

東海大学大学院令和5年度博士論文

上肢の筋活動を用いたドライバーの
操舵負担評価に関する研究

指導 成田 正敬 講師

東海大学大学院 総合理工学研究科
総合理工学専攻

内野 大悟

目次

第1章 序論

1. 1	本研究の背景	1
1. 1. 1	自動車のシェアリングサービスの普及と課題	1
1. 1. 2	ステアバイワイヤシステム	5
1. 1. 3	ステアリングギア比に関する先行研究	7
1. 2	SBWSの操舵反力トルク	10
1. 2. 1	操舵反力トルクによる操舵負担の評価	10
1. 2. 2	表面筋電位を用いた操舵負担評価	12
1. 3	SBWSの運転姿勢	13
1. 3. 1	運転姿勢の調節機構による課題	13
1. 3. 2	SBWSを用いた適切な運転姿勢	14
1. 4	本研究の目的と検討方法	15
1. 4. 1	SBWSの操舵反力トルクと運転姿勢	15
1. 4. 2	ドライバーごとの操舵負担評価手法の構築	16
1. 5	本論文の構成	17

第2章 上肢の体格に基づいた操舵負担の評価

2. 1	第2章の目的と検討方法	19
2. 2	2次元の上肢負担モデルを用いた操舵負担評価	20
2. 2. 1	逆運動学を用いた2次元の上肢負担モデルの構築	20
2. 2. 2	上肢の体格が操舵負担に与える影響	23
2. 3	SBWSを実装した車両の操舵による負担評価	25
2. 3. 1	SBWSを搭載した実験車両	25
2. 3. 2	操舵実験の実験協力者	32

2. 3. 3	表面筋電位を用いた操舵負担評価	34
2. 3. 4	実験結果及び考察	40
2. 4	第2章のまとめ	44

第3章 関節モーメントを考慮した操舵動作時の筋負担評価

3. 1	第3章の目的と検討方法	45
3. 2	主観評価を用いた予備実験	46
3. 2. 1	主観評価による操舵負担評価	46
3. 2. 2	実験結果及び考察	50
3. 3	負荷実験を用いた操舵負担の定量化	53
3. 3. 1	3次元の上肢負担モデルの構築	53
3. 3. 2	負荷実験と操舵実験による操舵負担の比較	55
3. 3. 3	実験結果および考察	58
3. 4	従来の操舵システムとSBWSの操舵反力トルクの比較及び検討	60
3. 4. 1	走行実験における操舵動作の負担度の確認	60
3. 4. 2	実験結果及び考察	62
3. 5	第3章のまとめ	65

第4章 上肢の体格に基づく関節パワーを用いた適切な運転姿勢 の評価

4. 1	第4章の目的と検討方法	66
4. 2	運転姿勢による表面筋電位を用いた操舵負担評価	67
4. 2. 1	運転姿勢の変化が操舵負担に及ぼす影響の検討	67
4. 2. 2	運転姿勢を変化させた際の筋活動の測定結果及び考察	70
4. 3	関節パワーを用いた運転姿勢の評価	72
4. 3. 1	関節モーメントによる運転姿勢の解析	72
4. 3. 2	関節モーメントによる解析結果および考察	75

4. 3. 3	関節角度の変化量による運転姿勢の解析	77
4. 3. 4	関節角度の変化量による解析結果および考察	78
4. 3. 5	関節パワーを用いた運転姿勢の解析	80
4. 3. 6	関節パワーによる解析結果および考察	81
4. 4	第4章のまとめ	84

第5章 結論

.....	85
謝辞	88
付録 本論文に記載された内容に引用元	89
参考文献	90

第1章

序論

1. 1 本研究の背景

1. 1. 1 自動車のシェアリングサービスの普及と課題

自動車のシェアリングサービスの利用者が増加している [1-1]. 観光地では図 1-1 に示すような小型車両のシェアリングサービスが普及している. このシェアリングサービスにおいては 20 代から 60 代までの幅広い年齢層の男女に利用されている [1-2].

シェアリングサービスの特徴として, 1 台の自動車を様々なドライバーが入れ替わり利用する. そのため様々なドライバーが運転姿勢を調節するためにステアリングホイールの位置を調節する. 従来の機械的な操舵機構を図 1-2 に示す. ステアリングホイールはステアリングシャフトの同軸上に接続されている. 加えて, ステアリングホイールを操舵したことによる回転運動を直線方向に変換するラックアンドピニオンギアに接続されている. この直線方向の動きが操舵輪を転舵することで, 操舵を行う. このように従来の操舵機構においてステアリングホイールは機械的に操舵輪と結合されており, ステアリングホイールの位置の調節範囲に制約がある. そのためドライバーの上肢の体格によっては適切な運転姿勢に調節することが難しく, ステアリングホイールを操舵するときの肉体的負担が増加してしまう.

図 1-2 に示すような従来の機械的な操舵機構において, 操舵輪からの反力はステアリングホイールに操舵反力トルクとして伝達されている. 操舵反力トルクは, タイヤが転舵した状態で車両が走行した時にタイヤを直進方向に戻そうとするセルフアライニングトルクとステアリングホイールの操舵角度とタイヤの転舵角の比 (ステアリングギア比) の積で決定される. ステアリングギア比は機械的に決定されるため, 機械的な操舵機構では操舵反力トルクをドライバーが調節することはできない. また操舵反力トルクを低減する目的で, ステアリングシャフトにモータを取り付けてドライバーの操舵動作を補助するパワーステアリングシステムが多く乗用車に搭載されており, ドライバーの負担を低減できる. ただしこのシステムにおいて, ドライバー側で補助の比率を変更することができる車両はほとんど存在しないため, 一定の負荷がドライバーに加えられることになる. また, ステアリングホイールを操舵するときを感じるトルクであ

る操舵反力トルクは、重すぎると感じれば肉体的負担が生じる、軽すぎれば運転が難しくなってしまう [1-3]. しかしながら上述の通りシェアリングサービスにおいては幅広い年齢層の男女の様々なドライバーが利用することから、腕の長さや重量、筋肉量は人によって大きく異なるため、一定の操舵反力トルクが加わる状況でも、どの程度の負担と感じるかはドライバーによって異なる.

このため機械的結合に依らず、ステアリングホイールの設置位置を幅広く変更でき、ドライバーに応じて操舵反力トルクを変更できるような操作系の構築が求められている.



図 1-1 トヨタ車体制の超小型モビリティ COMS
自由使用可能な [3-4] の Fig. 2 の一部を改変して転載

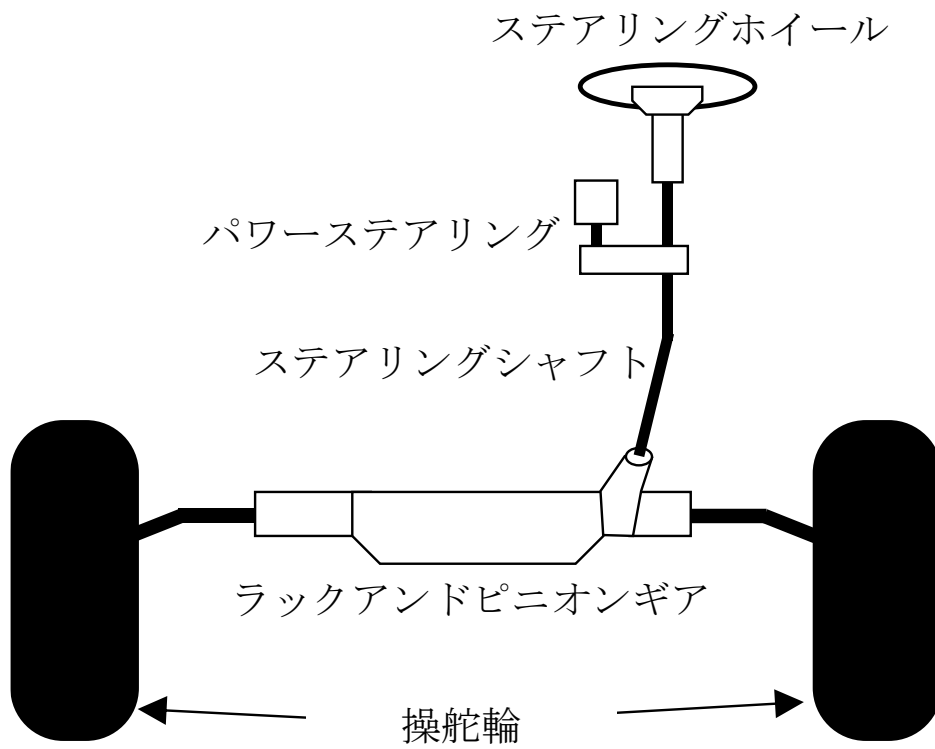


図 1-2 従来の機械的な操舵機構

1. 1. 2 ステアバイワイヤシステム

前述した課題を解決する手法として、ステアバイワイヤシステム (SBWS) が開発されている。SBWS とは、図 1-2 に示すような機械的な操舵機構に代わって電気信号によって操舵動作を伝達するシステムである。まずステアリングホイールの操舵角度をセンサで測定し、その信号をモータドライバや制御器を介して転舵モータに伝達する。転舵モータはラックアンドピニオンギアに接続されており、転舵モータが回転することによって操舵輪を転舵する。

SBWS はステアリングホイールに機械的な制約がなく、ステアリングホイールの位置を幅広く調節できる。そのため、様々なドライバーにおいて適切な運転姿勢を提供することができる。加えて、ステアリングホイールには操舵反力トルクモータが接続されており、操舵反力トルクをドライバーごとに制御することが可能になる。

これらの特長から SBWS を車両に搭載することで、ドライバー一人ひとりの特性に合わせてステアリングホイールの設置位置や操舵反力トルクを変更できる操作系を構築できる。しかしながらドライバーの負担を適切に低減するためには、ステアリングホイールの設置位置や操舵反力トルク的设计指針を構築する必要がある。そのためには、あるドライバーにとってこれらが負担にどのような影響を与えるかを評価する手法を構築する必要がある。

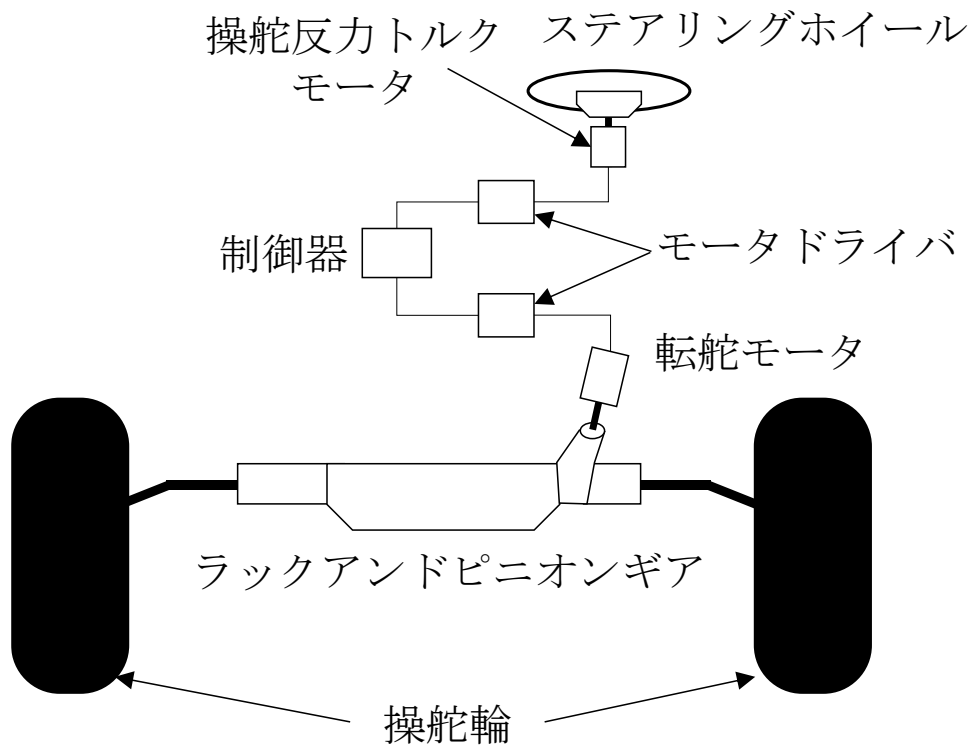


図 1-3 ステアバイワイヤシステム (SBWS) の操舵機構

1. 1. 3 ステアリングギア比に関する先行研究

自動車の死亡事故は単路に比べて市街地の交差点での事故件数が 1.5 倍程度多い。加えて、市街地と非市街地では市街地の死亡事故件数は約 1.3 倍多いなど、低速走行かつ高タスク時のリスクが高いと考えられる [1-4]。また、二神らは暗算タスクによって操舵が注意資源に及ぼす影響を検討し、反応速度が増大することで、特に右折時にドライバーへの負荷が高くなることを定量的に示した [1-5]。北原らは頻繁なステアリングホイールの持ち替えを伴う低速走行は直感的に操舵することが難しく、ドライバーの後天的な能力が必要であることを示した、特に初心者にとって負担となっている可能性を示した。 [1-6]

交差点など交通量が多い場面において、ステアリングホイールの持ち替え操舵による交通事故のリスクが大きいことが示唆されている。従来の操舵機構においてステアリングホイールの持ち替え操舵をなくすためには、ステアリングギア比を小さくする必要がある。一方で、操舵反力トルクは増加してしまい肉体的負担が増加してしまう。そのため従来の操舵機構において持ち替え操舵をなくすことは不可能である。

SBWS において、ステアリングホイールは操舵輪からの影響を受けないためにステアリングギア比を制御することが可能になる。ラックアンドピニオンギアのギア比はステアリングホイールの操作量と操舵輪の舵角量の比になり、ステアリングギア比と呼ぶ。パワーステアリングが搭載されている一般的な普通自動車において、ステアリングギア比は 12:1 から 18:1 (ピニオンギア : ラックギア) に設定されている [1-7]。ステアリングギア比を大きく設定すれば、ステアリングホイールを回す量 (操舵量) が増加するが、走行中操舵反力トルクが減少し、ステアリングホイールを軽く回すことができる (図 1-4)。

ステアリングホイールの持ち替え操舵をなくすために、SBWS では操舵反力トルクを増加させずに、ステアリングギア比を低く設定することができる。そのためステアリングホイールの持ち替え操舵をなくすことが可能になり、より安全な操舵機構を構築することができる。SBWS による低ステアリングギア比の操舵機構について研究が行われているが、これらの研究においてはステアリングギア比に着目した研究である [1-6], [1-8], [1-9], [1-10], [1-11]。そのた

め、操舵反力トルクや運転姿勢によって生じる操舵負担は検討されていない。シェアリングサービスにおいて、ドライバー一人ひとりの操舵負担が異なる。このことから適切な操舵環境を構築するためには、操舵反力トルクと運転姿勢に着目した研究を行っていく必要がある。

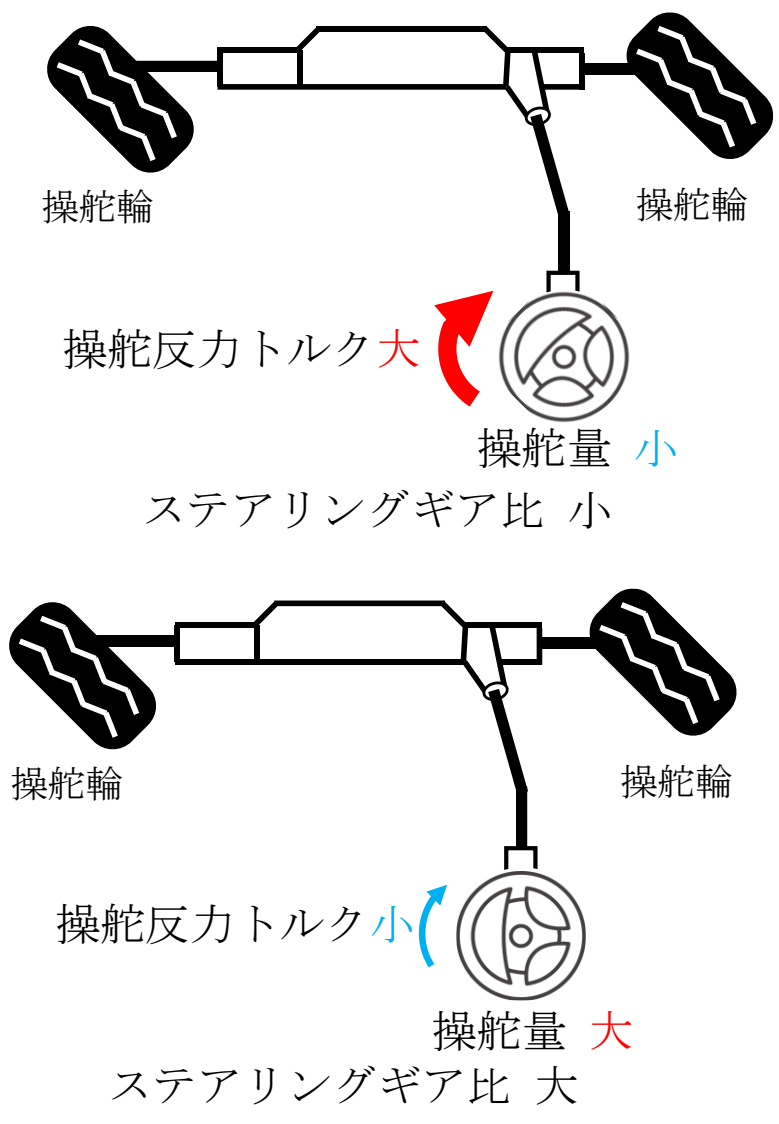


図 1-4 ステアリングギア比による操舵反力トルクと操舵量の関係

1. 2 SBWS の操舵反力トルク

1. 2. 1 操舵反力トルクによる操舵負担の評価

SBWS の課題の一つとして、ステアリングホイールと操舵輪が分離されている。そのためステアリングホイールを通してタイヤに生じている反力を感じることができない。タイヤの反力には車両運動の状態や路面情報が含まれており、SBWS はこれらを知ることができない。そこで、車両運動やドライバーの操舵反力トルクの感じ方に関する研究が行われている。

中野、池浦らは実車のデータに基づき、車両挙動が線形に近い場合は操舵反力トルクと操舵角は比例し、非線形領域では操舵反力トルクは飽和することで、車両の物理的限界を示す手法を提案しており、車両運動に基づいた検討を行うことで操舵反力トルクについて研究を行っている [1-12] , [1-13]。しかしこれらの研究においてドライバーの操舵反力トルクの感じ方については言及されていない。

平岡らはドライバーの知覚閾値に基づき、操舵反力トルクの感じ方を主観評価によって検討を行った。その結果、操舵反力トルクは操舵反力トルクが極端に小さいと精神的に負担になり、大きいと肉体的負担になることを明らかにした [1-3]。また、Newberry らは操舵反力トルクに対する心理実験を複数行い、物理量と近く量の非線形関係を明らかにしている [1-14]。加えて山田らは操舵反力トルクの変化量に対する知覚量は個人間での差違が小さいことを示したが、操舵反力トルクの絶対的な大きさにおいては個人差が生じることを明らかにした [1-15]。

先行研究において人が操舵反力トルクの大きさとその負担や感じ方についての傾向について言及されている。しかし、そのドライバーの体格差、筋肉量、好みなどと言ったドライバー一人ひとりの要素については言及されていない。自動車のシェアリングサービスにおける、一人ひとりの制御が求められる環境においてはドライバーごとの操舵反力トルクに対する評価手法が必要不可欠である。

操舵反力トルクを減少させることでドライバーの肉体的負担を減少させることができる。しかし肉体的負担を減少させすぎると運転が難しくなってしまう

[1-3]. しかしその適切な操舵反力トルクの大きさについては明らかにされていない. そのため, ドライバーごとに適切な操舵反力トルクの制御を行うためには, ドライバーごとの操舵負担の評価手法を構築する必要がある.

1. 2. 2 表面筋電位を用いた操舵負担評価

操舵反力トルクによって生じる肉体的負担を評価するために、表面筋電位の測定が用いられている。筋電位とは、人間の筋の伸長と収縮によって生じる活動電位であり、表面筋電位とは筋電位を表皮膚に貼付した電極によって筋電位を測定する手法である。表面筋電位の測定によって筋活動を測定し、肉体的負担を評価することができる。

吉田らは操舵動作によって生じる肩と肘関節の動作に着目した。3次元の上肢筋骨格モデルを構築し、肩の屈曲動作が操舵動作において影響が大きいことを示した。加えて操舵動作にかかわる筋の表面筋電位の測定から、三角筋前部が活動的であることを示した。その結果、肩の屈曲動作と三角筋前部によって操舵負担を評価できることを明らかにした [1-16]。梅本らは三角筋前部においても、操舵時の送り手側の三角筋前部が特に活発に活動を行っていることを示した。さらには送り手側の三角筋前部は主観評価による負担度との傾向が一致することを示している [1-17]。

表面筋電位を用いた操舵負担評価によって、操舵動作における動作や、筋の種類が明らかにされている。しかし、表面筋電位を用いることでドライバー一人ひとりの肉体的負担までには言及されていない。

1. 3 SBWS の運転姿勢

1. 3. 1 運転姿勢の調節機構による課題

従来の操舵機構では、ステアリングシャフトによる機械的な制約があるため、ステアリングホイールの調整範囲が狭い。様々な身長や体重、筋肉量が想定されるシェアリングサービスにおいて、従来の操舵機構では満足な運転姿勢をとることができない可能性がある。玉井らは体格が乏しいドライバーは前かがみ運転姿勢をとることが多いことを示唆している。前かがみ運転姿勢とは、高齢者などの上肢の筋肉量が低いドライバーに見られる運転姿勢であり、体幹を前屈させ、肘関節と膝関節が屈曲した運転姿勢である。前かがみ運転姿勢は全身の筋を用いて上肢の筋力を補うことで踏力を増加させることが出来るが、操作性を低下されることが明らかにされている [1-18]。前かがみ姿勢はステアリングホイールの位置をドライバーに合わせて変更することによって解消することが可能である。従来の操舵機構ではステアリングホイールの上下や前後量を変更するチルト機構の調整幅が狭い。そのため上肢筋力量の乏しいドライバーにとって前かがみ運転姿勢を取らざるを得ない。自動車のシェアリングサービスではユーザーが幅広いため、女性や高齢者も多く利用することが想定される。谷本らによると、男性は女性よりも 2 kg 程多いが、80 歳になった時の減少率が 16.4%と多いのに対し、女性は 80 歳時の減少率は 3%と小さいが 20 歳の筋肉量においては 2 kg 程少ない [1-19]。このように高齢者や女性は若い男性と比較すると上肢筋力量の減少が明らかにされており、ステアリングホイールの位置が適切でないと前かがみ運転姿勢を引き起こし、操作性の低下を引き起こす可能性がある。

1. 3. 2 SBWS を用いた適切な運転姿勢

SBWS を用いることによって、操舵輪とステアリングホイールの機械的な締結がなくなり、ステアリングホイールの位置の調整幅を大きくすることができる。そのため、ドライバーごとに適切な位置へ調節できることで運転姿勢を改善し、操作性の悪化を防ぐことが出来る。運転姿勢が操舵負担に及ぼす影響や、適切な運転姿勢に関する研究は多くされている [1-20] , [1-21] , [1-22] , [1-23] , [1-24]。しかしこれらは人間の体格や関節角度を統計的に考慮した検討、もしくは機械的な操舵機構において設計上の制約がある条件下での研究である。SBWS のように、ステアリングホイールの位置をほとんど制約なく調整できる機構における研究事例はない。また、ドライバーごとの身長、体重、腕の長さや重量などのパラメータごとに操舵負担を考慮した運転姿勢に関する研究は行われていない。

1. 4 本研究の目的と検討方法

1. 4. 1 SBWS の操舵反力トルクと運転姿勢

シェアリングサービスを利用するドライバーは様々な背景を持ち、同一車両を様々なドライバーが入れ替わり利用することが想定される。これまでに SBWS を用いた操舵負担の低減や、操舵反力トルクによる操舵負担、運転姿勢についての先行研究が行われている。しかし、ドライバー一人ひとりの身長、体重、腕の長さや重量などのパラメータごとに操舵負担を評価する手法に関しては検討されていない。そこで本研究では、ドライバーごとに適切な操舵反力トルクと運転姿勢を提供することができる SBWS の構築を目指すことを目的とした。このシステムを構築するためには、ドライバー一人ひとりの操舵負担を評価する手法は必要不可欠である。

劉らの研究において、操舵負担の低減を目的とした操舵反力トルクを制御が検討されている。その結果、どのような体格のドライバーにとっても操舵負担を低減することができることを示した [1-25]。この研究はドライバーの三角筋前部に生じる表面筋電位によって負担評価が行われている。どのドライバーに対しても同じ操舵反力トルクの制御が行われているが、操舵負担の大きさはドライバーによって異なり、低減される操舵負担の大きさも異なっていることを示している。このことから、操舵負担はドライバーによって異なる。この研究は身長、体重、腕の長さや重量に関しても言及されているが、表面筋電位の評価によってこれら进行评估することはできていない。そのため、表面筋電位のみでドライバーのパラメータを評価することは難しいと考えられる。

表面筋電位を用いることで、ドライバーの実際の肉体的負担量を示すことができる。しかし筋発揮量はドライバーの状態、筋の大きさやつき方、電極の貼付位置などによって異なることから、ドライバーごとのパラメータの影響を検討することが難しい。そのため表面筋電位の測定のみではドライバー一人ひとりのパラメータによって操舵負担を評価することはできない。身長、体重、腕の長さや重量といったドライバーのパラメータごとに操舵負担を評価するためには、表面筋電位の測定による筋活動の評価のみでは難しい。

1. 4. 2 ドライバーごとの操舵負担評価手法の構築

ドライバーごとに適切な操舵反力トルクや、運転姿勢を提供するためには、身長、体重、腕の長さや重量などによって操舵負担を評価できる手法が必要である。しかし、ドライバーひとり一人の体格や姿勢は千差万別であり、操舵負担にばらつきが生じてしまう [1-3] , [1-14], [1-15]。また、ドライバーの操舵反力トルクを感じ方や、操舵負担に影響する要素は年齢、筋肉量、身長、体重、腕のサイズなど、定量化できないものとできるものがある。定量化できないものを評価するためにはアンケートなどを用いた主観評価が有効だが、操舵負担には定量化できる上肢の体格である腕の長さや重量も影響している。そこで、定量化できるパラメータが操舵負担に与える影響を明らかにすることで、操舵負担の影響を排除し、主観のみを評価できるような操舵負担評価の手法を構築する。

1. 5 本論文の構成

表面筋電位の測定による操舵負担の評価においては身長、体重、腕の長さや重量による操舵負担を評価することは難しい。そこで本論文の第 2 章ではドライバーの腕の長さや重量による操舵負担への影響を検討する。まず、ドライバーの腕の 2 リンクのロボットアームとみなし、操舵時の肩関節の屈曲動作を再現する 2 次元の上肢負担モデルを構築する。これを用いて肩に生じる関節モーメントを算出する。関節モーメントは肉体的負担を評価できる [2-4]。また、上肢負担モデルはドライバーの腕の長さや重量を考慮し、関節モーメントは腕の長さや重量により変化する。そのため、関節モーメントは腕の長さや重量による操舵負担への影響を評価することができる。関節モーメントとドライバーの表面筋電位の測定を行うことで腕の長さや重量が実際の操舵負担に与える影響を明らかにする。

第 3 章では 3 次元の上肢負担モデルを構築する。このモデルは操舵時の屈曲動作のみではなく内旋、外旋、内転、外転動作を再現する。このモデルはドライバーの肩幅、腕の長さや重量を考慮しており、これらが操舵負担に与える影響を関節モーメントの算出によって検討できる。しかしドライバーが異なれば、肩幅、腕の長さや重量は異なり、関節モーメントは異なる。そのため操舵反力トルクを感じ方と肉体的負担が肩幅、腕の長さや重量によって影響してしまう。これらを排除して負担感を評価するためには操舵動作では難しい。そこでおもりを用いることでドライバーに負荷を与える負荷実験を行う。この負荷実験はドライバーの腕の長さや重量ごとにおもりの重量を調節する。そのため、異なるドライバー同士同じ肩関節モーメントによる負荷をドライバーに与えることができる。操舵時における肩関節モーメントを負荷実験で再現することによって、腕の長さや重量による肉体的負担の影響を排除した操舵負担評価が可能になる。しかし、操舵時と負荷実験における筋負担が一致するかは明らかではない。そこで操舵時と負荷実験における筋負担を評価し、異なる操舵反力トルクによる両者の筋負担が一致するかどうかの検討を行う。

ドライバーの上肢の体格によって、適切とされる運転姿勢は異なり、体の関節角度は異なる。関節角度が異なれば操舵負担が異なることから [1-18]、操舵負

扱はドライバーの上肢の体格に影響を受けることが考えられる。そのため、上肢の体格ごとに適切な運転姿勢を評価する必要がある。第4章では構築した3次元の上肢負担モデルを用いることで、上肢の体格である肩幅、腕の長さ、重量を考慮した運転姿勢の評価を行う。運転姿勢の評価には肩関節モーメントの算出に加え、肩関節角度の変化量と関節の仕事率である関節パワーを算出することで適切な運転姿勢を評価する方法を構築する。

第5章では本論文の結論を述べる。第2章から第4章までに得られた本研究の成果を総合して述べると共に、将来の展望についてまとめる。

なお、本論文のすべての実験において、本研究は、東海大学「人を対象とした研究」倫理委員会の承認を得ており、実験協力者に事前の同意を得て実験を行った。

第2章

上肢の体格に基づいた 操舵負担の評価

2. 1 第2章の目的と検討方法

第1章で示したように、操舵負担を評価するためには主観評価による手法が取られており、操舵反力トルクによって生じる操舵負担を個々に評価し、異なるドライバー間で比較評価する手法は確立されていない。劉ら [2-1] はドライバーの体格ごとにグループ分けし、筋活動によって操舵負担を評価している。しかし筋活動の発揮量は人によって異なり、同じドライバー同士を単純に評価することが出来ない。また、ドライバーの腕の長さや重量が与える操舵負担への影響は十分に検討されていない。そこで解析的な手法から、上肢の体格に基づいた操舵負担の評価を行う。

山本ら [2-2] によって、スポーツなどにおける素早い動作を除き、関節のモーメントつり合いによって、肉体的負担を評価できることが明らかにされているが、関節モーメントを算出するには、腕の長さや重量を決定する必要がある。つまり、ドライバーの上肢の体格（腕の長さや重量）ごとに関節モーメントは異なり、ドライバーの体格に基づいた操舵負担を関節モーメントによって評価することができる。

本章ではドライバーの上肢の体格による操舵負担の定量化を行う。そこで2次元の上肢負担モデルを作成する。このモデルから関節モーメントを算出することで、上肢の体格による操舵負担への影響を検討する。次に、筋活動の測定によって操舵負担の評価を行うことで、上肢の体格が操舵負担にどのような影響を与えるのかを明らかにする [2-3]。

2. 2 2次元の上肢負担モデルを用いた操舵負担評価

2. 2. 1 逆運動学を用いた2次元の上肢負担モデルの構築

人間の腕部は上腕，前腕，手から構成されており，それぞれ肩，肘，手首の3つの関節の角度を変化させることで腕の動作を行っている．本論文で扱うステアリングホイールの操舵動作において，ドライバーは主に肩関節と肘関節を動かして操舵動作を行っている．関節の周囲には筋肉があり，収縮して関節にモーメントを加えることで関節を動作させている．各関節にはそれぞれ複数の筋肉があり，それぞれの筋肉が収縮する方向が異なるため，人間は様々な方向に腕を動かすことができる．本論文ではドライバーの腕部を肩と肘の関節を持つ2リンクのロボットアームとし，アームの先端がステアリングホイールと拘束されている上肢負担モデル（図2-1）を構築する [2-4]．このモデルによって算出される肩に相当するリンクに発生するモーメントを用いて，肩の操舵負担を評価する．図2-1に示すように，車両の進行方向を x 軸，上下方向を y 軸，肩関節を O 点，肘関節を Q 点，ハンドル把持位置を P とし，上肢の重りはそれぞれ前腕，上腕の重心である R 点， S 点に作用し， P 点には操舵反力トルクによる力 F が作用する．肩と肘のモーメントを計算するためには，それぞれの点から肩（点 O ）と肘（点 Q ）までの距離を求める必要がある．点 P ， Q ， R ， S までの距離は式(2-1)~(2-4)を用いて計算した．

$$x_P = l \quad (2-1)$$

$$x_Q = L_1 \times \sin\theta \quad (2-2)$$

$$x_R = x_Q \times a \quad (2-3)$$

$$x_S = x_Q + L_2 \times b \times \sin(\theta_2 - \theta_1) \quad (2-4)$$

式(2-3)と式(2-4)の係数 a と b は，先行研究 [2-5] により明らかにされている前腕と上腕の重心位置であり， a は 0.47 で b は 0.43 である． x_P はハンドル把持位置の x 座標 [m]， x_R は上腕重心の x 座標 [m]， x_Q は前腕重心の x 座標 [m] であ

る. 関節モーメント M_O , M_Q [N・m]は, それぞれ式(2-1)~(2-4)の値を式(2-5), (2-6)に代入して算出した.

$$M_O = x_P \cdot F + x_R \cdot m_1 g + x_S \cdot m_2 g \quad (2-5)$$

$$M_Q = (x_P - x_Q) \cdot F + (x_S - x_Q) \cdot m_2 g \quad (2-6)$$

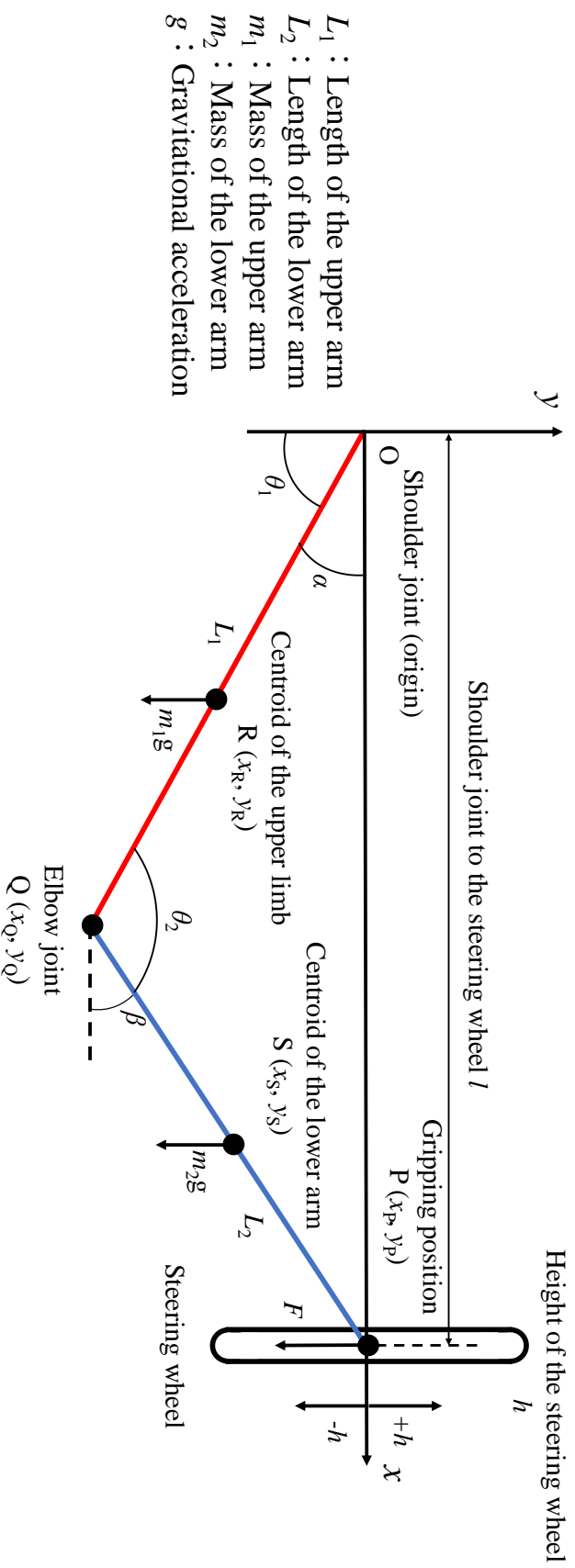


図 2-12 次元の 2 次元の上肢負担モデル

自由使用可能な [2-3] の Fig. 7 より転載

2. 2. 2 上肢の体格が操舵負担に与える影響

ドライバーの上肢の体格差が操舵負担に与える影響を確認するために、本モデルに含まれているパラメータである上腕 L_1 、前腕 L_2 、上腕と前腕を合成した重量 m を変更した際の肩関節モーメントの算出を行った。モデルの動作はステアリングホイールを 9 時 15 分の位置で保持する状態とした。まず、図 2-2 に腕の重量を変更した際の解析結果を示す。腕の重量の増加とともに、肩関節モーメントが増加することが分かった。図 2-3 に上腕と前腕の長さを変化させた際の肩関節モーメントを示す。上腕の長さの増加によって肩関節モーメントは増加したが、前腕の長さが増加すると肩関節モーメントは減少することが分かった。上腕が長くなることで、腕の重心位置が肩関節から遠くなるためにモーメントアームが増加するためである。また、前腕が長くなることで腕の重心位置が肩関節に近づくために肩関節モーメントが減少したと考えられる。

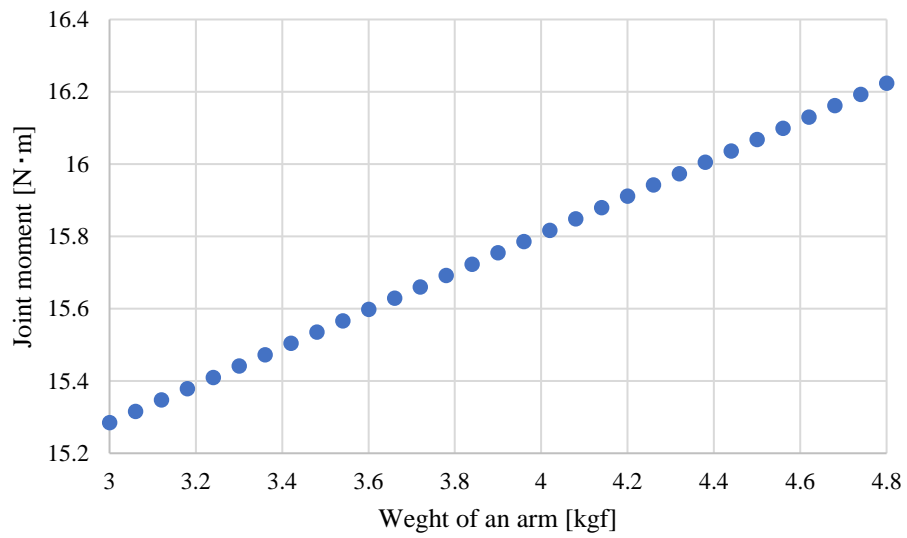


図 2-2 腕の重量ごとの肩関節モーメント

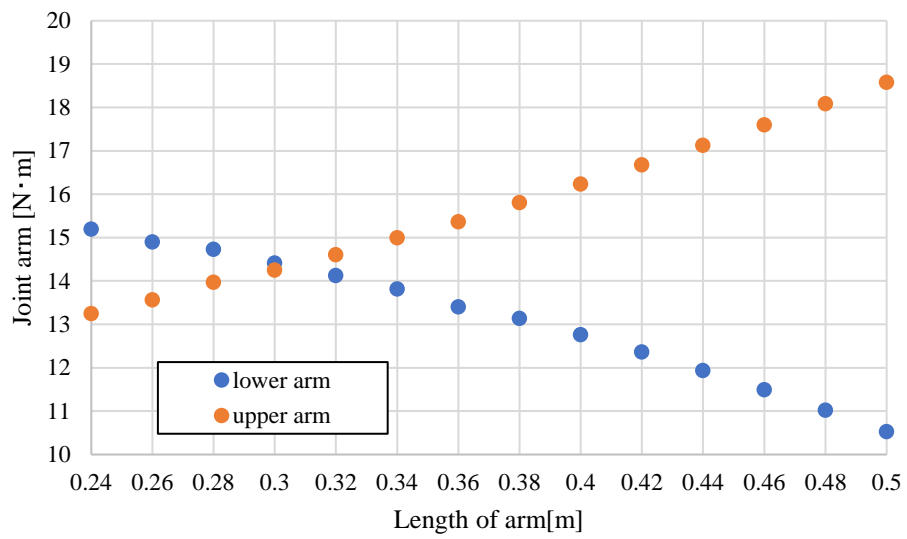


図 2-3 腕の長さごとの肩関節モーメント

2. 3 SBWS を実装した車両の操舵による負担評価

2. 3. 1 SBWS を搭載した実験車両

上肢の体格による操舵負担を，筋活動から実験的に評価するために，第 1 章において図 1-1 に示したトヨタ車体製の超小型モビリティである COMS（トヨタ車体製）に SBWS を搭載した実験車両（図 2-4）を用いた．同図の通り本実験車両はステアリングホイールとタイヤの転舵機構が機械的に締結されていないため，ステアリングホイールを任意の位置に設置することができ，様々な運転姿勢を提供することが出来る．図 2-5 に SBWS の概略図を示す．SBWS は，操舵反力トルクモータ，転舵モータと各モータ用の 2 つのモータドライバと DSP (Digital Signal Processor) から構成され，2 つのモータはそれぞれのモータドライバから DSP を介して接続されている．操舵反力トルクモータはロータリーエンコーダを内蔵しているため，ステアリングホイールの角度を検出することができる．検出された角度の信号は DSP に入力され，DSP 内で設定したステアリングギア比に基づいて転舵量が決定される．DSP から転舵量を指令する信号が出力され，モータドライバを介して転舵モータが駆動する．回転運動を並進運動に変換できるラック & ピニオンギアのピニオン部にステアリングモータを接続して並進運動を取り出し，前輪を転舵する．

本研究では，操舵反力トルクモータにオリエンタルモーター株式会社製の BXM6200-GFS を用いた．このモータは，操舵反力トルクを $0\sim 18\text{N}\cdot\text{m}$ の範囲で設定できる．また，操舵反力トルクをアナログ入力モードに設定することで，制御信号に応じて任意の操舵反力トルクを作用させることができる．従って，操舵角に応じて反力トルクを自由に設定することも可能である．図 2-6 に示すように，ステアリングホイールにはモータが接続されている．また，幅広い体格においても運転姿勢を調整可能にするために，図 2-7 に示すようなステアリングホイールの高さ調節が可能な機構が搭載されている．従来の COMS のステアリングホイールは，ステアリングシャフトを介してラックアンドピニオンギアに接続されている．本実験車両はこのステアリングシャフトを取り外し，転舵モータを設置してラックアンドピニオンギアと接続されている．先行研究より，緊急時の最大操舵速度は 450 deg./sec. 程度 [2-6]，[2-7] であることから，この操舵速度

に対応可能なオリエンタルモーター株式会社製の ARM98SAK-PS10 を転舵モータとして設置した。転舵モータは治具によって取り付けられ、モータの回転部とラックアンドピニオンギアにはプーリを介して図 2-8 のようにベルトで連結されている。DSP 内で設定を変更できるため、操舵反力トルクモータに対する転舵モータの回転量を変更できる。そのためステアリングギア比を自由に設定することができる。



図 2-4 SBWS を搭載した COMS

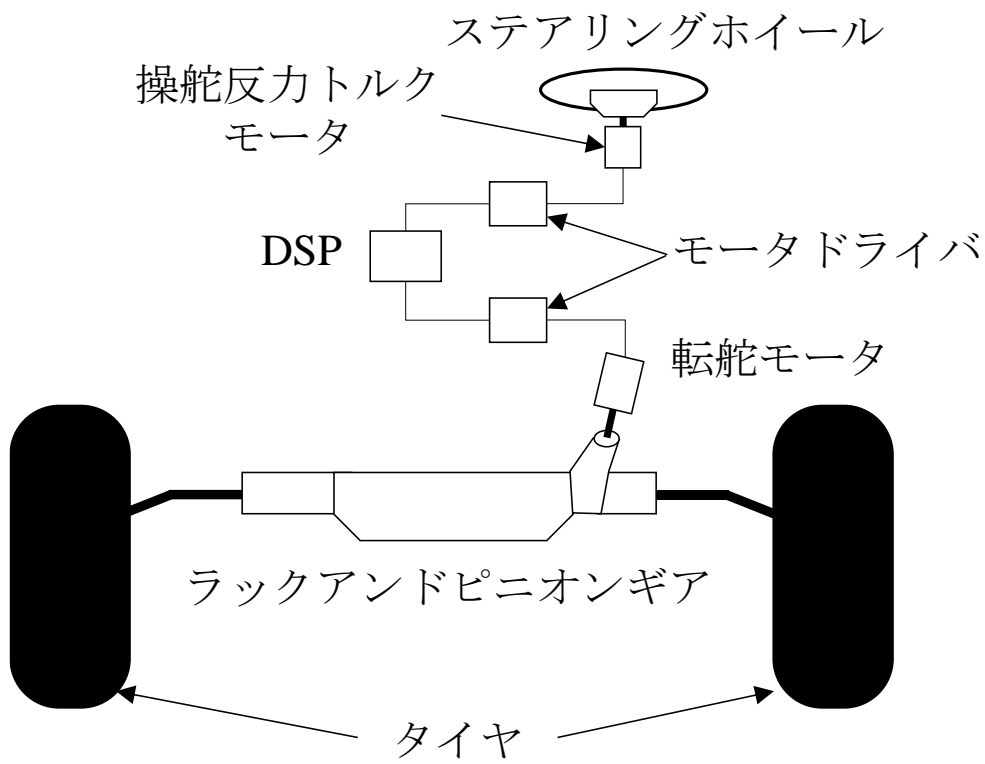


図 2-5 構築した SBWS の概略図

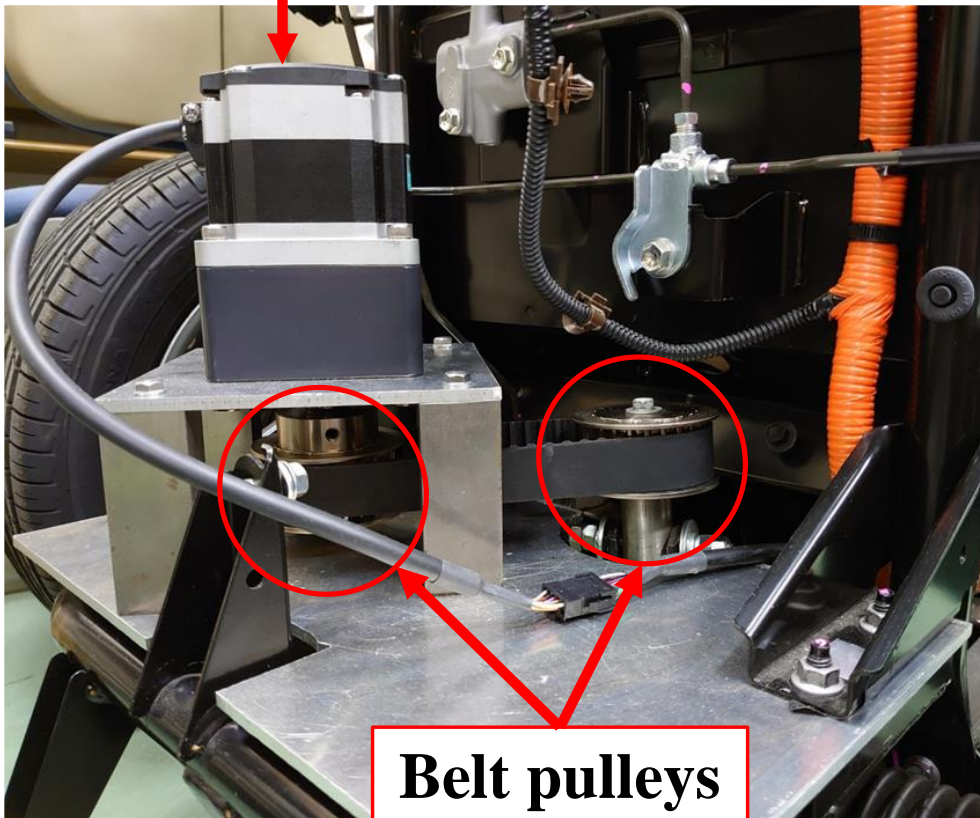


図 2-6 ステアリングホイールに接続された操舵反力トルクモータ
自由使用可能な [2-3] の Fig. 4 より転載



図 2-7 ステアリングホイールの高さ調節機構
自由使用可能な [2-3] の Fig. 5 より転載

Steering motor



Belt pulleys

図 2-8 転舵モータとプーリとベルトの接続
自由使用可能な [2-3] の Fig. 6 より転載

2. 3. 2 操舵実験の実験協力者

ドライバーが9時15分の位置でステアリングホイールを切らずに握ったまま操舵したときの送り手側の腕に着目し [2-8], [2-9], 肩関節モーメントを算出した。この時, 送り手側の腕とはドライバーが操舵する際に, ステアリングホイールを送り込む側の腕を指す。例えば, ステアリングホイールを右方向に操舵した際は左腕が送り手側の腕となる。対して右腕は引手側といわれる。

実際のドライバーの体格が必要となるため, 体格が異なり, BMI が同程度の20代男性の実験協力者4名の体格を測定した。作成した上肢負担モデルは, 腕の重量, 上腕, 前腕の長さを決定する必要がある。測定結果を表2-1に示す。腕の重量は体重を測定し, 先行研究にて報告されている体重比を用いて算出した [2-10]。図2-6に示すようなステアリングホイールの位置を調節する機構を搭載した実験車両に乗車した際の運転姿勢から肩, 肘, 把持位置を算出した。

表 2-1 実験協力者の体格

自由使用可能な [2-3] の Table. 1 より転載

Participants	A	B	C	D
Body height (m)	1.63	1.72	1.78	1.81
Body weight (kg f)	58	60	63	73
BMI	21.69	21.17	18.93	22.28
Arm weight (kg f)	3.48	3.60	3.78	4.38
Length of upper arm (m)	0.23	0.24	0.25	0.27
Length of forearm (m)	0.27	0.28	0.30	0.30

2. 3. 3 表面筋電位を用いた操舵負担評価

筋電位は筋肉が活動したときに発生する活動電位であり，筋肉の発揮量を評価することができる．本研究では，非侵襲的に測定できる大胸筋の表面筋電位を測定した．表面筋電位は，電極を表皮に貼付することで測定される．本章では，腕を前方に伸ばしたり，上げたり，下げたりするときに活動する大胸筋上部，三角筋前部，棘下筋（図 2-9）の表面筋電位を測定した [2-8]．表面筋電位は，AD Instruments 社製の Bio Amp ML132 preamplifier を用いて増幅し（ハイパスフィルタ，350 Hz；ローパスフィルタ，10 Hz），AD Instruments 社製の測定機器 PowerLab ML825 2125 によって測定される．これらの実験装置は電極に接続され，サンプリング周波数 4 kHz で測定を行う．図 2-10 に実験の外観を示す．

図 2-11 は，ステアリングホイールを 0～135 deg.に切ったときの表面筋電位の原波形を示す．この原波形を 0.1 秒ごとに二乗平均平方根(RMS)を用いて平滑化した波形が図 2-12 である．RMS の算出式を式(2-7)に示す．サンプリング周波数が 4kHz（サンプリング周期：0.25 ms）であるため，本研究において $n = 400$ で算出を行った．

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} \quad (2-7)$$

表面筋電位の発揮量は，人やその日の状態，電極を取り付ける位置によって異なる．そこで，最大随意収縮力（MVC）と呼ばれる，対象の筋の最大の力を発揮する際の RMS を測定する．MVC 時の RMS を 100%とし，操舵時の RMS との百分率で%MVC を算出した．%MVC の算出式を式(2-8)に示す．

$$\%MVC = \frac{\text{操舵時のRMS}}{\text{MVCのRMS}} \times 100 \quad (2-8)$$

この%MVCが増加することで、対象の筋に負担増加していることが示される。

表面筋電位は電極を、筋電位を測定する筋の上の表皮層に貼付して測定される。図 2-9 に電極の取り付け位置を示す。大胸筋の MVC の測定方法を図 2-13 に示す。実験協力者に図 2-13 に示す方向に 5 秒間最大筋力を発揮するように教示し、その逆方向に実験協力者の腕を抑えた。実験協力者の疲労が十分に回復するように核実験の間に休憩をはさみ、これを 3 回行う。計測された表面筋電位から最大値を MVC として用いた。

その後、実験協力者は実験車両に乗車し、解析条件と同様にステアリングホイールを 9 時 15 分の位置で保持操舵するよう教示した。操舵時の表面筋電位は 5 秒間測定された。

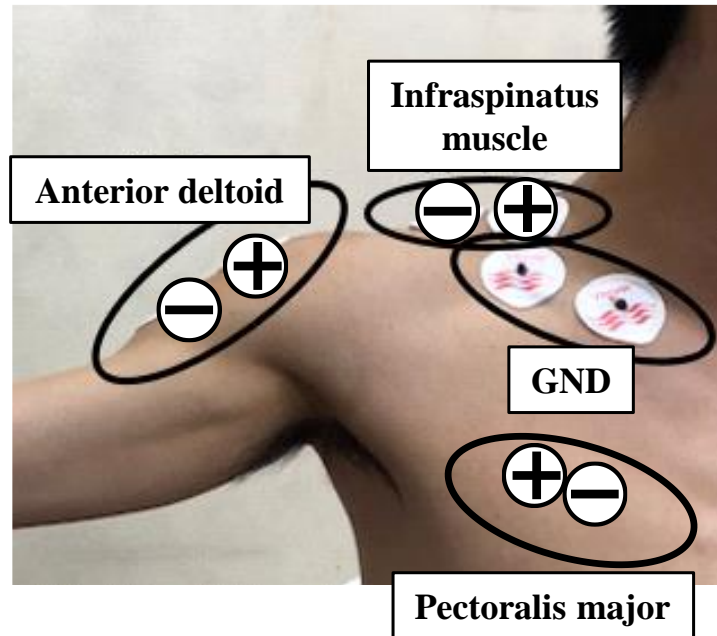


図 2-9 測定した筋と電極の貼付位置
自由使用可能な [2-3] の Fig. 11 より転載

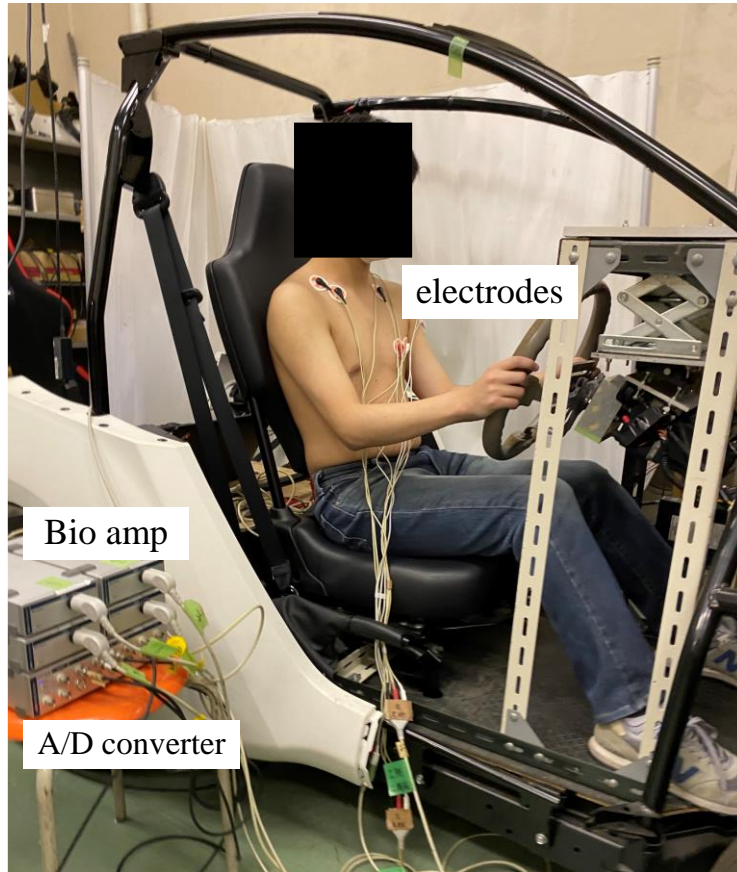


図 2-10 実験装置の外観

自由使用可能な [2-3] の Fig. 9 より転載

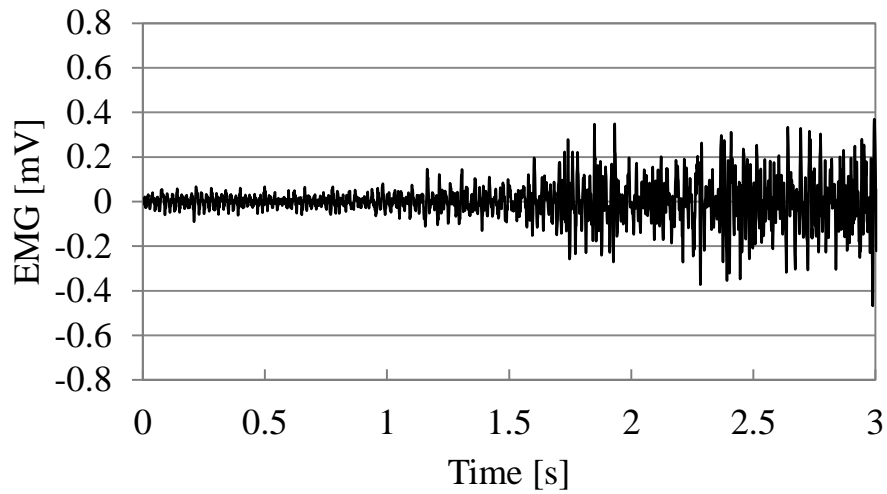


図 2-11 表面筋電位の原波形
自由使用可能な [2-3] の Fig. 10 より転載

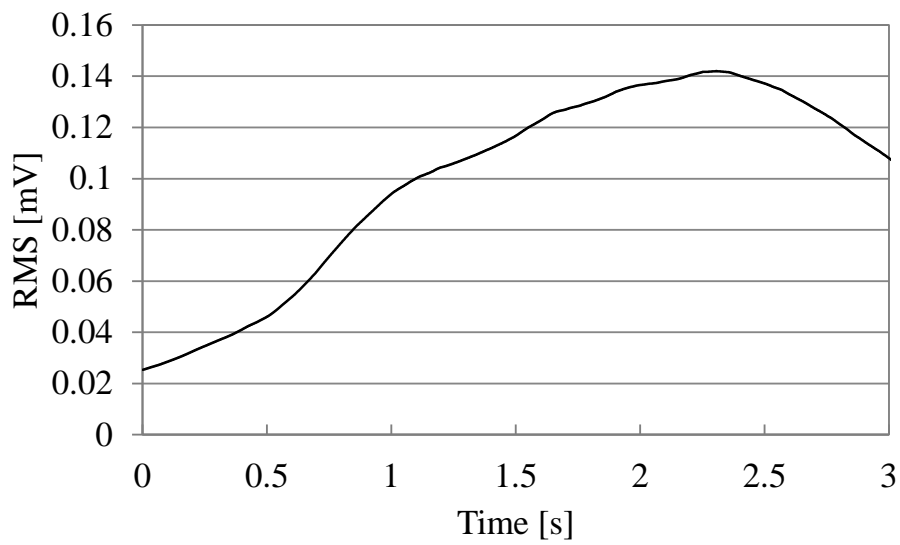


図 2-12 表面筋電位によって算出した RMS 波形
自由使用可能な [2-3] の Fig. 10 より転載

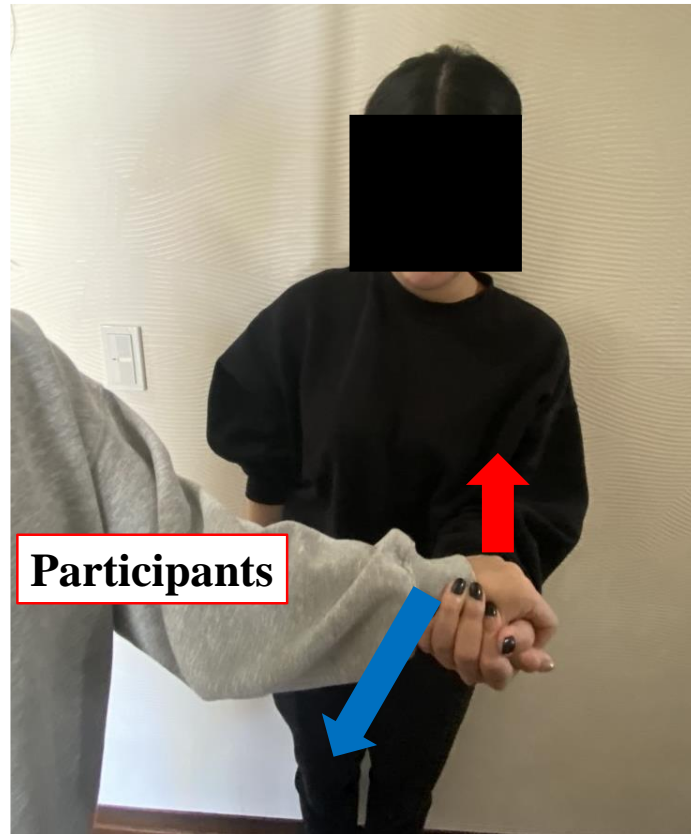


図 2-13 大胸筋上部の MVC の測定方法
自由使用可能な [2-3] の Fig. 12 より転載

2. 3. 4 実験結果及び考察

図 2-14 に実験協力者の腕の重量ごとに大胸筋上部の 5 秒間の%MVC と肩関節モーメントの平均値を示す。腕の重量が大きいほど、大胸筋上部の%MVC は増加し、腕の重量が最も軽い協力者と最も重い協力者では%MVC が約 15%増加した。肩関節のモーメントについても同様の傾向がみられ、腕の重量が 3.48 kgf から 4.38 kgf に増加すると、肩関節モーメントは 0.5 N・m 増加した。ドライバーの腕の重量増加によって関節モーメントの増加と同様に、大胸筋上部の筋活動が増加した。図 2-15 に三角筋前部の%MVC と肩の関節モーメントを示す。三角筋前部の%MVC は実験協力者 A から C にかけて増加傾向であったが、D は C よりも 2%減少した。図 2-16 に棘下筋の%MVC と肩の関節モーメントの結果を示す。棘下筋の%MVC は A から C にかけて減少傾向にあり、関節モーメントの傾向とは逆の傾向を示した。

肩の関節モーメントと大胸筋上部の表面筋電位の傾向が一致し、ドライバーの腕の重量が大胸筋上部の筋負担に影響を与えることを明らかにした。三角筋前部と棘下筋の筋活動において、関節モーメントの傾向は一致しなかった。2次元のモデルにおいては肩関節の屈曲動作のみの再現である。しかし操舵動作には内旋、外旋、内転、外転といった動作も含まれているため、関節モーメントと%MVC の傾向が一致しなかった筋は屈曲以外の動作に大きくかかわりがあると考えられる。

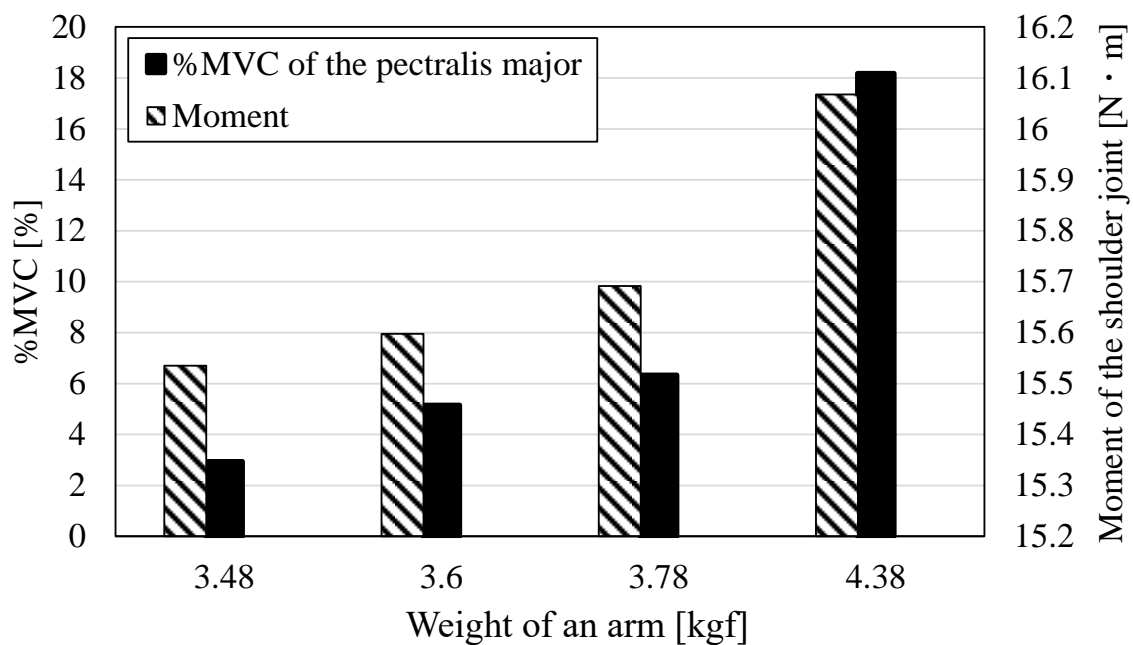


図 2-14 大胸筋上部の%MVC と肩の関節モーメント
 自由使用可能な [2-3] の Fig. 13 より転載

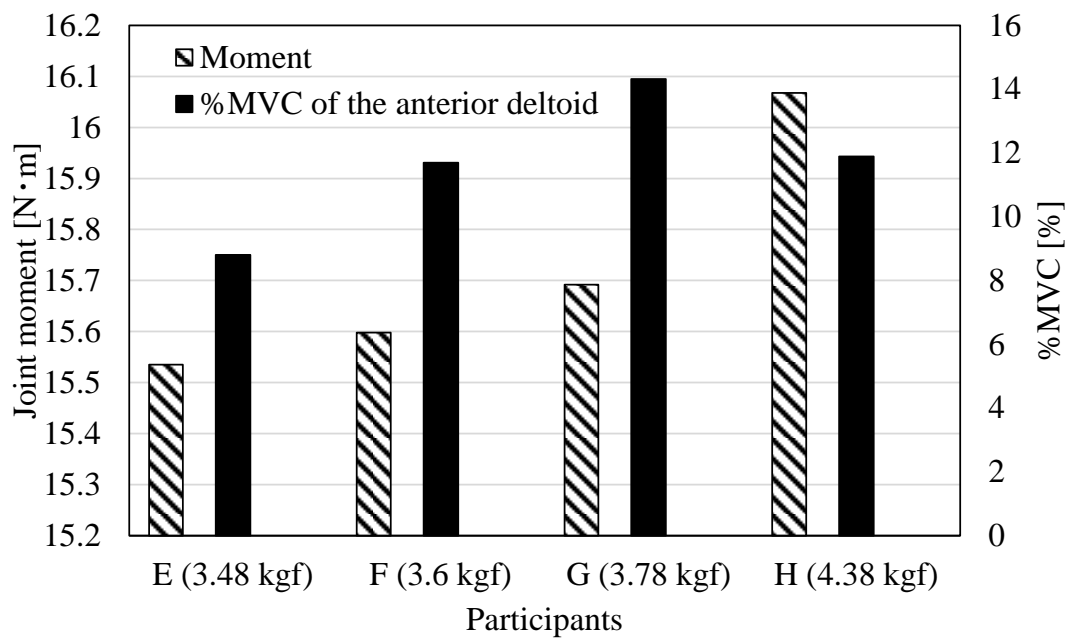


図 2-15 三角筋前部の%MVC と肩の関節モーメント

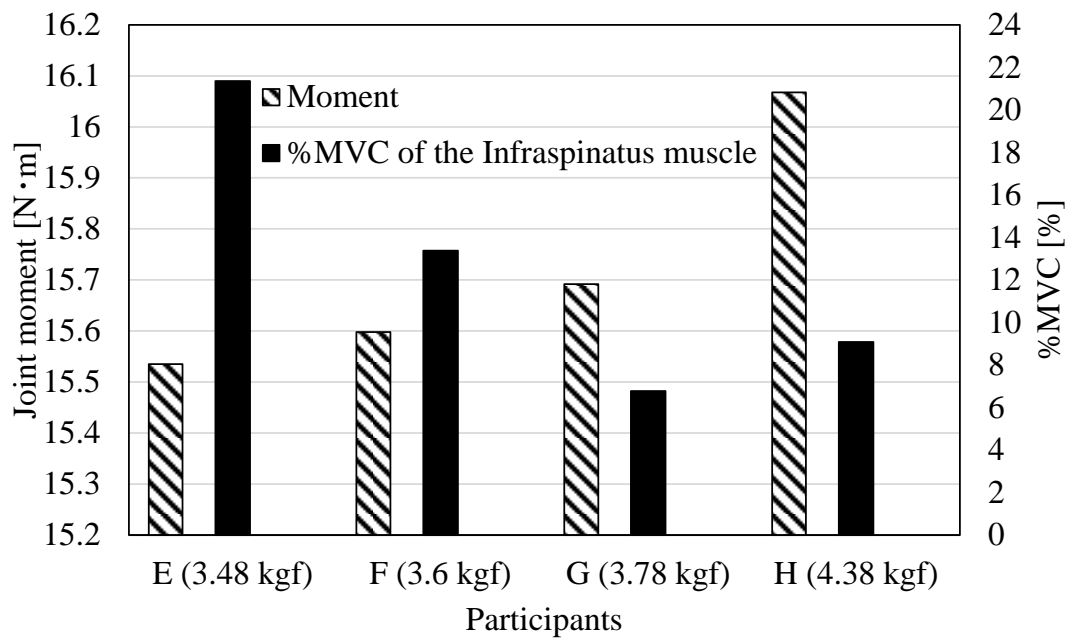


図 2-16 三角筋前部の%MVC と肩の関節モーメント

2. 4 第2章のまとめ

上肢の体格によって生じる操舵負担を評価するために、2次元の上肢負担モデルを構築した。また、このモデルを用いて肩の関節モーメントを算出することで、腕の前腕と上腕の長さ、重量が操舵負担に与える影響を明らかにした。次に体格が異なるドライバーの関節モーメントを算出し、解析と同条件で大胸筋上部の表面筋電位を測定することによってこれらを比較した。その結果関節モーメントと大胸筋上部の筋活動の傾向が一致し、体格によって操舵負担が異なることを明らかにした。しかし、棘下筋と三角筋前部は関節モーメントとの一致が得られなかった。次章において内旋、外旋、内転、外転を再現できる上肢負担モデルを構築する。

本章は以下の論文(Daigo Uchino, Takamasa Hirai, Shugo Arai, Keigo Ikeda, Taro Kato, Xiaojun Liu, Ayato Endo, Hideaki Kato and Takayoshi Narita, Active Steering Wheel System for Ultra-Compact Mobility Vehicles: Operability Evaluation with Steering Burden in Various Drivers, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 33, No. 5, (2021), pp. 1169-1177.)を基に構成されている

第3章

関節モーメントを 考慮した操舵動作時の 筋負担評価

3. 1 第3章の目的と検討方法

操舵反力トルクの操舵負担において主観評価による検討ではドライバーの感覚を評価することが可能である。これまでに平岡らは主観評価によって、操舵反力トルクが大きすぎると身体的負担を感じる、極端に小さいと車両が運転し難いという傾向にあることを明らかにした [3-1]。また、山田らは操舵反力トルクの絶対的な大きさに関して評価が異なったのは、性別や体格差に加え、好みや運転経験と言った後天的な要素の寄与が大きいためと推察している [3-2]。

上記研究によって、主観評価を用いることで操舵反力トルクによって生じる操舵負担の傾向を明らかにした。しかし主観評価は評価者それぞれの評価軸で感じた度合いを数値化するため、複数の評価者の数値が同一であったとしても、全く同程度の感覚であるかを担保することは非常に困難である。このため、ドライバー個人ごとの操舵負担を比較評価し、定量化することは出来ない。

本章では、予備実験として操舵負担に影響する筋と主観評価の関係を確認する。アンケートへの回答と表面筋電位の測定によって操舵反力トルクと操舵動作による操舵負担を明らかにする [3-3]。主観評価によって得られた操舵反力トルクによる操舵負担評価は回答者によって評価軸が異なるために、単純に評価することが難しい。前章において、肩関節モーメントによって、ドライバーの上肢の体格ごとの操舵負担を評価することが可能であることを明らかにした。加えて、肩関節モーメントは上肢の体格や運転姿勢によって異なり、肩関節モーメントが異なれば操舵負担は異なる。前章においてはステアリングホイールや座席の位置を固定して検討を行ったが、上肢の体格が異なった際に運転姿勢が異なってしまう。そのため、異なるドライバーが同じような運転姿勢で乗車したとしても肩関節モーメントの大きさが異なり、同じ操舵負担を再現することができない。また、同じ操舵負担を異なるドライバーで比較できなければ、操舵負担を定量的に比較評価することはできない。そこでドライバーごとに評価軸をそろえられるような定量的な手法を確立することを目的とする。本章ではおもりを用いた負荷実験において操舵時の関節モーメントをそろえることで異なるドライバー同士でも、肩関節モーメントで比較評価できる手法を検討する [3-4]。

3. 2 主観評価を用いた予備実験

3. 2. 1 主観評価による操舵負担評価

予備実験として、操舵反力トルクによる身体的・精神的負担の評価と筋活動の関連性を確認するために三角筋前部の表面筋電位による筋活動による身体的負担評価と図 3-1 に示すようなアンケートによる主観的評価を行った。実験協力者は 20 代の男性 10 名である。SBWS を搭載した実験車両に乗車してもらい、毎秒 90 度の速度でステアリングホイールを時計回りに切り込み、その後反時計回りに切り返す。その際に操舵負担感として評価することが出来る三角筋前部の表面筋電位を測定した [3-5] , [3-6] , [3-7] , [3-8]。表面筋電位を測定する際の電極の貼付位置を図 3-2 に示す。表面筋電位の測定と評価方法は 2 章と同様に行った。また、%MVC を算出するための MVC の測定方法を図 3-3 に示す。実験協力者は図の上方向に最大の力を上方向に 5 秒間発揮し、他者が実験協力者の腕が動かないように図の下方向に抑える。これを疲労が回復するように十分な休憩時間を各実験の間に 3 回行う。この時の表面筋電位の最大値を MVC として用いる。操舵反力トルクは従来の機械的な操舵システムを持つ車両において測定された最大の操舵反力トルクである $3.0 \text{ N}\cdot\text{m}$ を最大とし、0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, $3.0 \text{ N}\cdot\text{m}$ の 7 パターンを 3 回ずつ行う。これらは実験参加者に疲労を残さない負担度であることを事前に確認している。実験参加者に操舵反力トルクの重さを知覚させないために、7 つのパターンをランダムに並べ、点線で囲まれた部分は実験参加者に提示せずに行った。各操舵反力トルクの操舵実験を行った直後に実験協力者にはアンケートに回答するように教示した。

ハンドルの重さはどのくらいでしたか？

ステアリングホイールを切った時

操舵反力トルク	<input checked="" type="checkbox"/> 2.0 N·m	<input type="checkbox"/> 重い	<input type="checkbox"/> 適正	<input type="checkbox"/> 軽い
操舵反力トルク	<input type="checkbox"/> 0.5 N·m	<input type="checkbox"/> 重い	<input type="checkbox"/> 適正	<input type="checkbox"/> 軽い
操舵反力トルク	<input type="checkbox"/> 1.0 N·m	<input type="checkbox"/> 重い	<input type="checkbox"/> 適正	<input type="checkbox"/> 軽い
操舵反力トルク	<input type="checkbox"/> 1.5 N·m	<input type="checkbox"/> 重い	<input type="checkbox"/> 適正	<input type="checkbox"/> 軽い
操舵反力トルク	<input type="checkbox"/> 2.5 N·m	<input type="checkbox"/> 重い	<input type="checkbox"/> 適正	<input type="checkbox"/> 軽い
操舵反力トルク	<input type="checkbox"/> 3.0 N·m	<input type="checkbox"/> 重い	<input type="checkbox"/> 適正	<input type="checkbox"/> 軽い
操舵反力トルク	<input type="checkbox"/> 0.0 N·m	<input type="checkbox"/> 重い	<input type="checkbox"/> 適正	<input type="checkbox"/> 軽い

ステアリングホイールを切り戻した時

操舵反力トルク	<input checked="" type="checkbox"/> 2.0 N·m	<input type="checkbox"/> 重い	<input type="checkbox"/> 適正	<input type="checkbox"/> 軽い
操舵反力トルク	<input type="checkbox"/> 0.5 N·m	<input type="checkbox"/> 重い	<input type="checkbox"/> 適正	<input type="checkbox"/> 軽い
操舵反力トルク	<input type="checkbox"/> 1.0 N·m	<input type="checkbox"/> 重い	<input type="checkbox"/> 適正	<input type="checkbox"/> 軽い
操舵反力トルク	<input type="checkbox"/> 1.5 N·m	<input type="checkbox"/> 重い	<input type="checkbox"/> 適正	<input type="checkbox"/> 軽い
操舵反力トルク	<input type="checkbox"/> 2.5 N·m	<input type="checkbox"/> 重い	<input type="checkbox"/> 適正	<input type="checkbox"/> 軽い
操舵反力トルク	<input type="checkbox"/> 3.0 N·m	<input type="checkbox"/> 重い	<input type="checkbox"/> 適正	<input type="checkbox"/> 軽い
操舵反力トルク	<input type="checkbox"/> 0.0 N·m	<input type="checkbox"/> 重い	<input type="checkbox"/> 適正	<input type="checkbox"/> 軽い

図 3-1 主観評価のアンケート

自由使用可能な [3-3] の Fig. 2 より一部改変して転載

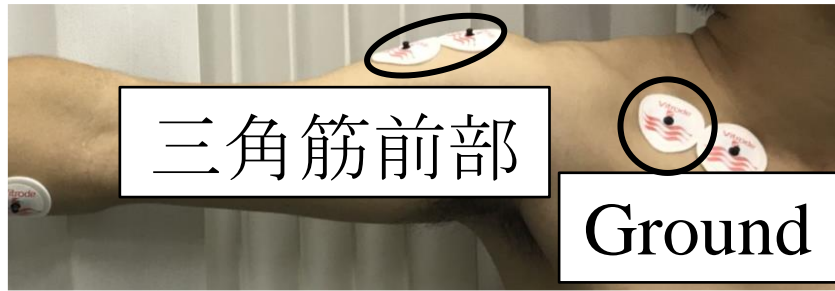


図 3-2 三角筋前部と電極の貼付位置

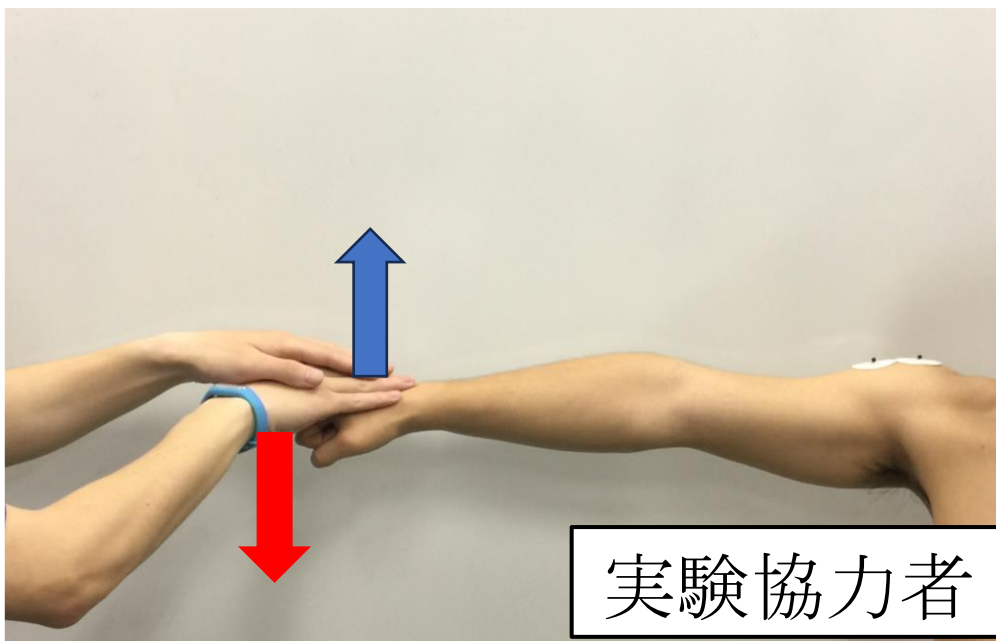


図 3-3 三角筋前部の MVC 測定方法

3. 2. 2 実験結果及び考察

図 3-4 と図 3-5 は、アンケートによる操舵反力トルクごとの回答者数を示したものである。図 3-4 のステアリングホイールを切りこんだ時の結果では、操舵反力トルクが $1.5\text{ N}\cdot\text{m}$ 以上で回答が分かれ、 $3.0\text{ N}\cdot\text{m}$ で重いと回答した人が最も多い。操舵反力トルクの増加に伴い、主観的な負担が大きくなることがわかった。一方、図 3-5 に示すように、ステアリングホイールを切り戻したときの操舵反力トルクが 0 , 0.5 , $1.5\text{ N}\cdot\text{m}$ のときに重いと回答した実験参加者がいた。 $2.0\text{ N}\cdot\text{m}$ では 8 人が「軽い」と答え、 $3.0\text{ N}\cdot\text{m}$ では 6 人が「軽い」と回答した。これはステアリングホイールを切り戻すときには操舵反力トルクが重いほど、操舵操作を補助する働きが強くなるためである。この傾向を確認するためには、筋負担を評価する必要がある。図 3-6 と図 3-7 に 1 人の実験協力者の %MVC の結果を示す。10 人の実験協力者で同じ傾向を示したため、1 人の結果を代表値として示した。図 3-6 では、操舵反力トルクの増加により %MVC による筋負担が増加しているが、図 3-7 では、操舵反力トルクの増加により筋負担が減少しており、主観評価による傾向と一致している。また、主観評価の結果からステアリングホイールを切ったときの操舵反力トルクによる増加傾向が顕著であり、筋負担との一致が確認できた。

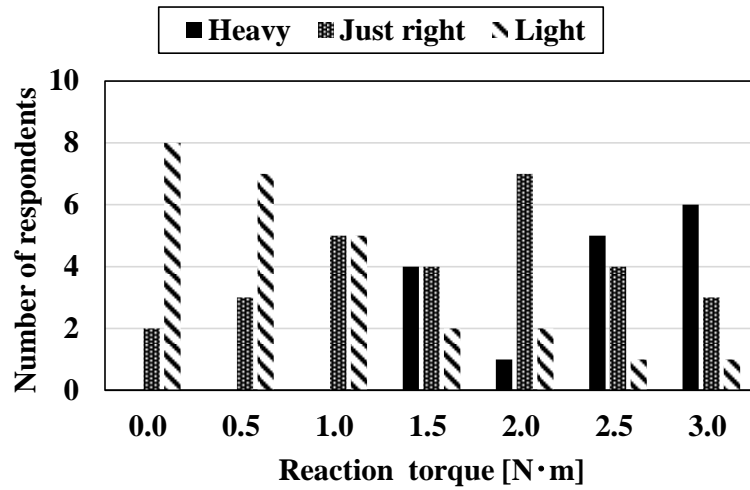


図 3-4 ステアリングホイールを切り込んだ時の主観評価
自由使用可能な [3-3] の Fig. 3 より一部改変して転載

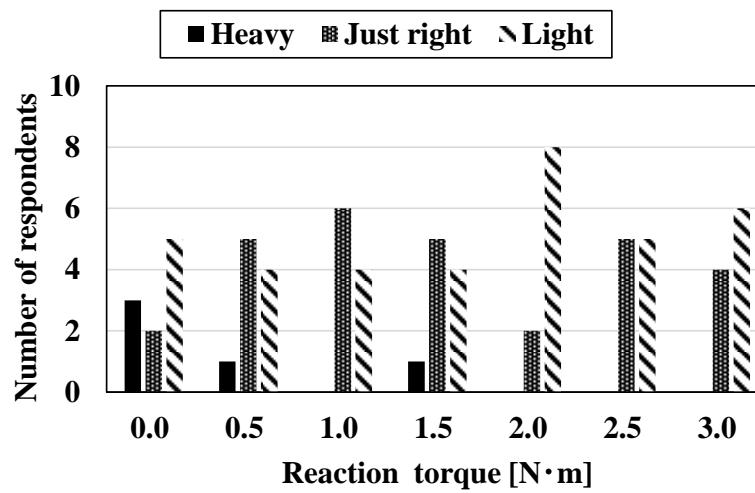


図 3-5 ステアリングホイールを切り戻した時の主観評価
自由使用可能な [3-3] の Fig. 3 より一部改変して転載

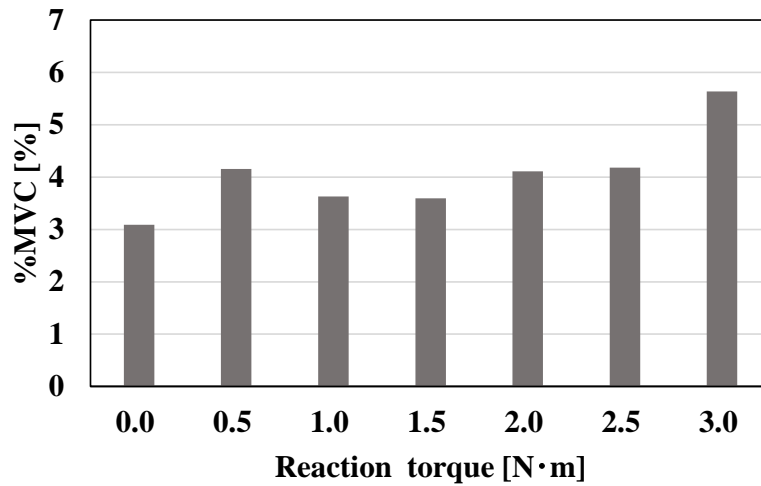


図 3-6 ステアリングホイールを切り戻した時の%MVC
自由使用可能な [3-3] の Fig. 4 より一部改変して転載

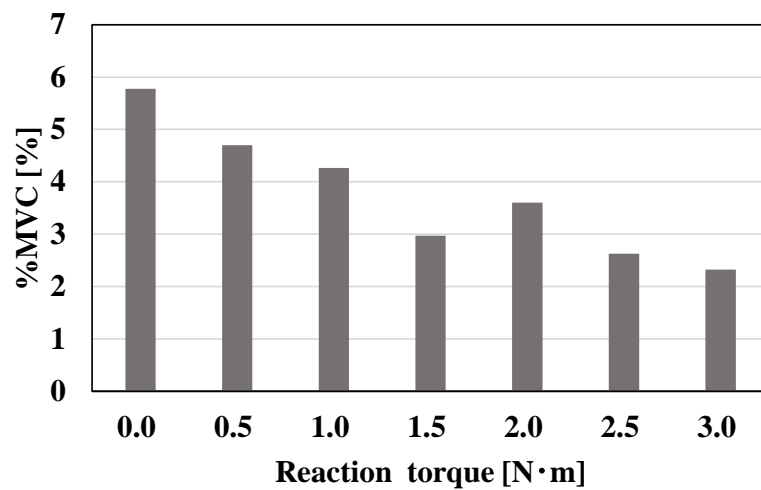


図 3-7 ステアリングホイールを切り戻した時の%MVC
自由使用可能な [3-3] の Fig. 4 より一部改変して転載

3. 3 負荷実験を用いた操舵負担の定量化

3. 3. 1 3次元の上肢負担モデルの構築

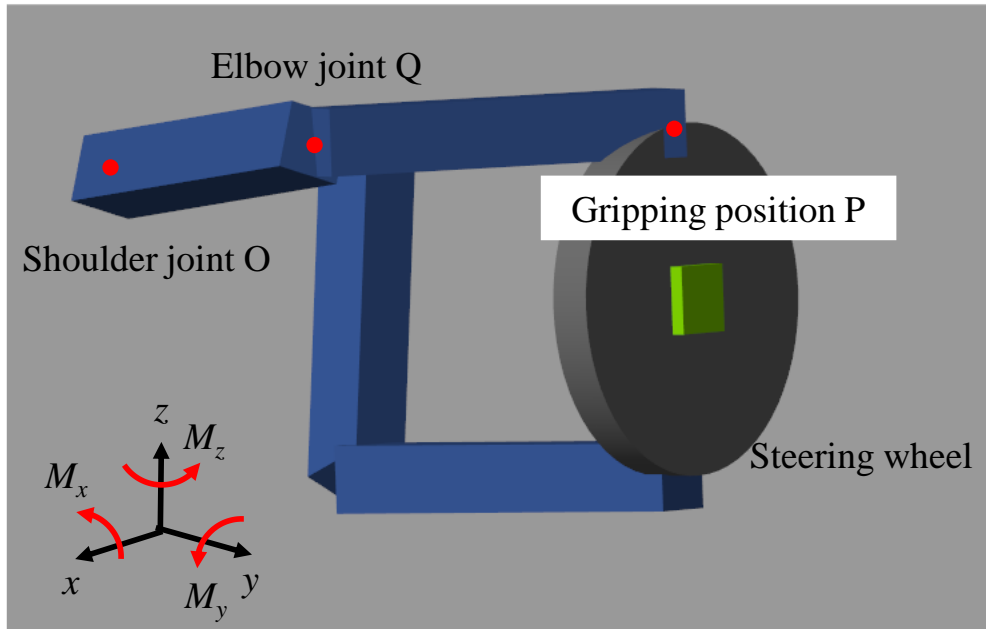
乗員の上肢負担モデルを構築し、関節モーメントから負担の評価を行った。Mathworks 社製の解析ソフトである Simscape を用いてドライバーの上肢の体格を反映し、図 3-8 に示すような操舵動作を再現する上肢負担モデルを作成した。x 軸は車両の直進方向に対して直交する方向、y 軸は車両の進行方向、z 軸は車両の鉛直方向と定義した。肩関節を O、肘関節を Q、ステアリングホイールを把持した位置を P とし、肩関節 O、ステアリングホイールの把持位置 P にボールジョイント、肘関節 Q に回転ジョイントを用いた。上肢には前腕と上腕の重心となる R と S にそれぞれの自重が加わり、ステアリングホイールに生じる操舵反トルクによる操舵反力が把持位置 P に加わった際の送り手側の肩関節 O に生じる x, y, z 軸まわりのモーメント M_x , M_y , M_z を式(3-1)~(3-3)によって算出した。肩関節 O に生じるモーメント M_x , M_y , M_z は図 3-7 に示すように、上肢負担モデルの肩関節 O の x, y, z 軸のまわりにそれぞれ生じているモーメントである。これらはそれぞれ x 軸、y 軸、z 軸周りに発生する肩関節モーメントを示している。

$$M_x = y_P \cdot F_z + y_R \cdot m_1 g + y_S \cdot m_2 g \quad (3-1)$$

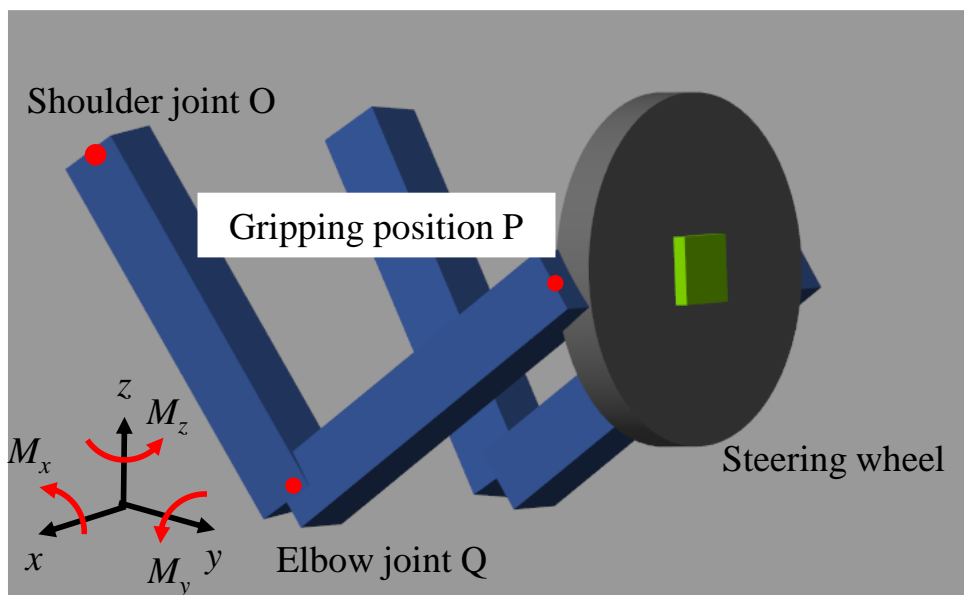
$$M_y = z_R \cdot F_x - y_P \cdot F_z - x_R \cdot m_1 g - y_R \cdot m_2 g \quad (3-2)$$

$$M_z = -y_P \cdot F_x \quad (3-3)$$

ただし、 x_P : ステアリングホイール把持位置の x 座標 [m], y_P : ステアリングホイール把持位置の y 座標 [m], z_P : ステアリングホイール把持位置の z 座標 [m], x_R : 上腕の重心位置の x 座標 [m], y_R : 上腕の重心位置の y 座標 [m], z_R : 上腕の重心位置の z 座標 [m], x_S : 前腕の重心位置の x 座標 [m], y_S : 前腕の重心位置の y 座標 [m], z_S : 前腕の重心位置の z 座標 [m], F_x : 操舵反力トルクの x 軸成分 [N], F_z : 操舵反力トルクの z 軸成分 [N], m_1 : 上腕の質量 [kg], m_2 : 前腕の質量 [kg], g : 重力加速度 [m/s^2]である。



(a) 操舵角度 0 deg.



(a) 操舵角度 90 deg.

図 3-8 3次元の上肢負担モデル

3. 3. 2 負荷実験と操舵実験による操舵負担の比較

操舵動作において、複数のドライバーが同じ操舵反力トルクにおいて操舵を行ったとしても上肢の体格（腕の長さや重量）や運転姿勢が異なる。運転姿勢が異なれば肩や肘関節の角度が異なり、腕の動かし方は全く異なるために、肉体的負担が異なる。そのため、同じ操舵反力トルクでも肉体的負担は人によって異なる。これは上肢の体格（腕の長さや重量）によって、肩関節に発生している負荷が異なっているためであり、この発生している負荷に対して操舵負担を評価する方法が必要である。そこで、異なるドライバー間で同じ肉体的負担量を再現できる評価方法の検討を行う。

はじめに、0, 1, 2, 3, 4, 5 N・m の操舵反力トルクとして、操舵実験を行った。この時実験協力者の三角筋前部の表面筋電位を測定し、筋活動の評価を行うように教示した。この時操舵動作はステアリングホイールの操舵角度 0 deg. から 90 deg. まで、45 deg./sec で 3 回ずつ行った。操舵実験を 3 回行い、測定した表面筋電位から %MVC を算出し、波形を平均化した。この時刻歴における最大の %MVC を、負荷実験で第 2 章と同様の方法で測定した %MVC と比較する。

つぎに、3 次元の上肢モデルを用いて、操舵実験の際のドライバーの上肢の体格と運転姿勢を再現する。その後実験条件と同じ操舵条件における肩関節モーメント M_x を算出した。算出された最大の M_x と同じ肩関節モーメントを図 3-8 に示すような上肢を水平に伸ばした状態でおもりを持ち、肩部にモーメントを加える負荷実験において再現する。この動作は三角筋前部の MVC の測定と同じ動作であり、負荷をほとんど三角筋前部にかけることができる。このときおもりの重量を調節することによって、操舵時の最大の肩関節モーメント M_x と同様の肩関節モーメントを再現する。負荷実験における肩関節モーメント M_x の算出式を式(3-4)に示す。この時 m_1 は上腕の質量 [kg]、 m_2 は前腕の質量[kg]、 F はおもりによって生じる力 [N]、 g は重力加速度 [m/s²]、 x_P は肩関節 O からおもりを持つ位置までの距離 [m]、 x_S と x_R は肩関節 O から前腕と上腕の重心位置までの距離 [m]であり、上腕の長さ（肩関節 O から肘関節まで） L_1 [m]と前腕の長さ（肘関節から x_P まで） L_2 [m]を用いて式(3-5), (3-6)から求められる。

$$M_x = x_P \cdot F + x_R \cdot m_1 g + x_S \cdot m_2 g \quad (3-4)$$

$$x_S = 0.47 \cdot L_1 \quad (3-5)$$

$$x_R = 0.43 \cdot L_2 \quad (3-6)$$

この時、0.47 と 0.43 は先行研究 [1-21] により明らかにされている前腕と上腕の長さに対する重心位置の割合である。

負荷実験は、図 3-9 に示すように、操舵時に生じた関節モーメントを再現できるおもりを保持したまま、肩と腕を 90 deg. で 5 秒間保持するように実験協力者に教示した。

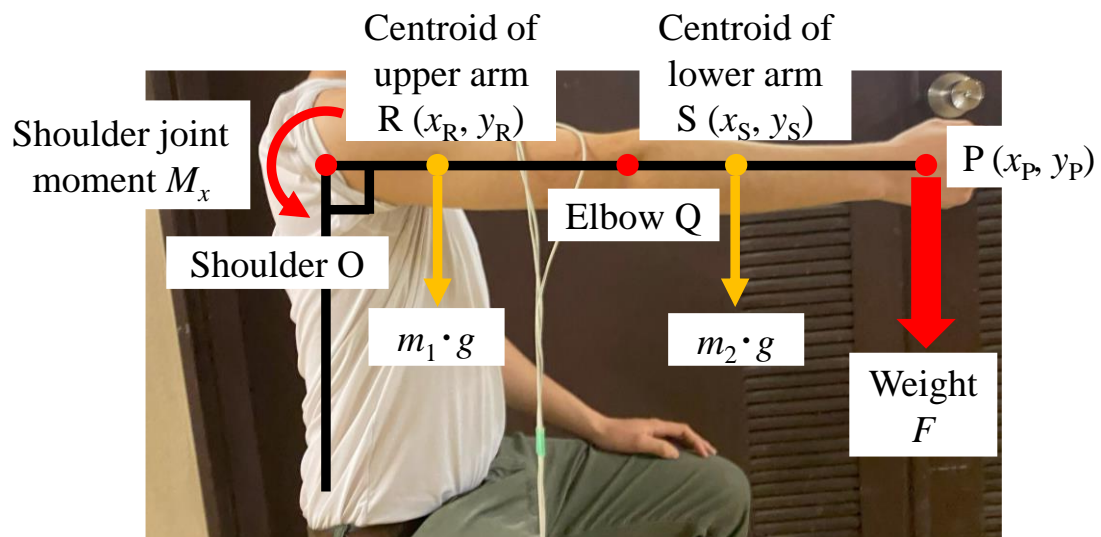


図 3-9 負荷実験の様子

3. 3. 3 実験結果および考察

負荷実験と操舵実験による%MVCの測定結果を図3-10に示す。負荷実験と操舵実験による%MVCには $0,5\text{ N}\cdot\text{m}$ で10%程度の差が生じたが、 $1, 2, 3, 4\text{ N}\cdot\text{m}$ において、両実験によって生じた%MVCが3%以内で一致した。

上肢負担モデルを用いて算出した操舵時の肩の関節モーメントで負荷実験における操舵負担の再現を行い、両実験において三角筋前部に生じる筋活動を測定した結果、操舵反力トルクが異なっても、筋活動量が一致した。三角筋前部の筋活動量は操舵負担感と傾向が一致していることが先行研究によって明らかにされている [2-6]。そのため、ドライバーの操舵負担を負荷実験において評価できることが分かった。

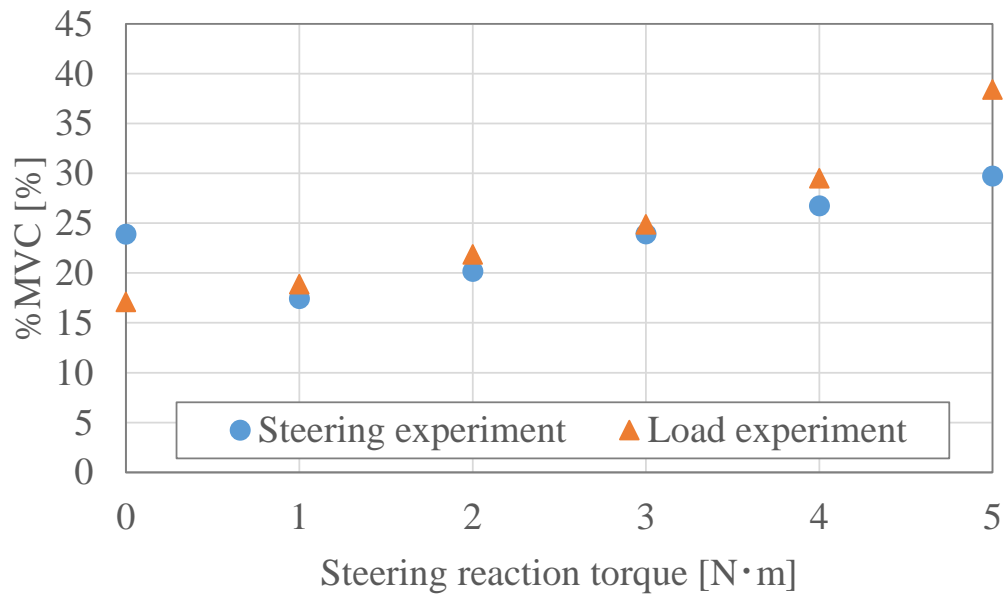


図 3-10 操舵実験と負荷実験の%MVC の測定結果

3. 4 従来の操舵システムと SBWS の操舵反力トルクの比較及び検討

3. 4. 1 走行実験における操舵動作の負担度の確認

これまでに行ってきた静的な状態における操舵実験のため、車両の走行環境における操舵負担とどの程度異なるのか明らかになっていない。そこで静的な操舵実験と実際に運転を行う車両の走行において同様の操舵負担が得られるのかどうか検討を行う。

従来の機械的な操舵機構を持つ車両による走行実験と SBWS を搭載した車両による静的な操舵実験の負担度を比較するために、図 3-11 に示すような 2 種類の走行コースを設けた。このコースはそれぞれ左操舵と右操舵で走行を開始し、互いに左右非対称なコースによって実験を行うことで操舵負担を検討する。従来の機械的な操舵機構を持つ車両には COMS を用いて、時速 5 km/h の一定速度でコースを走行するよう実験協力者に教示した。5 km/h の走行では最大 2.8 N・m の操舵反力トルクが測定された。そこで SBWS を用いた実験装置においては 2.8 N・m の一定の操舵反力トルクとし、5 km/h で走行コースを走行した時と同じタイミングで操舵するように実験協力者に教示した。2 つの実験において、三角筋前部に生じる筋活動を測定し、%MVC によって操舵負担を評価する。表面筋電位の測定方法は 2 章と同様、MVC の測定は 3. 3. 2 項と同様に行った。

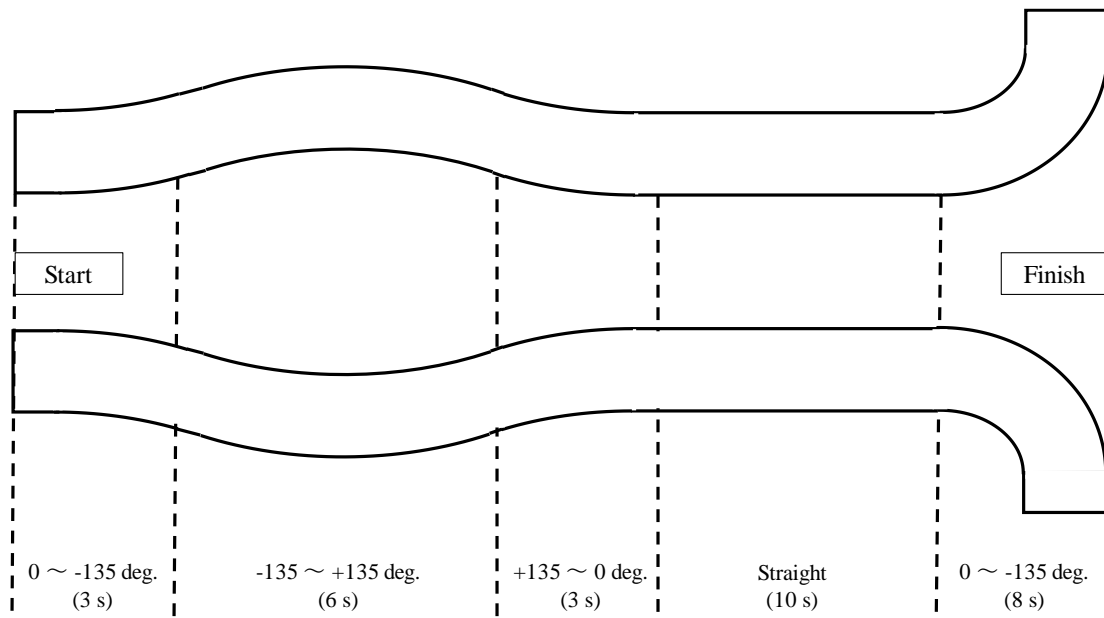


図 3-11 走行コース

自由使用可能な [3-4] の Fig. 8 より一部改変して転載

3. 4. 2 実験結果及び考察

図 3-12 と図 3-13 に 3 人の実験協力者による三角筋前部の%MVC の平均値の結果を示す。この図において、右方向が正の値を、左方向が負の値を示している。図 3-12 に示すように、ドライバーがステアリングホイールを右に切ると、左腕が上がり、左側の三角筋前部の%MVC が増加する。このとき右腕が下がり、%MVC はいずれも約 5%のままである。しかし、6~9 秒の間にステアリングホイールを戻すと、右側の%MVC が増加し、左腕の%MVC が減少する。9~12 秒の間にステアリングホイールを-135 deg. (左方向) から 0 deg.に戻すと、左腕の%MVC は約 10%に増加し、右腕の%MVC は約 5%に減少するが、ステアリングホイールを 0 deg.に維持すると、両腕どちらの値も変化を示さない。22 秒に右にステアリングホイールを切ると左腕の%MVC が増加し、24 秒から走行終了までステアリングホイールの操舵角度を 135 deg.に保持し、%MVC は約 10%に減少した。この走行コースにおいて、走行実験と静的な SBWS の操舵実験の両方で同じパターンの%MVC が得られた。また、図 3-13 に示すように、コースを逆方向に走行した場合も同様の結果が得られた。

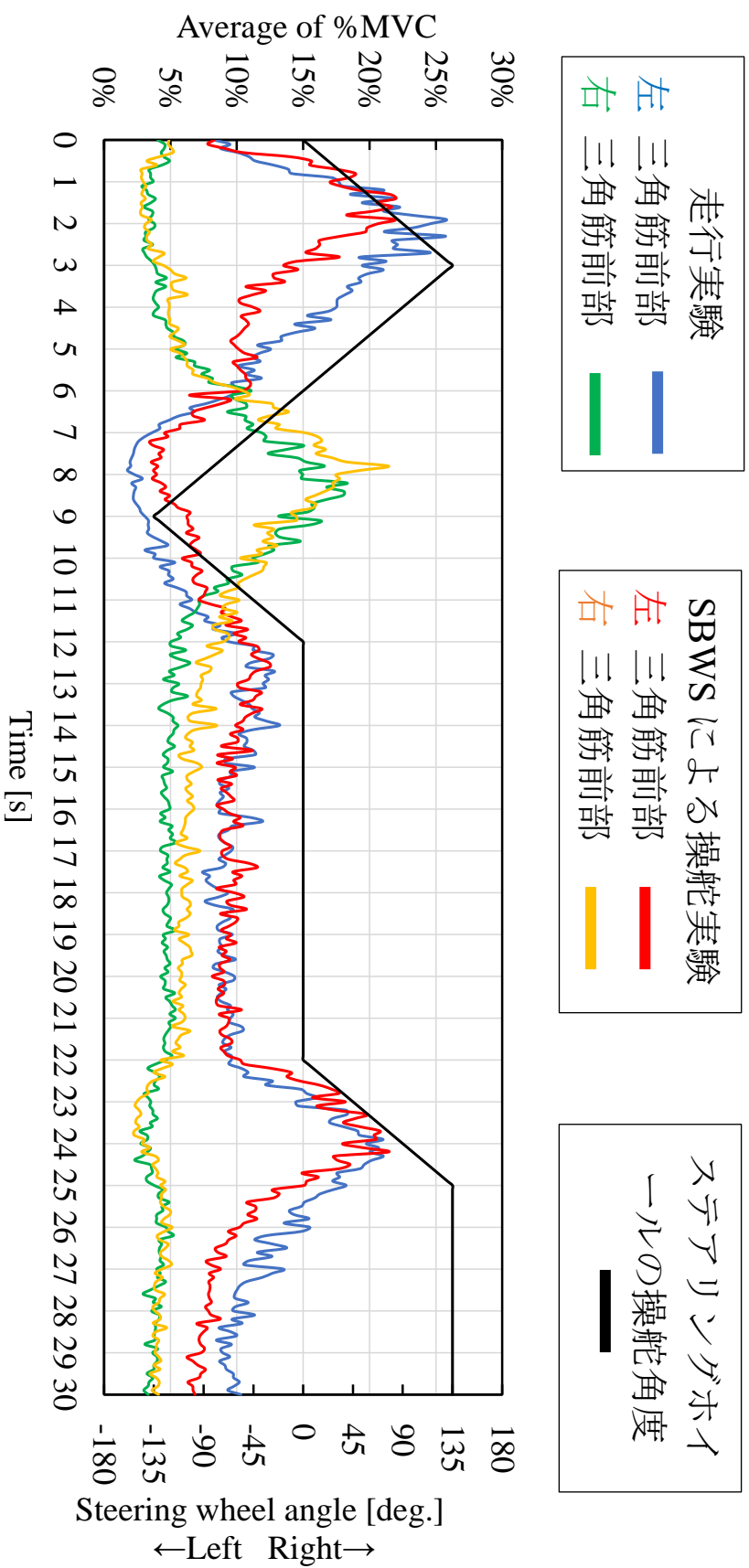


図 3-12 走行コースによる%MVC (右スタート)
自由使用可能な [3-4] の Fig. 11 より一部改変して転載

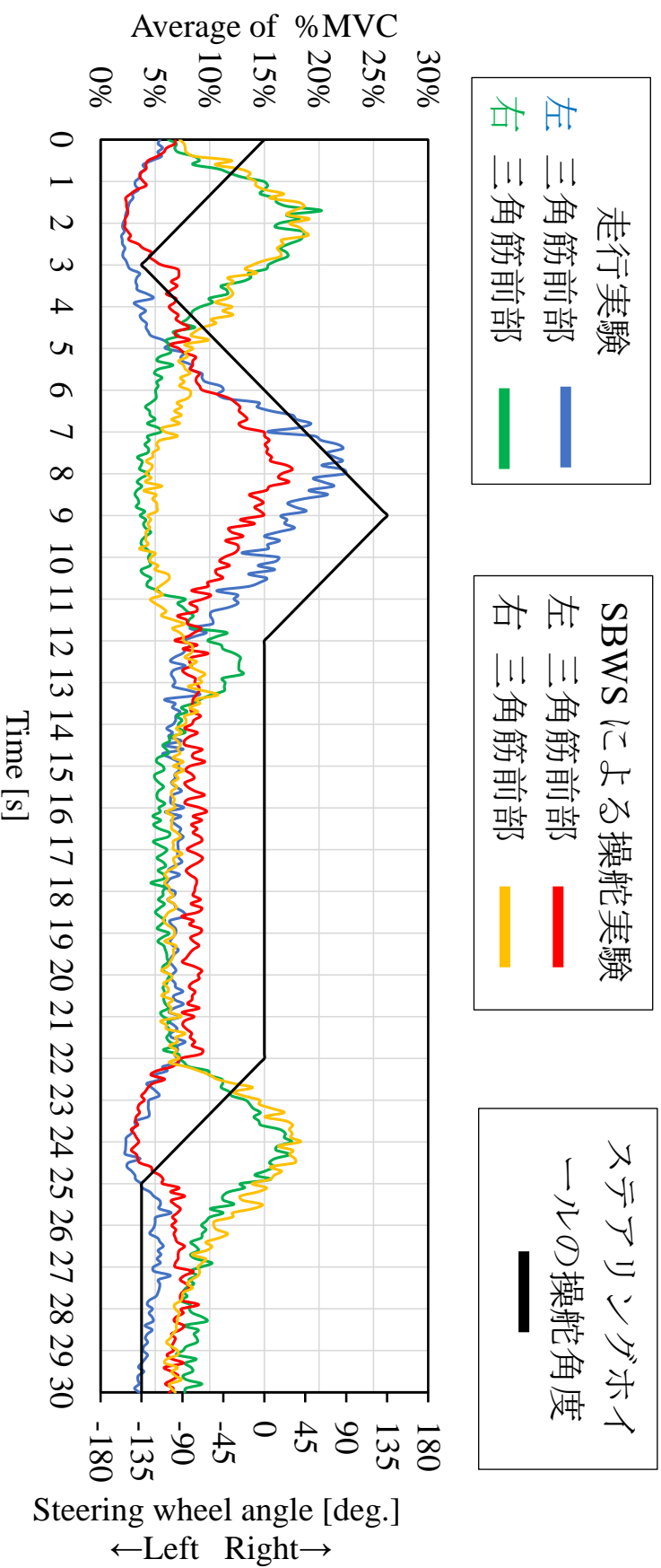


図 3-13 走行コースによる%MVC (右スタート)
 自由使用可能な [3-4] の Fig. 11 より一部改変して転載

3. 5 第3章のまとめ

操舵反力トルクによって生じる操舵負担をドライバーの主観評価と筋活動を比較することによって、操舵反力トルクによって生じる操舵負担と操舵負担感の関係を明らかにした。

3次元の上肢負担モデルを構築し、操舵時の肩関節モーメントを算出し、同じ肩関節モーメントを負荷実験によって再現した。操舵時と負荷実験において三角筋前部の筋活動量を測定した結果、筋活動量が一致した。三角筋前部の筋活動量は操舵負担感と傾向が一致していることから、負荷実験によって操舵負担を評価することができることを明らかにした。

最後に、これまでに行ってきた静的な操舵実験と、従来の機械的な操舵機構を持つ実験車両において同じ走行コースにおける操舵負担の比較を行った。その結果、両実験において操舵負担が一致したため、静的な操舵実験においても走行による操舵動作の負担度を評価できることが分かった。加えて、本章で行った負荷実験による操舵負担評価は従来の機械的な操舵システムにおいても有効であることを明らかにした。

本章3.2～3.3節は以下の論文(Daigo Uchino, Takamasa Hirai, Kazuki Ogawa, Keigo Ikeda, Taro Kato, Ayato Endo, Hideaki Kato and Takayoshi Narita, Effect of steering reaction torque of ultra-compact electric vehicle on steering burden for active steering wheel system, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 71, No. S1, (2023), pp. S363-S371.) を基に構成されている。また、本章3.4節は(Daigo Uchino, Xiaojun Liu, Hideaki Kato and Takayoshi Narita, Development of a driving assist system for ultra-compact electric vehicles using a steer-by-wire system: Fundamental consideration of muscle burden and evaluation by a continuous steering operation, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 64, No. 1-4, (2020), pp. 1111-1118.) を基に構成されている。

第4章

上肢の体格に基づく
関節パワーを用いた
適切な運転姿勢の評価

4. 1 第4章の目的と検討方法

本章はドライバーの上肢の体格（腕の長さや重量）に基づき、適切な運転姿勢を明らかにするために、関節パワーを用いた操舵操作における負担評価手法を構築することを目的とする。

運転姿勢が操舵負担に及ぼす影響に関する研究は多いが [4-1], [4-2], [4-3], [4-4], [4-5] 人間の平均的な体格から統計学的に運転姿勢を検討したものであり、ひとり一人の体格から最適化された評価方法はない。また、SBWS を搭載した車両は従来の車両と異なり、ステアリングホイールが前輪と機械的に連結されていないため、ステアリングホイールの位置調整に制約がない。そのためドライバーの上肢の体格ごとに運転姿勢を提供できる。ドライバーの上肢の体格はまず、簡単に測定可能な腕の長さや体重で大きく分類できるが、前腕と上腕の長さの比率や重量は人によって全く異なり、適切なステアリングホイールの位置も異なる。そこでドライバーの運転姿勢に着目し、表面筋電位の測定によって運転姿勢が異なる際の筋負担の比較を行った。

前腕と上腕の長さの比率や重量が人によって異なる場合、最も力を発揮しやすい適切な伸長や収縮量（関節角度の変化量）が異なることが知られている [4-3]。そのため、ドライバーの上肢の体格によって、ドライバーが力を発揮しやすい運転姿勢は異なる。加えて、関節パワー、関節モーメント、関節の角度を用いることで人の筋の発揮しやすさを評価することができる。第3章では3次元の上肢負担モデルと負荷実験を用いることでドライバーごとの操舵負担を定量的に比較検討が可能になった。そこで本章では前章で構築した3次元の上肢負担モデルを用いて関節パワー、関節モーメント、関節の角度を算出し、適切な運転姿勢を評価する方法を構築した [4-6]。

4. 2 運転姿勢による表面筋電位を用いた操舵負担評価

4. 2. 1 運転姿勢の変化が操舵負担に及ぼす影響の検討

予備実験として、ドライバーの運転姿勢の変化が操舵負担に及ぼす影響を明らかにする。そこで、操舵負担を評価できる三角筋前部の表面筋電位 [4-7], [4-8] を測定し、スライド量の変化により運転姿勢が変化したときの操舵負担の傾向を検討する。スライド量は図 4-1 に示すようにドライバーの把持位置から肩関節までの水平方向の距離とした。実験条件は図 4-2 に示すように実験協力者の上肢の体格（腕の長さや重量）を考慮し、スライド量 l を 0.500, 0.550, 0.600 m とし、把持位置から肩関節までの鉛直方向の距離を 0.100 m とした運転姿勢に設定した。COMS の走行時に測定された操舵反力トルク $2.8 \text{ N}\cdot\text{m}$ に設定し、ステアリングホイールを 0 deg. から 135 deg. まで 45 deg./sec. で操舵を行うように実験協力者に教示した。異なるスライド量の際に、三角筋前部の表面筋電位の測定を行った。三角筋前部の表面筋電位の測定方法は 2 章と同様に行い、三角筋前部の MVC の測定は 3 章と同様に行った。

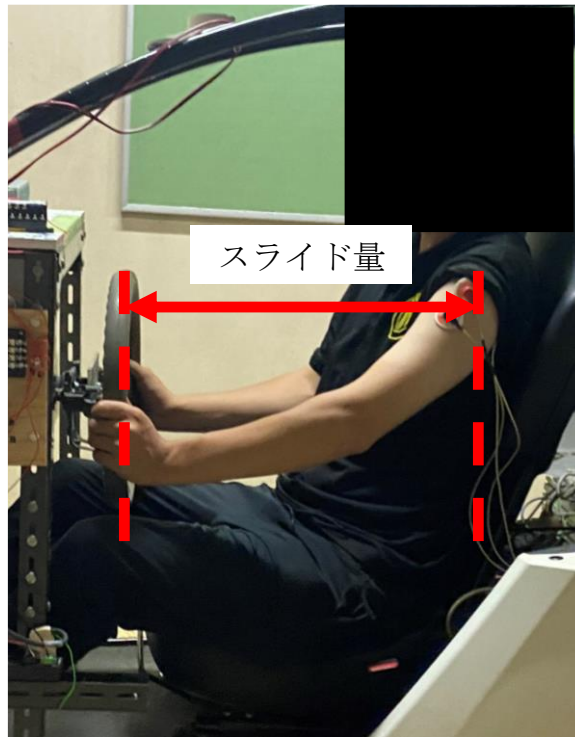


図 4-1 スライド量の定義

自由使用可能な [4-6] の Fig. 8 より一部改変して転載

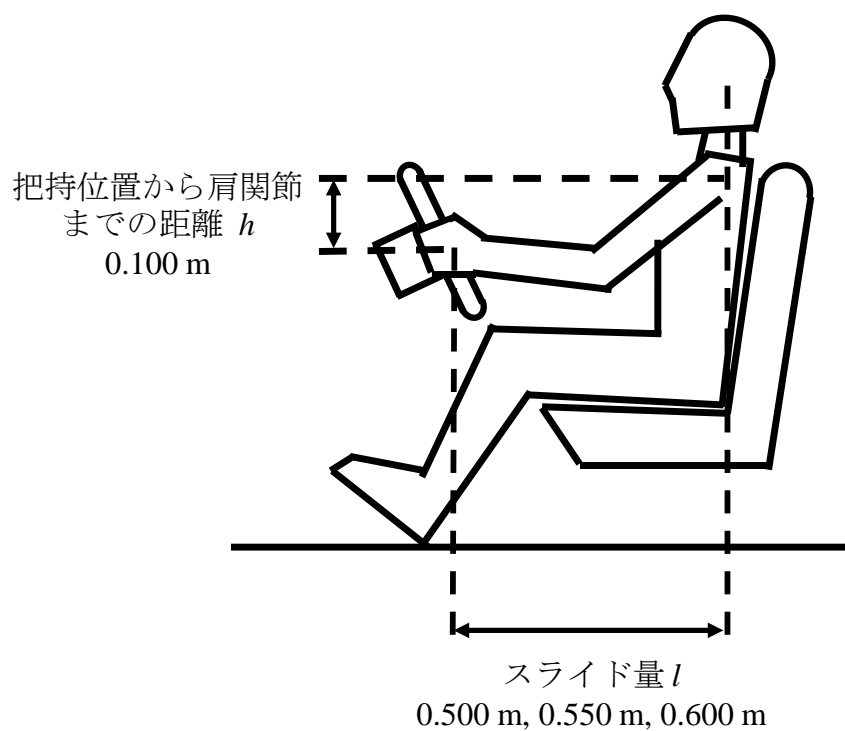


図 4-2 スライド量を変化させた際の実験条件
自由使用可能な [4-6] の Fig. 6 より一部改変して転載

4. 2. 2 運転姿勢を変化させた際の筋活動の測定結果及び考察

操舵動作時の%MVCの最大値をスライド量ごとに図4-3に示す。%MVCはスライド量が0.550mのときに最も減少し、他の2つのスライド調整量では7%程度となり、最も減少した値との差は3%であった。したがって、スライド量が小さい場合、大きい場合、もそれぞれステアリングの負担が増加することがわかった。

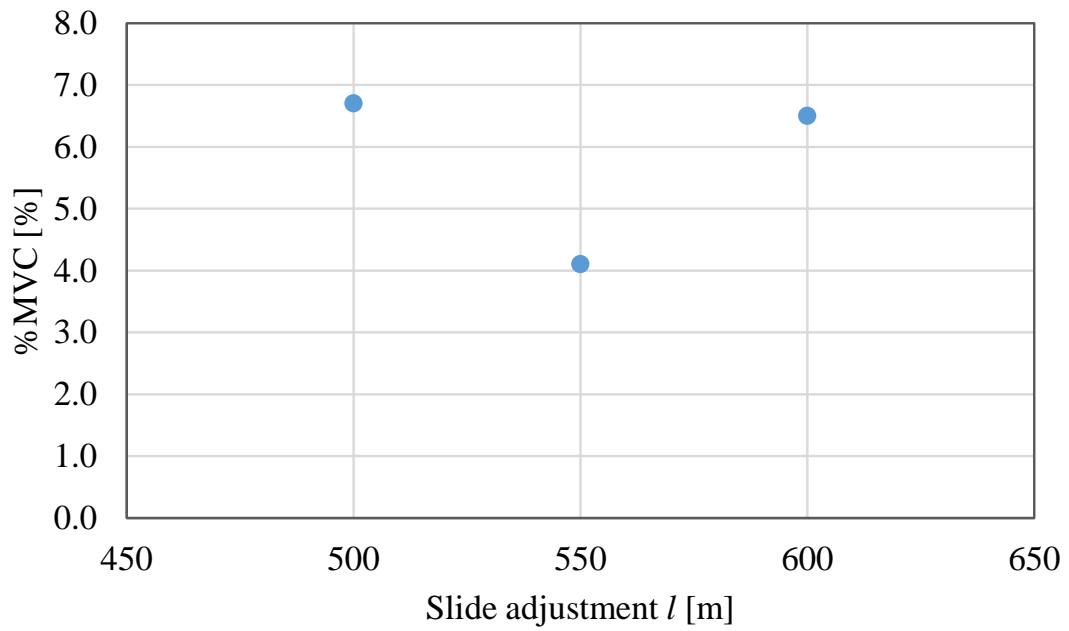


図 4-3 スライド量ごとの%MVC
自由使用可能な [4-6] の Fig. 7 より転載

4. 3 関節パワーを用いた運転姿勢の評価

4. 3. 1 関節モーメントによる運転姿勢の解析

前節において、スライド量が小さい場合、大きい場合も操舵負担が増加することを実験的に示した。そこで、肩関節モーメントの算出によって運転姿勢の変化による操舵負担を評価する。操舵負担はステアリングホイールの操舵方向と反対側（送り手側）の肩関節の屈曲方向の筋負担を評価することができる [4-7], [4-8]。肩関節の屈曲方向の関節モーメントは前章と同様に算出した。

本章の解析では、図 4-4 に示すように、スライド量 l を 0.305 m から 0.605 m に変更したことによる運転姿勢の変化から、肩関節への負担を評価する。操舵反力トルクは COMS の最大の操舵反力トルクである $2.8 \text{ N}\cdot\text{m}$ とした。操舵動作はステアリングホイールを 0 deg. から 90 deg. まで操舵し、操舵動作を再現した。解析に用いた 21 歳男性の腕の測定値を表 4-1 に示す。

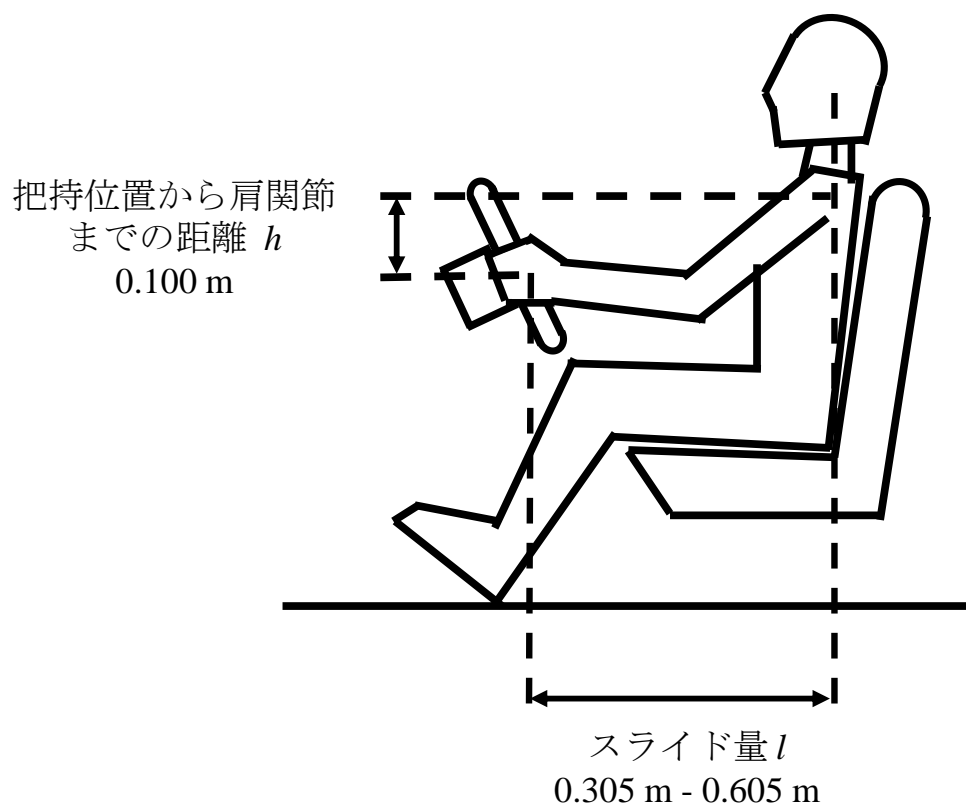


図 4-4 スライド量を変化させた際の解析条件
自由使用可能な [4-6] の Fig. 10 より一部改変して転載

表 4-1 実験協力者の上肢の体格
自由使用可能な [4-6] の Table. 1 より一部改変して転載

上肢の体格	値
上腕の質量 m_1	1.80 kg
前腕の質量 m_2	1.80 kg
上腕の長さ L_1	0.30 m
前腕の長さ L_2	0.26 m

4. 3. 2 関節モーメントによる解析結果および考察

スライド量 l [m]ごとに算出した関節モーメントを図 4-5 に示す。この解析における肩関節に生じる関節モーメントは、ステアリングホイールの操舵角度の増加に伴い減少している。これは、屈曲方向の肩関節モーメントのみであり、操舵角度が増加すると操舵反力トルクの屈曲方向の成分が減少するためである。どの操舵角度においても、スライド量が増加すれば、肩関節から上腕と前腕の重心までのモーメントアームが長くなり、肩関節モーメントが増加、操舵負担が大きくなる結果が明らかになった。つまりスライド量が減少するほど操舵負担が小さいと評価することができる。しかし、最もスライド量が小さい場合においては窮屈な運転姿勢になってしまう。加えて、4. 2. 2項の実験で得られた結果ではスライド量が小さい場合においても操舵負担が増加してしまうことが得られており、運転姿勢の評価において肩関節モーメントの評価のみでは負担を評価できていないといえる。

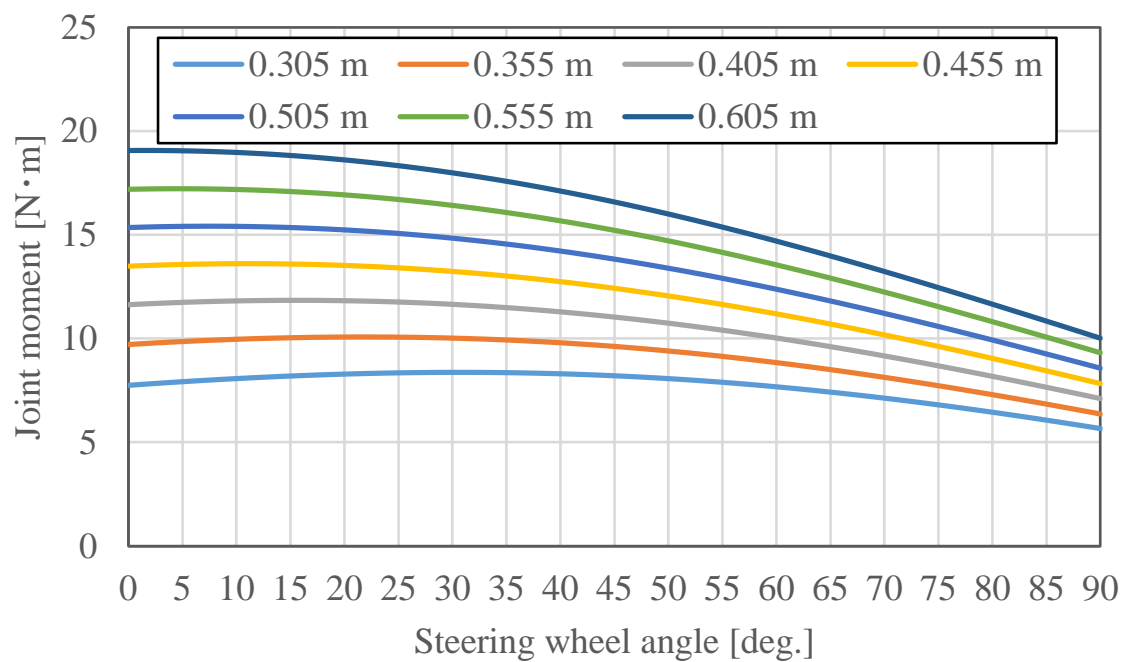


図 4-5 スライド量ごとの肩関節モーメント
自由使用可能な [4-6] の Fig. 11 より転載

4. 3. 3 関節角度の変化量による運転姿勢の解析

関節モーメントのみでは、運転姿勢を評価することができなかつたため、上肢負担モデルを用いて肩関節角度を算出した。本論文では、ステアリングホイールの操舵角度 1 deg.ごとの肩関節角度 $\Delta\alpha$ を算出した。解析条件は4. 3. 1項の関節モーメントの算出と同様に行い、ドライバーの上肢の体格（腕の長さと重量）も同様に設定した。

4. 3. 4 関節角度の変化量による解析結果および考察

図 4-6 にスライド量ごとの肩関節角度 $\Delta\alpha$ を示す。この肩関節角度 $\Delta\alpha$ は屈曲方向の関節角度であるため、操舵量の増加に伴い肩関節角度が減少した。また、最大の操舵角度が 90 deg. に制限されているため、 $\Delta\alpha$ はすべての l において 90 deg. で 0 となる。 $\Delta\alpha$ はスライド量が最小の 0.305 m で最大となり、スライド量が大きくなるにつれて減少した。また、 $\Delta\alpha$ は 0.605 m で急激に減少したが、操舵角 55 deg. からの $\Delta\alpha$ は 0.555 m とほぼ同じであった。 $\Delta\alpha$ は 0.350 m から 0.505 m までは操舵角度 25 deg. でピークに達したが、0.555 m から 0.605 m までは操舵角度のピークが増加した。加えて、操舵角度の増加に伴い、スライド量ごとの $\Delta\alpha$ の差はほとんどなくなった。

これらの結果から、スライド量が小さくなるほど肩関節角度の変化量 $\Delta\alpha$ が大きくなり、操舵時に肩関節の動作量が増加することで、操舵負担が増加するものと考えられる。一方で、スライド量が最大の時に操舵負担が小さいことが示されているが、4. 3. 2 項で明らかにした通り、スライド量が最大の 0.605 m の時は肩関節モーメントが最大であり、肩に負担が大きい状態である。以上の結果化から、関節角度の変化量のみでは運転姿勢の負担を十分に評価できていないといえる。

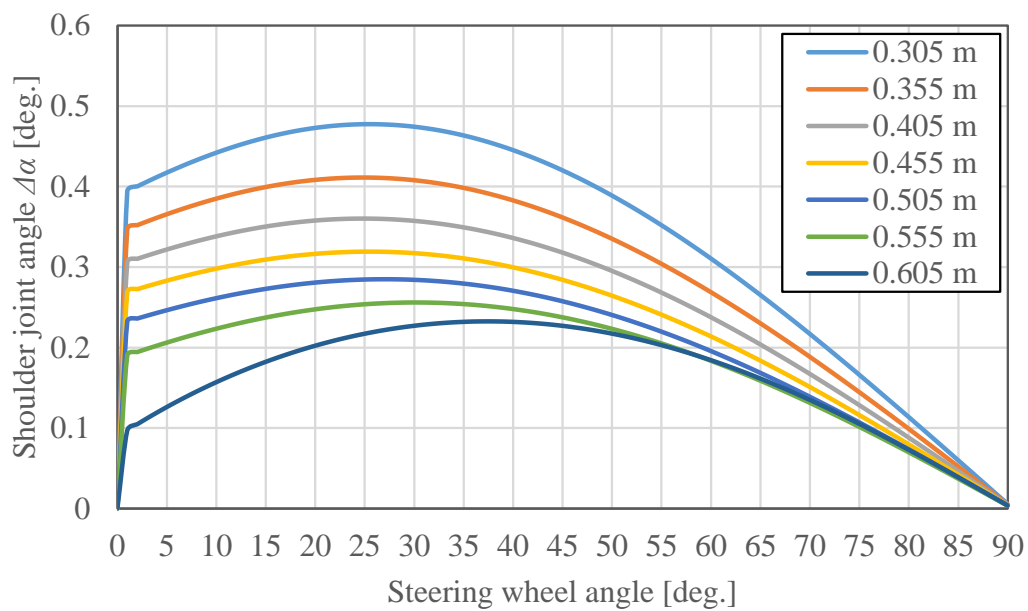


図 4-6 スライド量ごとの肩関節角度の変化量
自由使用可能な [4-6] の Fig. 12 より転載

4. 3. 5 関節パワーを用いた運転姿勢の解析

肩に生じる関節モーメントと関節角度の変化量を評価することによって、スライド量が大きすぎても小さすぎてもドライバーの操舵負担が最も軽減される位置を推定することは困難である。また、ステアリングホイールの操舵角速度は必ずしも一定ではないため、操舵角速度によっても筋力発揮量が異なることが予想される。そこで人の動作解析の評価に用いる肩関節パワーを算出した。関節パワーは単位時間あたりの仕事量を表し、およそその筋の仕事率を推定し、筋の収縮様式を示すことができる [4-9]。関節パワー P [W]は、式(4-1)のように関節角速度と関節モーメントの積で求められる。

$$P = M_s \frac{\Delta\alpha}{T} \quad (4-1)$$

ここで、 T は肩関節角度 $\Delta\alpha$ [deg.]あたりの時間 [sec.]であり、ステアリングホイールの操舵角速度を 45 deg./sec.として T を算出した。

4. 3. 6 関節パワーによる解析結果および考察

図 4-7 に各スライド調整時の関節パワーの結果を示す。0.305m と 0.605m では、最小スライド調整時と最大スライド調整時に関節パワーの低下が見られた。しかし、図 4-7 からそれ以外の現象は得ることはできない。そこで、ステアリングホイールの操舵角度ごとの肩関節の関節パワーを計算した結果を図 4-8 に示す。操舵角度 40 deg. から 80 deg. までは、スライド量が増加するにつれて肩関節パワーが増加した。4. 3. 2 項では、すべての操舵角度において、スライド量の増加に伴い、肩関節モーメントが増加することを示した。しかし、肩関節角度 $\Delta\alpha$ は操舵角度が増加してもほとんど変化は得られず、関節パワー肩関節モーメントと同じ傾向を示した。

10 deg. から 30 deg. では異なる傾向が見られた。特に 0.605 m 付近で肩関節パワーが急激に減少した。これは肩関節角度の変化量 $\Delta\alpha$ によるものと考えられる。操舵角度が 10 deg. から 30 deg. の場合、関節角度 $\Delta\alpha$ がほとんど変化しないため、肩関節パワーは 0.605 m で急激に減少した。加えて、肩関節はほとんど動かずに力を発揮する必要があり、この位置で関節モーメントは最大である。

操舵角度が 30 deg. である場合にはスライド量が、0.505 m で関節パワーが最大になり、操舵角度が 10 deg. と 20 deg. では 0.455 m で最大になった。そのため、関節角度の変化量と関節モーメントが適切に生じているのは 0.455 m から 0.505 m であり、ドライバーの筋の伸長、収縮量が適切であることから、適切なスライド量であると考えられる。

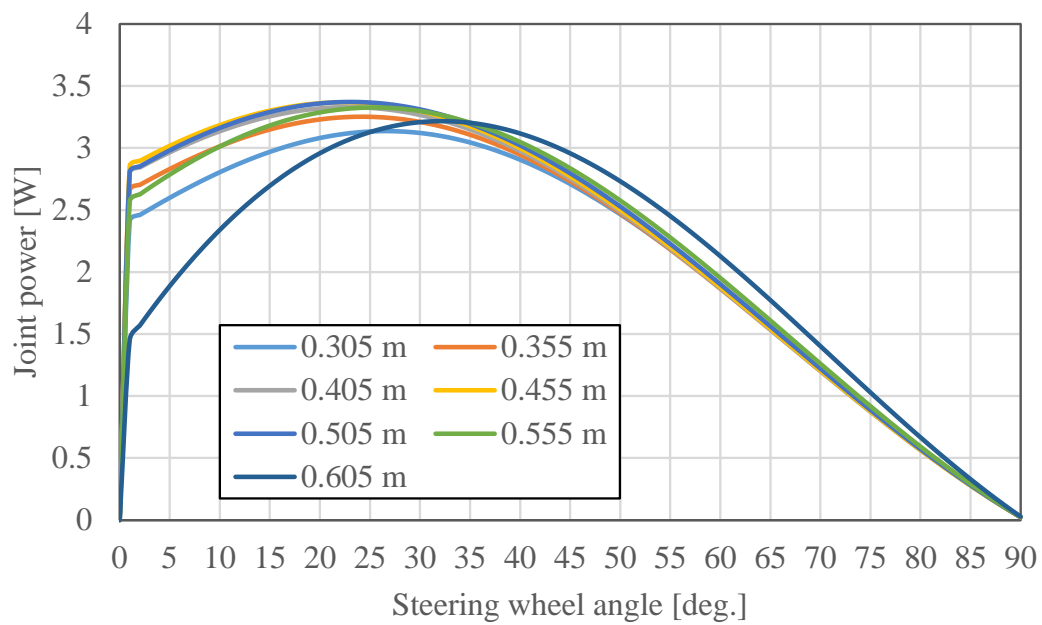


図 4-7 スライド量ごとの肩関節のパワー
自由使用可能な [4-6] の Fig. 13 より転載

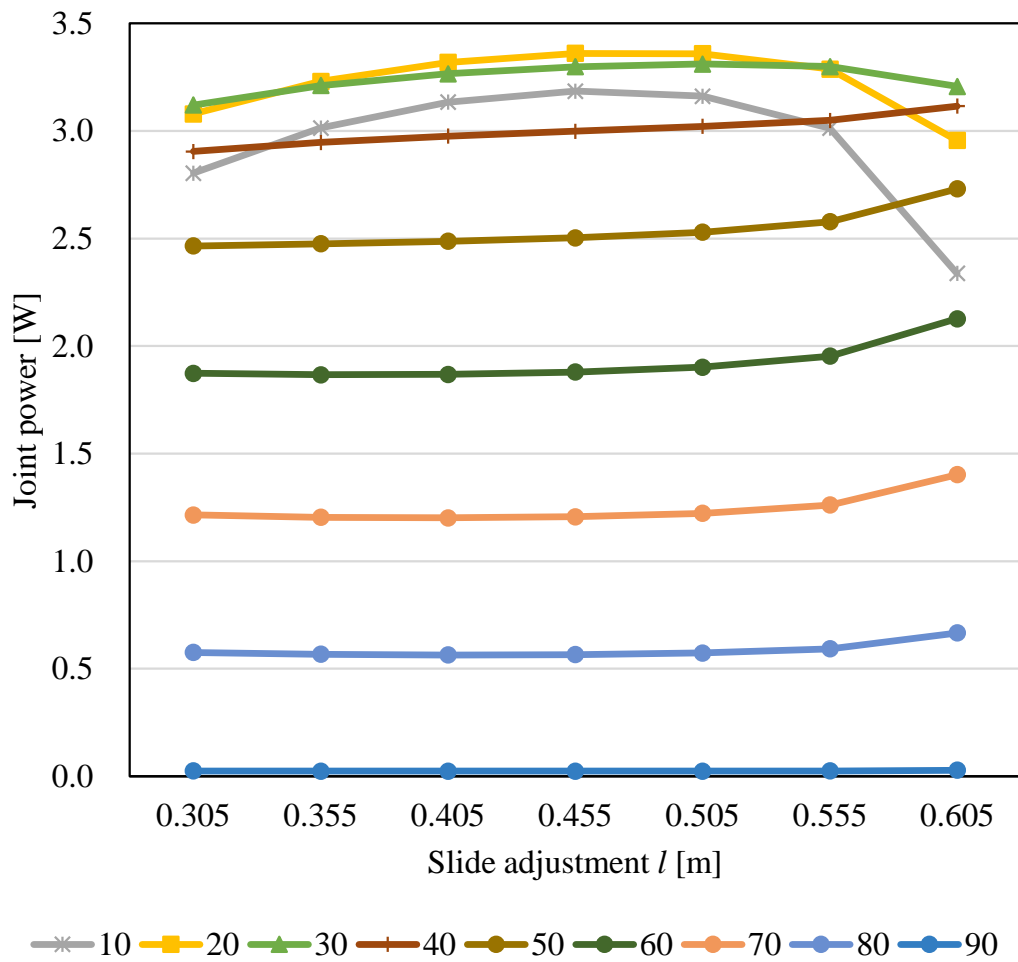


図 4-6 操舵角度ごとの肩関節パワー
自由使用可能な [4-6] の Fig. 14 より転載

4. 4 第4章のまとめ

三角筋前部の表面筋電位の測定によってスライド量の変化が操舵負担に与える影響を検討した。その結果、スライド量が大きすぎても小さすぎても操舵負担が増加することが明らかになった。

肩に生じる関節モーメントをスライド量ごとに算出し、スライド量が小さければ関節モーメントが減少した。しかし、スライド量が最小の時は実際に窮屈な運転姿勢である。一方で、関節角度の変化量はスライド量が小さいほど大きく、肩関節を大きく動かす必要があり、操舵負担が生じる。スライド量が最大であれば、肩関節角度の変化量は最小であるが、肩関節モーメントが最大であり、操舵負担が大きい運転姿勢である。

関節のモーメント、肩関節角度の変化量を用いて関節パワーをスライド量ごとに算出した。その結果、操舵角度が 10 deg. から 30 deg. の際に、肩関節の動作量と関節モーメントが適切であり、ドライバーの筋の伸長、収縮量が適切であることから、適切な運転姿勢を解析的に明らかにすることができた。

以上の検討を行い、筋負担と関節パワーの算出による運転姿勢による操舵負担の影響を検討することで、上肢の体格に基づいたドライバーごとの適切な運転姿勢の評価方法を構築することができた。

本章の 4. 2 ~ 4. 3 節は以下の論文(Daigo Uchino, Ikkei Kobayashi, Jumpei Kuroda, Kazuki Ogawa, Keigo Ikeda, Taro Kato, Ayato Endo, Hideaki Kato and Takayoshi Narita, A Basic Study for Active Steering Wheel System for Steering Burden Evaluation by Driving Position Focus on Driver's Arm Size, vehicles, Vol. 5, No. 3, (2023), pp. 846-858.)を基に構成されている。

第5章

結論

SBWS を実装した車両において、一人ひとりの上肢の体格が異なるドライバーに対して適切な操舵反力トルクと運転姿勢を提供するために、本論文はドライバーの定量的な操舵負担評価手法の構築を目的とした。まず、上肢の負担モデルを構築し、ドライバーの体格から操舵反力トルクの定量化を行い、適切な操舵反力トルクについて研究を行った。次に、ドライバーの体格ごとに適切な運転姿勢の評価手法について検討を行った。以下に各章において得られた研究成果について述べる。

第1章 序論

本論文の研究の背景として、カーシェアの普及によって生じる課題 SBWS について述べた。また、SBWS の操舵負担の評価に関する研究の現状についても明らかにした。さらに本研究における操舵負担の評価方法のアプローチについて説明するとともに、本研究の概要と社会的意義を明らかにした。

第2章 上肢の体格に基づいた操舵負担の評価

ドライバーひとり一人の体格に着目し、筋活動量から操舵負担の定量化を行うことを目的とした。しかし、筋活動の発揮量は人によって異なり、同じドライバー同士単純に評価することが出来ない。そこでドライバーの体格に基づいた2次元の上肢負担モデルを作成し、ドライバーの腕のサイズによる操舵負担への影響を検討した。このモデルを用いて腕の前腕と上腕の長さ、重量が操舵負担に与える影響を明らかにした。

次に体格が異なるドライバーの関節モーメントを上肢負担モデルによって算出し、解析と同条件で大胸筋上部の表面筋電位を測定することによってこれらと比較した。その結果、関節モーメントと筋活動の傾向が一致し、体格によって操舵負担が異なることを明らかにした。

第3章 関節モーメントを考慮した操舵動作時の筋負担評価

操舵反力トルクの操舵負担において解析的な手法と筋活動の測定から定量的に評価できる手法の構築を本章の目的とした。

まず、予備実験として操舵負担に影響する筋と主観評価の関係を確認することで、操舵反力トルクと操舵動作による操舵負担を明らかにすることができた。次に、3次元の上肢負担モデルを構築、操舵時の肩関節モーメントを算出し、同じ肩関節モーメントを負荷実験によって再現した。操舵時と負荷実験において三角筋前部の筋活動量を測定した結果、筋活動量が一致した。三角筋前部の筋活動量は操舵負担感と傾向が一致していることから、負荷実験によって操舵負担を評価することができることを示した。最後に、SBWSを実装した実験装置を用いた静的な操舵実験と、従来の機械的な操舵機構を持つ実験車両において同じ走行コースにおける操舵負担を比較し、一致することを確認した。その結果、本章で行った負荷実験による操舵負担評価は、従来の機械的な操舵システムにおいても有効であることを明らかにした。

第4章 上肢の体格に基づく関節パワーを用いた適切な運転姿勢の評価

ドライバーの体格に基づき、適切な運転姿勢を明らかにするために、関節パワーを用いた操舵操作における負担評価手法を構築することを目的とした。

前腕と上腕の長さの比率や重量は人によって異なれば、筋の最も力を発揮しやすい適切な伸長や収縮量、すなわち関節角度の変化量が異なることが知られている。そのため、ドライバーが力を発揮しやすい適切な運転姿勢は異なる。まず、三角筋前部の表面筋電位の測定によってスライド量の変化が操舵負担に与える影響を検討した。その結果、スライド量が大きすぎても小さすぎても操舵負担が増加することを明らかにした。

関節パワー、関節モーメント、関節角度を用いることで人の筋力の発揮しやすさを評価することができる。そこで3章にて構築した3次元の上肢負担モデルを用いて関節パワー、関節モーメント、関節の角速度を算出し、適切な運転姿勢を評価する方法を構築し、運転姿勢を評価した。その結果、適切な肩関節の動作量と関節モーメントから、適切なドライバーの筋の伸長、収縮量を評価すること

によって、適切な運転姿勢を解析的に明らかにすることができた。

以上の検討を行い、筋負担と関節パワーの算出による運転姿勢による操舵負担の影響を検討することで、体格に基づいたドライバーごとの適切な運転姿勢の評価方法を構築することができた。

以上の研究成果により、適切な操舵反力トルクと運転姿勢を評価する手法を提案した。負荷実験を用いた操舵負担評価を行った結果、体格に基づいた上肢負担モデルから算出した関節モーメントと筋活動が一致することを確認した。体格や運転姿勢にかかわらず、個人間で評価軸が一致した操舵負担評価が可能になることを明らかにした。また、従来の機械的な操舵機構、SBWSの操舵反力トルクによる操舵負担評価に有用であることを明らかにした。さらにはドライバーの体格に基づいた関節パワー、関節モーメント、関節角度を評価することで、ドライバーの体格ごとに力を発揮しやすい適切な運転姿勢の評価手法を提案し、運転姿勢による操舵負担への影響を明らかにした。

今後の展望として、様々な車両における定量的な操舵負担評価が可能になると考えられる。示した負荷実験による操舵負担評価は誰でも行える動作であり、容易に評価を行うことができる。そのため様々な操舵システムの負担評価に応用できると考えている。そのため、ドライバーに応じた操舵感を提供するシステムが構築できるため、ドライバーがより安定した操舵を行うことができると予想される。また、体格ごとに適切な運転姿勢を評価することによって、快適な操舵を行うことが可能になる。本論文によって提案した操舵負担評価の手法を操舵システムに応用することで、ドライバーひとり一人が最適な操舵感を得られる高性能な操舵システムの実現が期待できる。

謝辞

本研究を行うにあたり多大なるご指導，ご鞭撻ならびにご尽力を賜りました本学 工学部 機械システム工学科 成田正敬講師，加藤英晃准教授，に心からお礼申し上げます。

本論文をまとめるにあたっては本学 工学部 機械システム工学科 森山裕幸教授，工学部 機械システム工学科 落合成行教授，工学部 機械システム工学科 奥山淳教授に細部にわたってご査読，ご叱正をいただきました。ここに紙面を借りて深謝いたします。

最後に，研究を進めるにあたり様々な面でご支援いただいた愛知工業大学 工学部 電子ロボット工学科 小川和輝助教，北海道科学大学 工学部 機械工学科 池田圭吾助教，東京工科大学 工学部 機械工学科 加藤太朗助教，福岡工業大学 工学部 電気工学科 遠藤文人助教，本学の諸先生，諸先輩，同僚，大学院生ならびに加藤・成田研究室の諸氏に感謝いたします。

2023年 11月

内野 大悟

付録 本論文に記載された内容の引用元

本論文は参考文献 [2-3], [3-3], [3-4], [4-6] に掲載された内容を基に構成されている。Journal of Robotics and Mechatronics に掲載された内容 [2-3] は第 2 章 2. 3 節, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics に掲載された内容 [3-3] と [3-4] は第 3 章 3. 2~3. 3 節, ならびに第 3 章 3. 4 節, Vehicles に掲載された内容 [4-6] は第 4 章 4. 2~4. 3 節を構成している。なお, 本論文で引用された International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics の論文 [3-3] と [3-4] の最終版については DOI: 10.3233/JAE-220179 ならびに DOI: 10.3233/JAE-209427 で公開されている (The final publication [3-3] and [3-4] that used in this doctoral these are available at IOS Press through “DOI: 10.3233/JAE-220179” and “DOI: 10.3233/JAE-209427”). また, Journal of Robotics and Mechatronics の論文 [2-3] の最終版は <https://doi.org/10.20965/jrm.2021.p1169> にて公開されている (The final publication [4-6] that used in this doctoral thesis is available at FUJI TECHNOLOGY PRESS LTD. Through <https://doi.org/10.20965/jrm.2021.p1169>).

参考文献

第1章 序論

- [1-1] カーシェアリングの動向整理, 三菱 UFJ&コンサルティング, (2023).
- [1-2] 超小型モビリティの成果と今後, 国土交通省自動車局環境政策課, (2016).
- [1-3] 平岡敏洋, 熊本博光, 操舵反力トルクの大きさがステアバイワイヤ車両の状態判別性と運転行動に与える影響, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 12, No. 2, (2010), pp. 187-198.
- [1-4] 警察庁交通局, 令和4年における交通事故の発生状況について, (2023), <https://www.npa.go.jp/bureau/traffic/bunseki/nenkan/050302R04nenkan.pdf>.
- [1-5] 二神龍太, 風間恵介, 毛利宏, 右折時の操舵に着目した信号交差点歩行者事故におけるヒューマンエラーを誘発する要因の考察, 自動車技術会論文集, Vol. 50, No. 5, (2019), pp.1433-1439.
- [1-6] 北原圭, 孕石泰丈, 毛利宏, 上肢の運動に着目した新しい運転操作系の提案, 日本機械学会論文集(C編), Voll. 79, No. 806, (2013), pp.3327-3334.
- [1-7] (株) 矢野経済研究所, 電動パワーステアリングシステム市場の最新動向と将来展望, (2017), https://www.yano.co.jp/market_reports/C59110600.
- [1-8] 松岡耕平, 立和名慎一, 土居俊一, 和田隆広, 車速連動型小操舵角操舵制御がドライバに与える影響, 中国四国支部総会・講演会 講演論文集, Vol. 46, (2008), 1313.
- [1-9] 野田凌平, 藤井康夫, 毛利宏, タイヤ緩和長が低ステアリングギア比車両の挙動に及ぼす影響と対策, 自動車技術会論文集, Vol. 52, No. 6, (2021), pp. 1192-1197.
- [1-10] 北原圭, 玉川迅, 吉田秀久, ポンサトーン ラクシンチャラーンサク, 毛利宏, 低速走行時の操舵負担解消を目指した新しい操舵系の開発とその有効性, 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 840, (2016), 15-00687.
- [1-11] 北原圭, 孕石泰丈, 毛利宏, ステアリング持ち替え操作を不要にする低ギヤ比操作系の開発, 交通・物流部門大会講演論文, Vol.22, (2013), 1205.
- [1-12] 中野史郎, 高松孝修, 西原修, ステアバイワイヤにおける操舵制御に関する研究(第1報)操舵反力制御と前輪舵角制御について, 自動車技術会論文集, Vol. 31, No. 2, (2000), pp.53-58.
- [1-13] 池浦, インピーダンスに基づく車のステアリング操舵感評価, 自動車技術会学術講演会前刷集, Vol. 45, No. 5, (2005) pp.413-418.

- [1-14] A. C. Newberry, M. J. Griffin, and M. Dowson, Driver perception of steering feel, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 221, Issue 4, (2007), pp. 405-415.
- [1-15] 山田大介, 村岸裕治, 久代育生, 中澤正和, 小泉瑠理子, 富田健仁, 澤村浩志, ドライバが知覚する操舵反力の定量化法, *自動車技術会論文集*, Vol. 47, No. 2, (2016), pp.437-442.
- [1-16] 吉田武司, 長谷和徳, 大日方五郎, 羽田昌敏, 3次元上肢筋骨格モデルを用いたステアリング動作の解析とハンドル特性評価, *Vol. 34, No. 1, (2010), pp. 41-52.*
- [1-17] 梅本貴史, 劉曉俊, 成田正敬, 加藤英晃, 森山裕幸, 超小型電気自動車のステアバイワイヤシステム(三角筋の筋電位を用いた送り手上腕部の負担に関する基礎的検討), *日本 AEM 学会誌*, Vol. 25, No. 2, (2017), pp.155-161.
- [1-18] 玉井建嘉, 山崎信寿, 前屈み運転姿勢の操作性要因と身体要因, *日本人間工学会大会講演集*, 日本人間工学会第 47 回大会, (2006), 1B4-3.
- [1-19] 谷本芳美, 渡辺美鈴, 河野令, 広田千賀, 高崎恭輔, 河野公一, 日本人筋肉量の加齢による特徴, *日本老年医学会雑誌*, Vol. 47, No. 1, (2010), pp. 52-57.
- [1-20] Giuseppe Andreoni, Giorgio C Santambrogio, Marco Rabuffetti and Antonio Pedotti, Method for the analysis of posture and interface pressure of car drivers. *Applied ergonomics. Applied Ergonomics 2002*, Vol. 33, Issue 6, (2002) pp. 511-522.
- [1-21] M. P. Reed, Statistical and biomechanical prediction of automobile driving posture, *University of Michigan ProQuest Dissertations*, UMI number 9825331, (1998).
- [1-22] Matthew P. Reed, Miriam A. Manary, Carol A. C. Flannagan and Lawrence W. Schneider, Effects of Vehicle Interior Geometry and Anthropometric Variables on Automobile Driving Posture, *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol. 42, Issue 4, (2000), pp. 541-552.
- [1-23] 松井秀治, 各種姿勢の重心位置に関する研究:(1)身体各部の簡易質量計算とその質量比による重心位置の合成, *体育学研究*, Vol. 2, No. 2, (1956), pp. 65-76.
- [1-24] 伊藤宏太, 早川聡一郎, 後藤翔平, 津田修平, 池浦良淳, 早川知範, ランバーサポートを用いた運転姿勢変化に着目した運転時の疲労増加の低減手法, *電気学会論文誌C (電子・情報・システム部門誌)*, Vol. 135, No. 5, (2015),

pp. 513-519.

- [1-25] Xiaojun Liu, Daigo Uchino, Keigo Ikeda, Ayato Endo, Mohamad Heerwan Bin Peeie, Takayoshi Narita and Hideaki Kato, Driving Assist System for Ultra-Compact EVs—Fundamental Consideration of Muscle Burden Owing to Differences in the Drivers' Physiques, *Actuators*, Vol. 7, No. 3, (2018), 44.

第2章 関節モーメントと表面筋電位を用いた操舵負担の定量化

- [2-1] Xiaojun Liu, Daigo Uchino, Keigo Ikeda, Ayato Endo, Mohamad Heerwan Bin Peeie, Takayoshi Narita and Hideaki Kato, Driving Assist System for Ultra-Compact EVs—Fundamental Consideration of Muscle Burden Owing to Differences in the Drivers' Physiques, *Actuators*, Vol. 7, No. 3, (2018), 44.
- [2-2] 山本澄子, 身体運動のバイオメカニクス, *理学療法科学*, Vol. 18, No. 3, (2003), pp. 109-114.
- [2-3] Daigo Uchino, Takamasa Hirai, Shugo Arai, Keigo Ikeda, Taro Kato, Xiaojun Liu, Ayato Endo, Hideaki Kato and Takayoshi Narita, Active Steering Wheel System for Ultra-Compact Mobility Vehicles: Operability Evaluation with Steering Burden in Various Drivers, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 33, No. 5, (2021), pp. 1169-1177.
- [2-4] 大隅久, ロボット工学の基礎, *精密工学会誌*, Vol. 73, No. 10, (2007), pp. 1123-1126.
- [2-5] 松井秀治, 各種姿勢の重心位置に関する研究:(1)身体各部の簡易質量計算とその質量比による重心位置の合成, *体育学研究*, Vol. 2, No. 2, (1956), pp. 65-76.
- [2-6] 名切末晴, 緊急時におけるドライバ運転挙動解析, *豊田中央研究所 R&D レビュー*, Vol. 30, No. 3, (1995), pp. 67-76.
- [2-7] 土居俊一, 名切末晴, 天野也寸志, ドライバの緊急操作挙動に基づく車両の予防安全性能解析, *豊田中央研究所 R&D レビュー*, Vol. 33, No. 1, (1998), pp. 31-38.
- [2-8] 吉田武司, 長谷和徳, 大日方五郎, 羽田昌敏, 3次元上肢筋骨格モデルを用いたステアリング動作の解析とハンドル特性評価, *Vol. 34, No. 1, (2010)*, pp. 41-52.
- [2-9] 梅本貴史, 劉曉俊, 成田正敬, 加藤英晃, 森山裕幸, 超小型電気自動車のステアバイワイヤシステム(三角筋の筋電位を用いた送り手上腕部の負担に関する基礎的検討), *日本 AEM 学会誌*, Vol. 25, No. 2, (2017), pp.155-161.
- [2-10] 小川鑛一, *イラストで学ぶ看護人間工学 (第2版)*, 東京電機大学出版局, (2008).

第3章 関節モーメントと表面筋電位を用いた操舵負担の定量化

- [3-1] 平岡敏洋, 熊本博光, 操舵反力トルクの大きさがステアバイワイヤ車両の状態判別性と運転行動に与える影響, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 12, No. 2, (2010), pp. 187-198.
- [3-2] 山田大介, 村岸裕治, 久代育生, 中澤正和, 小泉瑠理子, 富田健仁, 澤村浩志, ドライバが知覚する操舵反力の定量化法, 自動車技術会論文集, Vol. 47, No. 2, (2016), pp. 437-442.
- [3-3] Daigo Uchino, Takamasa Hirai, Kazuki Ogawa, Keigo Ikeda, Taro Kato, Ayato Endo, Hideaki Kato and Takayoshi Narita, Effect of steering reaction torque of ultra-compact electric vehicle on steering burden for active steering wheel system, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 71, No. S1, (2023), pp. S363-S371.
- [3-4] Daigo Uchino, Xiaojun Liu, Hideaki Kato and Takayoshi Narita, Development of a driving assist system for ultra-compact electric vehicles using a steer-by-wire system: Fundamental consideration of muscle burden and evaluation by a continuous steering operation, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 64, No. 1-4, (2020), pp. 1111-1118.
- [3-5] 藤原哲司, 筋電図・誘発電位マニュアル (改訂第4版), 金芳堂, (2004).
- [3-6] 廣瀬和彦, 筋電図判読テキスト (第2版), 文光堂, (2007).
- [3-7] 木塚朝博, 増田正, 木竜徹, 佐渡山亜兵, 表面筋電図, 東京電機大学出版, (2006).
- [3-8] 浅井智也, 田川善彦, 手指等尺性屈曲保持における負荷タイプの違いによる疲労差, 日本機械学会論文集C編, Vol. 78, No. 790, (2012), pp. 2152-2161.

第4章 体格に基づく関節パワーを用いた適切な運転姿勢の評価

- [4-1] 玉井建嘉, 山崎信寿, 前屈み運転姿勢の操作性要因と身体要因, 日本人間工学会大会講演集, 日本人間工学会第47回大会, (2006), 1B4-3.
- [4-2] Giuseppe Andreoni, Giorgio C Santambrogio, Marco Rabuffetti and Antonio Pedotti, Method for the analysis of posture and interface pressure of car drivers. Applied ergonomics. Applied Ergonomics 2002, Vol. 33, Issue 6, (2022) pp. 511-522.
- [4-3] M. P. Reed, Statistical and biomechanical prediction of automobile driving posture, University of Michigan ProQuest Dissertations, UMI number 9825331, (1998).
- [4-4] Matthew P. Reed, Miriam A. Manary, Carol A. C. Flannagan and Lawrence W. Schneider, Effects of Vehicle Interior Geometry and Anthropometric Variables on Automobile Driving Posture, The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, Vol. 42, Issue 4, (2000), pp. 541-552.
- [4-5] 伊藤宏太, 早川聡一郎, 後藤翔平, 津田修平, 池浦良淳, 早川知範, ランバーサポートを用いた運転姿勢変化に着目した運転時の疲労増加の低減手法, 電気学会論文誌C (電子・情報・システム部門誌), Vol. 135, No. 5, (2015),
- [4-6] Daigo Uchino, Ikkei Kobayashi, Jumpei Kuroda, Kazuki Ogawa, Keigo Ikeda, Taro Kato, Ayato Endo, Hideaki Kato and Takayoshi Narita, A Basic Study for Active Steering Wheel System for Steering Burden Evaluation by Driving Position Focus on Driver's Arm Size, vehicles, Vol. 5, No. 3, (2023), pp. 846-858.
- [4-7] 吉田武司, 長谷和徳, 大日方五郎, 羽田昌敏, 3次元上肢筋骨格モデルを用いたステアリング動作の解析とハンドル特性評価, Vol. 34, No. 1, (2010), pp. 41-52.
- [4-8] 梅本貴史, 劉曉俊, 成田正敬, 加藤英晃, 森山裕幸, 超小型電気自動車のステアバイワイヤシステム (三角筋の筋電位を用いた送り手上腕部の負担に関する基礎的検討), 日本AEM学会誌, Vol. 25, No. 2, (2017), pp.155-161.
- [4-9] 山本澄子, 身体運動のバイオメカニクス, 理学療法科学, Vol. 18, No. 3, (2003), pp. 109-114.