

操縦安定性に関するヒューマンダイナミクス解析へ 向けた道具の身体性についての基礎的研究

A Fundamental Study of Tool Embodiment for Human Dynamic Analysis Relating
to Handling and Stability of Driving

谷 田 公 二*
Koji TANIDA

要 旨

クルマの操縦安定性評価手法の策定にあたって、クルマの大きさや動きを操作者が自身の運動感覚系に取り込む身体性に着目した。身体性と運動感覚の関係を明らかにするために、運動感覚系情報処理の観点においてクルマの操縦と等価であると考えられるバーチャルリアリティ環境でのハサミによる紙切断作業実験を考案した。

バーチャルリアリティ環境において、運動に伴う感覚量である操作者へのフィードバック情報を様々に変化させることによって、操作中に生じる操作実感と脳神経系活動の関係が脳内血流量変化から明らかとなった。また、操作実感には適切な感覚量の呈示が必要であること、感覚量呈示の遅れ時間が操作実感を変容させることが分かった。道具操作時のこれらの実験結果を通して、クルマの操縦安定性評価に向けて身体性の観点から新たな見解、すなわち操縦中に生じる感覚情報評価の必要性を提案するに至った。

ABSTRACT

In the course of formulating methods for evaluating the handling and stability of driving an automobile, attention was focused on embodiments of the size of the automobile and its movements, which the operator absorbs into his or her own sensorimotor system. An experiment was devised to clarify the relationship between embodiment and sensorimotor activity. The experiment involved cutting paper with scissors in a virtual reality environment, where that action would be considered equivalent to steering an automobile from the perspective of processing sensorimotor system information.

In a virtual reality environment, the sensory quantity that accompanies activity is provided to the operator as feedback information. When this information was changed in various ways, the corresponding changes that occurred in the cerebral blood flow clarified the relationship between the feeling of actual operation generated during operation and the activity of the central nervous system. It was also found that the feeling of actual operation requires an appropriate sensory quantity to be presented, and that time delay in presenting the sensory quantity alters the feeling of actual operation. This experimentation during the manipulation of tools produced results that led to new ideas regarding evaluation of the handling and stability of driving of automobiles from the perspective of embodiment. In other words, it led to the proposal that it is necessary to evaluate the sensory information generated during driving.

1. ま え が き

クルマやバイクには、走る、曲がる、止まるの基本性能が備わっており、ドライバは、駆動、操舵、制動の基本操作で運転をする。もしくはライダーにとっては、駆動、荷重移動、制動が基本操作となる。操縦者の思い通りにクルマやバイ

クが動いているかどうかの性能は操縦安定性と呼ばれる。

現在、クルマにおけるその定量的な性能評価には、クルマのみを対象とするオープンループ試験法と擬似的なドライバを含めたクローズドループ試験法がある。オープンループ試験法においては、クルマには駆動輪やステアリングなどを通じて運動が与えられ、例えばタイヤのグリップ

*基礎技術研究センター

特性や車両運動をシミュレートする研究が多数報告されている⁽¹⁾。一方、クローズドループ試験法においては、ステアリングなどへのフィードバックループを含んだ入出力系を備える関数モデルで簡略表現されたドライバモデルのシミュレーション技術が研究開発されている⁽²⁾。クローズドループ試験法では車両挙動と操縦操作量の因果関係からロバスト性など操縦安定性の良し悪しなどが評価される。

いずれの試験法においてもドライバは定められた操作方法で車両に運動を与え、生じた車両挙動を数値化することで評価がなされている。他方ドライバの観点から車両評価するために、ドライバを計測する実験系が設計され、そこで操縦安定性は官能評価や操舵成績などで検証されている⁽³⁾。しかしながら、なぜドライバが車両挙動の良し悪しを判断できるのかは未解明のままである。その解明のために筆者はドライバの脳に着目した。脳は情報処理器官であるので、ドライバが操作に伴って得られる何らかの車両情報を脳内で処理し何かしらの評価に至っていると考えられるが、その情報処理の特性は着目されてこなかった。今回、これまで発表してきた研究を通して、脳機能計測と心理学実験から明らかとなってきた運動感覚情報と官能評価の関係を総括した。操縦安定性の評価にはドライバへの感覚情報の観点が重要であるとの見解に至ったので、ここに論述する。

2. 感覚情報量の脳機能計測

ドライバの脳は運転中にどのような情報処理を行っているのだろうか。クルマの運転は、クルマをあたかも自分の身体の一部のように、すなわちクルマに対して身体性が成立したドライバ自身が手や足を動かすことで交通環境の中でどのように振舞うかの体现であるので、概念的かつ身体的な複雑な情報処理である。概念的な面とは、何時にどこへどのルートで行くか、交差点信号ではどうするか、どのような車間距離で走行するかという言語化可能な運転行動である。身体的な面は、車両の横加速度を感じながらステアリング操作を行う、路面の摩擦力を感じながらアクセルペダル操作を行うという運転行動である。運転の中でも車両挙動の制御はこの身体的な情報処理である⁽⁴⁾。

しかしながら、このような複雑な情報処理の中から、運転中にドライバの特定の脳活動を計測して運動感覚系にまつわる情報処理のみを把握することは容易ではない。さらには誰も脳の情報処理に注目してこなかったのであるから、例えば車両にかかる横加速度の大きさと操作や官能評価の関係も不明なままである。車両旋回中に生じる横加速度によって運転姿勢の乱れを制御するのも運動感覚系にまつわる脳内の情報処理である。このようにステアリングホイールの操作に着目してもそれ以外の脳機能の成分が含まれてしまうおそれがある。同じ信号の中に同時に生じる複

数の脳機能課題を分離することは容易ではないのである。

したがって、脳機能の計測で留意しなければならないのは課題設定である。このようなことから、本研究ではまず礎を築くために、自動車運転と等質な道具を操作する運動中の運動感覚情報処理に注目し、以下に述べる実験系を構築し脳機能の計測を行ってきた。その研究概要⁽⁵⁾を紹介する。

2.1. 自動車運転と等質な実験の設定

運動感覚系での脳機能計測では、実験協力者に感覚情報を複数種類呈示して比較実験をすることが必要である。一方、実験立案においては先に触れたように複雑な情報処理環境から運動感覚系のみを抜き出し、実験を単純化する必要がある。そこでバーチャルリアリティ技術 (VR) を用いることで感覚情報量を可変とし、また単純化した実験においても運動感覚系情報処理の観点において自動車運転との等質性を再現するためにハサミを用いた紙の切断実験を立案した。

なぜ自動車運転とハサミ操作が等質なのか。自動車運転では、ドライバは目的地へ向かう道中で走行ラインを予測的に設定し、車両から生じる力を運動に変えるために例えばステアリングホイールを転舵し車両挙動である物理量変化を受容器から感じ取り、操舵量を修正しながら移動している。一方、ハサミ操作においても、使用者は切り出した形状の想定の中でハサミの進路を予測的に設定し、所々変化する紙の厚さや繊維方向の変化による抵抗を感じ取り、ハサミの開閉速度や作用点を修正しながら切断点を線でつないでゆく作業である。このような観点から以下6項目に示す自動車運転とハサミ操作の等質性に着目し、今回実験的に運動感覚情報処理を評価した。すなわち、

- (1) 身近な道具である。
- (2) フィードバックがハンマ打撃のように瞬間的でなく、操作中に継続する。
- (3) 予測と結果を比較しながらの操作である。
- (4) 途中の結果は最終目的の過程である。
- (5) ミスは怪我につながるので慎重な作業となる。
- (6) 人 - 操作対象 - 外界のダブルインタラクションである。

作業課題は、切断作業に関する感覚情報のみを変化させ4水準設定した。すなわち、Table 1 に示すように現実のハサミで現実の紙を切断する課題 (以下、現実ハサミ課題)、センサグローブをはめた右手を開閉させることでコンピュータグラフィックス (CG) で描画された VR ハサミで CG の VR 紙を切断する課題 (以下、VR ハサミ課題)、この課題にさらに切断音と振動触覚信号を加えた課題 (以下、聴触覚付加 VR ハサミ課題)、他者の現実環境での切断作業を録画した VTR の再生画像を監視するだけの課題 (以下、VTR 監視課題) の4課題である。

実験協力者は右手が利き手であるモンゴロイド成人男性

Table 1 Experimental tasks for measurement of brain

	Real task	VR tasks		VTR observation task
Experimental scenarios				
	Real paper with real scissors	VR paper with VR scissors generated using sensor glove on right hand	Auditory and tactile sensory information added to task at left	Observing video recording of real task performed by someone else

5名であり、左手で現実の紙ならびに VR 紙を手繰り寄せるように引き出した。振動触覚信号は Fig. 1 に示すように、偏心した重りを回転させることで振動を生み出すモータをグローブに複数配置することで呈示された。実験協力者はこのグローブを装着しハサミを扱うような動きをする。その手の動きは Fig. 2 に示すように CG によって画面の中で生成された。

2.2. NIRS による脳内血流量の計測とプロトコル

脳機能計測として脳内血流量の変化に着目した。脳の神経細胞群が活動するとき、酸素と糖を供給するために活動部位に動脈血が増加する。頭皮上から近赤外光を照射し、それぞれ吸光度が異なる酸化ヘモグロビンと還元ヘモ



Fig. 1 Vibrators on right-hand glove. Five small motors are placed at circled locations on the tops of the fingers and one on the palm.

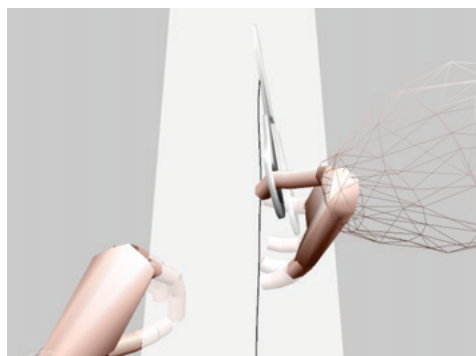


Fig. 2 VR environment with right and left hands, a pair of scissors, and a sheet of paper displayed by CG

グロビンの脳からの散乱光を検出することで脳内のそれぞれの血行動態を観測できるのが、NIRS (Near Infrared Spectroscopy) である。ヘモグロビンは血中に含まれるのでヘモグロビンの濃度変化は血流変化を示す。ヘモグロビンが増加すると吸光度が増し検出される散乱光は減少する。ここでは詳細な連立方程式などの記述を略すが、ヘモグロビン濃度変化は、酸化ヘモグロビンと還元ヘモグロビンごとに、複数照射される波長によって異なる量で検出される散乱光量の値に基づいた相対的な変化量として算出される⁽⁶⁾。センサは前頭から頭頂にかけて 3 cm 間隔の格子状に分布し左右対称で計 24 箇所配置される。実験プロトコルは、20 s 間の閉眼安静の後、続けて課題を 20 s 間行ない、その直後に閉眼安静を 20 s 間行なう実験ブロックを 10 試行繰り返した。試行と試行の間は 2 - 3 min 設けた。別の課題呈示を日を変えて同時刻に行なうことで、概日リズムによる影響に配慮した。課題呈示順は実験協力者ごとに異なりランダムとした。

酸化ヘモグロビン変化量 (ΔCoxy) の数値化については、0 - 20 s 間のヘモグロビン変化量の平均値を安静区間の変化量とし、20 - 40 s 間のヘモグロビン変化量の平均値を作業区間の変化量と定義した。一課題あたり 10 試行であるので、この安静値と作業値は一実験水準あたり 10 組算出される。これらの値を用いて、課題作業中のヘモグロビン変化が安静中に対して有意に変化したかどうかを対応ある両側 t 検定で判定した。なお、40 - 60 s までのヘモグロビン変化量データは数値化の際、計測器によるドリフト成分の除去のために用いた。

2.3. 脳機能計測の解析結果

現実ハサミ課題において、全実験協力者において有意に顕著に賦活した部位は左半球の前頭前野周辺であった。実験協力者は右手でハサミを操作していたので、左半球が賦活したという結果は、感覚入力や運動出力は反対側の脳半球が関与するという、これまでの知見と一致する。また前頭前野の賦活が観測された結果は、作業中はハサミ開閉の運動出力とフィードバック情報の受容器からの感覚入力が生じているので、運動と感覚情報の統合化を司る前頭前野が賦活するという神経科学的な知見と相違ない。一方、VTR 監視課題では、全実験協力者には左半球の前頭前野周辺の賦活は観測されず、さらには全ての計測部位で実験協力者間で共通した賦活部位も観測されなかった。また両 VR ハサミ課題においても、全実験協力者に関して共通した賦活部位は観測されてはいなかった。したがって、全ての課題を比較するために、この現実ハサミ課題において賦活が観測された左前頭前野周辺の血行動態に着目した。この左前頭前野周辺での作業中の酸化ヘモグロビン変化量を全被験者に渡って算術平均を行なった。それらの大きさの差は、ANOVA によると $F(3,12)=6.712$ となり $p<0.01$ で課

題違いによることが示唆された。その結果を Fig. 3 に示す。現実ハサミで賦活した左前頭前野周辺で、VR ハサミ課題では VTR 監視課題と比較して大きな血流変化を示したことから、VR ハサミ課題の方が脳内活動が盛んであることが示されていた。さらに聴触覚付加 VR ハサミ課題の方が、視覚のみにたよる VR ハサミ課題よりも血流変化が大きく、脳内活動がより盛んであることが示された。

なお、この計測に先立って、実験協力者には課題に慣れるために各課題を試行する機会が与えられており、その際実感の順序を評価してもらったところ、全ての実験協力者が示した実感の順は VTR 監視課題< VR ハサミ課題< 聴触覚付加 VR ハサミ課題< 現実ハサミ課題であった。

さて、この血流変化は小さいものから、VTR 監視課題< VR ハサミ課題< 聴触覚付加 VR ハサミ課題< 現実ハサミ課題であり、この順序は先述した実感の順である。血流量の大きさは脳の賦活を示し脳内の情報処理活動度合いを表わしている。本実験では感覚情報量を可変にし、その感覚情報量に関して VTR 監視課題< VR ハサミ課題< 聴触覚付加 VR ハサミ課題< 現実ハサミ課題の順で操作作業時の運動感覚系におけるフィードバック情報が増していることも明白である。したがって、本実験結果から、道具を操っている実感、すなわち手応えを得るには豊富な作業フィードバック情報と運動を統合する脳内情報処理が必要であるという示唆が得られた。以上、運動に伴う感覚情報量の大小と有無に関する実験結果である。

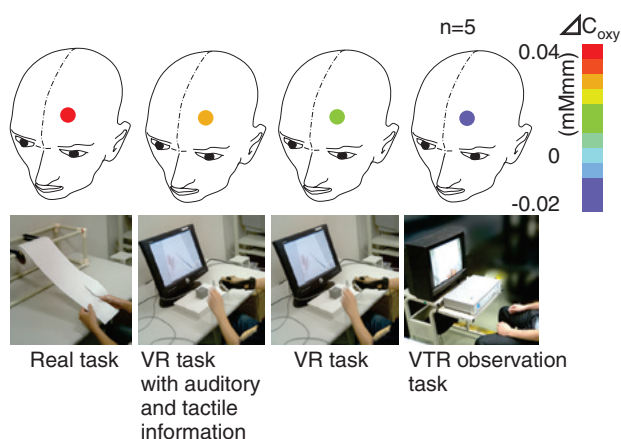


Fig. 3 Experimental result for measurement of brain activation

3. 感覚情報発現の遅れ時間評価

次に、感覚情報の時間特性について操作者がどのような操作印象を持つか評価実験を行った研究結果⁽⁷⁾を概説する。実験協力者は8名で右利きであった。ここでは第2章の聴触覚付加 VR ハサミ課題を元に、実験協力者への感覚情報フィードバック呈示タイミングを意図的に遅らせた実

Table 2 Results of Scheffe's method of paired comparison with Nakaya's modification

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Unbiased variance	F
Total	100	48		
Main effects	85.187	3	28.395	241.54
Main effects × personal	9.3125	21	0.4434	3.7721
Combination effects	0.5625	3	0.1875	1.5949
Error	4.9375	42	0.1175	

Here, $F(3,7,0.01)=8.451252 < 241.54$, $F(21,7,0.01)=6.132382 > 3.7721$, $F(3,42,0.01)=4.285255 > 1.5949$

験環境を準備した。呈示遅れを特に設定しない場合でも、本 VR 実験システムは1秒間に約20回のセンサ入力、各種計算処理、描画更新が伴うので50 msの遅れが含まれる。呈示した実験条件は、50 msを含む遅延なし、200 ms、500 ms、1000 msの4種類であった。なお、先述した脳機能計測に用いた VR システムはこの遅延なし条件である。

実験プロトコルは、実験協力者はまず4種類の遅延のうちある2種類の実験条件で50 cm相当のVR紙をVRハサミで切断し、この切断作業後にそれらの比較を官能評価で回答する。総当たりとした一対比較の実験条件の組み合わせは6組あり、それぞれの順序は各実験協力者で異なるようにランダムな順とした。官能評価は、各組の切断作業に対して次の5段階で回答する。(1)前者の遅延環境が操作感が良い、(2)前者がやや良い、(3)違いを感じない、(4)後者がやや良い、(5)後者が良い、である。

各遅延を前述のようにランダムとしたので順序効果はないものとみなし、順序の入れ替えを行わない中屋の変法により解析を行った。その解析結果を Table 2 に挙げる。

Table 2 に示したように、実験協力者による評価、遅延条件の組み合わせによる評価に有意差は認められず、一方、遅延条件の評価には危険率1%で有意差が認められた。その遅延条件の大小関係は、統計スコアに基づくと次のようになる。操作感は遅延なし条件が一番良く、次に200 ms遅延条件が続きこの二つの条件は良い印象がもたれた。一方、操作感の悪さでは500 ms遅延条件と1000 ms遅延条件が挙げられ、1000 ms遅延条件の方がさらに悪い印象がもたれていた。

実験後の聞き取り調査において、全実験協力者が200 msの遅延条件では、「重たい」、「分厚いものを切っているようだ」、「ハサミが硬い、ハサミの動きが渋い」など同じ傾向の操作印象を挙げた。これらを理由に半数の実験協力者は遅延なし条件の方が「やや良い」と回答した。また500 ms、1000 msの遅延条件では、「普通と同じように切断する操作が行えずストレスが大きい」、「まっすぐ切ることが難しい」、「老人になったようだ」などの感想を挙げた。このことから、感覚情報は操作とほぼ同時に感覚器を通じてフィードバックされることが良き操作感を導き、一方で操

作してから感覚情報が得られるまでの時間が長いと操作そのものが困難になったり、操作している道具や操作対象が、さらには操作者自身が変わってしまった印象を持たせてしまうことが分かった。

4. 感覚情報そのものの評価

第2章で紹介した研究では実験協力者は触覚と聴覚の両感覚情報を同時に経験している。それぞれの感覚情報はどのように操作印象に影響を及ぼしているのであろうか。次に運動感覚の情報と操作印象との関係についての研究⁽⁸⁾の概要を記す。

4.1. 触覚刺激と操作印象の関係

ここで紹介する実験は先述のVRシステムで50 msの遅延を含む遅延なし条件で、かつ切断音のない、すなわち聴覚信号のない条件で行った。VRハサミ操作時の振動触覚信号を強弱3段階とし、振動感覚を与える指もしくは掌部に応じて振動触覚信号の強弱の組み合わせを5組準備した。本実験の先行検討結果から、3段階の振動触覚強度は、(1)操作者は注意しないと分からない程度、(2)感じる程度、(3)振動なしとし、指への刺激呈示は親指、人差し指、中指の計3箇所、掌部へは1箇所とした。以下が準備した五つの組み合わせパターンである。

- a. 指:振動(2) + 掌部:振動(2)
- b. 指:振動(2) + 掌部:振動(1)
- c. 指:振動(2) + 掌部:振動(3)
- d. 指:振動(1) + 掌部:振動(2)
- e. 指:振動(3) + 掌部:振動(2)

実験協力者6名は一つのパターンを3回ずつ試行し合計15回ランダム順で実験に協力した。それぞれのVRハサミの環境に対して実際の操作感に近いかどうかの操作印象を、臨場感の有無の度合い7段階で回答するように求められた。

この結果、操作印象の平均値の順は、 $b > c > a > d > e$ となった。これより、掌部への振動触覚強度は弱い方が好まれ、また指への振動触覚強度は強くもなく存在する方が臨場感のある操作印象に対して効果的であることが分かった。

4.2. 聴覚刺激と操作印象の関係

次に紹介する事例は、聴覚刺激である切断音がハサミの操作印象にどのように及ぼすかの実験である。この実験は先述のVRシステムで50 msの遅延を含む遅延なし条件で、かつ振動触覚信号のない条件で行った。切断音は電子合成音ではなく、一般的な紙であるプリンタ印刷用紙の現実の切断音を録音したものを扱い、VRハサミでVR紙を切断する操作に合わせて切断音を再生した。再生音は日常の道

具として考えられる7種類用意した。

- (A) 刃渡り 45 mm, ステンレス製, 事務用.
- (B) 刃渡り 60 mm, ステンレス製, 事務用.
- (C) 刃渡り 75 mm, ステンレス製, 事務用.
- (D) 刃渡り 105 mm, ステンレス製, 事務用.
- (E) 刃渡り 140 mm, ステンレス製, 事務用.
- (F) 刃渡り 40 mm, ステンレス製, ジグザグ切断線, 事務用.
- (G) 刃渡り 100 mm, 鉄製, 裁ちバサミ布用.

なお、(C)は先述した脳機能計測ならびに感覚情報遅延課題に用いた切断音である。

実験協力者6名へは、実験条件を3回繰り返して計21回ランダム順に呈示した。また、音の印象評価について、実際の操作音に近いかなの度合いを7段階で回答するように求めた。

その印象評価点の平均値を比べた結果、 $(A) > (D) > (E) > (C) > (G) > (B) > (F)$ の順となった。例えば数名の実験協力者のコメントによると、(G)は切断音が高温であるため操作において軽量感があり実感に乏しいということであった。実験に用いたハサミの切断音はそれぞれ固有の音質を有す。このように操作印象に対して順列が生じたことから、切断音として有効な音域が存在し、単に聴覚刺激の有無だけでなく、その音質もまた操作印象を変容させることが示された。また、疲労度に関する官能評価では切断音のある環境の方が疲れないという結果が得られた⁽⁹⁾。

4.3. 聴覚刺激と操作印象の関係

前述の一連の研究として最後に紹介する実験結果⁽⁸⁾は、これら聴覚刺激と触覚刺激とが操作印象に対してどのように影響を及ぼすかである。実験協力者6名で行われた実験は以下の通りである。VR実験系は4.1.節で設定したbの条件で、切断音は4.2.節で挙げた(D)の条件であった。比較実験に用いられたのは次の4条件である。

- (1) CGのみ
- (2) CGと触覚刺激あり
- (3) CGと聴覚刺激あり
- (4) CGと触覚刺激と聴覚刺激あり

実験協力者は現実の操作に近いかの印象評価について、臨場感はないを1点、臨場感があるを7点として7段階で回答するように求められた。その印象評価点の平均値を比べた結果、(1)2.3点、(2)3.8点、(3)5.3点、(4)6.0点であった。これより、VRハサミによるVR紙の切断課題において、触覚刺激は評価を高める一方、その効果は聴覚刺激ほどではないことが分かった。

5. 人から見た操縦安定性

ここまで運動における感覚情報と操作印象の関係を紹介してきた。これらの知見を総括し、道具と人の関係に関し

て考察を述べる。

道具を操っている実感を得るには操作に伴った豊富な運動感覚系情報が必要であることを第2章で述べた。神経活動は階層構造をなしており筋肉に直接信号を出す下位層では、筋肉が発動する前に運動プログラムの結果をシミュレート、すなわち予測していると考えられている⁽¹⁰⁾。またその運動シミュレーションは運動によって生じるであろう感覚信号もシミュレートしている。これら運動感覚系のシミュレーションでは予測が実際の行動結果すなわち物理世界と相違ないかどうかを比較するので、感覚器系はどのような運動感覚が生じるのか予測的に物理世界からの入力も期待しているのである。すなわち脳はその差分を見出すために制御目標に対して情報処理ループを構築する。一方、運動プログラムや認知過程のようなまとまりの意識活動は上限およそ3秒で保持され、3秒以内に起こる事象を一つの心理的ユニットとして神経系は捉えている⁽¹¹⁾ことが知られている。また、パブロフの古典的条件付けとして、同時条件付け、あるいは遅延条件付けでは刺激に対する学習が強化される⁽¹²⁾ことが知られている。すなわち、脳神経系は情報入力と運動出力の関係を自動的に学習強化する性質があるので、操作者の脳神経活動は作業と作業時に生じた情報との関連付けを自動的に模索、形成し運動感覚系情報処理ループを学習する。学習といっても特別な認知活動ではなく、脳神経系ではどの行動においても、作業目標を達成する遂行のみならず、その課題を遂行するための知識やスキルを獲得する学習は同時に行われている⁽¹³⁾。4.1.節ならびに4.2.節で述べたように、模擬的な振動と切断音がフィードバック感覚として呈示されるVRハサミ操作時の聴触覚VR情報が、作業課題とほぼ同時に実際のハサミ操作時とは異なる指の甲や掌部、スピーカ音源から呈示されているにも関わらず、これらの情報も運動感覚系情報処理ループに取り込まれ実感化してしまうほど学習は強力である。脳内血流評価によって、この実感度合いは運動出力と統合化される感覚情報入力の豊富さと相関が認められた。したがって、操作している道具が身体の延長となり、その身体性を向上させるためには、あるいは身体性を維持するためには、作業に適切な量と質の感覚情報が必要であるということである。

しかし、その作業に適切な感覚情報は単なる感覚量だけではなく、時間情報も考慮せねばならないことが第3章から導かれた。感覚情報の呈示に遅れ時間が生じると操作荷重の大きさに影響を及ぼしたのであった。このような事象は、パーソナルコンピュータ操作中にアイコンのドラッグを行った時など反応が遅い場合に、重いという表現を使うことと同じであり、pseudo hapticと呼ばれる⁽¹⁴⁾。このことは、ドライバがハンドルが重たいと評価しても、実際にはステアリング操舵トルクを評価していない可能性、言わば力覚の錯覚があることを示唆する。ドライバはクルマを

操作するときに時間成分も運動感覚系に取り入れているので、人からの操縦安定性評価には時定数評価を考慮せねばならないと考えられる。

また、作業に適切な感覚情報は、先述したように制御目標なる物理世界からの情報である。情報処理量が減る作業では賦活部位の脳内血流量の低下が見られた。他方、切断音がない、すなわち感覚情報が入力されない方が疲労感を招いた。これらの結果は脳内の情報処理負荷と疲労感あるいは負担感が一対一対応でないことを意味する。情報処理を司る機能をもつ脳にとっては、運動と感覚情報をつじつま合わせのように統合する運動感覚ループを構築しやすい方が疲労軽減につながっていると考えられる。

ハサミ操作における最終制御目標は操作者が切り出したいように切断できたかどうかである。ハサミ操作ではそれは視覚によって確認される。今回のVR環境における実験では、視覚情報に加え4.3.節で述べたように触覚と聴覚情報が、操作しているという実感に影響を及ぼしていることが分かった。脳の情報処理は上層に概念的階層、下位層に運動感覚的な階層をもつ階層構造をなしており、それぞれの階層で最上位の最終制御目標を遂行するための個別の制御目標が設定される⁽⁴⁾。すなわち、各階層での情報処理ループ遂行が最終制御目標への最上位の情報処理ループ遂行を支える構造となっている。ハサミの場合は、最終制御目標である切断軌跡を確認する視覚情報に加えて、聴触覚情報も重要であり最終制御目標への遂行に対するフィードバック評価に影響した。下位層での制御目標の遂行から得られる操作実感とは、総合的な最終制御目標の遂行の操作フィードバック評価向上へ導くのである。一方、例えば、楽器では、楽器を操る運動感覚系情報処理ループも構築される⁽¹⁵⁾ことも報告されているが、制御目標は聴覚情報である音である。このように、道具によって操作者が運動感覚系情報処理ループを作るに必要な感覚情報は異なる。したがって、クルマの場合の操縦安定性評価では、どの感覚情報が物理情報と関連付けられているのかを明確にし、ドライバの制御目標への操作とその制御目標からの感覚情報との情報処理ループの構築度合いを評価することが必要である。

フィードバックされる受容器の感覚情報は基本的に運動出力と同じ部位で生じたものが統合化される。しかし、クルマの操作は手と脚であるが、クルマの挙動は身体に加速度や回転としても感覚入力される。例えば、アクセルペダル操作の感覚は踏み込む脚の筋肉の運動と運動感覚系の情報処理ループを作る。操作と同時に動きを与えられるクルマの5自由度の運動は、ドライバ身体の加速度センサである三半規管、オプティカルフローを検出する視覚、シートバックに押し付けられる背中の触覚や圧痛覚、身体姿勢の変形を捉える体性感覚などへの刺激も誘発する。これらの感覚情報は運動と同時に生じるので、神経系はその性質

上、自動的に運動感覚系情報処理ループを構築する。その運動感覚系情報処理ループでは、例えば車両のヨー変化を臀部や腰で感じる、目で感じるなど構築される感覚入力はいずれも個人に依存するようであるが、またこれらも感覚における錯覚も含まれているかもしれないが、結果的に最終制御目標に対してループを生成するのは同じである。重要なのは運動と同時に生じる最終制御目標に至る感覚情報に対して情報処理ループを構築するという点である。このような感覚情報から運動と関連付けられる情報のみを選択し情報処理ループを構築する神経系の柔軟さによって、人々はステアリング操舵力、取り付け角度やペダル踏力などが全て異なるセダンからスポーツカーやトラックなどへ乗り換えても操縦できるのである。

以上、操縦安定性評価に向けた運動感覚情報からの観点の重要性を導いてきたが、さらにこれらを鑑みてクルマのあり方を考えてみると、振動対策や遮音性能向上の行き過ぎには注意せねばならない。ドライバの脳は運動に必要な感覚情報を常に求め、すなわち様々な環境情報から運動とつじつまの合うものをシグナル S として扱い、情報処理ループを構築できないものをノイズ N として扱う。一概に周波数何 kHz 帯が N である、S であるとは定義できない。例えば、ドライバにとって乗り心地評価に対して 10 kHz 帯が N であるとする。技術者は 10 kHz 帯を数 dB 遮音しようと対策を試みる。ある施策を打っては 10 kHz 帯の増減を確かめる。この繰り返し作業の中では、その技術者にとっては 10 kHz 帯が制御したい目標であり、もはやこの技術者にとっては 10 kHz 帯は N ではなく他の周波数帯に埋もれてもなお 10 kHz 帯は遮音成績を表わす S なのである。このように人それぞれの情報処理ループによって情報は S か N に分けられるので、振動評価にはドライバが運転の際にどのような情報処理ループを構築するのかの観点が必要である。S/N 比の向上、ならびに S そのものの大きさ、時間情報も操作感覚には必要なのであるが、N と一緒に S も過度に防振遮音してしまうと操縦感覚が希薄となってゆき、結果的に物理的な車両挙動とドライバの関係は分断されてしまう。このような振動や音もドライバが運転しているという実感を生じさせるためには感覚情報として必要なのである。また、これら感覚情報は物理環境に応じて走行中に変化する。このようなことから操縦安定性は、例えば単に車両が 0.2 G 旋回できることではなく操作に伴う物理情報を得てどのように 0.2 G 旋回に至ったかの時間情報処理の評価でもあったと考えられる。

6. まとめ

VR 技術を用いた実験環境にて運動感覚系における感覚情報を変化させることによって、それが道具を操作する印象へどのように影響を及ぼすのかを先行研究結果を

紹介しながら解説した。それら様々な実験結果から、クルマを操るとはどういうことかを脳科学と心理学の見地から考察し、操縦安定性評価手法の確立へ向けて一見解を見出した。

今後、ドライバが操縦を通じた車両運動において、最終制御目標としている物理事象は何なのか、それに伴う最終制御目標からの物理情報は何かを明らかにし、より多くのドライバが車両挙動を自ずと感じ物理的に安定させるように操縦できる車両の開発へ結び付けていきたい。さらには運転に伴う fun も情報処理の結果の感情と考えられるのでその解明にも努めていきたい。本稿によりハード的な操縦安定性評価からソフト的な評価へ拍車がかかれば、またこの研究は始まったばかりであるのでご意見ご教授いただければ幸いである。

注)本稿では sensorimotor の和訳として知覚運動や感覚運動性でなく運動感覚と記した。

参考文献

- (1) 酒井英樹: ヨー運動と後輪横滑り運動との関係, 近畿大学工学部研究報告, No.46, p.85-88(2012)
- (2) 山本敬一, 西村秀和: 操縦安定性改善のためのアクティブスタビライザと電動パワーステアリングの分散制御系設計, 日本機械学会論文集, C 編 76 巻, 765 号, p.1271-1279(2010)
- (3) 金圭勇, 池田透, 矢野修: VSA による氷雪路走行時の操縦安定性向上, Honda R&D Technical Review, Vol.13, No.2, p.83-90
- (4) Tanida, K., Pöppel, E.: A Hierarchical Model of Operational Anticipation Windows in Driving An Automobile, Cognitive Processing, 6, p.275-287(2006)
- (5) 谷田公二, 舟橋健司, 近江政雄, 楠見昌司: バーチャルリアリティ技術を用いた道具に関する身体性評価ー脳内血流変化からの評価ー, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.12, No.1, p.3-10(2007)
- (6) 山下優一, 渡辺英寿, 川口文男, 牧敦, 小泉英明: 無侵襲脳機能画像計測システムとしての光トポグラフィ開発, MEDIX Vol.29(1998)
- (7) 舟橋健司, 久保谷太亮, 谷田公二, 岩堀祐之: 仮想はさみシステムにおける呈示遅れによる擬似的な力覚表現の検討, 日本バーチャルリアリティ学会第 12 回大会, p.393-394(2007)
- (8) Funahashi, K., Kubotani, D., Iwahori, Y., Tanida, K.: A Study for Virtual Scissors System with Thin Haptic and Force Feedback Environment, 2008 Joint 4th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 9th International Symposium

- on advanced Intelligent Systems, p.1448-1453(2008)
- (9) 久保谷太亮:希薄な触力覚フィードバック環境下における仮想はさみシステムの検討, 平成 17 年度修士論文, 名古屋工業大学大学院工学研究科 (2006)
- (10) Erich, V. H., Mittelstaedt H.: Das Reafferenzprinzip. (Wechselwirkungen zwischen Zentralnervensystem und Peripherie), Naturwissenschaften, 37, p.464-476(1950) (in German)
- (11) Pöppel, E.: A Hierarchical Model of Temporal Perception, TRENDS in Cognitive Sciences 1, p.56-61(1997)
- (12) 板野登:心理学研究法 3 実験Ⅱ, 荳坂良二(編), 東京大学出版, p.181-208(1973)
- (13) Sweller, J.: Cognitive load during problem solving: effects on learning, Cognitive Science, Vol.12, p.257-285(1988)
- (14) Lecuyer, A., Burkhardt, J. M., Etienne L.: Feeling Bumps and Holes without a Haptic Interface: the Perception of Pseudo-Haptic Textures, Proc. ACM SIGCHI, p.239-246(2004)
- (15) Bangert, M., Altenmüller, E. O.: Mapping perception to action in piano practice: a longitudinal DC-EEG study, BMC Neuroscience, Vol. 4, No. 26, BioMed Central(2003)

■ 著 者 ■



谷田 公二