

論文・解説

19

人間の反力知覚特性の解明と操作機器の反力設計への適用 Analysis of the Human Ability to Perceive Reaction Force and its Application to a Reaction Force Design for an Operational Device

竹村 和紘*¹ 山田 直樹*² 新部 忠幸*³
Kazuhiro Takemura Naoki Yamada Tadayuki Niibe
岸 篤秀*⁴ 西川 一男*⁵ 農沢 隆秀*⁶
Atsuhide Kishi Kazuo Nishikawa Takahide Nouzawa

要 約

ドライバーがコーナリング走行時にステアリングホイール（以下、ステアリング）を操作し、目標地点に向かって車を制御する時、車の進む方向が予見しやすければ、「意のままの運転」が可能になると考えられる。また、「意のままの運転」ができていた時のドライバーの感覚を、リニアなフィーリングと呼んでいる。ここで、リニアなステアリングの操作フィーリングを実現するためには、操作入力に対する車両応答の関係を線形にすればよいという仮説を持っていたが、実際にはリニアなフィーリングが得られない問題が生じる。これは、物理特性どおりに人間が感じていないためである。従って、操作入力と車両応答の知覚特性をモデル化することで、感覚量と物理量の関係を明らかにしなければ、リニアなフィーリングは設計できない。このような考えに基づき、「意のままの運転」の実現にあたり、コーナリング走行における車の「走る・曲がる・止まる」で必要となる操作に関わる各基本特性において、本稿では、リニアを表現するための操作入力に関する反力知覚モデルの解明と操作機器の反力設計への適用について報告する。

Summary

When a driver operates a steering wheel (hereinafter, is steering) a car while turning a corner and controlling the car toward a target point, it is commonly assumed that a driver feels in control of the car when the car's steering characteristics allow them to easily foresee the direction in which the car will move. This sense is known as a linear feeling. The authors have hypothesized that the relationship of a vehicle's response to an operational input must be linear to realize the operational feeling of linear steering. However, in reality, a problem occurs in which the linear feeling is not felt. This problem occurs because human beings do not entirely experience any feeling through its physical properties alone. Accordingly, a linear feeling cannot be integrated into the design if a mutual conversion between a steering sense and a physical characteristic is not enabled by modeling the perception properties between the operational input and the vehicular response. Based on the above hypothesis, to truly experience the joy of driving, the authors will analyze reaction force perception models and apply the results to a reaction force design for an operational device with reference to operational inputs for all basic actions, such as driving, turning, and stopping, related to driving that a driver carries out while turning a corner.

1. はじめに

私たちは、「走る喜び」と「優れた環境・安全性能」が調和した車を実現することを目指している。例えば、お客様の「走る喜び」（ワクワク感）を実現するため、新型ロードスターでは「意のまま感」といった感性ワードを軸にして、設計パラメータを決定するような商品開発が行われ

ている^①。具体的には、そういった感性ワードについて、人間がフィーリング評価を行い、自動車の機械特性にまで落とし込んでいる。

これまで、「意のまま感」を感じさせる操作機器を実現するために、テストドライバーのフィーリング評価とチューニングを納得いくまで繰り返してきた。しかし、試作とフィーリング評価を繰り返すことで多くの時間が必要とな

*1~6 技術研究所
Technical Research Center

る。また、これらの機械特性を設計する時、お客様のフィーリングを予測できれば、開発初期でのフィーリング検討が可能となり、車造りの効率化に役立つ。

精神物理学では、人間は音の大きさや光の明るさといった物理値をそのまま感じておらず、知覚特性というフィルターを介して感じていることが知られている。操作機器を操作する時においても、機械から生じる反力の物理値を人間はそのまま感じていないため、知覚特性を踏まえた機械特性を設計しないと感性評価と一致せず、思い描いたフィーリングが造れない⁽²⁾。

今回は、アクセルやステアリング、ブレーキの反力知覚特性を解明し、車の「走る・曲がる・止まる」で必要となる操作全てにおける、反力知覚特性から見た望ましい反力設計を考案した。

2. 人間の知覚特性解明の方法

一般に精神物理学における人間の知覚特性の計測手法は、弁別閾を計測する方法と、マグニチュード推定法やマグニチュードプロダクションを用いて計測する方法がある⁽³⁾。弁別とは、2つ以上の異なる刺激の間の差異を感知する作用のことで、弁別可能な最少の刺激差異を弁別閾と呼び、弁別閾を計測する手法は、Fig. 1のように横軸の標準刺激の大きさに対し、縦軸にその標準刺激から刺激量を徐々に増やした際に弁別できた値をプロットして知覚特性を得るものである。例えば、標準刺激である10Nから刺激量を1Nずつ増やしていき、3N増やした時に刺激の違いを感じることができたら、その値をプロットする。

一方、マグニチュード推定法とは基準となる刺激を100%であると被験者に記憶させ、その基準に対して提示する比較刺激が何%に感じたかを考えさせ、答えてもらう手法である。この時、比較刺激の大きさはランダムに提示する。例えば、標準刺激が2Nとした時、その大きさを100%であると被験者に教えた後、比較刺激を1~5Nまでランダムに提示した時、2Nに対して感じた大きさを検討させてその回答をプロットしていく。マグニチュードプロダクションは、被験者に標準刺激100%を与えた後、被験者自身が装置を操作することで標準刺激の指定された倍率の強さと感じる刺激を自ら操作し求める方法である。これらの手法で計測した結果をFig. 2に示す。横軸に実際に生じた刺激量、縦軸に被験者が標準刺激に対して感じた比較刺激の大きさをプロットし、知覚特性を表現する。

以上より、マグニチュード推定法は知覚の全体像解明に適しているのに対し、弁別閾の計測は詳細で微小領域での知覚検証に適している。また、マグニチュードプロダクションは頭で考えるのみでなく、能動的な自身の操作が加わるため、実際の操作環境により近い状態での知覚検証となる。操作対象の形状や使用する反力の大きさは操作対象に応じてさまざまであり、今回は、テストドライバーの知見や

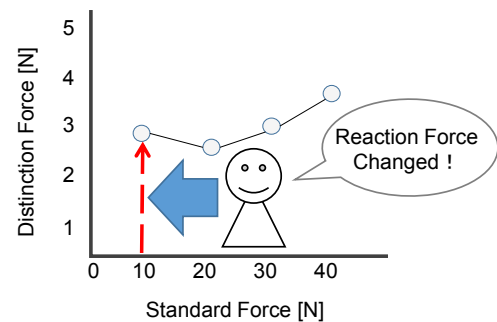


Fig. 1 Threshold Measurement

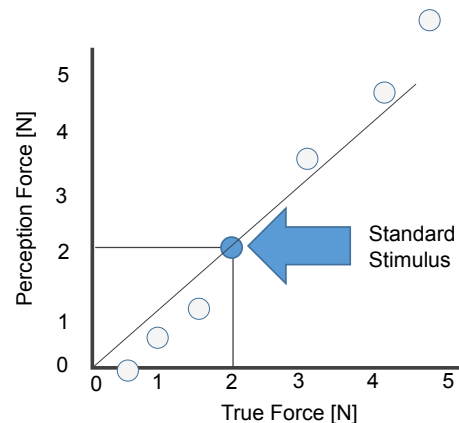


Fig. 2 Magnitude Estimation and Magnitude Production

既報の論文を踏まえ、注力する調査対象に応じて人間の知覚特性を解明した。なお、全ての実験前には、被験者に実験内容、およびプライバシー遵守を伝え、ヘルシンキ宣言ののっとりインフォームドコンセントを得た上で実験を実施した。

3. 反力知覚の計測実験

3.1 アクセル操作における反力の知覚結果と考察

「走る」シーンにおいて、ドライバーは追い越しなどで自動車を加速させる時、アクセルペダルを操作しながら速度を調整する。ここで、ドライバーはペダルから生じる反力を感じながら、踏み込む量をペダル操作にて調整しており、人間がペダル反力をどのように感じているかは、リニアな加速フィーリングが得られるペダル特性を検討する上で重要と考えられる。そこで、ペダル操作時の人間の反力知覚特性を調査することとした。これまで、モーターから生じるペダルの反力を被験者に感じさせ、受動的条件下で計測した反力知覚特性が報告されている⁽⁴⁾。これはシミュレータ上での結果であり、実車でも同様の結果であるかが分からない。そこで、今回はより実際の走行環境に近づけた状況にて検証を実施した。具体的には、実車を用いて被験者が能動的なペダル操作をした際の反力知覚特性を計測した。

実験は、Fig. 3に示すアクセラのアクセルペダルA（オ

ルガン式)を用いて、事前にF-S (Force Stroke) 特性を調べておき、ペダルのストローク量からその時に生じたペダル反力が算出できるようにした。なお、ペダルのストローク量は車両のController Area Networkの信号から計測し、実験ではマグニチュードプロダクションを用いた。まず、ドライバー席に座った被験者に、事前にストローク量が50%における反力を基準100%であることを体感させ、覚えてもらう。そして、実験者はFig. 3の点線で示す50~200%までの50%刻みの反力をランダムに指示し、被験者には指示された反力とを感じるまでペダルをストロークさせる。結果をFig. 4に示す。この図は被験者2名(エキスパートドライバー1名、一般ドライバー1名)の結果であり、横軸が提示した力 F_t 、縦軸が知覚した力 F_p で、実線は最小二乗法で求めた式(1)である。なお、係数 a 、 b 、および決定係数 R^2 を図中に示す。

$$F_p = aF_t + b \quad (1)$$

この図から、実際に生じた反力に対する知覚した力の関係は、2名とも線形となり、生じた反力を線形的にそのまま感じていることが確認できる。

一方、ペダルAよりも重いペダルや軽いペダルについても、同様の知覚特性であるかを検証した。用いたペダル特性をFig. 5に、各ペダルにて計測した知覚特性の結果をFig. 6に示す。

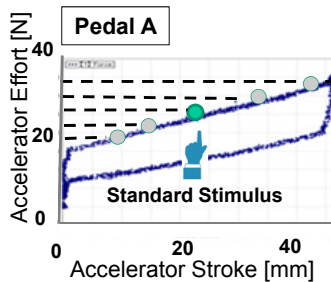


Fig. 3 Relation between Accelerator Pedal Effort and Stroke in Pedal A

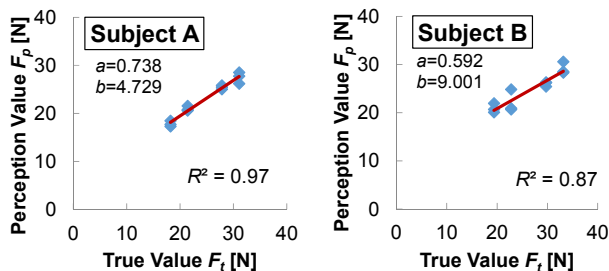


Fig. 4 Relation between True and Perceived Force in Pedal A

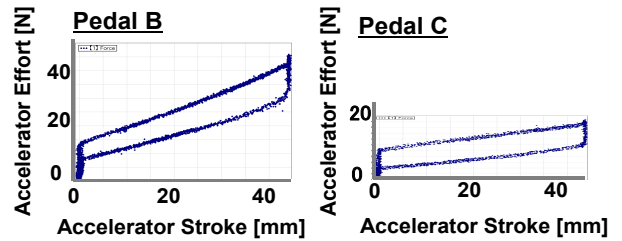
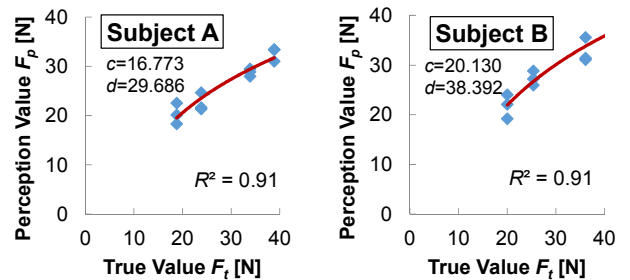
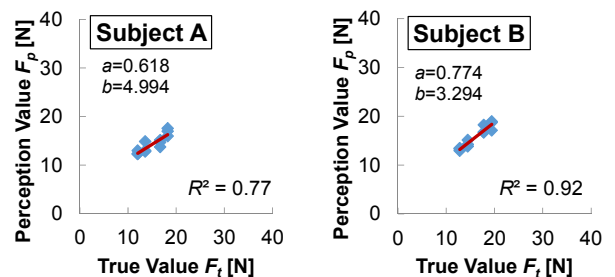


Fig. 5 Relationship among Accelerator Pedal Efforts, Stroke in Pedal B, C



(a) Pedal B



(b) Pedal C

Fig. 6 Relation between True and Perceived Forces for Two Different Pedal Weights

Fig. 6のペダルBの実線は最小二乗法で求めた式(2)であり、ペダルCの実線は最小二乗法で求めた式(1)である。なお、係数 a 、 b 、 c 、 d 、および決定係数 R^2 を図中に示す。

$$F_p = c \log(F_t) + d \quad (2)$$

反力が重いペダルBでは、Fig. 6(a)に示す赤い太線のように、実際の反力と感ずる力の関係は対数関数的な傾向を示した。すなわち、反力が大きくなるに従い鈍感となり力の大きさが分かりにくくなることから、ペダルBで調べた範囲まで反力を大きくするとウェーバー・フェヒナーの法則に従った特性が現れることが分かる。このように反力が重いペダル操作では、受動的なペダル操作にて報告された反力知覚特性⁽⁴⁾と同様の傾向であることが確認できた。一方、Fig. 6(b)に示す反力が軽いペダルCでは、ペダルAと同様に実際の反力と感ずる反力の関係は線形となったが、

被験者のコメントから、ペダルAと比べて操作時に踏み込めがなく、操作した感覚が分かりにくいことが判明した。これは、ペダルから生じる反力の刺激量が小さく、被験者がペダルを操作した際に生じる反力の変化が感じ取れないことが原因と推測される。すなわち、ペダルの操作性を向上させるには、操作時に反力変化が感じ取れるようなストローク操作量に対する反力の勾配を大きくした機器特性を検討する必要があると考えられる。

3.2 ステアリング操作における反力の知覚結果と考察

「曲がる」シーンにおいて、例えば十字路口や山道のコーナリングでは、ドライバーはステアリングを操作することで車両の向きを変えている。これまで、ステアリング操作時の反力知覚特性は、マグニチュード推定法を用いた実験から、ウェーバー・フェヒナーの法則に従うことや、操舵角が大きくなるに従い生じるステアリングの接線方向にかかる腕の自重の影響から、反力が軽く感じられることを明らかにしてきた²⁾。しかし、反力の小さな不感帯近辺を含めた、詳細な知覚特性は解明しておらず、今回は、ステアリングの反力を1Nずつ増加させた時の人間の弁別閾を計測することにした。

実験は、Fig. 7に示すドライビングポジションにて被験者を座らせて実施した。ステアリングの反力については、調整可能な反力発生装置を用いており、被験者にはステアリングを両腕で持たせることで、ステアリングから生じる反力を感じさせる。まず、基準となる反力を感じさせた後に、1N刻みで反力を増加させ、反力の大きさが変わったと感じたタイミングを回答させた。ここで、基準は0~35Nまでの反力を5N刻みで提示した。被験者は、エキスパートドライバー2名と一般ドライバー3名の計5名（30代~50代）の男性である。結果をFig. 8に示す。横軸が基準の反力、縦軸が弁別閾で、5名の平均値をプロットした上で標準偏差をエラーバーで示す。この結果を見ると、5N未満の小さな反力は弁別がしにくく、そこから反力が大きくなるに従い弁別がしやすくなるが、30N以上の反力になると再度弁別がしにくくなるのが分かる。

ウェーバーの式をもとに得られた弁別閾の値から感覚量を求め、一般的な手法を用いて、横軸を実際の反力、縦軸を感じた力の大きさとして、Fig. 9のグラフを作成した。この図から、知覚特性の全体形状はおおむね対数関数的であり、ウェーバー・フェヒナーの法則に従うが、微小な反力ではべき乗則に従う知覚特性となり、その変化は15N付近で生じていることが分かる。この変化が生じるメカニズムを調査するため、実験時の両腕の筋活動を計測した。計測箇所はFig. 10に示す、上腕二頭筋、上腕三頭筋、尺側手根屈筋で計6ヶ所である。反力の大きさに応じて筋活動量が変化している部位を調べたところ、右腕（引手）の上腕二頭筋と左腕（送り手）の尺側手根屈筋のみであった。

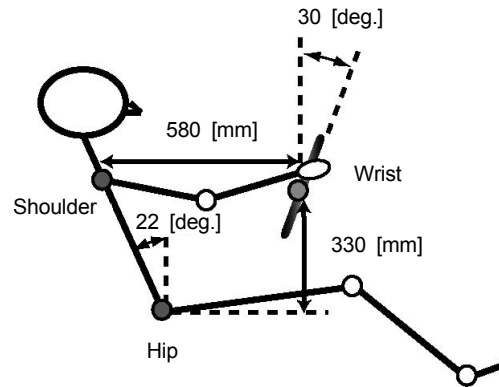


Fig. 7 Experimental Conditions²⁾

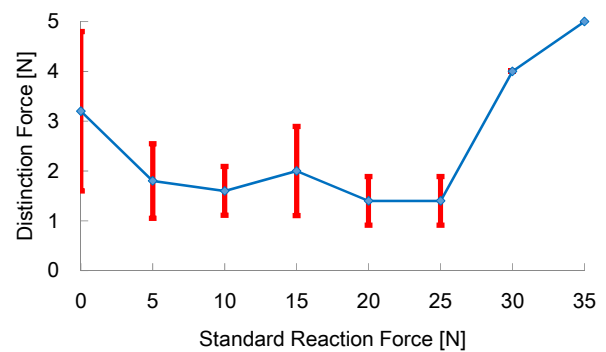


Fig. 8 Relation between Standard and Distinction Forces

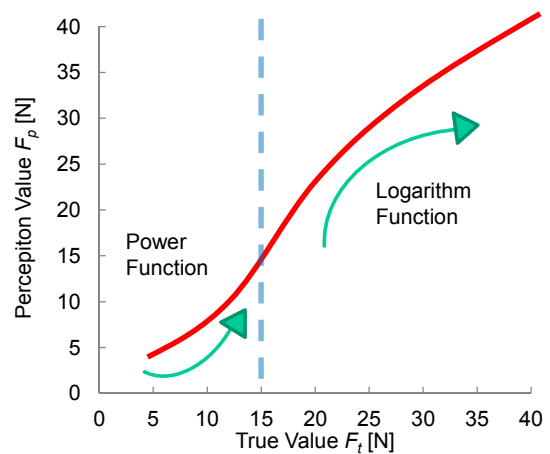


Fig. 9 Relation between True and Perceived Force

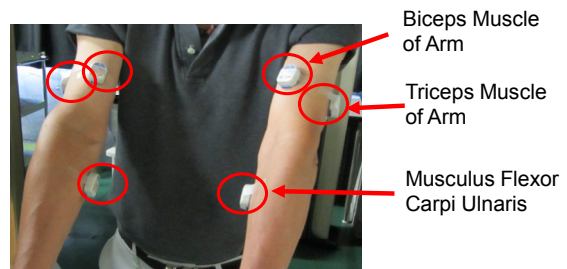


Fig. 10 Attachment Position of the Myoelectric Sensor

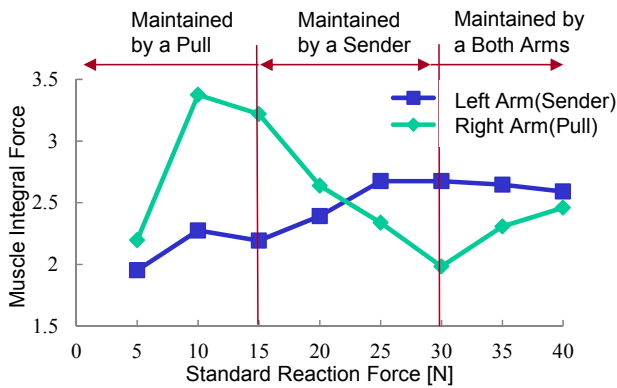


Fig. 11 EMG Contraction Level Every Reaction Force

それぞれの筋電値を積分し反力ごとにプロットしたものをFig. 11に示す。15N未満では引手の筋活動が大きく、15N以上から30N未満では引手から送り手に筋活動が移り変わり、30N以上になると両腕の筋活動がともに上昇していることが分かる。つまり、被験者1名の結果ではあるが、弁別閾の変化は引手から送り手への腕と筋活動の移り変わりが知覚変化の要因として考えられる。ドライバーに提供したいステアリングの反力を検討する際は、こうした変化点を考慮した設計が望まれる。

3.3 ブレーキ操作における反力の知覚結果と考察

「止まる」シーンにおいて、ドライバーが自動車を減速させたい時、ブレーキペダルを操作する。ここでのペダル操作では、加速時と同様に、ドライバーはペダルから生じる反力を感じながら操作量を決定している。しかし、ブレーキペダルの形状は多くが吊り下げ型であり、オルガン式のアクセルペダル操作と同様の知覚特性であるかは分からない。そこで、今回は、吊り下げ型のブレーキペダルを反力生成装置に取り付け、ペダル反力を自在に変化させながら、ペダルから感じた力の大きさを回答させた。

ここで、実際の運転時のペダル操作に近づけるため、ペダル反力はストローク量に応じて増加するように設定し、被験者が能動的にペダルを動かす、あるストローク量にて感じた反力の大きさを答えてもらうマグニチュード推定法を実施した。被験者にFig. 12のドラインビンギンポジションとなるような姿勢で座らせ、ブレーキペダルから生じる反力20Nを基準である100%と覚えさせた後、実験車が5~45Nの反力を5N刻みでランダムに変化させ、基準に対して感じた反力の大きさを%で回答させた。被験者はエキスパートドライバー2名と一般ドライバー2名の計4名(20代~50代)の男女各2名で実施した。結果をFig. 13に示す。横軸が提示した力 F_t 、縦軸が知覚した力 F_p で、実線は最小二乗法で求めた式(1)である。係数 a 、 b 、および決定係数 R^2 を図中に示している。この図から、実際のペダル反力と感じた力の関係は、アクセルペダルA、Cと同様に線形

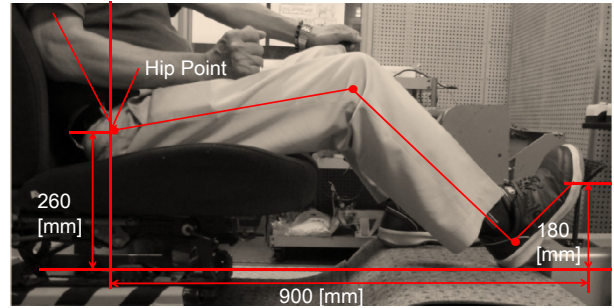


Fig. 12 Experimental Conditions

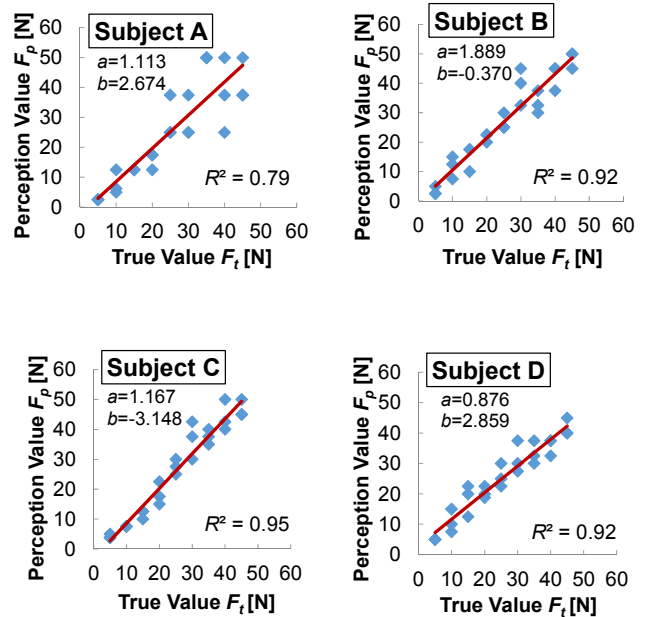


Fig. 13 Relation between True and Perceived Force in Brake Pedal

な特性となり、ペダルの反力をそのまま感じる線形的な結果になった。アクセルペダルBとは知覚特性が異なるが、ブレーキに比べてアクセルは使用する反力が小さく、日常ではともに線形な領域を使用していると考えられる。知覚の差が生じる原因は次節にて考察する。

3.4 四肢における反力知覚の考察と設計への適用

人間の四肢における反力知覚特性は、反力の大きさに応じて異なることが分かった。ここで、上肢と下肢において感じる力の大きさは、どのように異なるかを分析した。分析内容は、3.1節~3.3節で得られた実際の反力 F_t と人間が感じた力 F_p の関係式をそれぞれ並べ、感じた力 F_p を横軸にしたとき、各操作機器で必要となる反力の大きさを縦軸にとった主観的等価値(Point of Subjective Equality; PSE)を求めた。結果をFig. 14に示す。30N以下では、上肢で操作した反力を感じるステアリングに対し、下肢で操作した反力を感じるアクセルやブレーキでは、同じよう

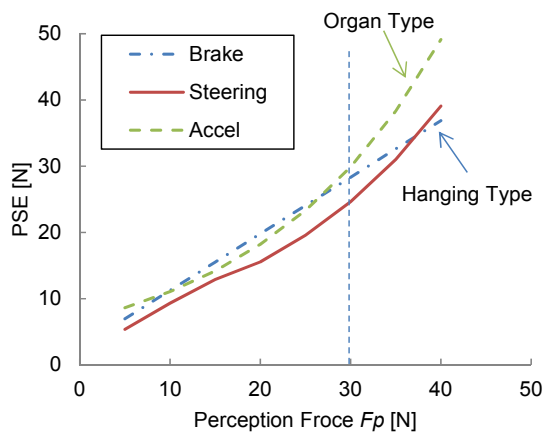


Fig. 14 Change of PSE Depending on the Perception Force

に感じている。このことから、下肢のほうが必要となる反力が大きいことが分かる。つまり、この結果から、下肢は上肢に比べて力の感受性が鈍感であると推測される。

一方、アクセルとブレーキにおいて30N以上の大きな反力では、同じ反力と感ずるために必要な反力量が異なっており、ブレーキの吊り下げペダルはアクセルのオルガンペダルに比べて踵位置が固定されないため常に足全体で反力を感じ取れず、踏み込み量の増加に伴い踵浮きや踵位置の移動による足首角度の違いから、反力を感じ取る部位が異なり、力の感じ方に差が生じているものと推測される。

以上より、各操作において同じ反力を感じさせたい場合は、操作する四肢の部位による知覚特性の違いや、30N以上の反力知覚特性を踏まえた反力設計を行う必要がある。また、電子制御技術を用いることで、異なった操作機器でも感じさせたい反力の感覚量から物理量を逆算して生成することで、同じような操作感覚を体感させることが可能になると考えられる。

4. おわりに

「走る・曲がる・止まる」の各シーンにおいて、ドライバーが操作機器を操作する際の反力知覚特性を明らかにした。ステアリングでは15N付近で知覚に変曲点があることが分かり、アクセルやブレーキでの知覚特性は小さい反力では同様な傾向であるものの、生じる反力が大きくなると機器の方式ごとに知覚特性が変化することが明らかとなった。また、ドライバーに感じて欲しい操作機器の反力特性を検討する際、3章で得られた式(1)(2)の係数を被験者の平均値とした上で、感じて欲しい力の大きさを F_p に入力すれば、必要となる機械特性の物理値 F が導出でき、作り手のイメージどおりの操作反力が設計可能となる。

本手法は、他の操作機器にも適用可能であり、人間の反力知覚特性をモデル化することで、提供したい感性が実現

できると考えられる。「意のままの運転」を可能にするリニアなフィーリングを実現するためには、操作入力のみではなく車両応答との組み合わせを考慮した知覚特性の解明が必要となる。加えて、ダイナミック状況下におけるフィーリングと生体反応との関連性については今後の課題である。

最後に本研究にご協力いただきました広島大学 辻敏夫教授をはじめ関係者の皆さまに深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 山本ほか：新型ロードスターの紹介, *マツダ技報*, No.32, pp.93-98 (2015)
- (2) 竹村ほか：人間の主観的な力知覚モデルの提案とステアリング操作系への応用, *日本機械学会論文集*, No.795, pp.64-73 (2012)
- (3) 福田ほか：増補版 人間工学ガイド, サイエンス社 (2009)
- (4) 山田ほか：反力知覚特性に基づく自動車操作機器特性に関する考察, 第47回日本人間工学会中国・四国支部大会講演論文集, pp.96-97 (2014)

■ 著 者 ■



竹村 和紘



山田 直樹



新部 忠幸



岸 篤秀



西川 一男



農沢 隆秀