2206 付加動作によるハンドル操作性（インピーダンスによる解析）

Analysis of the Impedance of Steering Maneuverability distracted by Additional Actions

○学 坂本宗之（関西大） 正 朝尾隆文（関西大）
 正 堀井 健（関西大） 小谷賢太郎（関西大）

Muneyuki SAKAMOTO, Kansai University, 3-3-35, Yamate-cho, Suita, Osaka
 Takafumi ASAO, Kansai University
 Ken HORII, Kansai University
 Kentaro, KOTANI, Kansai University

While driving, drivers perform non-driving-related actions such as reaching toward the dashboard. Such actions cause their bodies to tilt and their arm positions to change. To maintain body posture, drivers exert a force with their arms on the steering wheel; this is called the internal force. Maneuverability of the steering wheel is affected by the internal force, the arm posture and muscle stiffness. In the existing study of the human operations, it was analyzed the impedance characteristics as the human-object closed linkage system. In this report, it was investigated the maneuverability of the steering wheel due to the additional actions and the tracking task was conducted as the experiments. Furthermore, the maneuverability was analyzed by using the estimated rotational impedance of the steering wheel. The results indicate that the maneuverability became low as increasing the internal force and stretching the arm and the impedance was decrease at the infection of the steering wheel angle.

Key Words: Additional Action, Rotational Impedance, Driving Posture, Internal Force, Maneuverability of The Steering Wheel

1. はじめに

我々は自動車の運転中に、運転操作以外の運転に直接関係しない様々な動作を行っている。例えば、エアコンやオーディオのスイッチ操作、ダッシュボードに手を伸ばす、飲食等の動作が考えられる。

L.Angell ら⁽¹⁾は、車載情報機器の使用に関する運転操作に直接関係しない負荷タスクを分類し、その負荷の程度を表す評価指標を提案した。T.A.Dingus ら⁽²⁾は、100 台の実車を使用して、ドライバの普段の運転行動データを収集し、事故、ヒヤリ・ハット事象と運転操作に直接関係しない行動の関係の調査を行った。その分析結果の一つとして、手を伸ばして車内の物を探す行動によって事故頻度が増えることを示している。これらの研究では、視覚的、精神的なディストラクションを主な調査対象としているため、運転姿勢についての詳細な検討は行われていない。しかしながら、運転姿勢が大きく崩れればハンドルの操作性に悪影響を及ぼすと考えられる。このことから、運転に直接関係しない行動に起因するような運転姿勢の変化が車両の操作性に及ぼす影響を詳細に分析する必要がある。

本研究では、運転姿勢を変化させるような運転操作に直接関係しない動作を付加動作と定義し、これに着目した。大きく腕を伸ばすような付加動作では、腕姿勢が変化するだけではなく、体幹姿勢の変化をもたらす。運転中に体幹姿勢を変化させる場合、ドライバはハンドルを握っている腕でその体幹姿勢を支持しようとする。このときの腕姿勢とハンドル把持点での支持力がハンドルの操作性を低下させている恐れがある。

ヒトと対象物が相互に影響を与えながら運動する場合には、ヒトの筋の状態によってヒト-対象物系の機械的な特性、すなわち機械インピーダンスが変化する^{(3)~(9)}。したがって、ヒト-ハンドル系のインピーダンス特性を調べることによって、付加動作にともなう変化する操作性の変化

を詳細に解析することができると考えられる。そこで本報告では、機械インピーダンスを用いることによって、付加動作がハンドル操作性へ及ぼす影響の詳細な分析を行った。

2. 付加動作時のよるハンドル操作性評価のためのトラッキング実験

付加動作がハンドル操作性へ及ぼす影響を調べるため、付加動作による姿勢の維持中に、ハンドルのトラッキング操作を行わせた。ハンドル軸まわりの機械インピーダンスを調べるため、実験中にはハンドルに微小摂動を印加した。

2.1 付加動作の模擬

実験において被験者が自由に付加動作を行うと、試行および被験者ごとに姿勢が異なり、任意の動作の再現性が乏しくなるため、詳細な解析が困難となる。そこで、ハンドル、手首、肘、肩は水平面内で運動するものとし、付加動作を肩位置の変化、内力の変化として模擬することにした。

1) 肩位置条件

付加動作にともなう腕姿勢の変化を以下の条件で模擬する。左腕を伸ばすような付加動作を想定し、ハンドル操作は右手のみで行うものとする。体幹は曲がらず、腰を中心として左右へのみ回転するものとする。付加動作の体幹の傾きに相当する右肩の左右位置をハンドルに対して相対的に変化させる。体幹の傾きが 0 [deg]、すなわち通常の運転姿勢に相当する肩位置の条件を肩位置条件 1 とする。同様に、体幹の傾きが左方向へ 15, 30 [deg] に相当する肩位置の条件をそれぞれ肩位置条件 2, 3 とする。実験に先立ち、被験者ごとに、背筋を伸ばした状態での第 7 頸椎棘突起と第 5 腰椎棘突起の間の距離を測定する。測定された値に、模擬する体幹の傾きに応じた正弦を乗じた距離 l_x だけ、肩位置条件 1 の状態から座席を左に平行移動させる。

2) 内力条件

付加動作時には、ハンドル円周部の法線内向きに力を加

えることで、付加動作時の姿勢を維持すると考える。このハンドルと手先の間に働く力、すなわち内力を 0, 20, 40 [N] の 3 水準設定した。これらの内力に関する条件を内力条件と呼ぶことにする。

2.2 実験装置

ハンドル(Nardi, classic $\phi 360$)に接続したシャフトはカップリングを介して、AC サーボモータ(安川電機, SGMPH-08A1A41)に接続されている。ステアリングシャフトに加わる力は、6 軸力覚センサ(ニッタ, IFS-105M50A220-I63)で計測し、ハンドル角度をモータ付属のインクリメンタルエンコーダ(分解能 16384[pulse/rev.] $\times 4$ 通倍)で計測する。モータの制御は、モータドライバを介して計算機から行う。さらに、ヒトの上腕、前腕がハンドルと同じ水平面内で運動するため、旋回ノブ(ニッシン自動車工業, DNK4)をハンドルに取り付けた。また、被験者が座るためのシートとトラッキング実験時の目標値を表示するために 17 インチ LCD を使用した。

2.3 ハンドル制御方法

本実験においてモータが生成するトルクは、ハンドル反力生成のためのトルク、および M 系列信号を用いた擬似ランダム振動を生成するためのトルクである。

粘性摩擦を模擬した反力トルク τ_f は、次式により生成する。

$$\tau_f = \begin{cases} -B_{fd}\dot{\theta} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) & : |\dot{\theta}| \leq \dot{\theta}_{\max} \\ -B_{fd}\dot{\theta}_{\max} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) & : \dot{\theta}_{\max} \leq |\dot{\theta}| \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 θ はハンドル角、 B_{fd} は粘性摩擦係数、 $\operatorname{sgn}(\cdot)$ は引数の符号を返す関数であるとする。予備実験により $B_{fd}=10$ [Nm smp/rad] とした。反力が大きくなりすぎないように上限値 $\dot{\theta}_{\max}=1.5$ [rad/s] を設定した。上記により生成される反力を 10[ms] 周期で印加した。

本実験では、時々刻々と変化するハンドル軸まわりの機械インピーダンスを推定するため、微小振動を印加する。印加する振動は、その大きさや方向によって、推定されるインピーダンスに影響を与えるという報告⁽¹⁰⁾から、印加方向および周波数がランダムとなる M 系列信号を用いた擬似ランダム振動を間欠的に印加した。擬似ランダム振動は次式により生成される。

$$\tau_M = \begin{cases} 1.35 & : u_M = 1 \\ -1.35 & : u_M = 0 \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 τ_M は M 系列信号入力による擬似ランダム振動トルク、 u_M は M 系列信号である。振動の大きさについては、予備実験により決定した。

以上の 2 種類のトルクの和であるモータが生成するトルク τ_A は次式で表される。

$$\tau_A = \tau_f + \tau_M \quad (3)$$

2.4 実験手順

肩位置条件に合うようにシートを方向に平行移動させる。被験者がシートに座った後、肩と肘の運動のみでハンドル操作を行わせるため、サポーター(ダイヤ工業, A・リストガード 000-3682)で手首を固定する。また、上腕に上腕支持具を取り付けることで水平面内での運動を実現する。その後、被験者にはグリップと手掌および指との間に隙間ができないように旋回ノブを握らせる。実験が開始したら、被験者はディスプレイに表示された内力条件の内力値と現在の発揮内力が等しくなるように力を発揮する。さらに、ハンドルの回転と連動した操作視標がディスプレイに表示された正弦波状に往復運動する目標視標からはみ出ないよ

うにハンドルを操作して目標視標を追従する(図 1)。なお、実験中にはインピーダンス推定のため、ハンドルに擬似ランダム振動を間欠的に与えた。目標視標の振幅はハンドル角で 30[deg]、移動周波数は 0.15[Hz] とした。実験前には被験者に十分な練習を行わせた。被験者は、実験の主旨を書面で説明した後に、実験協力の理解を得た大学生 6 名である。3 水準の肩位置条件と 3 水準の内力条件の組み合わせによる 9 条件の各々の条件において、4 試行の実験を行った。図 2 に実験装置と実験時の被験者の姿勢の例を示す。

3. 実験結果

図 3 に被験者 A の肩位置条件 2, 内力条件 0[N] におけるハンドル角度と内力の時系列データを示す。図中にマルで示しているように、ハンドル角が目標ハンドル角から逸脱している箇所が複数見られる。全条件、全試行の中で、目標ハンドル角からの逸脱が最も多かったのは、正弦波の変極点である操作方向を切り替える箇所であった。ハンドルの操作方向を切り替えるときには、ハンドル角速度を減少させ、静止し、反対方向へ加速するといった操作が必要であり、目標を正確に追従するためには微調整が必要であると考えられる。

Fig.1 Example of Screenshot

Fig.2 Outline of Experimental Setup

Fig.3 An Example of The Experimental Data

次に、ハンドルの操作性を調べるため、ハンドル角と目標ハンドル角との差である追従誤差の標準偏差を求めた。全被験者の追従誤差の標準偏差の平均を図4に示す。肩位置条件1、内力条件0[N]は付加動作を行っていない状態に相当する。追従誤差の標準偏差が大きいほど目標に追従できていないことを表す。図4a)は、全被験者の追従誤差の標準偏差の平均を肩位置条件によって整理したグラフである。同様に、図4b)は、全被験者の追従誤差の標準偏差の平均を内力条件によって整理したグラフである。

図4a)より、肩位置条件1、2では内力が増加すると、追従誤差の標準偏差が大きくなった。これは、内力増加にともなって内力効果⁽¹⁰⁾が大きくなるために剛性が低下したことが原因であると考えられる。肩位置条件3では、内力条件による顕著な差は見られなかった。

図4b)より、内力条件0[N]においては、肩位置条件2で追従誤差の標準偏差は小さく、肩位置条件3で追従誤差の標準偏差は最大となった。内力条件20[N]においては、肩位置条件が1、2、3の順で、すなわち腕姿勢が伸びるに従って、追従誤差の標準偏差は大きくなった。内力条件40[N]においては、肩位置条件が1から3へと変化するに従って、追従誤差の標準偏差が小さくなった。

以上の結果より、肩位置条件3のように腕が伸びた姿勢、内力条件40[N]のように発揮内力が大きい場合では、肩位置条件と内力条件の相互作用による影響が大きくなると考えられる。

4. ヒトーハンドル系におけるインピーダンスの同定

付加動作時のハンドル操作性を詳細に分析するため、ヒトーハンドル系におけるハンドル軸まわりのインピーダンスの同定を行った。

4.1 ヒトーハンドル系のモデリング

ステアリング操作中のヒトーハンドル系の運動方程式は次式で表される。

$$\tau + \tau_d = K\theta + B\dot{\theta} + M\ddot{\theta} \quad (4)$$

ただし、 K 、 B 、 M はそれぞれヒトーハンドル系におけるハンドル軸まわりの剛性、粘性、慣性であり、 τ はヒトの操舵トルクである。微小摂動による強制変位中のヒトーハンドル系のインピーダンスおよび平衡点は一定であると仮定すると、強制変位中の運動方程式は、

$$\Delta\tau = K\Delta\theta + B\Delta\dot{\theta} + M\Delta\ddot{\theta} \quad (5)$$

となる。ただし、 $\Delta\tau$ 、 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\dot{\theta}$ 、 $\Delta\ddot{\theta}$ はそれぞれ微小摂動トルク、微小変化角度、微小変化角速度、微小変化角加速度である。ヒトの能動的な運動が摂動に比べて遅いことを考慮すると、高域通過フィルタによってヒトの能動的な運動以外の成分、すなわち摂動成分およびヒトの受動的な成分を取り出すことができる。フィルタ処理で得られる信号を用いて、ハンドル軸まわりのヒトーハンドル系の機械インピーダンスの推定を行う。信号の抽出には、低域遮断周波数5[Hz]、高域遮断周波数20[Hz]の4次のパワースフィルタを用いた。

a) Shoulder Position b) Internal Force
Fig.4 Averaged S.D. of Steering Wheel Angle

4.2 機械インピーダンスの推定方法

実験中のヒトに起因する機械インピーダンスは時々刻々と変化する。したがって、逐次的に機械インピーダンスを推定する必要がある。そこで、逐次最小二乗法⁽¹¹⁾を用いて機械インピーダンスの推定を行った。本報告で用いた推定方法について以下で述べる。時間によって変化する変数をサンプリングの関数として明示している。

第*i*サンプリングにおける摂動成分のみの運動方程式は、

$$\Delta\tau_{[i]} = K_{[i]}\Delta\theta_{[i]} + B_{[i]}\Delta\dot{\theta}_{[i]} + M_{[i]}\Delta\ddot{\theta}_{[i]} \quad (6)$$

となる。ここで、標記を簡単にするため、

$$A_{[i]} = [M_{[i]} \ B_{[i]} \ K_{[i]}] \quad (7)$$

$$\theta_{[i]} = [\Delta\ddot{\theta}_{[i]} \ \Delta\dot{\theta}_{[i]} \ \Delta\theta_{[i]}]^T \quad (8)$$

とすると、(6)式は、

$$\Delta\tau_{[i]} = A_{[i]}\theta_{[i]} \quad (9)$$

と表すことができる。 $\Delta\tau_{[i]}$ 、 $\theta_{[i]}$ が計測可能であるので、(9)式に逐次最小二乗法を適応し、 $A_{[i]}$ を推定することができる。

真値 $A_{[i]}$ の推定値を $\hat{A}_{[i]}$ としたとき、 $\hat{A}_{[i]}$ は次式で推定される。

$$\hat{A}_{[i]} = \hat{A}_{[i-1]} + \frac{\theta_{[i]}^T \Gamma_{[i-1]}}{\kappa + \theta_{[i]}^T \Gamma_{[i-1]} \theta_{[i]}} \varepsilon_{[i]} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{[i]} = \tau_{[i]} - \hat{A}_{[i-1]} \theta_{[i]} \quad (11)$$

$$\Gamma_{[i]} = \Gamma_{[i-1]} - \frac{\Gamma_{[i-1]} \theta_{[i]} \theta_{[i]}^T \Gamma_{[i-1]}}{\kappa + \theta_{[i]}^T \Gamma_{[i-1]} \theta_{[i]}} \quad (12)$$

ただし、 ε は予測誤差、 Γ は共分散行列、 κ は忘却係数である。各変数の初期値は、

$$\hat{A}_{[0]} = \mathbf{0}$$

$$\Gamma_{[0]} = \gamma I$$

とし、 $\gamma = 10^4$ 、 $\kappa = 0.98$ として計算を行った。ただし、 I は単位行列である。

5. インピーダンスの推定結果

ハンドル角度が目標値にうまく追従できていなかった原因をインピーダンスにより検討する。図5a)に追従性能の良い結果を示した被験者Bの肩位置条件1、内力条件0[N]、同図b)に追従成績の悪かった被験者Fの肩位置条件3、内力条件40[N]での操舵の変極点における計測データと推定したインピーダンスの結果を示す。

図5最上段の操舵波形を見てみると、図5a)では目標角度に対してうまく追従できているのに対し、図5b)では操作方向の変極点付近で目標角度から大きく逸脱している。図5中の2段目から最下段にかけて示す推定したインピーダンスを見ると、a)ではインピーダンスの変化が少ないが、b)では剛性、粘性が大きく変化しており、慣性もa)に比べて変化量が多い。a)ではヒトがインピーダンスを調節せずとも操作が容易な状況であったと考えられる。それとは反対に、b)では、ダイナミックに変化するハンドル操作性を補うため、状況に応じてヒトが積極的にインピーダンスを調節したと考えられる。

図5b)では、目標ハンドル角の変極点を境にして剛性および粘性が急激に減少している。剛性については、内力効果によって減少する剛性をヒトが補いきれなくなったためであると考えられる。粘性と慣性に比べ、剛性はステアリングの操舵感に大きく影響を及ぼす⁽⁷⁾ことから、操作感と操作性が比例するのであれば、剛性の急激な減少はハンドル操作性を低下させていると考えられる。以上より、図5b)の変極点近傍では、急激に剛性および粘性が減少し、ハンドルが急激に動きやすくなったため目標にうまく追従できずオーバーシュートしたと考えられる。

Fig.5 Experimental Results and Estimated Impedance

次に、肩位置条件の違い、すなわち腕姿勢の影響について考察する。図 6 a), b) はそれぞれ肩位置条件 1, 3 におけるハンドル角の変極点付近での腕姿勢の模式図である。ハンドル角の変極点前後では、運動方向の変化により、伸筋と屈筋の活動が入れ替わる。肩位置条件 1 では、トラッキング操作中には常に肩関節、肘関節がある程度屈曲した姿勢であるのに対し、肩位置条件 3 では、被験者から見て手前側の変極点で肩関節が伸展し、奥側の変極点では肘関節が伸展している。肩位置条件 3 のハンドル角の変極点付近では、関節が屈曲から伸展に変わること、筋の姿勢と運動方向に依存して剛性および粘性が減少したと考えられる。

以上のインピーダンスを用いた分析により、付加動作によるインピーダンスの変動がハンドル操作性を低下させているのではないかと示唆された。

6. おわりに

本報告では、トラッキング実験の追従性により、付加動作がハンドル操作性へ及ぼす影響について調べた。その結果、以下のことが示唆された。

- ・肩位置条件 1 では、内力増加によりトラッキングの追従性が低下した
- ・腕姿勢変化、内力が大きくなるにしたがって、単純にトラッキングの追従性は低下しなかった。
- ・うまく追従できていない場合には、インピーダンスが大きく低下した。

今回の実験では、筋のインピーダンスの推定を行っていないため、姿勢や運動方向に依存するインピーダンスの変化を詳細に分析することができなかった。今後は、筋電計測や筋骨格モデルによる詳細なインピーダンスの分析を行う必要がある。また、ハンドル反力を生成するための制御系の影響を分離した解析が必要である。

Fig.6 Arm Posture Depended on Shoulder Conditions

参考文献

- (1) L. Angell, J. Auflick, P.A. Austria, D. Kochhar, L. Tijerina, W. Biever, T. Diptiman, J. Hogsett, and S. Kiger : Driver Workload Metrics Project: Task2 Final Report, National Highway Traffic Administration, DOT HS 810 635 (2006)
- (2) Dingus T.A., Klauer S.G., Neale V.L., Petersen A., Lee S.E., Sudweeks J., Perez M. A., Hankey, J., Ramsey D., Gupta S., Bucher C., Doerzaph Z. R., Jermeland J., and Knippling R.R.: The 100-Car Naturalistic Driving Study, Phase II – Results of the 100-Car Field Experiment, National Highway Traffic Administration, DOT HS 810 593 (2006)
- (3) J. M. Dolan, M. B. Friedman, and M. L. Nagurka : Dynamic and Loaded Impedance Components in the Maintenance of Human Arm Posture, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.23, No.3, pp.698-709 (1993)
- (4) N. Hogan : Adaptive Control of Mechanical Impedance by Coactivation of Antagonist Muscles, IEEE Transaction on Automatic Control, Vol.AC-29, No.8, pp.681-690 (1984)
- (5) H. Gomi, M. Kawato : Human arm stiffness and equilibrium-point trajectory during multi-joint movement, Biological Cybernetics, Vol.76, No.3, pp.163-171 (1997)
- (6) 辻敏夫, 伊藤宏司 : クランク回転作業における人間の位置/力制御方策, 人間工学, Vol.28, No.4, pp.209-218 (1992)
- (7) 池浦良淳, 星野広行, 横井大介, 水谷一樹, 沢井秀樹, 兼原洋治, 星野光弘 : 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, pp.33-38 (2006)
- (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手先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, pp.1353-1359 (2006)
- (9) 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, pp.1083-1091 (2006)
- (10) 後藤和弘 : 人の腕の運動機能特性把握と産業への応用, 平成11年度 大分県産業科学技術センター研究報告, (1999)
- (11) 花房秀郎, M.Afif ADLI : 閉じた機構の剛性に及ぼす内力の効果, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.1, pp.128-134 (1992)
- (12) 足立修一 : 制御のためのシステム同定, 東京電気大学出版局, 東京, pp.115-118 (1996)