

平成 27 年度 卒業論文

操作における入出力間の相互相関と遅延に着目した
自己主体感に関する研究

指導教員
舟橋 健司 准教授

名古屋工業大学 工学部 情報工学科
平成 24 年度入学 24115039 番

片岡 俊樹

目次

第1章	はじめに	1
第2章	実験1: 連続信号の相互相関と自己主体感	3
2.1	実験の概要	3
2.2	実験システム	3
2.3	実験の手順	8
2.4	結果と考察	9
第3章	実験2: 相互相関および遅延と自己主体感	12
3.1	実験の概要	12
3.2	実験システム	12
3.2.1	目標信号	13
3.2.2	出力信号	14
3.3	実験の手順	16
3.4	結果と考察	18
3.4.1	自己主体感評価	19
3.4.2	安心感評価	20
3.4.3	自己主体感と安心感の関係	21
3.4.4	偶然性の程度	22
第4章	むすび	24
	謝辞	25
	参考文献	26

第1章 はじめに

人類の道具の起源は数百万年前とされており, Oakley [1] は, 人間の特徴は道具を作ることであるとしている. 道具は人間の文化や歴史と密接に関わりながら進化を続け, 複雑な作業を行う道具(機械)も利用されている現在では, 人の操作を必要としない道具の自動化の検討も行われている. 例えば最近では, 自動運転自動車が大きな話題を呼んでおり, 日本国内でも操作の一部を自動化した車での公道実験が始まっている. しかし, 自動運転自動車をはじめ様々な道具の自動化の開発が進むにつれ, 実用化において安全性やコストなど様々な問題が持ち上がってくる. 道具の大半は人の操作を必要としているのが現状であり, 人が操作するための道具のインタフェース開発は重要である. しかし, コンピュータや携帯電話をはじめとした電子機器などは, 機能が多くなるにつれてそのインタフェースは複雑になっている. そのため近年, 使いやすい道具を実現するためのインタフェース開発や, ヒトとモノとの関わりについて関心が高まってきている [2, 3].

よりよいインタフェースを開発するうえで人間の知覚を考慮することは重要であり, 心理学の分野では様々な研究がなされている. McGurk ら [4] は, ある音韻の発話の映像と別の音韻の音声を組み合わせて視聴すると, 第三の音韻が知覚されることを初めて報告した. これは, 複数の感覚が脳内でグループ化され新しい感覚を生み出すクロスモーダル知覚によるもので, 近年, バーチャルリアリティやヒューマンマシンインタフェースの分野で注目されている. 道具のインタフェース開発に関連する分野では, 道具を操作する人間の自己感についての研究が行われている. 最も基本的な自己感として Gallagher [5] は, 自己主体感 (sense of self-agency), すなわち「この行為を引き起こしたのはまさに自分自身である。」という感覚を挙げている. フォワードモデルでは, 自己主体感は「実際の結果」が「結果の予想」に合致するときに生起されるとしており, 浅井ら [6] は自己主体感の生起メカニズムにおける学習の効果について検討し, その結果, フォワードモデルの妥当性と, 学習が自己主体感に影響を与えることを示した. また, 道具を操作するとき, その操作結果にノイズが加わることは十分考えられる. 自分の操作に対してノイズが加わったり遅延が生じたりしてフィードバックが予想と異なる場合, 自己主体感は減少することが過去の研究で報告されている [6]. 遅延と自己主体感の関係について, 河邊ら [7] は, 入力(対象の操作)時と出力(結果の提示)時のそれぞれに操作と関係のない感覚信号を提示し, 入力感覚と出力感覚それぞれに無関係の感覚を意図的にグループ化させると, それらの因果関係が希薄になり自己主体感が減少することを示し, 延いては自己主体感がクロスモーダル知

覚と同様のプロセスで、行為とその効果の時間的統合により得られることを明らかにした。そしてこの知見から、Farrerら [8] は、自己主体感が行為とそのフィードバックがあるまでの時間に依存していることを示した。これらの研究では、被験者が実験装置のボタンを押すなどの単発的な入力を行った後、意図的に遅延させた上で画面を表示するなどの単発的な出力を行う実験を行っている。すなわち、実験における行為と効果がパルス的であり、どちらも連続性を伴っていない。実際の道具には連続的な入出力を伴うものが多いが、連続的な入出力に対するノイズや遅延に着目した自己主体感に関する研究はない。また、これらの研究の多くは自己主体感の新たなモデルの提案や人間の正常なパーソナリティの発達に役立てることを目的としており、ものづくりに貢献するために自己主体感とノイズ、遅延の関係を調べたものはまだない。自己主体感とノイズ、遅延の関係を明らかにし、人が操作していると許容できるノイズと遅延の度合いを検討することで、インタフェースやバーチャルリアリティシステムの精度や性能の妥協点を見出すことができると期待される。

そこで本研究では、連続的な入出力信号間の遅延時間と相互相関に着目した自己主体感の変化を調査し、人が何をもって道具を操作していると感じるのかを検討する。第一の実験では、行為と効果の相互相関が強い場合に自己主体感が強くなる、という仮説を検証する。被験者の入力に対して、相関が強い出力(操作対象)と相関が弱い出力(非操作対象)を同時に提示し、被験者に操作対象を見つけてもらう。被験者が操作対象として選んだ出力と入力との相互相関が強いならば、仮説は実証される。第二の実験では、相互相関と遅延時間が自己主体感に与える効果を検討する。また、有意な効果があるのならば、相互相関、遅延時間と自己主体感の関係と、自己主体感が得られるノイズ、遅延の許容境界を明らかにしたい。被験者は提示される目標信号に一致するように操作対象を操作する。様々な相互相関と遅延時間の組み合わせに対して、被験者に印象を官能評価してもらう。自己主体感とともに操作をしているときの安心感(sense of security)の評価も同時に行う。雪道を走る車がスピードの出しすぎで曲がりきれなかったり、パラシュートが風にあおられ降下目標から大きく離れてしまったりと、道具や機械の操作にはリスクを伴うものがある。操作時のノイズや遅延が人命に関わる場合もある。その場合、操作者は不安を感じることもあり、また大きな事故へとつながる可能性もある。そのため、道具操作から得られる安心感の評価も意義があると考えられる。相互相関と遅延時間の変化に伴う自己主体感と安心感の変化の関係を検討することで道具インタフェース開発の更なる発展につながる知見を得られると期待される。

本論文では、第2章で第一の実験について述べ、第3章で第二の実験について述べる。そして第4章で本研究のまとめ、今後の課題について述べる。

第2章 実験1: 連続信号の相互相関と自己主体感

2.1 実験の概要

行為と効果の相互相関が強い場合に自己主体感が強くなる, という仮説を検証したい. そこで, 次のような実験を行う. 被験者の入力に対して複数の出力を同時に提示する. 出力のうち入力と相互相関が強い出力 (操作対象) は一つのみで, 残りは全て入力との相互相関が弱い出力 (非操作対象) である. 被験者は, 装置を利き手で操作し, 複数の出力の中から操作対象として自分が操作していると思うものを回答する. 被験者が操作対象に選んだ出力と入力との相互相関が強いならば, 仮説は実証される.

本実験に用いる相互相関係数を式 2.1 により求める.

$$Corr_{XY}(\tau) = \sum_{t=1}^T \{X(t)Y(t+\tau)\} \quad (2.1)$$

X と Y は相互相関係数を求める 2 つの信号であり, τ は 2 信号間の時間差を表す. 片方の信号を τ だけずらし, その信号ともう片方の信号との重なった部分と時間軸とに囲まれた部分の面積が $Corr_{XY}(\tau)$ である. $Corr_{XY}(\tau)$ のうち値の最大のもをその信号間の相互相関係数とし, そのときの τ が 2 信号間の遅延時間となる. なお X と Y が全く同じ信号の時, 相互相関係数が 1 となるように値を正規化している.

被験者は大学生および大学院生 (20 代) の男女 10 名ずつ, 計 20 名である. 全員, 右利きで, 実験に用いる機材を右手で操作した. なお, 本実験は本学の生命倫理審査にて承認されている. また全ての参加者から実験参加について同意が得られている.

2.2 実験システム

被験者への提示は視覚刺激と聴覚刺激により構成する. 視覚刺激は, 解像度 1680×1050 の 22 インチ液晶ディスプレイ (BenQ G2200W) で提示し, 聴覚刺激は, 2ch スピーカー (BUFFALO BSSP01UBK) で提示する. また, 被験者の操作は 3 次元力覚入出力デバイス (Geomagic Phantom Omni, 以降 PHANTOM) を使用する. PHANTOM は, ペンを持つように操作することで, その 3 次元座標やペンの角度などを得ることができる. また, 力

覚フィードバックによる出力装置としても用いることができる。実験では、前後方向の座標(ストローク)とねじり角の値を利用する(図2.1)。

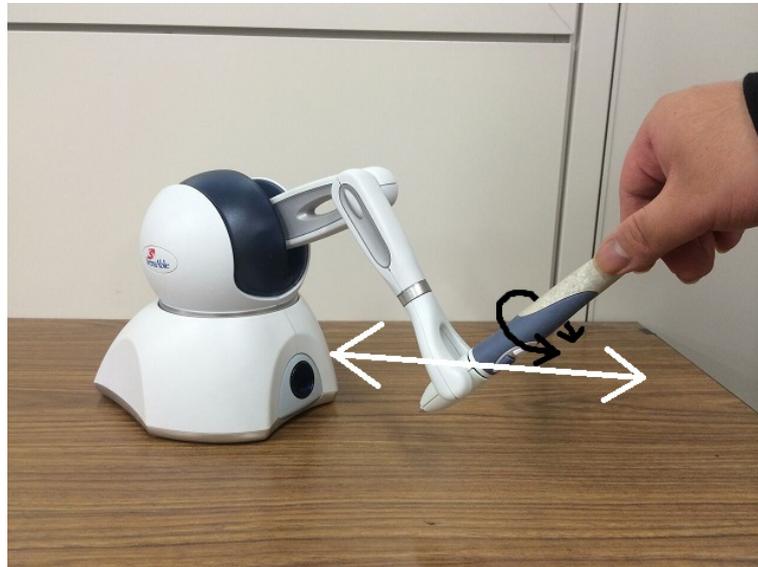


図 2.1: ストロークの動きとねじりの動き

入力から得られる値は、ストロークの場合、最も奥へ押したときに1、最も手前に引いたときに-1となり、ねじり角の場合、最も時計回りに回したときに1、最も逆時計回りに回したときに-1となるように値を正規化しており、その値は入力に対して線形的に変化する。なお、ストローク入力の場合は上下左右の移動を制限し、ねじり入力の場合は位置を完全に固定する。

試行開始前は、ディスプレイに800×800の白地の枠のみを表示する。試行が開始されると、図2.2のように画面内に視覚刺激、およびスピーカからの聴覚刺激があることを示すスピーカマーク(図2.2, 右上)を表示する。出力は全部で7種類とし、そのうちの4種類を提示する。聴覚刺激の場合は視覚的な変化はなく、スピーカから再生される音のみが変化する。4つの出力のうちPHANTOMの入力値に応じて変化するのは1つだけで、他の3つはあらかじめ用意された関数の値によって変化する。どの出力がどこに表示されるかは、試行ごとにランダムに決める。タスクの理解を深めるために、出力画面上部にタスクの内容を表示している。

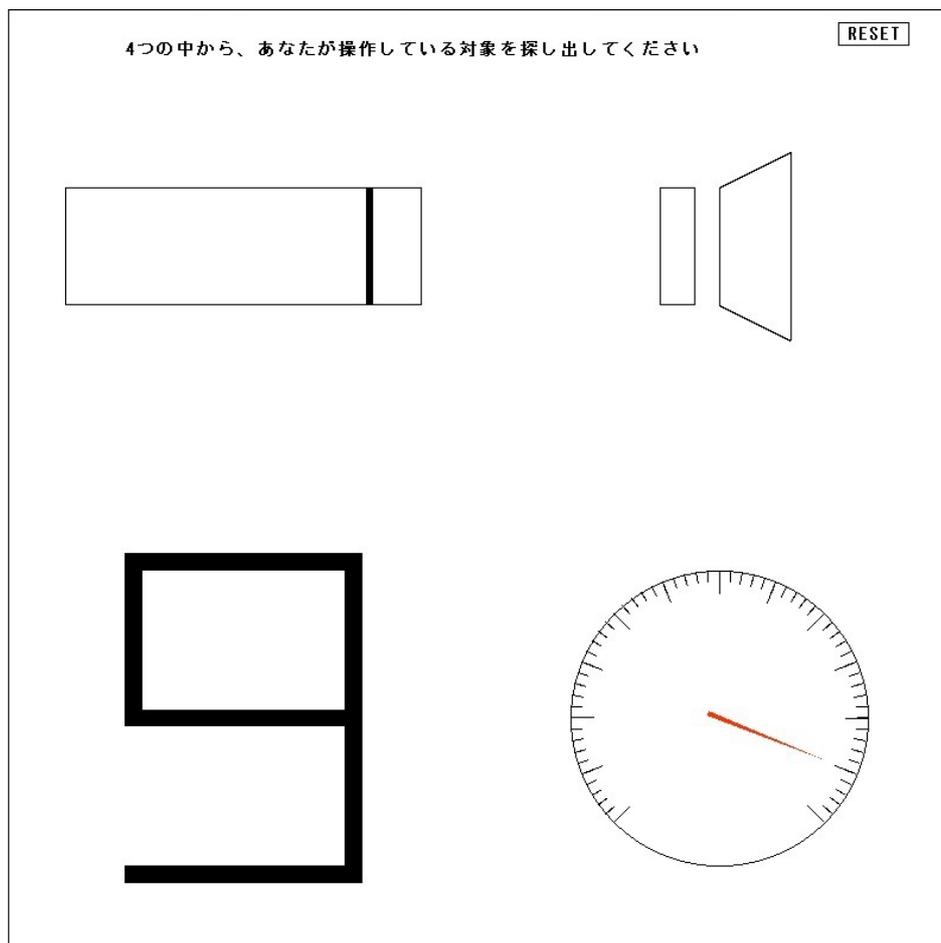


図 2.2: 実験 1 の表示画面の例

視覚刺激は円の大小, バーの一次元位置, 円の明るさ, メーターの角度, 7セグメントの数字 (1桁) の5種類で, 聴覚刺激は音の高さ, 音の大きさの2種類である. 本論文ではそれぞれを大きさ, 横変位, 明るさ, 角度, 数字, 音周波数, 音量と表す. 聴覚刺激に用いる音は正弦波で, 音周波数は200Hzから4000Hzの間で変化し, 音量は微かに聞こえる程度から大きく聞こえる程度まで変化する. なお, 音出力2種類は同時に提示されることはない. 視覚刺激がそれぞれどのように提示されるかを図2.3から図2.7に示す. 図は左から順に入力が-1, 0, 1のときの出力をそれぞれ示している. 入力が-1のときの明るさは, 微かに見える状態である (図2.5, 左). また, 数字は入力値0の前後で4と5が入れ替わる (図2.7, 中央).

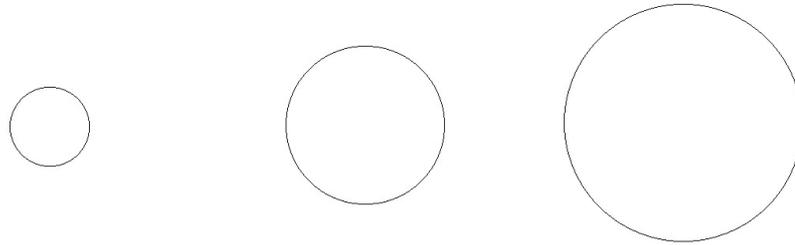


図 2.3: 大きさの変化



図 2.4: 横変位の変化

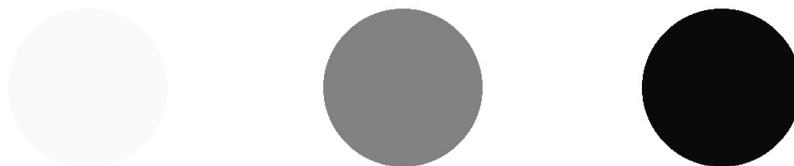


図 2.5: 明るさの変化

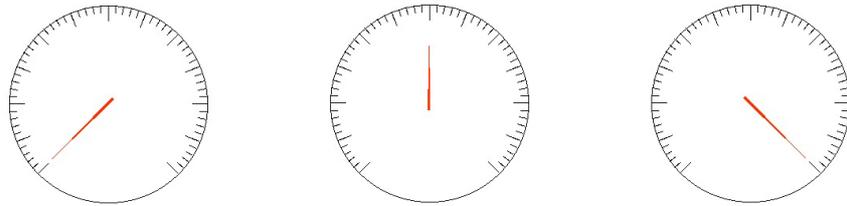


図 2.6: 角度の変化

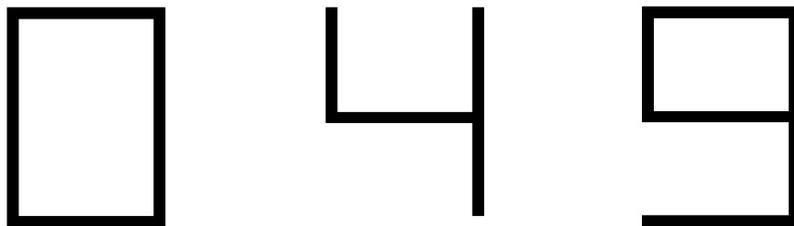


図 2.7: 数字の変化

入力に非同期な出力はあらかじめ用意された関数に従う (例えば, 式 2.2).

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\sin 2t}{2} & (0 \leq t < \pi) \\ \sin 2t & (\pi \leq t < 2\pi) \end{cases} \quad (2.2)$$

$f(t)$ は非同期出力に用いられる値で, $-1 \leq f(t) \leq 1$ である. t は $0 \leq t < 2\pi$ で PHANTOM を動かしたときだけ増加させることで, 操作者が何も操作しなかった場合, 全ての出力の変化を止める. 代表的な入力として, 振幅 1 (入力値の範囲に同じ), 周期 5.23 秒の正弦波を入力信号と想定し, 非同期出力との相互相関係数を求めたところ, 値は 0.3 程度で相関が弱いことを確認している.

2.3 実験の手順

実験は静かな部屋で行う. 被験者は, ディスプレイから 50cm 離れて座る. 被験者には事前に以下の情報を伝える.

- 実験を開始すると視覚的, もしくは聴覚的な出力のうち 4 つが提示される.
- PHANTOM を操作すると 4 つの出力はそれぞれ変化する.
- PHANTOM の動きと同期している出力は 1 つのみで, 他の 3 つは PHANTOM とは無関係でランダムに動く.
- 課題は, PHANTOM の動きと同期している出力, すなわち自分が操作している対象を見つけ出すことである.
- PHANTOM の入力方法は 2 種類あり, 各試行ごとにどちらで行うか指示する.
- 制限時間はない.

被験者が PHANTOM を利き手でもち, 操作できる状態であることを確認した後, 試行を開始し, 出力を提示する. 被験者には PHANTOM を操作してもらい, 操作対象が判明したら操作を中断し, 口頭で操作対象を報告してもらい, 被験者には回答の正誤は告げず, 入力方法と出力の種類を変更した後, 次の試行を行う. 入力方法と同期出力の組み合わせは $2 \times 7 = 14$ 通りであり, 1 通りにつき 14 回試行したいため, 合計 196 回試行する. 試行はカウンターバランスされ, 被験者にランダムに均等に割り当てられる. 実験に要する時間は被験者ごとに異なるが, 4 分程度で終了した.

2.4 結果と考察

入力と同期出力の組み合わせに対する正答数, 誤答数, および正答率を表 2.1 に示す. また, 入出力の各組合せと正答率は図 2.8 の通りである.

表 2.1: 実験1の結果

入力	出力	正答数	誤答数	正答率
ストローク	大きさ	16	0	100
	横変位	9	0	100
	明るさ	12	1	92.3
	角度	14	0	100
	数字	15	0	100
	音周波数	14	0	100
	音量	14	3	82.4
ねじり	大きさ	12	0	100
	横変位	19	0	100
	明るさ	15	0	100
	角度	14	0	100
	数字	12	1	92.3
	音周波数	12	2	85.7
	音量	9	2	81.8

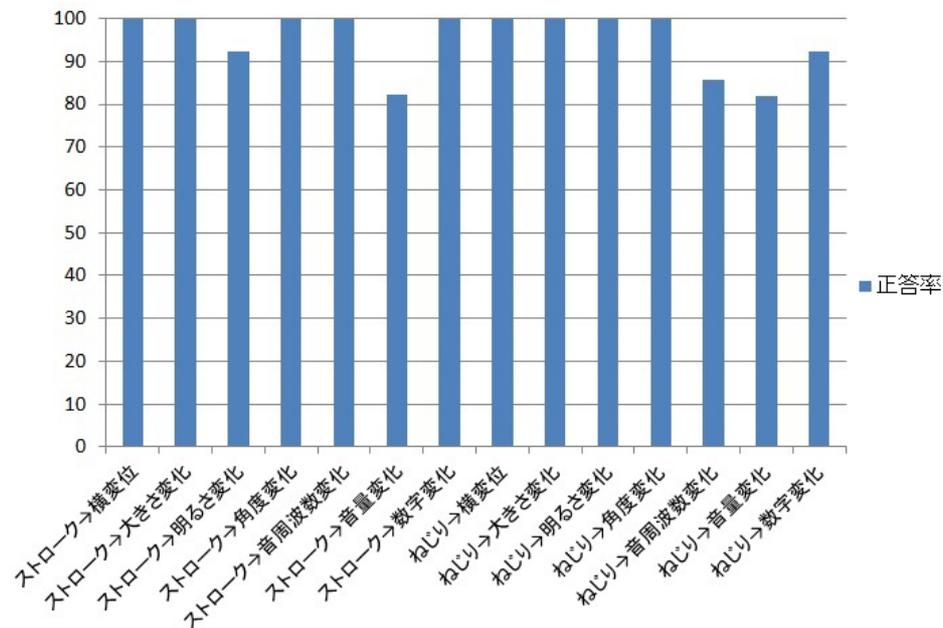


図 2.8: 入出力の各組合せに対する正答率

入出力の組み合わせによって正答数, 誤答数に差があるかどうか χ^2 検定を行ったところ, $\chi^2(13) = 20.985$, $p > 0.05$ となり, 有意水準 5% で有意な差はなかった. すなわち, 入出力の組み合わせと回答の正誤は関連性はなかった. 被験者が操作対象に選択した出力はほとんどが正答であり相互相関が強い. すなわち, 行為と効果の相互相関が強い場合に自己主体感が強くなるという仮説は実証された.

今回行った実験では, 入出力の組み合わせと回答の正誤に有意な差はないという結果が得られた. しかしながら, 誤答の多くは操作対象が聴覚刺激の場合であるということは検討の余地がある. 産業教育機器システム便覧 [9] では, 人の五感による知覚の割合は視覚刺激が 83%, 聴覚刺激が 11% であるとしている. そのため, 今回の実験で被験者が操作対象を見つけようとするとき, 視覚刺激の知覚が大きく働いたために, 聴覚刺激の変化に気づきにくくなったことが考えられる. また, 同期出力が聴覚刺激ではない誤答も存在する. そのうちの一つに着目し, そのときの入力と被験者が操作対象として選んだ出力の関係を図 2.9 に示す. 入力はストロークで, 正答は明るさであったが, 被験者は音量を操作対象に選択している. グラフは横軸が時刻 (秒), 縦軸がその時刻における入出力の値を示している.

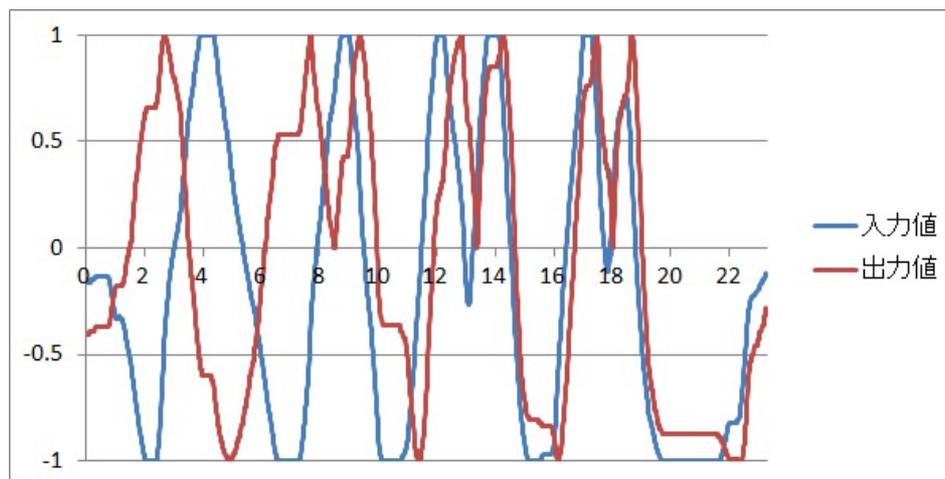


図 2.9: 入力(ストローク)と非同期出力(音量)の変化

図 2.9 における時刻 11 秒から 23.5 秒までの範囲で, 入出力の相互相関係数を計算したところ, 値は偶然的に 0.947 と強い相関があった. すなわち, 被験者の回答は実験者側が用意した正答ではなかったが, 相互相関の強い出力を操作対象に選ぶことができたとも考えられる. この結果は, 行為と効果の相互相関が強い場合に自己主体感が強くなるという仮説を支持するものであった.

第3章 実験2: 相互相関および遅延と自己主体感

3.1 実験の概要

第一の実験では, 行為と効果の相互相関が強い場合に自己主体感が強いということが実証された. そこで, 第二の実験では, 相互相関と遅延時間が自己主体感に与える効果を検討する. 被験者には提示される目標信号に一致するように操作対象を操作してもらう. 様々な相互相関と遅延時間の組み合わせに対して, 被験者に印象を官能評価してもらう. 評価は自己主体感だけでなく, 操作をしているときの安心感についても行う. 自己主体感と安心感に対して, 相互相関と遅延時間の変化は有意な効果があるのかどうかを検討し, 有意な効果があるならば相互相関, 遅延時間との関係と, 道具操作におけるノイズ, 遅延の許容境界を明らかにしたい. 被験者は第2章の実験1と同様である.

3.2 実験システム

実験1と同様の機材を用いる. 実験2では PHANTOM によるねじり角のみを入力とする. 実験を開始すると, 図 3.1 のような画面を表示する. 相互相関 1.00, 遅延時間 0 秒の状態 (以後, 基本状態と呼ぶ) のとき, 出力信号は PHANTOM の入力に応じて図 2.4 のように動く. 出力信号の枠内に引かれている赤線は出力が -0.8 と 0.8 のときの位置であり, 出力信号が赤線より外側に存在するときバーが赤色になり警告音が鳴る. 目標信号はあらかじめ用意された関数に従って, 赤線を超えないように変動する. タスクの理解を深めるために, 出力画面上部にタスクの内容を表示している.

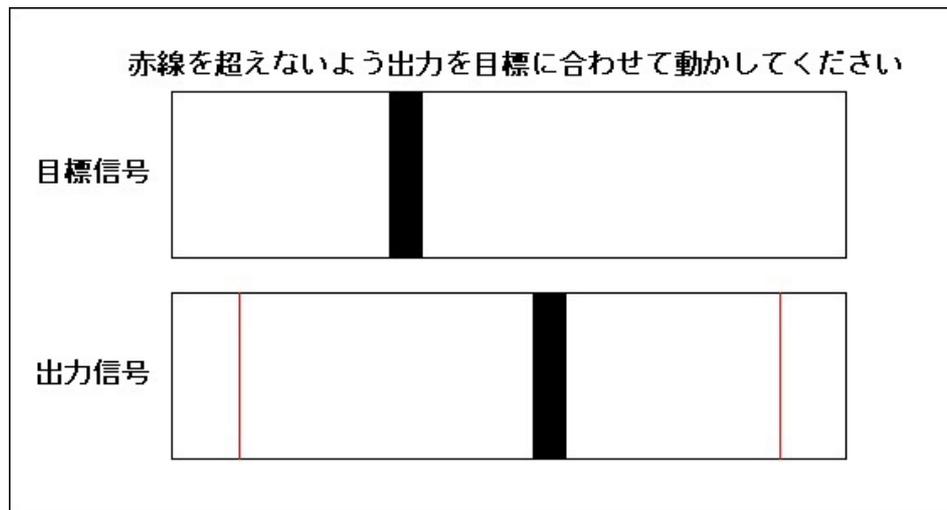


図 3.1: 実験 2 の表示画面の例

3.2.1 目標信号

基本状態のときには出力信号を目標信号に容易に一致させることができるように、目標信号をゆっくりと滑らかに動かす。目標信号は、式 3.1 から式 3.6 の中からランダムに選ばれた関数 $f_x(t)$ ($x = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) に従うものとする。 $f_x(t)$ は目標信号の座標に用いられる値である。目標信号が赤線に近づきすぎると基本状態であっても赤線を超えてしまう可能性があるため、不適切である。そのため目標信号に用いられる関数は $-\frac{3}{4} \leq f_x(t) \leq \frac{3}{4}$ を満たすものを設定している。パラメータ t は 0 から 1 フレーム毎に 0.012 ずつ増加し円周率を超えると 0 に戻る変数である。なお、リフレッシュレートを 60Hz と想定している。また $t = 0$ になる度にランダムに関数を選び、目標信号の動きを完全に予測することを困難とする。

$$f_1(t) = \frac{\sin t}{2} \quad (0 \leq t < 2\pi) \quad (3.1)$$

$$f_2(t) = \frac{3 \sin t}{4} \quad (0 \leq t < 2\pi) \quad (3.2)$$

$$f_3(t) = \frac{\sin 2t}{4} \quad (0 \leq t < 2\pi) \quad (3.3)$$

$$f_4(t) = \frac{\sin 4t}{6} \quad (0 \leq t < 2\pi) \quad (3.4)$$

$$f_5(t) = \begin{cases} 0 & (0 \leq t < \frac{\pi}{4}) \\ \frac{2 \sin(\frac{3}{4}t - \frac{\pi}{3})}{3} & (\frac{\pi}{4} \leq t < \frac{7}{4}\pi) \\ 0 & (\frac{7}{4}\pi \leq t < 2\pi) \end{cases} \quad (3.5)$$

$$f_6(t) = \begin{cases} \frac{3}{2\pi}t & (0 \leq t < \frac{\pi}{3}) \\ \frac{\cos(\frac{3}{4}t - \frac{\pi}{4})}{2} & (\frac{\pi}{3} \leq t < \frac{5}{3}\pi) \\ \frac{3}{2\pi}t - 3 & (\frac{5}{3}\pi \leq t < 2\pi) \end{cases} \quad (3.6)$$

3.2.2 出力信号

本実験ではノイズは5段階に分け、入力と出力との相互相関係数がそれぞれ1.00, 0.95, 0.90, 0.85, 0.80となるものとした。また、遅延時間は4段階に分け、入力に対する出力が得られるまでの時間をそれぞれ0秒, 0.3秒, 0.6秒, 1.0秒とした。

入力に加えるノイズが単純なランダムノイズの場合、値の変動が大きくなることもあり、出力がちらついて見えてしまうという問題がある。そこで、本実験では図3.2のように正弦波の振幅と周期をランダムに変化させ、それを入力に加えることでノイズとした。図3.2は横軸が時刻で、縦軸がノイズ量である。

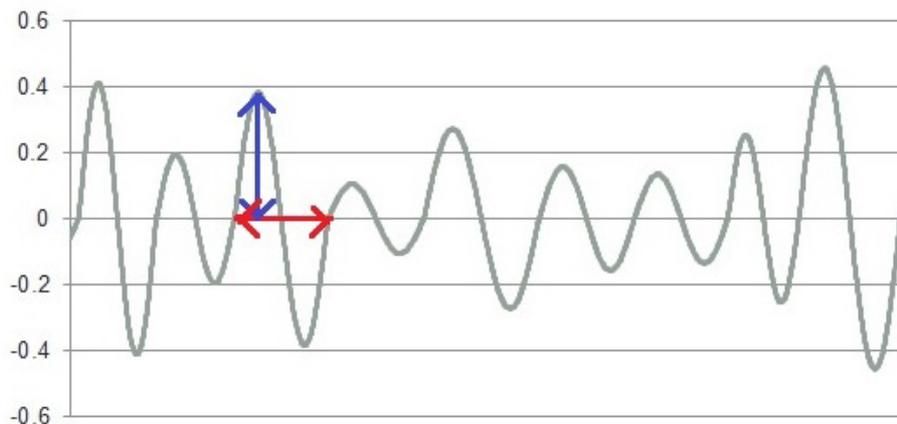


図 3.2: 正弦波によるノイズの例

正弦波は滑らかに変化するため、出力のちらつきを防ぐことができる。5段階のノイズを実装するために、代表的な入力として、遅延時間0秒の状態では振幅1、周期約5.23秒の正弦波を入力信号と想定し、それに加えるノイズの正弦波の振幅と周期を変化させながら、10分間測定したデータをもとに相互相関係数を計算した。5段階のノイズは表3.1の値の振幅、周期により設定する。

表 3.1: 各相互相関係数に対するノイズ正弦波の振幅と周期

相互相関係数	振幅	周期 (秒)
1.00	-	-
0.95	0.28 ~ 0.38	2.5 ~ 4.0
0.90	0.44 ~ 0.54	2.5 ~ 4.0
0.85	0.575 ~ 0.675	2.5 ~ 4.0
0.80	0.70 ~ 0.80	2.5 ~ 4.0

振幅と周期の値を試行錯誤するうちに、周期が相互相関に与える影響は振幅と比べて極めて小さいことがわかったため、全ての段階で共通して周期を2.5秒~4.0秒としており、振幅の値の範囲だけを変化させている。

4段階の遅延時間はリフレッシュレートを $60Hz$ として、各入力の値をそれぞれ0フレーム、18フレーム、36フレーム、60フレームだけ遅らせて用いることで、0秒、0.3秒、0.6秒、1.0秒の4段階の遅延としている。

出力信号にノイズが加わったり、遅延が発生したりすると目標信号に一致するように出力信号を操作するのは困難になる。図3.3のように出力信号が目標信号からバー5本分以上離れてしまうと、もしくは赤線より外側に位置していると、バーが赤色になりあらかじめ用意された警告音が鳴るようにしている。なおバーは、-1から1の間で変化する信号に対して、0.1の幅で表示している。警告音は操作者の不安感を煽るものであり、実際の道具操作における事故を想定している。

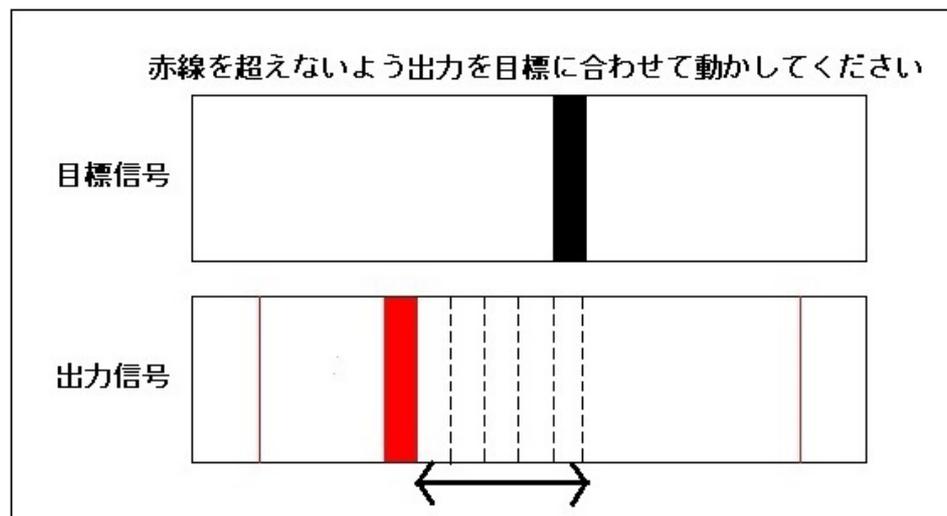


図 3.3: 警告音が鳴る例

3.3 実験の手順

実験1と同様の環境で行う。被験者には事前に以下の情報を伝える。

- 実験を開始すると画面内に目標信号と出力信号が現れる。
- 目標信号はランダムに動くのに対して、出力信号はPHANTOMのねじり入力に同期して動く。
- 課題は、目標信号に一致するように出力信号を操作することである。
- ただし、出力信号にはノイズが加わったり、遅延が発生したりする。
- 出力信号が目標信号から離れすぎるか、赤線より外側に出てしまうと警告音が鳴るが、ペナルティはない。

- 1 試行あたり 30 秒間行われ, その後 10 秒間でアンケートに回答してもらう。

試行開始前は目標信号と出力信号のバーは表示しない。被験者が PHANTOM を利き手でもち, 操作できる状態であることを確認した後, 試行を開始し, バーを表示する。被験者には目標信号に一致するように出力信号を操作してもらう。操作開始から 30 秒後に自動でバーを非表示とし, 操作を終了してもらう。その後, 被験者に安心感と自己主体感の 2 項目を官能評価してもらう。操作の評価において, 前回の操作との相対的な評価になるのを防ぐため, 本実験を行う前に練習として, 基本状態とノイズと遅延が共に本実験における最大の状態 (相互相関 0.80, 遅延時間 1.0 秒) をそれぞれ実際の試行時間である 30 秒間ずつ体験してもらう。被験者には練習での操作を基に質問に回答してもらう。質問内容は以下の 2 種類である。

- 問1. 操作時の安心/不安の印象はどうだったか
 - － 操作できているか安心していった
 - － 操作できているか少しは安心していった
 - － どちらともいえない
 - － 操作できているか少しは不安だった
 - － 操作できているか不安だった
- 問2. 追従操作していると思うか
 - － 非常に思う
 - － 思う
 - － やや思う
 - － やや思わない
 - － 思わない

被験者が質問内容を容易に理解できるように, 自己主体感という表現は使用していない。問1では, 不安感を煽る警告音の有無やその発生時間を目安に操作時の安心感を官能評価してもらう。問2では, 操作対象が自分の操作にどれだけ追従して動いていたかを官能評価してもらう。なお, 実験について思ったことを書いてもらうためにアンケート用紙には自由記述欄を設け, 実験終了後, 記入の時間を与える。相互相関と遅延時間の組み合わせが $4 \times 5 = 20$ 通りであり, 1 通りにつき 10 回試行したいため, 合計 200 回試行する。試行はカウンターバランスされ, 被験者にランダムに均等に割り当てられる。実験は操作ブロック 30 秒と回答ブロック 10 秒を 1 試行として一人当たり 10 試行行われ, 7 分程度で終了した。

3.4 結果と考察

評価をそれぞれ点数で表す. 安心感評価では「安心」を5点, 「不安」を1点とし, 自己主体感評価では「非常に思う」を5点, 「思わない」を1点としている. 表3.2は, 各相互相関と遅延時間でその評価をした人数を示している. 誰もその評価をしなかった場合は空欄である.

表 3.2: 各相互相関, 各遅延時間における安心感, 自己主体感の評価

相互相関係数	遅延時間	安心感					自己主体感				
		5	4	3	2	1	5	4	3	2	1
1.00	0	10					10				
1.00	0.3	5	4		1		2	7		1	
1.00	0.6		8	2				7	2	1	
1.00	1.0		4	5	1		1	3	3	3	
0.95	0	2	3	1	4		2	4	3	1	
0.95	0.3		3	4	1	2		4	3	2	1
0.95	0.6		1	2	5	2			3	7	
0.95	1.0			3	3	4		2	1	4	3
0.90	0	1	2	1	3	3	1	3	2	3	1
0.90	0.3		2	2	6			2	4	3	1
0.90	0.6			1	4	5			2	3	5
0.90	1.0			1	3	6			3	3	4
0.85	0		1	1	6	2		1	2	5	2
0.85	0.3			1	6	3			1	5	4
0.85	0.6		1	2	2	5		1	3	5	1
0.85	1.0				2	8				3	7
0.80	0		2	2	3	3			5	4	1
0.80	0.3			2	3	5			2	5	3
0.80	0.6			2	1	7			1	4	5
0.80	1.0				1	9				2	8

3.4.1 自己主体感評価

分散分析を行った結果, 相互相関について, $F_{4,180} = 22.480$, $p < 0.01$ となり, 有意水準1%で相互相関の変化は自己主体感に対して有意な効果があると言えた. また, 遅延時間について, $F_{3,180} = 45.533$, $p < 0.01$ となり, 有意水準1%で遅延時間の変化も自己主体感に対して有意な効果があると言えた. そこで, 自己主体感と相互相関, 遅延時間との関係を検討する. 自己主体感を遅延時間と相互相関係数で表す重回帰式は式3.7となる. 重回帰式の有効性の検定を行ったところ, $F_{2,197} = 100.601$, $p < 0.01$ となり, 重回帰式は有意水準1%で有効であると言えた.

$$\text{自己主体感} = 10.50 \times \text{相互相関係数} - 1.27 \times \text{遅延時間} - 6.30 \quad (3.7)$$

式3.7から, 強い自己主体感を得るためには相互相関係数は高く, 遅延時間は短くする必要があると考えられる. 強い自己主体感を得るためには相互相関係数を高くする必要があるという結果は, 第一の実験で実証された仮説の妥当性を示している. また, フォワードモデルでは, 自己主体感は「実際の結果」が「結果の予想」に合致するときに生起されるとしており, 本実験の結果はその妥当性も示している. 重回帰式3.7を用いて相互相関係数, 遅延時間に対する自己主体感のグラフを図3.4に示す. 自己主体感の有無の境界は, 式3.7における自己主体感 = 3となる黒線で示す.

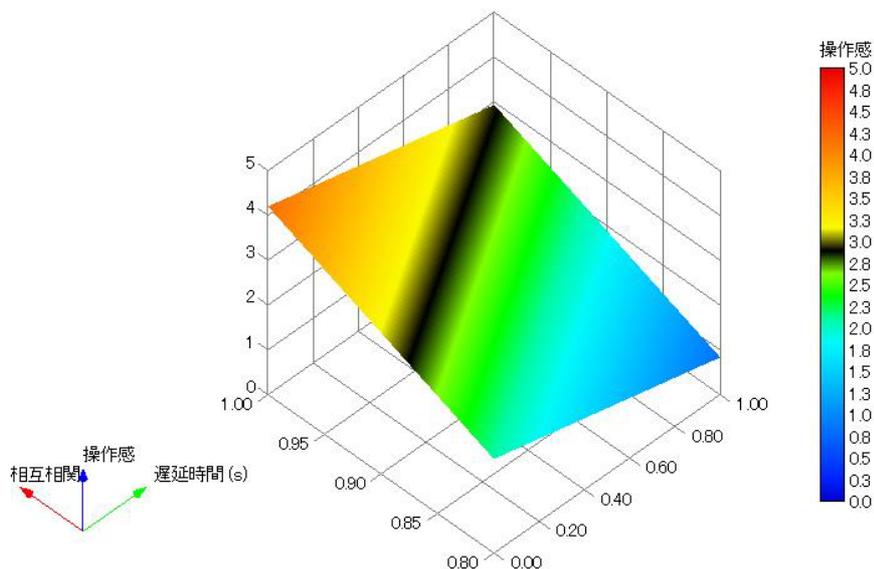


図 3.4: 自己主体感の変化と有無の境界

3.4.2 安心感評価

分散分析を行った結果, 相互相関について, $F_{4,180} = 53.023$, $p < 0.01$ となり, 有意水準 1% で相互相関の変化は自己主体感評価に対して有意な効果があると言えた. また, 相互相関について, $F_{3,180} = 19.038$, $p < 0.01$ となり, 有意水準 1% で遅延時間の変化も自己主体感に対して有意な効果があると言えた. そこで, 自己主体感と同様に安心感も相互相関, 遅延時間との関係を検討する. 安心感を遅延時間と相関係数で表す重回帰式は式 3.8 となる. 重回帰式の有効性の検定を行ったところ, $F_{2,197} = 98.020$, $p < 0.01$ となり, 重回帰式は有意水準 1% で有効であると言えた.

$$\text{安心感} = 11.4 \times \text{相互相関係数} - 1.25 \times \text{遅延時間} - 7.24 \quad (3.8)$$

式 3.8 から, 強い安心感を得るためには自己主体感と同様に, 相互相関係数は高く, 遅延時間は短くする必要があると考えられる. 重回帰式 3.8 を用いて相互相関, 遅延時間に対する安心感のグラフを図 3.5 に示す. 安心感を得られる境界線は, 式 3.8 における 安心感 = 3 となる黒線で示す.

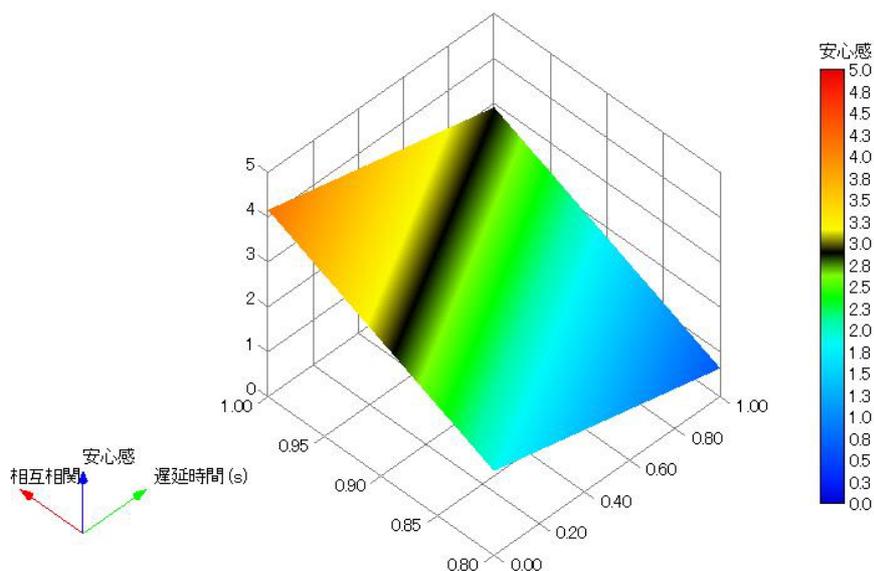


図 3.5: 安心感の変化と有無の境界

3.4.3 自己主体感と安心感の関係

次に、自己主体感と安心感の関係について検討する。式 3.7, 3.8 から、自己主体感と安心感はともに、遅延時間が短く相互相関係数が高いと、評価が高くなることが示唆される。安心感と自己主体感の相関係数は 0.826 であった。無相関検定を行ったところ、 $t(198) = 20.61$, $p < 0.01$ となり、有意水準 1% で相関がないとは言えなかった。表 3.2 から得られた各相互相関、各遅延時間における評価の平均値を表 3.3, 3.4 にそれぞれ示す。

表 3.3: 安心感評価平均値

		遅延時間 (s)			
		0	0.3	0.6	1.0
相互相関係数	1.00	5	4.3	3.8	3.2
	0.95	3.3	2.8	2.2	1.9
	0.90	2.5	2.6	1.6	1.5
	0.85	2.1	1.8	1.9	1.2
	0.80	2.3	1.7	1.5	1.1

表 3.4: 自己主体感評価平均値

		遅延時間 (s)			
		0	0.3	0.6	1.0
相互相関係数	1.00	5	4	3.6	3.2
	0.95	3.7	3	2.3	2.2
	0.90	3	2.7	1.7	1.9
	0.85	2.2	1.7	2.4	1.3
	0.80	2.4	1.9	1.6	1.2

表 3.3, 3.4 から得られる散布図を横軸を安心感, 縦軸を自己主体感として図 3.6 に示す。直線は y 切片 0 で最小二乗法により線形近似したものである。安心感と自己主体感には強い相関があり、比例関係にあることが明らかになった。すなわち、遅延やノイズを除去し強い自己主体感を得ることは強い安心感を得ることにつながると考えられる。人命に関わる事故が想定される道具は不安感によってさらに大きな事故に発展する可能性がある。今回の結果から、道具開発において自己主体感を強めることの重要性が示唆された。

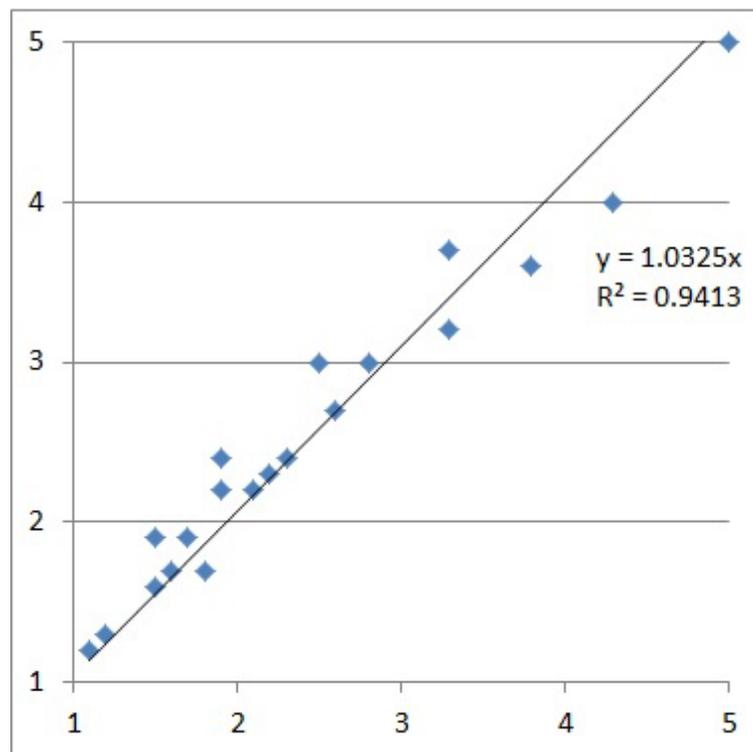


図 3.6: 安心感と自己主体感の評価平均値の散布図

3.4.4 偶然性の程度

Farrer ら [8] は, 行為と効果の偶然性の程度 (degree of contingency) は自己主体感に有意な効果はないことを明らかにした. 偶然性の程度は相互相関に相当すると考えることもできる. 本研究では, 実験2の結果, 行為と効果の相互相関の変化は自己主体感に有意な効果があることが示唆されており, これはFarrer らの結果とは異なっていたと捉えることもできる. その違いは, 実験システムの入出力方法の違いによるものであるとも推測できる. Farrer らが行った実験は, 単発的な入力 (ボタンを押す/押さない) の後, 意図的に遅延させた上で, 画面に単発的な出力 (オブジェクトの表示/非表示) をするものであった. 偶然性が高い状態 (High contingency) と偶然性が低い状態 (No contingency) で自己主体感に有意な差があるかを検討している. 偶然性が高い状態は, 入出力間の相互相関が低く, ボタンが押されても押されてなくてもオブジェクトが75%で表示される. また, 偶然性が低い状態は, 入出力間の相互相関が高く, ボタンが押されたときオブジェクトが75%で表示され, 押さなかったとき25%で表示される. 対して本実験は, 連続的な入力に, 意図的に遅延させ, またノイズを加えた上で, 画面に連続的な出力を表示するものであった. 連続

的入出力での実験でも, 一定時間のうち部分的に出力の変化を止めるという偶然性の程度に関する実験が想定できる. その場合, 相互相関係数に対して連続的に自己主体感が変化するのではなく, ある相互相関係数以上では自己主体感に有意な効果はないという, Farrerらと類似の結果が得られることも考えられる.

第4章 むすび

本研究では、連続的な入出力信号間の遅延時間と相互相関に着目した自己主体感と安心感の評価の変化について検討した。第一の実験では、行為と効果の相互相関が強い場合に自己主体感が強くなるという仮説を検証した。被験者の入力に対して、相関が強い出力と相関が弱い出力を同時に提示し、被験者に操作対象であると思うものを報告してもらった。その結果、被験者が操作対象として選択したものは相互相関が強い出力であったことが明らかになり、仮説は実証された。第二の実験では、相互相関と遅延時間の変化が自己主体感に与える効果を検討した。被験者に提示される目標信号に一致するように操作対象を操作してもらい、様々な相互相関と遅延時間の組み合わせに対して、印象を官能評価してもらった。道具操作において操作者の安心感を考慮することは非常に重要であるため、自己主体感と合わせて操作をしているときの安心感も評価した。実験の結果、相互相関と遅延時間の変化は自己主体感に有意な効果があることが明らかになった。また、強い自己主体感を得るためには相互相関係数は高く、遅延時間は短くする必要があると考えられ、この結果はフォワードモデルの妥当性を示している。最後に、自己主体感と安心感には強い相関があることが示唆された。強い自己主体感は強い安心感につながるため、道具インタフェース開発においてノイズと遅延を除去することの重要性が明らかになった。

相互相関の変化が自己主体感に有意な効果があるという結果は、Farrerら [8]の研究結果とは異なっていたと捉えることもできる。今後の課題として、Farrerの実験様式に従って連続的な入出力における相互相関の変化に対する自己主体感の変化を検証する必要があるかもしれない。ある相互相関係数以上では自己主体感に有意な効果はないという、Farrerらと類似の結果が得られることも考えられる。また、入出力の方法において力覚を導入することも予定している。本研究では押し引きによる位置変化を入力としているが、位置を変化させずに押し引き動作の力自体を入力とする。また、何らかの入力に対して、押される、引っ張られるなどの力を出力信号として提示する。入力動作の種類や、出力信号を受け取る感覚器官の種類を増やした上で、様々な要因に対する自己主体感の変化を検証していきたい。

一言で道具といってもその形状、用途は多様である。家庭で使われる安価な道具と宇宙ロケットでは相互相関係数的に同じノイズでもその意味は大きく異なる。一步間違えれば生命の危機に直結するような道具の設計には細心の注意が払われるべきである。そのため、道具それぞれの特性を考慮したインタフェース開発が必要となる。本研究がその手助けになることを期待する。

謝辞

本研究を進めるにあたって、日頃から多大な御尽力を頂き、ご指導を賜りました名古屋工業大学、舟橋健司 准教授、伊藤宏隆 助教 に心から感謝致します。また、本研究は株式会社 本田技術研究所との共同研究の一部であり、研究の機会を与えてくださった本田技術研究所の谷田公二 様, 八代勝也 様, 皆様に深く感謝致します。

最後に、本研究に多大な御協力頂きました舟橋研究室諸氏に心から感謝致します。

参考文献

- [1] K.P. Oakley, “Man the Tool-Maker”, *Proceedings of the Geologists' Association*, 55(2), 115-118, 1944.
- [2] 原田 悦子, “「使いやすさ」の認知科学 人とモノとの相互作用を考える”, 共立出版株式会社, 2003.
- [3] 浅川 智恵子, “すべての人に使いやすい「アダプティブインタフェース」への挑戦”, 電気情報通信学会誌, 90(9), 792-794, 2007.
- [4] H. McGurk, J. MacDonald, “Hearing lips and seeing voices”, *Nature*, 264, 746-748, 1976.
- [5] S. Gallagher, “Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science”, *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 14-21, 2000.
- [6] 浅井 智久, 丹野 義彦, “自己主体感における自己行為の予測と結果の関係 -行為主判別に対する学習課題を用いた検討”, 日本パーソナリティ心理学会, 16(1), 56-65, 2007.
- [7] Takahiro Kawabe, Warrick Roseboom, Shin'ya Nishida, “The sense of agency is action-effect causality perception based on cross-modal grouping”, *PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY B*, 280(1763), 2013.
- [8] C. Farrer, G. Valentin, J.M. Hupe, “The time windows of the sense of agency”, *Consciousness and Cognition*, 22(4), 1431-1441, 2013.
- [9] 教育機器編集委員会, “産業教育機器システム便覧”, 日科技連出版社, 1972.