解説

意のままに操る自動車を目指して

Toward Development of a Vehicle Operated at Driver's Will

西川 一男^{*1} 農 沢 隆 秀^{*1} 辻 敏 夫^{*2} ^{*1}マツダ株式会社 ^{*2}広島大学
Kazuo Nishikawa^{*1}, Takahide Nouzawa^{*1} and Toshio Tsuji^{*2} ^{*1}Mazda Motor Corporation ^{*2}Hiroshima University

1. はじめに

現代の機械は、様々なアクチュエータ等を装備しており精密な動きを可能にしている。しかし、これらの機械類を動かすのは主に人間である。すべての人にとって扱いやすく、意のままに操作が可能な機械であれば、機械を身体の一部として捉え、自分の能力以上の高度なパフォーマンスが可能となる。

種々の機械の中で、特に自動車は意のままに操りたい機械の一つであろう。ペダル、シフト、およびステアリングホイールの操作は、四肢の高度なスキルを必要とする運動で行われている。操作がしやすく、意のままに操る自動車を実現するためには、人間の運動特性や知覚特性等の視点を考慮して自動車の設計や開発をしなければならない。

人間は運動を行う場合に、運動内容に応じて身体の各部位の力や速度等の特性を適切に調節し、巧みな運動を実現している。人間は腕や脚の筋を収縮させることによって筋力を制御し、その結果、関節トルクを発生させ、手足の硬さや柔らかさ等のインピーダンス特性を巧みに調整し、操作機器を操っている [1] [2]。自動車を設計するためには、人間の身体的特徴を的確に捉えた人間側の特性と、ペダルやシフトに代表される機械側の特性とをマッチングさせることが重要になる。この考え方をヒューマンマシンマッチングと呼ぶ (図 1 参照)。

筆者らはこれまで、このヒューマンマシンマッチングの考え方で、上肢下肢特性と自動車のペダル、シフト、およびステアリング操作の関係を解明し、自動車の操縦系の設計指針を明らかにしてきた。本解説では、まず筆者らが行ってきた上肢下肢の人間特性の計測法とその一例について述べる [3]~[6]。そして、それらの計測結果に基づいて研究を進めたペダル、シフト、およびステアリングホイールの設

図 1 ヒューマンマシンマッチングの構成

図 2 足関節のトルク計測の構成

計指針について解説する [5]~[9]。

2. 人間の力学特性の計測

2.1 計測システムと計測方法

下肢の特性を明らかにするために、ペダルを踏む運動を想定し、まず、動的な力学特性である足関節トルクを計測する。足関節トルクの計測システムの概要を図 2 に示す [5]。本システムはトルク計測部、EMG 計測部、計測結果を被験者にフィードバックする表示用ディスプレイから構成される。トルク計測部は、Biodex System 2AP (Biodex Medical Systems Inc.; 最大トルク: 610 [Nm]; 以下 Biodex と呼ぶ) を使用した。Biodex は多用途の筋機能評価訓練用の装置であり、アタッチメントを取り替えることにより、前述の足関節トルクを計測することができる。被験者の正面に表示用ディスプレイを設置し、被験者に筋収縮レベルを一定の値に維持して足関節トルクを発揮するように指示する。筋疲労の影響を抑えるため筋収縮レベルを 40% に設定し下肢運動時の関節トルクを計測する。次に、ペダルを操

原稿受付 2014 年 9 月 2 日

キーワード: Human Machine Matching, Pedal Operation, Gearshift Operation, Manipulability Analysis

^{*1}〒730-8670 安芸郡府中町新地 3-1

^{*2}〒739-8527 広島市鏡山 1-4-1

^{*1}Aki-gun, Hiroshima

^{*2}Higashihiroshima-shi, Hiroshima

図6 操作力だ円体から求めた手先力

いて、前後方向へ発揮可能な最大手先力が大きくなることが分かる。また、図6(a)と(b)から、 y 軸に対するだ円体の傾きが大きい位置でも小さくなる傾向が確認できる。このだ円体から理論上、力の発揮しやすい手先位置を求めると、ショルダーポイントから前方向に450~500[mm]、下方向に150~200[mm]、横方向に200[mm]以下の位置が最も力が出しやすいと考えられる。以上より、このだ円体モデルを用いることで、力が発揮しやすい位置にシフトノブを設計することが可能であることが分かる。

3. 人間と機械特性のマッチングによる車への応用

3.1 アクセルペダルの設計

アクセルペダルの機械特性は Force-Stroke 特性で表現できる[10]。図7は、A車のアクセルペダルの操作力とストロークの線図に2.1節で計測した足部の自重による荷重の線図(点線)を加えたものである。アクセルペダル特性はペダルストローク0から最大まで踏み込んだ後、ペダルを引き戻すヒステリシスを示している。ペダルの操作力と足部の自重による荷重の関係を見ると、ほとんどのペダルストローク域で、アクセルペダルの戻し側の操作力線が、足部の自重による荷重の線よりも重くなっていることが分かる。この状態は、例えば一定速度で走行しているときは、常に踏み込みでコントロールすることになる。一方、図8のB車は、アクセルペダルの戻し側の操作力線と足部の自重による荷重の線がストローク中央で交差していることが分かる。例として、車速50[km/h]の一定速度で走行しているときのペダルストローク量を図7と8に一点鎖線で加えた。B車のこの状態は、足部の自重による荷重がペダルの戻し側の操作力よりも大きいため、足部の自重による荷重のみでペダルを踏み過ぎていることを示している。したがって、一定の車速50[km/h]に保つためには、足関節部を引き戻した状態にして踏み力を一定にしておく必要がある。結果として、図5からも分かるように力の弱い戻し側の前脛骨

図7 A車のアクセルペダル機械特性と足部の自重の関係

図8 B車のアクセルペダル機械特性と足部の自重の関係

図9 A車とB車のシフト操作時のEMG計測結果

筋を常に使うよう強いられるため操作性が悪くなる。下肢の発揮できる力を考慮し下肢特性を総合的に考えたアクセルペダル踏力の設定が重要である。

3.2 シフトレバーとステアリングホイールの設計

手先力の発揮しやすさが異なるシフトノブ位置での上肢筋負担への影響を考える。A車とB車のシフトノブ位置で、最大手先力をだ円体で評価すると、シフトノブ位置がニュートラル位置でA車は195[N]、B車は120[N]となる。このことからA車のほうが力を発揮しやすいことが分かる。では、実際にA車とB車のシフトノブ位置で上肢の負担に差があるのか、図9にそれぞれの位置で操作した際の上肢の筋電図を示す。この筋電位の計測部位は、A車とB車の差が顕著に表れている尺側手根伸筋、上腕二頭筋、三角筋中部の3箇所である。B車に比べてA車の筋電位の振幅が明らかに小さくなっており、弱い力で操作していることが分かる。力が発揮しやすいA車の位置にシフトノブを配置するだけで、上肢の負担を小さくして操作ができる

図 10 ステアリング反力を変化させた際の知覚量と物理量の関係

のである。

図 10 は、ステアリング回転操作時の反力を変化させた際の人間の知覚量（知覚された力）と物理量（実際の反力）の関係を示した一例である [7]。図の横軸は提示した力 F_t 、縦軸は被験者が知覚した F_p である。この結果から、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おり、これ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。このように手先の運動特性は操舵力等に大きく影響される。現在は、反力変化と姿勢変化を組み合わせた場合での知覚特性の解明 [8] や力知覚モデルを明らかにしている [9]。下肢を含めた四肢の知覚特性を深く研究を進めるとともに、ヒューマンマシンマッチングを考慮した自動車操縦系の設計が必要である。

4. まとめと今後の課題

本解説では、人間の特性である上肢下肢の力学特性の計測方法を説明し、ヒューマンマシンマッチングによる自動車のペダルとシフトレバーのレイアウトや荷重特性の設計指針の一例を紹介した。

自動車業界では、自動運転などの機械中心の開発が加速している。一方で、運転者や同乗者がワクワクするような

人間の感覚を中心におく自動車も望まれている。そのためには、意のままに操る感覚のメカニズム解明も重要であり、人間の知覚特性が感情として脳に伝わるメカニズム等の感性の研究を進める必要がある。このような試みの先に、さらに進化した感性ヒューマンマシンマッチングのシステムが実現されるに違いない。

参 考 文 献

- [1] 辻敏夫：“ヒトの上肢運動のしなやかさを計測する”，計測と制御，vol.35，no.9，pp.689–695，1996。
- [2] 辻敏夫，田中良幸：“生体インピーダンス特性のシステムインテグレーションを目指して”，日本ロボット学会誌，vol.24，no.6，pp.696–699，2006。
- [3] 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，pp.612–618，2004。
- [4] Y. Tanaka, N. Yamada, K. Nishikawa, I. Masamori and T. Tsuji: “Manipulability Analysis of Human Arm Movements during the Operation of a Variable-Impedance Controlled Robot,” Proc. of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems, pp.3543–3548, 2005。
- [5] 西川一男，宮崎透，古川浩二，阿部治彦，農沢隆秀，辻敏夫：“人間の下肢の力学特性を利用したペダル特性の設計”，日本機械学会論文集，vol.80，no.809，bms0019，2014。
- [6] 西川一男，古川浩二，河手功，農沢隆秀，辻敏夫：“人間の上肢力学特性に基づく自動車のシフト特性の設計”，日本機械学会論文集，vol.80，no.816，bms0247，2014。
- [7] 竹村和紘，山田直樹，岸篤秀，農沢隆秀，田中良幸，栗田雄一，辻敏夫：“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 C 編，vol.78，no.795，pp.64–73，2012。
- [8] 竹村和紘，山田直樹，岸篤秀，西川一男，農沢隆秀，栗田雄一，辻敏夫：“人間の主観的反力知覚モデルに基づく自動車のステアリングホイール操作系評価”，自動車技術会論文集，vol.45，no.3，pp.579–584，2014。
- [9] 佐藤純平，竹村和紘，山田直樹，岸篤秀，西川一男，農沢隆秀，辻敏夫，栗田雄一：“筋力推定に基づくステアリング操作時の力知覚モデル”，日本機械学会論文集 C 編，vol.79，no.808，pp.4917–4925，2013。
- [10] 自動車技術ハンドブック編集委員会：自動車ハンドブック設計（デザイン・ボディ編）改定第 1 版，pp.133–135，（社）自動車技術会，1991。

西川一男 (Kazuo Nishikawa)

1986 年明治大学工学部卒業，マツダ（株）入社。2012 年技術研究所部門統括研究長，現在に至る。自動車の人間工学，感性工学，軽量化に向けた構造や材料工法の研究などに従事。日本機械学会，日本人間工学会などの会員。

農沢隆秀 (Takahide Nouzawa)

1980 年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了，マツダ（株）入社。2010 年技術研究所所長，現在に至る。工学博士。自動車の先進構造，感性工学，空気力学などの研究に従事。日本機械学会，日本流体力学学会などの会員。

辻 敏夫 (Toshio Tsuji)

1985 年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了，2002 年同大学大学院工学研究科教授，現在に至る。工学博士。人間とロボットの運動制御，生体信号解析などの研究に従事。IEEE などの会員。（日本ロボット学会正会員）