デレージョン)を4倍速(400パーセント)に指定する(フレームを開く)
4. フレーム速度を10fpsとする
5. これにより静止画から静止画までの平均フレーム数は7.75フレーム(ムービー全体:1852フレーム[-31\*239/4])となる

画素数を1/4に削減した理由は、「標準画像の解像度を1/2-1/4-1/8と劣化させても、コントラストを劣化させても、画面サイズを1/4-1/9-1/16と小さくしても、画像に対する認知度はほとんど変化しなかった」という過去の研究報告による[19]。以上により、完成したQTムー

ビーのサイズは45.9MBとなった。

#### 4-3. Max/MSP/Jitter上でのQTムービーの再生

完成した映像素材QuickTimeムービーは100MBの領域を確保したRAMディスク内に置くことで、HDDアクセス時の速度変動の無いスムーズなムービー再生を実現した。QuickTimeムービーは初期値110msecごとにインクリメントされる数値をフレーム指定として与えることでフレーム単位で駆動して再生した。図3はこの心理学実験システムMax/MSP/Jitterメインパッチである。

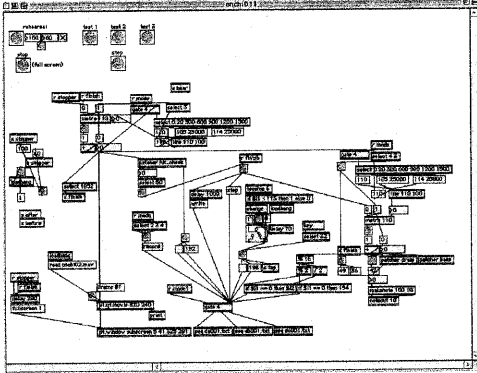


図3 心理学実験システムのメインパッチ

#### 4-4. 被験者への映像素材の提示

320\*240ピクセルのムービー用スクリーンウィンドウは、コンピュータのサブ画面内に移動しフルスクリーン指定によってVGA画面(640\*480)にフルサイズ拡大され、S-video画像出力端子からSビデオケーブル(長さ1メートル)で接続された、SHARP LCDモニタに表示した。LCDモニタは被験者の正面およそ50cmの距離に置き、画面の輝度は3段階のうち、もっとも映像刺激として鮮明な「明るい」を設定した。モニタ背面のスタンドを被験者自身が調整して、もっとも画面を見やすい角度に調整したために、液晶画面に特有の角度による見にくさは回避できた。

### 5. 音楽素材の制作

本研究の心理学実験において使用した音楽素材の制作について述べる。まず最初に、従来の心理学・認知科学の研究において心理学実験に用いられた音楽的刺激の問題点を検討する。次に実際の音楽素材をMaxのパッチとして制作した過程を紹介し、さらに心理学実験システム内での再生環境を報告する。

#### 5-1. 音楽的刺激の問題点の検討

従来の研究で音楽的刺激として使用されてきたものに、メトロノーム音やクリック音やスタッカートで同一音高のピアノ音などがある。これは和音やメロディーによって調的なリズムやフレーズのリズムなどの別種の要素が入り込むことを排除するためであるが、クリックとクリックとの時間的間隔の心理学実験ならともかく、本研究で目指すリズム知覚実験としては重大な欠陥がある。

その第一の理由は、単純なクリックの羅列は心理的なゲシュタルト知覚の働きによっていろいろに(2拍子

系/3拍子系等)体制化されてしまう、という問題である[2]。第二の欠点は、短時間でなくビート感の引き込み効果という知覚認知の漸進的プロセス実験の刺激とするには、単調さに起因する慣れ・飽き・眠気などによって素材として適さない[17][33]。そして第三の、というよりも最大の問題点は、単なるクリックの羅列にはノリがないので、本研究の視点からはビートが存在しないことになるのである。

ノリのある音楽的素材としては、ロックやポップスなどの既存のダンスミュージックを使用すればいいが、これは前述と同様に高次の音楽的要素が多く含まれているために、心理学実験の音楽的刺激としては適さない。そこで次の候補として、ドラムマシンのようなシンプルなりズムパターンを繰り返すシーケンスデータを作り、これをシーケンサを用いて再生することを容易に思い付く。実験においてMax/MSP/Jitterで映像的ビートをフレーム単位で制御すると同時に、音楽的ビートも音符単位で時間制御するためには、簡単には標準MIDIファイル(SMF)形式などのシーケンスデータをDTMの手法で制作(作曲)し、これをMaxのシーケンスオブジェクトで再生するMIDIテンポクロックを制御すればよい。

しかしこの方法でも、以下のような問題点と課題がある。(1)無個性の地蔵の羅列である映像素材は記憶しにくい。ドラムとベースによる音楽素材はシーケンサで固定して繰り返し再生すると、楽曲の一部ということで簡単に覚えてしまう。これでは、それぞれ約3分間の素材で2パターンの実験を行いたい、という状況では、慣れてしまって「飽き」「眠気」などの問題が出てくる。(2)被験者ごとのレスポンス特性をリハーサル段階でのチューニングにより補正するためには、再生のMIDIクロックでなく個々の音楽素材の生成時にタイミングを発生して、より確実なデータを収集したい。これはシーケンサでは不可能であるが、アルゴリズム作曲の手法によりMaxでは容易である。(3)被験者だけでなく実験実施者(筆者)自身も、次に出てくる音(コードのルート等)を予測できない状況がより好ましい。明らかにこの方が完全に映像と音楽のビートという条件だけを抽象化するのに良好であるが、これは乱数要素を盛り込んだアルゴリズム作曲の手法により、Maxでは実現容易である。そこで本システムでは、以下に述べるように固定的な音楽素材のシーケンサ再生でなく、乱数を用いたMax/MSP/Jitterによるリアルタイムのアルゴリズム音楽生成を用いた。

#### 5-2. Maxによる音楽素材生成パッチの制作

まず音源について検討した。Max/MSPの環境ではQuickTime標準のソフトウェアGM音源にも対応しているが、この音源には発音抜けと遅延のばらつきという重大な欠点があるために使用できない[27][56]。そこで、OMS経由でUSB-MIDIインターフェース(Roland UM-2)により接続する外部音源として、先行研究により発音遅延とそのばらつきについて良好な実験結果データが得られているRoland社のSC-55mkIIを使用した。音楽情報科学実験システムにMIDIを利用する場合にはレイテンシと遅延のばらつきについて十分に検討する必要があるが、本実験の場合には、後述する被験者から

のタッピング入力にも同じMIDIインターフェースを経由したことで、共通の遅延要素として誤差が相殺されるメリットも生まれた。

具体的には、ムービーを1フレーム進める基準クロック(16分音符に対応)である110msecごとのタイミングでハイハット音を16ビート刻む時間単位(テンポ:4分音符=136.36/分)のもとで、いわゆるエイトビートのシンプルロックドラムとスラップベースによるリズム系を作成した。ドラムやベースは同一パターン(フレーズ)を繰り返すと被験者が慣れてきて集中力が低下するために、8分音符が4個という半小節ループを1単位として、ドラムは2単位ごと、ベースは3単位ごとに乱数によりそれぞれ4種類のパターンから1種類を選択するようにした。さらにベースのスケール(調性感)のルート音は同様に2単位ごとに平均率12音から乱数で選択するようにしたために、ドラムとベースだけの単純な音楽でありながら刻々と進行していき、単純な繰り返しとして知覚しにくい、無個性なビートを純粹に提供する音楽素材を実現できた。以下、具体的なサブパッチの内容を紹介する(紙面の都合により図は省略)。

ドラムスの楽器は、メインパッチ内で全ての16分音符ごとに鳴るクロードストハイハット以外には、バスドラムとスネアドラムの2種類だけとした。パターンを2回ループするごとに、4種類のパターンのうちの1つがランダムに選択される。

ベースのパターンは3回ループすることに、4種類のパターンのうちの1つがランダムに選択されて繰り返す。これと同時に、パターンを2回ループすることに、フレーズの調的中心となるルートの音を平均率12音中の隣接した9個の中からランダムに選択する。この組み合わせによって、ドラムとも異なる周期でベースのパターンとルートが変化するために、全体としてはシンプルでビート感がありながら、なんだか少しづつ違っていき気が抜けない、注意を喚起しつつ飽きない、という音楽素材を実現できた。

ベースの4種類のフレーズパターンはテーブルパッチによって生成した。飽きが来ないこと、ビート感を出すために細部では8ビートでなく16ビートの要素が盛り込まれているが、それぞれのフレーズの冒頭は必ずルート音の長い音を置くことで8ビートのノリを確保した。

### 5-3. 被験者への音楽素材の提示

このMaxからのMIDI音楽演奏情報は、Roland USB-MIDIインターフェース"UM-2"からMIDIケーブル(長さ3メートル)によってRoland GM音源モジュール"SC-55mkII"に与えられ、そのステレオサウンド出力(RCAライン:長さ1.5メートル)がソニーパワードスピーカー"SRS-Z1000"によって音響となった。スピーカから被験者までの距離は約2メートル、左右スピーカの間隔は約1メートル、スピーカの高さは被験者の視線から上方約50cmである。

被験者の位置において、リオン騒音計"NL-05"にて計測した、実験室のバックグラウンドノイズの音圧レベルは45.5dbであった。3種類の心理学実験(別の機会に詳述する)における、同じ被験者の位置におけるサウンドの音圧レベルは、10回の計測の平均値として以下のようになった。

「実験1」におけるヒット位置を示すピアノ音 56.6db  
 「実験1」においてヒットした時のピアノ和音 62.7db  
 「実験2」「実験3」においてBGMが鳴っている状態 61.9db

## 6. システムのレイテンシ計測実験

図4は、本研究の心理学実験システムの全体図を、レイテンシの検討という視点から示した図である。

### 6-1. 心理学実験におけるMIDI/USB利用の注意点

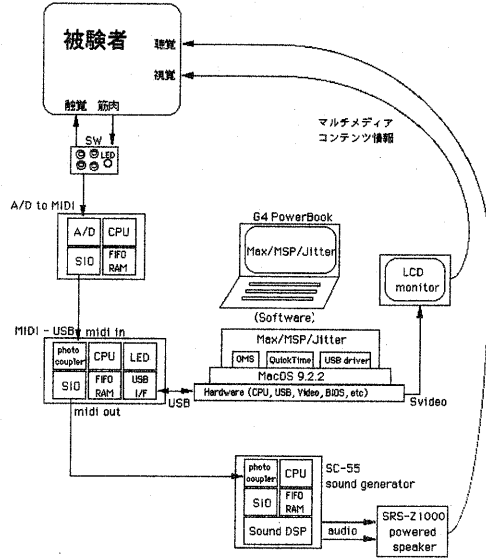


図4 心理学実験システムの詳細全体図

音楽関係のコンピュータシステムではMIDIは1985年頃から定番のインターフェースであり、さらに最近では多くのコンピュータの外部インターフェースとしてUSBが用いられている。本研究の心理学実験でも、パソコンの外部インターフェースとしてはUSBしかないため、「USB-MIDIインターフェース」装置を介して情報交換を行っている。ところで、パソコン自体もそうであるが、MIDI機器も、さらに「USB-MIDIインターフェース」装置も、内部にコンピュータ(CPU)というソフトウェア機構を持ったハードウェアであり、ここには多段の複雑なソフトウェア処理がイモズル式に連なっていることになる。

あらためて図4の心理学実験システムの詳細全体図を眺めてみると、本研究の心理学実験における情報の流れにおいて、実験中のリアルタイム情報は、少なくとも以下に述べる(1)-(5)の5つのCPUによるソフトウェア処理を経由していると考えられる。これは最終的な出力としては音楽情報のルートであるが、映像情報のルートについても、パソコンからの映像出力信号を実際の「光」に変換するLCDディスプレイ内部に、CPUではないがデジタル信号処理システムがあって画像情報として出力されているので、少なくとも4つのCPU処理は経由していることになる [27][56]。

#### (1) A/D to MIDIインターフェース

1. タイマにより定期的に8チャンネルのアナログ電圧をスキャンしてA/D変換する
2. A/Dデータの前回データと比較して変化があると、データをMIDIフォーマットに変換して内部FIFOバッファに積む
3. メインルーチンを巡回中にFIFOバッファに変化があると、そのデータをシリアルポートからMIDIとして出力する

#### (2) USB-MIDIインターフェース

1. MIDI受信データはフォトコプラからCPUのシリアルポートに入力され、割り込みによってこれをFIFOバッファに積む
2. FIFOバッファに積まれたデータはMIDIメッセージとして意味を持つかが解釈され、メッセージとして完結しないなど無意味なデータは捨てられる
3. MIDIメッセージとして意味を持つと解釈されたメッセージはUSBバ

スにパケットとして送られる

### (3) Macintosh コンピュータ

1. USB-MIDIインターフェースUM-2から、このデバイスからのリクエストとしてUSBバスに情報が送られる
2. コンピュータのUSBデバイスはBIOSを経由してOSのUSB処理ルーチンをコール(ソフトウェア翻訳)
3. Max/MSP/Jitterの起動時にOMSが呼び出され、このOMSはUM-2の専用USBドライバを読み込んでいたために、OS→USBドライバ→OMS→Maxという流れでこの入力情報をMax/MSP/Jitterが受け取る
4. (心理学実験システム内の処理)
5. Max/MSP/JitterからのMIDI情報出力は、上記と逆の流れで、Max→OMS→USBドライバ→OS→USBハードウェア、と経路してUSBバスからUM-2に送られる

### (4) USB-MIDIインターフェース

1. パソコンからのMIDIメッセージはUSBバスからUM-2に与えられる
2. CPUはUSBパケットを解析しMIDI送信すべきMIDIメッセージを抽出
3. 送信すべきMIDIメッセージはステータスバイトとデータバイトそれぞれにシリアルポートに送られ、オープンドレイン/オープンコレクタのドライバを経由して電流出力される

### (5) MIDI音源SC-55

1. MIDI受信データはフォトカブラからCPUのシリアルポートに入力され、割り込みによってこれをFIFOバッファに積む
2. FIFOバッファに積まれたデータはMIDIメッセージとして意味を持つかが解釈され、メッセージとして完結しないなど無意味なデータは捨てられる
3. MIDIメッセージとして意味を持つと解釈されたメッセージは内部バッファに蓄積される
4. 入力された発音イベントの情報のうちMIDIチャンネル情報によって、そのMIDIチャンネルに既に設定されている(あるいは電源ON時/アフォルト時の初期値)音色番号が呼び出され、その音色番号に対応した楽音合成パラメータが音源LS(DSP)にセットされる
5. 入力された発音イベントの情報のうちMIDIチャンネル情報とノートナンバ(音高)情報とベロシティ(音量とON/OFF)情報によって、過去に同一の発音イベントとの関係を検索し、さらにこの発音のための音源チャンネルの空き状態を検索し、「音源チャンネルが空いていて過去に同じ音は発音中ではない」場合には発音処理を開始する(アサイン処理)
6. 上記で過去に同一の発音が既にあったり音源チャンネルが同時発音数の限度で満杯の場合には、決められたルールによりしかるべき対応処理を行う(無視したり、どこか別の音を強制消音して音源チャンネルを空けたり、等)
7. 発音の場合には、音色パラメータ、ピッチ情報などを設定した上で、ここにベロシティ情報に対応した音量情報を乗算し、さらにそのMIDIチャンネルに設定されていたボリューム情報とエクスプレッション情報とを乗算して最終的な発音の音量情報とし、さらにそのMIDIチャンネルに設定されていたパンポット情報に応じてステレオの左右チャンネルにそれぞれ乗算してステレオの両チャンネルからのサウンド情報に累算する
8. 音源部は上記のような処理を同時発音数の全ての音源チャンネルについて累算して、D/Aコンバータの左右それぞれの出力情報とする
9. 出力段のD/Aコンバータは、このデジタル電気信号を44.1KHzサンプリング、16ビットリニア、2チャンネルとしてアナログ電気信号に変換してライン出力する

ごく簡略しても以上のような情報処理の流れを経て本研究の心理学実験での「スイッチを押す」「サウンドが鳴る」という動作が実現されている。従ってこの所要時間、その誤差とばらつき、知覚心理学から得られている人間の反応時間や知覚処理時間、というような時間オーダでの比較と検討は心理学実験において本質的に重要である。問題となるオーダのレイテンシ特性を持つ機器等を音楽心理学の実験の道具として使用した場合、人間の聴覚と音楽心理学的な影響から、発音遅延やばらつきによって、実験の意味が消滅する危険性がある。つまりもともと正確な「同時性」の概念の消滅しているMIDIの世界において、さらに実験データをブラックボックスのシーケンサとMIDI音源に委ねた場合には、音楽心理学的に意味を持つ(感性評価として有意な差がある)オーダの時間的誤差がある、というの

は、実験の意味を喪失させることになりかねない。

北村・山田らの研究によれば、人間が「同時に鳴る」3和音を聴取した際に、5msecとか10msecとかのオーダの発音遅延を特定の音に作用させただけで、和音全体の感覚的な印象が異なる、とされている[67]。もし、ここに発音遅延の絶対値が20msecのオーダでばらつく音源を使用した場合、シーケンサのソフト上では「同時」と思いこんでいる実験データが、実験の意味を失わせるオーダで効いていることは明白であるが、シーケンサと市販音源を安易に使用している研究者は、この事実には気付かない、という可能性がある。カラオケのBGMを自動再生している場合にはまったく問題ないが、音楽心理学の実験にはそうそう気楽に使ってはいけない、という事実を認識すべきである。なお文献[67]の実験には、当然のことながらMIDIシーケンサ等は使用せず、正確なタイミングの和音の音響波形を編集してDATで再生して聴取実験している。

### 6-2. レイテンシを許容できる実験条件

以上のようなシステム遅延の状況から、音楽心理学においてコンピュータシステム(ソフトウェアを含む)を利用する場合には、以下のようなガイドライン例を十分に検討する必要がある。

1. 実験における情報の流れをステップとして明確に区分する
2. ステップごとの遅延時間の絶対値を明確にする
3. ステップごとの遅延時間のばらつき範囲を明確にする
4. ばらつきが絶対値より大きい場合には時間の加算の意味がなくなる
5. 個々のステップの平均遅延時間を合計することが無意味にならないか検討する
6. 人間の知覚心理学から得られている時間と比較検討する
7. 知覚時間より十分に小さい遅れや誤差は許容できる
8. 知覚時間と同等、あるいはそれ以上のオーダの遅延やばらつきがあれば実験に使用できない

### 6-3. レイテンシ計測の実験

ここでは、図4の心理学実験システムの詳細全体図のうち、どの部分を計測したデータであるかを明確にしながら、以下に紹介する11種類のレイテンシ計測を行った。具体的なレイテンシ計測データの詳細とその検討については紙面がないので、次回の音楽情報科学研究会で報告・検討する予定である。

#### レイテンシ計測実験1

トリガ信号としては、被験者のタッピング操作のスイッチの両端にかかる電圧そのものを計測して、プルアップしている電圧がGNDに落ちた瞬間を時間計測の起点とした。計測信号としては、USB-MIDIインターフェースUM-2の内部のMIDI受信フォトカブラの出力信号とした。このフォトカブラ(Sharp PC410)の変換時間は、Typicalで50nsecと高速なので、MIDI受信に対しての出力はほぼ同時と考えてよい。結局、この実験では、「被験者がスイッチを押してからUM-2にMIDI情報が届くまでの遅延」が計測できる。情報の遅延要因としては、汎用A/Dインターフェース内部のCPUによるA/D変換時間、MIDI情報化してFIFOバッファに積まれる時間、そして31.25KbpsのシリアルIOであるMIDIにより伝送される伝送遅延の合計となる。

#### レイテンシ計測実験2

トリガ信号としては、実験1の計測情報である、USB-MIDIインターフェースUM-2の内部のMIDI受信フォトカブラの出力信号とした。計測信号としては、UM-2のMIDI出力オープンドレインゲートの入力信号とした。ゲートの遅延は5nsecから10nsecなので、これはUM-2からのMIDI送信と同時に考えてよい。UM-2からC4PowerBookコンピュータのMaxに入った情報は、「midiin」オブジェクトから直結された「midiout」オブジェクトによりそのままスルー出力されてUM-2に戻り、MIDI出力される。結局、この実験では、「UM-2にMIDI情報が届いてからMaxを経由してUM-2から送信されるまでの最短時間の遅延」が計測できる。情

報の遅延要因としては、UM-2内部のCPUによるMIDI受信時間、USB情報化してMacintoshとやりとりする時間、USBドライバからOMSを経由してMax/MSP/Jitterと行き来する時間、USBを経由してUM-2からMIDIにより伝送される伝送遅延の合計となる。

#### レイテンシ計測実験3

トリガ信号は、実験2と同じUM-2の内部のMIDI受信フォトカブラの出力信号とした。計測信号としては、ピアノ音色を設定したGM音源SC-55mkIIのオーディオ出力端子とした。本当はSC-55のMIDI入力をトリガとしたかったが、ピアノ音などノートイベントについては、アクティブセンシング機能によって、UM-2から自動的に300msec以内ごとにメッセージ「0xFE」が送信されてしまい、オシロスコープのトリガを邪魔するので、スイッチ操作によりピアノ音を出す、という実験2の遅延時間が加わった条件として考えることにした。UM-2からPowerBookのMax/MSP/Jitterに入った情報は、「midiin」オブジェクトから直結されてノートナンバー60とした「makenote」-「noteout」オブジェクトにより出力されてUM-2に戻り、MIDI出力される。結局、この実験では、「UM-2にMIDI情報が届いてからMax/MSP/Jitterを経由してUM-2から送信される。これを受信してCGM音源SC-55mkIIでサウンドが発音されるまでの最短時間の遅延」が計測できる。情報の遅延要因としては実験2の遅延に加えて、SC-55内部のCPUによるMIDI受信時間、SC-55内部の音源DSPの楽音合成/発音処理の演算時間、SC-55からD/Aコンバータでアナログのオーディオ信号化する変換時間の合計となる。

#### レイテンシ計測実験4

トリガ信号は、実験2と同じUM-2の内部のMIDI受信フォトカブラの出力信号とした。計測信号としては、ピアノ音色を設定したGM音源SC-55mkIIのオーディオ出力端子とした。違いとして、心理学実験2と3のようなBGMのある状況を想定して、計測に使うピアノ音とは別に、MIDIチャンネル2のベース音とMIDI10チャンネルのドラムスパートを連続して再生し、この2つのチャンネルボリュームを最小の「1」とすることでほとんど聞こえない状態に鳴らしている。結局、この実験では、計測実験3のシステムレスポンス(入力イベントがあったら最速で反応して発音する)に対して、BGMという余分なジョブが加わっている場合にどうなるか、という差分を見ていることになる。

#### レイテンシ計測実験5

トリガ信号は、実験2と同じUM-2の内部のMIDI受信フォトカブラの出力信号とした。計測信号としては、UM-2のMIDI出力オープンドレイアウトの入力信号とした。違いとして、Jitterを使って、320\*240ドットのQuickTimeムービーを、S-Videoを経由して出力したサブスクリーンに最大化(640\*480ドットのVGA)して同時に描画処理させている。結局、この実験では、計測実験2のシステムレスポンスに対して、さらにリアルタイムのムービー再生出力、という余分なジョブが加わっている場合にどうなるか、という差分を見ていることになる。

#### レイテンシ計測実験6

トリガ信号は、実験2と同じUM-2の内部のMIDI受信フォトカブラの出力信号とした。計測信号としては、UM-2のMIDI出力オープンドレイアウトの入力信号とした。違いとして、計測実験5と同様にQuickTimeムービーのサブスクリーンでのVGA連続描画を行った上で、「midiin」から「midiout」に直結していたところに、msec単位の情報遅延オブジェクトである「pipe」を使って、意図的にMax内での処理として「pipe1」という「1msecの遅延」を明示的に加えた。つまりこの実験は、計測実験5と比較した場合、ムービー再生を行っている中で、スベックと同様に「1msecだけ遅延が長い」結果が出たとすれば、Max/MSP/Jitterは相当に正確な時間管理をしているということになる。

#### レイテンシ計測実験7

トリガ信号は、実験2と同じUM-2の内部のMIDI受信フォトカブラの出力信号とした。計測信号としては、UM-2のMIDI出力オープンドレイアウトの入力信号とした。違いとして、計測実験5と同様にQuickTimeムービーのサブスクリーンでのVGA連続描画を行った上で、「midiin」から「midiout」に直結していたところに、msec単位の情報遅延オブジェクトである「pipe」を使って、意図的にMax内での処理として「pipe5」という「5msecの遅延」を明示的に加えた。つまりこの実験は、計測実験6と比較した場合、スベックと同様に「5msecだけ遅延が長い」結果が出たとすれば、Max/MSP/Jitterは相当に正確な時間管理をしているということになる。

#### レイテンシ計測実験8

トリガ信号は、実験2と同じUM-2の内部のMIDI受信フォトカブラの出力信号とした。計測信号としては、UM-2のMIDI出力オープンドレイアウトの入力信号とした。違いとして、計測実験5/6/7と同様にQuickTimeムービーのサブスクリーンでのVGA連続描画を行った上で、「midiin」から「midiout」に直結していたところに、msec単位の情報遅延オブジェクトである「pipe」を使って、意図的にMax内での処理として「pipe10」という「10msecの遅延」を明示的に加えた。つまりこの実験は、計測実験6/7と比較した場合、スベックと同様に10msec

だけ遅延が長い結果が出たとすれば、Max/MSP/Jitterは相当に正確な時間管理をしているということになる。

#### レイテンシ計測実験9

トリガ信号は、実験2と同じUM-2の内部のMIDI受信フォトカブラの出力信号とした。計測信号としては、G4PowerBookのS-Video出力信号を接続したシャープ液晶モニタLC-10R2-Aの画面上に密着して貼り付けたフォトセンサ(Sharp IS474)の電圧出力を計測した。Max/MSP/Jitterの処理としては、MIDI入力があると、それまで初期化によりブラックだった画面内に明るい部分を持つQuickTimeムービーを出力する。というものであり、ムービーの中でほぼ真っ白という高輝度の部分にセンサを貼り付けた。LCDから約1メートル離れた被験者にはこの光の変化が遅れて届くが、光速がこの距離を伝わる遅延時間は約3億分の1秒なので、ほぼ無視できる。この実験は、MIDI入力に対して「なるべく即時にグラフィクスを出す」という実験条件を、実際に被験者が対峙しているLCDモニタによって再現しているものとなる。多くの心理学実験において、被験者に提示する視覚的刺激的提示の時間的遅延は、情報を送るパソコンの内部情報として定義しているが、VDIにしろCRTにしるプロジェクトにしるLCDにしる、いずれも情報機器として内部で信号処理/演算処理を行っているための遅延があり、さらに液晶の反応時間はかなり長いと言われている。本計測実験のような条件測定を行わずに視覚刺激の時間を定義した場合には、大きな問題となる可能性があるために設定した計測実験である。

#### レイテンシ計測実験10

トリガ信号は、実験2と同じUM-2の内部のMIDI受信フォトカブラの出力信号とした。計測信号としては、USB-MIDIインターフェースUM-2のパネルにある動作表示LEDのうち、「MIDI送信LED(green)」に密着して貼り付けたフォトセンサ(Sharp IS474)の電圧出力を計測した。UM-2からG4PowerBookコンピュータのMax/MSP/Jitterに入った情報は、「midiin」オブジェクトから直結された「midiout」オブジェクトによりそのままスルー出力されてUM-2に戻り、MIDI出力される。この実験はCPU内蔵機器であるUM-2の内部動作遅延を検証する目的で行った。

#### レイテンシ計測実験11

トリガ信号は、実験2と同じUM-2の内部のMIDI受信フォトカブラの出力信号とした。計測信号としては、USB-MIDIインターフェースUM-2のパネルにある動作表示LEDのうち、「MIDI受信LED(red)」に密着して貼り付けたフォトセンサ(Sharp IS474)の電圧出力を計測した。一般に、MIDIインターフェースの「MIDI受信モニタLED」は、MIDIラインそのものを表示するとほんの一瞬で見えにくいために、CPUのソフトウェアで一定時間のタイムで点灯させることが多い。また、MIDIを受信した段階でこのLEDを点灯するシステムであれば、計測実験10のようにコンピュータに行って帰ってくる遅延が不要となるので、より早く反応する筈である。この実験は、UM-2の場合にどうであるかを検証する目的で行った。

## 7. おわりに

一定のテンポでビート感をもった映像と音響を同時に試聴している環境下で、映像と音響のテンポのわずかな違いからビート感がずれてきた場合の振舞いについての心理学実験について、第2報としてその一部を報告した。続報とともに検討・議論をお願いしたい。

## 参考文献

- [1] 梅本堯夫: 音楽心理学, p.594, 誠信書房, 1966.
- [2] タイアナ・ドイチュ/寺西立年, 大串健吾, 高崎謙一訳: 音楽の心理学, p.663, 西村書店, 1987.
- [3] リタ・アイエロ/大串健吾訳: 音楽の認知心理学, p.371, 誠信書房, 1998.
- [4] 梅本堯夫: 音楽心理学の研究, p.375, ナカニシヤ出版, 1996.
- [5] 岡田晋: 映像学・序説, p.260, 九州大学出版会, 1996.
- [6] ジェイムズ・モナコ/岩本憲他訳: 映画の教科書, p.438, フィルムアート社, 1983.
- [7] P.H.リンゼイ, D.A.ノーマン/中澤幸夫, 箱田裕司, 近藤倫明訳: 感覚と知覚, p.319, サイエンス社, 1983.
- [8] 森政昭, 吉田寿夫: 心理学のためのデータ解析テクニカルブック, p.349, 北大路書房, 1990.
- [9] R.H.テイ/島津一夫, 立野有文訳: 知覚的解決: 知覚心理学, p.249, 誠信書房, 1972.
- [10] 国際電気通信基礎技術研究所: 視聴覚情報科学, p.271, オーム社, 1994.
- [11] 沢川英司, 東倉洋一, 中根一成/電子情報通信学会編: 視聴覚の認知科学, p.192, 電子情報通信学会/コロナ社, 1998.
- [12] 武蔵真介: 計量心理学, p.155, 朝倉書店, 1982.

- [13] 松田隆夫: 知覚心理学の基礎, p.294, 培風館, 2000.
- [14] 相場寛, 鳥居修晃: 知覚心理学, p.210, 放送大学教育振興会, 1997.
- [15] 福田忠彦: 生体情報システム論, p.242, 産業図書, 1995.
- [16] 森本正昭: 情報処理心理学, p.226, 誠信書房, 1979.
- [17] 波多野道夫: 音楽と認知, p.155, 東京大学出版会, 1987.
- [18] L.クラークス/杉浦実訳: リズムの本質, p.142, みすず書房, 1994.
- [19] 中島義明: 映像の心理学-マルチメディアの基礎, p.270, サイエンス社, 1996.
- [20] 西井雄一郎, 栗本育三郎: ドラムパッドを利用した実演音とクリック音との聴覚的ずれ検出装置について, 情報処理学会研究報告, Vol.93, No.32 (93-MUS-1), pp.17-23, 1993.
- [21] 後藤真孝, 村岡洋一: 音楽音響信号に対するビートトラッキングシステム, 情報処理学会研究報告, Vol.94, No.71 (94-MUS-7), pp.49-56, 1994.
- [22] 山田真司, 井村和孝, 新井裕子, 小田清理子, 西村英樹: 音楽演奏者の時間的制御能力について, 情報処理学会研究報告, Vol.95, No.46 (95-MUS-10), pp.21-28, 1995.
- [23] 堀内靖雄, 三井卓, 井音洋, 市川薫: 二人の間による演奏の収録と分析, 情報処理学会研究報告, Vol.96, No.53 (96-MUS-15), pp.21-26, 1996.
- [24] 後藤真孝, 村岡洋一: 音楽音響信号を対象としたビートトラッキングシステム--小筋線の検出と打楽器音の有無に応じた音楽的知識の選択--, 情報処理学会研究報告, Vol.97, No.67 (97-MUS-21), pp.45-52, 1997.
- [25] 堀内靖雄, 三井卓, 財津西, 市川薫: 二人の間による演奏の協調動作について, 情報処理学会研究報告, Vol.98, No.74 (98-MUS-26), pp.103-108, 1998.
- [26] 堀内靖雄, 財津西, 市川薫: 人間の演奏制御モデルの推定, 情報処理学会研究報告, Vol.99, No.51 (99-MUS-30), pp.59-64, 1999.
- [27] 長嶋洋一: MIDI音源の発音遅延と音源アルゴリズムに関する検討, 情報処理学会研究報告, Vol.99, No.68 (99-MUS-31), pp.31-38, 1999.
- [28] 長嶋洋一, 中村文隆: メディアアートにおける画像系の制御について, 情報処理学会研究報告, Vol.2000, No.76 (2000-MUS-36), pp.31-36, 2000.
- [29] 浜中雅俊, 後藤真孝, 麻生英樹, 大津 展之: 学習に基づくクオンタイズ 発音時刻の楽譜上での位置の推定, 情報処理学会研究報告, Vol.2001, No.45 (2001-MUS-40), pp.21-28, 2001.
- [30] 難波精一郎, 林勇気: 画像中の円の落下と音の変化の共鳴現象, 情報処理学会研究報告, Vol.2002, No.40 (2002-MUS-45), pp.9-12, 2002.
- [31] 新山王政和, 村尾忠廣, 南陽子, 小川容子: 音楽ビートと運動ビートのタイムラグについて--マーチングステップの熟達者と未経験者の相違について--, 情報処理学会研究報告, Vol.2002, No.40 (2002-MUS-45), pp.79-84, 2002.
- [32] 下迫晴加, 石田時敬, 菊地正: 音系列における時間間隔の変化の検出, 情報処理学会研究報告, Vol.2002, No.40 (2002-MUS-45), pp.91-96, 2002.
- [33] 後藤靖宏, 阿部純一: 拍子解釈の基本的偏好性と漸進的確立, 音楽知覚認知研究, Vol.2, 日本音楽知覚認知学会, pp.38-47, 1996.
- [34] 末高大剛, 中島祥好: リズム知覚研究の動向, 音楽知覚認知研究, Vol.4, No.1, 日本音楽知覚認知学会, pp.26-41, 1998.
- [35] 菅野禎盛, 岩宮眞一郎: 音楽のリズムと映像の動きの同期が音楽と映像の調和に及ぼす効果, 音楽知覚認知研究, Vol.5, No.1, 日本音楽知覚認知学会, pp.1-10, 1999.
- [36] 岩宮眞一郎, 上月裕, 菅野禎盛, 高田正幸: 音楽の調性及びテンポと映像の速度及び密度が映像作品の印象に及ぼす影響, 音楽知覚認知研究, Vol.8, No.2, 日本音楽知覚認知学会, pp.53-64, 2002.
- [37] Manfred Clynes: Time, Timeconsciousness and Music, Proceedings of 1st International Conference on Music Perception and Cognition, pp.249-254, Kyoto, Japan, 1989.
- [38] Yoshitaka Nakajima, Takashi Nomura, Takashi Tsumura: Physically Wrong Rhythms can be Subjectively Correct, Proceedings of International Symposium on Musical Acoustics, pp.187-190, Tokyo, Japan, 1992.
- [39] David Rosenthal: A Model of the Process of Listening to Simple Rhythms, Proceedings of ICMC1988, pp.189-197, International Computer Music Association, 1988.
- [40] Gregory Kramer, Stephen Ellison: Audification --The Use of Sound to Display Multivariate Data--, Proceedings of ICMC1991, pp.214-221, International Computer Music Association, 1991.
- [41] David Rosenthal: Intelligent Rhythm Tracking, Proceedings of ICMC1992, pp.227-230, International Computer Music Association, 1992.
- [42] Jeff A. Bilmes: Techniques to Foster Drum Machine Expressivity, Proceedings of ICMC1993, pp.276-283, International Computer Music Association, 1993.
- [43] Peter Design, Henkjan Honing: Advanced Issues in Beat Induction Modeling --Syncopation, tempo and Timing--, Proceedings of ICMC1994, pp.92-94, International Computer Music Association, 1994.
- [44] Simon C. Roberts, Michael Greenough: Rhythmic Pattern Processing using a Self-Organising Neural Network, Proceedings of ICMC1995, pp.412-419, International Computer Music Association, 1995.
- [45] Leigh M. Smith: Modeling Rhythm Perception by Continuous Time-Frequency Analysis, Proceedings of ICMC1996, pp.392-395, International Computer Music Association, 1996.
- [46] Vijay Iyer, Jeff Bilmes, Matt Wright, David Wessel: A Novel Representation for Rhythmic Structure, Proceedings of ICMC1997, pp.97-100, International Computer Music Association, 1997.
- [47] Eric Gotesman: The Psycho-Adaptive Listening Machine --An Application of Perceptual Control Theory to Computer Music--, Proceedings of ICMC1998, pp.195-198, International Computer Music Association, 1998.
- [48] Tommi Ilmonen, Tapio Takala: Conductor Following with Artificial Neural Networks, Proceedings of ICMC1999, pp.367-370, International Computer Music Association, 1999.
- [49] Ali Taylan Cemgil, Bert Kappen, Peter Design, Henkjan Honing: On Tempo Tracking --Tempogram Representation and Kalman Filtering--, Proceedings of ICMC2000, pp.352-355, International Computer Music Association, 2000.
- [50] Yoichi Nagashima: Improvisation II --A Performing/Composing System for Improvisational Sessions with Networks--, Entertainment Computing, pp.241-248, IFIP / Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [51] Hiromi Hashimoto, Masashi Yamada: Temporal Fluctuation in Equal Interval Tapping using Various Muscle Groups, Proceedings of 17th Congress of the International Association of Empirical Aesthetics, pp.525-528, Takarazuka, Japan, 2002.
- [52] 吉田友敬, 山本佐代子, 廣瀬百合子, 武田昌一: 音楽リズムの同調と引き込み現象(1), 日本音楽知覚認知学会平成14年度秋季研究発表会予稿集, 日本音楽知覚認知学会, pp.79-86, 2002.
- [53] 難波精一郎, 林勇気: 画像中の円盤の運きと音の変化の同期--棒組みの影響--, 日本音楽知覚認知学会平成14年度秋季研究発表会予稿集, 日本音楽知覚認知学会, pp.115-120, 2002.
- [54] 刈谷亜未太, 青野正二, 桑野園子, 難波精一郎: 規則的なバルス列のタッピング作業におよぼす挿入刺激の効果, 日本音楽知覚認知学会平成14年度秋季研究発表会予稿集, 日本音楽知覚認知学会, pp.143-150, 2002.
- [55] 吉田友敬, 山本佐代子, 廣瀬百合子, 武田昌一: アンサンブルにおけるリズムの同調と分析, 日本音響学会全国大会講演論文集, 日本音響学会, pp.863-864, 2003.
- [56] 長嶋洋一: MIDI音源の発音遅延と音楽心理学実験への影響, 日本音響学会音楽音響研究会資料 Vol.18, No.5, 日本音響学会, pp.47-54, 1999.
- [57] 長嶋洋一, 橋本周司, 平賀謙, 平田圭二: コンピュータと音楽の世界, p.484, 共立出版, 1999.
- [58] 長嶋洋一: コンピュータサウンドの世界, p.180, CQ出版, 1999.
- [59] 長嶋洋一: Java & AKI-80, p.176, CQ出版, 1997.
- [60] 長嶋洋一: 作るサウンドエレクトロニクス, <http://nagasm.suac.net/ASL/mse/index.html>, 1999.
- [61] 村尾忠廣: タゴリズムからの発見, 季刊音楽教育研究56, 音楽の友社, pp.177-190, 1988.
- [62] 村尾忠廣: <拍ノリ>の裏・表 タゴビートの裏・表, 音楽教育学18-1, 日本音楽教育学会, pp.31-36, 1988.
- [63] 村尾忠廣(代表): わらべ唄・自由斉唱におけるピッチの統一化と運動ビートの同期化プロセスの研究, 研究成果報告書平成10-12年度文部科学省研究費補助金基盤研究(B)(2) 研究課題番号10480045, p.118, 2000.
- [64] 新山王政和: フットタッピングによるテンポ同期の実験研究, 音楽教育学27-1, pp.53-68, 日本音楽教育学会, 1997.
- [65] 新山王政和: 音楽ビートと運動ビートの知覚に関する分析的研究 --「テンポ同期」から「ステップ動作」までの一連の検証実験のまとめ--, 音楽教育学第33-2号別冊 日本音楽教育学会第33回プログラム, pp.15, 日本音楽教育学会, 2003.
- [66] 長嶋洋一: オリジナルMIDIセンサを作ろう, <http://nagasm.suac.net/ASL/original/index.html>, 1999.
- [67] 梅田利彦, 山田真司, 北村音一: ピアノの長3和音の各音の発生時間による変化, 日本音響学会講演論文集, 日本音響学会, pp.447-448, 1989.
- [68] 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(1) -- その第1報と実験計画 --, <http://1106.suac.net/news/docs/onchi-1.pdf>, 2003.