

# 多感覚研究のための実験環境 Experimental Setups for Multisensory Research

寺本 渉

室蘭工業大学 大学院工学研究科  
〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1

## 1. はじめに

多感覚情報処理に関する研究は、心理学、神経生理学及び脳科学分野で精力的に行われ、近年著しく発展してきている。「目で聞く」「耳で見る」などといった表現は与えられた対象を違った角度から理解することのメタファーとして用いられるのが通例だが、これまでの多感覚研究の成果を概観する限り、これは単なるメタファーではなく、我々の脳の中で実際に起きている現象であることを示している。例えば、音源が実際の提示位置ではなく、映像の位置から聞こえる腹話術効果<sup>1)</sup>や、唇の動きによって音声の聞こえが大きく変化するマーカー効果<sup>2)</sup>は古くから知られている。また、音の動きによって静止した光に動きを知覚することも報告されている<sup>3-5)</sup>。脳の情報処理の目標が、安定した知覚世界を維持し、適切な行動を導くことと仮定すると、様々な感覚モダリティ由来の情報を利用しながら知覚課題の解決を行うのは当然ともいえる。従来、視覚、聴覚、触覚などの感覚モダリティは独立に研究されてきたが、近年急激に増加した多感覚研究によって、人間の情報処理の新たな側面が明らかになってきており、今後も我々の常識を覆すような知見が続々と見いだされると考えられる。また、昨今加速度的に進んでいるコミュニケーション技術やエンタテインメント技術のマルチメディア化の健全な発展のためにも、多感覚研究が一層発展するこ

とが望まれる。

本稿は、このような背景をもつ多感覚研究に対して、これから取り組むことを考えている学生および研究者を対象として、多感覚研究のための実験環境構築の初歩の初歩を紹介する。脳が多感覚統合を行うためには、各感覚器が受け取る刻一刻と変化する複数の信号の中から同一事象を発生源とするものを見つけ出すことが必要になるが、その有効な手がかりが時間(いつ)と空間(どこで)の一致性である。多感覚研究では、この時空間一致性を様々に操作しながら、多感覚の統合の様相を明らかにする手続きをとることが多い。そこで本稿でも、この基本的手がかりを基準にしてハードウェアおよびソフトウェア(Psychtoolbox, Pure Data)の実験環境構成手法について解説を行う。特に、視覚刺激と同時に聴覚刺激と触覚刺激を提示する場合のみを対象とする。

## 2. ハードウェアの選択

視覚心理実験では、PCに視覚刺激提示装置(CRT/LCDディスプレイ、プロジェクタ、ヘッドマウントディスプレイ、発光ダイオード(LED)など)および反応取得装置を接続すれば、実験準備はほぼ完了である。一方で、多感覚研究となると、多種類の刺激を同時に提示する必要がある。例えば、視覚刺激と同時に聴覚刺激を提示する場合には、PCからの信号を視覚刺激提示装置と聴覚刺激提示装置の両方に送り出すことになる。この場合には、聴覚刺激用の信号をD/A変換器でアナログの電圧信号に

表1 触覚刺激の種類と差異

触覚刺激の種類	振動刺激	電気刺激	空気刺激	実物刺激
価格	低～中	低～中	高 (システム構築費込)	—
付随音	あり	なし	あり	なし
磁性体	あり	あり	なし	なし
受容器	周波数依存	?	触?	—

変換し、さらに増幅器等を経由してスピーカやヘッドフォンによって音に変換し、提示する。触覚刺激についても同様であり、スピーカやヘッドフォンが触覚デバイスに置き換わる（だけである）。

## 2.1 聴覚刺激

視覚刺激を用いる際に、（色彩）輝度計等を使って信号のレベルを確認すると同様に、聴覚刺激や触覚刺激の場合にも、最終的に音に変換された信号レベルが提示予定のものかどうかについて確認する必要がある。これには少なくともオシロスコープや騒音計が必要である。特に、聴覚系や触覚系にとって時間周波数は極めて重要な物理特徴であり、限られた周波数を用いて、ある多感覚現象の周波数特性を調べる際には、アナログ信号が適切に扱われていることが大前提となる（例えば、視聴覚実験では、腹話術残効や聴覚随伴性視覚運動知覚の周波数選択性を調べた研究等がある<sup>6-8)</sup>）。聴覚心理実験時に気をつけるべきことの詳細は、例えば、平原<sup>9)</sup>に詳しく、そちらを参照して頂きたい。

## 2.2 触覚刺激

近年では視覚や聴覚と触覚（体性感覚）との相互作用の検討が盛んに行われ、身体にまつわる様々な現象が報告されている（北川<sup>10)</sup>やBlanke<sup>11)</sup>に詳細なレビューがある）。例えば、ラバーハンドイリュージョン<sup>12)</sup>やそれを身体全体に拡張したもの<sup>13,14)</sup>など、視触覚の同期刺激によって、外界の対象を自分の身体として認識するようになる現象が知られている。他にも、身体近傍空間に生じる空間性の強い触聴覚相互作用<sup>15,16)</sup>や、顔残効の視触覚間転移<sup>17)</sup>など多岐にわたる。そこでは大きくわけて4種類

の触覚刺激が用いられている。1つ目は、樹脂や木片、サンドペーパーなど実物を刺激として用いる場合である。2つ目は、圧電デバイスや偏心モーターなどの振動刺激である。3つ目は、微少電流を提示する電気刺激であり、4つ目はエアパフ等の空気刺激である。これらの主な特徴をまとめたものが表1である。振動刺激や電気刺激は比較的安価に入手可能である一方で、磁性体をもつため、fMRI実験等には使用できない。fMRI内で使用できるのは空気刺激（例えば、Sekiyamaら<sup>18)</sup>）や実物刺激である。振動刺激や空気刺激は空気を振動させるため、音の発生は避けられず、使用する場合にはマスキングノイズ等によって駆動音を低減する必要がある。電気刺激は、音の発生はないが、どのようにして「触」が生じているのか、現在のところ不明である。その点、振動刺激は周波数によって触受容器（マイスナー小体、メルケル盤、パチニ小体、ルフィニ終末）の選択的刺激がある程度可能である。したがって、こうした刺激の特徴を十分認識したうえで、各実験目的にあった刺激を選択する必要がある。

## 2.3 ハードウェア選択において考慮すべき点

どの聴覚刺激や触覚刺激を使うにしても、多感覚統合／相互作用に関する実験を行ううえで考慮しなければいけないのが、空間一致性と時間一致性である。

空間一致性とは異種感覚刺激間の空間的位置を一致させることであり、例えば、前述の腹話術効果（視覚刺激による音源定位への影響）は、視聴覚刺激の空間距離が離れすぎると生じにくくなる<sup>19,20)</sup>。したがって、空間一致性が決定的な影響を与えると考えられる現象を扱う際に

は、ヘッドフォンによる聴覚刺激提示は、どの視覚刺激提示法（CRT/LCDディスプレイ、プロジェクタ、ヘッドマウントディスプレイ、発光ダイオードなど）と組み合わせても、最適な方法とはいえない。ただし、頭部伝達関数（HRTF: head-related transfer function）を畳み込んだ仮想音源を提示する場合にはその限りではない（しかし、HRTFによる仮想音源は前後誤り等が発生しやすく、今度はHRTFの精度の問題が生じる）。事実、Soto-Faracoら<sup>21)</sup>は視覚運動刺激による聴覚運動知覚捕捉現象（dynamic visual capture, 腹話術効果の運動知覚版）について、視覚刺激をLEDで提示し、聴覚刺激をスピーカまたはヘッドフォンから提示したところ、スピーカで有意に強い視聴覚相互作用が生じたと報告している。

スピーカと組み合わせる視覚刺激提示方法に関して、LEDでは単純な刺激しか提示できないが、プロジェクタと音響透過型スクリーンを用いることによって、複雑な視覚刺激は提示することもできる。崔ら<sup>22)</sup>は、そのような方法を用いて、一定方向に様に運動する大視野視覚運動刺激によって自己運動感覚を引き起こし（ベクシオン）、その際の前方空間での音位置知覚を調べている。

触覚刺激と視覚刺激の空間一致性を保つ場合には、LEDと触覚デバイスを組み合わせて用いられることが多いが、複雑な視覚刺激を提示する場合には、ハーフミラー等が用いられる（例えば<sup>23)</sup>）。

こうした空間一致性と並んで重要なのが、ある事象が異種感覚間で同じタイミングで生じるように提示するという時間一致性である。例えば、音速を340m/sとすると、視聴覚刺激間の10msのずれは、3.4mの距離差として換算することもできる。10msの差が常に距離差として換算されるわけではないが、3.4mも距離差があれば普通は同じイベントとは知覚されない。実際、視聴覚刺激の時間ずれが大きくなると、視聴覚相互作用が生起しにくくなることは、腹話術効果<sup>20)</sup>、ダブルフラッシュ現象<sup>24)</sup>、

交差-反発錯覚<sup>25)</sup>、聴覚誘導性視覚運動知覚現象<sup>3)</sup>など様々な研究で示されている。こうした同期はソフトウェアにも大きく関わる問題であり、筆者の実験環境でいろいろと計測を行ったので、次節ではその点について解説を行う。

### 3. Psychtoolboxを用いた多感覚研究

Psychtoolbox (PTB)は、MatlabおよびGNU/Octaveで動作するフリーの心理物理実験用ライブラリである。視覚刺激提示用コマンドのほか、聴覚刺激提示用コマンドも用意されており、簡単に多感覚実験を設計できる。特に、PTB2.54では、音出力は2チャンネルのみ（デフォルト）であったのに対して、PTB3からは標準で多チャンネルを扱うことができるように設計されている。また、PTB2.54では音の命令が出てから、実際に音が提示されるまで数十ミリ秒程度の潜時があったのに対し、現バージョンではMac環境ではCoreAudio、Windows環境ではAsio（ない場合は、MMEやDirectSoundなど）をサウンドドライバとして使えるように設計されており、聴覚刺激を非常に短い潜時で提示できるようになった（とされる）。本稿では、まず、聴覚刺激提示法について解説を行い、その後、筆者の環境で実際どの程度の同期が実現できているか計測したので紹介する。PTB3の基本的な使用方法については別掲の草野氏の解説を参照して頂きたい。

#### 3.1 PTB3による聴覚刺激提示

PTB3の聴覚刺激提示に関わる各コマンドは、オープンソースオーディオI/OライブラリであるPortAudio (<http://www.portaudio.com/>)を基に作成されている。また、聴覚刺激提示に関わるコマンドの詳細は、PTB3に同梱のBasicSoundOutputDemo.mを参照して頂きたい。

聴覚刺激提示に最低限必要なコマンドは6つある（表2）。まず、コードの最初にInitializePsychSoundによってPsychPortAudioサウンドドライバを読み込む必要がある。引数を1とすることによって最も短い潜時での再生が可能な環境が整えられる。次にPsychPortAudio

表2 Psychtoolboxで聴覚刺激を提示する際に最低限必要なコマンドとその機能及び引数など

コマンド名	主機能	引数 (必須)	引数 (オプション)	戻り値
InitializePsychSound	ドライバ 読込		通常潜時/短潜時	
PsychPortAudio (‘Open’)	デバイス 初期化		デバイスID, モード (録音/ 再生/両方), 要求潜時クラ ス, サンプリングレート, チャ ンネル数, バッファサイズ, ...	デバイスハンドル
PsychPortAudio (‘FillBuffer’)	データを 送信	デバイスハンドル, 音データ	バッファへのデータのrefillの 有無, ...	refill成功の可否...
PsychPortAudio (‘Start’)	デバイス 開始	デバイスハンドル	繰返再生回数, 開始時刻, 関数待機の有無, 停止時刻, 再開か否か	実際に音が提示され た時刻
PsychPortAudio (‘Stop’)	デバイス 停止	デバイスハンドル	再生終了まで待機の有無, 関数待機の有無, ...	停止した音が再生 (録音) 開始した時刻 の見積, 停止時刻, ...
PsychPortAudio (‘Close’)	デバイス 解放		デバイスハンドル	

(‘Open’, ...)によって, サウンドデバイスを開  
き, 初期化する. ...の部分には9つのオプショ  
ンが用意されており, デバイスID (指定しな  
い場合は自動的に選択), モード (1=再生, 2=  
録音, 3=再生と録音など), 要求潜時クラス  
(1=潜時を短く保ちつつ他のアプリケーション  
に影響を与えないようにする, 2=他のアプ  
リケーションに影響を与えるかもしれないが,  
このプログラム優先で潜時が短くなるように  
する, など), サンプリングレート, 使用チャ  
ンネル数, バッファサイズなどの設定が用意さ  
れている. 第3段階では, PsychPortAudio  
(‘FillBuffer’, デバイスハンドル, 音データ, ...)  
によってバッファに音データを送信する. 音を  
提示するデバイスのハンドル (PsychPortAudio  
(‘Open’, ...)の戻り値) と音データを指定する.  
第4段階では, PsychPortAudio (‘Start’, デバ  
イスハンドル, ...)によってデバイスを開始  
する (再生の場合は, 再生するデバイスの動作  
開始). オプションとしては, サウンドデータ  
の繰返し回数の設定, デバイスが実際に動き  
出すまでプログラムを待機させるかどうかの設  
定やデバイスの開始時刻の設定, 終了時間の設  
定などがある. 第5段階では, PsychPortAudio

(‘Stop’, デバイスハンドル, ...)でデバイスを  
停止する. オプションとして, 再生が終わるま  
で待機するか否かの設定, デバイスが終了す  
るまでプログラムを待機させるかどうかの設定  
などがある. そして, 第6段階として, プログラ  
ムの最後にPsychPortAudio (‘Close’, ...)によ  
ってサウンドデバイスを解放する.

### 3.2 視聴覚刺激提示の同期測定

PTB2.54では音の命令が出てから, 実際に音  
が提示されるまで数十ミリ秒程度の潜時があ  
ったのに対し, 現バージョンでは5ms程度の潜時  
が実現できているという (<http://psychtoolbox.org/psychportaudio>). これはディスプレイの  
垂直帰線に同期して画面を入れ替えるコマンド  
であるScreen (‘Flip’)に合わせて音の提示Psych  
PortAudio (‘Start’)を行った場合には, 視聴覚  
刺激の時間ずれが5ms程度まで抑えられる可  
可能性を示唆するものである. そこで, 実際にど  
の程度の視聴覚刺激の同期が実現できているの  
か, 筆者の環境で測定を行った. ハードウェア  
的に視聴覚刺激の同期をとる方法もあるが, こ  
こでは扱わない.

#### 測定環境

視覚刺激は, CRTディスプレイ (Mitsubishi

RDF223H, 解像度: 1280×1024, リフレッシュレート: 60 Hz) に提示し, 視覚刺激提示タイミング計測はディスプレイの左上隅に貼り付けたフォトダイオードによって実施した. 聴覚刺激は, Asioドライバ対応オーディオインターフェイス (Roland Octa-capture, サンプリング周波数: 44.1 kHz, バッファサイズ: 64) によってD/A変換を行い, 提示した. フォトダイオードおよびオーディオインターフェイスの出力は, A/D変換器 (CONTEC AIO-160802AY-USB, サンプリングレート: 1000 Hz, 分解能: 16ビット(-10~10 V)) によってデータ取得用PCに取り込んだ. 刺激提示制御用PCとして, Macintosh PCとWindows PCを用意した. それぞれ, MacBook pro 13 in. (OS X 10.8.4, 2.9 GHz Intel Core i7, 8 GBメモリ, Intel HD Graphics 4000 512 MB, Matlab R2012b)と Prime Raytreck 2011 (Windows 7 Professional SP1 64bit, 3.2 GHz Intel Core i7, 12 GBメモリ, Nvidia Quadro 4000 2 GB, Matlab R2010b)であった. なお, フォトダイオードの代わりに輝度計のアナログ出力を用いても結果は同様であった. また, オーディオインターフェイスの出力を直接A/D変換器に入れる代わりに, ヘッドフォンによって音信号に変換し, 人工耳とメジャリングアンプを用いてアナログ出力を得ても, 結果は同様であった.

#### 実験プログラム

PTB3には視聴覚刺激の同期テストを行うためのプログラムPsychPortAudioTimingTest.mが用意されている. これは画面全体の白黒の反転に合わせて音のオンオフを行い, それを10回繰り返すものである. 第1引数であるexactstartをオン(1)にすることによって, 高い精度での視聴覚刺激の同期提示を実現できる(筆者の測定環境の場合, Mac PCでは1 ms以内, Windows PCを用いた場合には3~7 msの時間ずれであった). これは, サウンドデバイスが音を提示する準備が整うのを待って, 視覚刺激を描画するためである. ただし, この方法では, サウンドデバイスが音を提示する準備に費やす時間に試行間でばらつきがある場合, あ

らかじめ決めた試行間隔で刺激提示を行うことは難しい. また, 視聴覚刺激を1試行あたり1度だけ提示する場合には特に問題にならないが, 往復運動を繰り返す仮現運動刺激に合わせて音を繰り返し提示する場合には(例えばTeramotoら<sup>26)</sup>の実験状況等), 仮現運動の刺激間隔が変わってしまうこともありうる(その場合には, 次に述べる方法のほかに, 長い音を用意し, それを仮現運動の第1刺激に合わせて提示し, 仮現運動が終わるまで音のオンオフを行わないなどの工夫をする必要がある). そこで本稿では, PsychPortAudioTimingTest.mの引数をオフ(0)にし, 単純に垂直帰線に同期して視聴覚刺激を提示した場合にどの程度のずれが生じるか測定を行った. 試行数は200試行とした.

#### 測定結果

図1(a)および図2(a)にはMac PCで測定を行った結果とWindows PCで測定を行った結果をそれぞれ示す. Mac環境では, 平均3.95 ms (標準偏差: 0.50 ms) 程度視覚刺激が先に提示されるのに対して, Windows環境では, 平均30 ms (標準偏差: 0.78 ms) 視覚刺激が先に提示されることが示された. いずれの環境でも, ばらつきは小さかったため, 視覚刺激提示の1つまたは2つ前の垂直帰線に同期して聴覚刺激の提示を開始し, 音が先行する部分には無音区間を入れ, 再計測を行った(例えば, Mac環境では平均3.95 ms視覚刺激が先に提示されるので, 1つ前の垂直帰線に同期して, 先頭に12.75 ms (16.7 ms (1フレーム)-3.95 ms) の無音区間が設けた聴覚刺激を提示することによって視聴覚刺激がほぼ同期した状態での提示が可能となる). 図1(b)および図2(b)に示すように, この操作によってほぼ同期して提示できるようになることが示された.

視聴覚刺激の非同期の大きさは, 使用環境によって異なる可能性が高いので, 自らの実験環境の計測を行い, 実態を把握しておくことを薦める. 触覚刺激提示に関しては触れなかったが, D/A変換器でアナログの電圧信号に変換

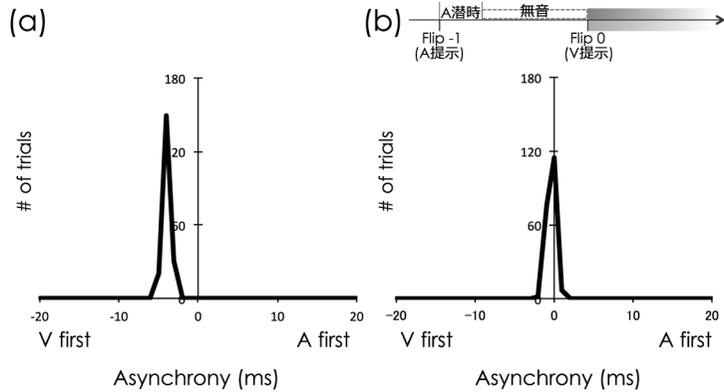


図1 Mac環境でPsychtoolbox使用時の視聴覚刺激の同期計測結果。200試行実施し、その際の時間ずれの大きさを1ms単位でヒストグラムで示した。縦軸が頻度、横軸がずれの大きさを表す（正値が音先行、負値が視覚刺激先行）。(a)調整なしでの計測結果。(b)聴覚刺激の提示フレームを視覚刺激提示に対して1フレーム前にし、さらに無音区間を挿入することによって、視聴覚刺激の同期を調整した後の計測結果。

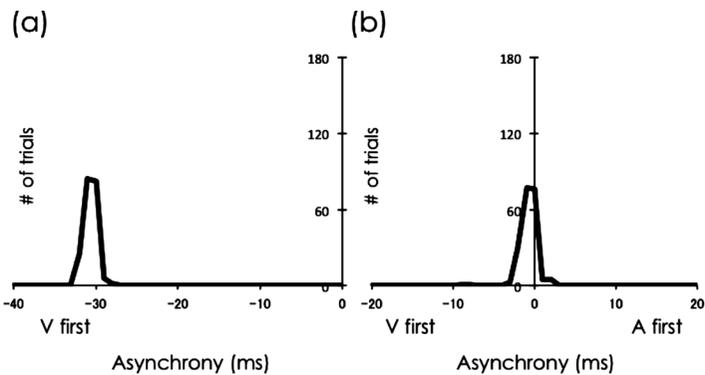


図2 Windows環境でPsychtoolbox使用時の視聴覚刺激の同期計測結果。200試行実施し、その際の時間ずれの大きさを1ms単位でヒストグラムで示した。縦軸が頻度、横軸がずれの大きさを表す（正値が音先行、負値が視覚刺激先行）。(a)調整なしでの計測結果。(b)聴覚刺激の提示フレームを視覚刺激提示に対して2フレーム前にし、さらに無音区間を挿入することによって、視聴覚刺激の同期を調整した後の計測結果。

するまでは聴覚刺激提示と全く同様であり、ここに記した方法で同期測定および実験を行うことが可能である。

#### 4. Pure Dataを用いた多感覚研究

Psychtoolbox (Matlab 言語) はC言語などと異なり、変数の厳密な管理を必要とせず、また約束事も少ないため、初心者が比較的扱いやすいものといえる。しかし、プログラムをテキストで記述するため、C言語などと同様にプログラム全体の動きがイメージしづらく、開発や保守に困難を感じる人も少なくない。そこで、ここでは多感覚研究初心者がさらに扱いやすいプロ

グラミング環境としてPure Data (<http://puredata.info/>)を紹介する。

Pure Dataは、音や映像等マルチメディア素材製作用プログラミング環境であり、ミュージシャンやアーティストによって主に用いられてきた。プログラム形態は、データの流れを箱と線で示すデータフロー型プログラミングであり、思いついたアイデアを簡単に音や映像をして表現することができる（同様の形態をもつプログラミング環境としてMax/MSPがある）。しかも、無償で提供され、簡単に多チャンネル制御ができるほか、ネットワークを通じてiPhone/iPad, Kinect, Wiiリモコンなどとの連携

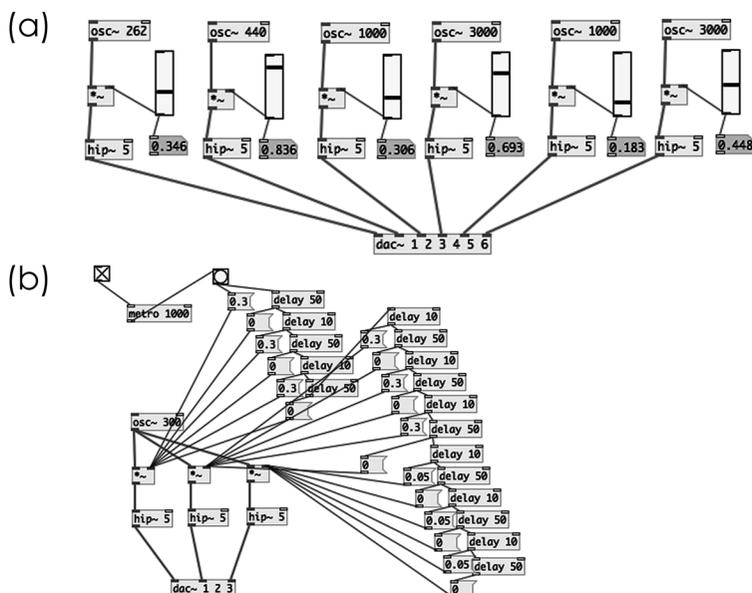


図3 Pure Dataで作成したコード例. (a) 6つのチャンネルに同時に異なる周波数の音を提示するプログラム例. 正弦波を発生させ (各モジュールの先頭), 振幅をかけ合わせ (縦長の長方形スライダ), 各チャンネルに出力をおこなっている. (b) ラビット錯覚用プログラム例. 振動刺激を前腕部の3カ所に貼り付け, このプログラムを実行すると, 50ms×3の振動が各振動刺激位置に連続して提示され, 先行研究<sup>27)</sup>で報告されたようなラビット錯覚を体験できる.

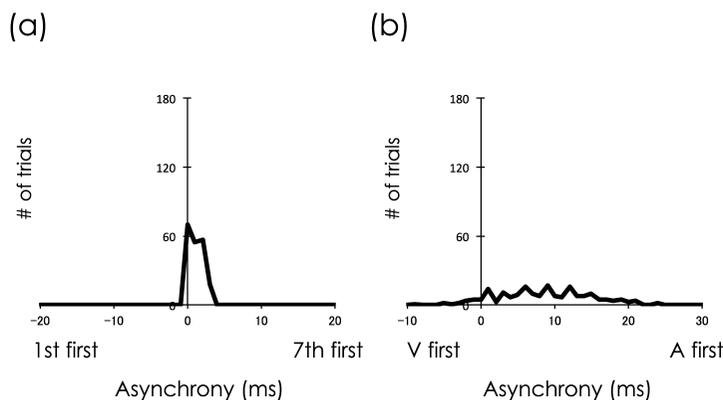


図4 Mac環境でPure Data使用時の同期計測結果. 200試行実施し, その際の時間ずれの大きさを1ms単位でのヒストグラムで示した. 縦軸が頻度, 横軸がずれの大きさを表す. (a) チャンネル間同期の計測結果 (正値が第7チャンネル先行, 負値が第1チャンネル先行). (b) Pure DataのGEM環境 (OpenGL) での視聴覚刺激同期結果 (正値が音先行, 負値が視覚刺激先行).

も簡単に行うことができる (Pure Dataの使い方を紹介する日本語のWebサイトもいくつかあるため, そちらを参照のこと). また, プラットフォームも選ばない. このように様々な利点はあるが, 実際どの程度本格的な心理実験に使用できるのか未知数である. そこで, 本稿では

同期測定を行ったので, その結果を紹介する.

#### 4.1 多チャンネル再生における同期

複数のLED刺激と聴覚 (または触覚) 刺激を同時に扱う場合には多チャンネル再生系が必要になる. 先述のようにPure Dataでは簡単に多チャンネルを扱うことができる. その一例と

して、6つのチャンネルにアナログの電圧信号を送るコードを図3(a)に示した。PCにD/A変換器および増幅器を接続することによって、LED刺激、聴覚刺激、触覚刺激など電圧信号を必要とするデバイスを簡単に扱うことができる。触覚デバイスを接続した場合には、ラビット錯覚<sup>27)</sup>のデモンストレーションも用意に行うことができる(図3(b))。しかし、チャンネル間の同期に問題がある場合には、本格的な心理実験に使用することはできないため、どの程度のずれが生じるか計測を行った(200試行)。チャンネル間同期計測用のプログラム(8チャンネル同時再生)を新たに作成し、Mac PCおよびPure Data、さらに3.2項に示した計測機器を使用して、1チャンネル目と7チャンネル目に同時に信号を出力した。その結果、図4(a)に示すようにチャンネル間のずれは平均1.12ms(標準偏差:0.99ms)程度であり、ほぼ同期して刺激提示を行うことができることがわかった。1チャンネル目と7チャンネル目だけでなく、ほかのチャンネルどうしても同様の結果が得られた。

#### 4.2 GEM環境における視聴覚間同期

Pure DataにはGEM(Graphics Environment for Multimedia)と呼ばれるOpenGLを扱える環境も用意されている(立体視等OpenGLの各種機能も扱うことができる)。そこで、3.2と同様の視聴覚刺激を作成し、視聴覚刺激の同期計測を行った。その結果を図4(b)に示す。現在のところディスプレイの垂直帰線に同期して画面を入れ替えることができていないため、大幅なずれが生じ、またばらつきも大きかった。今後この点を改善できれば、本格的な心理実験に使用できる可能性も出てくるだろう。

#### 5. まとめ

本稿では、多感覚研究にこれから取り組むことを考えている学生および研究者を対象として、多感覚研究のための実験環境構築の初歩の初歩を紹介した。特に、多感覚統合/相互作用を実現するための基本的な手がかりである空間一緻性と時間一緻性を基準にして、実験環境構

成時に必要となるハードウェアやソフトウェア(Psychtoolbox, Pure Data)について解説を行った。

視覚刺激提示装置にはCRT/LCDディスプレイ、プロジェクタ、ヘッドマウントディスプレイ、LED等があり、聴覚刺激提示装置にはヘッドフォンやスピーカがある。また、触覚刺激提示には、実物刺激、振動刺激、電気刺激や空気刺激等がこれまでに用いられてきた。これらは、それぞれメリットとデメリットを持っているので、そのことを十分認識し、それぞれの実験目的や環境に合わせて使い分けていく必要がある。

ソフトウェアとしては、PsychtoolboxとPure Dataについて解説を行った。Psychtoolboxには様々な心理実験用デモプログラムが用意されており、非常に使い勝手が良いものとなっている。インストール法や使い方を紹介する英語/日本語のWebサイトも比較的多く存在する。また、多くの多感覚研究で実際に使用されており、信頼性の高いものといえる。一方、Pure Dataに関しては、GEM環境ではいくつか改善すべき点が残っているが、思いついたアイデアを簡単に音や映像として表現できる手軽さは群を抜いている。したがって、デモ作成や、どうすればうまくいきそうか当たりをつける場合には有用と考える。

#### 文 献

- 1) I. P. Howard and W. B. Templeton: *Human spatial orientation*. Wiley, New York, 1966.
- 2) H. McGurk and J. MacDonald: Hearing lips and seeing voices. *Nature*, **264**, 746–748, 1976.
- 3) S. Hidaka, Y. Manaka, W. Teramoto, Y. Sugita, R. Miyauchi, J. Gyoba, Y. Suzuki and Y. Iwaya: Alternation of sound location induces visual motion perception of a static object. *PLoS ONE*, **4**, e8188, 2009.
- 4) W. Teramoto, Y. Manaka, S. Hidaka, Y. Sugita, S. Sakamoto, R. Miyauchi, J. Gyoba, Y. Iwaya and Y. Suzuki: Visual motion perception induced by sounds in vertical plane. *Neuroscience Letters*, **479**, 221–225, 2010.

- 5) W. Teramoto, S. Hidaka, Y. Sugita, S. Sakamoto, J. Gyoba, Y. Iwaya and Y. Suzuki: Sounds can alter the perceived direction of a moving visual object. *Journal of Vision*, **12**, article 11, 2012.
- 6) G. H. Recanzone: Rapidly induced auditory plasticity: The ventriloquism aftereffect. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **95**, 869–875, 1998.
- 7) I. Frissen, J. Vroomen, B. de Gelder and P. Bertelson: The aftereffects of ventriloquism: Are they sound-frequency specific? *Acta Psychologica (Amsterdam)*, **113**, 315–327, 2003.
- 8) M. Kobayashi, W. Teramoto, S. Hidaka and Y. Sugita: Sound frequency and aural selectivity in sound-contingent visual motion aftereffect. *PLoS ONE*, **7**, e36803, 2012.
- 9) 平原達也：はじめての聴覚実験：デジタルな世界に棲む人々に伝えたい、音を鳴らし、測り、聴き比べるときのお約束. *日本音響学会誌*, **65**, 81–86, 2009.
- 10) 北川智利：多感覚錯覚からみる身体のリアルティ. *日本バーチャルリアルティ学会誌*, **10**, 26–31, 2005.
- 11) O. Blanke: Multisensory brain mechanisms of bodily self-consciousness. *Nature Review Neuroscience*, **13**, 556–571, 2012.
- 12) M. Botvinick and J. Cohen: Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see. *Nature*, **391**, 756, 1998.
- 13) H. H. Ehrsson: The experimental induction of out-of-body experiences. *Science*, **317**, 1048, 2007.
- 14) B. Lenggenhager, T. Tadi, T. Metzinger and O. Blanke: Video ergo sum: Manipulating bodily self-consciousness. *Science*, **317**, 1096–1099, 2007.
- 15) N. Kitagawa, M. Zampini and C. Spence: Audiotactile interactions in near and far space. *Experimental Brain Research*, **166**, 528–537, 2005.
- 16) W. Teramoto, Y. Nozoe and K. Sekiyama: Audiotactile interactions beyond the space and body parts around the head. *Experimental Brain Research*, **228**, 427–436, 2013.
- 17) K. Matsumiya: Seeing a haptically explored face: Visual facial-expression aftereffect from haptic adaptation to a face. *Psychological Science*, **24**, 2088–2098, 2013.
- 18) K. Sekiyama, K. Hashimoto and Y. Sugita: Visuo-somatosensory reorganization in perceptual adaptation to reversed vision. *Acta Psychologica (Amsterdam)*, **141**, 231–242, 2012.
- 19) C. V. Jackson: Visual factors in auditory localization. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **5**, 52–65, 1953.
- 20) D. A. Slutsky and G. H. Recanzone: Temporal and spatial dependency of the ventriloquism effect. *NeuroReport*, **12**, 7–10, 2001.
- 21) S. Soto-Faraco, C. Spence and A. Kingstone: Cross-modal dynamic capture: Congruency effects in the perception of motion across sensory modalities. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception*, **30**, 330–345, 2004.
- 22) 崔 正烈, 寺本 渉, 坂本修一, 岩谷幸雄, 鈴木陽一：ベクションが頭部前後における水平方向の音像定位に及ぼす影響. *ヒューマンインターフェイス学会誌*, **14**, 41–48, 2012.
- 23) M. O. Ernst and M. S. Banks: Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, **415**, 429–433, 2002.
- 24) L. Shams, Y. Kamitani and S. Shimojo: Illusions. What you see is what you hear. *Nature*, **408**, 788, 2000.
- 25) R. Sekuler, A. B. Sekuler and R. Lau: Sound alters visual motion perception. *Nature*, **385**, 308, 1997.
- 26) W. Teramoto, S. Hidaka and Y. Sugita: Sounds move a static visual object. *PLoS ONE*, **5**, e12255, 2010.
- 27) F. A. Geldard and C. E. Sherrick: The cutaneous “rabbit”: A perceptual illusion. *Science*, **178**, 178–179, 1972.