

人間の主観的力知覚モデルの提案と  
自動車操作系への応用

(A Subjective Force Perception Model of Humans and its  
Application to Vehicle Operation Systems)

広島大学大学院工学研究科  
システムサイバネティクス専攻  
D115402 竹村 和紘

# 目 次

## 人間の主観的力知覚モデルの提案と自動車操作系への応用

第 1 章	序論	1
	1.1 背景と目的	1
	1.1.1 車社会と求められる機能	
	1.1.2 研究目的	
	1.2 関連する従来研究	4
	1.3 本論文の概要	6
第 2 章	人間の力知覚特性の解析	7
	2.1 はじめに	7
	2.2 力知覚特性の計測方法	8
	2.3 実験	10
	2.3.1 ステアリング反力の変化に対する力知覚特性	
	2.3.2 ステアリング操舵角の変化に対する力知覚特性	
	2.3.3 動的操作における力知覚特性	
	2.4 実験結果	16
	2.4.1 反力変化について	
	2.4.2 姿勢変化について	
	2.4.3 動的操作について	
	2.5 考察	33
	2.6 まとめ	33
第 3 章	人間の主観的力知覚モデルの提案	35
	3.1 はじめに	35
	3.2 主観的力知覚特性のモデル化	36
	3.2.1 反力変化の知覚特性	
	3.2.2 操作姿勢と力知覚特性の関係	
	3.3 人間の主観的力知覚モデル	47
	3.4 まとめ	49

<b>第 4 章</b>	<b>力知覚空間における操作特性を用いた感性評価法</b>	<b>50</b>
	4.1 はじめに.....	50
	4.2 提案する感性評価法.....	51
	4.3 実験.....	54
	4.4 結果と考察.....	56
	4.4.1 ステアリング機械特性の主観的力知覚空間への変換結果	
	4.4.2 主観的力知覚空間における機械特性の主成分抽出結果	
	4.4.3 重回帰分析による感性評価結果	
	4.4.4 最適設計	
	4.5 まとめ.....	71
<b>第 5 章</b>	<b>結論</b>	<b>72</b>
	<b>参考文献</b>	<b>74</b>
	<b>謝辞</b>	<b>77</b>

# 第 1 章

## 序 論

### 1.1 背景と目的

#### 1.1.1 車社会と求められる機能

2012 年の内閣府による国民に対する世論調査の結果では、これからは物の豊かさよりも心の豊かさを求めていると答えた人は、対象者 6075 人の内 61.8 [%] であり、これは物質的には豊かになった一方で心は豊ではない人が多いことを示している<sup>(1-1)</sup>。そうした中、近年、自動車は感性に訴える車づくりを重要としており、そうした自動車に求められている性能の 1 つにドライバーの感性にあった操作特性がある<sup>(1-2)</sup>。例えばマツダのロードスターの開発では、ドライバーと車との心が通いあった密接な関係を象徴した「人馬一体」をキーワードに、意のままに車を操る楽しさを実現している。基本的な軽量化はもちろん、操舵に対する車両応答のゲインとステアリングホイール（以下、ステアリング）の操作力とのバランスをベースとし、他の操作機器やパフォーマンスフィールドの目標を決めることで、ドライバーが統一に感じる車を実現している<sup>(1-3)</sup>。ただし、例えば軽快でリニアリティーがありスムーズな操作感を実現するためには、テストドライバーが納得するまでチューニングを繰り返し、そのつくり込みを行なっているのが現状である。

ここで、テストドライバーのフィーリングテストは試験が大規模化しやすいことから、ドライバーの操作フィーリングを操作機器の物理特性との関係からモデル化し、評価しようという研究が活発化している<sup>(1-4)</sup>。これらの開発を効率的に行うには、開発初期に狙った操作感を物理量として設計値に反映しておく必要があり、そのためには人間の感覚特性を用いたシミュレーション技術を構築することが必要不可欠である。

### 1.1.2 研究目的

人間の感覚特性を用いたシミュレーション技術が実現できれば設計段階で人間の感覚を予測することが可能となるが、その実現のためには、それぞれの操作機器に対して、人間の四肢における運動特性と知覚特性を明らかにし、それらのモデル化を行う必要がある。

そのためのアプローチとして、筋骨格系の特徴（生理学）を考慮した可操作性（力学）とそこから得られる人の感じ方（精神物理学）から人間の運動特性と知覚特性を解析することが有効であると考えられる（図1）。従来研究では、アクセルペダル操作時の反力知覚実験から単関節における知覚特性とメカニズムが明らかにされている<sup>(1-5)</sup>が、ステアリングホイール操作時の大きな操舵による多関節運動を対象とした研究はこれまで行われていない。例えば、ステアリングホイール操作時に同じ力を手先に与えても姿勢が大きく変化すると、異なる力に感じる可能性がある。ドライバーの操作フィーリングを操作機器の物理特性との関係からモデル化するには、その操作による手先力の変化に対する人間の主観的な力知覚特性を明らかにし、操作フィーリングのモデル化を試みる必要がある。

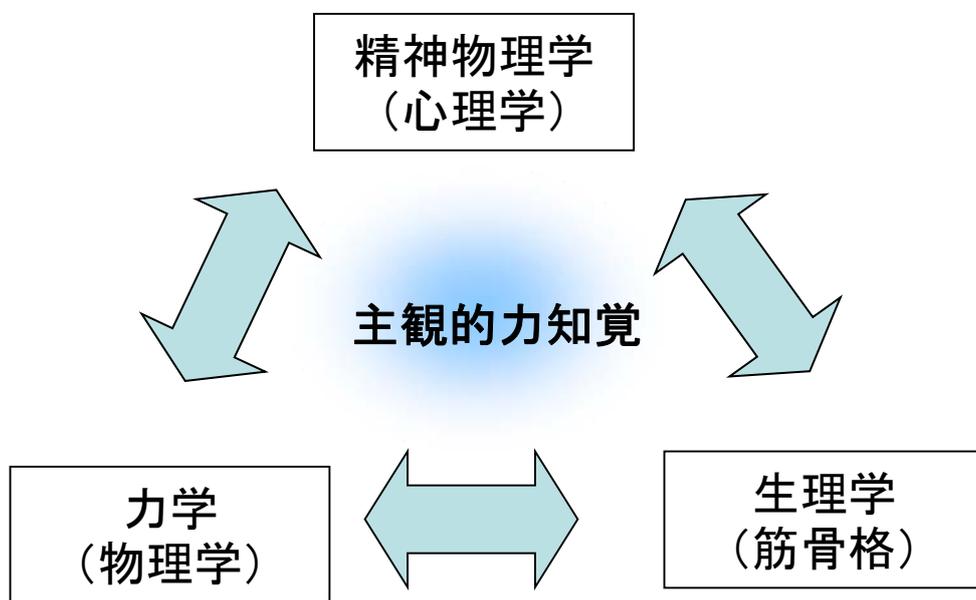


図 1.1 人間の知覚特性解明へのアプローチ

## 1.2 関連する従来研究

人間の運動特性のモデル化に関する従来研究として、Mussa-Ivaldi らは、強制変位を与えた直後の手先変位と手先力を計測することで、手先剛性が腕の姿勢に依存することを明らかにし<sup>(1-6)</sup>、辻らは、剛性、粘性、慣性を含む手先インピーダンス特性のモデル化を実現した<sup>(1-7)</sup>。田中らは、ステアリング操作における手先インピーダンスを計測することで、ステアリング操舵力に対する人間の運動インピーダンス特性を明らかにし<sup>(1-8)</sup>、また、下肢操作においては、人間の関節トルクが発揮する特性を明らかにすることで、力の発揮効率を表す操作力楕円体を提案している<sup>(1-9)</sup>。羽田らはそうした四肢の運動特性を踏まえ、人間と操作系との接触条件や拘束条件を考慮することで、等価インピーダンスに基づくステアリングやペダルのレイアウトを検証する方法を述べている<sup>(1-10) (1-11) (1-12)</sup>。池浦らは、ステアリングを操作する際のインピーダンス特性を計測し、ドライビングシミュレータを用いたスラローム走行時において、位置決めやし易さや抵抗感など、4つの主観評価結果を腕の剛性から表現できることを述べている<sup>(1-13)</sup>。Kim らは、ジョイスティック型のステアリング装置を操作する際の人間の腕のインピーダンス特性を調べており、上肢姿勢の変化や、上肢姿勢一定の場合でも時間変動に依存し、インピーダンスが変化することを明らかにしている<sup>(1-14)</sup>。このように、運動特性においては、姿勢変化を伴うメカニズム解明をすることで、四肢のインピーダンスに基づく運動特性のモデル化を実現している。

一方、知覚特性に関しては、例えば視覚において、Stevens らは、明るさ（感覚量）と輝度（刺激量）の関係が指数関数的な関係であることを述べており<sup>(1-15)</sup>、長田らは、奥行きについて視距離と奥行弁別距離から奥行感度を提案し、奥行の主観距離はLunenburgの仮定と同様に飽和特性になることを報告している<sup>(1-16)</sup>。力の知覚特性について、辻らは、1次元直線運動におけるロボットインピーダンスの知覚特性について、人間のインピーダンス知覚特性はウェーバーの法則に従うこと、また、剛性、粘性、慣性の3種類のうち、1種類のインピーダンスのみを変更して被験者に提示した時、被験者のインピーダンス知覚能力が高いこと、3種類全てのインピーダンスを変更して被験者に提示すると知覚能力が低下することを報告している<sup>(1-17)</sup>。田中らは、2次元水平面上でのスライダ操作において、被験者の上肢姿勢をギプスなど用いて維持させた際、手先運動の反力知覚特性がウェーバー・フェヒナーの法則に従うこと、また、被験者に提示する力の方向によって力の知覚特性が異なることを述べている<sup>(1-18)</sup>。また、Jones らは、指、手首、肘の関節において筋の太さが知覚能力に影響を与えること、手と肘で

は実際の力と再現した力の関係は非線形であることを述べている<sup>(1-19)</sup>。A.C. Newberry らは、ステアリングの反力知覚において、人間はトルクよりも力を、そして、ステアリングを持つ手の変位よりも操舵角を知覚していることを明らかにした。さらに、ステアリング操作時の人間の知覚特性について、スティーヴンスの指数法則に基づき、5.25~21 [N]の反力では力増加の知覚が力増加量の1.39の累乗であり、4~16 [deg.]の小舵角においてはステアリング角度増加の知覚は角度増加量の0.93の累乗であることを述べている<sup>(1-20)</sup>。このように、一定姿勢の条件下では四肢における力知覚特性が一部明らかにされているが、車のステアリング操作において腕の姿勢が大きく変化する際の力知覚特性についてはまだ明らかにされていない。

ステアリングフィールについては、山田らは、ドライビングシミュレータを用い、ステアリング特性における減衰の大きさと最大静止摩擦トルクが半径400mの旋回区間を有するコース走行時の操舵の安定性や車両制御のしやすさに影響することを示した<sup>(1-21)</sup>。実車走行における横加速度とステアリングトルクの関係について、M. Salaani らは、速度違いによる蛇行テストの分析をおこなっている。その結果、操舵角力特性においてステアリングに加える力と負担感の関係や直線的な操舵感覚、増加、減少を感じる操舵角を視覚的に表記でき、ステアリングフィールの性能評価ができることを述べている<sup>(1-22)</sup>。さらに、フィーリングに関する感性のモデル化について、上原らはドライバーのフィーリングと操縦安定性能の関連度について議論し、五感で感じる操舵角度の変位や加速度は主観評価と強く関連しているが、ヨーレイトゲインや応答の時間遅れなどのドライバーの認知による運動力学特性はドライバーの経験に応じて主観評価と結びつく可能性が高いことを述べている。また、商品性に関する感性評価ではドライバーの好みに起因する要素が支配的であることや、スポーツカーで良いとされる特性がファミリーカーでは良いとは限らないことから、全てのカテゴリーの車にあてはまる評価項目ばかりでないことを言及している<sup>(1-23)</sup>。佐藤らはステアリングの操舵感を、手応え感、ハンドル戻り感、操舵トルクの位相遅れ感の3つに分類し、4台の車両の機械特性とスラローム走行での官能評価結果との関係から、感覚の定量化について述べている<sup>(1-24)</sup>。脇田はエンジン音と排気音の音色について、実車の排気音から一部をサンプリングすることで音色の変化を排除した合成音の官能評価をおこない、重回帰分析の結果から排気音色の性質や位置づけを明らかにしている<sup>(1-25)</sup>。Zhang らは、商用トラックの内装を対象とした顧客の視覚的な印象を調査し、数量化理論を用いることで、トリムの材質、形状、色、窓の形、地図のポケットが上品な感覚と強く影響し、トラックドライバーの好みのデザイン要素であることを明らかにしている<sup>(1-26)</sup>。以上のように、ステアリングフィールについては、ドライビングシミュレータや実車走行での走行結果分析による研究が

あり、運動特性の研究においても、人間の腕のインピーダンス特性による操舵時の主観推定やインピーダンス特性が変化する要因の研究がおこなわれている。さらに、感性のモデル化については、自動車のステアリング操作特性や排気音、内装などと人間の官能評価との関係解明、及び、定量化が 2000 年頃まで活発におこなわれている。

しかし、これらの研究の中には交差点や山道で使用するような大きな操舵角 ( $\pi/2 \sim 2\pi/3$  [rad]) の反力知覚特性については詳細な検討は見当たらず、そうした知覚特性を踏まえた感性のモデル化はおこなわれていない。

### 1.3 本論文の概要

そこで、本研究では多関節運動を伴うステアリングホイール操作について、人間の反力知覚特性のモデル化を行い、人間の主観的な力空間への変換法を新たに提案するとともに、その有効性について検証する。

第 2 章では、多関節操作で姿勢が大きく変化する運動特性としてステアリング操作を取り上げ、その操作による手先力の変化に対する人間の主観的な力知覚特性を明らかにする。

第 3 章では、反力変化と上肢姿勢変化を組み合わせた条件での人間の知覚特性を実験的に明らかにする。さらに、人間の主観的な反力知覚特性を表現するモデル式を導出し、自動車開発におけるステアリングの操舵角力特性の設計において、ステアリングの機械特性を人間の主観的な力空間に変換できることを示す。

第 4 章では、第 3 章のモデルを元に操舵特性と感性との関係解明をおこない、主観的な力空間への変換効果を明らかにすると同時に、感性の最適設計を提案する。

第 5 章では、第 2 章～第 4 章までの概要及び結論と、今後の課題について述べる。

## 第2章

# 人間の力知覚特性の解析

### 2.1 はじめに

感性に訴える車造りは重要であり，そうした車に求められている性能の1つにドライバーの感性にあった操作特性がある<sup>(2-1)</sup>．例えば，軽快でリニアリティーがあり，スムーズな操作感を実現するため，テストドライバーは納得するまでチューニングを繰り返し，その造り込みを行なっている．これらの開発を効率的に行うには，開発初期に狙った操作感を物理量として設計値に反映しておく必要がある．そのためには，人間の感覚特性を用いたシミュレーション技術を構築する必要がある．このようなシミュレーション技術が実現できれば，設計段階で人間の感覚を予測することが可能となる．これには，それぞれの操作機器に対して，人間の四肢における運動特性と知覚特性を明らかにし，それらのモデル化を行う必要がある．

一定姿勢の条件下では四肢における力知覚特性が一部明らかにされている<sup>(2-2)</sup>が，車のステアリング操作のような双腕でかつ腕の姿勢が大きく変化する際の力知覚特性についてはまだ明らかにされていない．

例えば，同じ力を与えても姿勢が大きく変化するすると，異なる力に感じる可能性がある．そこで，本章では，多関節操作で姿勢が大きく変化する運動特性としてステアリング操作を取り上げ，その操作による手先力の変化に対する人間の主観的な力知覚特性を明らかにする．

この章の構成は以下の通りである：2.2 節では，力知覚特性の計測にあたり，装置の説明と知覚計測手法について述べる．2.3 節では，実験結果について，反力変化による影響，操舵角変化による影響，動的操作による影響を述べる．2.4 節では個人差によるばらつきについて述べ，2.5 節では結論と今後の課題について述べる．

## 2.2 力知覚特性の計測方法

主観的な力知覚特性を明らかにするため、被験者には反射運動を起こさせずに意図した反力を手先で知覚させる必要がある。そのために本章では定置型のドライビングシミュレータを開発した。この概要図を図 2.1 に示す。本装置はダイレクト・ドライブ型の回転モータ (M-YSB, (株) 日本精工製: 最大出力トルク 20 [Nm] ), その制御を行う計算機, 操舵角や反力知覚量を答えるタイミングを表示するディスプレイから構成されている。

モータの回転可動部に取り付けた操舵力計 (TR60, (株) 総合計装製: 定格トルク 50 [Nm] ) とステアリング (半径:  $r=0.185$  [m] ) によって、被験者が発揮するステアリング操舵力を計測する。ステアリング回転角度は、モータに内蔵されたエンコーダ (分解能: 51200 [pulse/rad] ) より求める。なお、モータ制御は、DSP ボード (ds1103, dSPACE 社製) を用いて、実車のステアリング操作と同様な計測・制御を実現している。

モータの挙動は、操舵力とステアリング回転角度によってインピーダンス制御され、被験者の手先に意図した反力を発生させる。モータの動特性は次式で表わされる。

$$M\ddot{\theta}^*(t) + B\dot{\theta}^*(t) + K(\theta^*(t) - \theta_v(t)) = \tau(t) \quad (1)$$

ここで、 $\theta^*(t)$  は式(1)のインピーダンス特性が実現された時の理想的な操舵角であり、 $M$ はステアリングの慣性モーメント、 $B$ は粘性、 $K$ は剛性、 $\theta_v(t)$ は手先の平衡点 (仮想軌道)、 $\tau(t)$ は人間がステアリングに加えるトルクである。ステアリングが発振しないようにこれらのパラメータを調節することで、被験者にさまざまなステアリング反力を与えることが可能となる。被験者に提示する反力の大きさは、ステアリングに設定する剛性  $K$  を調節して実現した。なお、被験者に反力を与える際は反射運動を抑制するため、平衡点  $\theta_v(t)$  は次式の躍度最小モデル<sup>(2-1)</sup>に従って指定角度  $\theta_f$  だけ滑らかに移動させた。

$$\theta_v(t) = \theta(0) + \theta_f(6s^5 - 15s^4 + 10s^3) \quad (2)$$

ここで  $\theta(0)$  はステアリングの初期角度、 $s = t/t_f$  は  $t$  を移動時間  $t_f$  で正規化した時間であり、本章の実験では  $t_f = 4$  [s]、 $\theta_f = 10$  [deg.] とした。また、安定したステアリング操作を実現するため、剛性  $K$  に応じてステアリング

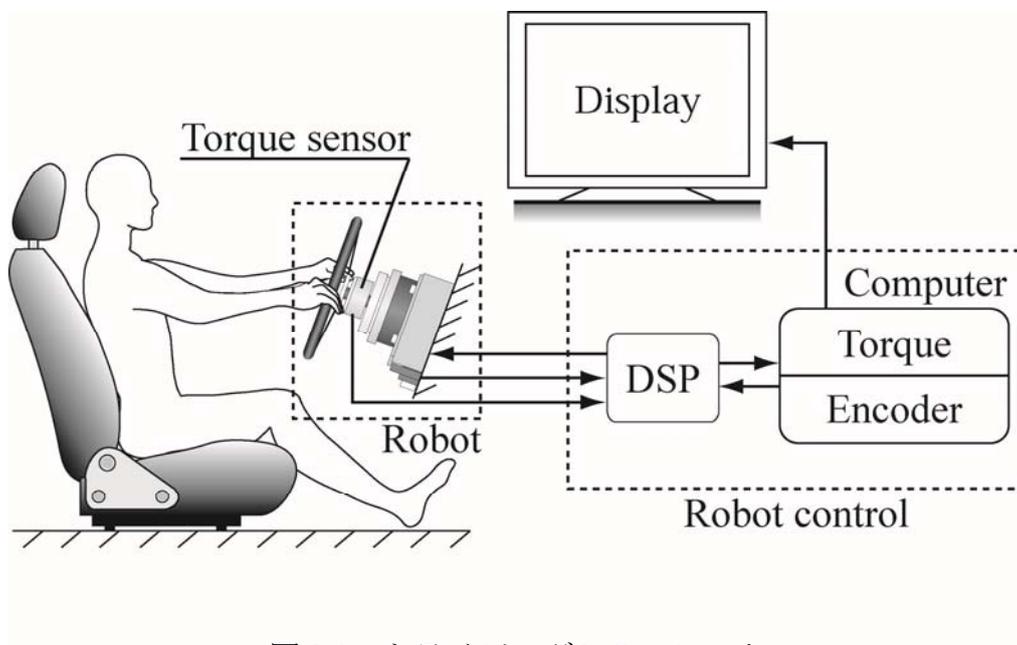


図 2.1 ドライビングシミュレータ

Steering

慣性モーメント  $M=0.03$  [kgm<sup>2</sup>]の下で，減衰係数  $\zeta=1.2$  となるように粘性  $B$  を自動調節した．以上より，被験者がステアリング角度を  $\theta(0)$  に維持し続けた場合，被験者の手先に発生する反力  $F$  はステアリング半径が  $0.185$  [m]を用いて次式で与えられる．

$$F(t) = \frac{K(\theta_v(t) - \theta(0))}{0.185} \quad (3)$$

以上のステアリング操作における手先インピーダンス制御を実現するため，モータには目標角度軌道  $\theta^*(t)$  を与えて次式のPID制御則により追従させた．

$$T = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

ここで， $T$ はモータの駆動トルク， $e(t) = \theta^*(t) - \theta(t)$  は目標角度と現在角度の差であり， $K_p$ ， $K_i$ ， $K_d$  はそれぞれ比例ゲイン，積分ゲイン，微分ゲインである．本章では，サンプリング周波数を  $1$  [kHz]とし， $K_p = 90$  [Nm/rad]， $K_i = 1.5$  [Nm/srad]， $K_d = 1$  [Nms/rad]と設定した．

## 2.3 実験

実験は提示された反力を被験者が知覚し，その反力の大きさを口述する口頭試問による形式とした．なお，被験者の主観的な力知覚特性の測定実験はマグニチュード推定法に基づいて実施し，事前に被験者には十分な練習を行わせた．被験者は22～45才までの4名（男子大学生2名，社会人2名）で，図2.1に実験時の被験者の姿勢を示す．日常における被験者4名の運転姿勢を計測した結果，それぞれの平均値はステアリングの傾きが  $30$  [deg.]，トルソー角が  $22$  [deg.]となり，これを実験時の姿勢とした．また，被験者1名のステアリングから肩までの距離が  $580$  [mm]，座骨からステアリングまでの高さが  $330$  [mm]であり，他の被験者もほぼ同等であることを確認している．なお，本章では， $0 \sim 120$  [deg.]における右回転の送り操舵に対して実験を行った．実験条件は，以下に示す3条件である．（表2.1参照）

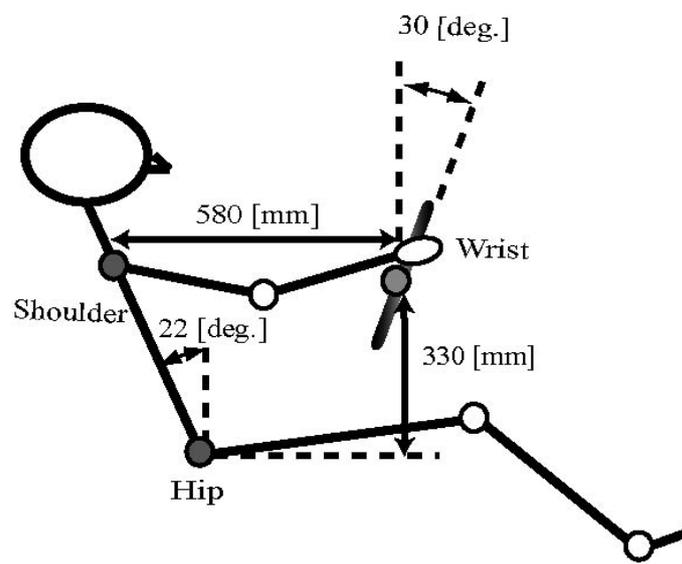


図 2.2 被験者の姿勢

表 2.1 実験条件

	2.3.1	2.3.2	2.3.3
Standard: comparing angle of rotation	Same angles	Different angles	Different angles
Reaction force	Diffrent forces	Same forces	Same forces
State of reactive force	Static	Static	Dynamic

### 2.3.1 ステアリング反力の変化に対する力知覚特性

まず、被験者がステアリングから反力を受ける時の、双腕による力知覚特性を明らかにするため、被験者が姿勢を維持した状態で、異なる反力をどのように知覚したかを調べた。反力は式(1)～(4)を用いてモータを駆動させ、回転しようとするステアリングを被験者が阻止することで力を知覚させる。ここで被験者の姿勢を維持したまま、式(2)を用いて  $t_f = 4$  秒間ステアリング反力を徐々に増加させ、その後さらに 5 秒間一定のステアリング反力を提示した。その時、手先に発生する反力は  $F_t = K\theta_f / 0.185$  となる。被験者には知覚した反力（比較刺激）の大きさを標準刺激に対するパーセンテージで回答させた。標準刺激は 20 [N]、比較刺激 5, 10, 15, ..., 40 [N] の 8 種類で、最初に標準刺激を 1 回提示した後、比較刺激をランダムに 3 回提示する。比較刺激の計測回数が各反力で 5 回ずつの計 40 回となるまで測定を繰り返し、これらを操舵角  $\theta(0) = 0, 60, 120$  [deg.] の 3 条件でそれぞれ行った。

### 2.3.2 ステアリング操舵角の変化に対する力知覚特性

次に、被験者がステアリングから反力を受ける時、異なる操舵角の姿勢変化において、反力を一定とし、その反力に対してどのように知覚するかを調べた。実験は、2.3.1 と同様に反力提示方法を用いた。標準刺激は操舵角 0 [deg.] で反力 20 [N]、比較刺激は操舵角 0, 30, 60, 90, 120 [deg.] の 5 種類で反力 20 [N] で、比較刺激はランダムに提示した。計測回数は、比較刺激が各操舵角で 5 回ずつの計 25 回となるまで計測を繰り返した。その他の実験条件は 2.3.1 と同じである。

### 2.3.3 動的操作における力知覚特性

次に、被験者自らステアリングを操作した際、操作後の姿勢変化が人間の力知覚特性にどのような影響を与えるかを明らかにするため、2.3.3 では、自ら操舵した動的操作の後、被験者に指定した操舵角までどのように反力を知覚したかを調べた。ただし、標準刺激は操舵角 0 [deg.] では 2.3.2 と同じ静的な状態で反力を提示され、比較刺激の操舵角 30, 60, 90, 120 [deg.] の 4 種類では被験者自らの動的操作により反力を提示した。比較刺激はランダムに提示し、各操舵

角で 5 回ずつの計 25 回となるまで測定を繰り返した。実験では、まず、被験者に  $\theta(0) = 0$  [deg.] で姿勢を維持させ、 $\theta_t$  まで 20 [deg./s] でステアリングを等速回転させる。この時、操舵速度をできる限り一定に保つため、図 2.3 のように、ディスプレイの画面上に目標とする一定の操舵速度で動く目標と被験者の操舵角を提示し、できるだけ目標と同じ速度で操舵するように被験者に指示した。操舵中に被験者へは操舵角に応じた反力を次式で与えた。

$$F(t) = F_t \frac{\theta^*(t)}{\theta_t} \quad (5)$$

ただし、 $F_t$  は最終的に被験者に提示する反力、 $\theta_t$  は知覚させたい指定の操舵角である。つまり、被験者に与える反力は、現在の操舵角に応じて目標の反力まで力を線形的に増加させた。なお、被験者には操舵角  $\theta(t)$  に到達後、2 秒間姿勢を維持するよう指示した。

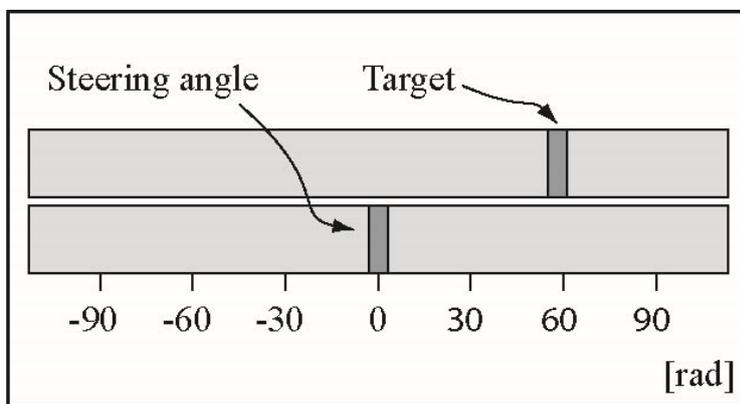


図 2.3 操舵角のターゲット位置

## 2.4 実験結果

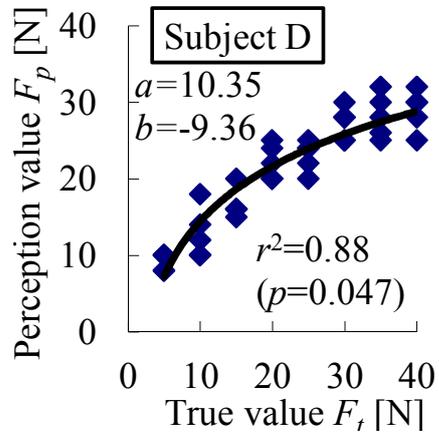
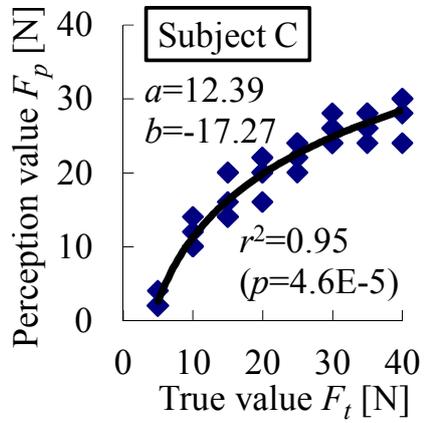
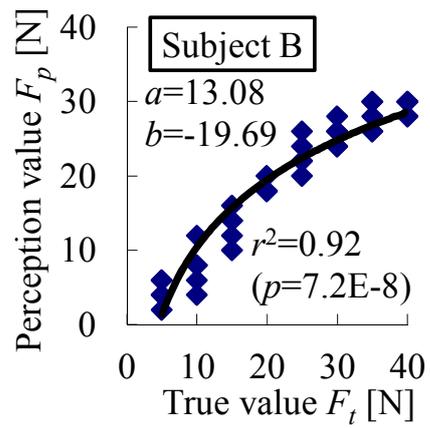
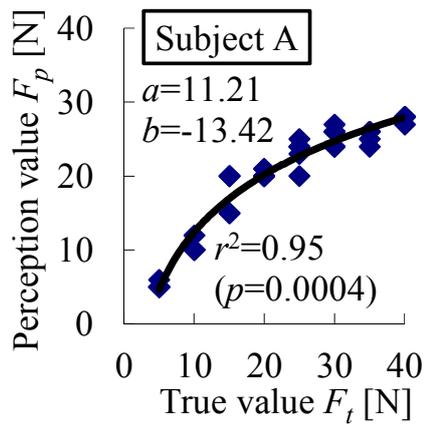
### 2.4.1 反力変化について

ステアリング反力を変化させた際の人間の知覚量と与えた物理量の関係を図 2.4 に示す。図は被験者 4 名の結果であり、図の(a), (b), (c)は、それぞれ操舵角  $\theta(0)$  が 0[deg.], 60[deg.], 120[deg.]の場合である。横軸は提示した力  $F_t$ 、縦軸は被験者が知覚した力  $F_p$  で、実線は最小二乗法により求めた次式である。なお、係数  $a$ 、 $b$  および決定係数  $r^2$ 、片側検定で算出した  $p$  値を図中に示す。

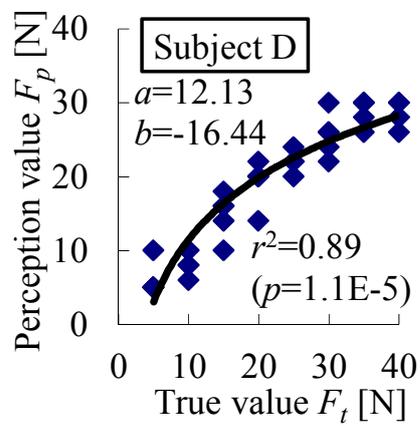
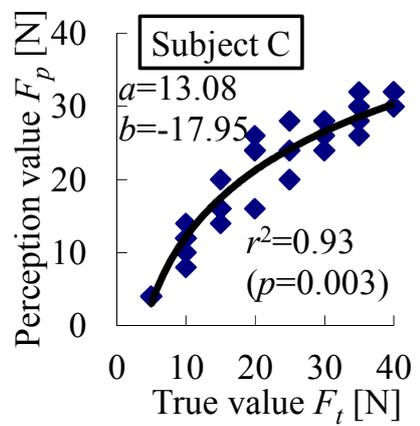
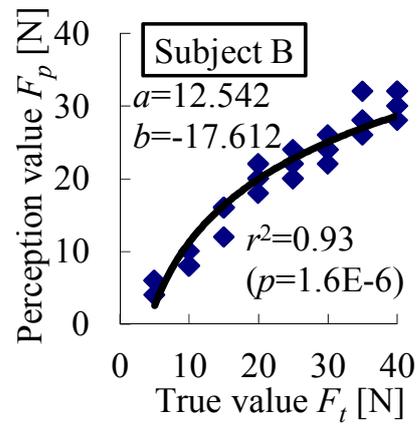
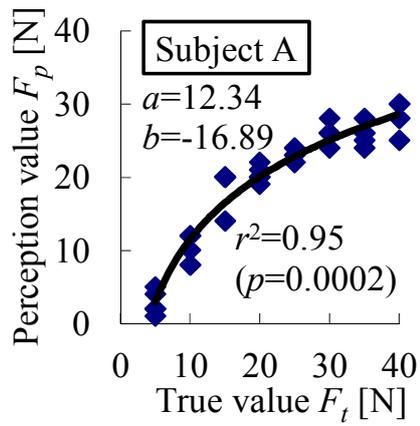
$$F_p = a \log(F_t) + b \quad (6)$$

図 2.4 から、すべての条件で  $r^2$  は 0.88 以上、 $p$  値は 0.047 以下となり、すべての実験条件において式 (6) により実験結果を示すことができる。この結果は、実際の反力に対し、知覚された力は対数比例しており、反力が大きくなると力の知覚が鈍くなっている。以上のことから、ウェーバー・フェヒナーの法則をほぼ満たしていることが分かる。これは、片腕操作における反力知覚特性<sup>(11)</sup>と同様の傾向を示している。

操舵角が増えた場合においても、この傾向は同様であり、標準刺激と比較刺激を与えた姿勢が同じであれば、力知覚量の特徴は大きく変わらないことが明らかになった。



(a)  $\theta(0)=0$  [deg.]



(b)  $\theta(0) = 60$  [deg.]

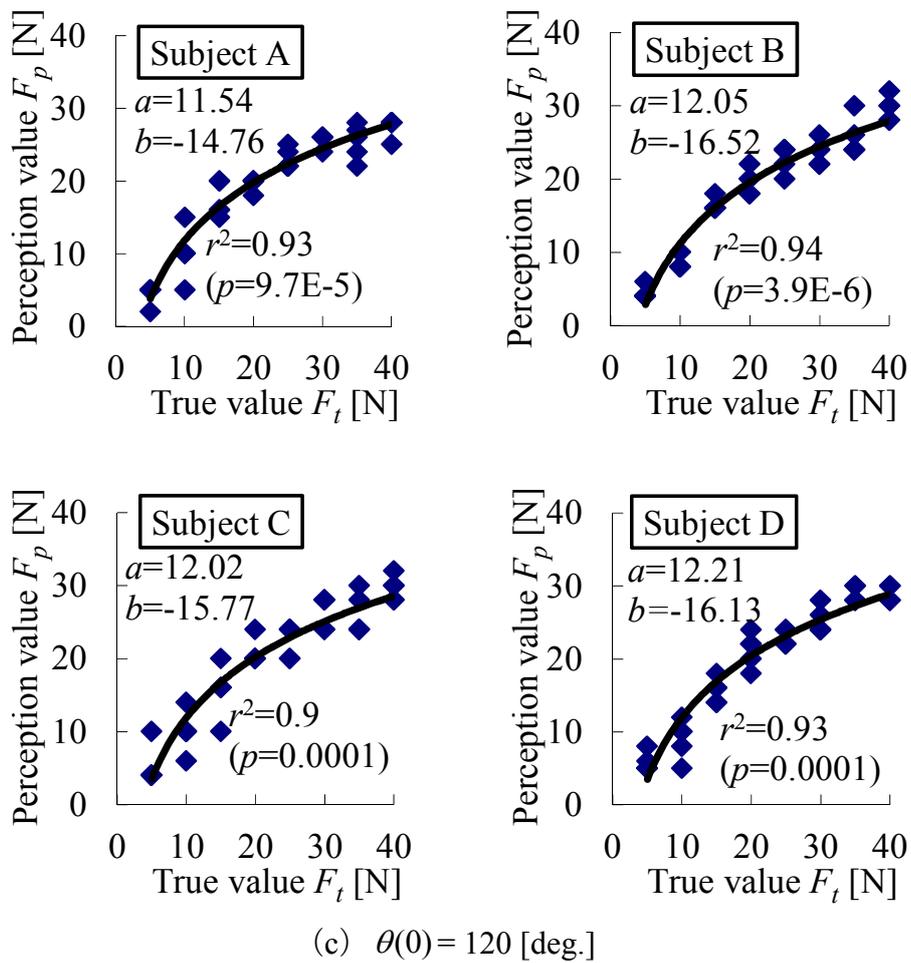


図 2.4 3つの異なるステアリング操舵角  $\theta(0)$  での反力知覚特性

## 2.4.2 姿勢変化について

操舵角変化が人間の力知覚特性に与える影響を調べるために行った 2.3.2 の実験結果を図 2.5 に示す。図は被験者 4 名分の結果で、横軸は操舵角  $\theta(0)$ 、縦軸は被験者が知覚した力  $F_p$  である。図中、実線は最小二乗法により求めた次式である。

$$F_p = c\theta(0) + d \quad (7)$$

なお、係数  $c$ 、 $d$  および決定係数  $r^2$ 、片側検定で算出した  $p$  値を図中に示す。ただし、被験者による回答のばらつきの影響を抑えるため、各条件における 5 試行分の結果から最も平均から離れた 2 点を除き、3 点の結果を各記号 (■, ▲, ×) でプロットした。被験者によるばらつきはあるものの、全ての被験者で操舵角が大きくなると力を小さく感じる傾向を確認できる。このような傾向となる原因として、ステアリングの接線方向にかかる腕の自重の影響や、姿勢変化による力の発揮効率の変化、筋の状態変化などが推察される。

そこで、まず腕の自重の影響について調査した。腕の自重による影響は、人体モデルを用いた MADYMO などによる力学計算でも可能であるが、姿勢維持に伴う筋活動や皮膚・組織の引っ張りによって発生する張力の影響などを考慮すると、力学計算では誤差が生じる可能性がある。そこで今回は実測データにより検討を行った。

被験者を脱力させた状態でステアリングを把持させ、操舵角を変化させながらステアリングにかかるトルクを計測し、腕の自重によってステアリングの接線方向に加わる手先力を算出した。図 2.6 に被験者 4 名の計測結果を示す。図中の破線が左腕の手先力、一点鎖線は右腕の手先力、実線が両腕による手先力である。この間、ステアリングの回転方向は右である。この結果から、姿勢変化によって腕の自重による手先力が変化することが分かる。前節の 2.3.2 の実験では、被験者に提示した反力の方向は、ステアリングの左回転方向である。そのため、被験者は右回転方向に手先力を発生する必要がある。その時、腕の自重によって右回転方向の手先力が発生するため、被験者は腕の自重分の手先力を発生する必要がなく、発生すべき手先力は少なくて済む。このことから、力知覚量が減少したと推測できる。

この推測を検証するため、被験者に加える反力を逆向きにすることで、力知覚量はどのように変化するかを調べた。この場合、被験者は自重によって発生する

手先力の方向とは逆向きの力を加える必要があり，ステアリングの位置を保持するためには，より大きな力を発生する必要があると考える．結果を図 2.7 に示す．図は被験者 4 名分の結果で，横軸は操舵角  $\theta(0)$ ，縦軸は被験者が知覚した力  $F_p$  である．図中の実線は，操舵角  $0 \sim 60$  [deg.] までの結果を式(7)を用いて最小二乗法により求めた．なお，係数  $c$ ， $d$  および決定係数  $r^2$ ，片側検定で算出した  $p$  値は図中に示す．予想通り全ての被験者で  $0 \sim 60$  [deg.] までは，図 2.5 とは逆に，操舵角が大きくなるにつれて力を大きく感じる傾向が確認できた．

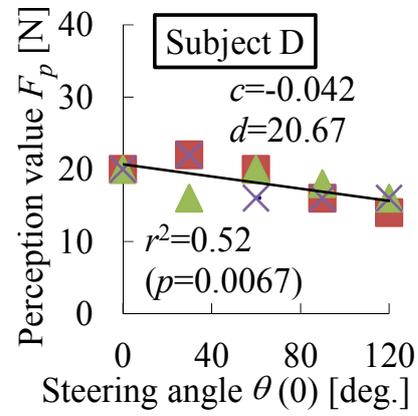
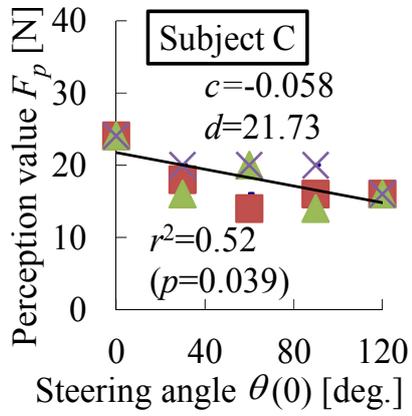
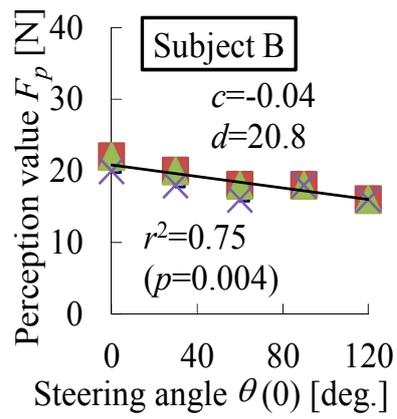
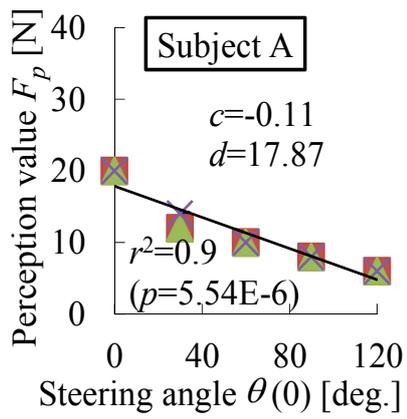


図 2.5 操舵角  $\theta(0)$  による反力知覚特性の変化

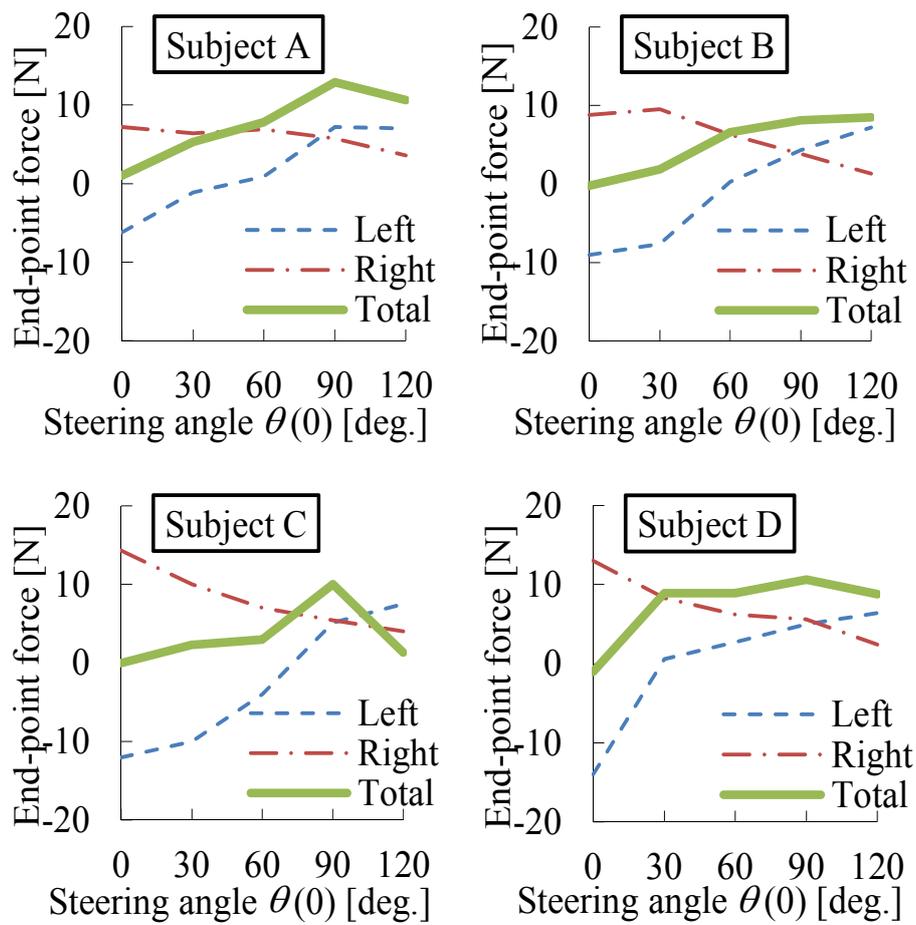


図 2.6 操舵角に伴うステアリング接線方向の腕の自重

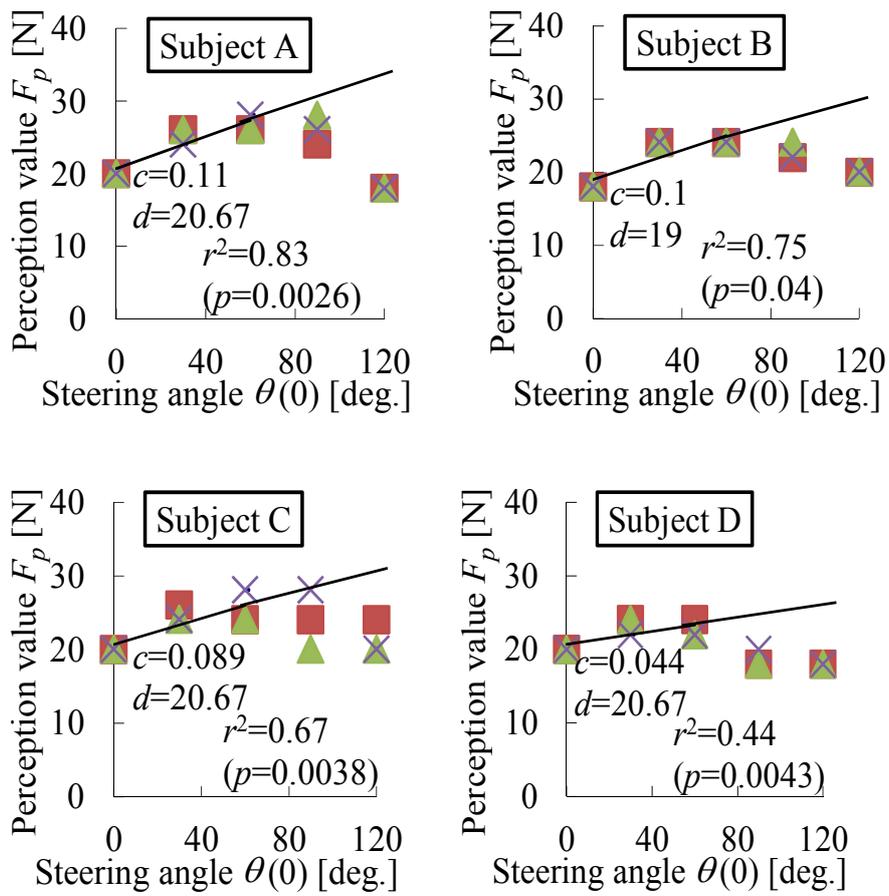


図 2.7 操舵方向に影響する反力知覚特性

しかしながら、全被験者とも 90~120 [deg.] では、力知覚量が減少する傾向を示した。この結果から、腕の自重だけでなく他の要因も考えられる。この現象を調べるために、知覚特性に影響を与えると考えられる筋の活動レベルの計測を試みた。計測では、上肢筋群の収縮レベルを解析するため、肘関節の屈曲と前腕の回外を行う屈筋（上腕二頭筋: CH 1, 2）、肘の伸展を行う前腕屈曲位の拮抗筋（上腕三頭筋: CH 3, 4）、手首の掌屈、尺屈を行う屈筋（尺側手根屈筋: CH 5, 6）の表面筋電信号をマルチテレメータ（WEB-7000, (株) 日本光電製）を用いて測定した（図 2.8 参照）。なお、CH 番号の奇数が右腕、偶数が左腕である。そして、6つの筋から計測した表面筋電信号を窓幅 0.1 秒間で全波を整流積分した後、関節可動域の中立位における最大随意収縮 (%MVC) 時の整流積分値で正規化し、これを筋収縮レベルと定義した。実験では、20 [N] の反力を提示したときの筋活動を 0, 30, 60, 90, 120 [deg.] の各姿勢に対して計測した。全操舵角条件で被験者の手先に加える反力の方向を左回転方向（図 5 の実験条件に対応）、右回転方向（図 2.7 の実験条件に対応）の 2 種類とし、それぞれ 2 回ずつ計測した。なお、被験者には 2.3.2 の知覚時と同様に姿勢を維持するよう指示した。

被験者 A を例に、手先に加えた反力の方向による筋収縮レベルの変化を図 2.9 に示す。図 2.9 (a) が左回転方向、(b) が右回転方向の結果である。なお、図中の %MVC は、反力が定常状態である 3 秒間のうち、中間の 1 秒間の筋収縮レベルの平均値である。この結果から、90 [deg.] 以上では、CH4 の筋収縮レベルは右回転方向の方が大きいことが見て取れる。また、その拮抗筋である CH2 は図 2.9 の(a)と(b)では差が無いことより回転方向に影響せず、CH4 の筋収縮は自ら力むことで行なわれたのではないことが分かる。なお、他の被験者も同様の傾向であることを確認した。これは、操舵角が大きくなると左腕の自重が大きくなり（図 2.6 参照）、自重は反力と同じ右回転方向となるため、結果として操舵角を維持するのに必要な力が大きくなる。つまり、90~120 [deg.]における左回転方向（図 2.9 (a)）に対して、右回転方向（図 2.9 (b)）では図 7 の様に力知覚量は減少傾向であるものの、自重の影響により被験者が発生すべき手先力が大きくなることが明らかとなった。

一方、力知覚量が減少傾向であることについては力知覚特性の影響で一部説明できる。まず、反力が左回転方向の 0 [deg.]における筋電（図 2.9(a)）は、同じ回転方向である図 2.4(a)の反力 20 [N]に相当する。次に、反力が右回転方向の 90~120 [deg.]における筋電（図 2.9(b)）は、CH4 が左回転方向に比べて大きく、図 2.4(a)で該当する反力は 20 [N]より大きいと考えられる。その際、ウェーバー・フェヒナーの法則から大きな力は小さく知覚していると想定され、このこと

から、90～120 [deg.] は自重の影響と反力の回転方向から大きな力を受けているにもかかわらず、力の知覚特性により小さく力を知覚していることが推察できる。

しかしながら、力知覚量が標準刺激よりも低い値となることは説明できず、姿勢変化に伴う力の発揮効率の影響<sup>(2-3)</sup>や、筋収縮レベルが大きくなると腕の剛性が上がり硬くなること<sup>(2-4)</sup>が示唆される。

また、操舵方向による反力の知覚影響を明らかにするため、これまで操舵方向が右方向であるのに対し、左方向で同様の実験を実施した。その結果を図 2.10 に示す。図は、被験者 1 名の結果であり、図 2.5 と同様に右肩下がりの知覚傾向である。このことから、反力の知覚影響は操舵方向に影響されにくいことが判明した。

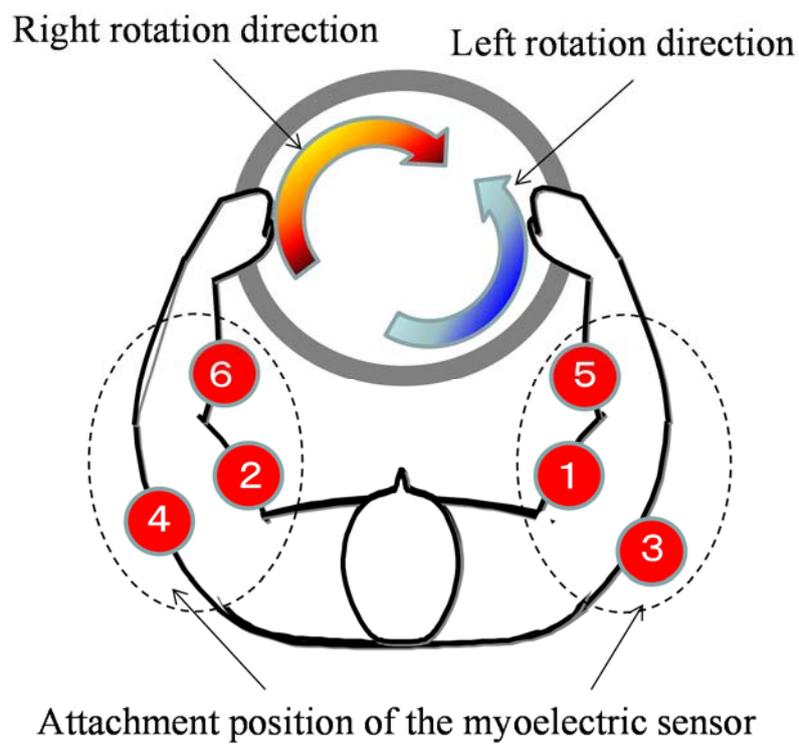
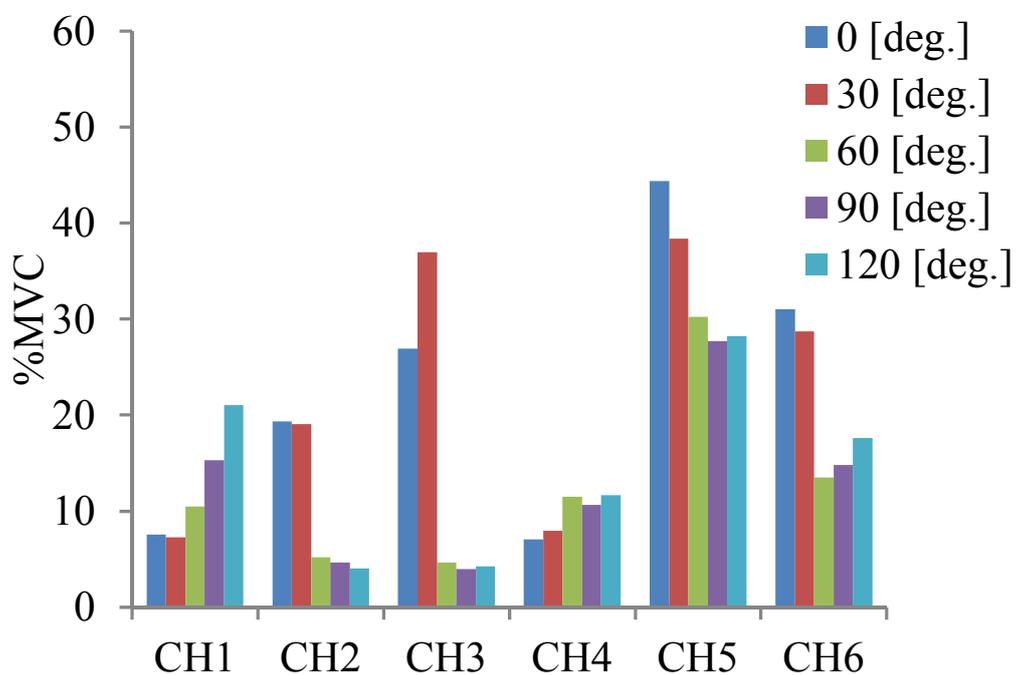
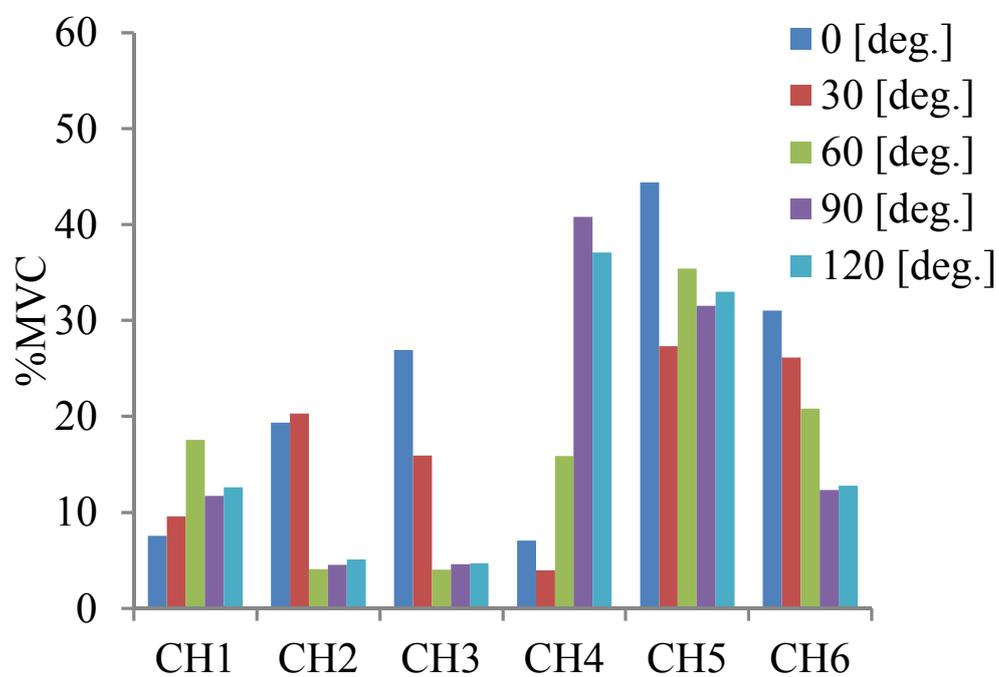


図 2.8 筋電の貼り付け場所とステアリングの反力発生方向



(a) 反力発生方向が左回転



(b) 反力発生方向が右回転

図 2.9 静的条件での反力知覚実験における筋活動レベル (被験者 A)

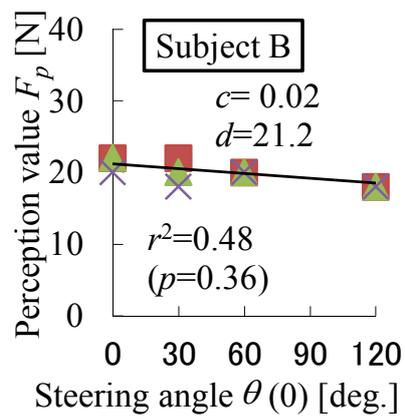


図 2.10 操舵角  $\theta(0)$  による反力知覚特性の変化 (反力は左回転方向)

### 2.4.3 動的操作について

これまでの実験は、被験者自身の腕は静止しており自動で回転しようとするステアリングを阻止することで反力を知覚する静的な実験条件であった。本節では、被験者自ら腕を動かし、日常の運転に近い状態で反力を知覚させる動的な実験条件で計測を行った。被験者 4 名分の結果を図 2.11 に示す。横軸は操舵角  $\theta_t$ ，縦軸は被験者が知覚した力  $F_p$  で、式 (8) を用いて最小二乗法によりフィッティングした実線とともに示す。

$$F_p = c\theta_t + d \quad (8)$$

なお、係数  $c$ ， $d$  および決定係数  $r^2$ ，片側検定で算出した  $p$  値を図中に示す。

図 5, 10 の結果から静的条件と動的条件の知覚特性は、右下がりの同じ傾向であることが分かる。次に、反力知覚時における筋の収縮レベルについて調査した。計測方法は 2.3.2 と同様であるが、動的条件では操舵角が目標角度  $\theta_t$  に到達した 1 秒後から 1 秒間の筋収縮レベルの平均値を用いた。被験者 B を例に、静的条件、動的条件における筋収縮レベルを図 2.12 に示す。図 2.12 (a) の静的条件と図 2.12 (b) の動的条件を比較すると、筋収縮レベルは全 CH において 20%未満であり、微小な差はあるものの傾向が似ていることが分かる。微小な差に関しては、静的に比べ動的は操舵角が大きくなるに従い自らの力で操舵する時間が長くなり、その間、左右の腕でバランスをとりながら操舵していることが影響しているのではないかと推察する。他の被験者も同様の傾向を示しており、ステアリング操作における力知覚量は、腕の運動履歴には依存しないことが明らかになった。

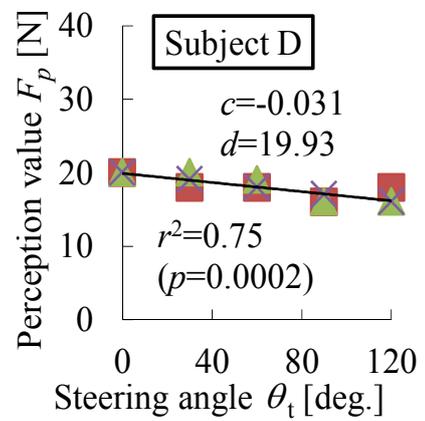
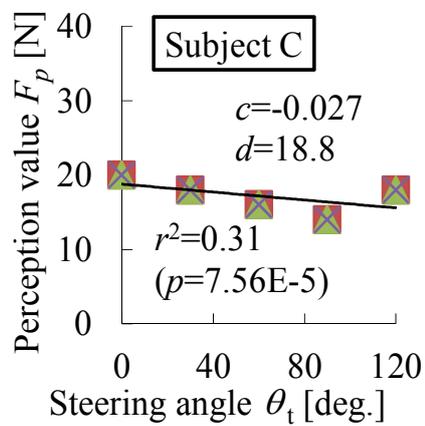
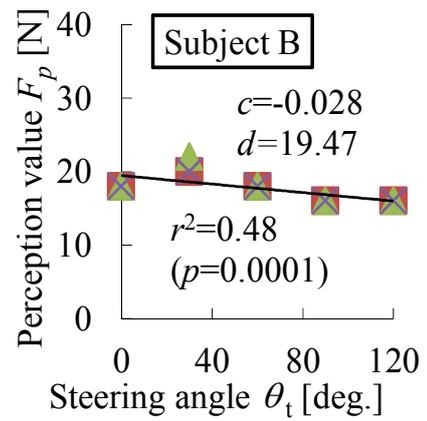
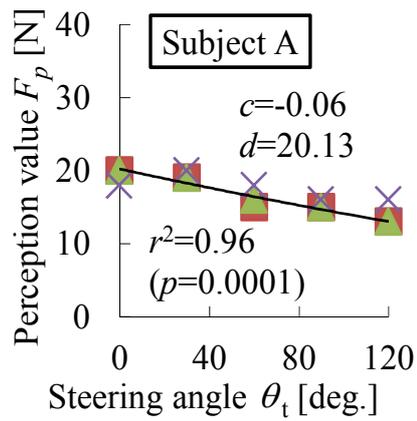
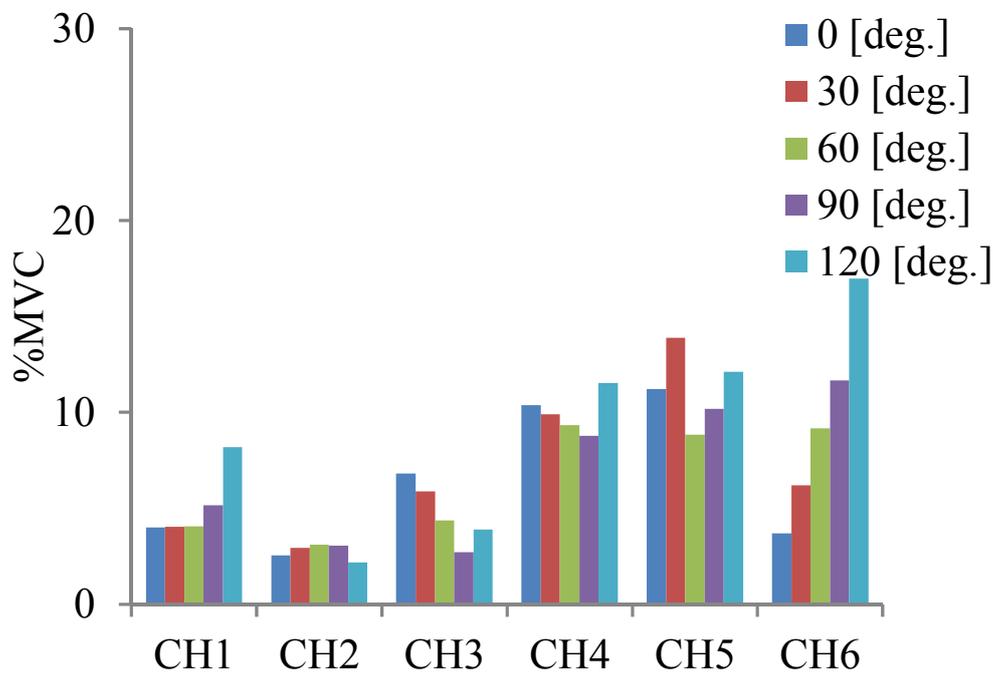
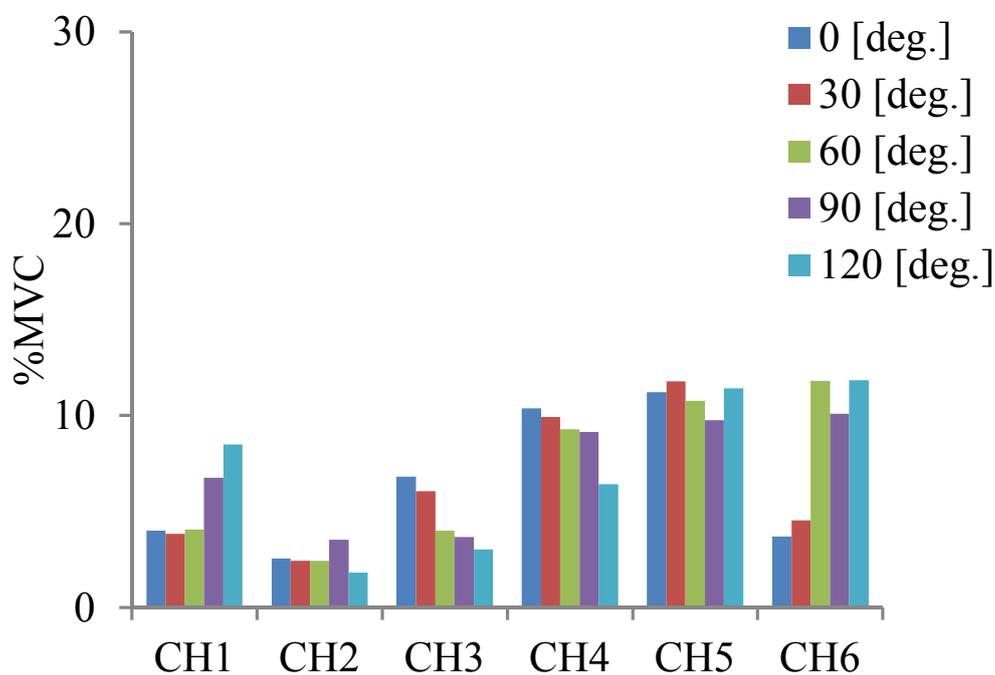


図 2.11 動的条件での反力知覚特性



(a) 静的条件での筋活動



(b) 動的条件での筋活動

図 2.12 静的条件と動的条件での反力知覚実験における筋活動レベル (被験者 B)

## 2.5 考察

実験結果に含まれる個人差とばらつきを評価するため、式(6)および式(7)に含まれるパラメータ  $a, b, c, d$  の変動係数を求めた。まず、2.4.1 節のステアリング反力の変化に対する知覚特性に関して、操舵角 3 種類、被験者 4 名の  $a, b$  に関する変動係数は、 $CV_a = 6$ 、 $CV_b = 16$  [%] となり、 $a$  に関してはある程度の一般性が認められた。一方、 $b$  についてはばらつきがやや大きいものの、これは  $b$  が計測範囲外の  $F_t = 1$  [N] における仮想的な  $F_p$  のオフセットに相当するためと考えられる。

次に、ステアリング操舵角変化に対する知覚特性については、2.4.2 節の静的条件での変動係数は  $CV_c = 45$ 、 $CV_d = 7$  [%]、一方、2.4.3 節の動的条件での変動係数は  $CV_c = 37$ 、 $CV_d = 3$  [%] となり、特に  $c$  に関してばらつきが大きな結果となった。ここで被験者 A が、「反力の微妙な差を感じようとしたことから肩に力がはいり、緊張していた」とコメントとしていたこともあり、被験者 A のデータが変動係数が大きくなる一要因になったと考えられる。そこで、被験者 A を除く 3 名で変動係数を求めると、静的条件での変動係数は  $CV_c = 11$ 、 $CV_d = 7$  [%]、動的条件での変動係数は  $CV_c = 6$ 、 $CV_d = 2$  [%] と小さく、静的条件、動的条件を合わせても、 $CV_c = 28$ 、 $CV_d = 5$  [%] となり、 $c$  には静的条件と動的条件による差が表れるが、 $d$  に関してはある程度の一般性を確認することができた。

以上より、本章の実験結果は個人差が大きな結果が一部含まれるものの、被験者と同様の年齢層である 22~45 歳の健常男性の力知覚特性を大まかに表現することができると考えられる。ただし、高齢者や女性はさらにばらつく可能性もあり、今後、より詳細に調査する必要がある。

## 2.6 まとめ

本章では、双腕における多関節運動で姿勢変化が大きいという複雑な運動を伴うステアリング操作を対象として、人間の主観的力知覚量を計測した。その結果、(1) 姿勢一定での力知覚量はウェーバー・フェヒナー則に従うこと、(2) 力知覚量は姿勢変化に伴い自重や力の知覚特性の影響により変化すること、(3) ステアリング操作における力知覚量は腕の運動履歴には依存しないことが明らかになった。

本章で得られた人間特性の結果を、実際のステアリング操作に応用するには、より統一的・普遍的なモデルが必要であり、今後は、そのために必要となる操舵角と反力の変化を網羅した知覚実験を行う必要がある。また、実車への適用を考え、ステアリングホイール径や操舵回転方向による知覚特性への影響について検証を進めるとともに、ステアリングの反力特性を人間の主観的な力知覚量に変換して操作性の評価を行う予定である。

## 第3章

# 人間の主観的力知覚モデルの提案

### 3.1 はじめに

自動車の操作機器の開発において、ドライバーの感性にあった操作フィーリングを実現することは重要である。その実現のため、テストドライバーのフィーリングテストにより造り込みが日々行われているが、フィーリングテストは試験が大規模化しやすいことから、ドライバーの操作フィーリングを操作機器の物理特性との関係からモデル化し、評価しようという研究が活発化している<sup>(3-1)</sup>。本章では自動車の操作機器のうち、ステアリングホイール(以下、ステアリング)操作を取り上げ、操作フィーリングのモデル化を試みる。

2章では、大きな姿勢変化の際、ステアリング接線方向の腕の自重変化などが知覚へ影響することを明らかにしたが、人間が受ける反力の大きさと操舵角による姿勢をそれぞれ単独に変化させた際の知覚特性のみを解析対象としており、反力変化と姿勢変化が同時に組み合わさった場合の知覚特性についてはまだ明らかにされていない。

そこで、本章では、反力変化と姿勢変化を組み合わせた条件での人間の知覚特性を実験的に明らかにする。さらに、人間の主観的な反力知覚特性を表現するモデル式を導出し、自動車開発におけるステアリングの操舵角力特性の設計において、ステアリングの機械特性を人間の主観的な力空間に変換できることを示す。

この章の構成は以下の通りである：3.2節では、主観的力知覚特性のモデル化にあたり、反力変化と上肢姿勢変化を組み合わせた条件での人間の知覚特性の実験結果を述べる。3.3節では、3.2節で得られた実験結果を元に、人間の主観的力知覚モデルの導出方法について述べる。3.4節結論と今後の課題について述べる。

### 3.2 主観的力知覚特性のモデル化

主観的力知覚特性のモデル化のため、実験は提示された反力を被験者が知覚し、その反力の大きさを口述する口頭試問による形式とした。なお、被験者の主観的な反力知覚特性の測定実験はマグニチュード推定法に基づいて実施し、事前に被験者には十分な練習を行わせた。被験者はインフォームドコンセントを得た 22~45 才までの 4 名（男子大学生 2 名，社会人 2 名）で、操舵角から上肢姿勢がほぼ一意に決まるように<sup>(3-2), (3-3)</sup>，シート位置やトルソー角を一定とした上でステアリングを 10 時 10 分の位置で握らせ自然な上肢姿勢を取るよう指示した。

被験者がステアリングから反力を受ける時の双腕による反力知覚特性を明らかにするため、被験者が上肢姿勢を維持した状態で、異なる反力をどのように知覚したかを調べた。反力はモータを駆動させて発生し、回転しようとするステアリングを被験者に阻止させることで反力を知覚させる。ここで被験者の上肢姿勢を維持したまま、4 秒間ステアリング反力を徐々に増加し、その後さらに 5 秒間一定のステアリング反力を提示した。被験者には知覚した反力（比較刺激）の大きさを標準刺激に対するパーセンテージで回答させた。

標準刺激は 20 [N]，比較刺激は 5, 10, 15, ..., 40 [N]の 5 [N]刻みの 8 種類で、最初に標準刺激を 1 回提示した後、比較刺激をランダムに 3 回提示する。比較刺激の計測回数が各反力で 5 回ずつの計 40 回となるまで測定を繰り返す。この反力変化に加え、標準刺激を与える操舵角  $\theta$  を、送り操舵を 0 [rad]，戻し操舵を  $2\pi/3$  [rad]の 2 条件とした。さらに、反力変化と操舵角変化を組み合わせた際の知覚変化を明らかにするため、それぞれの標準刺激に対して 操舵角 0,  $\pi/6$ ,  $\pi/3$ ,  $2\pi/3$  [rad]の 4 条件で 8 種類の比較刺激を与えた。

ステアリング反力を変化させた際の人間の知覚量と与えた物理量の関係について、標準刺激が 0 [rad]の場合を図 3.1(a)に、 $2\pi/3$  [rad]の場合を図 3.1(b)に示す。図は、被験者 4 名の結果を全てプロットしており、対数関数的な傾向を示していることに加え、操舵角ごとの知覚結果が異なっていることが分かる。また、送り操舵と戻し操舵を比べると、操舵角が変化した際の反力の知覚特性が異なっている。さらに、各反力における知覚ばらつき<sup>(3-4)</sup>の最大値と最小値を、Generalized Reduced Gradient method<sup>(3-4)</sup>（以下、GRG 法）を用いた最小二乗法により二次の多項式で近似したところ（図中の破線で示す）、戻し操舵は送り操舵に比べ、反力が大きくなるに従い、知覚のばらつき量が小さくなる傾向がある。

次に、傾向が異なる要因を調べるため、反力違いによる知覚影響を 4 種類の上肢姿勢一定時のデータに分けて、また操舵角違いによる知覚影響を 8 種類の反力一定時のデータに分けて分析した。

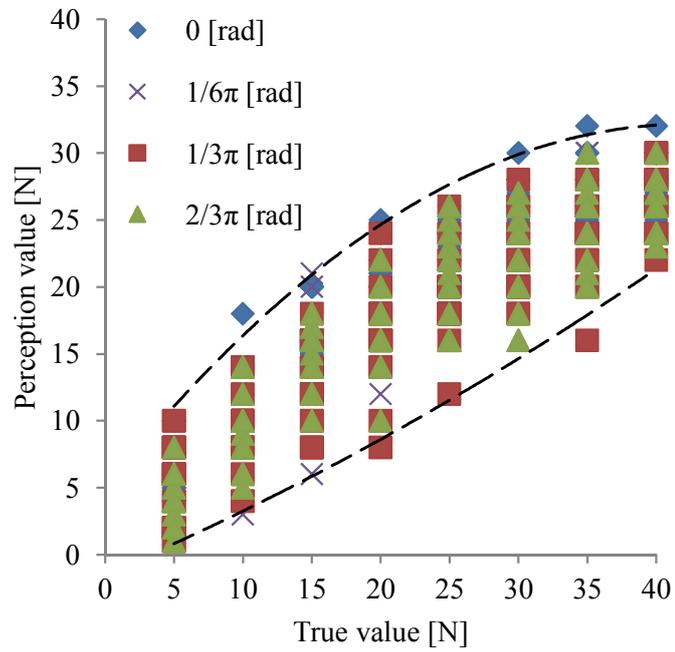
### 3.2.1 反力変化の知覚特性

図 3.2 は、図 3.1(a)の各操舵角のデータを抜き取り、被験者 4 名分の結果の平均と標準偏差を示している。(a), (b), (c), (d)は、それぞれ比較刺激の操舵角  $\theta$  が  $0, \pi/6, \pi/3, 2\pi/3$  のときに知覚した力  $F_p$  で、横軸は提示した力  $F_t$  である。図中の実線は GRG 法を用いた最小二乗法により求めた式 (1) である。

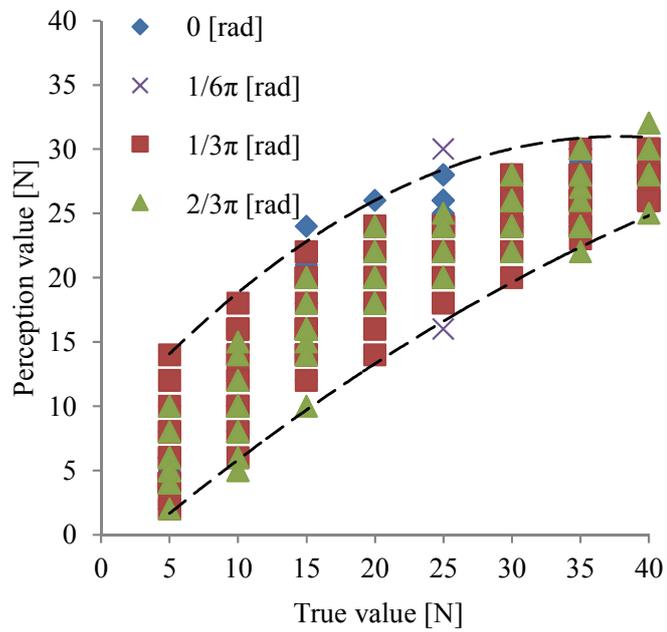
$$F_p = a \log(F_t) + b \quad (1)$$

図 3.2 から、すべての条件で  $R^2$  は 0.80 以上、 $p$  値は 0.05 以下となり、すべての実験条件において式 (1) が成立していることがわかる。実際の反力に対して知覚された力は対数関数的に増加しており、標準刺激と比較刺激の操舵角が異なる場合においても、反力知覚特性はウェーバー・フェヒナーの法則をほぼ満たしていることが分かる。

次に、戻し操舵について同様の検討を行った。図 3.3 から、標準刺激を  $2\pi/3$  [rad]の場合においても、すべての条件で  $R^2$  は 0.86 以上、 $p$  値は 0.05 以下となり、標準刺激の操舵角が異なる場合においても、ウェーバー・フェヒナーの法則が成立している。



(a) 送り操舵



(b) 戻し操舵

図 3.1 異なった4つの操舵角  $\theta$  による反力知覚特性 (全被験者)

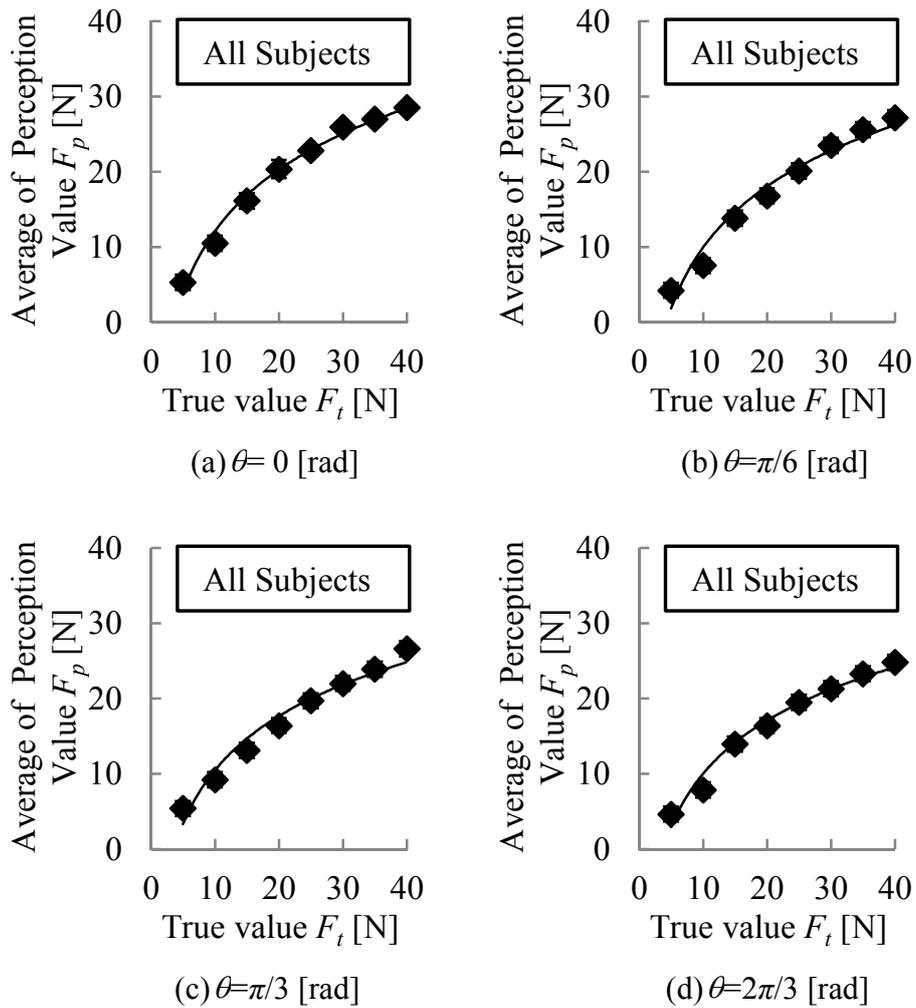
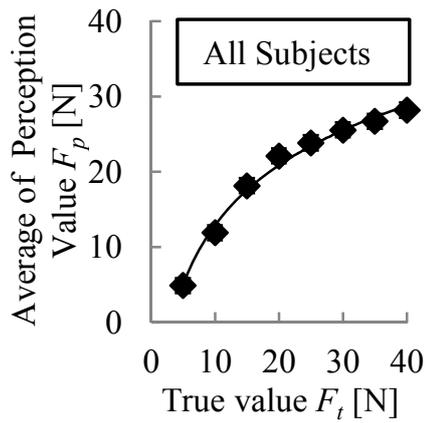
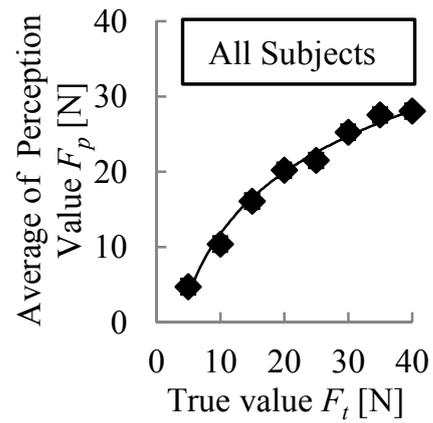


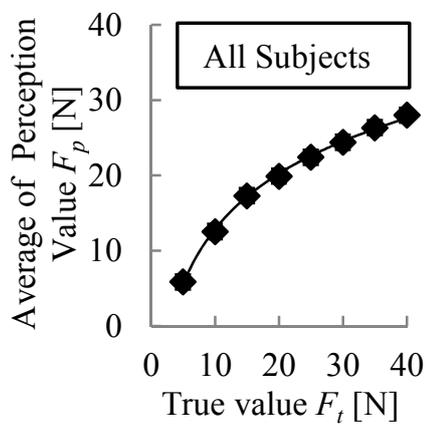
図 3.2 送り操舵における 4 つの異なる操舵角  $\theta$  での反力知覚特性



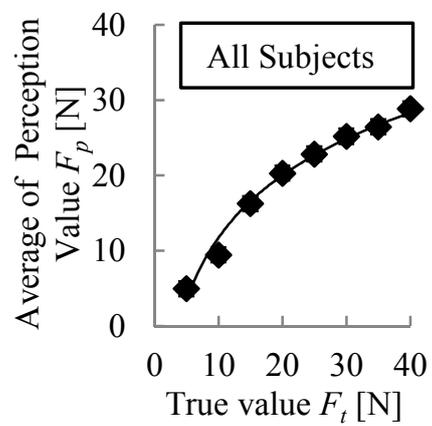
(a)  $\theta = 0$  [rad]



(b)  $\theta = \pi/6$  [rad]



(c)  $\theta = \pi/3$  [rad]



(d)  $\theta = 2\pi/3$  [rad]

図 3.3 戻し操舵での 4 つの異なった操舵角  $\theta$  と反力知覚特性

### 3.2.2 操作姿勢と力知覚特性の関係

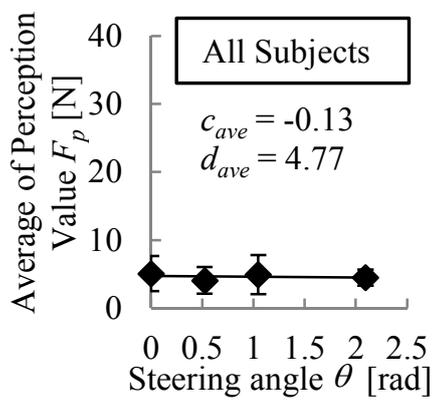
次に、操舵角変化が人間の反力知覚特性に与える影響を分析した結果を示す。

まず送り操舵について、反力が 5, 40[N]の結果を図 3.4 に示す。図の横軸は操舵角  $\theta(0)$  , 縦軸は被験者が知覚した力  $F_p$  であり、被験者 4 名分の結果の平均と標準偏差を示している。図中、実線は GRG 法を用いた最小二乗法により求めた式 (2) である。

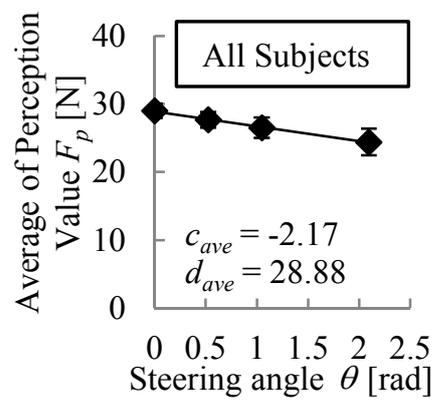
$$F_{p\theta} = c\theta + d \quad (2)$$

被験者 4 名分の係数の平均  $c_{ave}$  ,  $d_{ave}$  を図中に示す。ただし、被験者による回答のばらつきの影響を抑えるため、各条件における 5 試行分の結果から最も平均から離れた 2 点を除いた。

さらに、反力による影響を分析するため、全被験者の反力に依存した知覚傾き  $c$  の変化を図 3.5(a)の箱ひげ図に、4 名の平均値の傾向を図 3.5(b)に示す。

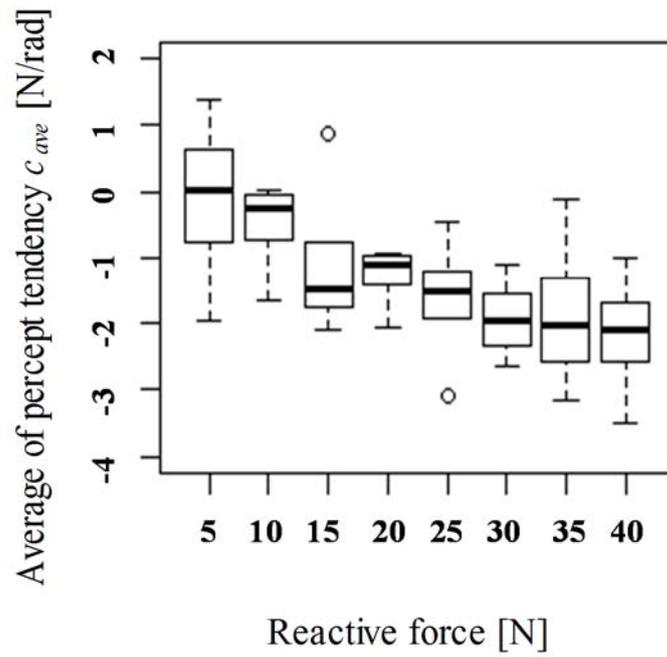


(a)  $F_t = 5$  [N]

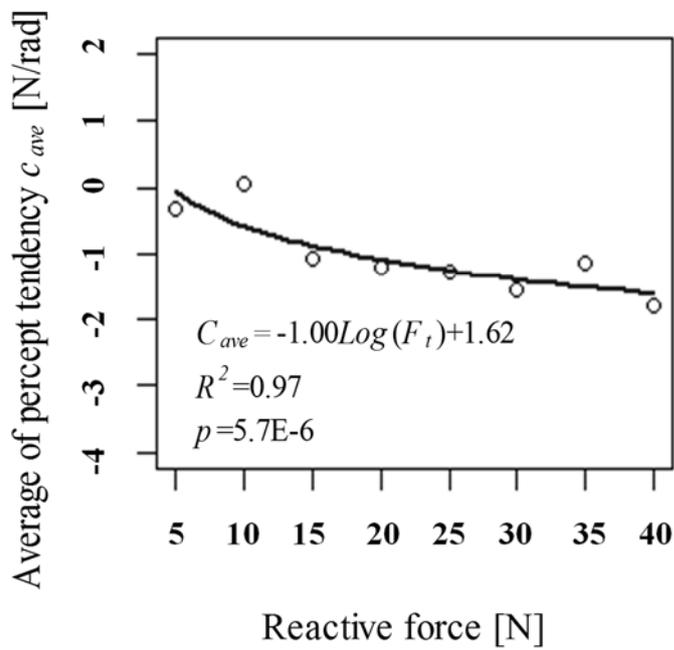


(b)  $F_t = 40$  [N]

図 3.4 送り操舵での操舵角  $\theta$  による反力知覚特性の影響



(a) ボックスプロット

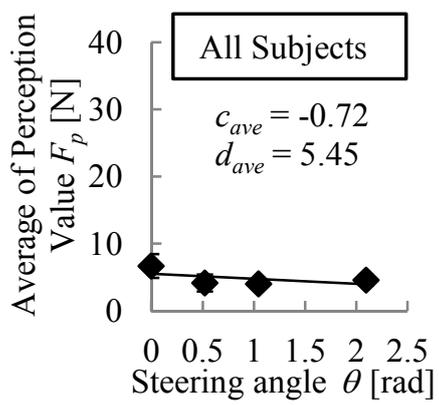


(b) 散布図

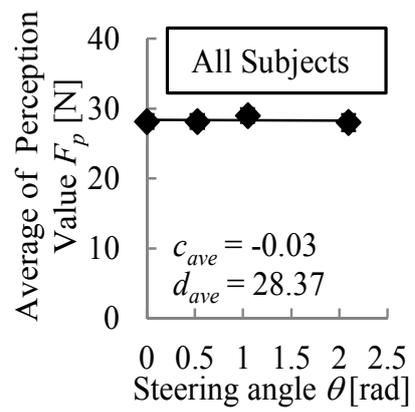
図 3.5 送り操舵での反力と  $c_{ave}$  との関係 (全被験者)

反力の影響を見ると，図 5 から反力が小さい 5 [N] の領域では  $c_{ave}$  が -1 より大きい，図 3.5(a) から 15 [N] 以上の反力では -1 未満と小さく，反力の大きさに応じて操舵角による力知覚量の影響が変化していることがわかる．さらに，操舵角による力知覚の減少傾向は反力ごとの知覚量に差はあるものの，図 3.5(b) から平均値は反力が大きくなるに従い，対数関数的に右肩下がりになることが明らかになった．被験者の内省報告では，反力が弱いとステアリングに触れるようにして感じ，反力が大きいとステアリングをしっかりと握りながら感じようとしていることを述べており，このことから，ステアリングの握り方による違いが力知覚へ影響することが考えられる．すなわち，反力が小さいと被験者への刺激が弱く，微小な力を感じようとして腕の自重を自ら支えるために自重の影響がなくなるのに対し，反力が大きくなるに従い，反力とつり合う力として自重の作用を利用するために，腕の自重による影響が顕著に表れたと考えられる．

次に，戻し操舵では知覚特性に違いがあるかどうかを明らかにするため，標準刺激を  $2\pi/3$  [rad] で与えた場合の結果を，送り操舵と同様の形式で図 3.6, 3.7 に示す．これらの図から，送り操舵では操舵角を増加させると力知覚量が減少していくのに対し，戻し操舵では反力が 5~25 [N] の小さい領域では平坦で，30~40 [N] の大きい領域ではわずかに増加する傾向がある．これは，操舵角が大きくなるに従い，腕の自重の影響から反力を軽く感じる傾向があることが報告されている<sup>(7)</sup>ため，戻し操舵では標準刺激を受ける操舵角が大きいために反力を小さく回答し，比較刺激は標準刺激に対し重く感じたためと考えられる．

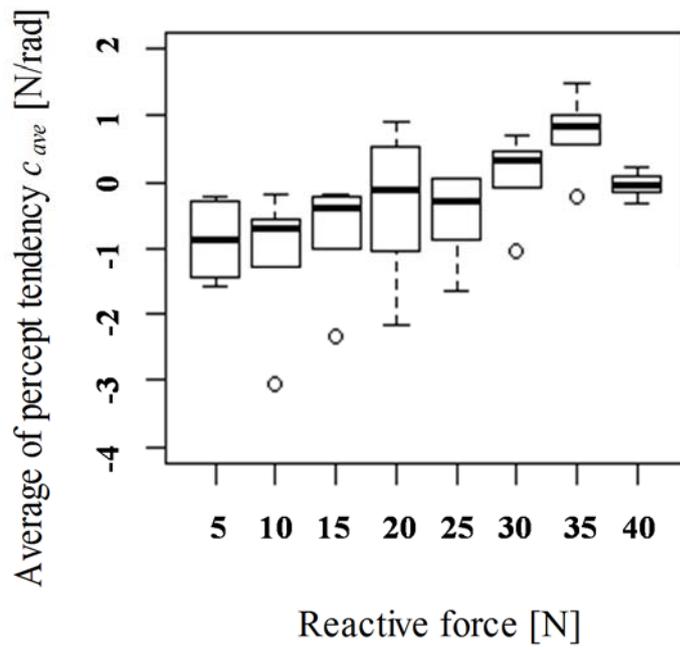


(a)  $F_t = 5$  [N]

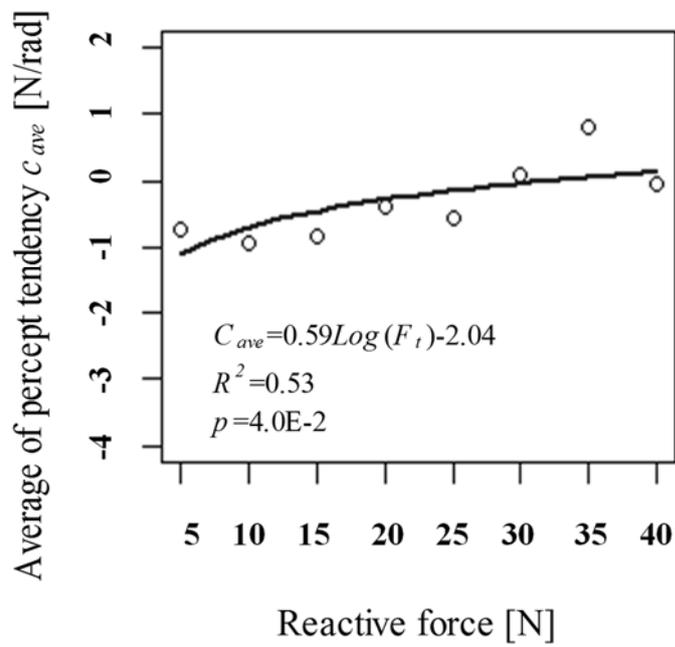


(b)  $F_t = 40$  [N]

図 3.6 戻し操舵での操舵角  $\theta$  と感じた力の変化の関係



(a) ボックスプロット



(b) 散布図

図 3.7 戻し操舵での反力と  $c_{ave}$  との関係 (全被験者)

### 3.3 人間の主観的力知覚モデル

ステアリングの操舵角力特性の官能評価をおこなう場合、ステアリング操作量に従い反力と操舵角が同時に変化するため、被験者にとってこれらを同時に評価することはかなり困難なタスクとなる。しかし、ステアリングの操舵角力特性を主観的力空間に変換する反力知覚モデル式を用いることができれば、物理的な操舵角力特性を主観的に知覚される操舵角力特性に変換することができ、より人間の感性に近い評価が可能となる。本章では前節の実験結果に基づいてステアリング操作時の反力知覚特性モデルを導出する。

3.2.1 および 3.2.2 の結果から、反力知覚特性がウェーバー・フェヒナー則に従うこと、操舵角により力知覚量が変化し、それは、反力の大きさに影響することが明らかとなった。また、同じ反力においては、送り操舵では標準刺激が重めに感じるため操舵量に応じて軽く感じる傾向であり、戻し操舵では逆に操舵量に応じて僅かに重く感じる傾向がある。この反力と操舵角を組み合わせた新たな実験により得られた知覚特性を整理することで、より精度の高いモデル式が導出できると考えられる。ここで 3.2.2 の結果は、被験者によるばらつきが存在するものの、全被験者の平均値では反力毎に有意差があることから、平均的な傾向から導出した式を用いてモデル化する。

まず、被験者に提示する反力  $F_t$  と操舵角  $\theta$  の影響を考慮する。知覚のばらつき量を  $F_p$  とすると、被験者が知覚する力  $e_{noiz}$  は式 (1), (2) より、式 (3) と考えることができる。

$$F_p = F_{pF} - \{a \log(F_{nom}) + b\} + F_{p\theta} + e_{noiz} \quad (3)$$

式 (3) の右辺第 1 項は印加される手先反力  $F_t$  の大きさに応じて変化する成分 (式 (1)) を表す。右辺第 2 項は、基準手先力  $F_{nom}$  (本章では  $F_{nom} = 20$  [N]) のとき第 1 項を 0 とするための項である。また、右辺第 3 項は式 (2) に対応し、ステアリング操舵角  $\theta$  によって変化する成分を表現している。ここで、式 (3) に式 (1), (2) を代入すると、式 (4) を得る。

$$\begin{aligned}
F_p &= \{a \log(F_t) + b\} - \{a \log(F_{nom}) + b\} + (c\theta + d) + e_{noiz} \\
&= a \log\left(\frac{F_t}{F_{nom}}\right) + c\theta + d + e_{noiz}
\end{aligned} \tag{4}$$

ここで、係数  $a$  は実際の反力に対する知覚量の傾向を意味している。図 2 を見ると、送り操舵と戻し操舵では知覚傾向が異なっているため  $a_i$  ( $i=1, 2$ ) とし、送り操舵を  $i=1$ 、戻し操舵を  $i=2$  と定義した。

係数  $c$  は操舵角による知覚変化を表しており、図 6, 8 から  $c$  は一定ではなく  $F_t$  の関数になっていることが分かる。また知覚傾向は対数関数でフィッティングできることから、次式を定義した。

$$c = \frac{1}{\theta_{max}} \{c_{1i} \log\left(\frac{F_t}{F_{nom}}\right) + c_{2i}\} \tag{5}$$

式 (5) の  $c_{1i} \log(F_t) + c_{2i}$  は、送り操舵 ( $i=1$ ) が図 3.5, 戻し操舵 ( $i=2$ ) が図 3.7 の各(b)で得られた式であり、無次元化するために、 $F_t$  を  $F_{nom}$  で割った。また、この式は、実験での最大操舵角  $\theta_{max}$  に対する操舵角  $\theta$  の知覚変化量を意味しており、式 (4) の  $\theta$  を最大操舵角  $\theta_{max}$  で規格化した。式 (5) を用いることで、操舵角や反力の大きさによる影響を考慮した力の知覚変化を表現することができる。

係数  $d$  は  $\theta=0$  の時、標準刺激  $F_{nom}$  と同じ刺激を受けた際の知覚量  $F_p$  を意味しており、図 3.4, 3.6 から送り操舵と戻し操舵で異なっているため、 $d_i$  ( $i=1, 2$ ) とした。

以上の係数を式 (4) に代入し、ステアリング操舵におけるモデルを導出した。

$$\begin{aligned}
F_p &= a_i \log\left(\frac{F_t}{F_{nom}}\right) + \frac{\theta}{\theta_{max}} \{c_{1i} \log\left(\frac{F_t}{F_{nom}}\right) + c_{2i}\} + d_i + e_{noiz} \\
&= \left(a_i + c_{1i} \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \log\left(\frac{F_t}{F_{nom}}\right) + c_{2i} \frac{\theta}{\theta_{max}} + d_i + e_{noiz}
\end{aligned} \tag{6}$$

次に、式 (6) に含まれる各係数を実測値(図 3.1)を用いて GRG 法を用いた非線形最小二乗法により算出したところ、送り操舵では、 $a_1=11.43, c_{11}=19.84, c_{12}=-1.55, d_1=-2.19$  であり、実測値との決定係数  $R^2$  は 0.86 となった。同様に、戻し操舵では、 $a_2=11.17, d_2=20.67, c_{21}=0.09, c_{22}=-0.11$  であり、決定

係数  $R^2$  は 0.89 となり，送り操舵と戻し操舵を合わせた決定係数  $R^2$  は 0.88 となった。

最後に，ばらつき量  $e_{noiz}$  を図 2 の実測値と，式(7)の知覚推定値の差から求めた。送り操舵では，平均が  $3.96E-9$  [N]，標準偏差は 2.9 [N]となり，戻し操舵では，平均が  $-6.08E-9$  [N]，標準偏差は 2.59 [N]となった。従って，平均はほぼ 0 [N]，標準偏差は  $\pm 3$  [N]未満と小さく，式(7)を用いて実測値を良くフィッティングできていることがわかる。

### 3.4 まとめ

本章では自動車の操作機器のうちステアリング操作を取り上げ，より統一的・普遍的な力知覚モデルを導出するために必要な操舵角と反力の変化を組み合わせた反力知覚実験を行った。その結果，(1) 送り操舵と戻し操舵では反力の知覚傾向が異なり，(2) 操舵による上肢姿勢変化から腕の自重のみならず，その時の反力に影響を受けることを明らかにし，(3) 送り操舵と戻し操舵において実測値との決定係数が  $R^2 = 0.88$  となるようなモデル式を導出した。

また，導出したモデル式を用いることで，ステアリングの反力特性を人間の主観的力空間に変換できることを示し，プロのテストドライバーのフィーリング結果と類似した傾向が得られることを確認した。今後は，個人差のばらつきをモデルにどう取り入れていくかの検証，実際の走行における送りと戻しの一連の操舵を実験条件に加え，主観的力空間の有効性をより詳細に検証する予定である。

## 第4章

# 力知覚空間における操作特性を用いた感性評価法

### 4.1 はじめに

自動車の開発においては、ドライバーに感動やワクワクした感覚を提供することが重要であり、そのためには感じさせたい感性を自動車の操作機器の特性から実現する必要がある。また、ドライバーの生体情報から感性を判断し、ドライバーに適した操作特性を提供することができれば、一体感のある自動車と心を通わせたような操縦感覚を実現できる可能性がある。本章では、操作機器の中でも自動車のステアリングホイール（以下、ステアリング）操作を取り上げ、操作の際に生じる感性のモデル化を試みる。

感性のモデル化に関する研究<sup>(1-23)(1-24)(1-25)(1-26)</sup>は、自動車のステアリング操作特性や排気音、内装などと人間の官能評価との関係解明、及び、定量化が2000年頃まで活発におこなわれているが、その後は、著者らの知る限り研究報告が見当たらない。また、知覚特性に関する研究は、自動車のステアリングやアクセルペダルの反力知覚特性の研究がおこなわれているが、人間の知覚特性を踏まえた感性のモデル化は試みられておらず、人間の主観的な力知覚空間とステアリング操作時の感性との関係は解析されていない。

そこで、本章では、機械特性から直接、感性評価をおこなうのではなく、機械特性を人間の主観的な力知覚空間に変換してからステアリング操作時の感性評価をおこなう方法を新たに提案し、その有効性を明らかにする。

この章の構成は以下の通りである：4.2節では、新たに提案する感性評価法の4つのStepとその詳細について述べる。4.3節では、使用した実験装置や被験者について述べる。4.4節では、4.2節のStepに従いおこなった実験結果と考察について述べる。4.5節では、結論と今後の課題について述べる。

## 4.2 提案する感性評価法

ステアリング操作時の人間の主観的力知覚空間を用いた感性評価法の流れを図 4-1 に示す。本手法は、(1) ステアリング機械特性の主観的力知覚空間への変換、(2) 主観的力知覚空間における機械特性の主成分抽出、(3) 重回帰分析による感性評価のモデル化、(4) 数理計画法による最適設計という 4 つの Step から構成される。以下、各 Step について説明する。

### 4.2.1 ステアリング機械特性の主観的力知覚空間への変換

Step 1 では、ステアリング操作時に生じる操舵角に対する操舵反力の機械特性を、3 章にて導出した力知覚特性のモデル式 (1) を用いて人間の主観的力知覚空間に変換する。

$$F_p = (a_i + c_{1i} \frac{\theta}{\theta_{\max}}) \log(\frac{F_t}{F_{nom}}) + c_{2i} \frac{\theta}{\theta_{\max}} + d_i + e_{noiz} \quad (1)$$

係数  $a_i$  は実際の反力に対する知覚量の傾向を意味しており、送り操舵を  $i=1$ 、戻し操舵を  $i=2$  と定義する。係数  $c_{1i}$ 、 $c_{2i}$  は操舵角による知覚変化を表しており、 $c_{1i}$  は操舵角のみならず反力に依存する成分、 $c_{2i}$  は操舵角のみに依存する成分を表している。係数  $d_i$  は  $\theta=0$  の時、標準刺激  $F_t$  と同じ刺激を受けた際の知覚量  $F_p$  に相当し、送り操舵と戻し操舵で異なっているため  $d_i (i=1, 2)$  とする。ばらつき量  $e_{noiz}$  は、モデル化が困難なノイズ成分を表す。

ここで、3 章にて式 (1) に含まれる各係数を知覚計測の実測値を用いて Generalized Reduced Gradient method を用いた非線形最小二乗法により算出しており、送り操舵では、 $a_1=11.43$ ,  $c_{11}=19.84$ ,  $c_{12}=-1.55$ ,  $d_1=-2.19$  であり、戻し操舵では、 $a_2=11.17$ ,  $c_{21}=20.67$ ,  $c_{22}=0.09$ ,  $d_2=-0.11$  であることを明らかにした。この式 (1) を用いて、右辺に機械特性の反力  $F_t$  と操舵角  $\theta$  を代入することにより、ステアリング機械特性を人間の主観的力知覚空間に変換することが可能となる。

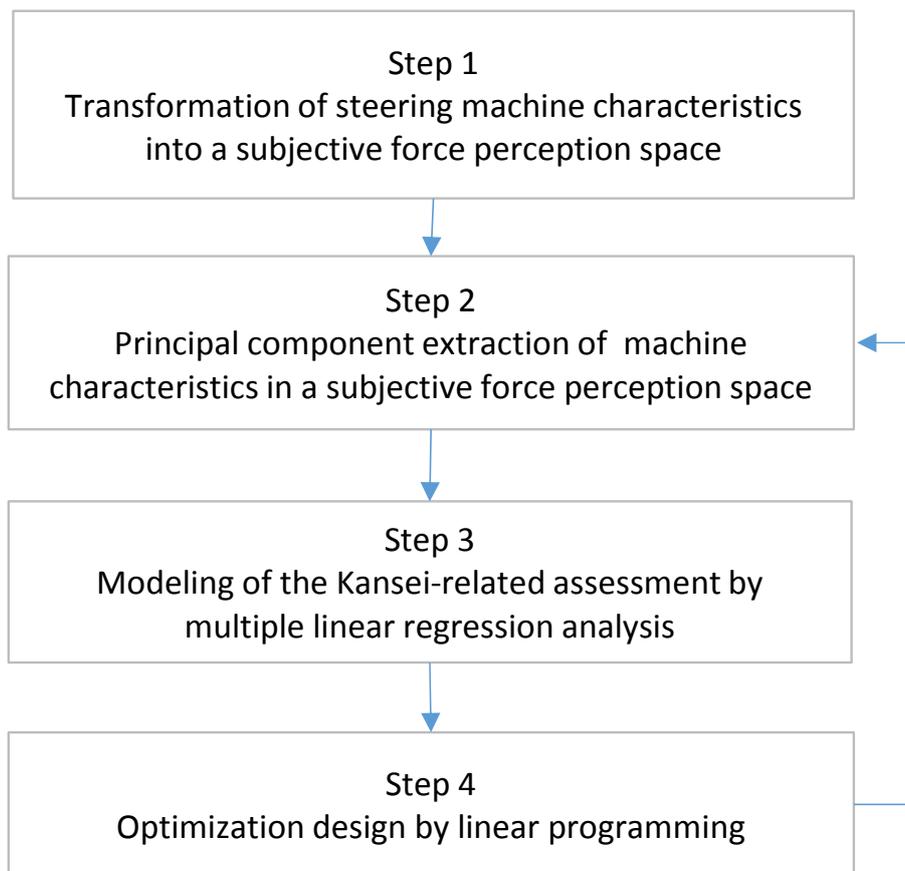


図 4-1 実験及び解析のフローチャート

#### 4.2.2 主観的力知覚空間における機械特性の主成分抽出

次に、Step 2 では人間の主観的力知覚空間に変換した機械特性から、主成分分析<sup>(4-1)</sup>を用いることで直交化した主成分を抽出する。これにより、各パラメータが従属関係にある場合でも多重共線性を防ぐことができる。まず、人間の主観的力知覚空間に変換した機械特性の特徴を表すパラメータを  $N$  個定義する。次に、 $M$  台の車を用意し、それぞれの自動車のパラメータから  $P_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ,  $j=1, 2, \dots, M$ ) を抽出する。そして、式 (2) を用いた主成分分析から主成分  $PC_k$  ( $k=1, 2, \dots, L$ ) をそれぞれ算出する。

$$\begin{aligned} PC_k &= a_{k1}x_1 + a_{k2}x_2 + \dots + a_{kN}x_N \\ &= \sum_{i=1}^N a_{ki}x_i \end{aligned} \quad (2)$$

係数  $a_{ki}$  は  $L$  個の主成分が互いに無相関で、かつ、もとの  $N$  個の変数のもつ情報をできるだけ多く集められるように定められており、 $\sum_{i=1}^N a_{ki}^2 = 1$  を満たす<sup>(4-2)</sup>。変数  $x_i$  はパラメータ  $P_{ij}$  を標準化したものを入力し主成分  $PC_k$  を求める。ここで標準化は、 $P_{ij}$  の各パラメータについて  $M$  台の車での平均値を引いた後に標準偏差で割ることにより、平均値が 0 で標準偏差が 1 となるように行った。

#### 4.2.3 重回帰分析による感性評価のモデル化

Step 3 では、Step 2 で得られた主成分と被験者のステアリング操舵時の感性評価結果との関係を明らかにするため、重回帰分析をおこなう。左辺に各特性を操作した時の SD 法<sup>(4-3)</sup>を用いた  $R$  個の感性評価の被験者平均  $SD_q$  ( $q=1, 2, \dots, R$ )、右辺に  $L$  個の主成分  $PC_k$  ( $k=1, 2, \dots, L$ ) としてこれらを重回帰分析することで、左辺の感性評価を右辺の主成分から推定するモデル式 (3) を導出する。

$$SD_q = b_0 + b_1 PC_1 + b_2 PC_2 + \dots + b_p PC_p \quad (3)$$

$PC_k$  は説明変数、 $SD_q$  は目的変数であり、この関係を満たす  $P$  個の係数  $b_r$  ( $r=0, 1, \dots, P$ ) から構成される。

#### 4.2.4 数理計画法による最適設計

最後に、Step 4 では特定のフィーリング（感性ワード）が最大評価となるようなステアリング操舵特性の最適設計を、線形計画法を用いることで実現する。式 (2)、式 (3) を用いて設計するパラメータ  $P_1, P_2, \dots, P_N$  について各パラメータの下限値と上限値を設定し、式 (3) の左辺の感性ワードに対する SD 法の変数を最大化するパラメータ  $P_1, P_2, \dots, P_N$  を数理計画法を用いて求める。次に、式 (1) を変形した式 (4) に  $P_1, P_2, \dots, P_N$  を代入することで  $F_t$  を算出する。但し、 $F_p$  は  $P_1, P_2, \dots, P_N$  の関数であることに注意されたい。

$$F_t = F_{nom} \text{Exp} \left[ \left\{ F_p(P_1, P_2, \dots, P_N) - d_i - c_{2i} \frac{\theta}{\theta_{\max}} \right\} / (a_i + c_{1i} \frac{\theta}{\theta_{\max}}) \right] \quad (4)$$

$\theta$  と式 (4) から得られた  $F_t$  を操作反力装置に入力してモデル式の操作性を評価し、評価結果が悪い場合は Step 2 へ戻り、新たなパラメータ  $P_1, P_2, \dots, P_N$  を定義し同様の手続きを繰り返す。

### 4.3 実験

ステアリング操作時の感性特性を評価するため、定置型のステアリング操作反力装置（三菱プレジジョン（株）製：トルク分解能 0.003[Nm]以下、角度分解能 0.001[deg./pulse]以下）を使用する。これは計算機からの指令により操舵角に応じたステアリングの反力をモータから発生させ、被験者に対して様々な操作感覚を与えることを可能とする。さらに、モータから発生したステアリングの反力計測には、計算機を介した DSP ボード（ds1006, dSPACE 社製）を使用し、高サンプリングかつ安定した計測を実現している。実験に用いるステアリング操作時の機械特性として、車速 40 [km/h] でコーナリングを走行時の自動車 10 台の機械特性から特徴の異なる 5 台（表 4-1）を選択し、操作反力装置の計算機にその特性を入力した。次に、被験者 20 名（25～59 才までの社会人）とし、ステアリングを操作させた後、SD 法（7 段階尺度）による感性評価を実施した。ここで、評価項目は自動車開発のステアリング操作性評価に用いられる形容詞 6 項目（しっかり感、リニアさ、重厚さ、ぎくしゃく感、重さ、凸感）とする。

表 4-1 実験で用いた車両の性能

	Type of car	Country	Drive system	Weight [kg]	Length [mm]	Width [mm]
Vehicle A	Open car	Japan	Front-engine Rear-drive	990	3955	1675
Vehicle B	Open car	Europe	Mid-engine Rear-drive	900	3800	1720
Vehicle C	Sports car	Europe	Mid-engine Rear-drive	1380	4345	1800
Vehicle D	Family car	Japan	Front-engine Front-drive	1320	4460	1755
Vehicle E	Sports car	Japan	Front-engine Four-wheel drive	1740	4670	1895

## 4.4 結果と考察

### 4.4.1 ステアリング機械特性の主観的力知覚空間への変換結果

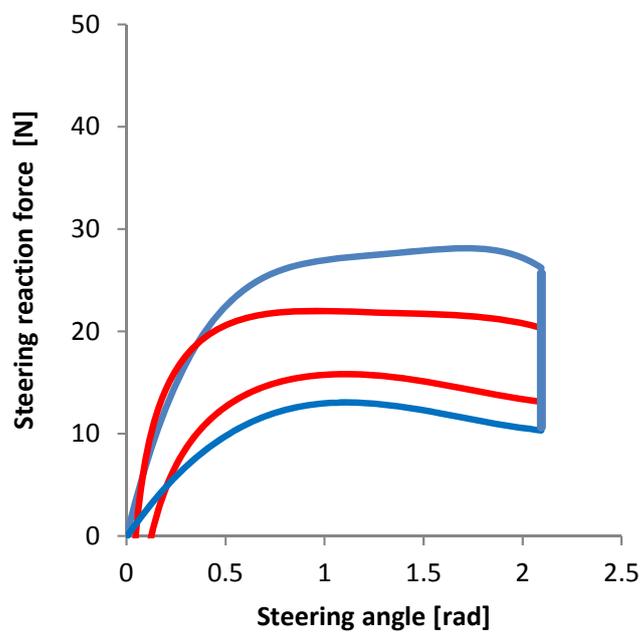
図 4-2 に、5 台のステアリング操作時の機械特性から  $0 \sim 2/3\pi$  [rad]における送り操舵から戻し操舵までの一連の計測値を青線で示し、式 (1) による人間の主観的力知覚空間へ変換した結果を赤線で示す。(a) と (b) の赤線の形状を比較すると、送り操舵で  $\pi/6$  [rad]以上の操舵角では (a) がヒステリシスの幅が平坦に対し、(b) はヒステリシスの幅が右肩上がりの傾向である。操舵角が増加するに従い、(a) はドライバーにおおよそ一定の重さを感じさせているのに対し、(b) は徐々にステアリングを重く感じさせている。プロのテストドライバーによる感性評価では、操舵中盤以降について (a) は操舵感覚が一定で操作しやすいが、(b) は徐々に重くなり操作しにくいことを述べている。戻し操舵については、(a) が平坦に対し、(b) は左肩下がりの傾向である。プロのテストドライバーによる感性評価では、(a) は送り操舵とほぼ同じ一定の感覚に対し、(b) は操舵角が小さくなるにつれて軽く感じることを述べている。

次に (c) と (d) の赤線の形状を比較すると、 $\pi/6$  [rad]以上の操舵時における知覚変化は、(c)が凸型に対し、(d)は平坦の傾向である。(c) ではドライバーに操舵角が増加するに従い徐々にステアリングを重く感じさせ、途中から平坦に感じさせるのに対し、(d) では常に一定の重さを感じさせているのである。プロのテストドライバーによるフィーリング評価では、操舵中盤以降では、(c) はステアリングと手に一体感を感じるが、(d) は一体感が少ないと述べている。戻し操舵については、(c) は送り操舵とほぼ同じ形状を示すのに対し、(d)では大きく異なり、特に $\pi/3$  [rad]より小さい操舵角では反力知覚量が小さく、アシスト力が減少している。プロのテストドライバーによるフィーリング評価では、(c) は送りと戻しによるフィーリングが同じに感じ、常に一体感のある操作ができ、一方で (d) は重く感じるが操舵に対し反力は滑らかに変化し、安定した操作ができることを述べている。

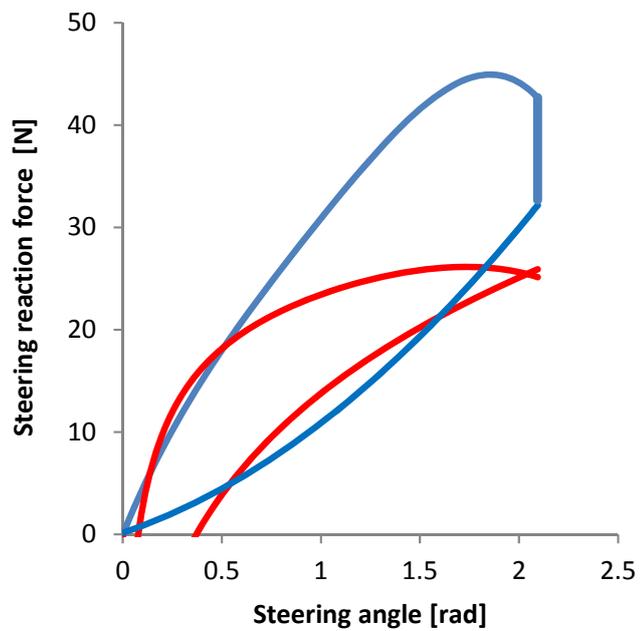
(e) の赤線の形状を見ると、送り操舵で $\pi/6$  [rad]以下は他の 4 台に比べ反力の勾配が大きく、重く感じさせているのに対し、 $\pi/6$  [rad]以上は右肩下がりの傾向であり、操舵に応じて軽く感じさせていることが分かる。プロのテストドライバーによるフィーリング評価では、操舵初期は、4 台に比べ (e) は重く感じるものの、操舵中盤以降ではわずかに軽く感じて操作しやすいと述べている。戻し操舵については、(d) に類似した形状であるものの送り操舵とのヒステリシスが

小さく、プロのテストドライバーによるフィーリング評価では、操舵角が大きいとステアリングを中立の 0 [rad] へ戻そうとする力が強く、保舵がしにくいことを述べている。

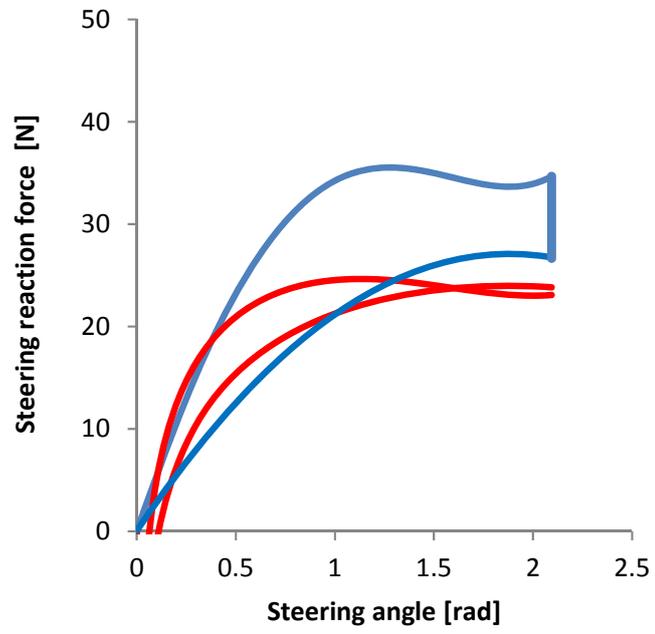
以上から、人間の主観的力知覚空間へ変換した特性がプロのテストドライバーの感性評価と概ね一致していることが分かる。



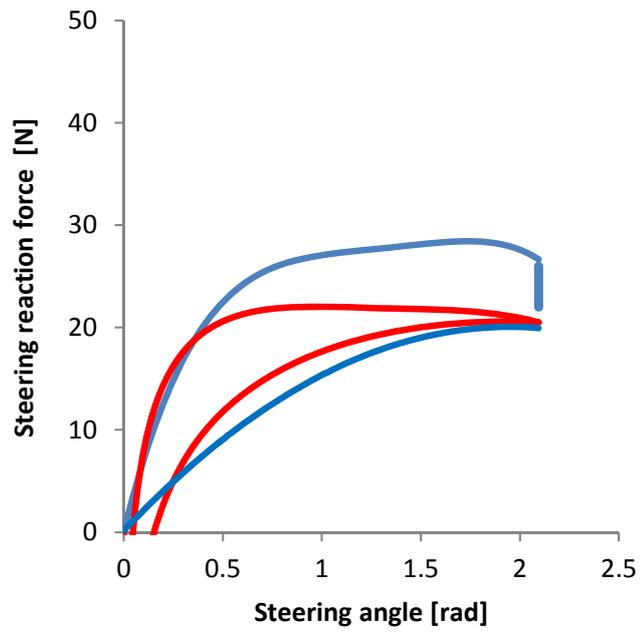
(a) A車



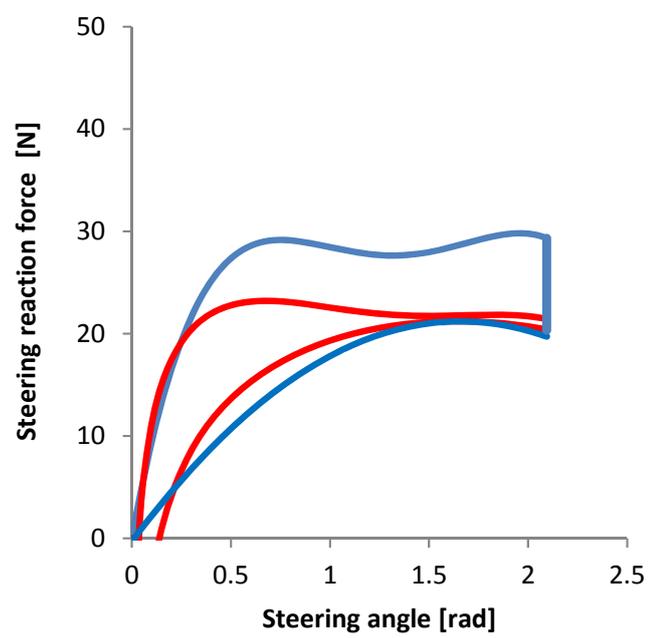
(b) B車



(b) C車



(d) D車



(e) E 車

図 4-2 操舵角力特性

#### 4.4.2 主観的力知覚空間における機械特性の主成分抽出結果

次に主成分分析を実施するため、4.1 で用いた 5 台のステアリング操作特性から特徴量としえ以下の 9 項目を抽出する。これらの特徴量は、5 台のステアリング操作特性を比較したときに特性の差が明らかな箇所を探し、それを決定する設計パラメータから選定した。なお、送り操舵時の反力の大きさに対するヒステリシスの大きさにより戻し操舵時の反力の大きさを考慮している。

$P_{1j}$ : 20 [N]以上となる操舵角

$P_{2j}$ : 反力増加が収束する 30 [deg.]の反力

$P_{3j}$ : 反力の最大値

$P_{4j}$ : 反力が最大となる操舵角

$P_{5j}$ : 送り操舵における 30~120[deg.]の形状について式 (5) を用いて最小二乗法で求めた係数 a

$P_{6j}$ : 送り操舵における 30~120[deg.]の形状について式 (5) を用いて最小二乗法で求めた係数 b

$P_{7j}$ : 送り操舵における 30~120[deg.]の形状について式 (5) を用いて最小二乗法で求めた係数 c

$P_{8j}$ : 120 [deg.]の送り操舵から戻し操舵までの反力差 (以下, ヒステリシス) の大きさ

$P_{9j}$ : 30 [deg.]のヒステリシスの大きさ

$$F_p = a\theta^2 + b\theta + c \quad (5)$$

ただし、式(5)は、送り操舵における $1/6\pi \sim 2/3\pi$  [rad]の反力形状を近似するために導入した2次関数で、式に含まれる係数は最小2乗法を用いて求めた。

これらの項目について、機械特性をそのまま用いた場合と主観的力知覚空間に変換した場合のそれぞれで、主成分分析をおこなった結果を表 4-2 に示す。各主成分の主成分負荷量が大きいものを赤字で記載しており、第 1 主成分は送り操舵時での操舵反力の特性形状、第 2 主成分は小さな操舵角でのヒステリシスの大きさと反力最大となる操舵角、第 3 主成分は大きな操舵角でのヒステリシスの大きさにおおよそ対応していることが分かる。また、第 3 主成分までの累積寄与率は、機械特性をそのまま用いた場合、主観的力知覚空間に変換した場合とも 90%以上であった。

次に、主成分分析で得られた結果を用いてステアリングの感性評価をモデル

化し，機械特性をそのまま用いた場合と人間の主観的力知覚空間に変換した場合を比較した．

表 4-2 主成分分析の結果

	Mechanical property			Transformed human force perception property		
Eigenvalue	5.600	1.797	1.087	5.904	1.702	1.128
Contributing rate	0.622	0.200	0.121	0.656	0.189	0.125
Cumulative contribution ratio	0.622	0.822	0.943	0.656	0.845	0.970
Eigenvector	First	Second	Third	First	Second	Third
$P_1$	0.404	0.180	-0.018	0.399	0.043	0.206
$P_2$	-0.374	-0.215	-0.067	-0.386	-0.126	-0.258
$P_3$	0.357	0.230	-0.239	0.324	-0.082	-0.435
$P_4$	-0.156	0.692	0.001	-0.048	0.754	-0.131
$P_5$	-0.369	0.124	-0.198	-0.392	0.215	-0.104
$P_6$	0.421	0.004	-0.091	0.406	-0.117	0.068
$P_7$	-0.413	-0.131	0.049	-0.407	-0.009	-0.132
$P_8$	0.014	0.181	0.928	-0.163	0.167	0.794
$P_9$	-0.247	0.570	-0.165	0.271	0.565	-0.144
Principal component loadings	First	Second	Third	First	Second	Third
$P_1$	0.956	0.241	-0.019	0.970	0.056	0.218
$P_2$	-0.886	-0.289	-0.070	-0.938	-0.164	-0.274
$P_3$	0.845	0.308	-0.249	0.787	-0.107	-0.462
$P_4$	-0.368	0.927	0.001	-0.118	0.983	-0.139
$P_5$	-0.873	0.166	-0.207	-0.953	0.281	-0.110
$P_6$	0.995	0.005	-0.095	0.985	-0.152	0.072
$P_7$	-0.978	-0.176	0.051	-0.990	-0.011	-0.140
$P_8$	0.032	0.243	0.968	-0.397	0.218	0.844
$P_9$	-0.584	0.764	-0.172	0.657	0.737	-0.153

#### 4.4.3 重回帰分析による感性評価結果

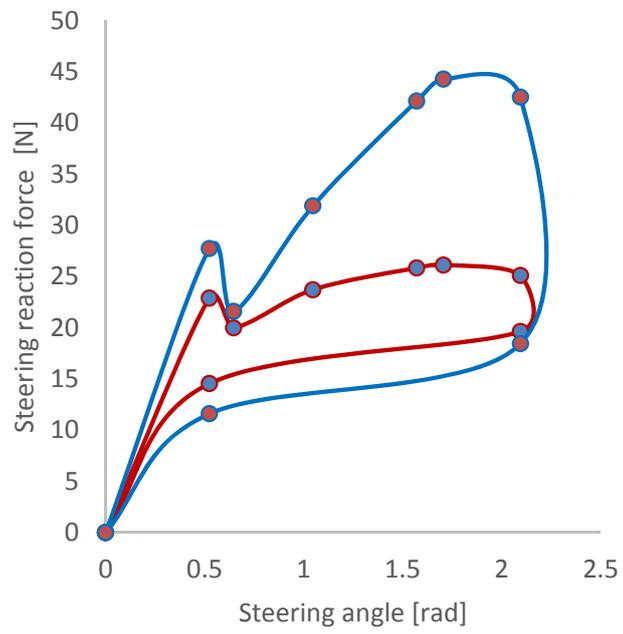
4.2 で得られた第 1, 第 2, 第 3 主成分と SD 法による感性評価結果を用いて重回帰分析を実施した。機械特性をそのまま用いた場合と人間の主観的力知覚空間に変換した場合の各パラメータと、被験者 20 名による感性評価結果との重相関係数  $R^2$  を表 3 に示す。この結果から、機械特性を人間の主観的力知覚空間に変換することにより、ウェーバー・フェヒナーの法則に従った人間が感じる感覚や感性に近い特性を示すため、全ての感性評価項目の重相関係数が向上しており、主観的力知覚空間に変換することにより重回帰分析の精度が平均で 17% 向上することが分かった。また、しっかり感, 重厚さ, 凸感の相関係数の向上は 20% 以上であり, これは反力の大きさに直結するキーワードであったため精度が大きく向上したと推測される。

#### 4.4.4 最適設計

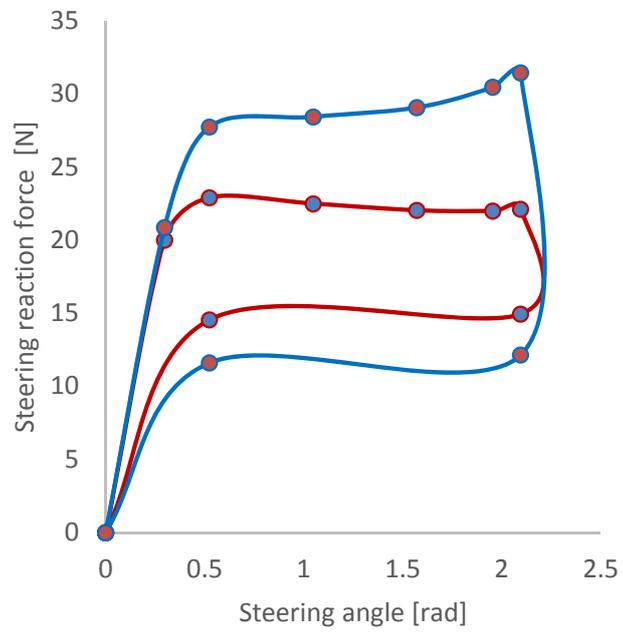
次に, 5 台のステアリング操作特性の各パラメータにおける最大値, 最小値を上下限值として, 2.4 節で提案した最適設計法を用いて, 感性評価が最大となる機械特性の導出を試みた。まず, 感性評価が最大となるパラメータ  $P_1, P_2, \dots, P_9$  を算出する。ここで,  $P_3, P_4$  と  $P_5, P_6, P_7$  が独立変数でないことを踏まえ,  $P_5, P_6, P_7$  で導出した反力特性に対して  $P_4$  の操舵角における  $P_3$  の反力を比較して, 値が大きい方を採用することとした。次に, 各パラメータは主観的力知覚空間に変換後の値のため, 式 (4) を用いて機械特性に逆変換した上でパラメータ間はスプライン関数を用いて補間した。以上のアルゴリズムにより求めた機械特性を図 4-3 に示す。図 4-3 は a が「しっかり感」, b が「リニア感」, c が「重厚さ」, d が「ぎくしゃく感」, e が「重さ」, f が「凸感」を最大として設計した結果である。

表 4-3 多変量解析の結果

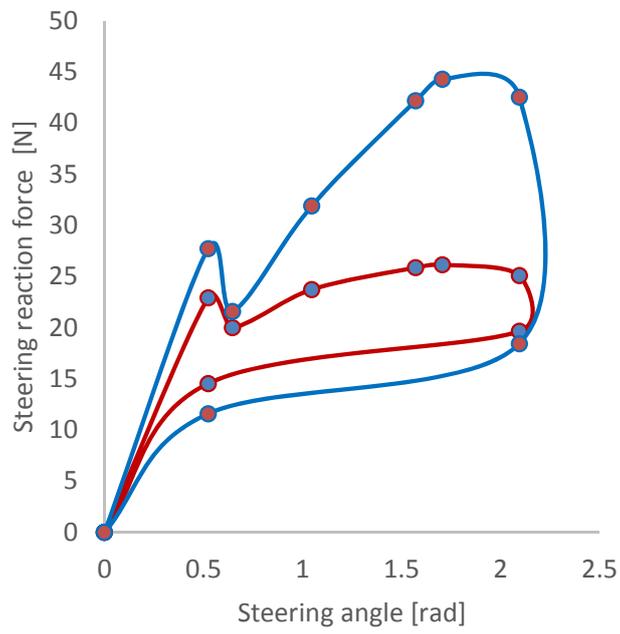
	Mechanical property	Transformed human force perception property	Ratio
Solidity feeling	0.539	0.773	1.434
Linear feeling	0.999	1.000	1.001
Comfortable feeling	0.643	0.890	1.383
Jerky feeling	0.911	0.996	1.093
Heavy feeling	0.860	0.939	1.092
Convex feeling	0.825	0.993	1.204
Average	0.796	0.932	1.170



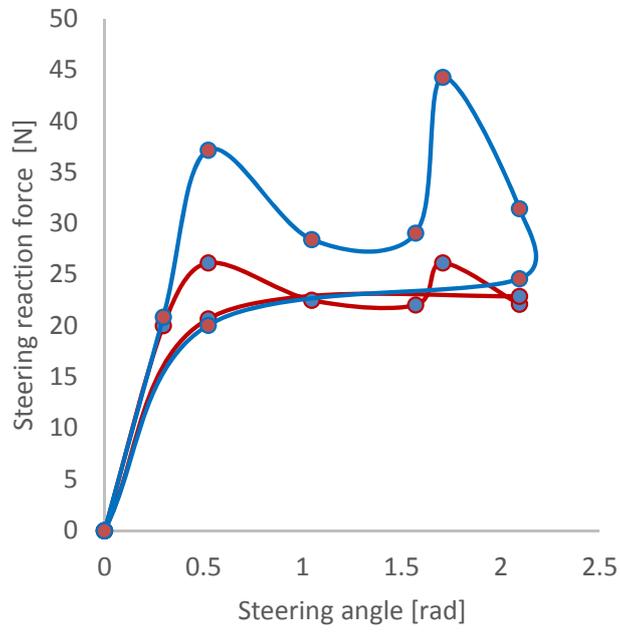
(a) しっかり感



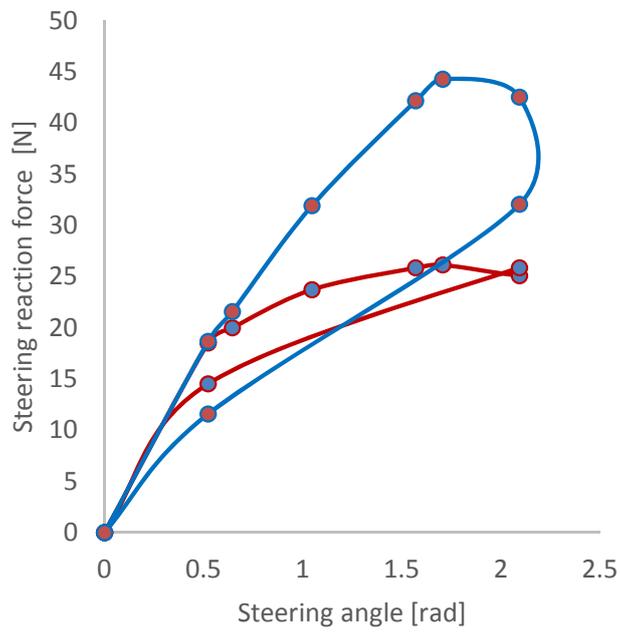
(b) リニアさ



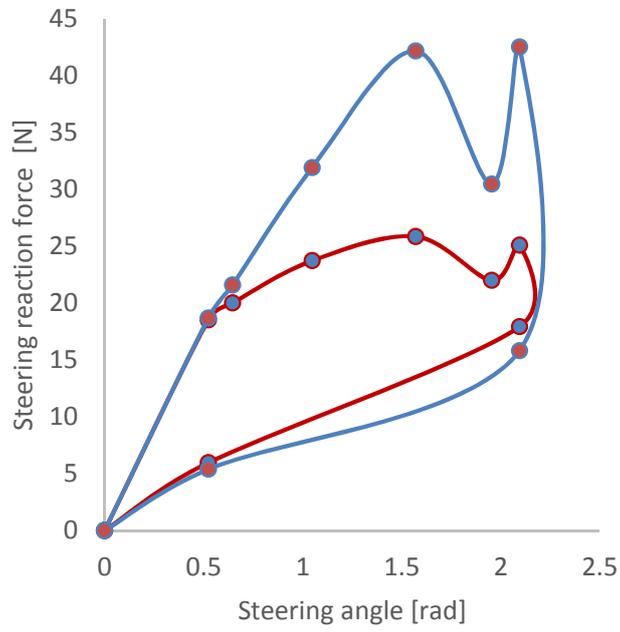
(b) 重厚さ



(d) ぎくしゃく感



(e) 重さ



(f) 凸感

図 4-3 提案手法による最適設計の結果

図 4-3 の最適設計で得られた特性が狙い通りの感性評価であるかどうかを確認するため、ステアリング操作反力装置に機械特性を入力し、実験 4.3 と同様の 7 段階 SD 法を用いて被験者 6 名にて感性評価を実施した。評価結果について 6 名の平均値と標準偏差を表 4-4 に示す。この結果から、感性の推定式から導出した機械特性とその特性を操作した際の感性評価には相関があり、ほぼ狙い通りの感性評価となる機械特性が実現できている。また、市販されている A, B, C, D, E の車に比べて最適設計した結果は狙った特性が最高点近くになっており、実験に使用したすべて車よりも最適設計した項目を強調した特性が実現できたことが分かる。

一方、図 4-3 の a と c は同じ形状を示しており、「しっかり感」と「重厚さ」は同じ機械特性となった。表 4-4 の「しっかり感」と「重厚さ」を最大とした設計に対して、2 つの感性ワードはともに最大の感性評価となっており、本章でおこなった実験の範囲では両者の間に強い相関関係が存在していることがわかる。これが「しっかり感」と「重厚さ」に対する最適設計結果が同一特性を示した理由である。また、被験者は「ぎくしゃく感」が最大の特性は操舵における反力の増減が一定でないことに違和感を感じ、「リニア感」が最大の特性は操舵角の増加に伴い操舵反力が僅かに増加した感じから、ステアリングの操舵と手応えに一体感があると述べている。さらに、「重さ」が最大となるように設計した特性は操舵に応じて反力が大きくなり、操舵角が大きくなると操作がしにくくなることを、「凸感」が最大の特性はぎくしゃく感に似た感触ではあるが、操舵前半のリニアに近い感触に対して操舵後半の急に反力が抜けることから、操作の違和感が大きいことを述べている。

表 4-4 最適設計の主観評価

	Optimal designs						Commercialised vehicles				
	Solidity max	Linear max	Comfortable max	Jerky max	Heavy max	Convex max	Vehicle A	Vehicle B	Vehicle C	Vehicle D	Vehicle E
Solidity feeling	6.00±0.9	6.00±0.9	5.33±0.9	4.83±1.2	6.17±1.4	4.83±1.2	4.80±1.3	4.30±1.1	5.60±1.3	5.80±0.6	4.95±1.2
Linear feeling	6.00±1.2	6.00±1.2	5.00±1.4	3.83±1.0	6.00±1.2	4.17±1.0	4.05±1.3	3.80±1.6	5.25±1.6	5.75±0.9	4.30±1.1
Comfortable feeling	2.83±1.6	2.83±1.6	5.17±1.4	1.50±1.6	2.83±1.6	3.50±1.3	4.45±1.5	4.60±1.5	4.15±1.5	5.00±1.2	4.90±1.5
Jerky feeling	4.17±1.3	4.17±1.3	2.50±0.6	6.00±1.5	4.17±1.3	2.83±1.9	4.65±1.2	4.55±1.3	3.35±1.6	4.35±1.6	5.15±1.6
Heavy feeling	5.33±0.8	5.33±0.8	5.33±0.9	4.00±1.2	6.67±0.8	4.83±0.7	4.30±1.3	3.90±1.2	6.45±0.9	5.80±0.9	3.95±1.3
Convex feeling	2.83±1.6	2.83±1.6	3.83±1.7	3.17±1.2	3.00±1.6	4.83±1.8	3.55±1.7	3.30±1.3	3.55±1.8	2.80±1.3	3.00±1.5

## 4.5 まとめ

本章では自動車の操作機器のうちステアリング操作を取り上げ、力知覚モデルを用いて機械特性を人間の主観的力知覚空間に変換することで、重回帰分析による感性評価のモデル化が全ての感性項目において精度が向上することを明らかにした。これにより、機械特性から人間の主観的力知覚空間へ変換することの有効性を示すことができた。また、感性評価の推定式を用いた最適設計法を提案し、感性に合った機械特性の導出ができる可能性を示した。今後は対象とする母集団（世代や性別など）の種類を増加すると同時に、母集団の特性を十分に反映するのに必要な被験者数や計測条件数などを適切に設定する方法について検討し、他の車でも同様な結果になるか検証を進めていく。また、最適設計における従属変数の取り扱いや設計パラメータの制約条件、特徴量選定法に関する検討が必要と考えられ、主成分分析においては影響力の大きい項目の一般性や、主成分が持つ意味、斜交回転法の適用などについて検討を進め、ステアリング操作反力装置だけでなく実車走行での感性評価も視野に入れながら、他の操作機器、力以外の知覚特性についても同様の検証を進めることで本手法の一般性を検証する予定である。

## 第5章

### 結 論

現在、自動車開発における操作機器の設計は、他車のベンチマーク結果を元にテストドライバーの感性評価とチューニングの繰り返しにより開発されている。その開発に必要となる時間は膨大であるが、操作機器の特性に対する人間の知覚特性や感性評価との関係が分からないまま、机上での設計・検証は難しい。

そこで本研究では、ステアリングホイール操作（以下、ステアリング操作）に焦点を当て、操舵時に人間が主観的に感じる力知覚特性を明らかにするアプローチで、知覚特性を踏まえた操舵特性の設計・検証の実現に向け、研究を進めてきた。その結果、ステアリング操作における人間の主観的な反力知覚特性を解明し、その知覚特性を用いたモデル式を導出し、さらに感性のモデル化と感性設計の最適化手法の提案をおこなった。

以下に本論文の要約と各章の概要、及び結論を総括する。

第2章では、人間の主観的力知覚量を計測し、(1) 姿勢一定での力知覚量はウェーバー・フェヒナー則に従うこと、(2) 力知覚量は姿勢変化に伴い自重や力の知覚特性の影響により変化すること、(3) ステアリング操作における力知覚量は腕の運動履歴には依存しないことを明らかにした。

第3章では、力知覚モデルを導出するために必要な操舵角と反力の変化を組み合わせた反力知覚実験を行い、(1) 送り操舵と戻し操舵では反力の知覚傾向が異なり、(2) 操舵による上肢姿勢変化から腕の自重のみならず、その時の反力に影響を受けることを明らかにし、(3) 送り操舵と戻し操舵において実測値との決定係数が0.88となるようなモデル式を導出した。

第4章では、第3章にて導出したモデル式を用いることで、ステアリングの機械特性を人間の主観的力知覚空間に変換できることと、感性評価のモデル化や最適設計の可能性を示した。

これらの研究成果により、人間特性を踏まえた感性設計が可能となり、自動車開発における机上設計・検証の早期化と、様々なベンチマーク車両における操舵

特性のメカニズム解明へ貢献できると考えられる。

今後の研究課題として、下記3点が考えられる。

第1に、ブレーキペダルやドアハンドルなど四肢の様々な操作における、人間の知覚特性解明とモデル化の実現である。これにより、人間の知覚特性を踏まえた自動車全体での操作特性の設計が可能となり、全ての操作機器から統一感が感じられる特性の導出を机上検証から実現できると考えられる。

第2に、定置のドライビングシミュレータのみならず実車走行においても、4章で明らかにした最適設計の結果が、設計の意図通りにドライバーが感じるかを検証する必要がある。その際、視覚や聴覚などが受ける外界からの刺激が感性評価に影響する度合いを、相互作用を含めて調べる必要があるだろう。

第3に、ドライバーが自動車を運転する時にワクワクする操作特性の解明である。そのためには、ワクワクした感覚や楽しい感覚を想起させる人間のメカニズム解明をおこないながら、これまで明らかにしてきた反力知覚特性と感性評価との関係解明の技術をベースに、ワクワクした感覚と自動車の操作特性との関係解明をおこなう必要があると考えている。

これらの課題を解決すると同時に、これまで明らかにしてきた反力知覚特性は自動車以外の分野でも同様に役立つと考えられ、五感の知覚特性を踏まえたものづくりへの活用が望まれる。

## 参考文献

- (1-1) 国民生活に関する正論調査(内閣府), <http://www8.cao.go.jp/survey/h25/h25-life/index.html>, アクセス日時: 2014.5.4 12:00
- (1-2, 2-1) T.Kijima, T.Hirai, “Vehicle Development through “Kansei” Engineering”, *Special Publications. Society of Automotive Engineers*, No. SP-1772 (2003), pp. 53-59.
- (1-3) 貴島孝雄, 山口宗則, 秋山耕一, “新型ロードスターの紹介”, *マツダ技報*, No. 24 (2006), pp. 3-8.
- (1-4, 3-1) 平松金雄, “運転フィーリングの数値化”, *自動車技術*, Vol. 45, No. 3 (1991), p. 12-18
- (1-5) Yoshiyuki Tanaka, Hidekazu Kaneyuki, Toshio Tsuji, Tooru Miyazaki, Kazuo Nishikawa and Takahide Nouzawa, ”Mechanical and Perceptual Analyses of Human Foot Movements in Pedal Operation”, *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 1736-1741, San Antonio, Texas, USA, October 2009 11-14.
- (1-6) F. A. Mussa-Ivaldi, N. Hogan and E. Bizzi, “Neural, Mechanical and Geometric Factors Subservicing Arm Posture in Humans”, *The Journal of Neuroscience*, Vol. 5, No. 10 (1985), pp. 2732-2743.
- (1-7) 辻敏夫, 後藤和弘, 伊藤宏司, 長町三生, “姿勢維持中の人間の手先インピーダンスの推定”, *計測自動制御学会論文集*, Vol. 30, No. 3 (1994), pp. 319-328.
- (1-8) 田中良幸, 神田龍馬, 武田雄策, 山田直樹, 福庭一志, 正守一郎, 辻敏夫, “ステアリング操作における人間のインピーダンス特性の解析”, *計測自動制御学会論文集*, Vol. 42, No. 12 (2006), pp. 1353-1359.
- (1-9) 田中良幸, 山田直樹, 正守一郎, 辻敏夫, “生体関節トルク特性を考慮した下肢操作特性の解析”, *計測自動制御学会論文集*, Vol. 40, No. 6 (2004), pp. 612-618.
- (1-10) 羽田昌敏, 山田大介, 三浦弘樹, 辻敏夫, “人間-機械系の等価インピーダンス特性解析システム”, *計測自動制御学会論文集*, Vol. 42, No. 9 (2006), pp. 1083-1091.
- (1-11, 3-2) 羽田昌敏, 山田大介, 辻敏夫, “拘束環境下における人間-機械系の等価慣性”, *計測自動制御学会論文集*, Vol. 42, No. 3 (2006), pp. 156-163.

- (1-12) 羽田昌敏, 辻敏夫, “等価慣性指標にもとづく人間—自動車系のレイアウト設計法”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 43, No. 5 (2007), pp. 400-407.
- (1-13) 池浦良淳, 星野広行, 横井大介, 兼原洋治, 星野光弘, 水谷一樹, 澤井秀樹, “腕のインピーダンスに基づく操舵感の評価方法について”, 自動車技術会論文集, Vol. 37, No. 4 (2006), pp. 33-38
- (1-14) Y. Kim, T. Oyabu, G. Obinata, K. Hase, “Operability of Joystick-Type Steering Device Considering Human Arm Impedance Characteristics”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 42, No. 2 (2012), pp. 295-306
- (1-15) J.C.Stevens, S.S.Stevens, “Brightness Function : Effects of Adaptation”, *Journal of Optical Society of America*, Vol. 53, No. 3 (1963), pp. 375-385.
- (1-16) 長田昌次郎, “視覚の奥行距離情報とその奥行感度”, テレビ誌, Vol. 31, No. 8 (1977), pp. 649-655.
- (1-17) 辻敏夫, 島崎知之, 金子真, “ロボットインピーダンスに対する人間の知覚能力の解析”, 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 2 (2002), pp. 180-186.
- (1-18, 2-2) 田中良幸, 辻敏夫, “ヒトの上肢姿勢維持における手先反力知覚の方向性”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 216, No. 3 (2011), pp. 335-341.
- (1-19) L. A. Jones, “Perceptual Constancy and the perceived magnitude of muscle forces”, *Experimental Brain Research*, Vol. 151, No. 2 (2003), pp. 197-203.
- (1-20) A. C. Newberry, M. J. Griffin, M. Dowson, ”Driver perception of steering feel, *Journal of Automobile Engineering*”, Vol. 221, No.4 (2007), pp. 405-415
- (1-21) 山田大介, 久代育生, 村岸裕浩, “操舵トルクの特徴が人間—自動車系に及ぼす影響”, 自動車技術会論文集, Vol. 44, No. 2 (2013), pp. 459-465.
- (1-22) M. Salaani, G. Heydinger, P. Grygier, “Experimental steering feel performance measures”, SAE Technical Paper, 2004-01-1074 (2004), pp. 665-679
- (1-23) 上原繁, 白石修士, 樋口実, “ドライバフィーリングと操安特性との関連”, 自動車技術, Vol. 41, No. 3 (1987), pp. 341-347.
- (1-24) 佐藤博文, 原口哲之理, 大沢洋, “操舵感に関わる操舵応答特性の考察”, 自動車技術, Vol. 44, No. 3 (1990), pp. 52-58.
- (1-25) 脇田敏裕, “自動車の音色評価”, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol. 27, No. 3 (1992), pp. 23-32.
- (1-26) Zhang, L. and Vertiz, A., “Kansei Engineering Application on Commercial Truck Interior Design Harmony”, SAE Technical Paper, 2000-01-3412 (2000), DOI:10.4271/2000-01-3412.

- (2-3) T. Flash and N. Hogan, “The coordination of arm movements: An experimentally confirmed mathematical model”, *The Journal of Neuroscience*, Vol. 5, No. 7 (1985), pp. 1688-1703.
- (2-4) T.Tsuji, P.Morasso, K.Goto and K.Ito, “Human Hand Impedance Characteristics during Maintained Posture in Multi-Joint Arm Movements”, *Biological Cybernetics*, Vol.72, No.6(1995), pp. 475-485.
- (3-3) D. Tolani, A. Goswami and N. Badler, “Real-time inverse kinematics techniques for anthropomorphic limbs” , *Graphical Models*, Vol. 62, No. 5 (2000), pp. 353-388
- (3-4) J. Abadie and J. Carpentier, “Generalization of the Wolfe Reduced Gradient method to the Case of Nonlinear Constraints: in Optimization (R. Fletcher(ed.)) “ , Academic Press, (1969), pp. 37-47
- (4-1) Hotelling, H., “Analysis of a complex of statistical variables into principal components”, *Journal of Educational Psychology*, Vol. 24, No. 6 (1933),pp.417-441. DOI:10.1037/h0071325
- (4-2) Osgood, C.E., Suci, G.J., and Tannenbaun, P.H., “The Measurement of Meaning”, University of Illinois Press, Urbana (1957), p. 346
- (4-3) 奥野忠一, 芳賀敏郎, 矢島敬二, 奥野千恵子, 橋本茂司, 古河陽子, “続多変量解析法”, (1976), p.115.

## 謝辞

本研究において、たくさんの関係者の協力により論文を作成することができました。

広島大学工学研究院システムサイバネティクス専攻教授 辻 敏夫 博士には、未経験である論文作成や国際会議での発表に際し、多大な時間にてご指導いただきました。また、研究の要所において研究の進め方や考え方をご助言いただき、研究好奇心だけが先にあった自身の考えが、こうして形となった報告書にまとめられたことは先生のご指導あつての賜物であります。広島大学工学研究院システムサイバネティクス専攻准教授 栗田 雄一 博士には大学での研究会にてたくさんのアドバイスやご指摘をいただきました。長崎大学工学研究科システム科学部門准教授 田中 良幸 博士にはこの研究の基盤となるアクセルペダルの知覚特性や実験装置についてご指導いただきました。

マツダ株式会社 技術研究所長 農沢 隆秀 博士には、辻 敏夫 博士をご紹介いただき、論文作成時にはたくさんのご指導をいただきました。部門統括研究長 西川 一男 氏には、論文の細かな体裁についてご指導いただき、研究長 岸 篤秀 氏には、業務が多忙な中でも大学での研究に時間を使用させていただくことを許していただきました。シニアテクニカルスペシャリスト 山田 直樹 氏には、全ての論文作成についてご指導いただき、国際会議への投稿においては英語が未熟だった私の論文を忙しい中見て頂きました。辻研究室の先輩でもあるシニアテクニカルスペシャリスト 武田 雄作 博士には苦手な機械工学や計測器について、現在の上司であるアシスタントマネージャー 新部 忠幸 氏には研究成果がどうすれば会社の業務に役立つかをご指導いただきました。

広島大学の同研究室においては、研究員である 平野 陽豊 博士には不思議な縁があり、国際会議や研究活動にて様々なご支援をいただきました。既に卒業されました中原 裕貴 氏には PID 制御など操舵反力装置のプログラミングについてご指導いただくと同時に、成末 充宏 氏を始め大学関係者やマツダ株式会社 技術研究所の皆様にも膨大な被験者実験に協力いただきました。

この場を借りて、深くお礼申し上げます。