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*

竹村 和紘^{*1}, 山田 直樹^{*1}, 岸 篤秀^{*2}, 農沢 隆秀^{*1} 田中 良幸^{*3}, 栗田 雄一^{*4}, 辻 敏夫^{*4}

A Subjective Force Perception Model of Humans and Its Application to a Steering Operation System of a Vehicle

Kazuhiro TAKEMURA*1, Naoki YAMADA, Atsuhide KISHI, Takahide NOUZAWA, Yoshiyuki TANAKA, Yuichi KURITA and Toshio TSUJI

*1 Mazda Motor Corporation 3-1 Shinchi, Fuchu-cho, Aki-gun, Hiroshima, 730-8670 Japan

The present study was carried out to clarify characteristics of human motion and perception and to support the development of a force perception model for vehicle operation. This paper describes initial experimental analysis of human force perception characteristics relating to steering operation, which involves multiple joint motions and large postural changes of the arms. The results highlighted three points in particular: (1) force perception follows the Weber-Fechner law when arm posture is constant; (2) force perception depends on the steering wheel angle and is affected by the weight and stiffness of the arms; and (3) force perception does not depend on the preceding state of the arms before perception.

Key Words: Force Perception, Human Model, Steering Operation, Weber-Fechner Law, Arm Weight

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⁽¹⁾. 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.

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⁽²⁾、 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⁽³⁾ . 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⁽⁴⁾、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⁽⁵⁾ . 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⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾ . この



[·] 原稿受付 2012年7月17日

^{*1} 正員, マツダ(株) (〒730-8670 広島県安芸郡府中町新地 3-1)

² マツダ(株) (〒730-8670 広島県安芸郡府中町新地 3-1)

^{*3} 広島大学大学院工学研究院(〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

^{*4} 正員,広島大学大学院工学研究院(〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

E-mail: takemura.ka@mazda.co.jp

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⁽⁹⁾、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 Luneburg の仮定と同様に飽和特性になることを報告している⁽¹⁰⁾. 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⁽¹¹⁾. 田中らは、2次元水平面上でのスライダー操作において、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⁽¹²⁾. 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⁽¹³⁾. 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と、異なる力に感じる可能性がある。そこで、本論文では、 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。

2. 実験

2・1 実験装置

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。そのために本論文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。

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

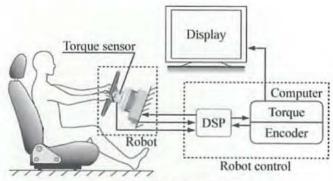


Fig.1 A driving simulator

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 $^{(14)}$ に従って指定角度 θ_c だけ滑らかに移動させた。

$$\theta_{v}(t) = \theta(0) + \theta_{f}(6s^{5} - 15s^{4} + 10s^{3}) \tag{2}$$

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、本論文の実験では $t_f=4$ [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慣性モーメントM=0.03 [kgm²]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。

$$F(t) = \frac{K(\theta_{\nu}(t) - \theta(0))}{0.185}$$
(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.

$$T = K_p e(t) + K_t \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$
(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_l 、 K_d はそれぞれ比例ゲイン、積分ゲインである。本論文では、サンプリング周波数を 1 [kHz]とし、 $K_p = 90$ [Nm/rad]、 $K_l = 1.5$ [Nm/srad]、 $K_d = 1$ [Nms/rad]と設定した。

2 * 2 実験方法

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「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、本論文では、0~120 [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1参照)

2・2・1 ステアリング反力の変化に対する力知覚特性

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) \sim (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・2・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・2・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・2・1 と同じである。

2・2・3 動的操作における力知覚特性

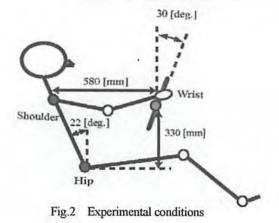
次に、被験者自らステアリングを操作した際、操作後の姿勢変化が人間の力知覚特性にどのような影響を与えるかを明らかにするため、 $2\cdot 2\cdot 3$ では、自ら操舵した動的操作の後、被験者に指定した操舵角までどのように反力を知覚したかを調べた。ただし、標準刺激は操舵角 0 [deg.]では $2\cdot 2\cdot 2\cdot 2$ と同じ静的な状態で反力を提示され、比較刺激の操舵角 30, 60, 90, 120 [deg.]の 4 種類では被験者自らの動的操作により反力を提示した。比較刺激はランダムに提示し、各操舵角で 5 回ずつの計 25 回となるまで測定を繰り返した。実験では、まず、被験者に $\theta(0)$ = 0 [deg.]で姿勢を維持させ、 θ_t まで 20 [deg. δ]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 δ 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。

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

ただし、 F_t は最終的に被験者に提示する反力、 θ_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。

Table 1 Experimental condition

	2.2.1	2.2.2	2.2.3
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



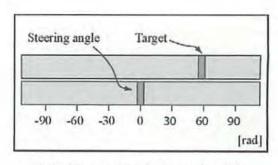


Fig.3 Target position for the steering angle

3. 結果と考察

3・1 ステアリング反力の変化に対する力知覚特性

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 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 θ (0)が 0[deg.]、60[deg.]、120[deg.]の場合である。横軸は提示した $\int F_t$ 、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。

$$F_p = a\log(F_t) + b \tag{6}$$

図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(11)と同様の傾向を示している。

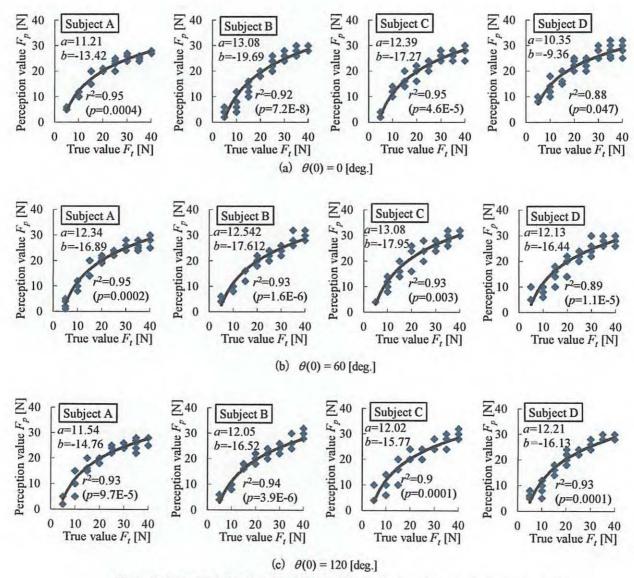


Fig.4 Relationship between true and perceived forces for three different steering angle $\theta(0)$

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、 力知覚量の特性は大きく変わらないことが明らかになった.

3・2 ステアリング操舵角の変化に対する力知覚特性

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 $2 \cdot 2 \cdot 2$ の実験結果を図 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。

$$F_p = c\theta(\mathbf{0}) + d \tag{7}$$

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(\blacksquare , \blacktriangle , \times)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。前章の2・2・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 $0\sim60$ [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 $0\sim60$ [deg.]までは、図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。

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

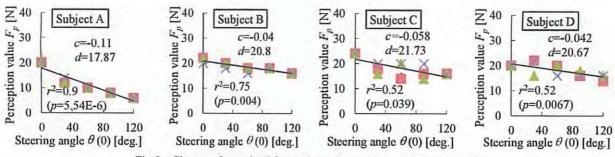


Fig. 5 Change of perceived forces depending on the steering angle $\theta(0)$

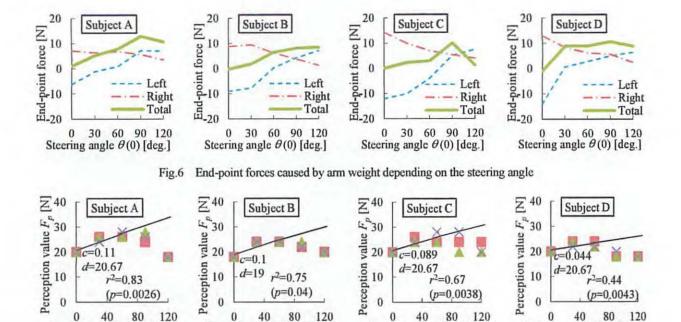


Fig.7 Change of perceived forces depending on the rotating direction

40

Steering angle $\theta(0)$ [deg.]

80 120 40

Steering angle $\theta(0)$ [deg.]

80 120

40

Steering angle $\theta(0)$ [deg.]

80

120

40

Steering angle $\theta(0)$ [deg.]

80

120

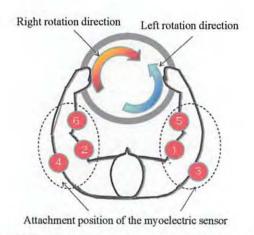


Fig.8 Attachment position of the myoelectric sensor and rotation direction by the external force

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・2・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9に示す. 図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9の(a)と(b)では差が無いことより回転方向に影響せ

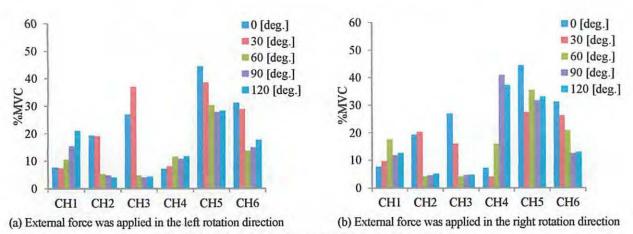


Fig.9 EMG contraction level in the static perception task (Subject A)

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9(a))に対して、右回転方向(図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 9(a))は, 同じ回転方向である図 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 9(b))は, CH4 が左回転方向に比べて大きく, 図 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⁽¹³⁾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⁽¹⁵⁾が示唆される.

3・3 動的操作による力知覚特性

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 10 に示す。横軸は操舵角 θ_i 、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。

$$F_p = c\theta_t + d \tag{8}$$

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 $3 \cdot 2$ と同様であるが、動的条件では操舵角が目標角度 θ_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 11 に示す。図 11 (a) の静的条件と図 11 (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。

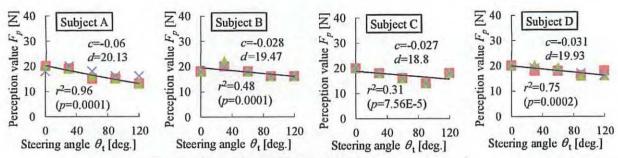


Fig. 10 Change of perceived forces in the dynamic perception task

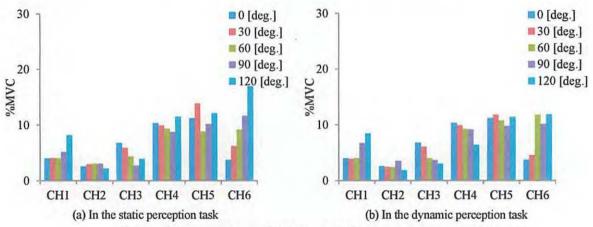


Fig.11 EMG contraction level in the static and dynamic perception tasks (Subject B)

3・4 個人差と一般性

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、3.1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、3.2 節の静的条件での変動係数は CV_c =45、 CV_d =7 [%]、一方、3.3 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、本論文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。

4. まとめ

本論文では、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。

本論文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。

文 献

- T.Kijima, T.Hirai, "Vehicle Development through "Kansei" Engineering", Special Publications. Society of Automotive Engineers, No. SP-1772 (2003), pp. 53-59.
- (2) F. A.Mussa-Ivaldi, N.Hogan and E.Bizzi, "Neural, Mechanical and Geometric Factors Subserving Arm Posture in Humans", The Journal of Neuroscience, Vol. 5, No. 10 (1985), pp. 2732-2743.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 羽田昌敏, 山田大介, 三浦弘樹, 辻敏夫, "人間ー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.
- (7) 羽田昌敏,山田大介,辻敏夫,"拘束環境下における人間一機械系の等価慣性",計測自動制御学会論文集, Vol. 42, No. 3 (2006), pp. 156-163.
- (8) 羽田昌敏, 辻敏夫, "等価慣性指標にもとづく人間ー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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) L. A. Jones, "Perceptual Constancy and the perceived magnitude of muscle forces", Experimental Brain Research, Vol. 151, No. 2 (2003), pp. 197-203.
- (14) 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.
- (15) T.Tsuji, P.Morasso, K.Goto and K.Ito, "Human Hand Impedance Characteristics during Maintained Posture in Multi-Joint Arm Movements", Biological Cybernetics, Vol72, No.6(1995), pp. 475-485.