

平成 29 年度 修士論文

操作にともなう自己主体感の  
操作系に対する外的要因による影響に関する調査

A Study of Influence of External Factors to Sense of  
Self-Agency Accompanied by Operation

指導教員  
舟橋 健司 准教授

名古屋工業大学大学院 工学研究科 情報工学専攻  
平成 28 年度入学 28414029 番

片岡 俊樹

# 目次

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	自己主体感に関する先行研究	5
2.1	実験 1：連続信号の相互相関と自己主体感	5
2.1.1	実験システム	6
2.1.2	実験手続き	8
2.1.3	実験結果と考察	9
2.2	実験 2-1：単入出力操作における相互相関および遅延と自己主体感	10
2.2.1	実験システム	10
2.2.2	実験手続き	11
2.2.3	実験結果と考察	12
第 3 章	実験 2-2：自動車操作における相互相関および遅延と自己主体感	14
3.1	実験システム	14
3.1.1	入力装置と入力方法	14
3.1.2	提示画面	15
3.1.3	操作対象の挙動	16
3.1.4	相互相関係数と遅延時間	19
3.1.5	先行車の挙動	21
3.2	実験手続き	21
3.3	実験結果と考察	22
第 4 章	実験 3-1：単入出力操作における能動的操作支援と自己主体感	26
4.1	実験システム	26
4.1.1	相互相関係数と遅延時間	27
4.1.2	能動的操作支援	28
4.2	実験手続き	30
4.3	実験結果と考察	30
第 5 章	実験 3-2：自動車操作における能動的操作支援と自己主体感	34
5.1	実験システム	34
5.1.1	相互相関係数と遅延時間	34
5.1.2	能動的操作支援	35
5.2	実験手続き	39
5.3	実験結果と考察	39

第 6 章 実験 4：自動車操作に付随する音と自己主体感	44
6.1 実験システム	45
6.1.1 操作に付随する音	45
6.2 実験手続き	46
6.3 実験結果と考察	47
第 7 章 むすび	51
謝辞	52
参考文献	53
発表論文リスト	55

## 第1章 はじめに

認知科学の分野では自己の認識についての研究が行われており, 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) の概念を提唱した [1]. 身体保持感は動いているのは自身の身体であるという感覚で, 自己主体感はその行為を引き起こしたのは自身であるという感覚である. 身体保持感と自己主体感は, 自身の意図的な運動が関与するかどうかという点で異なる. 身体保持感は無意図的な運動にも伴って生起される. 例えば何かが自身の身体を動かしたとき, 動かされたのは自身の身体であるという感覚はあるが (身体保持感が生起するが), 身体を動かしたのは自身であるという感覚は生じない (自己主体感が生起しない). 一方, 自己主体感は自身の意図的な運動に起因する. すなわち自身が意思をもって何らかの行為を引き起こしたとき, 確かにその行為は自身によって引き起こされたと感じ, 自己主体感が生まれる. ヒトの自己主体感の発達過程はいまだ議論の余地があるが, ヒトは乳児期には自己主体感を感じ始めることが示唆されている [2]. しかしながら統合失調症の自我意識障害の一つに自己の意識と運動の関連付けができない作為体験という症状がある. 作為体験とは自身の行動の起源が自身ではなく他者にあり, 自身は他者に操られていると感じる体験であり, Schneider は作為体験を統合失調症の診断上, 最も重要な症状の一つである第一級症状であるとした [3]. 自己主体感は作為体験の症状に大きく関わると考えられており, 認知科学の分野では自己主体感の観点から自我障害についての検討が進められている [4].

ところで, ヒューマンインタフェースの分野でも認知科学の知見を考慮したインタフェース設計が必要であるという意見が高まっている [5]. インタフェースを認知科学的側面から評価する手法が数多く提案されており, Norman はヒトのインタフェース行為を目標実現行動として捉えた「ユーザ行為の7段階モデル」を提唱し, ユーザと

システムの間で行われる心理的もしくは物理的やり取りの中での問題箇所の特定を可能とした [6]. さらに Norman はユーザ行為の7段階モデルにおけるユーザとシステム間の隔たりを強調したユーザ中心のデザインモデル (UCSD モデル; user-centered system design) を考え, よいインタフェースとはユーザの心理世界とシステムの物理世界に生じる溝が少ないインタフェースであると考えた. インタフェースにおけるユーザビリティはユーザやシステムを取り巻く世界における様々な要素により評価される. そして近年は, 自己主体感の高さもユーザの満足度に関係すると考えられ, すなわちユーザビリティを評価するうえで重要な要素であると考えられ, インタフェース設計に関する分野でも自己主体感が注目されている [7].

自己主体感は, 自身の行為による実際の結果が結果の予想と合致するときに生じると考えられている [8]. インタフェースの性能が原因で行為 (入力) とそれにより生じる効果 (出力) の間にノイズや遅延が生じることがあり, その場合は結果の予想と実際の結果に差異が生じて自己主体感が減少することが考えられる. インタフェース分野における自己主体感に関する研究は遅延に着目したものが多く, それらの研究では遅延が自己主体感に有意な影響を与えることが示唆されている [9]. しかしながらインタフェースに生じるノイズに着目した自己主体感に関する研究はない. 当研究室ではインタフェースにおけるノイズの大きさを入出力間の相互相関係数により表現し, それと自己主体感の関係について調査した [10, 11]. その結果, 人間は入力と出力との相互相関が強い場合, すなわちノイズが小さい場合に自己主体感を強く感じることを示唆された. 文献 [10, 11] では, 1つの入力に1つの出力が対応する (以降, 単入出力と表記する) 状況を想定しているが, インタフェースの中には, 複数の入力と複数の出力で構成される (以降, 多入出力と表記する) インタフェースも数多く存在する. そこで本研究では第一に, 多入出力インタフェースとして身近な自動車操作を対象にノイズと遅延が自己主体感に与える影響を調査する [12]. また自動車のような操作にリスクを伴うインタフェースでは操作時の安心感 (sense of security) もインタフェースを評価するうえで重要な要素であると考え, 自己主体感とともに調査する.

一方で, 近年は自動車工学分野を中心にユーザの操作を支援するシステムが備えられたインタフェースが提案されている. ここでは操作支援システムをその性質から

以下のように分類してみる。

1. 受動的操作支援: 人が操作したうえでそれを受けてその操作を支援する。
2. 操作時判断支援: システムが判断し, 人に通知することで人の最終的な判断と必要な操作を促す。
3. 能動的操作支援: 人の操作の有無に関わらずシステムが判断し, 能動的に操作する。

受動的操作支援の例としてパワーステアリングが挙げられる。パワーステアリングは運転者のステアリング操作時に必要な力を補う機構であり, 運転者はこれにより軽い力で自動車の操舵ができるようになる。操作時判断支援には車線逸脱警報が該当する。車線逸脱警報はカメラなどのセンサーが車線を認識し車線逸脱を検知すると音や画像により運転者に知らせる機能である。また能動的操作支援には積極的に車線維持を行うタイプのレーンキープアシストが該当する。レーンキープアシストはシステムが状況を判断しステアリングに適切なトルクを発生させることでステアリング制御を行う機能である。自動車における操作の一部の自動化は運転の安全性や効率の向上が期待できるが, 運転者が機能を過信することで本来は操作者自身が行うべき操作が適切に行なわれないことも危惧される。この問題の回避のためには, 運転者が, 自身が操縦しているというユーザエクスペリエンス, すなわち自己主体感を感じる必要があると考える。能動的操作支援はユーザの意思に関わらずシステムの判断により操作されてしまうため, 自己主体感に大きく影響を与えられられるが, 能動的操作支援と自己主体感の関係について検討した例は見られない。そこで本研究では第二に, 能動的操作支援が自己主体感にどのような影響を与えるのかを調査する [13]。まず, 単入出力インタフェースの操作を対象として実験を行い, その後, 多入出力インタフェースの一つである自動車の操作を対象として実験を行う。操作の正確さ (3章で述べる) と自己主体感, 安心感のそれぞれの変化や関係を検証することで自己主体感や安心感の観点から操作支援について考察したい。

ところで自動車の技術革新とハイブリッド車や電気自動車の普及に伴って自動車の静音化も進んでいる。自動車の静音化により, 運転者のストレス緩和や騒音による公害の予防を期待できるが, 一方で歩行者が周囲の自動車を認識しづらいといった

交通安全上の問題点がある。この問題に対して数多くの検討がなされており、例えば国土交通省は「ハイブリッド車等の静音性に関する対策のガイドライン」を定め、自動車メーカーに対策を促している [14]。また金らは静音化が交通安全性や安心感を低下させるのではないかという問題意識のもとに検討を行った [15]。静音化に対する検討は主に交通安全性の観点からなされているが、運転者の自己主体感に着目したものは見られない。操作時の静音化も操作支援の場合と同様に、自身が操縦しているという自己主体感が変化することも考えられ、検証の必要があると考えた。そこで本研究ではノイズや遅延、能動的操作支援が自己主体感や安心感に与える影響に加えて、インタフェースの操作に付随する音（今回の場合は自動車操作時のエンジン音）が自己主体感や安心感に与える影響も検討する。本研究により、自動車に限らず、音を発するシステム全般の開発や設計に関する有意義な知見が得られることが期待できる。

以下、第2章で当研究室でこれまでに行った自己主体感に関する研究について、第3章で多入出力インタフェースにおけるノイズと遅延に着目した実験について、第4章、第5章でそれぞれ単入出力インタフェースと多入出力インタフェースにおける能動的操作支援に着目した実験について、第6章で操作に付随する音に着目した実験について述べる。そして第7章では本研究のまとめと今後の課題について述べる。

## 第2章 自己主体感に関する先行研究

本章では、本研究に至るまでに当研究室で行った自己主体感に関する研究について述べる。詳しくは文献 [10], [11] を参照されたい。

### 2.1 実験1：連続信号の相互相関と自己主体感

インタフェース分野における自己主体感に関する研究の多くは、ボタンを押したら画面にオブジェクトが表示されるといった単発的な入出力インタフェースを対象としている。すなわち、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。インタフェースの中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。そこで入出力間のノイズの大きさを入出力信号間の相互相関係数  $C$  により表現し、連続的な入出力信号間の相互相関係数および遅延と自己主体感の関係を調査する。本実験に用いる相互相関係数は式 2.1 により求める。

$$C = \max_{\tau} \frac{\sum_{t=0}^T \{X(t)Y(t+\tau)\}}{\|X(t)\| \|Y(t)\|} \quad (2.1)$$

ここで  $X(t)$  と  $Y(t)$  は時刻  $t$  ( $0 \leq t \leq T$ ) に対する連続信号であり、相互相関係数を求める2つの信号である (すなわち入力信号と出力信号)。また  $\tau$  は2つの信号間の時間差を表す。様々な  $\tau$  に対して最も値が大きい  $C$  を2信号間の相互相関係数とする。式全体を信号  $X(t)$  と  $Y(t)$  の大きさ  $\|X(t)\|$  と  $\|Y(t)\|$  で割ることで、2つの信号が同一の信号である場合  $C = 1$  となるように値を正規化している。

ノイズや遅延がなければ比較的正確な操作が期待できるため、実際の結果と結果の予想の差異は小さくなり、自己主体感を強く感じると考えられる。そこで、まず遅延のない状況で入出力信号間の相互相関が強い場合に自己主体感が強くなる、という仮説を検証する。



### 2.1.1 実験システム

被験者は3次元力覚入出力デバイス Phantom Premium (以降, Phantom) を操作する [16]. Phantom は, スタイラス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を出力することができる. 実験は, 前後方向の移動による位置入力 (ストローク入力) とスタイラスをねじることによるねじり角入力 (ツイスト入力), 前方向に押すことによる力の入力 (プッシュ入力) の3通りの入力方法で行う (図 2.1). 前方向に押す力による入力は, 前方向にペンを押したときに押し込んだ距離に比例して大きくなる力を押し返す方向に提示し, その力の大きさを入力とすることで表現する. なお各入力を行う際には他の入力ができないようにスタイラスの動きを制限する. 例えばストローク入力であれば左右上下に移動できないように拘束する. 出力はディスプレイからの視覚刺激とスピーカからの聴覚刺激, Phantom からの触覚刺激により構成する. 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, 大きさが変化する円

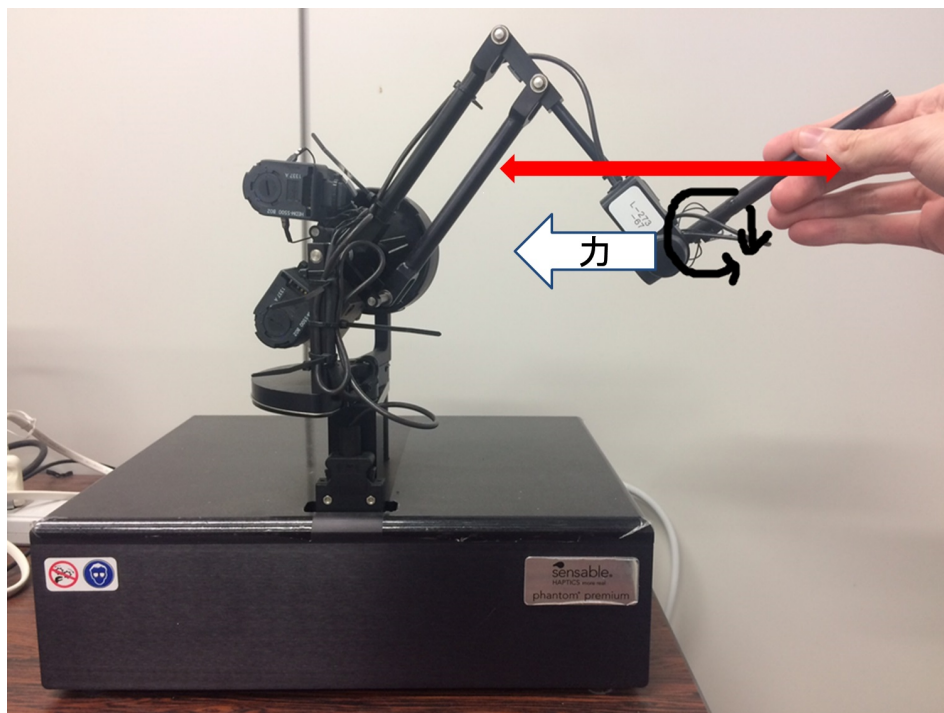


図 2.1: Phantom と入力方法

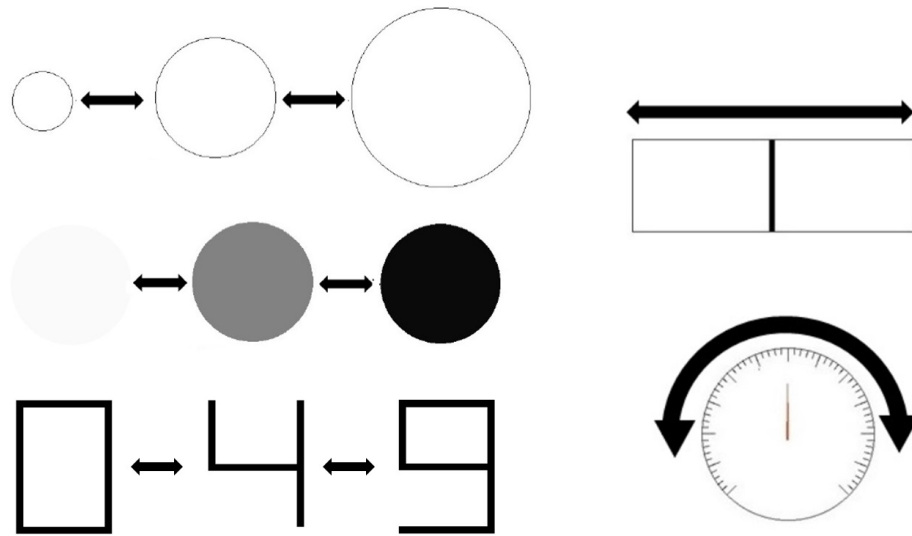


図 2.2: 各視覚刺激の変化

と明るさが変化する円, および一桁の7セグメント風アラビア数字の5種類とする. その変化の仕方を図 2.2 に示す. 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種類とする. 触覚刺激は, 前後方向の力とし, その大きさを変化させる. 実験では, 図 2.3 のように試行毎に全8種類の感覚刺激のうち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く, プッシュ入力に対して触覚刺激の出力が提示されることはない. また聴覚刺激の提示があるときはスピーカのピクトグラム, 触覚刺激の提示がある場合はペンを握るようなピクトグラムをそれぞれディスプレイ上に表示する (図 2.3 右上, 左上). 4種類の感覚刺激のうち, ランダムに選ばれた1つは, 被験者の入力に同期して変化する (すなわち, 入出力信号間の相互相関係数が1.00). 3つの出力は入力信号と非同期となるように, あらかじめ用意された関数に従って変化させる. 代表的な入力として, 振幅1 (入力値の範囲に同じ), 周期 $\pi$ 秒の正弦波を入力信号と想定し, この関数による非同期出力との相互相関係数を求めたところ, 値は0.3程度で弱い相関であることを確認している.

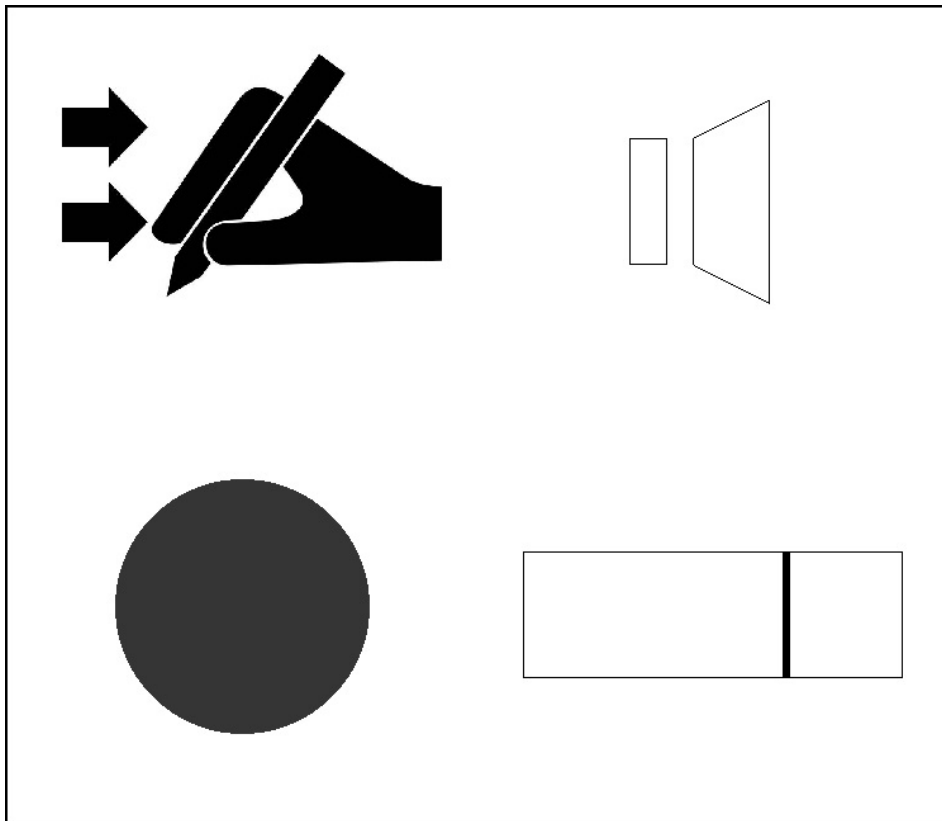


図 2.3: ディスプレイの表示例

### 2.1.2 実験手続き

被験者は大学生および大学院生 20 名である。被験者には 4 つの出力のうち自分が操作している対象を見つけてもらう。試行には制限時間は設けず、操作対象が判明次第操作を終了し口頭で回答してもらう。被験者には回答の正誤は告げず、続けて試行する。すべての入力方法に対してすべての感覚刺激が均等に操作対象に選ばれることとする。入力方法は 3 通りで、操作対象となる出力は 8 通りである。そのうちプッシュ入力に対する触覚刺激の出力が提示されることはないため、組み合わせは、 $3 \times 8 - 1 = 23$  通りである。1 つの組み合わせにつき 14 回試行したいため、合計 322 回試行する。試行は被験者全員にランダムに割り当てる。

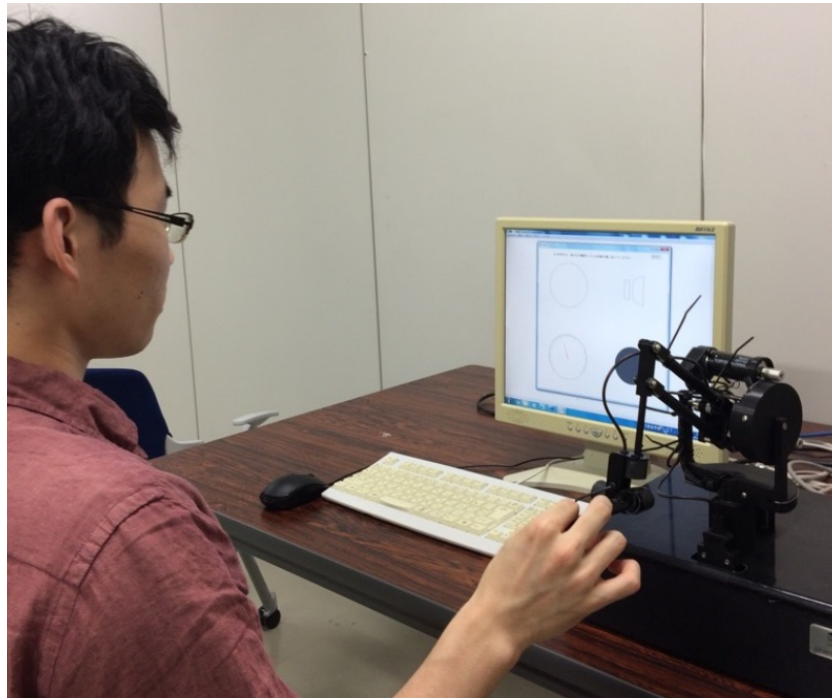


図 2.4: 実験の様子

### 2.1.3 実験結果と考察

図 2.4 に実験の様子を示す。回答にかかった時間は 1 試行につき概ね 15 秒程度であった。入力動作と操作対象に選ばれた感覚刺激の全組み合わせにおける正答率はほぼ 100 % であった。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に選ばれた感覚刺激の組み合わせによって正答率に差はないと言えた ( $\chi^2(22) = 21.23, p > 0.05$ )。すなわち、自己主体感の強さは操作の形態、対象の表示形態に依らないと言えた。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た。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 0.95 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。

## 2.2 実験 2-1：単入出力操作における相互相関および遅延と自己主体感

前節では、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。そこで次に単入出力インタフェースを対象としてノイズと遅延が自己主体感に与える影響を検討する。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。入出力信号間にノイズや遅延を加えるため、操作対象の動きは入力と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、被験者に印象を官能評価してもらう。評価は自己主体感と安心感について行ってもらおう。

### 2.2.1 実験システム

入力装置には Phantom を用いる。入力方法はツイスト入力とする。図 2.5 のような 2 つの線形ゲージを画面に表示する。2 つの線形ゲージのうち上側に表示しているものを目標信号、下側のものを出力信号とする。どちらの信号もバーは枠の幅を 2 として 0.1 の幅で表示している。出力信号は操作対象であり、被験者のツイスト入力により -1.0 から 1.0 までの範囲で変動するものとする (すなわち枠の左右方向の中央が 0 である)。出力信号が左右の赤線 (値が -0.8 と 0.8 の位置) より外側に出たとき、も

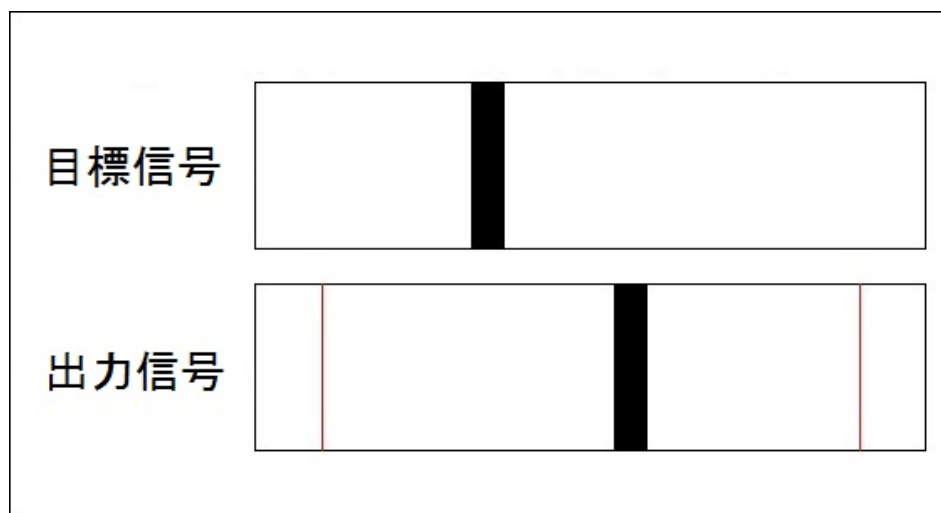


図 2.5: ディスプレイの表示例

しくは出力信号が目標信号から 0.5 以上離れたとき、バーを赤色で表示し電子音を出力する。これはリスクを伴う操作を想定している。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出力信号を操作してもらおう。目標信号は、ノイズ・遅延がないときに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、あらかじめ用意した関数に従ってゆっくりと滑らかに変動する。

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。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があり、出力がちらついて見えてしまうという問題がある。そこでノイズには正弦波を利用する。正弦波は連続的、かつ滑らかに変動するため、出力がちらつく問題を回避できる。正弦波の周期と振幅を周期ごとにランダムに変化させ入力信号に加算することでノイズを表現する。ノイズの大きさは5段階とし、入出力信号間の相互相関係数がそれぞれ 1.00, 0.98, 0.96, 0.94, 0.92 となるように設定する。実験1と同様に、代表的な入力として正弦波を想定し、それに加えるノイズである正弦波の周期と振幅の変域を変化させながら、入出力信号間の相互相関係数がそれぞれ 1.00, 0.98, 0.96, 0.94, 0.92 となるような変域を経験的に見つけ、5段階のノイズの大きさとして設定する。また遅延時間は 0 秒, 0.2 秒, 0.4 秒, 0.6 秒の 4 段階とする。

### 2.2.2 実験手続き

被験者は大学生および大学院生 20 名である。被験者には目標信号の動きに一致するように操作を 30 秒間行ってもらい、その後その操作に対して官能評価を行ってもらおう。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（最もないと感じる場合を 1 点とし、最もあると感じる場合を 5 点とする）。自己主体感という言葉に馴染みがないことを考慮し、自分が操作した感覚があるかどうか操作感について回答するように指示する。また直前の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、これを基準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つの組み合わせにつき 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に割り当てる。

### 2.2.3 実験結果と考察

図 2.6, 図 2.7 は相互相関係数と遅延時間の各組合せに対する自己主体感と安心感の評価の平均値を示している。分散分析の結果, 相互相関係数と遅延時間の変化はどちらも自己主体感に対して有意な影響があると言えた ( $F_{4,180} = 40.47 > 2.65, p < 0.05$ ,  $F_{3,180} = 7.69 > 2.42, p < 0.05$ ). また安心感も同様の結果であった ( $F_{4,180} = 40.90 > 2.65, p < 0.05$ ,  $F_{3,180} = 8.30 > 2.42, p < 0.05$ ). 相互相関係数  $C$  および遅延時間  $D$  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 2.2, 式 2.3 となった。

$$\text{自己主体感} = 23.88 \times C - 1.18 \times D - 19.41 \quad (2.2)$$

$$\text{安心感} = 24.63 \times C - 1.28 \times D - 20.13 \quad (2.3)$$

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。また強い自己主体感を得るためには入出力信号間の相互相関を強く, 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 で実証された仮説の妥当性を示している。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。

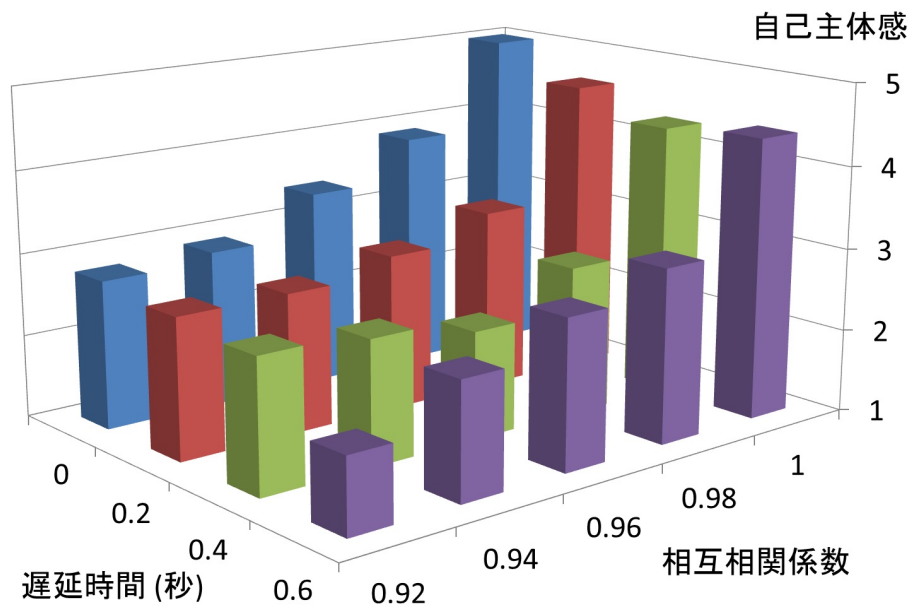


図 2.6: 自己主体感の評価の平均値

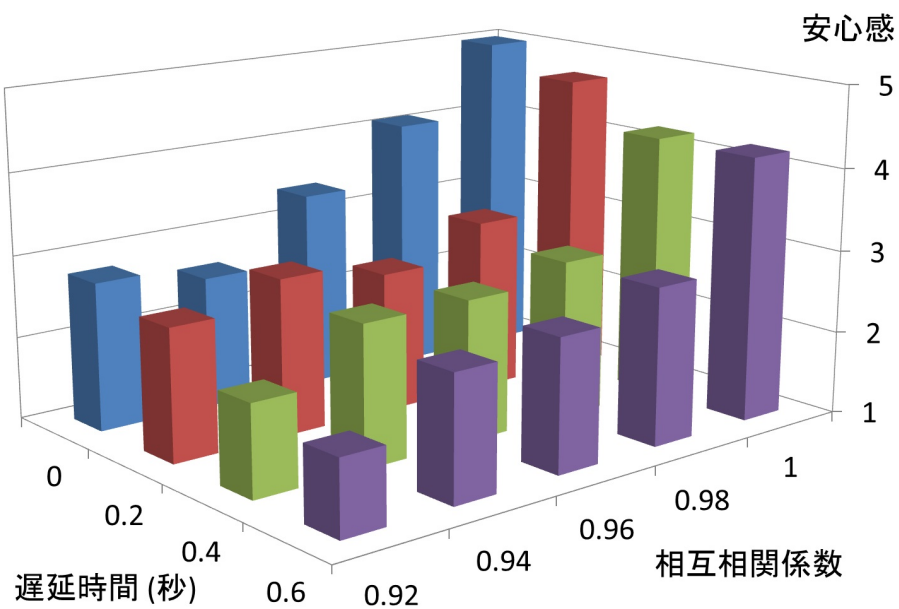


図 2.7: 安心感の評価の平均値



## 第3章 実験2-2：自動車操作における相互相関および遅延と自己主体感

先行研究(第2章)では, 単入出力インタフェースを対象としてノイズと遅延が自己主体感と安心感にどのような影響を与えるのかを調査した. 本章では, 多入出力インタフェースの一つである自動車を対象とした同様の実験について述べる. 先行研究で行った単入出力インタフェースでの実験と本章で行う多入出力インタフェースでの実験は, ともに入出力間の相互相関と遅延に着目した実験として共通であるため, 併せて実験2と表記する. また対象とするインタフェースの違いから, 単入出力インタフェースでの実験を実験2-1, 多入出力インタフェースでの実験を実験2-2とする.

### 3.1 実験システム

被験者はステアリング操作とアクセルペダル操作の2つの入力により自動車を模した挙動をとる操作対象を制御する. このとき前方を走る車(以降, 先行車)と一定の車間距離を維持しつつ, 先行車の走行軌跡に沿うように操作対象を操作してもらう. ステアリング操作による入力とアクセルペダル操作による入力のそれぞれにノイズや遅延を加える. 様々な相互相関と遅延時間の組み合わせに対して, 被験者に操作時の印象を官能評価してもらう. 評価は自己主体感と安心感について行ってもらおう.

#### 3.1.1 入力装置と入力方法

被験者はロジクール社製のステアリングコントローラ GT Force Pro [17] を操作する(図3.1). GT Force Pro は実際の自動車を運転するように操作することでステアリングの角度, アクセルペダルやブレーキペダルの踏み込み具合などを取得することができる. またステアリングに任意の力を出力することができる. 本実験では, 簡



図 3.1: GT Force Pro

単のためにステアリングとアクセルペダルの2入力のみを利用し, またステアリングの可動域は左右90度に制限する.

### 3.1.2 提示画面

図 3.2 のような画面を被験者に提示する. 単入出力実験では外枠を-1.0 から 1.0 までの 2.0 の幅で表示した上で操作対象を 0.1 の幅で表示している. 本実験ではそれに習い, 道路の幅を画面内の 3 次元空間において-1.0 から 1.0 までの 2.0 として (すなわち, 中央の白線が 0 の位置とする), 操作対象である黒色の円を半径 0.1 で描画する. なお操作対象を円としたのは, 操作対象の向きを考慮しないためである (3.1.3 項の最後に述べる). 道路前方には先行車である自動車を模したモデルを表示する. 画面内の 3 次元空間における前後方向の黒線は先行車の走行軌跡を示している. 左右方向の黒線は先行車との目標車間距離を示しており, 先行車と常に一定の距離を保ちながら移動し続ける. 目標車間距離は現在時刻から概ね 2 秒から 3 秒後に操作対象が先行車の現在位置に到達する程度の距離とした. 操作対象を走行軌跡と目標車間距離線の交点上に保持し続ける課題であるが, 実際の走行では誤差を皆無にするような運転状況はほとんどないと考えられる. そこで交点の許容範囲を拡張し, 濃淡二

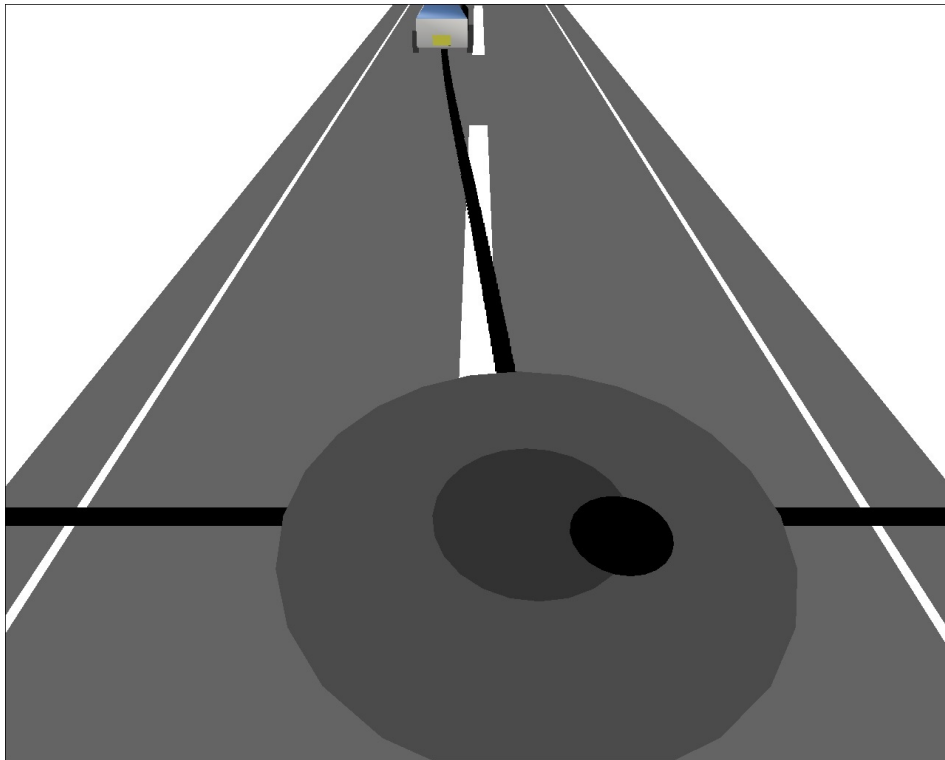


図 3.2: 提示する画面

色の灰色の円の内側に位置付け続ける課題とする。濃淡の灰色の円はそれぞれ半径 0.2, 0.5 で表示している。またリスクを伴う操作を想定し、操作対象が淡い灰色の円より外側に出る、もしくは操作対象が左右の白線 (それぞれ 0.8, -0.8 の位置) より外側に出ると背景を赤色にし、クラクションのような音を出力する。

### 3.1.3 操作対象の挙動

操作対象の挙動は実際の自動車を模した挙動とする。人は自動車を運転するとき、エンジンの回転数やタイヤの角度を直接的に意識せずに、左右方向の変位と前後方向の変位をコントロールしていると思われる。そこで、2 入力により変化する 2 つの出力は、左右方向の変位と前後方向の変位とする。ところで実際の自動車は、例えば同じ操舵角でも速度が大きくなると旋回半径がより大きくなるように、2 つの入力が左右の変位と前後の変位にそれぞれ直接的に対応しているのではなく、相互に関連している。そこで、車両を模した挙動には次に述べる車両運動方程式を用いる。

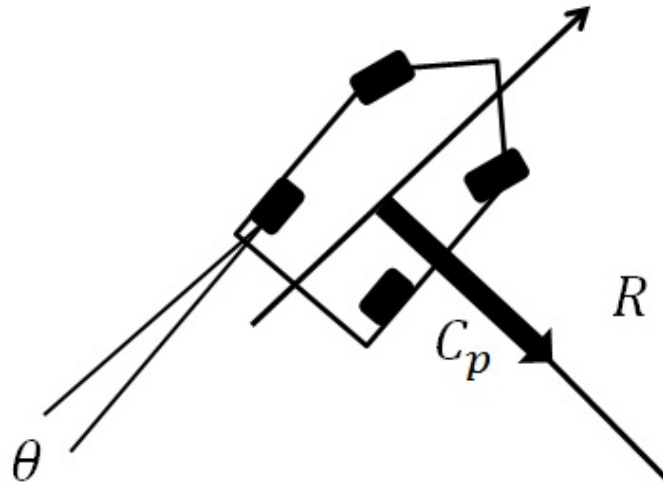


図 3.3: 車両の旋回の模式図

車両を旋回させるとき, 車両には進行方向に直交する力が生まれる. この力はコーナリングフォースと呼ばれ, 車両はコーナリングフォースを利用して旋回する. そのため車両は必ずしもタイヤの向いた方向に進むわけではなく, 旋回円に沿ってその接線方向に進む. 図 3.3 のように進行方向に対するタイヤのスリップ角を  $\theta[\text{rad}]$ , そのときの線形領域のコーナリングパワーを  $C_p[\text{N/rad}]$  とする. このとき, 旋回半径  $R[\text{m}]$ , 車速  $V[\text{m/s}]$  で質量  $m[\text{Kg}]$  の車両が旋回すると, 四輪を一輪として見立てた力のつり合いから式 3.1 が成り立つ.

$$C_p \theta = m \frac{V^2}{R} \quad (3.1)$$

コーナリングフォース  $C_p$  は速度に依存して変化するが, ここでは速度変化が大きくない実験環境を想定し, 定数  $a$  を用いて式 3.2 のようにみなした.

$$C_p = f(V) \approx aV \quad (3.2)$$

従って, 改めて定数  $A$  を定義すると, 式 3.3 が成り立つ.

$$R = m \frac{V^2}{C_p \theta} = m \frac{V^2}{aV\theta} = A \frac{V}{\theta} \quad (3.3)$$

次に, 車両の移動軌跡に着目すると, 図 3.4 のように微小時間  $\Delta t$  の間に左右方向に  $\Delta x[\text{m}]$ , 前後方向に  $\Delta z[\text{m}]$  だけ移動するとして式 3.4, 3.5 が成り立つ.

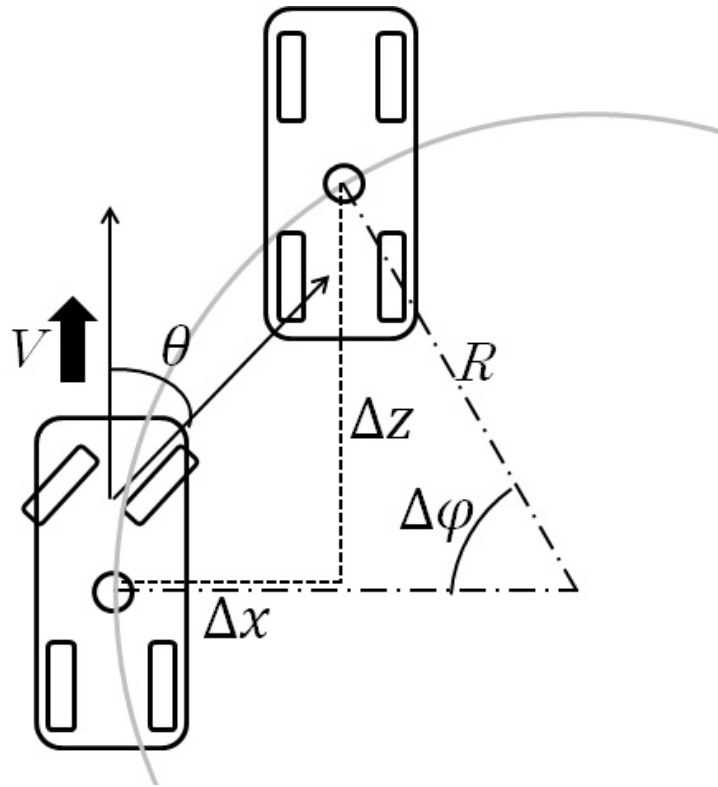


図 3.4: 車両の左右方向と前後方向の移動軌跡

$$\Delta x = R (1 - \cos \Delta \varphi) \quad (3.4)$$

$$\Delta z = R \sin \Delta \varphi \quad (3.5)$$

ここで,  $\Delta \varphi$  は旋回軌跡上の進行角度である. 微小時間での移動を直線とみなすと  $\Delta \varphi$  は式 3.6 で表すことができる.

$$\Delta \varphi = \frac{V}{R} \Delta t \quad (3.6)$$

以上から, 出力である左右方向の変位  $\Delta x$ , 前後方向の変位  $\Delta z$  は改めて式 3.7, 3.8 で表される.

$$\Delta x = A \frac{V}{\theta} (1 - \cos \frac{\theta}{A} \Delta t) \quad (3.7)$$

$$\Delta z = A \frac{V}{\theta} \sin \frac{\theta}{A} \Delta t \quad (3.8)$$

そこで操作対象は式 3.7, 3.8 に従って移動させる. 本実験では簡単のため, ステアリングから得られる入力値をスリップ角  $\theta$  とし, アクセルペダルから得られる入力値を

車速  $V$  とする。また定数  $A$  は経験的に設定する。なお、操作対象が停止することは考えないため、アクセルペダルを踏んでいない場合でも車速は0にならず、常に前方を向きつつ前方に進み続ける。そのため被験者に操作対象の向きを意識させないように操作対象は自動車を模したモデルではなく平面的な円で表示する。

### 3.1.4 相互相関係数と遅延時間

実験では  $\theta$ ,  $V$  のそれぞれの値にノイズと遅延を加え、その値で算出された  $\Delta x$ ,  $\Delta z$  の値に基づいて操作対象を移動させる。ノイズの大きさは入出力信号間の相互相関係数の大きさで表現する。相互相関係数の算出には式 2.1 を用いる。先行研究では、ノイズとして正弦波を用いたが、正弦波はその性質上、予測が可能でありノイズには適していないとも言える。そこで本実験ではノイズとしてパーリンノイズを用いる。パーリンノイズは主にコンピュータグラフィックスの分野で使われるテクスチャ作成技法である。1次元的なパーリンノイズは滑らかにかつ連続的に変動し、さらに予測できないため、本実験で用いるノイズとして適切である。パーリンノイズは図 3.5 のようにランダムに生成した制御点毎に設定された勾配に従って制御点間を補間することで得られる。各制御点の高さと勾配、制御点間の距離の3つパラメータの変域を調整することで様々なノイズを生成する。単入出力実験は5段階の相互相関係数と4段階の遅延時間を組み合わせて行った。しかしながら本実験は入力があるため、同様の相互相関係数と遅延時間を採用するとその組み合わせが膨大になる。そこで次の手順で相互相関係数と遅延時間の組み合わせを限定して実験を行う。

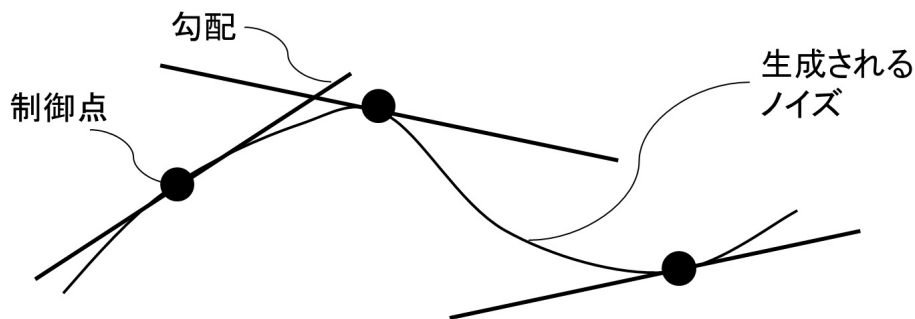


図 3.5: 1次元パーリンノイズ

1. 相互相関と遅延に着目した単入出力実験で得られた結果をもとに, 自己主体感の評価が高い順に相互相関係数と遅延時間の組み合わせを並べ替える.
2. 最も自己主体感が高い組み合わせとその他の組合せを自己主体感が高い順に比較する.
3. はじめて有意差のあった組み合わせを本実験で用いる組み合わせとして抽出する.
4. 3で抽出された組み合わせとそれより自己主体感が低い組み合わせを自己主体感が高い順に比較し, 3から繰り返す.

以上の手順を実際に単入出力実験 (実験 2-1) で得られたデータを用いて詳しく説明する. 図 3.6 左のように自己主体感の評価が高かった順に相互相関係数と遅延時間の組み合わせを並べ替える. その後, 最も自己主体感の評価が高かった組み合わせ (相互相関係数, 遅延時間) = (1.00, 0.0) とそれより自己主体感が低かったものを自己主体感が高い順に比較する. すなわち, まず (1.00, 0.0) と (1.00, 0.2) を比較し, 次に (1.00, 0.0) と (1.00, 0.6) を比較し, これを繰り返す. 比較を繰り返したところ, (1.00, 0.0) と (0.96, 0.0) の間にはじめて有意差が認められたため, (0.96, 0.0) を本実験で用いる相互相関係数と遅延時間の組み合わせとして抽出する. 同様にして, (0.96, 0.0)

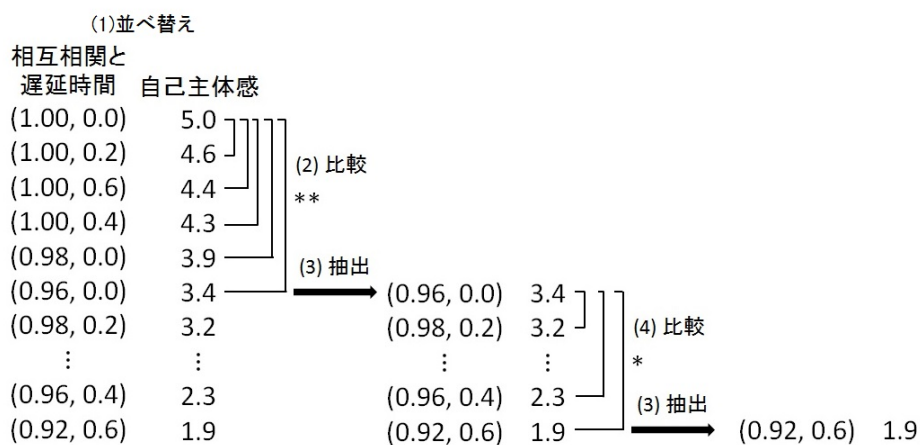


図 3.6: 相互相関係数と遅延時間の組み合わせの決定方法

と比較してはじめて有意差が認められた (0.92, 0.6) を抽出する。本実験では、以上の手順で決定した3つの組み合わせに加えて、(1.00, 0.0) と (0.96, 0.0) の中央値である (1.00, 0.6), (0.96, 0.2) と (0.92, 0.6) の中央値である (0.98, 0.4) の2通りを採用し、合計で5通りとした。事前に実験を知らない被験者にノイズと遅延のない状況で十分な時間操作してもらい、そこから得られた入力値  $V$  と  $\theta$  にそれぞれパーリンノイズにより生成したノイズを加え、ノイズの加わえたものをそれぞれ  $V'$ ,  $\theta'$  とする。 $V$  と  $V'$ ,  $\theta$  と  $\theta'$  の相互相関係数がそれぞれ設定したい値となるようにパーリンノイズのパラメータを経験的に決定する。

### 3.1.5 先行車の挙動

先行車の挙動もまたパーリンノイズによりその前後方向の変位、左右方向の変位を決定する。ノイズと遅延がない場合に容易に課題を達成できるように、先行車の挙動はゆっくりと滑らかに変化するようにパーリンノイズのパラメータを決定する。また先行車は左右の白線を超えないように-0.8から0.8までの範囲を移動する。被験者がステアリングを切らず、かつアクセルを踏み続けたとき、もしくはステアリングを大きく切り、かつアクセルペダルを踏み続けなかったとき、操作対象が先行車に追いついたり、先行車が画面上に見えなくなったりすることが考えられる。これを防ぐために、操作対象と先行車の車間距離に応じて先行車の前後方向の変位を制限する。すなわち車間距離が小さい場合には操作対象が先行車に追いつくことを防ぐために先行車の前後方向の変位が大きくなるようにパラメータを動的に変化させる。また車間距離が大きい場合には先行車が見えなくなることを防ぐために先行車の前後方向の変位が小さくなるようにパラメータを動的に変化させる。

## 3.2 実験手続き

被験者は大学生および大学院生 20 名である。被験者にはステアリング入力とアクセルペダル入力により操作対象を操作してもらい、課題は、先行車と一定の距離を保ちつつ先行車の走行軌跡に沿って操作対象を操作することであるが、実質的には操作対象を灰色の円の内部に位置付け続けることであり、被験者にもそれを伝える。



操作は30秒間継続して行う。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。単入出力実験と同様に、被験者が自己主体感という言葉に馴染みがないことを考慮し、自分が操作した感覚があるかどうか操作感について回答するように指示する。実験を行う前に、ノイズと遅延のない状況(すなわち、ステアリング入力、アクセル入力ともに(相互相関係数, 遅延時間)=(1.00, 0.0))で操作をしてもらい、これを実験者が十分操作できていると感じるまで行ってもらう。その後、本実験において最も大きいと考えられるノイズと遅延の組み合わせ(0.92, 0.6)を2入力それぞれに加えた状況で操作をしてもらい、これらの操作を基準に回答をしてもらう。相互相関と遅延時間の組み合わせは5通りであり、2つの入力それぞれに加えるため、 $5 \times 5 = 25$ 通りの組み合わせで実験を行う。1つの組み合わせにつき14回試行したいため、合計で $25 \times 14 = 350$ 回試行する。試行は被験者全員にランダムに割り当てる。

### 3.3 実験結果と考察

図3.7, 3.8はステアリング入力、アクセルペダル入力のそれぞれに加えたノイズと遅延の各組合せに対する自己主体感と安心感の評価値を示している。単入出力実験と同様に、ノイズと遅延が大きくなるにつれて自己主体感、安心感が低下していることがわかる。分散分析の結果、ステアリング入力に加えたノイズと遅延の変化は自己主体感、安心感に対して有意な影響があると言えた ( $F_{4,325} = 62.19, p < 0.05$ ,  $F_{4,325} = 61.45, p < 0.05$ )。アクセルペダル入力でも同様に自己主体感、安心感に対して有意な影響があると言えた ( $F_{4,325} = 71.64, p < 0.05$ ,  $F_{4,325} = 58.80, p < 0.05$ )。この結果は単入出力実験と同様の結果であった。またステアリング入力に加えたノイズと遅延が自己主体感に与える影響とアクセルペダル入力に加えたノイズと遅延が自己主体感に与える影響に差はないと言えた ( $t(38) = 0.60, p > 0.05$ )。同様に安心感に与える影響もステアリング入力とアクセルペダル入力に差はないと言えた ( $t(38) = 0.13, p > 0.05$ )。このことから、ノイズと遅延が自己主体感、安心感に与える影響は、操作入力の形態に依らないことが示唆された。

被験者の操作の正確さを操作成績  $P$  により表す。出力が1次元の場合、例えば単入

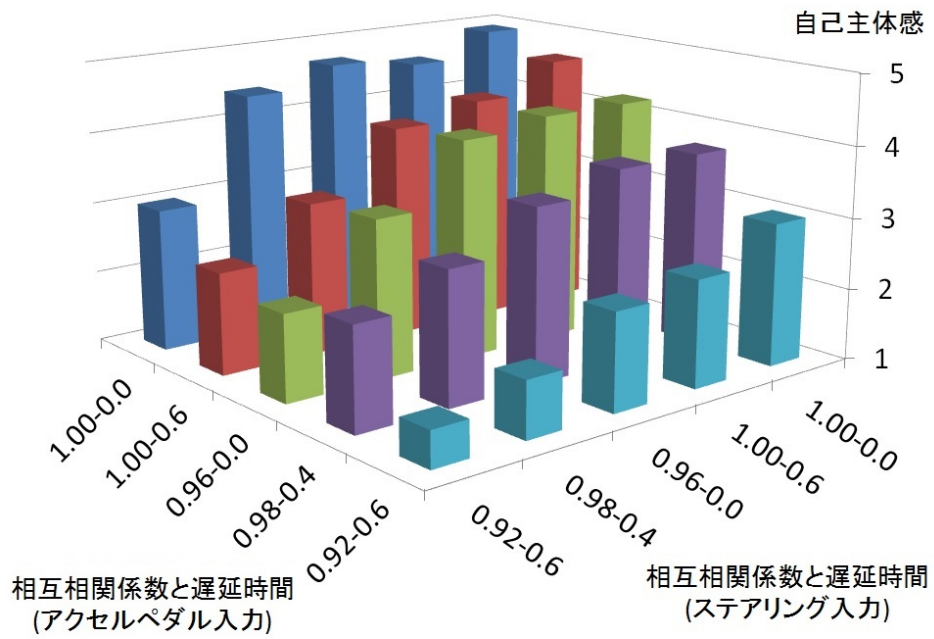


図 3.7: 自己主体感の評価の平均値

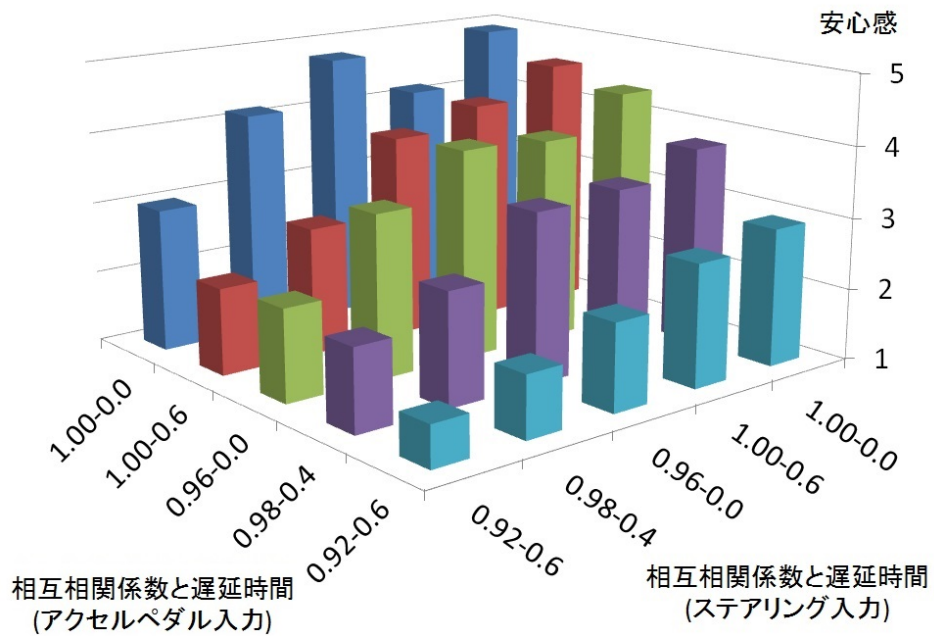


図 3.8: 安心感の評価の平均値

出力実験のような左右の変位のみを出力とする場合, 出力信号と目標信号との相互相関係数を基に操作成績を算出することができる. しかしながら, 本実験は出力が2次元であり相互相関係数を用いて操作成績を算出することが困難である. そこで, 出力信号と目標信号との距離  $D$  (すなわち, 操作対象の円の中心座標と灰色の円の中心座標の距離) に基づいて操作成績を算出することを考える. 時刻  $t$  における出力信号と目標信号との距離を  $D(t)$  として, 式 3.9 から 1 試行あたりの平均距離  $\overline{D(t)}$  を算出する.

$$\overline{D(t)} = \frac{\sum_{t=0}^N |D(t)|}{N} \quad (3.9)$$

$N$  は 1 試行での総フレーム数であり, 今回の場合はリフレッシュレート 60[Hz] で 30 秒間の試行であるため  $N = 60 \times 30 = 1800$  である. 操作成績  $P$  は  $\overline{D(t)} = 0$  のとき (すなわち, 出力信号と目標信号の中心座標が一致するとき) に  $P = 100$ ,  $\overline{D(t)} = 0.5$  のとき (すなわち, 出力信号の中心座標が淡い灰色の円の円周上であるとき) に  $P = 0$  となるように式 3.10 により算出する.

$$P = -200 \times \overline{D(t)} + 100 \quad (3.10)$$

図 3.9 にアクセルペダルとステアリングに加えたノイズと遅延の各組合せに対する操作成績の値を示す. 自己主体感, 安心感と同様にノイズと遅延が大きくなるほど, 操作成績は低下した. 分散分析の結果, ステアリング入力に加えたノイズと遅延の変化は操作成績に対して有意な影響があると言えた ( $F_{4,325} = 24.73, p < 0.05$ ). またアクセルペダル入力でも同様にノイズと遅延の変化は操作成績に対して有意な影響があると言えた ( $F_{4,325} = 63.16, p < 0.05$ ). 自己主体感, 安心感, 操作成績の相関を見たところ, 自己主体感と安心感では 0.98, 自己主体感と操作成績では 0.88, 安心感と操作成績では 0.90 であり, どの組み合わせでも強い相関が見られた.

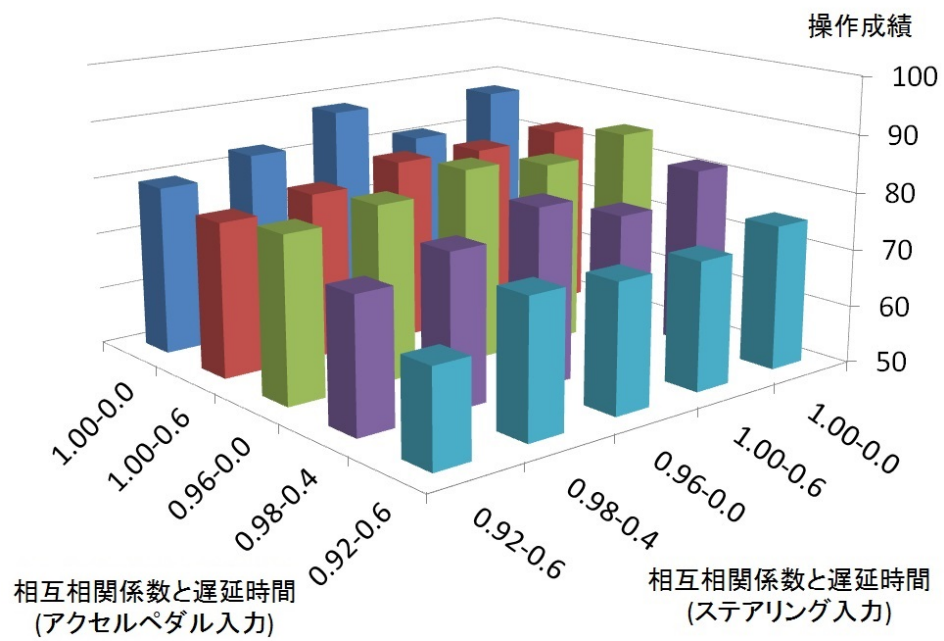


図 3.9: 操作成績の平均値

## 第4章 実験3-1：単入出力操作における能動的 操作支援と自己主体感

第3章では、ノイズと遅延が自己主体感に与える影響について調査するために、多入出力インタフェースの一つである自動車の操作を対象に実験を行った。ノイズと遅延は自己主体感に有意な影響を与え、その影響度合いは操作の形態に依らないことが示唆された。次に、能動的操作支援が自己主体感にどのような影響を与えるのかを調査する。本章では、単入出力インタフェースの操作を対象として実験を行い、次章で、多入出力インタフェースの操作を対象として実験を行う。本章で行う実験と次章で行う実験は、ともに能動的操作支援に着目した実験として共通であるため、併せて実験3と表記する。また実験2と同様に、対象とするインタフェースの違いから、単入出力インタフェースでの実験を実験3-1、多入出力インタフェースでの実験を実験3-2とする。実験3-1はPhantomを用いた単入出力実験(実験2-1)と同様のシステムを用いる。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う。操作対象はノイズ、遅延の影響を受け、操作入力とは完全には一致しない。能動的操作支援機能による様々な支援に対して、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う。

### 4.1 実験システム

実験2-1と同様の実験であるが、被験者が行う入力動作はツイスト入力ではなく、スタイラスペンを左右方向に動かす入力(スライド入力)とする。このときスタイラスペンは前後方向、上下方向に動かないように拘束してある。被験者に提示する画面は単入出力実験と全く同じものである。

#### 4.1.1 相互相関係数と遅延時間

ノイズと遅延に着目した研究では、ノイズと遅延がない状況では自己主体感が非常に高くなることが示唆されている。そのためノイズと遅延がない状況での実験では、自己主体感の変化、特に高まる場合に適切に計測することができないことが危惧される。そこで本実験では自己主体感の変化をみるために、入出力間にノイズと遅延を加えることで、自己主体感を意図的に下げておく。ノイズの大きさは過去の研究と同様に入出力信号間の相互相関係数  $C$  により表現する。本実験で用いる相互相関係数と遅延時間は次の手順で決定する。

1. ノイズと遅延に着目した単入出力実験の結果を基に、最も自己主体感の評価の平均値が高い組み合わせとその他の組合せをすべて比較し、有意差のあった組み合わせをすべて抽出する。
2. 1で抽出された組み合わせから相互相関係数が1.00、もしくは遅延時間が0.0ではないものを抽出する。
3. 2の中から、最も自己主体感の評価の平均値が高い組み合わせと最も自己主体感の評価の平均値が低い組み合わせの2通りを本実験で用いる組み合わせとして採用する。

以上の手順を実際に単入出力実験で得られたデータを用いて詳しく説明する。図4.1のようにすべての組み合わせの中で最も自己主体感の評価の平均値が高かった組み合わせ (1.00, 0.0) と有意差のあった組み合わせをすべて抽出する。次にその中から相互相関係数が1.00、もしくは遅延時間が0.0ではないものを抽出する。最後にその中で、最も自己主体感が高い組み合わせ (0.98, 0.2) と最も自己主体感が低い組み合わせ (0.92, 0.6) を本実験で用いる組み合わせとして採用する。なおノイズと遅延の度合いを2段階としたのは、ノイズと遅延の大きさによって能動的操作支援が自己主体感に与える影響に変化があるかを調査するためである。本論文では以降、入出力信号間の相互相関係数と遅延時間が (0.98, 0.2) であるとき、「ノイズと遅延が小さい」と表現し、(0.92, 0.6) であるとき、「ノイズと遅延が大きい」と表現する。

ノイズにはパーリンノイズを用いる。事前に実験を知らない被験者にノイズと遅延のない状況で十分な時間操作してもらい、そこから得られた入力値とそれにノイズを加えた出力値の相互相関係数が、それぞれ設定したい値となるようにパーリンノイズのパラメータを経験的に決定する。

#### 4.1.2 能動的操作支援

積極的に車線維持を行うタイプのレーンキープアシストを参考に能動的操作支援機能を構築する。レーンキープアシストは現在の速度や車両の向きから車線逸脱を予測し、車両を滑らかに、かつ速やかに元の位置に戻すようにステアリング制御を行う機能である。本実験における操作対象は一次元的な信号であるため、速度や向きを考慮することが困難である。そこで本実験では簡単のため、時刻  $t$  における目標信号と出力信号の距離  $D(t)$  に基づいて目標達成を支援する。また目標を達成するために、支援システムは入力装置を直接的に駆動する。すなわち、Phantom のスタイラスペンに対して状況に応じた適切な力を提示することで目標達成を支援する。時刻  $t$  での入力装置に加える力  $F(t)$  は式 4.1 により求める。

$$F(t) = \alpha D(t) \quad (4.1)$$

ここで、 $\alpha$  は支援の強さを決定する定数である。図 4.2 は、時刻  $t$  における目標信号と出力信号の位置を一直線上に表している。目標信号が移動せず、また人が操作を行わない場合を例に支援機能の詳細を説明する。時刻  $t = t_0$  のとき、目標信号と出力信号が

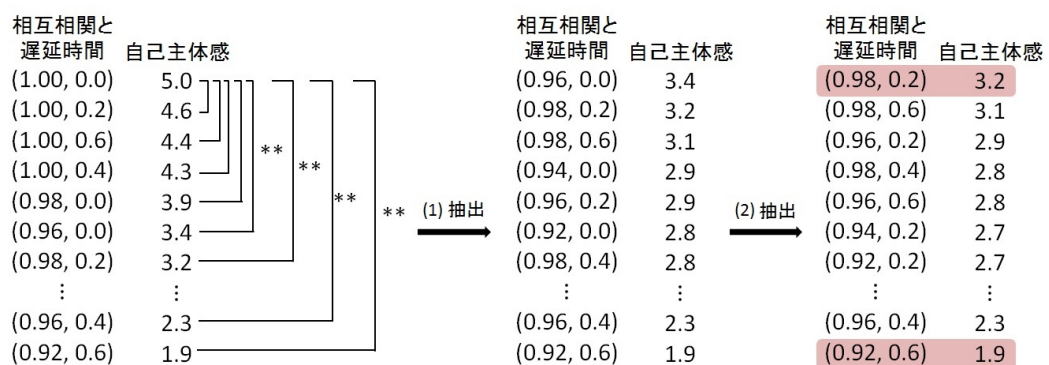


図 4.1: 相互相関係数と遅延時間の組み合わせの決定方法

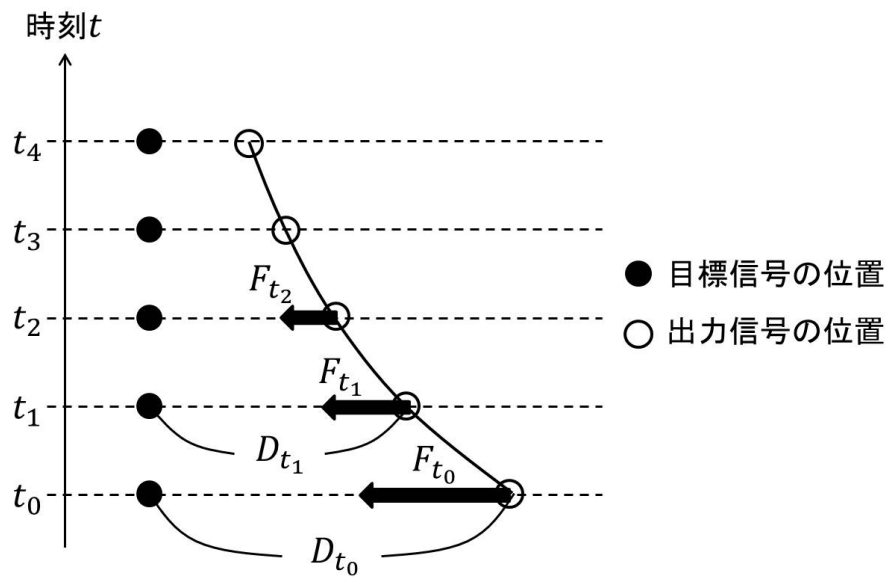


図 4.2: 操作支援の例

距離  $D(t_0)$  だけ離れているとすると、時刻  $t_0$  で入力装置に加える力を  $F(t_0) = \alpha D(t_0)$  とする。次に時刻  $t_0$  から微小時間だけ進んだ時刻  $t_1$  を考える。入力装置に微小時間だけ  $F(t_0)$  の力を加えたため、入力装置は力を加えられた方向に移動し、その結果、時刻  $t_1$  おける目標信号と出力信号の距離  $D(t_1)$  は、 $D(t_1) < D(t_0)$  となる。このとき入力装置に加える力  $F(t_1)$  は  $F(t_1) = \alpha D(t_1) < F(t_0)$  となる。このように入力装置に加わる力は微小時間ごとに逐次変化し、目標信号と出力信号との距離が近づくにつれその大きさは小さくなる。また力  $F(t)$  がある閾値以下になった場合、支援を行わない。実際には、実験開始時には目標と操作対象の左右位置は一致しており、開始後に目標が離れるに従い支援の力が強くなる。また  $\alpha$  の値を変化させることで加える力の大きさを変化させ、位置補正にかかる時間と滑らかさを調節することができる。実験者がほどよいと感じる支援の強さを経験的に決定し、 $\alpha_2$  を設定する。さらにそれよりも大きい  $\alpha_3, \alpha_4$  と、小さい  $\alpha_1$ 、および  $\alpha_0 = 0$  を設定することで、合計で5段階の支援の強さとした。本論文では、操作支援の強さを決定する  $\alpha$  が  $\alpha_i$  であるとき、支援の強さが  $i$  であると表現する ( $i = 0, 1, 2, 3, 4$ )。



## 4.2 実験手続き

被験者は大学生および大学院生の20名である。実験2-1と同様に、被験者には目標信号の動きに一致するように操作を30秒間行ってもらい、その後その操作に対して官能評価を行ってもらう。被験者が回答するのは操作感(自己主体感)と安心感の2項目である。被験者には事前にノイズと遅延が小さい状況とノイズと遅延が大きい状況の2通りを操作支援なしで体験してもらう。さらに、過去の実験ではノイズと遅延が小さい状況で自己主体感の評価の平均値が3.2であり、ノイズと遅延が大きい状況では1.9であったことを被験者に伝え、これを基準に評価を行ってもらう。ノイズと遅延の組み合わせは2通りであり、支援の強さは5通りであるため、全組み合わせは $2 \times 5 = 10$ 通りである。1つの組み合わせにつき20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に割り当てる。

## 4.3 実験結果と考察

図4.3は実験記録の一部であり、ノイズと遅延が小さい状況で支援の強さが2のときの目標信号と出力信号の位置と操作支援機能により入力装置に加えられた力の大きさを示している。目標信号の位置、出力信号の位置、および力の向きは右方向を正としている。目標の移動に追従するように操作していること、またそれらの差に応じて操作支援の力が加えられていることが確認できる。

操作の正確さを表す操作成績 $P$ を実験2-2と同様の手順で求める。図4.4, 4.5はそれぞれ、ノイズと遅延が小さい状況と大きい状況での支援の強さの変化に対する自己主体感、安心感、操作成績の平均値の変化を示している。分散分析の結果、支援の強さの違いによって操作成績に差はないと言えた( $F_{4,190} = 1.91 < 2.42, p > 0.05$ )。操作成績に影響を与えないことから、本実験での操作支援は支援として適切ではなかったとも言える。これは本来のレーンキープアシストが、現在の状況に基づいて未来の状況を予測することで適切な支援するのに対して、本実験の支援機能は現在の出力信号と目標信号との位置関係のみを考慮しているためであると考えられる。また支援のない状況でも高い操作成績であったことから、操作成績の変化を顕著にするためには目標信号の動きを速くすることで意図的に操作成績を下げる必要がある

であったと考える。しかしながら有意な差はなかったものの支援が強くなるにつれて操作成績は増加する傾向であるとも言えた。自己主体感、安心感、操作成績はすべてノイズと遅延の大きさの違いにより有意な差があり ( $p < 0.05$ ), これはノイズと遅延に着目した実験2-2と同様の結果であった。

支援が強くなるにつれて操作成績が緩やかな増加傾向であるのに対して、自己主体感は概ね単調に減少するという結果が得られた。この結果は、強すぎる支援によって被験者が「出力信号を操作しているのは主に自分よりもシステムである」と感じたためであると考えられる。分散分析の結果、支援の強さによって自己主体感に有意な差が見られ ( $F_{4,190} = 17.07 > 3.42, p < 0.01$ ), 下位検定を行ったところ、ノイズと遅延が小さい状況での支援の強さ3と4の間に有意差が見られた ( $t(19) = 3.44, p < 0.05$ )。この結果は、支援の強さの変化に対して自己主体感の強さが大きく変化する境界が存在するとも考えられる。またノイズと遅延の大きさに関わらず支援の強さが1のときに自己主体感が最大になった。これは支援機能による入力装置の駆動を自分が行った操作であると誤認して自己主体感が高くなったと考えられる。操作成績が変わらずに自己主体感が高くなるのは操作者が慢心しているとも考えられるが、ほどよい操作支援が自己主体感を高め、結果としてインタフェースの性能を高めること

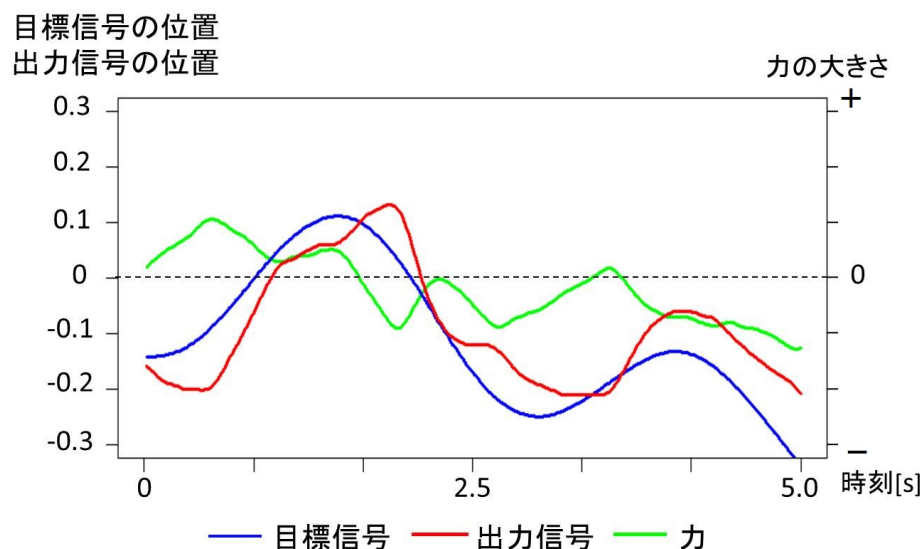


図 4.3: 実験記録の一部

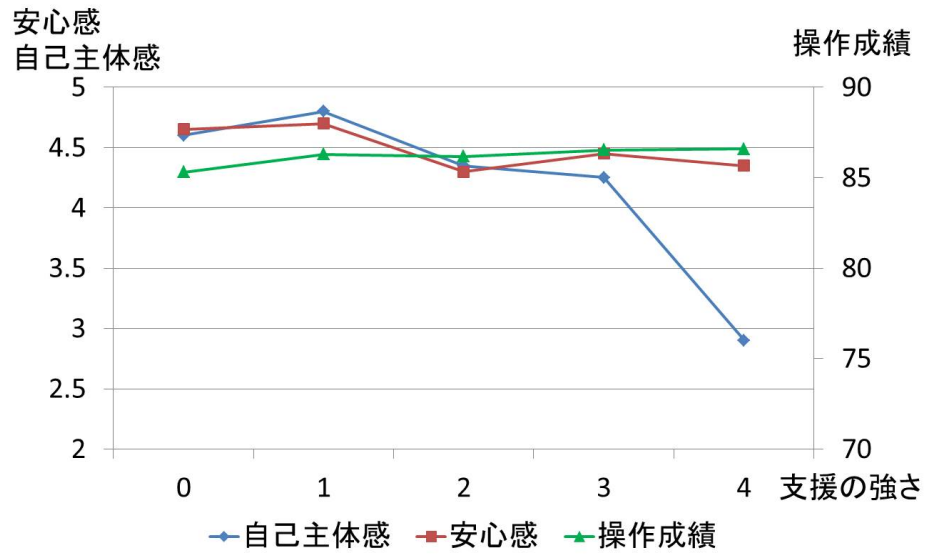


図 4.4: ノイズと遅延が小さい状況での各項目の平均値の変化

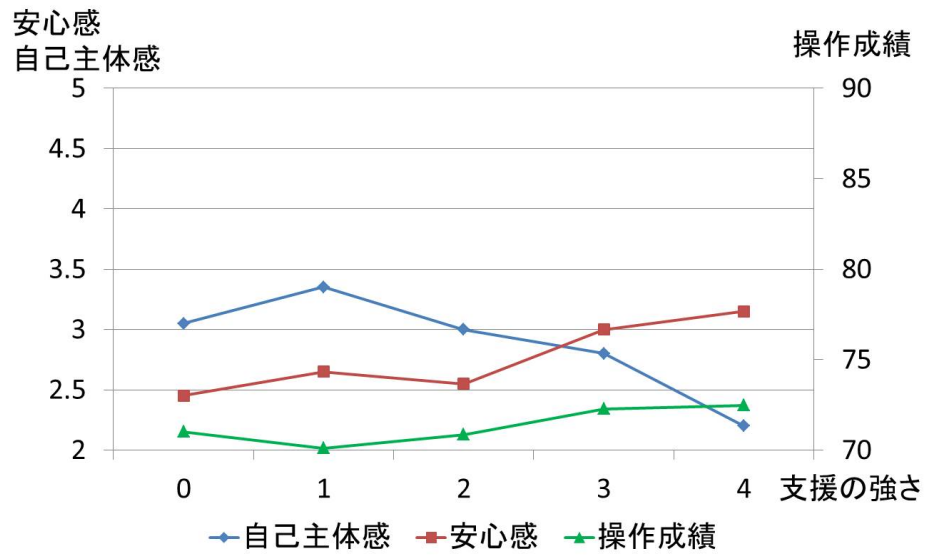


図 4.5: ノイズと遅延が大きい状況での各項目の平均値の変化

ができる可能性があるともいえる。

図4.6は、ノイズと遅延が小さい場合と大きい場合の支援の強さの変化に対する安心感の平均値の変化を示したものである。支援が強くなるにつれて操作成績が緩やかな増加傾向であるのに対して、安心感にはノイズと遅延が小さい場合には概ね単調減少の傾向があり、大きい場合には単調増加の傾向があった。分散分析の結果、安心感には支援の強さによる有意な差は見られなかった ( $F_{4,190} = 1.26 < 3.42, p > 0.05$ )。強い支援によって自己主体感が減少したが、操作の一部をシステムが受け持つことによって目標達成が容易になるため、被験者は安心して操作できていたと考えられる。このことから操作支援機能はノイズや遅延など、操作に影響を与える要素がある場合においては安心感の観点からみると効果的であると言える。ノイズと遅延が大きい場合に注目すると、支援の強さが強くなるにつれて自己主体感は概ね減少し、安心感と操作成績は概ね増加した。また自己主体感と安心感、操作成績の単相関係数を見たところ、安心感と操作成績には中程度の相関が見られた (単相関係数が0.69)。すなわち、ノイズや遅延など操作に影響を与える要素がある場合、人は自分が操作していると感じるか感じないかに関わらず (すなわち、自己主体感の大小に関わらず)、うまく操作できているとき (すなわち、操作成績が高いとき) 安心感が高くなる可能性が示唆された。

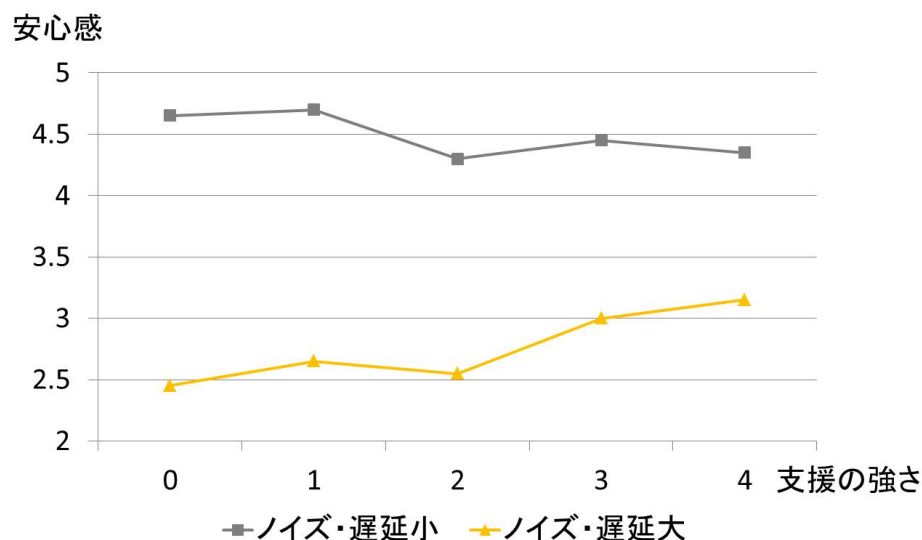


図 4.6: 安心感の平均値の変化

## 第5章 実験3-2：自動車操作における能動的 操作支援と自己主体感

第4章では、入力装置を直接的に駆動する能動的な操作支援が自己主体感に与える影響について調査するために、まず単入出力インタフェースの操作を対象として実験を行った。本章では、自動車操作を対象として同様の実験を行う。実験3-2では、GT Force Proを用いた多入出力実験(実験2-2)と同様のシステムを用いる。被験者はステアリング操作とアクセルペダル操作の2つの入力により自動車を模した挙動をとる操作対象を制御する。このとき先行車と一定の車間距離を維持しつつ、先行車の走行軌跡に沿うように操作対象を操作してもらう。実験3-1と同様に、ステアリング操作による入力とアクセルペダル操作による入力のそれぞれにノイズや遅延を加え、自己主体感を意図的に下げることで、その変化を検証する。能動的な操作支援機能による様々な支援の強さに対して、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う。

### 5.1 実験システム

実験2-2と同様のシステムを用いる。本実験では支援による操作成績の変化をより顕著にするために先行車の挙動を速くすることで意図的に操作成績を下げる。事前に何名かの被験者に、ノイズと遅延がなく操作支援もない状況で操作を行ってもらい、操作成績が70程度になるように、先行車の挙動を決定するパーリンノイズのパラメータを調節した。

#### 5.1.1 相互相関係数と遅延時間

ステアリング入力とアクセルペダル入力のそれぞれにノイズや遅延を加える。ノイズの大きさには相互相関係数  $C$  を用いる。本実験で用いる相互相関係数と遅延時

間の組み合わせは実験3-1と同様に,  $(0.98, 0.2)$  と  $(0.92, 0.6)$  である. ステアリング入力, アクセルペダル入力に加えるノイズと遅延がともに  $(0.98, 0.2)$  の場合を「ノイズと遅延が小さい」と表現し,  $(0.92, 0.6)$  の場合を「ノイズと遅延が大きい」と表現する. 本実験はこれら2通りのノイズと遅延の組み合わせで行う.

ノイズにはパーリンノイズを用いる. 事前に実験を知らない被験者にノイズと遅延のない状況で十分な時間操作してもらい, そこから得られた入力値  $V, \theta$  とそれにノイズを加えた値  $V', \theta'$  の相互相関係数がそれぞれ設定したい値となるようにパーリンノイズのパラメータを経験的に決定する.

### 5.1.2 能動的操作支援

実験3-1では現在の出力信号と目標信号との距離に応じた力を入力装置に加えることで操作を支援したが, このような操作支援では操作成績に影響を与えないことが示唆されており, そのため適切な操作支援とは言えなかった. そこで実験3-2では, 現在の状況が継続されると仮定することで未来の状況を想定し, それに基づいたトルクを発生させる. 本実験において適切な操作支援を行うためには, ステアリング制御により操作対象の位置を先行車の走行軌跡に近づけるだけでなく, 操作対象が走行軌跡上に位置するときステアリングに加えるトルクを0として, かつステアリングの角度を0にする必要がある. そこで次のような操作支援を考えた.

図5.1は, ある時刻  $t$  における操作対象の位置と先行車の走行軌跡を示している. 操

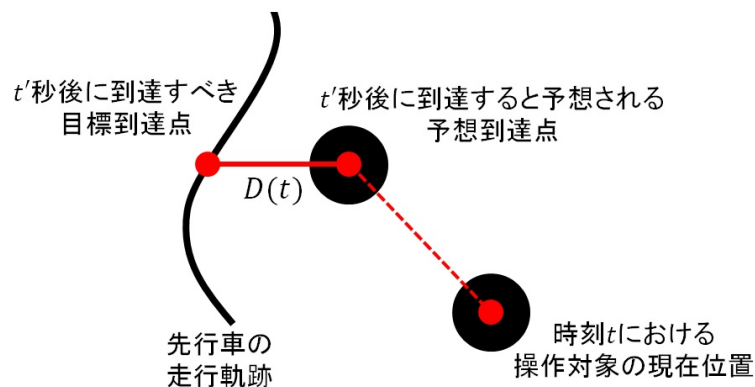


図 5.1: 時刻  $t$  における操作対象と先行車の走行軌跡

作対象が現在の速度, ステアリング角を維持しつつ,  $\Delta t$  秒間進むと仮定して,  $\Delta t$  秒後に操作対象が到達する点の座標 (予想到達点) を算出する. 次に予想到達点と前後方向の座標を同じくする先行車の走行軌跡上の点の座標 (目標到達点) を算出する. 時刻  $t$  における予想到達点と目標到達点の左右方向の距離を  $D(t)$  とすると, このとき入力装置に加えるトルク  $F(t)$  は式 5.1 により求める.

$$F(t) = \beta D(t) \tag{5.1}$$

$\beta$  は支援の強さを決定する定数である. また  $\Delta t$  は  $\Delta t = 1$  (秒) としている.

先行車の走行軌跡が直線であり, また人が操作を行わない場合を例に支援機能の詳細を説明する. 図 5.2, 5.3 は時刻  $t_i$  での操作対象 (黒色の点  $A_i$ ) と予想到達点 (青色の点  $B_i$ ) と目標到達点 (赤色の点  $C_i$ ) の位置, ステアリングに加わるトルクの向きと大きさ, ステアリングの角度を示している ( $i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ ). なお点 B と点 C の座標が一致しているとき, 紫色の点で示している. 時刻  $t_0$  におけるステアリング角が  $\theta(t_0) = 0$  であるとき, 予想到達点  $B_0$  は操作対象と左右方向の座標を同じくする点と

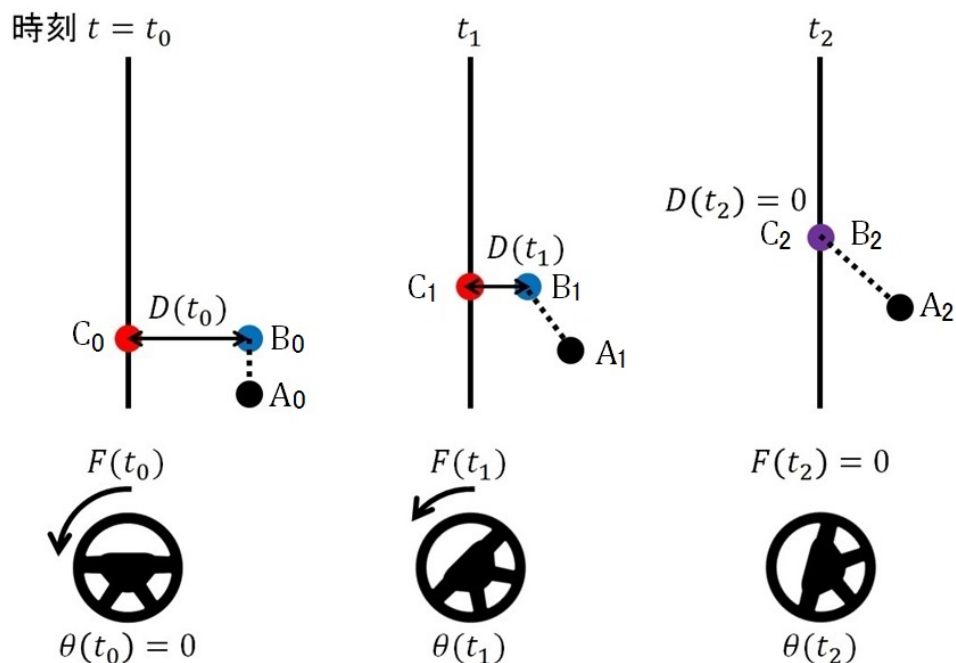


図 5.2: 支援機能の例 ( $t = t_0, t_1, t_2$  のとき)

なる。予想到達点  $B_0$  と目標到達点  $C_0$  の左右方向の距離を  $D(t_0)$  とすると、時刻  $t_0$  でステアリングに加えるトルクは左方向に  $F(t_0) = \beta D(t_0)$  である。次に時刻  $t_0$  から微小時間だけ進んだ時刻  $t_1$  を考える。ステアリングに微小時間だけ左方向に  $F(t_0)$  のトルクを加えたため、ステアリングは左方向に回転する。その結果、時刻  $t_1$  における予想到達点  $B_1$  は  $B_0$  よりも左方向に移動する。このとき入力装置に加えるトルク  $F(t_1)$  は左方向で、 $F(t_1) < F(t_0)$  となる。次に時刻  $t_1$  から微小時間だけ進んだ時刻  $t_2$  を考える。ステアリングに微小時間だけ左方向に  $F(t_1)$  のトルクを加えたため、ステアリングはさらに左方向に回転する。その結果、時刻  $t_2$  における予想到達点  $B_2$  は  $B_1$  よりもさらに左方向に移動する。このとき予想到達点  $B_2$  の座標が目標到達点  $C_2$  の座標と一致した (すなわち、 $D(t_2) = 0$ ) とする。このとき入力装置に加えるトルク  $F(t_2)$  は  $F(t_2) = 0 < F(t_1)$  となる。次に時刻  $t_2$  から微小時間だけ進んだ時刻  $t_3$  を考える。ステアリングにはトルクを加えていないため、ステアリングの角度は時刻  $t_2$  から変化しない。ステアリングは左方向に回転したままであるため、操作対象の座標  $A_3$  は  $A_2$  よりもさらに左方向に移動する。その結果、時刻  $t_3$  における予想到達点  $B_3$

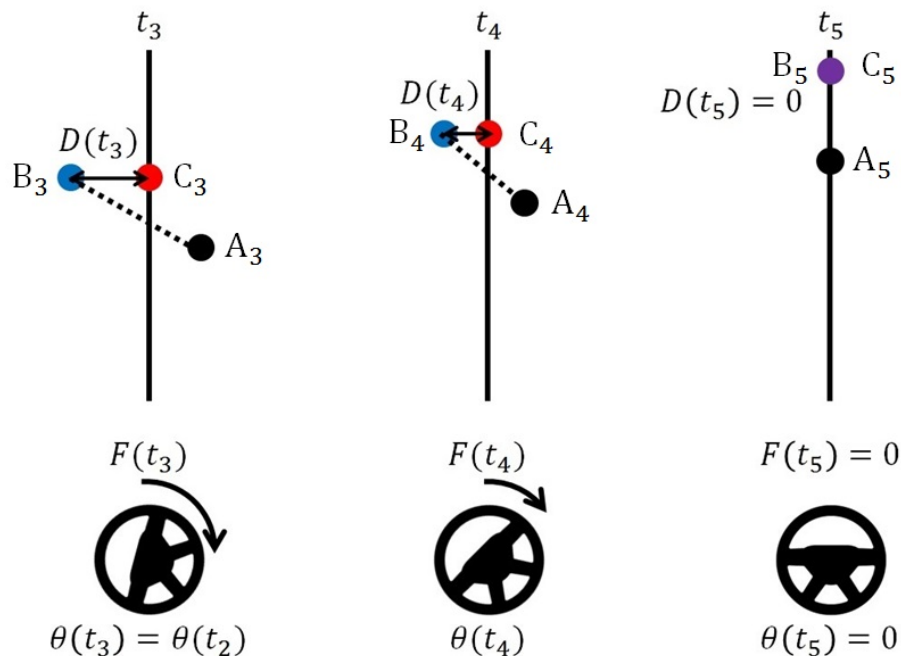


図 5.3: 支援機能の例 ( $t = t_3, t_4, t_5$  のとき)



は操作対象が移動した分だけ左方向に移動する。このとき、予想到達点  $B_3$  が目標到達点  $C_3$  よりも左側にあるため、入力装置には右方向にトルク  $F(t_3)$  を加える。次に時刻  $t_3$  から微小時間だけ進んだ時刻  $t_4$  を考える。ステアリングに微小時間だけ右方向に  $F(t_3)$  のトルクを加えたため、ステアリングは右方向に回転する。その結果、時刻  $t_4$  における予想到達点  $B_4$  は  $B_3$  よりも右方向に移動する。このとき入力装置に加えるトルク  $F(t_4)$  は右方向で、 $F(t_4) < F(t_3)$  となる。最後に時刻  $t_4$  から微小時間だけ進んだ時刻  $t_5$  を考える。ステアリングに微小時間だけ右方向に  $F(t_4)$  のトルクを加えたため、ステアリングはさらに右方向に回転する。このとき操作対象の座標  $A$  が走行軌跡上に一致すると同時にステアリングに加わるトルクは0になり、ステアリングの角度は0になる。またこれ以降ステアリングにトルクが加わることはなく、操作対象は走行軌跡に沿って直線に進み続ける。図5.4は時刻  $t$  ( $t = t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$ ) のときの操作対象の位置を示している。このように操作対象は時間とともに走行軌跡に近づいていく。

ステアリングに加えるトルク、ステアリングの角度は逐次変化し、さらに操作対象が走行軌跡上に位置する瞬間ステアリングに加わるトルクが0になり、かつステアリング角が0になる。実際には、実験開始時には操作対象は走行軌跡上に位置しており、開始後に走行軌跡が離れるに従い支援の程度が強くなる。また簡単のため時刻  $t_5$

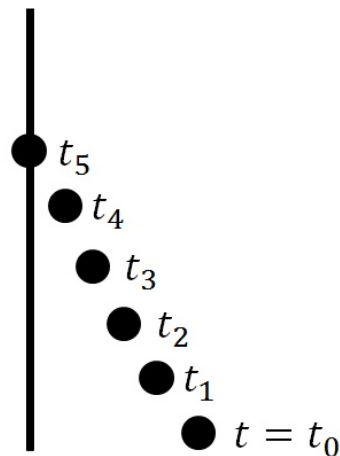


図 5.4: 操作対象の移動軌跡

で操作対象が走行軌跡上に到達する例を示したが、実際には微小時間の間に位置補正が行われることはなく、時間をかけて滑らかに位置補正が行われる。実験3-1と同様に、 $\beta$ の値を変化させることで加えるトルクの大きさを変化させ、位置補正にかかる時間と滑らかさを調節する。実験者がほどよいと感じる支援の強さを経験的に決定し、 $\beta_1$ を設定する。さらにそれよりも大きい $\beta_2$ と、小さい $\beta_0 = 0$ を設定することで、合計で3段階の支援の強さとした。本論文では、操作支援の強さを決定する $\beta$ が $\beta_i$ であるとき、支援の強さが $i$ であると表現する ( $i = 0, 1, 2$ )。なお本実験における支援の強さと実験3-1における支援の強さには関連性はない。

## 5.2 実験手続き

被験者は大学生および大学院生の20名である。過去の実験はすべて30秒間の操作に対して評価を行ってもらったが、適切に評価するには30秒では短いという意見も得られたため、本実験では操作は1分間行ってもらう。被験者が回答するのは操作感(自己主体感)と安心感の2項目である。被験者にはまずノイズと遅延がない状況で操作を行ってもらい、これを実験者が十分操作できていると感じるまで行ってもらう。その後、ノイズと遅延が小さい状況とノイズと遅延が大きい状況の2通りを操作支援なしで体験してもらう。このとき過去の実験ではノイズと遅延が小さい状況で自己主体感の評価の平均値が3.2であり、ノイズと遅延が大きい状況では1.9であったことを被験者に伝え、これを基準に評価を行ってもらう。ノイズと遅延の組み合わせは2通りであり、支援の強さは3通りであるため、全組み合わせは $2 \times 3 = 6$ 通りである。1つの組み合わせにつき20回試行したいため、合計120回試行する。試行は被験者全員に均等に割り当てる。

## 5.3 実験結果と考察

まず自己主体感に関する結果と考察を述べる。図5.5は自己主体感の評価の平均値を示している。エラーバーは標準誤差である。ノイズと遅延が小さい場合でも、大きい場合でも支援の強さ2では自己主体感が大きく減少していることがわかる。分散分析の結果、自己主体感についてノイズと遅延の大きさと支援の強さの二

要因の交互作用による効果が見られた ( $F(2, 114) = 3.08, p < 0.05$ ). そこで単純主効果検定を行った. その結果, ノイズと遅延による自己主体感への影響は, 支援の強さ0では有意であり ( $t(19) = 3.56, p < 0.05$ ), 支援の強さ1では有意傾向であり ( $t(19) = 2.33, 0.05 < p < 0.10$ ), 支援の強さ2では有意ではなかった ( $t(19) = 0.37, p > 0.1$ ). また操作支援による自己主体感への影響は, ノイズと遅延が小さい場合でも大きい場合でも有意であった ( $F(2, 57) = 68.42, p < 0.05, F(2, 57) = 21.97, p < 0.05$ ). さらに下位検定としてボンフェローニ多重比較を行ったところ, ノイズと遅延が小さい場合, 支援の強さ0と支援の強さ2に有意差が見られ ( $t(19) = 11.11, p < 0.05$ ), 支援の強さ1と支援の強さ2にも有意差が見られた ( $t(19) = 9.20, p < 0.05$ ). ノイズと遅延が大きい場合でも同様に, 支援の強さ0と支援の強さ2に有意差が見られ ( $t(19) = 7.91, p < 0.05$ ), 支援の強さ1と支援の強さ2にも有意差が見られた ( $t(19) = 5.60, p < 0.05$ ). 以上の結果から次のように考察する. 支援0, 支援1と比較して支援2で主体感が有意な減少を示したことから, 過度な支援は自己主体感の観点から適切ではないと言える. また支援の強さが強くなる

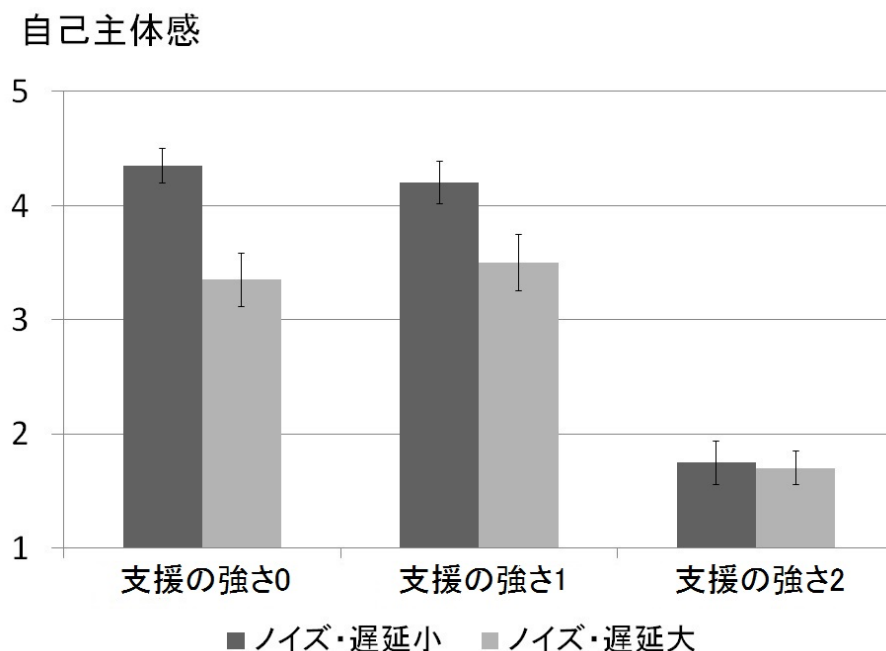


図 5.5: 自己主体感の評価の平均値

につれてノイズと遅延による影響が小さくなったことから、強い操作支援があるときノイズと遅延の大きさには関係なく操作をシステムに任せてしまっていることが考えられる。操作者が自分が操作しているという自己主体感を感じるためには、操作をシステムに任せてしまうのは不適切であり、このことから過度な支援が自己主体感の観点から適切ではないと言える。

次に安心感についての結果と考察を述べる。図5.6は安心感の評価の平均値を示している。ノイズと遅延が小さい場合には安心感は支援の強さ1で最大となり、ノイズと遅延が大きい場合には支援の強さ2で最大となった。分散分析の結果、安心感はノイズと遅延の大きさによって有意差があり ( $F(1, 114) = 42.84, p < 0.05$ ), 支援の強さによっても有意差があった ( $F(2, 114) = 7.04, p < 0.05$ )。下位検定としてボンフェローニ多重比較を行ったところ、ノイズと遅延が大きい場合、支援の強さ0と支援の強さ2に有意差が見られた ( $t(19) = 3.11, p < 0.05$ )。ノイズと遅延が大きい場合に支援が強いと安心感が有意に増加することは単入出力実験(実験3-1)でも示唆されている。そのためインタフェースの操作の形態に関わらず、ノイズや遅延など操

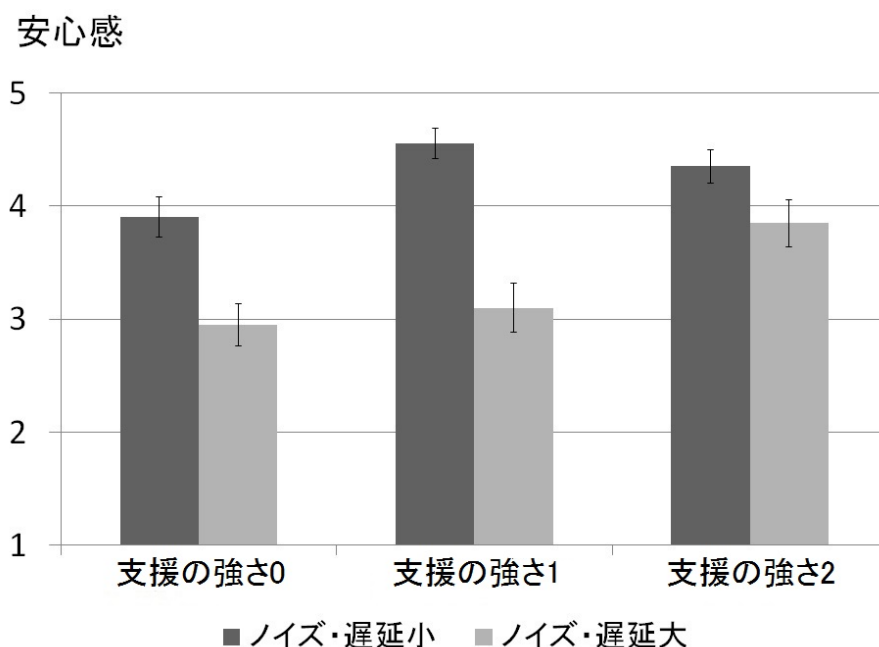


図 5.6: 安心感の評価の平均値

作に悪い影響を与える外因がある場合は操作支援は安心感の観点から効果的であると言える。

次に操作成績についての結果と考察を述べる。図5.7は操作成績の評価の平均値を示している。操作支援が強くなるにつれて、操作成績は単調増加の傾向があった。分散分析の結果、操作成績はノイズと遅延の大きさによって有意差があり ( $F(1, 114) = 32.16, p < 0.05$ ), 支援の強さによっても有意差があった ( $F(2, 114) = 6.13, p < 0.05$ )。下位検定としてボンフェローニ多重比較を行ったところ、ノイズと遅延が小さい場合、支援の強さ0と2の間に有意差傾向があると言えた ( $t(19) = 2.58, 0.05 < p < 0.10$ )。またノイズと遅延が大きい場合、支援の強さ0と1の間に有意差があり ( $t(19) = 3.46, p < 0.05$ ), さらに0と2の間に有意差があった ( $t(19) = 3.83, p < 0.05$ )。すなわち、支援の強さ0の場合 (支援を行わない場合) と比較して支援の強さ1や2の場合 (支援を行う場合) では、有意に操作成績が向上したと言える。実験3-1では操作支援は操作成績に有意な影響を与えておらず適切な支援とは言えなかったが、本実験では操作成績が有意に増加したため、適切な支援ができていたと言える。

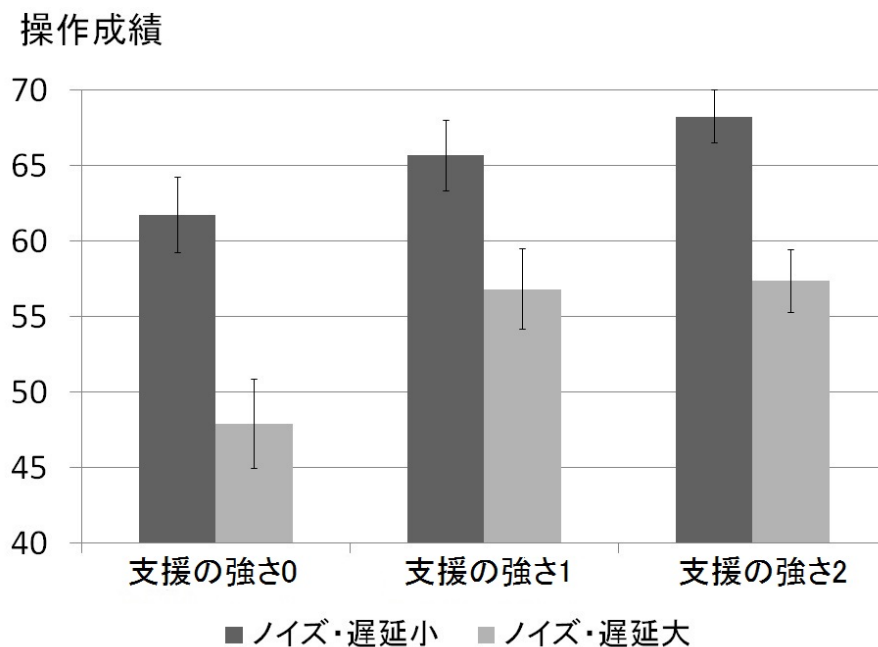


図 5.7: 操作成績の平均値

ノイズと遅延が大きい場合に着目すると、支援の強さが強くなるにつれて自己主体感は概ね減少し、安心感と操作成績は概ね増加した。また自己主体感と安心感、操作成績の単相関係数を見たところ、安心感と操作成績には中程度の相関が見られた(単相関係数が0.48)。この結果は、単入出力インタフェースを対象とした実験(実験3-1)と同様の結果であり、操作の形態に依らず、ノイズや遅延など操作に悪い影響を与える要素がある場合、人は自分が操作していると感じるか感じないかに関わらず、うまく操作できているとき、安心感が高くなる可能性が示唆された。

## 第6章 実験4：自動車操作に付随する音と自己主体感

第4章および第5章では、入力装置を直接的に駆動する能動的操作支援が自己主体感に与える影響について調査した。その結果、過度な支援は自己主体感の観点から適切ではないこと、また操作に悪い影響を与える要因がある場合において操作支援は安心感の観点から効果的であることが示唆された。本章では、操作自体に直接影響は与えないが、操作を行う人間に精神的に影響を与えるかもしれない要因について考える。具体的には、インタフェースの操作に付随する音が自己主体感に与える影響を調査する。一連の研究でこれまでに行った単入出力インタフェースを対象とした実験システム(実験2-1, 実験2-2)は、インタフェース操作を抽象化しているため、操作に対応する音を考えることが困難である。そのため、操作とその操作に付随する音の関連付けが困難である。そこで本実験では、自動車操作を模した実験システム(実験2-2, 実験3-2)を用いる。自動車操作時には様々な音が発生するが、本実験ではその代表として操作時のエンジン音に着目し、エンジン音と自己主体感の関係について調査する。被験者はステアリング操作とアクセルペダル操作の2つの入力により自動車を模した挙動をとる操作対象を制御する。このとき先行車と一定の車間距離を維持しつつ、先行車の走行軌跡に沿うように操作対象を操作してもらう。ステアリング操作による入力とアクセルペダル操作による入力のそれぞれにノイズや遅延を加え、自己主体感を意図的に下げることで、その変化を検証する。エンジン音が発生しない(以降、無音と表記する)場合の操作、操作に同期して音量(振幅)と音高(周波数)が変化するエンジン音が発生する(以降、同期音と表記する)場合の操作、操作とは非同期に音量と音高が変化するエンジン音が発生する場合(以降、非同期音と表記する)の操作のそれぞれについて、被験者に操作時の自己主体感と安心感を主観評価してもらう。

## 6.1 実験システム

実験3-2と同様のシステムを用いる。すなわち、実験2-2とは異なり、先行車の挙動を速くすることで意図的に操作成績を下げている。ただし操作支援は行わない。相互相関係数と遅延時間の組み合わせも実験3-2と同様である。

### 6.1.1 操作に付随する音

自動車操作に付随する音として、操作時のエンジン音に着目する。エンジン音として使用する音は、実際の自動車のエンジン音が適切かもしれないが、ここでは簡易的にエンジン音を模した効果音を利用する。本実験はエンジン音について、無音の場合と同期音の場合と非同期音の場合の3通りの状況で行う。

同期音は、操作対象の車速 $V$ に応じてエンジン音の振幅と周波数を変化させる。実際の実験では、アクセルペダルを踏まない状況や最大まで踏み込む状況が継続されることはほとんどなく、ある程度の踏み込みを維持しつつ、先行車が加速したらさらに踏み込み、減速したら少しだけ緩めるといった操作が繰り返される。そのためアクセルペダルの踏み込み具合が頻繁に変化する領域（ここでは実動域と表現する）が図6.1のように存在する。実動域内での音の変化を強調するために、踏込具合に対する

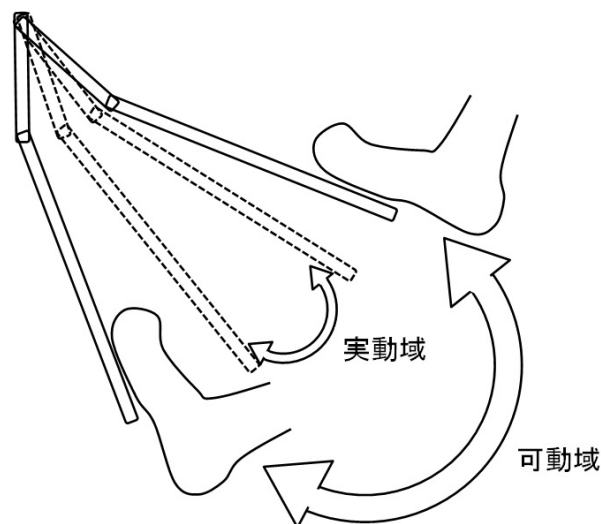


図 6.1: アクセルペダルの可動域と実動域



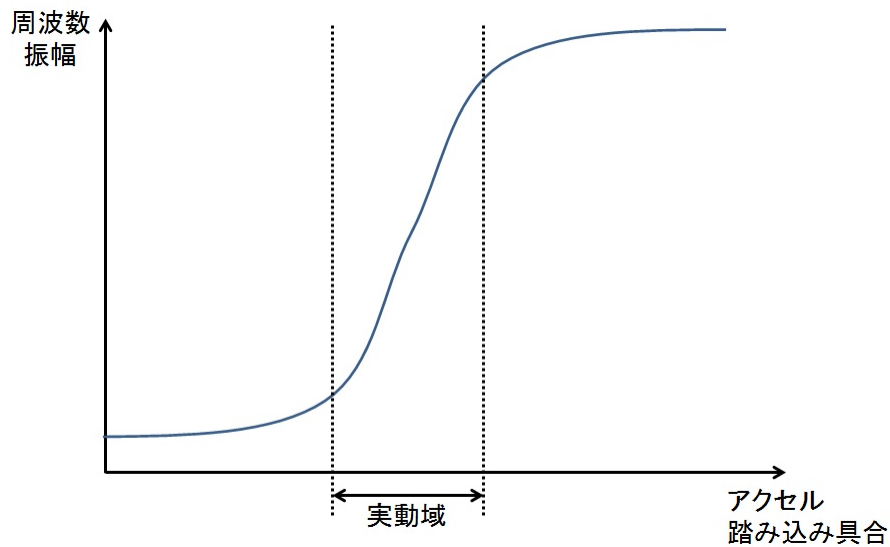


図 6.2: 踏込具合に対する振幅と周波数の変化

振幅と周波数の変化を図 6.2 のようにシグモイド関数を用いて設定した。

本来操作とは非同期に変化するエンジン音は現実には考えられないが (現在の, ガソリンエンジンで発電可能な, 電気のみで走行する自動車は, このようなことが起こるかもしれない), 今回は無音, 同期音との比較対象として非同期音での実験も行う. 非同期音は, パーリンノイズを利用してエンジン音の振幅と周波数を変化させる. 振幅と周波数の変域が同期音の場合と同程度になるようなパーリンノイズのパラメータを経験的に設定する.

## 6.2 実験手続き

被験者は大学生および大学院生の 20 名である. 被験者には操作を 1 分間行ってもらい, その後その操作に対して官能評価を行ってもらう. 被験者が回答するのは操作感 (自己主体感) と安心感の 2 項目である. 被験者にはまずノイズと遅延がない状況で操作を行ってもらい, これを実験者が十分操作できていると感じるまで行ってもらい. その後, ノイズと遅延が小さい場合と大きい場合の 2 通りを無音の状況で体験してもらう. このとき過去の実験ではノイズと遅延が小さい状況で自己主体感の評価の平均値が 3.2 であり, ノイズと遅延が大きい状況では 1.9 であったことを被験

者に伝え、これを基準に評価を行ってもらう。ノイズと遅延の組み合わせは2通りであり、エンジン音の種類は3通りであるため、全組み合わせは $2 \times 3 = 6$ 通りである。1つの組み合わせにつき20回試行したいため、合計120回試行する。試行は被験者全員に均等に割り当てる。なお本実験は独立した実験ではあるが、実験3-2と併せて行った。そのため被験者は実験3-2と共通であり、さらに実験3-2の支援の強さ0の状況と、実験4のエンジン音が無音の状況は全く同じ状況であるため、試行結果をそれぞれの実験の両方の集計に用いている。

### 6.3 実験結果と考察

図6.3は自己主体感の評価の平均値を示している。エラーバーは標準誤差である。分散分析の結果、自己主体感はノイズと遅延の大きさによって有意差がみられ( $F(1, 114) = 61.85, p < 0.05$ )、音のパターンによっても有意差がみられた( $F(2, 114) = 8.37, p < 0.05$ )。下位検定としてボンフェローニ多重比較を行ったところ、ノイズと

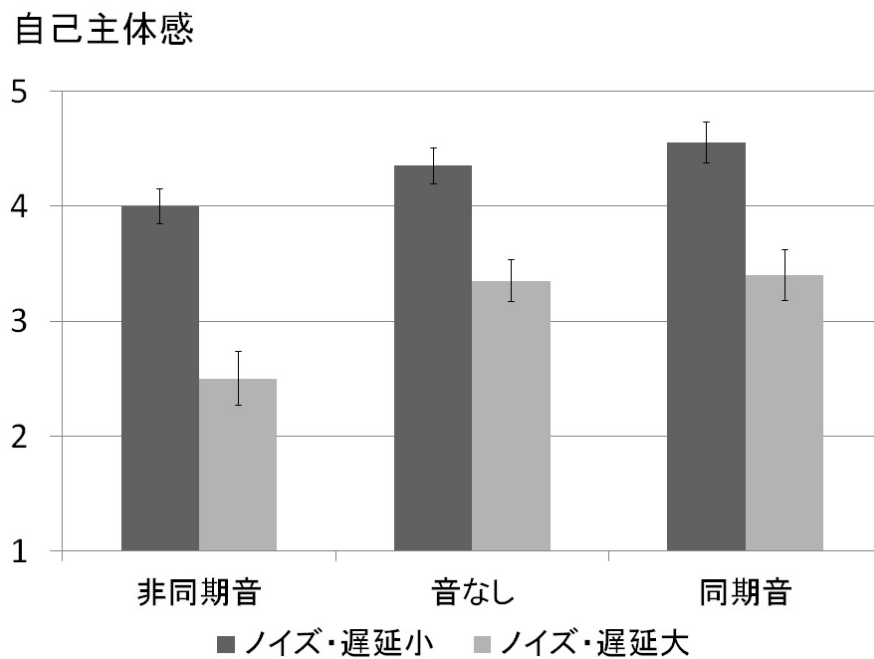


図 6.3: 自己主体感の評価の平均値

遅延が小さい場合、非同期音と同期音に有意差傾向が見られ ( $t(19) = 2.60, 0.05 < p < 0.10$ ), ノイズと遅延が大きい場合、非同期音と無音, 非同期音と同期音のそれぞれに有意差が見られた ( $t(19) = 3.00, p < 0.05$ ), ( $t(19) = 3.33, p < 0.05$ )). すなわち無音, 同期音と比較して非同期音では自己主体感が有意に減少したと言える. このことから操作系に対して操作に対応しない要素が存在するとき, 自己主体感は減少することが示唆された. また有意な差ではなかったが無音と比較して同期音では自己主体感が増加したとも言える. これはクロスモーダル知覚が関係していると考えられる. 人間の五感はそれぞれ独立したものではなく, 互いに影響を与え合って様々な感覚を知覚しており, このような感覚の仕組みをクロスモーダルと呼ぶ. 例えば, 風鈴の音を聞くだけで涼しさを感じるといった現象も, クロスモーダル知覚によるものである. クロスモーダル知覚によって, 操作に伴うエンジン音を聞くことで自動車を運転しているという自己主体感が高くなったとも考えられる. すなわち自動車の消音化は自己主体感の低下に繋がる可能性があり, 過度な消音が自己主体感の観点から不適切であるとも言える.

図6.4は安心感の評価の平均値を示している. 分散分析の結果, 安心感はノイズと

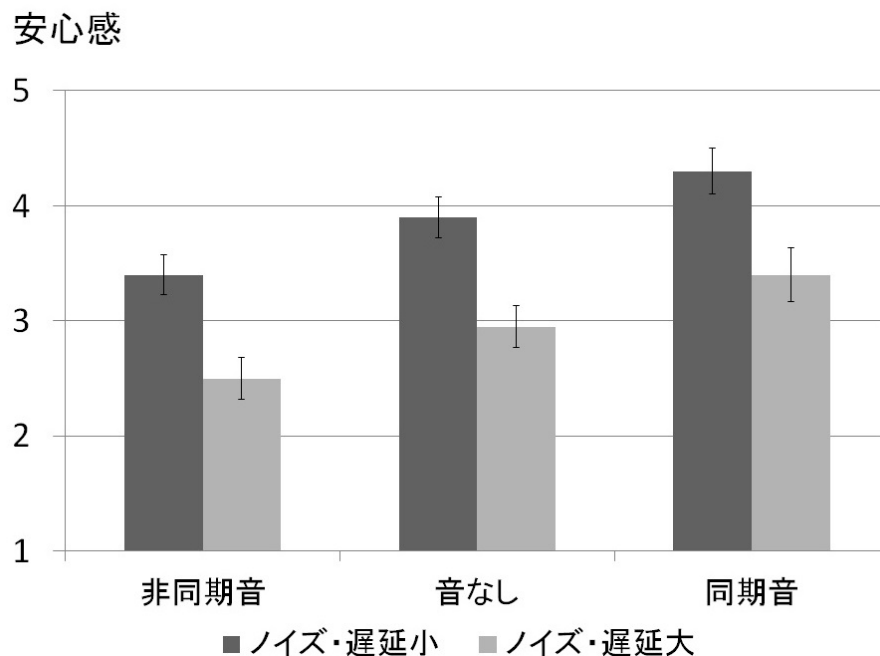


図 6.4: 安心感の評価の平均値

遅延の大きさによって有意差がみられ ( $F(1, 114) = 38.93, p < 0.05$ ), 音のパターンによっても有意差がみられた ( $F(2, 114) = 2.28, p < 0.05$ ). 下位検定としてボンフェローニ多重比較を行ったところ, ノイズと遅延が小さい場合, 非同期音と無音に有意差傾向が見られ ( $t(19) = 1.81, 0.05 < p < 0.10$ ), さらに非同期音と同期音に有意差が見られた ( $t(19) = 4.41, p < 0.05$ ). またノイズと遅延が大きい場合, 非同期音と同期音に有意差傾向が見られた ( $t(19) = 3.36, 0.05 < p < 0.10$ ). 安心感と自己主体感には強い相関があり (単相関係数 0.74), 安心感の大小の傾向は自己主体感と同様であると言えた. すなわち操作系に対して操作に対応しない要素が存在するとき, 自己主体感が減少すると同時に安心感も減少することが示唆された.

図 6.5 は操作成績の平均値を示している. 分散分析の結果, 操作成績はノイズと遅延の大きさによって有意差がみられたが ( $F(1, 114) = 38.93, p < 0.05$ ), 音のパターンによっては有意差はみられなかった ( $F(2, 114) = 2.28$ ). すなわち, 操作成績は操作に付随する音の有無や変化の仕方には左右されないと言える. しかしながら, 有意差はなかったものの同期音の場合では無音, 非同期音と比較して操作成績が向上し

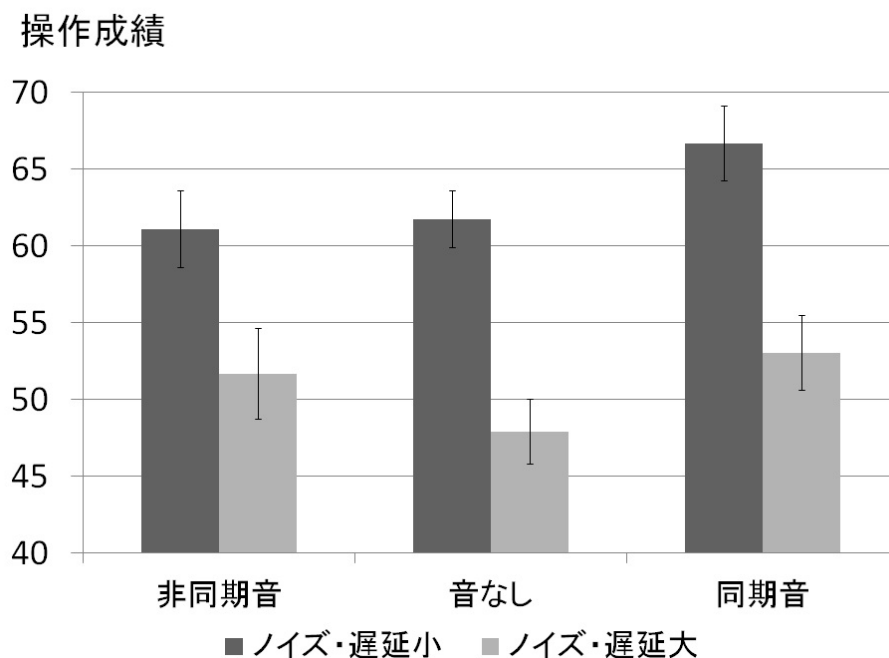


図 6.5: 操作成績の平均値

ているとも言える。ここで、関連する研究として金らの研究を紹介する [18]。金らは手書きの筆記作業とそれに伴う筆記音に注目し、筆記音が筆記作業に及ぼす影響を調査した。具体的には以下のような実験を行っている。被験者には漢字のなぞり書き作業を行ってもらい、それに伴う筆記音について、筆記音を遮断する条件、筆記音を自然に聞かせる条件、スピーカにより筆記音を強調して聞かせる条件、ヘッドホンにより筆記音を強調して聞かせる条件のそれぞれで実験を行った。そして各条件での作業量（ここでは1分間に書いた平均文字数）や作業に対する主観評価を比較し、筆記音が筆記作業に及ぼす影響を調査した。実験の結果、筆記音を強調して聞かせる条件では強調して聞かせない条件よりも作業量が多くなることが明らかになった。すなわち筆記音に関しては、強調して聞かせることが作業効率に肯定的な影響を及ぼすことが示唆されている。また主観評価でも、筆記音を強調して聞かせた方が、作業への肯定的な印象が強いことが示唆されている。本実験における自動車操作がなぞり書き作業、エンジン音が筆記音、操作成績が作業量にそれぞれ対応していると考えれば、本実験で得られた結果は金らの研究結果を支持するものであったと言える。操作に同期した音の存在が操作成績を向上させる可能性があり、これは、音を発するシステム全般の開発や設計に関する有意義な知見であると考えられる。

## 第7章 むすび

本研究では、操作にともなう自己主体感の、操作系に対する様々な外的要因による影響を調査した。結果は以下のとおりである。入出力間のノイズと遅延は自己主体感、安心感、操作成績を低下させることが明らかになった。また操作支援の程度がある強さを超えると急激に自己主体感が低下することから、過度な支援は自己主体感の観点から適切ではないと言えた。しかしながらノイズや遅延など操作に悪い影響を与える外因がある場合は操作支援は安心感の観点から効果的であるとも言えた。また操作に付随する音の存在は、自己主体感、安心感を高め、さらには操作成績を向上させることが示唆された。本研究結果は操作支援機能を備えたインタフェースや音を発するシステムの開発や設計に役立つと期待される。

最後の実験では、操作自体に直接的な影響は与えないが、操作を行う人間に精神的に影響を与えるかもしれない要因として聴覚刺激に着目して、操作に付随する音と自己主体感の関係について調査した。この実験に関連して、今後は聴覚刺激ではなく視覚刺激に着目することも検討したい。例えば自動車操作に伴って指示値が変化する速度計を操作者に提示した場合、特に実際よりも誇張した指示値を提示したり、実際とは異なる値を提示した場合などに、自己主体感にどのような影響があるのかを調査したい。また今回は、様々なインタフェース操作の一つとして自動車操作に着目し、簡易的な自動車運転シミュレータを用いて実験を行った。しかしながらシミュレータにおける操作と実際のインタフェース操作は大きく異なるため、本実験結果が実際のインタフェース操作に対して単純に適用できるとは限らない。そこで今後の課題として、シミュレータを用いるのではなく、実際のインタフェース操作を対象として、その操作系に対する様々な外的要因が自己主体感に与える影響を調査する必要がある。

## 謝辞

本研究を進めるにあたって、日頃から多大なご尽力を頂き、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、本研究は近畿大学、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近畿大学の谷田公二 様、本田技術研究所の八代勝也 様、皆様に深く感謝致します。

最後に、本研究に多大なご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] S. Gallagher, “Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science”, *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 14–21, 2000.
- [2] 宮崎 美智子, 高橋 英之, 岡田 浩之, 開 一夫, “自己認識における運動主体感の役割と発達メカニズム”, *Cognitive Studies*, 18(1), 9–28, 2011.
- [3] K. Schneider, “Clinical Psychopathology”, *New York: Grune and Stratton*, 1959.
- [4] 前田 貴記, “自己意識の神経心理学の試み”, 高次脳機能研究 (旧 失語症研究), 36(3), 420-425, 2016.
- [5] 佐伯 胖, 西田 正吾, “認知科学の視点からみたヒューマンインタフェース”, 電気学会雑誌, 109(8), 645-648, 1989.
- [6] D. A. Norman, S. W. Draper, “User Centered System Design; New Perspectives on Human-Computer Interaction”, *New Jersey: Lawrence Erlbaum*, 1986.
- [7] 簗原 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, 139-144, 2015.
- [8] S. J. Blakemore, D. M. Wolpert, C. D. Frith, “Abnormalities in the awareness of action”, *Trends in Cognitive Science*, 6(6), 237-242, 2002.
- [9] C. Farrer, G. Valentin, J.M. Hupe, “The time windows of the sense of agency”, *Consciousness and Cognition*, 22(4), 1431-1441, 2013.
- [10] 片岡 俊樹, 舟橋 健司, 谷田 公二, 八代 勝也, “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”, 日本バーチャルリアリティ学会 第21回大会講演論文集, 13B-02, 2016.



- [11] Toshiki Kataoka, Kenji Funahashi, Koji Tanida, Katsuya Yashiro, “A study of sense of self-agency focused on cross-correlation and delay between action and effect in continuous operation”, *Proceedings of ICAT-EGVE*, 5-6, 2016.
- [12] Toshiki Kataoka, Kenji Funahashi, Koji Tanida, Katsuya Yashiro, “A Study of Sense of Self-Agency Focused on Noise and Delay in Multiple Input Operation”, *Proceedings of IEEE-GCCE*, 484-487, 2017.
- [13] 片岡 俊樹, 舟橋 健司, 谷田 公二, “入力装置を直接的に駆動する能動的操作支援システムが自己主体感に与える影響”, 日本バーチャルリアリティ学会第 22 回大会講演論文集, 3A1-01, 2017.
- [14] 国土交通省, ハイブリッド車等の静音性に関する対策のガイドライン,  
[http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha\\_tk7\\_000002.html](http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_tk7_000002.html).
- [15] 金 利昭, 飛田 祐作, “自動車の電化に伴う静音化が交通安全性に与える影響に関する考察” 土木計画学論文集, 21(3), 2004.
- [16] 3D Incorporated, Geomagic Phantom Premium 1.5,  
[https://www.ddd.co.jp/products/geomagic\\_phantom\\_premium15/](https://www.ddd.co.jp/products/geomagic_phantom_premium15/)
- [17] logicool, GT Force Pro,  
[http://support.logicool.co.jp/ja\\_jp/product/driving-force-pro](http://support.logicool.co.jp/ja_jp/product/driving-force-pro)
- [18] 金 ジョンヒョン, 橋田 朋子, 大谷 智子, 苗村 健, “筆記音のフィードバックが単純な筆記作業に及ぼす影響の検討”, 日本バーチャルリアリティ学会講演予稿集, 17(3), 289-292, 2012.

## 発表論文リスト

1. 片岡 俊樹, 舟橋 健司, 谷田 公二, 八代 勝也, “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”, 日本バーチャルリアリティ学  
会第 21 回大会講演論文集, 13B-02, 2016.
2. Toshiki Kataoka, Kenji Funahashi, Koji Tanida, Katsuya Yashiro, “A study of  
sense of self-agency focused on cross-correlation and delay between action and  
effect in continuous operation”, *Proceedings of ICAT-EGVE*, 5-6, 2016.
3. 片岡 俊樹, 舟橋 健司, 谷田 公二, “入力装置を直接的に駆動する能動的操作支援  
システムが自己主体感に与える影響”, 日本バーチャルリアリティ学会第 22 回  
大会講演論文集, 3A1-01, 2017.
4. Toshiki Kataoka, Kenji Funahashi, Koji Tanida, Katsuya Yashiro, “A Study of  
Sense of Self-Agency Focused on Noise and Delay in Multiple Input Operation”,  
*Proceedings of IEEE-GCCE*, 484-487, 2017.