



操作における行為効果間の 相互相関と遅延に着目した自己主体感に関する研究

A study of sense of self-agency focused on cross correlation and delay
between action and effect in operation

片岡俊樹¹⁾, 舟橋健司²⁾, 谷田公二³⁾, 八代勝也⁴⁾

1) 名古屋工業大学 (〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町, katao@center.nitech.ac.jp)

2) 名古屋工業大学 (〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町, kenji@nitech.ac.jp)

3) (株) 本田技術研究所 (〒 321-3393 栃木県芳賀郡芳賀町下高根沢 4630, koji_tanida@n.t.rd.honda.co.jp)

4) (株) 本田技術研究所 (〒 321-3393 栃木県芳賀郡芳賀町下高根沢 4630, katsuya_yashiro@n.t.rd.honda.co.jp)

概要: VR システムの構築やインタフェース開発において人間の感覚を考慮することは重要であり, また, 心理学の分野では自己主体感 (行為の起源は自身であるという感覚) に関する研究がなされている. 本研究では, 連続的な操作における行為効果間, すなわち入出力信号間の遅延時間と相互相関 (ノイズの度合い) の様々な組み合わせに対する自己主体感の変化を調査する. その上で, 操作していると感じるために許容できるノイズと遅延の度合いを検討したい.

キーワード: インタフェース, 自己主体感, 遅延, ノイズ, 相互相関

1. はじめに

人類の道具の使用は数百万年前からとされており, 道具は人類の文化や歴史と密接に関わりながら進化を続けている. そしてより複雑な道具である機械やシステムには優れたインタフェースが必要であり, 様々な研究が行われている [1]. 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, 心理学の分野では知覚に関して様々な研究がなされている. 運動に関する感覚について, Gallagher は最も基本的な自己感として身体保持感 (sense of self-ownership) と自己主体感 (sense of self-agency) の二つを挙げている [2]. 身体保持感とは, 動いているのは自分自身である, という感覚で, 自己主体感とは, 自分がその運動を引き起こしている, という感覚である. 自己主体感に関する研究は多く行われており, 例えば文献 [3][4] 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にオブジェクト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.

ところで, インタフェースの性能が原因で行為 (入力) と効果 (出力) の間にノイズや遅延が生じてしまうと操作感が損なわれることが考えられる. いわゆるユーザビリティは多角的な要素により判断されるが, インタフェースに対する自己主体感の高さはユーザの満足度に影響すると考えられる. そのためインタフェース開発や VR システムの構築において, 自己主体感を考慮したい. 近年では自己主体感について

工学的な側面からも研究がなされている [5]. しかし前述の研究では実験における行為と効果が単発的であり, どちらも連続性を伴っていない. 連続的な行為効果間の遅延時間やノイズに着目した自己主体感に関する研究はまだない. 機器のインタフェースには連続的な入出力を伴うものも多く, また VR システム上で適切な相互作用を実現するためには, 連続的な行為を受けて, それに対する効果を提示する必要がある.

そこで本研究では, 連続的な操作における行為効果間, すなわち入出力信号間の遅延時間と相互相関 (ノイズの度合い) の様々な組み合わせに対する自己主体感の変化を調査する. 相互相関は, 入力信号に対する出力信号におけるノイズの度合いを相互相関係数により表現する. 前述の研究の実験では単発的な入出力に対して遅延のみを考慮していた. そこで, まず遅延のない状況で連続的な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, という仮説をたて, これを検証する. 続いて, 相互相関と遅延時間の変化と自己主体感の関係を調べる. 操作していると感じるために許容できるノイズと遅延の度合いを検討することで, VR システムやインタフェースの精度や性能の妥協点を見出すことができると期待する. ところで道具や機械の操作にはリスクを伴うものもある. 操作感の良いものは安心感 (sense of security) も得られると考えられる. そのため自己主体感に加えて, 相互相関と遅延時間の変化に伴う安心感の変化についても調査する.

以下, 2 章では連続信号における相互相関と自己主体感の

関係について、3章では相互相関および遅延と自己主体感の関係について、それぞれ実験とその結果、考察を述べる。

2. 実験 1：連続信号の相互相関と自己主体感

人間は、自身の行為による実際の結果が予想と合致するときに、自己主体感を得られると考えられている [6]。ノイズや遅延がなければ予想が容易である。そこでまず、遅延のない状態で、連続的な行為効果間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。そのために、次のような実験を行う。被験者の操作入力に対して複数の感覚刺激出力を同時に提示する。出力のうち入力と同期している、すなわち相互相関が強い出力（操作対象）は一つのみで、残りはすべて入力に対して無関係、すなわち相互相関が弱い出力（非操作対象）である。被験者には、自分が操作していると思うものを回答してもらう。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。

2.1 実験参加者

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、本実験は名古屋工業大学、および本田技術研究所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 相互相関係数

相互相関係数を式 (1) により求める。

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

X と Y が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。 $C_{XY}(\tau)$ のうち値の最大のものをその信号間の相互相関係数とする。なお入出力信号が同一の信号であるとき、相互相関係数が 1 となるように値を正規化している。

2.3 実験システム

被験者は三次元力覚入出力デバイス Phantom を操作する (図 1)。Phantom はペンを持つように操作することで、その

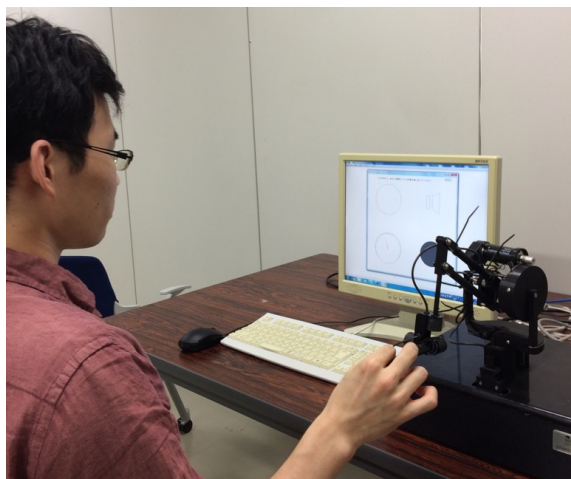


図 1: 実験の様子

三次元座標やペンの角度などを得ることができる。実験は、ストローク操作（ペンを前後に動かす動作）とツイスト操作（ペンをねじる動作）の 2 通りの操作方法で行う。ペンはストローク操作の場合は上下左右に、ツイスト操作の場合は上下左右に加え前後にも動かないように拘束してある。なお、力覚を伴う操作方法での実験も行ったが、分析が進んでいないため本稿では記述を省略する。

被験者に提示する感覚刺激は、視覚刺激と聴覚刺激により構成する。視覚刺激は、解像度 1280×1024 の 17 インチ液晶ディスプレイで提示する。視覚刺激は、入力により指示値が変化する線形ゲージと円形ゲージ (図 2)、全体の見た目が変化する大きさの変わる円と明るさの変わる円 (図 3)、および一桁の 7 セグメント風アラビア数字の計 5 種類とする。聴覚刺激は、周波数の変化する音と音量の変化する音の 2 種類とし、スピーカにより提示する。聴覚刺激の提示がある場合は画面にスピーカマークを表示する。なお前述に同じく、力覚刺激の提示実験も行ったが分析が進んでいないため、本稿では除外して記述する。実験では、試行ごとに全 7 種類の感覚刺激のうちの 4 種類を提示する。ただし 2 種類の聴覚刺激が同時に提示されることはない。

操作対象は入力信号に完全に同期する、すなわち操作対象の入力信号との相互相関係数は 1 である。他の非操作対象は恣意的に設定した挙動を提示することでランダムな変動とする。これらの挙動は、振幅 1 (入力値の範囲に同じ)、周波数 2π 秒の正弦波を入力信号と想定して求めた相互相関係数が 0.3 程度で弱い相関となるように設定する。

2.4 実験手続き

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。また、被験者には事前に以下の情報を伝える。

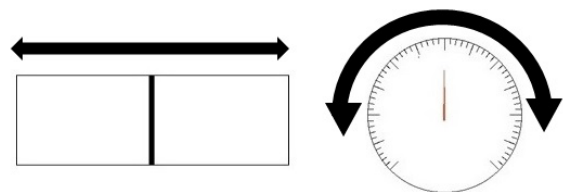


図 2: 線形ゲージ, 円形ゲージ

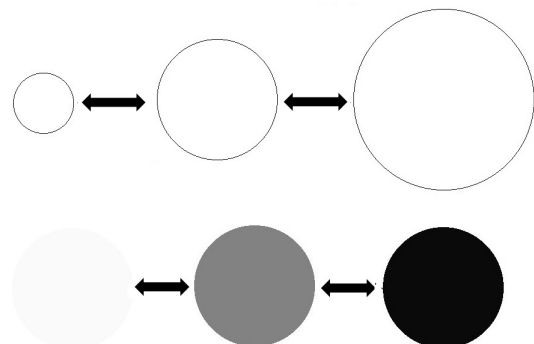


図 3: 大きさの変わる円, 明るさの変わる円

- 実験を開始すると視覚的, 聴覚的, もしくは力覚的な出力が 4 つ提示される.
- Phantom の操作で 4 つの出力はそれぞれ変化するが, 操作対象は唯一つで, 残りはランダムに変化している.
- 課題は, 操作対象を見つけ出すことである.
- 制限時間はない

被験者は Phantom を操作し, 操作対象が判明次第, 操作を中断し操作対象を回答する. 被験者には回答の正誤は告げず, 入力方法および提示する感覚刺激を変更し, 続けて試行する. 入力方法と操作対象となる出力の組み合わせは, $2 \times 7 = 14$ 通りである. 1 通りにつき 14 回試行したいため, 合計 196 回試行する. 試行は被験者全員にランダムかつ均等に割り当てる.

2.5 実験結果と考察

被験者は各試行に対して 10 秒程度で回答できた. 入力動作と操作対象である出力の各組み合わせにおける正答率は, ほぼ 100 % と高い結果が得られた. すなわち, 行為効果間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. また, 入力動作と操作対象の組み合わせとその正答率には, 有意水準 5 % で有意な差が見られなかった. すなわち, 自己主体感の強さは操作の形態, 対象の表示形態によらないといえる. 特に, より高次の脳内情報処理が必要である数字という概念についても同様に, 行為との相互相関関係により概念を操作しているという主体感を得られたと言える.

なお, 誤答の一つに着目し, そのときの操作入力と被験者が操作対象として選択した出力の相互相関を調べたところ, 10 秒程度の間, 値は偶然的に 0.947 と強い相関が見られた. 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考えられ, この結果は仮説を支持するものであった.

3. 実験 2: 相互相関および遅延と自己主体感

実験 1 では行為効果間の相互相関が強い場合に自己主体感が強くなる, という仮説が実証された. そこで実験 2 では, 相互相関と遅延時間それぞれの変化が自己主体感に与える影響を検証する. 被験者には提示される目標信号の動きに一致するように操作対象を操作してもらおう. 操作対象はノイズや遅延の影響を受け, 操作入力とは完全には一致しない. 様々な相互相関と遅延時間の組み合わせに対して, 被験者に操作時の自己主体感と安心感について主観評価してもらおう. なお, 実験参加者は実験 1 と同様の参加者である.

3.1 実験システム

図 4 のような線形ゲージを画面に提示する. 被験者は Phantom を用いたツイスト操作により, 出力信号を操作する. 出力信号は -1 から 1 までの範囲で変動するものとし, バーは 0.1 の幅で表示している. 目標信号は, ノイズと遅延の影響を受けていない場合に出力信号を容易に一致させることができるように, -0.8 から 0.8 までの範囲でゆっくりと滑らかに変化する. 出力信号が目標信号から大きく離れ

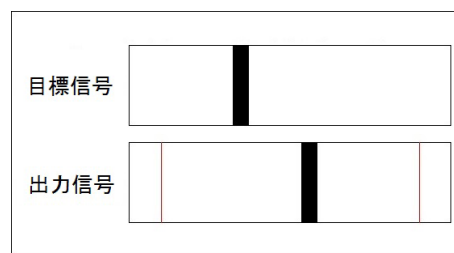


図 4: 実験 2 の例

る, もしくは左右の赤線 (出力信号の値が -0.8 と 0.8 の位置) より外に位置している場合, 電子音を出力するとともにバーを赤色で表示する. これは, リスクを伴う操作を想定している. 出力信号が影響を受ける遅延を, $0, 0.2, 0.4, 0.6$ 秒の 4 段階とする. ノイズは, 1 周期毎に周期と振幅がランダムに変化する正弦波を入力信号に加算することで表現する. 前節同様に正弦波入力に対して, $1.00, 0.98, 0.96, 0.94, 0.92$ の 5 段階の相互相関係数となるランダムな変化の範囲を経験的に決定することでノイズを設定する.

3.2 実験手続き

第一の実験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.

- 目標信号はランダムに動くのに対して, 出力信号は Phantom の操作入力で動く.
- 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.
- 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.
- 出力信号が目標信号から大きく離れる, もしくは赤線より外側に出てしまうと電子音が鳴る.
- 1 試行あたり 30 秒間操作し, その後 10 秒間でアンケートに回答する.

被験者が回答するのは操作感 (自己主体感) と安心感の 2 項目であり, それぞれ 5 段階で主観評価する. 自己主体感という言葉に馴染みがないことを考慮し, 自分で操作ができていのかどうか操作感について回答するように指示する. 前試行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, 遅延時間 0 秒かつ相互相関 1.00 の状態と, 遅延時間 1.0 秒かつ相互相関 0.80 の状態をそれぞれ体験してもらい, これを基に回答してもらおう. 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. 試行は被験者全員にランダムかつ均等に割り当てる.

3.3 実験結果と考察

自己主体感, 安心感が最も得られたときを 5 点, 最も得られなかったときを 1 点とする. 図 5, 6 に相互相関と遅延時間の各組合せでの自己主体感, 安心感の評価の平均値をそれぞれ示す. 分散分析の結果, 相互相関係数, 遅延時間の変化はともに, 有意水準 1 % で自己主体感に有意な影響があると言えた. また, 安心感についても同様に, 有意水準 1 % で有意な影響があると言えた. 相互相関係数 C および遅延時

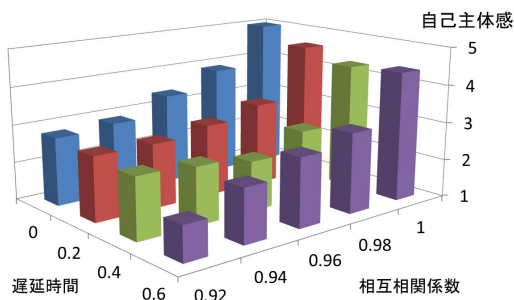


図 5: 自己主体感の評価の平均値

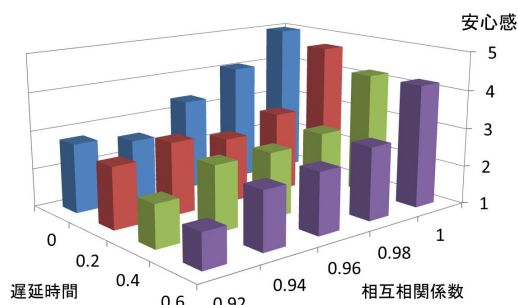


図 6: 安心感の評価の平均値

間 D から自己主体感, 安心感の評価値を得る重回帰式はそれぞれ式 (2), 式 (3) となった. 重相関係数は自己主体感が 0.63, 安心感が 0.65 でともに中程度の相関があると言えた. このことから, 相互相関係数と遅延時間から自己主体感, 安心感の度合いを予測できる可能性が示唆された.

$$\text{自己主体感} = 23.88 \times C - 1.18 \times D - 19.41 \quad (2)$$

$$\text{安心感} = 24.63 \times C - 1.28 \times D - 20.13 \quad (3)$$

式 (2),(3) から, 強い自己主体感を得るためには相互相関を強く, 遅延時間を短くする必要があることが示唆された. この結果は, 実験 1 の仮説の妥当性を示している.

次に, 自己主体感と安心感の関係について検討する. 自己主体感と安心感の単相関係数は 0.83 で強い相関があった. また, 無相関検定を行ったところ, 有意水準 1% で相関がないとは言えなかった. 相互相関係数, 遅延時間の同組み合わせにおける自己主体感と安心感の値の散布図を図 7 に示す. 直線は最小二乗法により線形近似したものであり, 自己主体感と安心感は比例関係にあることが明らかになった.

4. むすび

本研究では, 連続的な行為効果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変化を検証した. 実験 1 では, 行為効果間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. 被験者の操作入力に対して, 相関が強い出力と相関が弱い出力を同時に提示し, 操作対象であると思うものを回答してもらった. その結果, 被験者は相互相関が強い出力を操作対象に選択することができ, 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

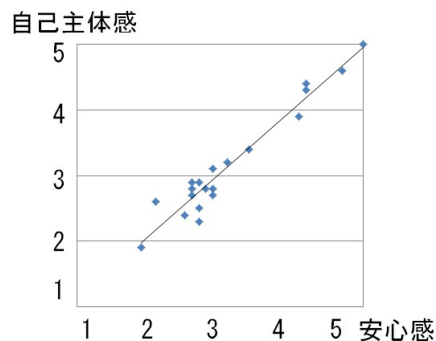


図 7: 自己主体感と安心感の散布図

己主体感と安心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, 印象を主観評価してもらった. 実験の結果, 相互相関および遅延は自己主体感, 安心感の両方に有意な影響があると言えた. また, 重回帰分析の結果, 相互相関係数および遅延時間から自己主体感を予測できる可能性が示唆された. 今後は, まず力覚を伴う操作についても分析を進めたい. さらに入力動作の種類や出力信号の形態やそれ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たい. また, VR システムやインタフェースの開発における有効な知見を見出したい.

謝辞 研究を進めるにあたり, 有益な議論を頂いた名古屋工業大学舟橋研究室諸氏に感謝する.

参考文献

- [1] 浅川 悦子: 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, 電子情報通信学会誌, Vol. 90, No. 9, pp. 792-794, 2007.
- [2] S. Gallagher: Philosophical conceptions of the self : implications for cognitive science, Trends in Cognitive Sciences, Vol. 4, No. 1, pp. 14-21, 2000.
- [3] 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, Vol. 16, No. 1, pp. 56-65, 2007.
- [4] C. Farrer, G. Valentin, J.M. Hupe: The time windows of the sense of agency, Consciousness and Cognition, Vol. 22, No. 4, pp. 1431-1441, 2013.
- [5] 蓑原 凜, 温 文, 濱崎 峻資, 前田 貴記, 加藤 元一郎, 山川 博司, 山下 淳, 浅間 一: スイッチ操作力の差異が運動主体感に与える影響の評価, 第 20 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp. 139-144, 2015.
- [6] S.J. Blakemore, D.M. Wolpert, C.D. Frith: Abnormalities in the awareness of action, Trends in Cognitive Science, Vol. 6, No. 6, pp. 237-242, 2002.