

運転者の操舵動作と筋活動との関係の研究*¹

Research on Relationship between Steering Maneuver and Muscles Activity

水野尊広 T. MIZUNO 葉山良平 R. HAYAMA 川原禎弘 S. KAWAHARA
楼 黎明 L. LOU Y. LIU X. JI

To operate the driver assistance system (DAS) at optimum efficiency, establishment of system evaluation method including the driver is necessary. In this study, muscles behavior during steering maneuvers has been investigated in order to create an estimation method of a driver's physical workload and an evaluation method for DAS. In this report, investigation results of muscle behavior while keeping the steering wheel are reported. Multiple muscles were simultaneously activated corresponding to each steering direction. When CCW direction torque was generated by the driver, it was observed that first anterior deltoids were activated, then, infraspinatus was activated and finally middle deltoid and pectoralis clavicular were activated.

Key Words: steering maneuver, electromyography (EMG), driver's physical workload

1. はじめに

安全性と省エネルギー性向上のため、電子制御技術を利用した運転者支援システムが多く実用化されており、車両安定性や操縦性の向上に貢献している。特に、電動パワーステアリングシステムは重要な運転者支援システムとして今後の発展が期待されている。すでに、環境への配慮や操縦性の要求から、電子制御による操舵力アシスト機能が、多くの車両に採用されている。この機能を応用して新しい支援システムや省エネルギー性向上の研究開発が行われている。

運転者支援システム性能は運転者の動作を含むシステム全体の総合的な動作に影響される。運転者の負担軽減、さらに交通事故低減のために、運転者を含むシステム全体の性能評価が必要となる。

ステアリングの操作性評価では、運転者の入力である操舵角や操舵トルク、および車両挙動であるヨーレートや横加速度などを定量的に計測し、これら計測値と官能評価結果との相関に基づいて評価される。近年では、運転者の生理的指標を用いた評価方法も検討されている。例えば、運転者の肩、上腕の筋活動を表面筋電位(EMG: ElectroMyoGraphy)計測器で定量的に計測すること

によって、ステアリングの操作性評価を行う試みである^{1)~12)}。

筆者らは、ステアリング操作性の評価手法と操舵負担推定手法の確立を目的に、操舵動作における筋活動を調査した。運転者が操舵を行う時に活動する筋を運動学と運動解剖学の観点から考察し、表面筋電位の計測が可能な10の筋を選定した。また、運転者が操舵によってステアリングホイール角を変化させる時(以下、アクティブ操舵)の筋の役割と活動の特徴を調査した¹³⁾。

本報では、被験者がステアリングホイールを保持する時(以下、パッシブ操舵)の筋活動を調査した結果を報告する。まず、2章で筋選定のプロセスとその結果の概要をまとめる。3章では選定した活動筋の役割・特徴を調査するために行った試験方法について説明する。4章では、操舵時の筋活動順序について述べる。5章では、全体のまとめを記す。

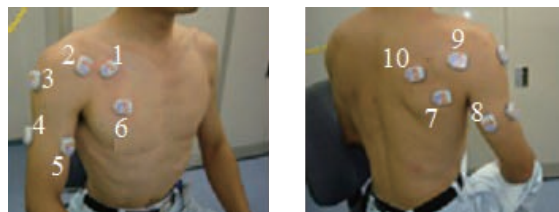
2. 計測筋の選定

被験者の操舵動作に応じて発生する筋の活動電位信号を計測するため、操舵時に活動し、かつ皮膚表面筋電位計測で計測可能な筋を決定することが必要である。文献⁴⁾には三角筋前部、大胸筋鎖骨部、大胸筋胸骨部、三角筋後部、三角筋中央部、三頭筋長頭、三頭筋外側頭、二頭筋が活動するとの報告が見られる。また同文献では、

* 1 本論文は、2011年自動車技術会 FAST-Zero' 11 Proceedings (20117373) を基に作成した。

操舵動作において肩の筋が主に活動することが報告されている。本報においては、これらの文献を参考に測定する筋を選定した。

操舵動作は運動学上の観点から上腕上肢の伸張と屈曲だけでなく、内転、外転、回内、回外が含まれる。解剖学の知見から、大円筋、棘下筋も測定することとした。図1に選定した筋とその位置、および関連する動作を示す。



No	筋	肩関節周りの上腕上肢動作					
		屈曲	伸張	外転	内転	回外	回内
1	大胸筋鎖骨部	★			☆		★
2	三角筋前部	★					★
3	三角筋中部			★			
4	三頭筋外側頭		☆				
5	二頭筋	★					
6	大胸筋胸骨部				☆		☆
7	大円筋		★		★		★
8	三頭筋長頭		★		☆		
9	三角筋後部		★				★
10	棘下筋		☆		★		☆

図1 計測筋と、上腕上肢動作の関係

(★相関強い, ☆相関弱い, 空白: 相関なし)

Relation between studied muscles and movement of upper limb and upper arm

(★ Related closely, ☆ Related slightly, Blank: No relation)

3. 試験方法

操舵時の筋活動を調査するため、ドライビングシミュレータ (DS: Driving Simulator) を用いた基礎試験を実施した。本報では、操舵の筋活動順序の基礎特性を明らかにすることを目的として、ステアリングホイールに発生するトルクに対抗して運転者が保舵する操舵を取り上げる。パッシブ操舵条件は、自動車の運転において多くの時間を占める直線走行時に行われる操舵動作に近いことから、操舵負担推定手法の確立に重要であると考えられる。

3.1 試験条件

被験者を図2に示すドライビングシミュレータ上の模擬運転席に着座させ、図3に示す振幅 5N・m、周期

0.025Hz の三角波形状の操舵反力に抗ってステアリングホイールを保持させた。本ドライビングシミュレータは乗用車の運転席を模した空間に、一般乗用車で用いられるステアリングコラムを取付けたものであり、運転者の操作に基づいて、車両モデルで作成された操舵反力を反力アクチュエータによって作り出すことができる。本ドライビングシミュレータは通常は車両挙動を含むステアリングシステムの性能評価に用いている。今回は、予め設定したトルクをステアリングホイールに生成させる機能のみを使用して試験を行った。

振幅 5N・m は操舵力アシスト機能が働いた車両を一般的に操舵する際に運転者が負担するトルクの大きさに等しくなるように設定した。また、周波数は筋の活動順序を評価する目的から、今回は準静的な領域と言える 0.025Hz を設定した。

被験者の基本姿勢を図4に示す。試験の前に、被験者には前腕と上腕の角度 δ がおよそ 110 度となる運転姿勢をとらせた。また、ステアリングホイールの把持は右手のみとし、その把持位置はステアリングホイール 3 時の位置とし、左手はステアリングホイールから離れた状態としている。試験の状況を図5に示す。

試験において、被験者が保持するステアリングホイールの角度とトルクを測定した。また、上述の被験者の上腕上肢動作に関わる筋の表面筋電位を測定した。これらの測定結果はデータレコーダに 1kHz のサンプリング周期で記録した。測定した筋は図1に示した通りである。センサ部で計測される結果は、無線通信でデータレコーダに送信される。各センサからデータレコーダまでの電線は存在せず、またセンサが非常に軽量であることから、運転操作の妨げにならず、自然な運転操作状況を計測できる。



図2 ドライビングシミュレータ
Driving simulator

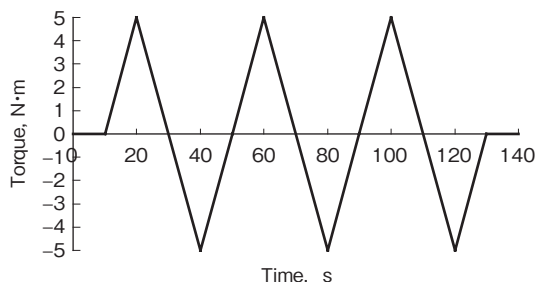


図3 操舵反力トルク
Steering wheel torque from DS

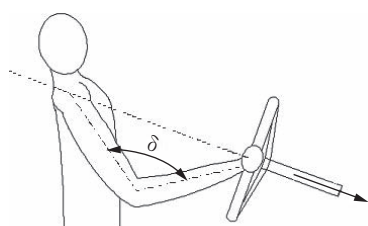


図4 基本姿勢
Basic posture



図5 試験状況
View of DS test

3.2 被験者

試験は25歳から50歳までの20名の被験者に対して実施した。なお、被験者の運転技能が評価へ影響する可能性を考慮して、被験者を表1の基準で選定した。

グループAは、ステアリング評価者としての運転訓練の受講経験がある被験者グループである。グループBは、日常的に運転している被験者グループである。グループCは、日常的に運転を行わず運転経験が不十分な被験者グループである。これらのグループに属する被験者をグループAは7名、Bは7名、Cは6名選んで試験を実施した。

表1 被験者のグループ分け
Grouping of subject

グループ	内容	人数
A	熟練運転者	7
B	日常運転者	7
C	運転経験の少ない運転者	6

4. 試験結果

パッシブ試験結果の内、グループA～Cの各1名の被験者の結果を図6(A)～(C)に示す。グラフの横軸は時間で、縦軸は上段より順に、操舵トルク、二頭筋、三角筋前部、三角筋中部、大胸筋鎖骨部、棘下筋、三頭筋外側頭、三頭筋長頭、三角筋後部、大胸筋胸骨部、大円筋のEMG信号である。操舵トルクの正值は、反時計回り方向へのドライビングシミュレータからの発生トルクに抵抗する時計回り方向への被験者入力トルクである。なお、EMG信号は15～500Hzのバンドパスフィルタ処理後、100データの二乗平均化処理を行ったものである。(ここで、大胸筋胸骨部の定常的な振動は心筋の活動を示している。)

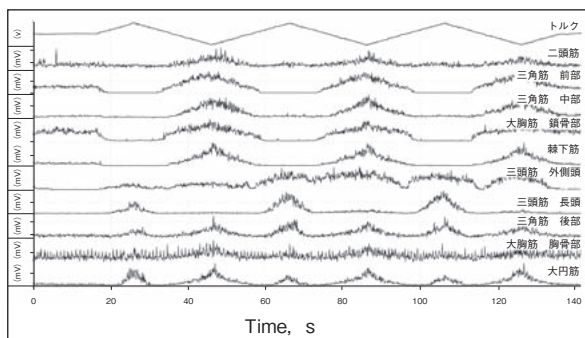
4.1 トルク方向と筋活動

時計回り方向への被験者入力(図6中、約15～25s、45～60s、85～105s: CW操舵)では、三頭筋長頭、三頭筋外側頭、三角筋後部、大円筋の活動が顕著である。一方、反時計回り方向への被験者入力(同図中、約25～45s、65～85s、105～115s: CCW操舵)では、大胸筋鎖骨部、三角筋前部、三角筋中部、棘下筋、大円筋の活動が顕著である。

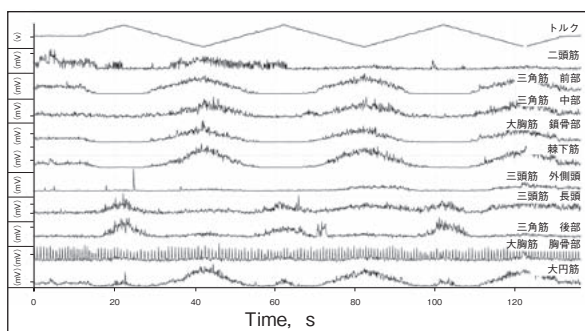
これらの結果をまとめて表2に示す。表2の結果は、図示していない他の被験者でも同様の傾向であった。また、グループによる違いは認められず、被験者の運転技能によらず操舵時に活動する筋が等しいことを示している。

また、いずれの方向のトルクに対抗する操舵においても、複数の筋活動が同時に見られることから、パッシブ操舵動作が単一の筋活動では達成できない動作であることが分かる。

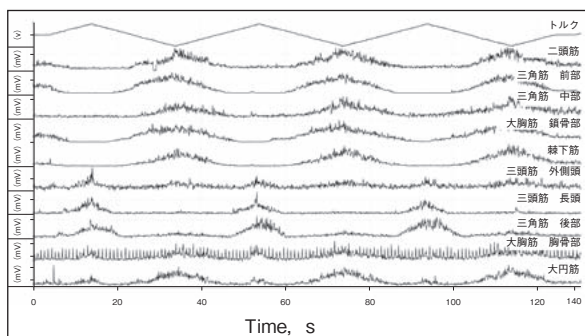
図6(A)の三頭筋外側頭、同図(C)の三角筋後部の活動が両方向のトルクを出力する時に見られる傾向がある。



(A) グループ A



(B) グループ B



(c) グループ C

図6 パッシブ操舵時の EMG 信号例
Example of EMG signals in passive steering maneuver

表2 筋のグループ分け
Grouping of muscles

グループ	筋
CW 方向トルク	三頭筋長頭
	三頭筋外側頭
	三角筋後部
CCW 方向トルク	三角筋前部
	三角筋中部
	大胸筋鎖骨部
	棘下筋
CW, CCW 両方向	大円筋

4.2 拮抗活動

次に、CCW 操舵から CW 操舵に替わる時の筋活動の特徴を考察する。例えば、図6中30s 近辺から、CCW 操舵トルクの減少に伴い、棘下筋の活動が減少しつつ、CW 操舵トルクを発生させるための三頭筋長頭の活動が増加していく。この時、両方の筋が同時に活動する時間（オーバーラップ）が存在していることが分かる。図7にこの時のグループ A に属する被験者の EMG 信号を一例として示す。前節の結果から、2つの筋は拮抗関係にあり、両筋の同時活動は操舵の仕事量としてステアリングホイールに作用していないと思われる。この同時活動は無駄な動作であり、運転者の操舵効率低下要因である可能性が考えられる。

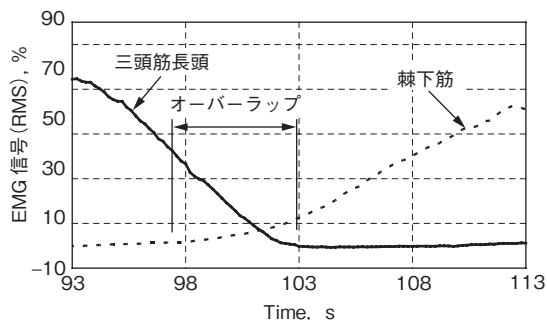


図7 拮抗関係の例
Example of co-contraction

4.3 活動順序

表2に示した、CW、CCW の各操舵において、活動する複数の筋の関係を調査するため、筋の活動順序を評価した。まず、時系列グラフより EMG 信号が顕著に増加し始める時点を明らかにした。図8にその一例を示す。グラフの横軸は時間で、縦軸は EMG 信号である。

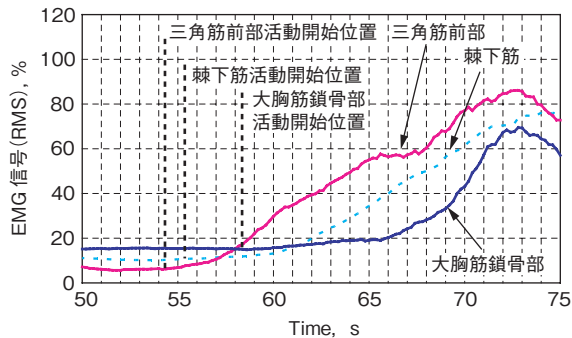


図8 筋活動開始点の例
Examples of activation starting time

4.3.1 CW 操舵時の筋活動順序

CW 操舵時の活動順序を評価する。三頭筋外側頭の EMG 信号増加時点を基準として、他の EMG 信号の増加時点がどれだけ遅れているかを読み取った。図9に結果を示す。横軸にCW 操舵時に活動する筋を示し、縦軸に各筋活動の増加開始時間遅れを示している。棒グラフは各々の被験者の遅れ時間を示し、折れ線グラフは各グループを構成する被験者の遅れ時間の平均値を示す。この結果より、CW 操舵の場合、活動順序に関して、明らかな傾向が見られないことが分かる。被験者グループの違いについても有意性が低いことが分かる。

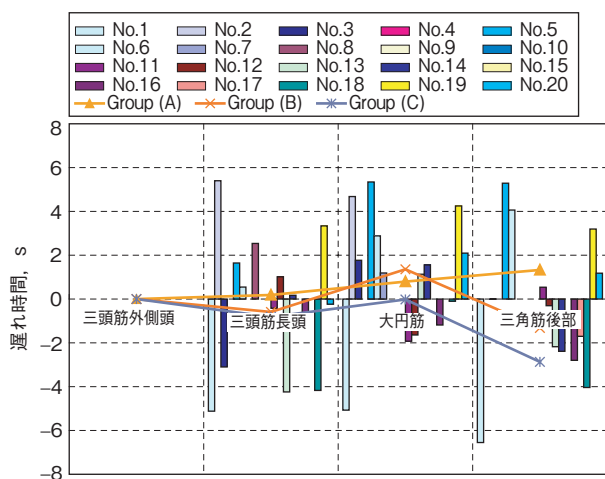


図9 CW 操舵時の筋活動順序
Activation order in CW maneuver

4.3.2 CCW 操舵時の筋活動順序

次に、CCW 操舵時の活動順序を評価する。CCW 操舵時には、三角筋前部の EMG 信号増加時点を基準として、他の EMG 信号の増加時点がどれだけ遅れているかを読み取った。図10に結果を示す。各軸およびグラフはCW 操舵時の評価結果と同様である。

この結果より、CW 操舵の場合と異なり、異なる活動順序を示す被験者は存在するものの、本条件において、筋活動が表3に示す順序で生じさせていることが分かる。また、この傾向は被験者のグループによらず同様の結果であることから、運転技能に関わらず、同様の筋制御が行われていることが分かる。また、三角筋前部、棘下筋、三角筋中部、大胸筋鎖骨部は肩関節の運動であり、二頭筋は肘関節の運動である。このことから、変化するステアリングホイールトルクに対して、被験者はまず肩関節の剛性を高めて保持することを試みた後に、不足分を肘関節動作で補っていると言える。

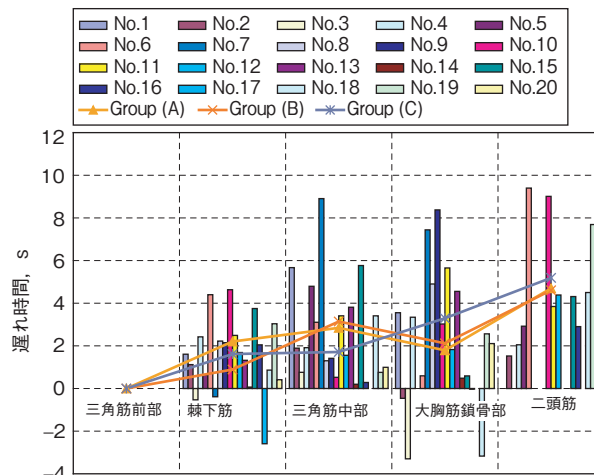


図10 CCW 操舵時の筋活動順序
Activation order in CCW maneuver

表3 筋活動順序
Activation order

活動順	筋
1	三角筋前部
2	棘下筋
3	三角筋中部 大胸筋鎖骨部

5. まとめ

本報では、操舵動作の負担推定指標を検討する前段階として、被験者がステアリングホイールを保持する、パッシブ操舵時の筋活動の役割と特徴の調査を実施した。以下に結果をまとめる。

- ①操舵トルクの方角によって、活動する筋が異なる。いずれの操舵方向においても、単独の筋活動ではなく、同時に複数の筋活動が見られる。被験者による複雑な筋制御が行われている。
- ②操舵トルクの方角が変化する条件では、活動する筋が交替する。活動が瞬時に切り替わるのではなく、双方の活動が重なり合う（オーバーラップ）時間が存在する。オーバーラップ時の拮抗活動は、ステアリングホイールに作用せず、運転動作に対する操舵効率の低下要因になる可能性がある。
- ③強制的に反時計回り方向のトルクをステアリングホイールに加えた場合、被験者は保舵するために、時計回り方向のトルクを発生させる。この時、三頭筋長頭、三頭筋外側頭、三角筋後部が活動している。活動順序は被験者間のばらつきが大きく、共通する明らかな特徴は見られない。

④保舵時にステアリングホイールから強制的に時計回り方向のトルクを加えた場合、被験者はステアリングホイール角を保持するために、反時計回り方向のトルクを発生させる。この時、被験者は三角筋前部、棘下筋、三角筋中央と大胸筋鎖骨部の順に活動させている。被験者は肩関節の剛性を向上させてトルクに対抗した後、さらに増加するトルクに対して、肘関節の剛性を向上させている。

6. おわりに

筋電位などの生体計測は、操舵負担推定だけでなく、操舵に関わる意図判別や事故回避のためのアクティブセイフティ技術の分野に活用できる可能性もあり、さらなる研究が期待される。

参考文献

- 1) Cole D. J.: Steering feedback Mathematical simulation of effects on driver and vehicle. ATZ autotechnology, 8, (2008)2.
- 2) Pick A. J., Cole D. J.: A mathematical model of driver steering control including neuromuscular dynamics. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 130(3), (2008)9.
- 3) Keen S. D., Cole D. J.: Steering control using model predictive control and multiple internal models. The 8th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Taipei, China, (2006)AVEC060095.
- 4) Pick A. J., Cole D. J.: Measurement of driver steering torque using electromyography. Transactions of the ASME. 2006, 128(2006)960.
- 5) Pick A. J., Cole D. J.: Neuromuscular dynamics and the vehicle steering task. In proceedings of the 18th IAVSD Symposium on the Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, Japan, August 2003, Vehicle System Dynamics, 41(Suppl.)(2003)182.
- 6) Pick A. J., Cole D. J.: Dynamic properties of a driver's arms holding a steering wheel. Proc. Inst. Mech. Eng., Part D(J. Automobile Engineering), 221(12)(2007)1475.
- 7) Pick A. J., Cole D. J.: Neuromuscular dynamics in the driver-vehicle system. Vehicle System Dynamics, 44(2006)624.
- 8) Pick A. J., Cole D. J.: Driver steering and muscle activity during a lane-change manoeuvre. Vehicle System Dynamics, 45(9)(2007)781.

- 9) Akira Kuramori, Noritaka Kouguchi., Kojiro Ishikawa, Masayoshi Kamijo, Tugutake Sadoyama: Evaluation of effects of drivability on driver workload by using electromyogram. JSAE review, 25(1)(2004)91.
- 10) Takamitsu Tajima, Toru Oshima: Effect of improvement of steering system of vehicle based on muscular cooperated control model. Proc. Inst. Mech.Eng., Part D(J. Automobile Engineering), 221(12)(2007)1475.
- 11) Akira Kuramori, Noritaka Kouguchi, Masayoshi Kamijo, Tugutake Sadoyama: Evaluation of vehicle drivability by using muscle activity of drivers. 2003, 6th JSEK conference.
- 12) Akira Kuramori, Noritaka Koguchi, Masayoshi Kamijo, Tsugutake Sadoyama: Study on Driving Ease Evaluation Focusing on Muscular Activity of Driver. Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, 61(6)(2007)116.
- 13) Liu Yahui, Ji.xuewu, Ryouhei Hayama, Takahiro Mizuno, Sadahiro Kawahara, Lou Liming: Research on EMG Signals of Shoulder and Upper Limb Muscles within Steering Manoeuvre - Part 1: Identification of the Main Muscles and Their Roles, JSAE FAST-Zero'11 Proceedings(2011)20117372.

筆者



水野尊広*
T. MIZUNO



葉山良平**
R. HAYAMA



川原禎弘***
S. KAWAHARA



楼黎明****
L. LOU



Y. LIU *****



X. JI *****

* 研究開発本部 先端基盤研究部
 ** 研究開発本部 電子システム研究部 博士(情報学)
 *** 研究開発本部 機械システム研究部
 **** 研究開発本部 先端基盤研究部 博士(農業工学)
 ***** 清華大学 自動車工学科 博士(工学)