

東海大学大学院令和2年度博士論文

表面筋電位を用いた超小型モビリティの
ドライブアシストシステム

指導 加藤 英晃 講師

東海大学大学院総合理工学研究科
総合理工学専攻

劉 暁俊

目次

| | | |
|-------|--|----|
| 第1章 | 序論..... | 1 |
| 1.1 | 本研究の背景..... | 2 |
| 1.1.1 | 超小型モビリティの現状..... | 2 |
| 1.1.2 | 超小型モビリティの課題..... | 3 |
| 1.2 | 従来の研究..... | 5 |
| 1.2.1 | ステアリングホイール操作時の補助装置に関する研究..... | 5 |
| 1.2.2 | 運転時の負担評価に関する研究..... | 7 |
| 1.2.3 | 運転姿勢と操舵負担に関する研究..... | 9 |
| 1.3 | 本研究の目的..... | 11 |
| 1.4 | 論文の構成および概要..... | 13 |
| 第2章 | ステアバイワイヤシステムを用いた超小型モビリティのドライブアシストシステム..... | 15 |
| 2.1 | 従来の操舵システムと本章の目的..... | 16 |
| 2.2 | 超小型モビリティに搭載するステアバイワイヤシステムの概要..... | 19 |
| 2.3 | ステアバイワイヤシステムを導入した超小型モビリティ..... | 21 |
| 2.3.1 | 実装車両..... | 21 |
| 2.3.2 | ロータリーエンコーダ..... | 21 |
| 2.3.3 | DSP..... | 22 |
| 2.3.4 | ステアリングモータ..... | 22 |
| 2.3.5 | 反力モータ..... | 22 |
| 2.3.6 | ステアバイワイヤシステムの実装と走行実験..... | 23 |
| 2.4 | まとめ..... | 40 |
| 第3章 | 操舵状況による腕部筋活動に関する検討..... | 41 |
| 3.1 | 本章の目的..... | 42 |
| 3.2 | 筋電位による負担評価..... | 43 |
| 3.2.1 | 筋電位測定..... | 43 |
| 3.2.2 | ステアリングホイール保持実験..... | 44 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.2.3 | 実験結果および考察..... | 45 |
| 3.3 | ステアリングホイール操作時の負担に関する主観評価..... | 53 |
| 3.3.1 | 実験方法..... | 53 |
| 3.3.2 | 実験結果..... | 53 |
| 3.4 | 筋電位計測によるステアリング操作時の負担評価..... | 57 |
| 3.4.1 | 異なる操舵反力での操作角保持実験..... | 57 |
| 3.4.2 | 実験結果および考察..... | 57 |
| 3.5 | ステアバイワイヤシステムによるステアリングホイール操作の負担低減に関する検討..... | 59 |
| 3.5.1 | 操作角による反力のフィードバックシステム..... | 59 |
| 3.5.2 | 力学計算によるステアリング操作時の負担評価..... | 59 |
| 3.5.3 | 操舵角反力フィードバックシステムを用いた連続操舵実験..... | 61 |
| 3.5.4 | 実験結果および考察..... | 61 |
| 3.6 | まとめ..... | 68 |
| 第4章 | 運転姿勢変化による筋負担変化に関する実験..... | 69 |
| 4.1 | 本章の目的..... | 70 |
| 4.2 | 運転者の体格が操作負担に与える影響..... | 72 |
| 4.2.1 | 体格が操舵操作の負担に与える影響に関する力学的検討..... | 72 |
| 4.2.2 | 筋電位測定による体格が操舵操作の負担に与える影響の検討..... | 73 |
| 4.3 | 操作角フィードバックによる負担低減..... | 79 |
| 4.3.1 | 操作角フィードバックが負担に与える影響に関する力学的検討..... | 79 |
| 4.3.2 | 筋電位測定による操作角フィードバックがステアリングホイール操作の負担に与える影響に関する検討..... | 79 |
| 4.4 | 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の引用元..... | 89 |
| 参考文献 | | 90 |

本論文で使用した記号

φ : ステアリングホイール操作角 [deg.]

θ : 肩関節角度 [deg.]

ψ : タイヤの転舵角 [deg.]

a : 肩関節から腕の重心までの距離 [m]

b : 肩関節から手首までの距離 [m]

a' : 腕が屈曲した場合のモデルにおける腕の重心までの距離 [m]

b' : 腕が屈曲した場合のモデルにおける肩関節から手首までの距離 [m]

W : 上肢の重量 [N] もしくは [kgf]

W_0 : ステアリングホイール反力により手首に加わる力 [N] もしくは [kgf]

M_0 : 肩関節回りのモーメント [N·m]

M_1 : 腕が屈曲した場合のモデルにおける肩関節回りのモーメント [N·m]

第1章

序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 超小型モビリティの現状

近年、各自動車メーカーが最大2人乗車可能な超小型モビリティを販売し始め、注目を集めている。超小型モビリティは、軽自動車よりコンパクトで小回りが利き、環境性能に優れ、近距離の移動手段となることが期待されている。2014年に国土交通省自動車局より地域から始める超小型モビリティ導入ガイドブック [1-1] が発表され、安全性の確保および環境の保全上支障がないことに配慮しつつ、超小型モビリティの公道走行を可能とする認定制度 [1-2] を創設した。その後、超小型モビリティは2018年に地方公共団体以外の公道走行申請が可能となり [1-3]、コンビニエンスストアの配送車両として導入されるなど、利用が拡大している。加えて2020年に国土交通省の車両安全対策検討会が「2人乗り小型EV」を「超小型モビリティ」として正式に軽自動車的一种と区分けした [1-4]。このことから超小型モビリティは普及が急速に拡大すると予想され、国内販売台数は2030年に1万台と推定されており、今後さらに普及が進む見通しである [1-5]。

超小型モビリティは車幅、ホイールベースも短い車両であるため、狭い道でもストレスなく走行することができる。特に近距離移動や駐車スペースでの利便性も非常に高く、近所への買い物や宅配業者の近距離配送、観光地のカーシェアリングでの利用も予想されている [1-6]。また、2020年3月に国土交通省より超小型モビリティの導入事例が発表され、運搬や配送のコスト削減や公共交通の補完、地域の周遊性向上の手段となると評価されている [1-7]。このため超小型モビリティは従来よりも性別、年齢、体格など多様な運転者に利用されることが予想され、高齢者の外出機会の増加や心身的健康増進にも役に立つと報告された [1-8]。さらに、高齢者の外出促進ための超小型モビリティに関する研究 [1-9] が行われており、高齢者にとって望ましい乗り物であることも報告されている [1-10], [1-11], [1-12]。社会の高齢化の進行に伴い、超小型モビリティに対する需要がますます増えていくことが予想される。

1.1.2 超小型モビリティの課題

超小型モビリティは軽量で、小回りが利くという利点があり、カーシェアリングや宅配、観光促進など、様々な場面で使用されている。特に近距離の移動や駐車場への出入りなどの場面においては、利便性が非常に高く、従来よりも性別、年齢、体格などが多様な運転者が利用すると予想される。超小型モビリティは小型な車体によるメリットがある一方、積載重量や空間的な余裕も少なく設計されている。このため、従来の一般的な車両と比較して以下のような課題がある。

・ステアリングホイール操作の補助装置が搭載されていない

従来の一般的な乗用車において、車両のステアリングホイール操作に必要な力を軽減するパワーステアリングシステムの搭載率はほぼ 100%である [1-13]。しかしながら、車両の寸法規格 [1-14] の制限から、現在、市販されているほとんどの超小型モビリティにおいてパワーステアリングシステムなどのステアリングホイール操作時の補助装置は搭載されていない。

20 歳の女性における上肢の筋肉量は男性に比べて約 60%である。また 20 歳と 80 歳の上肢の筋肉量は、男性で 16.4%、女性で 3.0%低下するという報告がある [1-15]、[1-16]。このような上肢筋肉量が少ない女性や高齢者はステアリングホイール操作の補助装置がない超小型モビリティの操作が大きな負担となることが予想され、誤った操作を誘発しやすく、これによる事故が懸念される。操舵機構におけるギア比など機械的なパラメータを調整し、ステアリングホイールに生じる反力を低減させることも対策の一つであるが、ステアリングホイールの操作量が大きくなり、かえって操作しにくくなることも予想される。

・シート位置調整機構の調節量が小さい

現在市販されている超小型モビリティは、ホイールベースが 2000 mm 以下のものがほとんどである。たとえばトヨタ車体制コムスのホイールベースは 1530 mm [1-17]、MC-β（本田技研工業株式会社製）のホイールベースが 1830 mm [1-18]、i-ROAD（トヨタ自動車株式会社製）のホイールベースが 1695 mm である [1-19]。従来の一般的な乗用車において、シート下部には前後方向のスライド機構が搭載されており、体格などに応じてシート位置を調整することで、運転操作時の負担が少ない姿勢をとることができる。しかしながら超小型モビリティはホイールベースが短いためシートの前後スライド量が狭くならざるを得ない。たとえば、従来の軽自動車と比較して超小型

モビリティのシート前後方向の調整量は約 100 mm 少なくなっている。このため乗員の体格によっては乗車時に適切な運転姿勢がとることができず、ステアリングホイール操作時の負担が増加し、快適性が劣化する [1-20]。特に高齢者は身体機能の低下から、運転姿勢によって乗り心地と快適性が劣化することが問題視されている [1-21]。

・ステアリングホイール操作時における負担評価の手法が確立されていない

前述の通り超小型モビリティは乗員の性別や年齢が多様と想定されるが、ステアリングホイール操作時の補助装置が非搭載であり、シート位置の調整量が少ない。このため乗員の体格や性別、年齢によっては超小型モビリティを運転する際の負担が従来の車両より増加する可能性がある。

これまでステアリングホイール操作時の負担はステアリングホイールに発生する反力など物理量の測定やアンケートなどを用いた実験協力者の主観的な官能評価によって考察される場合が多い [1-22]。しかしながら、物理量の測定では乗員個人にとってどの程度負担であるか明確に評価することは難しい。また実験協力者の主観的な感覚を数値化して評価する官能評価では、実験協力者の評価基準の変動や実験協力者間の評価スケールの不一致によって、体系的に負担を評価することは難しい。

このため、異なる運転者の運転時の負担を評価するために、定量的かつ正規化して評価する手法を確立する必要がある。

1.2 従来の研究

本研究にて提案する超小型モビリティに対するドライブアシストシステムの特徴を明確するため、従来行われてきた研究に関して詳細に述べる。本研究に対する先行研究としてステアリングホイール操作時の補助装置に関する研究、運転時の負担評価に関する研究、運転姿勢と操舵負担に関する研究についてその概要を述べる。

1.2.1 ステアリングホイール操作時の補助装置に関する研究

自動車は「走る・曲がる・止まる」の三大性能が重要な要素となる。その中における「曲がる」という動作を実現するために、ステアリングシステムが重要な役割を果たしている。自動車のステアリングシステムには多くの方式が提唱され、実用化されている。

ステアリングホイールを操作する際に伝達する反力の大きさは車両の重量やサスペンションのセッティング、装着タイヤ、走行速度が影響する。自動車のステアリングホイールを操作する際に、タイヤと地面の静止摩擦力は車両の重量に比例する。輪荷重が重ければ重いほど、ステアリングホイールを操作するとき、大きな力が必要となる。大型のバスやトラックのステアリングホイールが乗用車よりも直径が大きいのは、この原理を利用して重いステアリングホイールを操作するためである。現在ではパワーアシストによりステアリング反力を軽くする仕組みが考案され実用化されている。パワーステアリング装置はステアリングホイールを軽く切るための補助装置の総称である [1-23]。

一方、航空機の分野において、航空機の操縦系は乗員の操作をケーブルなどの機械的結合を介してエルロンやエレベーター、ラダーなどの補助翼に伝達し、操縦していたが、乗員の操作をセンサで読み取り、電気的信号を介して補助翼に取り付けられたアクチュエータを作動させて操縦を行うフライバイワイヤ技術が提案されている [1-24], [1-25]。これによって、ケーブルの伸び、リンク機構のガタ等による不具合が解消されるとともに、操縦系統の整備、保守が格段に容易になり、現在ではほぼ全ての航空機の操縦系に採用されている [1-26], [1-27]。さらに系統特性の変更が機体の設計、製作、いずれの段階でも可能になるなど、構造設計上の多くの利点が得られる。

バイワイヤ技術を自動車の操舵系に導入し、運転者のステアリングホイール操作を電気信号に置き換え、タイヤを転舵し、タイヤの切れ角とステアリングホイール角度、

操舵力を独立して制御するステアバイワイヤシステムが自動車メーカーより提案されている [1-28]. これまでにステアバイワイヤシステムに関して行われてきた研究について以下に述べる.

- 葉山ら [1-29] は電動パワーステアリングを操舵用モータとして利用し, 人間を含めた閉ループ評価を行い, 従来の油圧パワーステアリング装置と同程度の出力を得るための手法とステアバイワイヤシステムが操舵に関する精神的負荷の関係について報告している.
- 柿沼ら [1-30] は車両限界の走行特性ではなく日常的に使用する低速度域に的を絞り, ステアバイワイヤシステムの操舵反力制御を行い, 低ギア比反力において実験協力者が車両を操舵した時, 車両の挙動を把握できる反力装置を有するステアバイワイヤシステムの実験を行い, 改善効果を得ることができたと報告している.
- 松岡ら [1-31] はシミュレータ上の市街地を走行し, ステアリング反力のギア比を車両の加速度で変更した場合と粘性・弾性項で変化させたときに反力が運転者に与える影響についてアンケートを行い, 主観評価により検討を行っている.
- 平岡ら [1-32] は操舵反力を人間の知覚特性からゲインを決定し, シミュレータ上で定常円旋回とスラローム走行の実験を行い, 主観的評価, NASA-TLX, 横すべり角, タイヤにかかる荷重などから, 操舵反力の大きさに対して実験協力者の評価がどのように変化するか報告している.

上述のように操作性向上のためのステアリングシステムのバイワイヤ化に関する研究は多く報告されており, 超小型モビリティにおける反力機構を有するステアバイワイヤシステムの有用性について確認することができる. また, 機械的な操作機構と同等の反力を模擬するステアバイワイヤシステムも研究されている.

しかし, 研究例の多くが実車を用いないシミュレータによる実験である場合が多く [1-33], [1-34], 実際の車両を用いた実験でも横力における改善やトラクションコントロール制御を用いた数値による研究がほとんどである [1-29], [1-35]. また上述したステアバイワイヤシステムを搭載した車両においても, 機械的な操舵系を完全に廃したのではなく, 電磁クラッチによって切り替えられる構造となっている. このため操舵システムが非常に複雑で多くのスペースを必要とし, 車内スペースの限られる超小型モビリティでは搭載することが難しい.

1.2.2 運転時の負担評価に関する研究

上述した通り、従来の身体負担の評価手法はアンケートなどにより実験協力者の主観的評価が一般的である。特に運転時のステアリングホイールを操作する際の評価は基本的に実験協力者の感覚による官能評価に大きく依存しているのが現状である [1-36]。以下では身体負担評価の研究開発状況を理解するために、現在研究が行われている官能評価ならびに身体負担を定量化に関する研究について述べる。

- 石橋ら [1-37] は質問紙調査より運転負担感受性の構成尺度を明らかにし、日常の運転行動の個人差を理解する上での有用性検討を行った。
- 水野ら [1-38] は、日本産業衛生学会産業疲労研究会の“自覚症状しらべ”を用いて、二輪車および四輪車運転時の疲労感の程度を測定することを試みた。
- 徳田ら [1-39] は車いすの下り勾配における身体負担を実験協力者の主観評価を行い、自走車いすによるスロープでの下り走行の走行性や身体負担を平地走行と比較検討した。
- 川上ら [1-40] は、脳波測定で、香りが自動車運転における人の作業負担に及ぼす影響について考察し、香りは実験協力者の心身諸機能の高進維持と運転終了後の疲労回復に有効であることを示した。

しかしながら、主観的な評価では実験協力者の感じ方をリアルタイムに反映することが難しく、より客観的な評価手法が求められるようになった。このため生体力学による負担の定式化や、負担算出について多くの研究がされ [1-41], [1-42], 要求に対する研究開発が盛んに進められている。

また客観性を持たせるため、実験協力者の主観的な官能評価によって定性的に負担評価を行うのではなく、官能評価を力学的手法などにより定式化して表現する研究も行われている。以下では身体負担評価について、現在研究が行われている官能評価ならびに身体負担定式化に関する研究について述べる。

- 吉田ら [1-43] は生体力学的観点からステアリングの反力特性を評価しており、ステアリングホイールに発生する反力についての官能評価が筋負担の変化パターンと関連付けられる可能性を示唆した。
- 盛岡ら [1-44] は立ち上がり動作中に手すりにかかる外力をすべて計測可能な手すり装置とフォースプレートによりトイレでの立ち上がり動作中の力学的状態

を測定できるシステムを開発し、手すりに作用する引張力、モーメント、握力および床反力作用点の軌跡などと立ち上がりにくさとの関連性を分析した。

- 長谷ら [1-45] は、運動発生手法と身体モデルの構築、および介助の基本的な動作である持ち上げ動作、押し動作、引っ張り動作の計算結果について述べた。
- 西川ら [1-46] は、関節トルク特性を考慮した手先力楕円体モデルを用いて、ステアリング操作がしやすいステアリングコラム角度を実験的に考察した。そしてステアリングコラム角度における上肢の筋負担、および身体に加わる圧力の分布や両腕の動きとの影響を解析した。
- 茅原ら [1-47] は、生体力学解析を行い、各関節自由度の関節モーメントを算出し、算出した関節モーメントから負担感評価関数を用いて各関節の負担感を求め、上肢の負担評価を行っている。
- 澤田ら [1-48] は操舵力に関わる各因子を設定できる操舵シミュレータを用いて操舵角制御の実験を行い、操舵角ゲインおよび操舵力の特性が人間の制御特性に及ぼす影響を検討した。
- 青柳ら [1-49] は走行環境から運転者の負担を事前に予測し、個人差を反映させるために、ステアリングのふらつき度合いによる評価を行っている。

これらの検討を用いれば人間がある動作を行う際の身体負担を定量的に求めることができるが、姿勢や関節角度などを取得するために、新たなセンサを搭載する必要があり、超小型モビリティのような狭い車室では、上記の技術を活用することが困難である。また運転者が車両を操縦する際の生体情報に着目し、心拍数を用いて運転者の身体負担を評価する研究も報告されている [1-50], [1-51]。さらに、生体情報の一つである筋電位を用いた運転者の筋活動と操縦安定性に関する研究も行われている。以下では現在研究が行なわれている反力機構を有するステアバイワイヤシステムの有用性に関する研究について述べる。

- 倉森ら [1-52], [1-53], [1-54], [1-55] は「力み」を筋活動から評価するため、運転操作や姿勢保持に直接関係のない咬筋の筋活動や運転操作に関係のある三角筋や僧帽筋になどの拮抗関係にある伸筋、屈筋を計測している。それぞれの筋活動と車両特性の異なる 4 種類の仕様の車両にて高速走行でレーンチェンジとスラローム走行を行なった際の主観評価の関係から精神的負担の評価が行なっている。

- また倉森ら [1-52] , [1-56] , [1-57] は最も操舵と良く対応する左右の三角筋前部と上腕三頭筋の拮抗関係にある筋肉の筋電位を測定し, 車両特性の異なる4種類の仕様の車両にて高速走行でレーンチェンジとスラローム走行実験を行っている. その際の左右の三角筋前部の同期的活動から運転者が車両を安定方向に導こうとする操作の把握が可能であると報告している.

以上に示したように, 身体負担に関する研究は自動車や福祉など様々な分野において研究がされており, 質問紙により官能評価や, 生体力学におけるシミュレーションなどによる負担評価が行われている. しかしこれらの検討の多くは実験終了後の評価であり, 実験中の実験協力者の感覚をリアルタイムに測定できているとは言えない.

またこれらの研究の多くは従来の機械締結されたステアリングホイールでセダンタイプの乗用車を用いており, 超小型モビリティを用いた検討例は少ない. また走行条件に関しても, 現状の超小型モビリティでは走行することのできない高速道路上を想定した実験が行なわれている. 超小型モビリティは市街地や住宅地などの一定地域内を走行するような低速で大きなステアリング操作が想定され, 一般の乗用車と比較して走行条件が大きく異なる.

1.2.3 運転姿勢と操舵負担に関する研究

自動車を安全, 快適に運転するには適切な運転姿勢を取ることが望ましいとされる. 適切な運転姿勢とは, 運転中に常に良い視界が保たれ, 車両と一体感をもってステアリングホイールやペダル操作が行える運転姿勢のことである. 適切な運転姿勢が取ることができない場合, 長時間の運転により身体への負担が適切な場合より増加することや, 視界の不良により認知が遅れ, 事故に繋がる可能性が考えられる. このため運転姿勢の重要性が着目され, 関連する研究が盛んに行われている. 以下に自動車を運転した際の運転姿勢に関する研究について述べる.

- 竹村ら [1-58] は, 姿勢が大きく変化する運動特性としてステアリング操作を取り上げ, その操作による手先力の変化に対する人間の主観的な力知覚特性を明らかにした.
- 徳光ら [1-59] は, 車両を運転する人間の全身運動を網羅的に定量化する計測技術および分析技術を開発して, 人間の運動行動を観察した結果を報告している.

- 伊藤ら [1-60] は、学生フォーミュラ車両固有の運転姿勢を前提に、疲労が少なく正確で速い運転が可能な運転姿勢について検証した。
- 玉井ら [1-61] は、高齢者になりがち前屈み運転姿勢となる原因を運転操作および身体要因の観点から考察した。
- 横山ら [1-62] は、自動車旋回時に生じる外力によって姿勢が崩れようとするのを乗員自身が自発的に防ごうとする筋活動を確認した。シート形状を改良することで、旋回中の力みが軽減されることを生理量計測から示した。
- 山田ら [1-63] は、運転環境下における高精度な人体関節位置推定手法を用いて、非通常の運転姿勢を自動的に判定するシステムを提案した。
- 片桐ら [1-64] は、着座者の体格にシートの形状を合わせ、また姿勢変化を簡単に行うことができる補助具を提案し、その有効性を確認した。
- 小竹ら [1-65] は、高齢者の乗車負担を軽減する内装設計を検討し、座面の高さを上げることで、着座時の動作所要時間の短縮、シート着地時の重力方向成分の速度減少、下肢筋負担の軽減を実現できる可能性を示した。

運転姿勢と乗車時の操作負担に関する研究は積極的に行われているが、これらの研究の大多数はあくまで普通乗用車を対象とした研究である。超小型モビリティのシートポジションはわずかな調整量しかなく、超小型モビリティのように限られた車室内で、適切な運転姿勢がとれない場合の運転時の操作負担に関する検討例はほとんど存在しない。

1.3 本研究の目的

前節までに超小型モビリティの現状とこれまで行われてきた操舵システムの検討、乗員の負担評価の検討、運転姿勢に関する検討についてそれぞれ述べた。超小型モビリティが持つ新たな移動手段としての可能性は非常に大きいと言えるが、ステアリングホイール操作の補助装置が非搭載であり、シート位置の調整量が狭い。様々な年齢や性別の利用者が想定される超小型モビリティでは乗員によっては運転操作が大きな負担となり、重大な事故を招く可能性もある。

そこでステアリングシステムの簡略化や、適切な運転姿勢がとれないなどの課題により、超小型モビリティを運転する際に、運転者に掛かる操舵負担を低減する必要がある。本研究は超小型モビリティのドライブアシストシステムを構築し、様々な運転者に最適な操舵環境を提供することを目的とする。

本研究は、まず図 1-1 のようにステアリングホイールと転舵機構の間の機械的結合を廃し、超小型モビリティに搭載可能な小型のステアバイワイヤシステムを構築する。機械的結合が存在しないことで、運転席の設置位置に関する自由度が高まり、デザイン性の向上も期待することができる。一方でステアバイワイヤシステムはタイヤとステアリングホイールの上に機械的な連結がないため、路面状況が掴みにくい。このためステアリングホイールに反力を発生できる機構を設置し、操作感の向上を図る。このシステムは発生させる反力を自在に変化できるため、負担低減の効果も期待できる。

加えてステアリングホイールの操作が乗員にとってどの程度負担であるのか定量的に明らかにする必要がある。本研究では生体情報の一つである表面筋電位に着目し、ステアリングホイール操作の負担に関してリアルタイムに評価する手法の構築を目指す。加えてステアリングホイールで発生させる反力を変化させた場合、乗員の負担がどのように変化するかを明らかにする。

さらに超小型モビリティを運転する際に、姿勢を制限された中で運転者の体格が操舵時の負担に与える影響を明らかにし、負担を低減するシステムの構築を目指す。

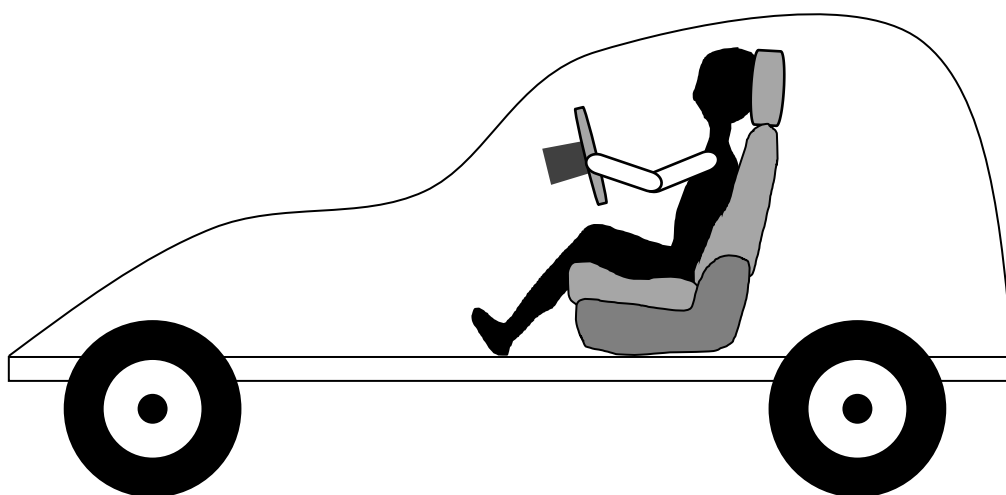


図 1-1 ステアバイワイヤシステムを搭載した超小型モビリティ

1.4 論文の構成および概要

本論文は「表面筋電位を用いた超小型モビリティのドライブアシストシステム」と題し、5章によって構成されている。以下に各章における概要を示す。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について説明している。次に従来までの研究について述べ、超小型モビリティの運転感覚改善における必要性和独自性を明らかにしている。さらに、本論文の構成および概要について述べている。

第2章は本研究のドライブアシストシステムのコンセプトおよび車両の作製について説明する。ステアリングシステムの簡略化およびシートポジションの調整量が少ないという超小型モビリティの操作性に関する課題に対し、機械的な連結がなく、操舵角とタイヤの切れ角の仮想ギア比を無段階で調整でき、操舵反力を自在に設定することができるステアバイワイヤシステムを構築した。また、ステアリングホイールに反力を発生させるデバイスを搭載し、ステアリング角度に応じて、ステアリングホイールで反力を発生させるシステムを構築し、操舵反力を自在に設定することができるステアバイワイヤシステムについて述べている [1-66]。

第3章は操舵状況による腕部筋活動について検討を行っている。操舵操作を行う際の上肢部の負担を定量的に評価するために、非侵襲式でステアリングホイールを操作する際に最も活発となる筋肉を特定した。またステアリングホイールの反力を変更してステアリングホイールの保持実験を行い、ステアリングホイールに発生する反力と上肢の負担についての傾向を明らかにしている [1-67]。同時に操作時の負担についての主観評価を行い、生体情報による負担感との関係を明らかにしている。また力学的観点から、操舵時の負担を数式化し、生体情報による実験結果と比較している。加えてステアリングホイールの操作角をフィードバックしてステアリングホイールの反力を変化させるシステムを構築し、運転者の上肢負担低減に関する効果について検討している [1-68]。

第4章は運転姿勢変化による筋負担変化について検討を行っている。実験協力者を身体パラメータで3つのグループに分け、それぞれのグループが超小型モビリティの限られている車室空間で操舵動作を行う際に、体格差がステアリングホイール操作時の負担への影響を検討している。また前章の操作角をフィードバックシステムに用いて、それぞれのグループがステアリングホイールを操作したときの負担の変化について、筋電位を用いて評価した [1-69]。

第5章では本論文の結論を述べている。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た。

また、本研究で参考にした参考文献は本論文の巻末に記載している。

第2章

ステアバイワイヤシステムを用いた超小型モ
ビリティのドライブアシストシステム

2.1 従来の操舵システムと本章の目的

本章では運転操作時における乗員の負担低減について検討するため、超小型モビリティにステアバイワイヤシステムを実装した。

一般的な自動車は図 2-1 のように乗員が運転席に設置されたステアリングホイールを操作し、その回転運動がステアリングシャフトを介して車両下部のラックアンドピニオン機構に伝達される。ラックアンドピニオン機構で回転運動が直線運動に変換され、タイヤを転舵させる。このときラックアンドピニオンのギア比や転舵機構の取り付け位置によってステアリングホイールの角度 φ はタイヤの転舵角 ψ に変換される。このときステアリングホイール角 φ とタイヤ転舵角 ψ の比はステアリングギアレシオと定義され、乗用車では 11~18 程度に設定される。図 2-2 にタイヤの転舵角を 0 deg. から 4 deg. に操作した際のステアリングホイールでの操作角 φ とステアリングホイールにおいて発生するトルクの関係を示す。同図の通りステアリングギア比を低下させるとステアリングホイールの操作角度が減少し、少ないステアリングホイール操作角でタイヤに所望の転舵角を与えることができる。一方、ステアリングホイールでのトルクは増加するため、パワーステアリングなどステアリングホイール操作を補助するシステムが不可欠となる。

車内スペースの限られる超小型モビリティでは上記のような操舵を補助するシステムを搭載することは難しく、ステアリングギア比を大きく設定することで操舵時のトルクを低減する。反面ステアリングホイールの操作角が大きくなるため、路地での進路変更や駐車時など大きなタイヤの転舵角を必要とする場面ではステアリングホイールでの操作量が大きくなる。このため何度もステアリングホイールの持ち替えを行う必要があり、この操作が乗員にとって大きな負担となる。

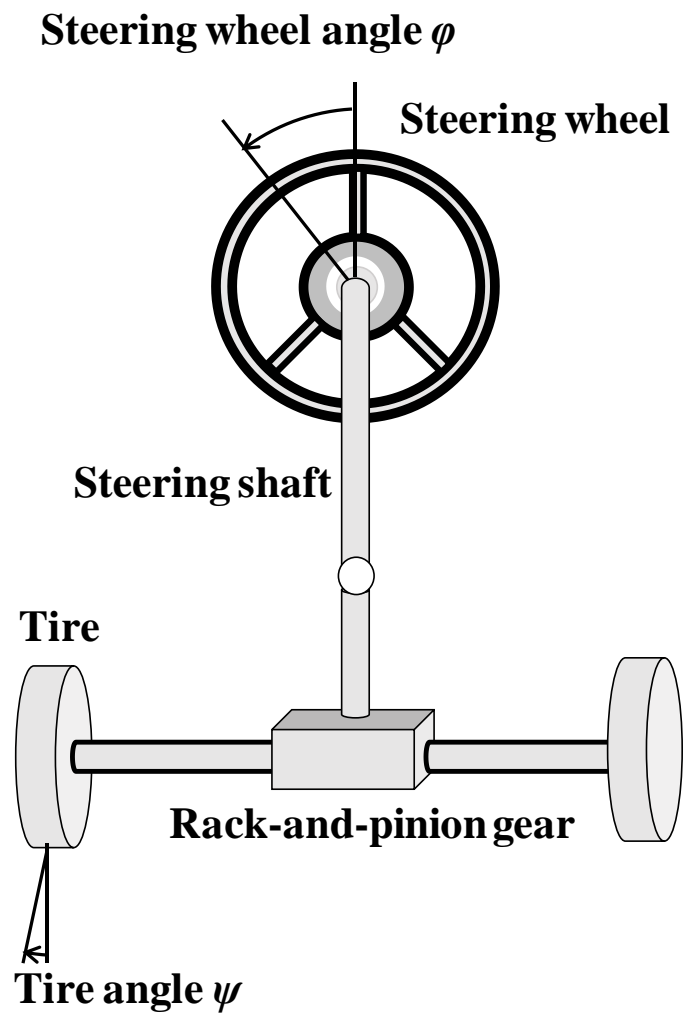


図 2-1 従来の自動車の操舵機構

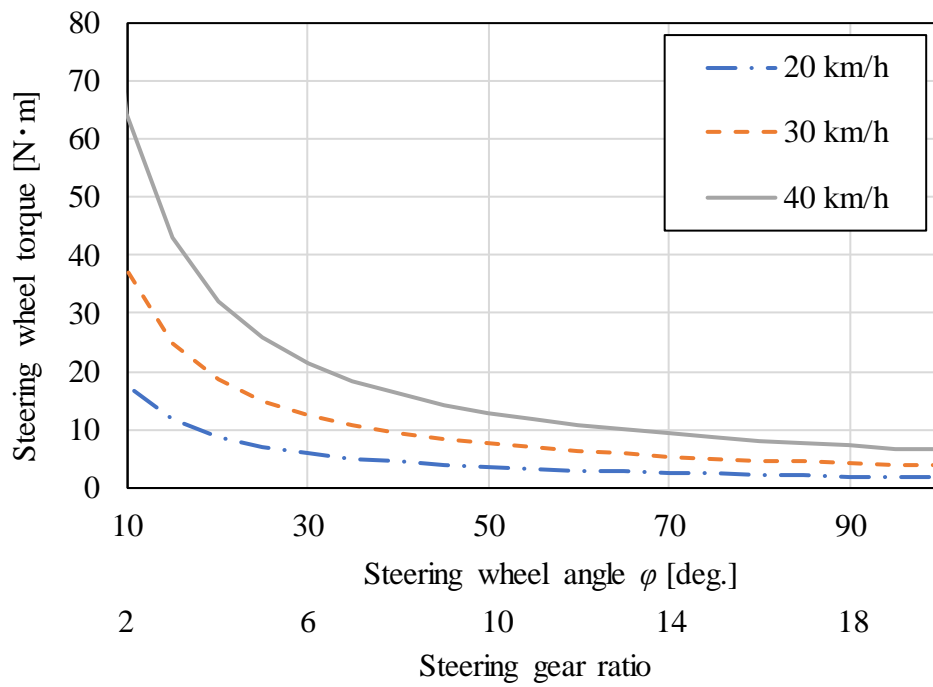


図 2-2 ステアリングホイール操作角とステアリングホイールでのトルクの関係

2.2 搭載するステアバイワイヤシステムの概要 [1-66]

そこで本研究では超小型モビリティに機械的結合のないステアバイワイヤシステムを実装する。図 2-3 に構築したステアバイワイヤシステムの概略図を示す。運転席に設置したステアリングホイールにロータリーエンコーダを取り付け、ステアリングホイールが操作された際の角度を検出する。ロータリーエンコーダのパルス信号はハーネスを通してデジタルシグナルプロセッサ (DSP) に入力され、DSP 内でステアリングホイール角度に変換される。DSP はステアリングホイール角度に応じたタイヤの転舵角を計算し、算出したタイヤの転舵角に応じて、ラックアンドピニオン機構のピニオンに連結されたステアリングモータの指令値を出力する。指令値を入力されたステアリングモータのドライバがモータを動作させ、ピニオンギアを回転させる。動作されたラックアンドピニオン機構によりタイヤを転舵させる。ステアバイワイヤシステムではステアリングホイールとタイヤの間に機械的な結合がなく、DSP 内の制御プログラムを変更することでステアリングギア比を変更することができる [2-1]。

また従来の操舵システムでは、路面に凹凸があった場合にタイヤが路面によって転舵され、その動きがラックアンドピニオン機構、ステアリングシャフトを通して運転者に伝達され、路面の状況を検知することができる [2-2], [2-3], [2-4]。一方ステアバイワイヤシステムではタイヤとステアリングホイールの間に機械的結合がないため乗員は路面の状況を検知することができない。加えて所望のステアリングホイール操作を行った後、セルフアライニングトルクによってステアリングホイールに復元力が発生するが、ステアバイワイヤ化するとモータで操舵を行うので反力が発生しない。このためステアリングホイールにモータを設置し、反力を発生させる機構が必要となる [2-5], [2-6]。そこで反力モータを設置し、ベルトを介してステアリングホイールに反力を伝達するようにした。このとき、ロータリーエンコーダで検出した角度を 0 deg. に戻すよう反力モータのドライバに指令値を入力し、反力モータを動作させた。

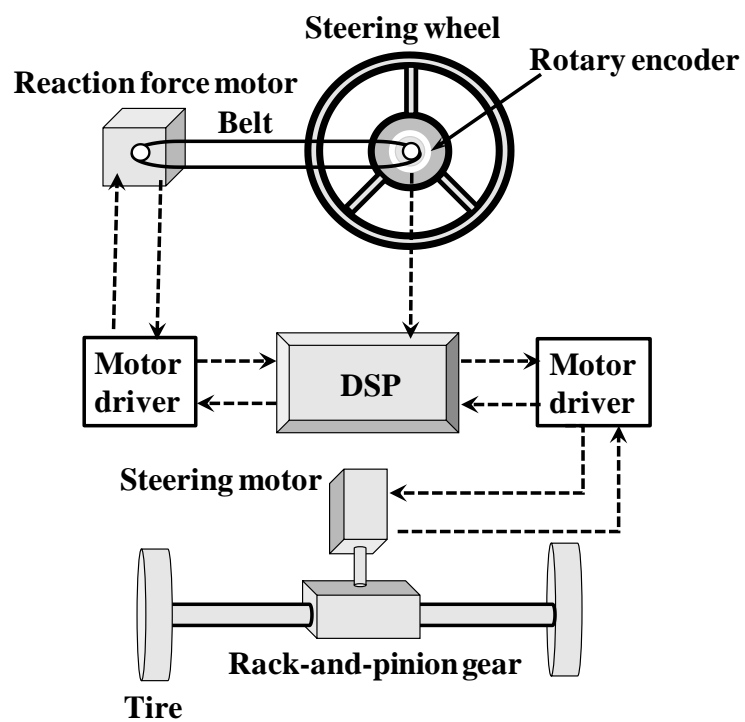


図 2-3 超小型モビリティに搭載したステアバイワイヤシステムの概略図 [1-66]

2.3 ステアバイワイヤシステムを実装した超小型モビリティ [1-66]

2.3.1 実装車両

ステアバイワイヤシステムを実装する車両として、タケオカ自動車工芸社製超小型電気自動車フレンドリー・エコを使用した。この車両は福祉車両として開発され、図 2-4 のように車両後部から電動車いすでそのまま車内に乗車できるような構造になっている。このため駆動輪となる後輪にはインホイールモータを採用し、車椅子が通行できるよう車内の床が障害物のない平面な設計になっている。加えて本車両は図 2-5 のように下肢が不自由な乗員でも操縦できるようステアリングホイールだけでなく、アクセルやブレーキなど一般の車両ではフットペダルを使用するような装置もステアリングホイールの周囲にレバーを設置し、腕で操作できるような構造となっている。上述の通り運転に必要なシステムがステアリングホイール周囲に集中しており、ステアバイワイヤ化が容易であることから、本車両の操舵系を改修してステアバイワイヤ化するようシステムを構築した。

2.3.2 ロータリーエンコーダ

ロータリーエンコーダの出力形式にはインクリメンタル型、アブソリュート型の二つがある。インクリメンタル型は単位角度ごとにパルスを出力する。また、起動位置が原点となるため、ステアリングホイールが原点から変位した状態でシステムを起動した場合でも誤作動が起りにくいと考えられる。アブソリュート型はスケール上の符号パターンを読み取って、その絶対位置を検出するものである。車両が停止した状態でステアリングが原点から変位していると、起動した際にモータが動作し、タイヤとステアリングホイールが動く可能性があるため、安全性に問題があると考えられる。以上の2つの出力形式を比較した結果、アブソリュート型ロータリーエンコーダでは安全性に欠けると判断したため、本研究ではインクリメンタル型を用いることに決定した。本研究では分解能が1回転で360パルス出力され、電圧出力のエンコーダである、図 2-6 に示すオムロン株式会社製ロータリーエンコーダ E6C3-CWZ3EH 360P/R 2M [2-7] を使用した。表 2-1 にこのロータリーエンコーダの仕様を示す。

2.3.3 DSP

ロータリーエンコーダからのパルスを入力し、ステアリングモータ、反力モータそれぞれのドライバに指令値を入力する制御システムを構築するために DSP を用いる。このとき、ロータリーエンコーダからの複数の入力信号やそれぞれのモータドライバに指令値を出力するため、多入力多出力のシステムが必要となる。また、サンプリング速度はステアリングホイールの操作の最大速度を 180 deg./s と仮定し、この操作速度においてロータリーエンコーダのパルスを検出できるように、図 2-7 に示すサンプリング周波数 1000 Hz のエムティティ社（現エムアイエス社）製 SBOX を使用した [2-8]。SBOX の仕様を表 2-2 に示す。

2.3.4 ステアリングモータ

ステアバイワイヤシステムではロータリーエンコーダで検知したステアリングホイールでの操作量や向きを制御器である DSP を介してモータにパルスを送り、モータを回転させる。このため、出力されたパルス数により決められた角度で高精度に回転を行うことができ、位置決め制御に適したステッピングモータを使用した。このモータをラックアンドピニオン機構のピニオンギアを駆動するよう設置し、ラックアンドピニオン機構を通してタイヤを転舵するよう動作させた。

実験車両を用いて最もトルクが発生する条件で転舵する実験を行い、このピニオンギアに発生するトルクを測定したところ最大で $4.6 \text{ N}\cdot\text{m}$ であったことから、図 2-8 に示すような最大トルクが $5.0 \text{ N}\cdot\text{m}$ のオリエンタルモータ社製 CRK566APB-N10 [2-9] を使用することとした。このモータの仕様を表 2-3 に示す。

2.3.5 反力モータ

ステアバイワイヤシステムではタイヤとステアリングホイールの間に機械的結合がないため、ステアリングホイールに反力モータを設置して操舵時の反力を発生させる。このときロータリーエンコーダで検出した角度を 0 deg. に戻すよう反力モータを動作させるため、精密な角度制御が行えるステッピングモータを使用した。実験車両において据え切り時にステアリングホイールで発生したトルクを計測したところ最

大で $2.1\text{ N}\cdot\text{m}$ となった。そこで、最大発生トルクが $3.0\text{ N}\cdot\text{m}$ のステアリングモータであるオリエンタルモータ株式会社製 AR66SMKD-T10-2 を反力モータに使用した。このモータの仕様を表 2-4 に示す。このモータのドライバに原点復帰するよう指令し、反力を発生させる。加えてモータドライバのアナログ入力ポートに DSP から指令値を入力し、反力を変更できるよう設定した。ステアリングホイールに接続したロータリーエンコーダと接続した反力モータを図 2-9 に示す。

2.3.6 ステアバイワイヤシステムの実装と走行実験

本節で示した要素を図 2-4 に示した超小型電気自動車フレンドリー・エコに搭載し、ステアバイワイヤシステムを実装した。図 2-10 にステアバイワイヤ化した実験車両の全景を示す。ステアリングホイールには図 2-11 のようにロータリーエンコーダと反力モータが接続され、ステアリングホイール角度の検出と反力が発生できるように設置した。実験車両下部の転舵機構では、図 2-12 のようにステアリングモータをラックアンドピニオン機構のピニオンギアと接続した。

ステアバイワイヤ化した実験車両のシステム構成図を図 2-13 に示す。ロータリーエンコーダで検出したステアリングホイール角 ϕ を DSP に入力し、仮想的なステアリングギア比から転舵角 ψ を算出する。得られた転舵角 ψ を DSP から出力し、ステアリングモータドライバに入力し、ステアリングモータを駆動する。またステアリングホイール角 ϕ をもとにステアリングホイールにおける反力 T_{r} を算出し、反力モータドライバに入力し、反力モータからベルトを通してステアリングホイールで反力を発生させた。

構築したステアバイワイヤシステムを実装した実験車両の運転環境について検討するため、ステアバイワイヤシステムを実装した実験車両を用いて走行実験を行った。図 2-14 に示すコースを 5 km/h で走行し、コース中のコーナーなどでステアリングホイールを操作する場合は 45 deg./s の速度で操作した。走行実験の様子を図 2-15 に示す。実験の結果、ステアバイワイヤシステムを実装した実験車両で、コース中の障害物に接触することなく、旋回することができた。



図 2-4 タケオカ自動車工芸社製超小型電気自動車 フレンドリー・エコ



図 2-5 フットペダルを使用しない操作システム



図 2-6 ロータリーエンコーダ（オムロン株式会社製 E6C3-CWZ3EH 360P/R 2M）

表2-1 ロータリーエンコーダ (E6C3-CWZ3EH 360P/R 2M) の仕様

| | |
|-------------|-----------------|
| 電源電圧 | DC5V-5%~12V+10% |
| 消費電流 | DC100 mA 以下 |
| 分解能 (1 回転) | 360 P/R |
| 出力相 | A, B, Z 相 |
| 制御出力 (出力形式) | NPN 電圧出力 |
| 許容最高回転数 | 5000 r/min |



図 2-7 DSP (エムティテイ社製 SBOX)

表 2-2 DSP (エムティティ社製 SBOX) の仕様

| | |
|-----------|---------|
| 入力チャンネル数 | 6 ch |
| 入力レンジ | ±10 V |
| 入力分解能 | 16 bit |
| 出力チャンネル数 | 8 ch |
| 出力レンジ | ±10 V |
| 出力分解能 | 14 bit |
| サンプリング周波数 | 1000 Hz |

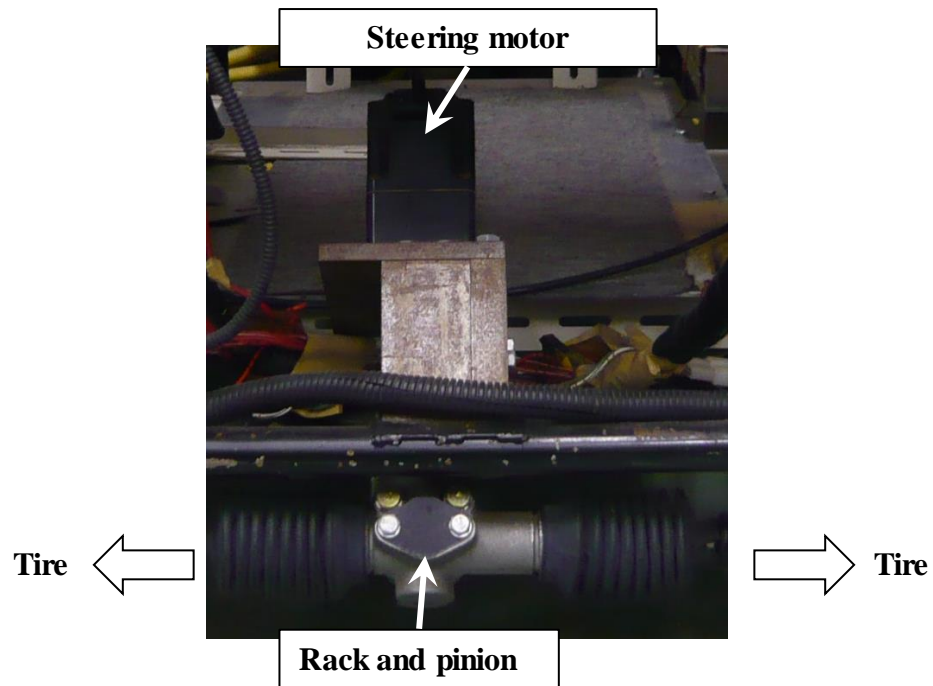


図 2-8 ステアリングモータをラックアンドピニオンに取り付けた様子（ステアリングモータはオリエンタルモータ社製 CRK566APB-N10） [1-66]

表 2-3 ステアリングモータ（オリエンタルモータ社製 CRK566APB-N10）の仕様

| | |
|-----------|--------------------|
| 電源入力 | DC24 V ± 10% 2.5 A |
| 定格電流 | 1.4 A/相 |
| 励磁最大静止トルク | 5 N・m |
| 基本ステップ角 | 0.072 deg. |
| 許容速度範囲 | 0~300 r/min |
| 質量 | 1.5 kg |

表 2-4 反力モータ（オリエンタルモータ株式会社製 AR66SMKD-T10-2）の仕様

| | |
|-----------|-----------------------|
| 電源入力 | DC24 V \pm 5% 3.8 A |
| 励磁最大静止トルク | 3.0 N·m |
| 基本ステップ角 | 0.036 deg. |
| 許容速度範囲 | 0~180 r/min |
| 質量 | 1.5 kg |

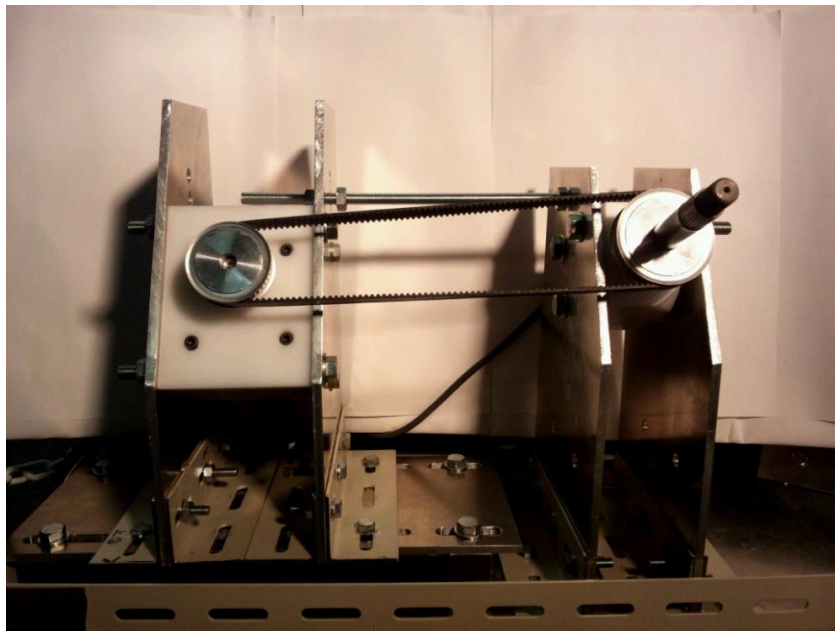


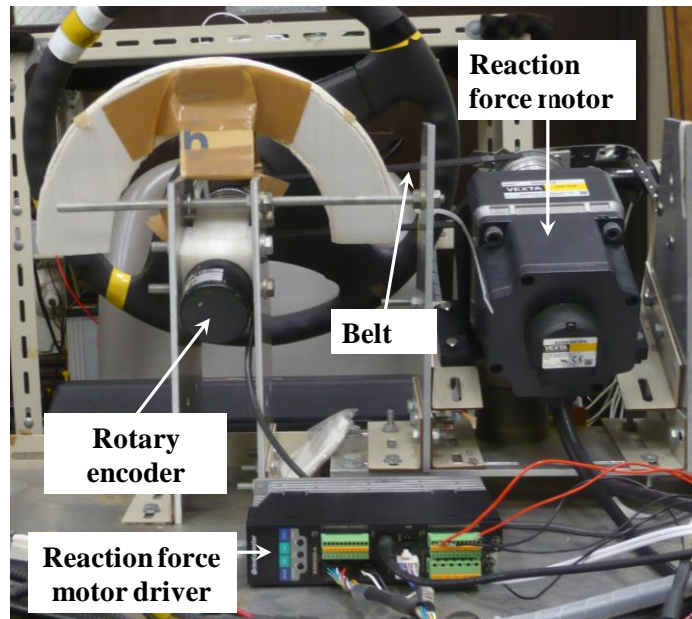
図 2-9 ステアリングホイール用の軸（右）と接続した反力モータ（左） [1-66]



図 2-10 ステアバイワイヤを搭載した超小型モビリティ [1-66]



(a) 前面（乗員側）から見た写真



(b) 背面（車両前面側）から見た写真

図 2-11 ステアバイワイヤシステムのステアリングホイール部分 [1-66]

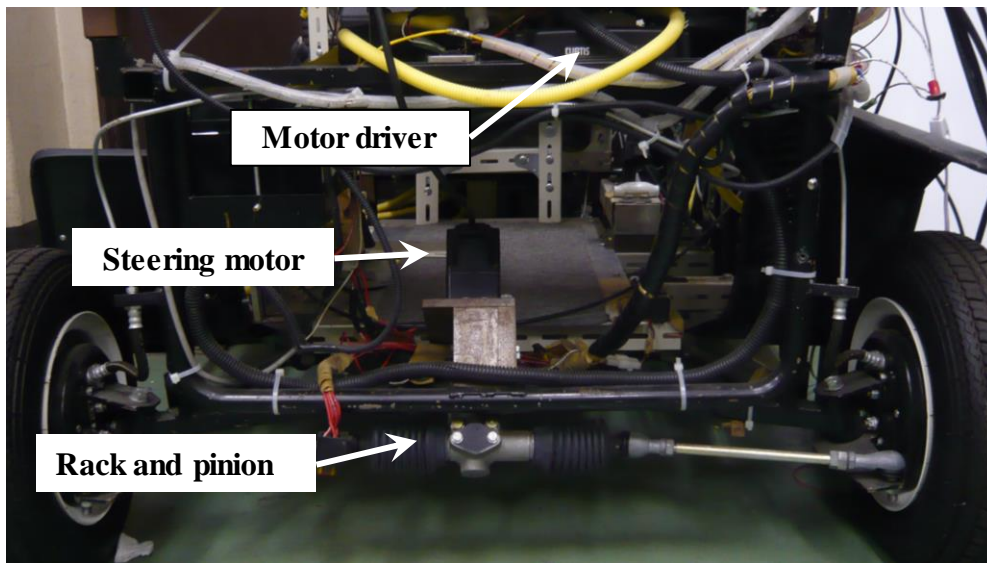


図 2-12 ステアバイワイヤシステムの転舵機構 [1-66]

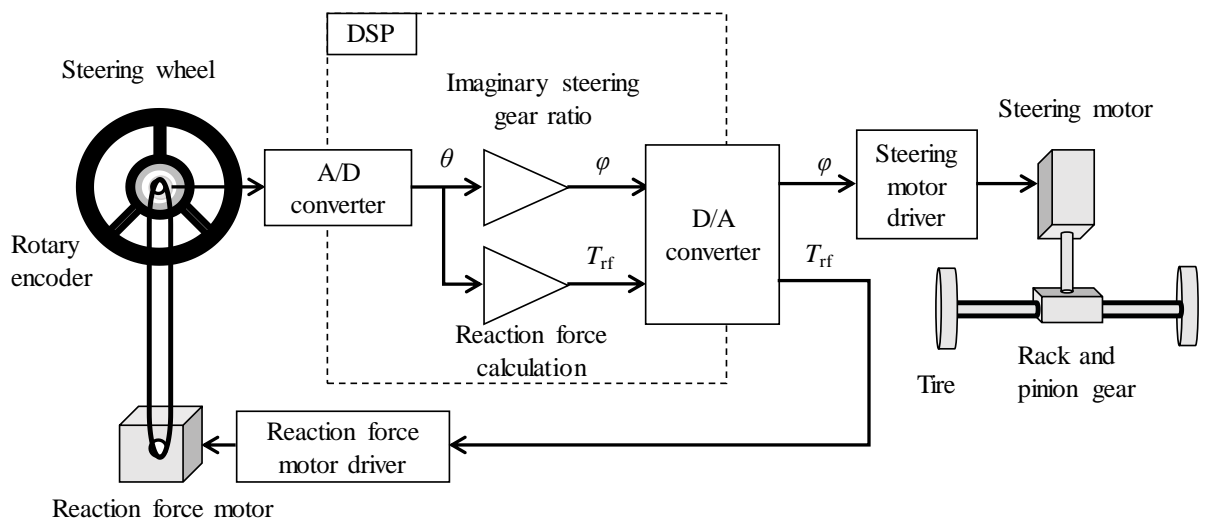


図 2-13 搭載したステアバイワイヤシステムの構成図

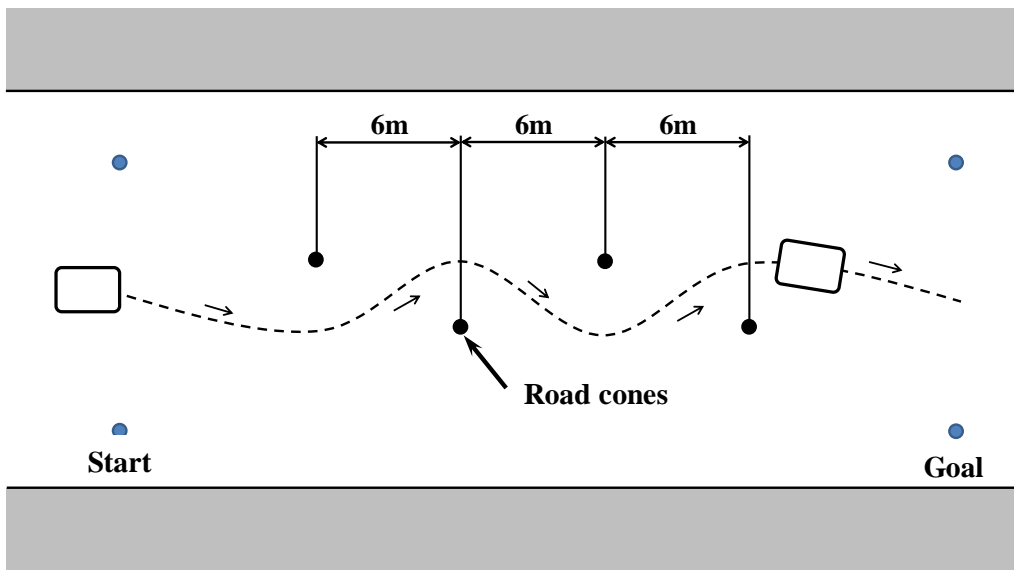


図 2-14 ステアバイワイヤシステムの動作実験に用いた実験路



図 2-15 ステアバイワイヤシステムの動作実験における車載カメラの様子

2.4 まとめ

本章では、ロータリーエンコーダによりステアリング角度を検知し、DSPに入力し、ステアリングモータを駆動することで機械的な連結のない操舵システムを構築した。また、ステアリングホイールに設置した反力モータをステアリング角度に応じて駆動することで、ステアリングホイールで反力を発生させることができた。

上記のシステムで、超小型モビリティのステアリングシステムの簡略化およびシートポジションの調整量が少ないという超小型モビリティの操作性に関する課題に対し、機械的な連結がなく、操舵角とタイヤの切れ角の仮想ギア比を無段階で調整でき、操舵反力を自在に設定することができるステアバイワイヤシステムを構築することができた。

第3章

操舵状況による腕部筋活動に関する検討

3.1 本章の目的

第3章では、操舵時の運転者の筋活動を明らかにするために、生体情報計測と実験協力者の主観評価、生体力学の観点から検討を行っていく。

生体情報の計測に関しては、針状の電極を筋肉に差し込む侵襲式計測と皮膚上に貼付する非侵襲式計測の計測方法がある。本研究では運転者の身体に痛みや負担をかけない非侵襲式の計測方法を採用し、ディスプレイ電極を体に貼付し、筋電位の計測を行った。また、計測部位によって、生体情報の計測結果と実験協力者の実際の感じ方が異なる可能性もある。そこで本章では操舵操作時の対象筋肉の筋電位計測と主観評価を行った。さらに操舵操作の動作を生体力学的に分析し、操舵操作時に対象部位にかかる負担を定式化し、操舵反力や操舵角度などの変化による操舵時の操作負担を定量的に評価する手法について考察した。

3.2 筋電位による負担評価 [1-67]

本研究ではステアリング操作時に働く腕の筋活動について検証していく。実験協力者に痛みを与えない非侵襲式計測を行うため、深層筋肉は計測できず、表面の筋肉のみ計測できる。また、ディスポ電極で測定できる筋肉群の中で、ステアリングホイールを操作する動作に関連する腕部の筋肉は三角筋前部、上腕二頭筋と尺側手根屈筋と考えられる [3-1], [3-2]。

本節で検討する三角筋前部、尺側手根屈筋、上腕二頭筋を図 3-1 に示す。まず三角筋前部は三角筋に含まれる筋肉の一部であり、三角筋前部の他に三角筋中部、三角筋後部を合わせて三角筋と呼ばれる。三角筋は肩の最外層にある筋肉で、肩全体を覆うように位置している。中でも三角筋前部は鎖骨の外側の端 1/3 に位置し、肩関節を屈曲もしくは内旋する際に働く。次に尺側手根屈筋は人間の上肢の筋肉であり、手首の屈曲筋の中では最も内側にある筋肉である。特に前腕を屈曲した状態で手首を尺屈するような動作においては、特に筋力を発揮する筋肉である。最後に上腕二頭筋は、人間の上肢の二の腕に当たり、力こぶを作る筋肉である。肘関節が屈曲もしくは回外する際に活動する筋肉である。

本節ではステアリングホイールを操作した際に活発な筋活動を示す筋肉の特定を目的として、ステアリングホイールを一定の角度に保持したときの 3 種類の筋肉の筋活動について表面筋電位により考察した。

3.2.1 筋電位測定

ステアリングホイールを一定の角度に保持したときの運転者の左右の腕の三角筋前部、上腕二頭筋、尺側手根屈筋の表面筋電位を測定する。

表面筋電位は図 3-2 に示す Bio Amp ML132 (AD Instruments 社) により増幅後、A/D 変換器 (Power Lab ML826, AD Instruments 社) を介してサンプリング周波数 4 kHz で記録した。動作分析などの手段として表面筋電位を用いる場合、筋電位信号の平均振幅が対象となる [3-3]。本実験において、記録した筋電位原波形に対して 0.1 秒間毎に 0.1 秒区間の二乗平均平方根 (Root Mean Square ; RMS) を算出した [3-4]。なお電極の貼付方法は図 3-3 に示す通りである。筋肉量は実験協力者によって個人差があり、また同じ実験協力者でも電極の貼付位置によって測定される電圧は変化するため正規化を行う必要がある。本研究では各筋に対応させた姿勢で最大の筋力を発揮した時

の筋電位（最大随意収縮力（Maximum voluntary contraction）、以下 MVC と称する）に対する実験時の筋電位の割合を示す%MVC で評価を行う。また各筋の MVC を測定する際は実験協力者に図 3-4 に示すような姿勢を取るよう教示した。

MVC の測定はステアリング操舵実験を実施する前に行なう。三角筋前部の MVC を測定する際は、実験協力者が腕を体の前方に水平になるように伸ばし、図 3-4(a)中の矢印で示した方向に拳を全力で上げるよう教示する。実験者は実験協力者の拳を矢印の反対方向に抑え、実験協力者の腕を水平に保つようにする。上腕二頭筋では実験協力者が腕を体の前方に出し、肘をテーブルにつけ、肘関節が 90 deg.になるように姿勢をとり、図 3-4(b)中の矢印で示した方向に全力で拳を引くよう教示する。実験者は実験協力者の拳を矢印の反対方向に引き、実験協力者の肘関節を 90 deg.に保つようにする。尺側手根屈筋は図 3-4(c)のように拳を握った状態で、拳を内側に全力で巻き込むような掌屈方向に動作させる。それぞれの姿勢において筋力を全力で発揮するよう教示し、このときの各筋肉の筋電位を 10 秒間測定した。各筋肉で測定した筋電位に対して上述と同様に 0.1 秒間毎の RMS を算出し、10 秒間における最大値を MVC とした。実験において測定した RMS を MVC に対する割合（%MVC）で示すことより正規化した。なお%MVC は数値が高いほど筋肉に負担がかかっていると評価することができる。

3.2.2 ステアリングホイール保持実験

ステアリングホイールを一定の角度に保持した際の三角筋前部、上腕二頭筋、尺側手根屈筋の表面筋電位を測定し、ステアリングホイール操作時に活発に活動する筋肉を特定する。製作した図 2-10 の実験車両に実験協力者を乗車させ、ステアリングホイールを保持するよう教示し、その際の筋電位を測定した。なおステアリングホイールの操作そのものに対する負担を評価するため、ステアリングホイールに設置した反力モータは反力を発生させない状態で実験を行った。実験協力者がステアリングホイールを把持する位置は、図 3-5 に示す通り日本自動車連盟（JAF）[3-5] が推奨する 9 時 15 分の位置とした。ステアリングホイールの角度は図 3-6 に示すように、ステアリングの頂点の目印箇所を 0 deg.とし時計回り、反時計回りにそれぞれ舵を切るものとする。実験協力者はステアリングホイールの角度を反時計回りに 45 deg.の状態です 5 秒間保持し、このときの筋電位を測定した。なお本論文では、ステアリングホイール

を操作する際に、図 3-6 の右腕のようにステアリングホイールを送り込む方の腕を送り手側、同図の左腕のようにステアリングホイールを引き込む方の腕を引き手側と定義する。

3.2.3 実験結果および考察

測定した表面筋電位の時刻歴を図 3-7 示す。左右各筋それぞれの MVC を同図のキャプションに記載した。同図(a)右図の右腕三角筋前部の筋活動が特に活発で引き手の左腕よりも、送り手である右腕の三角筋前部が大きく活動していることが確認できた。一方図 3-7 (b), (c)の上腕二頭筋、尺側手根屈筋の筋電位の振幅は非常に小さく、MVC と比較してもほとんど負担となっていないことが分かる。よって本研究ではステアリングホイール操作の負担評価として送り手の三角筋前部の筋活動に着目し、運転者の負担評価を行っていく。

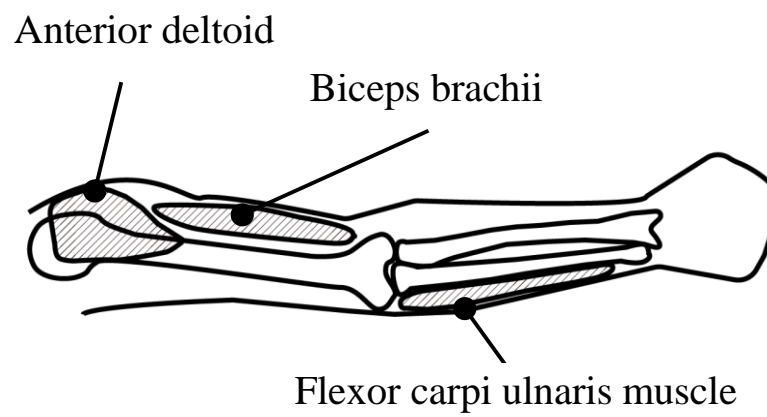
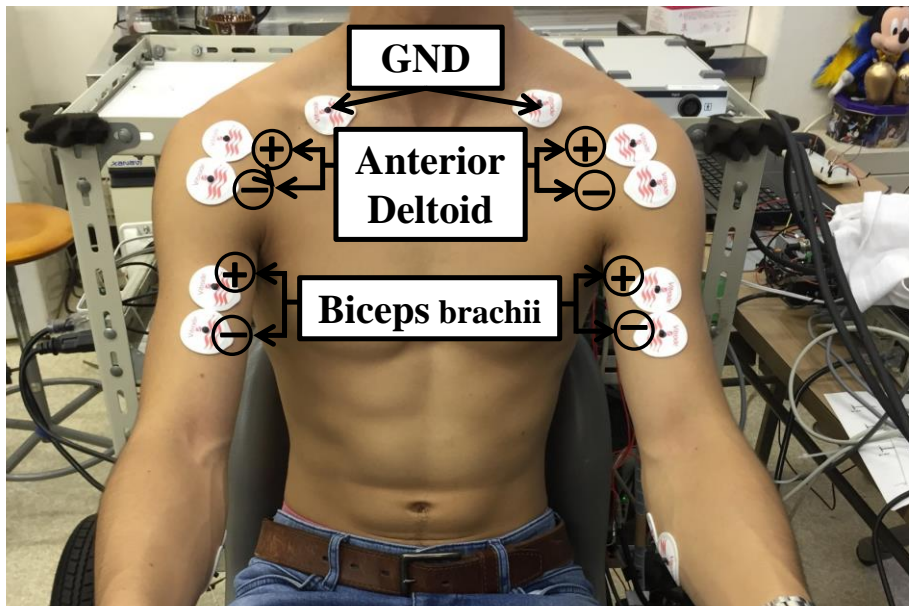


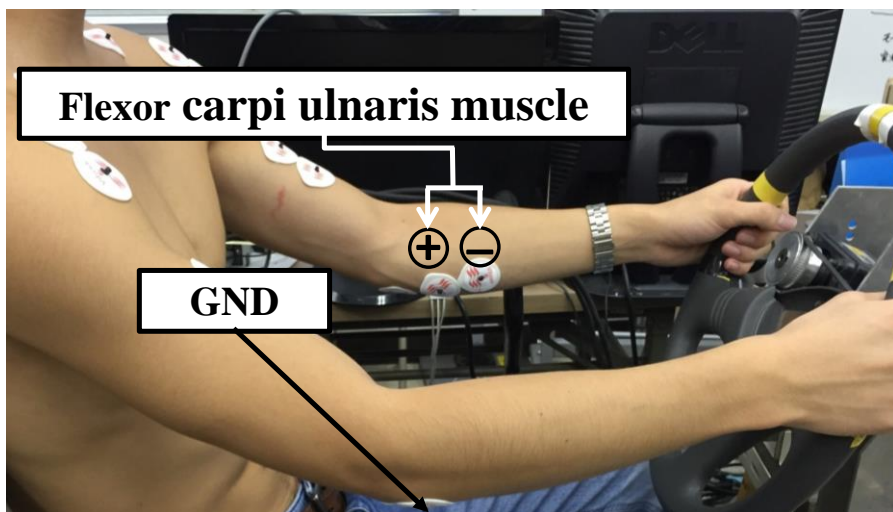
図 3-1 上肢における筋肉（三角筋前部，上腕二頭筋，尺側手根屈筋）の
模式図 [1-67]



図 3-2 表面筋電位の測定に用いた機器
右：AD Instruments 社製 PowerLab 2/26 ML826
左：AD Instruments 社製 BioAmp ML132

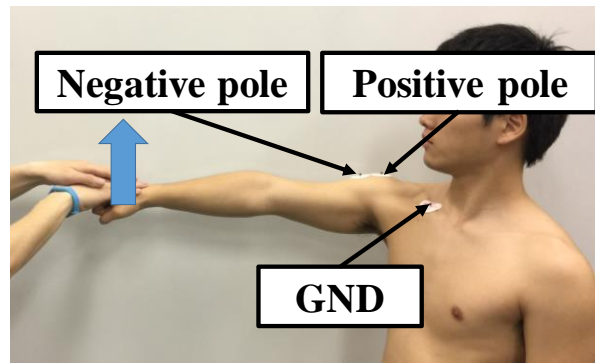


(a) 三角筋前部, 上腕二頭筋

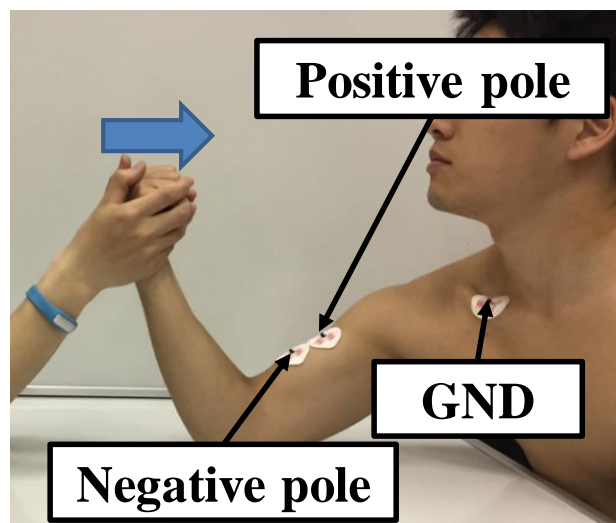


(b) 尺側手根屈筋

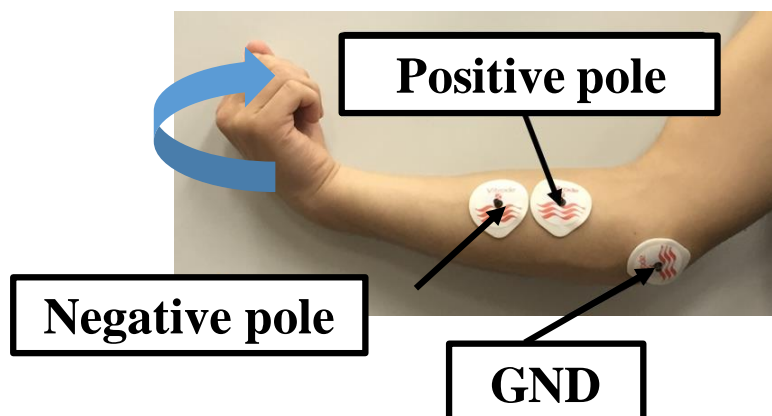
図 3-3 表面筋電位を測定するための電極の貼付位置 [1-67]



(a) 三角筋前部



(b) 上腕二頭筋



(c) 尺側手根屈筋

図 3-4 各筋肉における MVC の測定方法 [1-67]



図 3-5 ステアリングホイールの保持位置 (9 時 15 分の位置) [1-67]

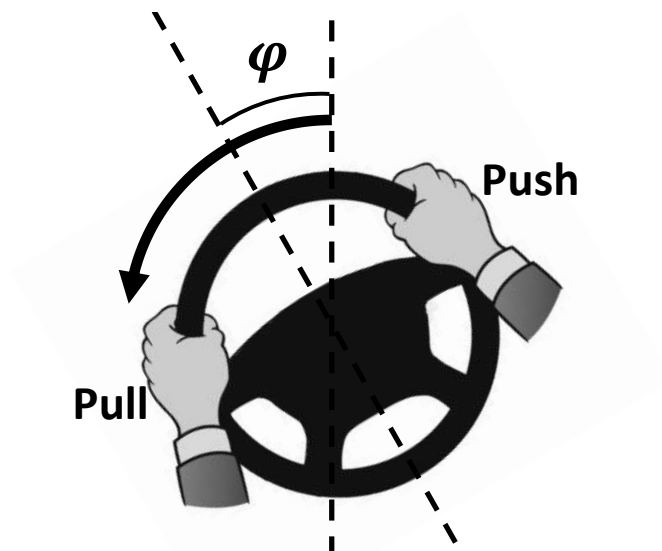


図 3-6 ステアリングホイール操作角 φ と送り手側と引き手側の定義 [1-67]

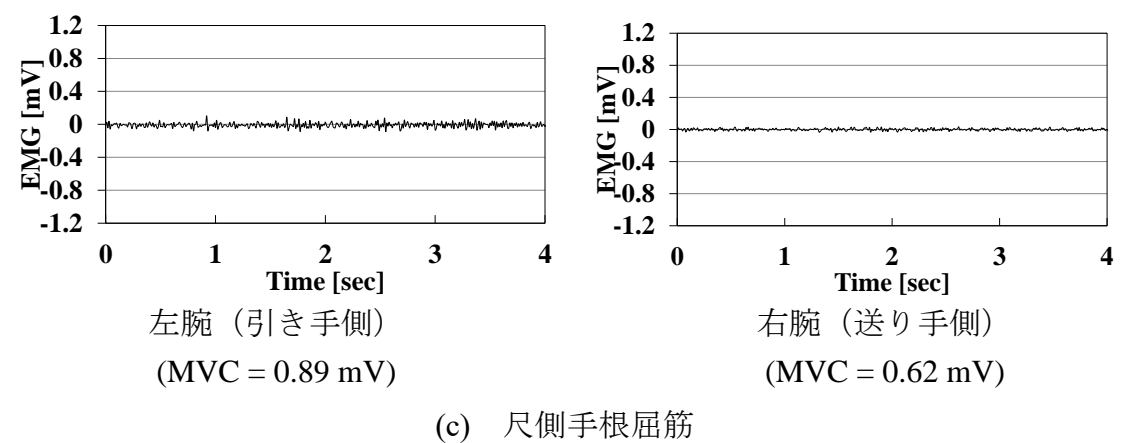
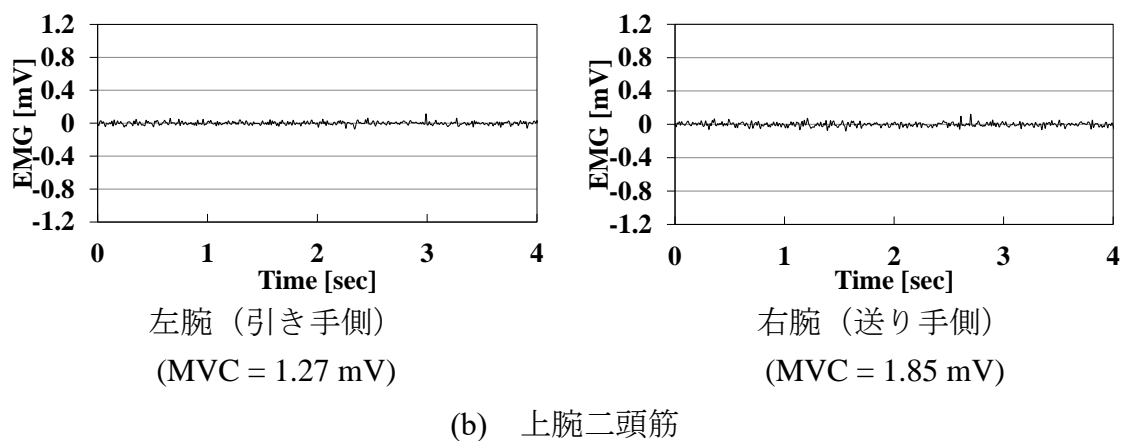
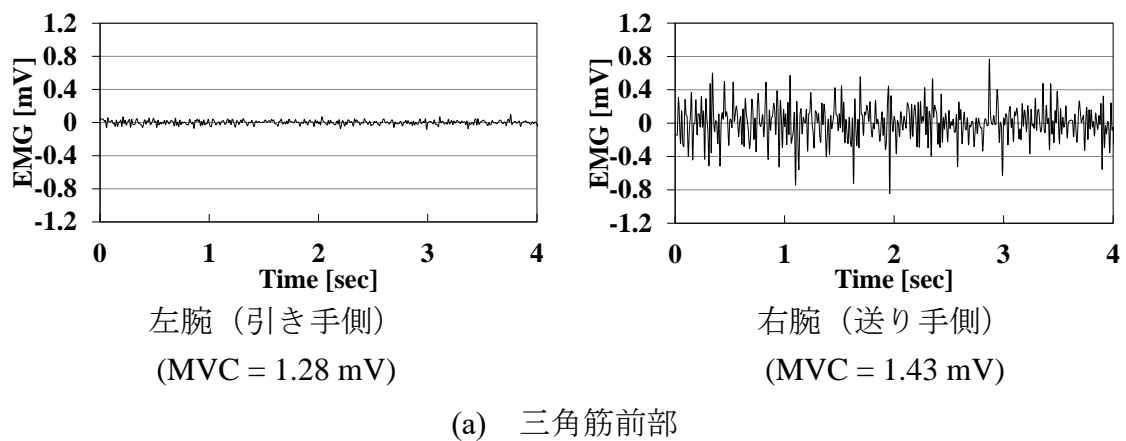


図 3-7 ステアリングを保持した際の各部表面筋電位の時刻歴 [1-67]

3.3 ステアリングホイール操作時の負担に関する主観評価 [1-67]

3.3.1 実験方法

運転者がステアリングホイールの操作角を一定に保持した際の上腕部の負担について、官能評価および三角筋前部の表面筋電位により評価を行った。実験協力者は普通自動車第一種運転免許を有する男子大学生 10 名である。実験内容は事前に説明し、東海大学「人を対象とする研究」の倫理規定の遵守に関しては書面をもって確認し、承諾を得た。

実験協力者は図 2-10 の実験車両を停車させた状態で運転姿勢をとり、ステアリングホイールの把持位置は図 3-5 に示す「9 時 15 分」とし、図 3-8 のように時計回りと反時計回りにそれぞれステアリングホイールの操作角を 0 deg., 45 deg., 90 deg. として 5 秒間保持するよう教示した。実験協力者の座高や腕の長さ、ステアリングホイール操作の癖などから、腕の重さをステアリングホイールにかけた場合は実験協力者によって傾向が大きく異なり、体系的な評価が行うことは非常に難しくなる。そのため本実験では実験協力者に腕の重さをステアリングにかけないよう教示して実験を行った。ステアバイワイヤシステムを実装する前の実験車両の機械式結合による操舵システムでは、停車・据え切り時に 1.4 N·m のトルクを必要とした。そこでステアリングホイールに設置した反力モータのトルクは停車・据え切り時のトルクを基準に 0 N·m, 0.7 N·m, 1.4 N·m, 2.1 N·m の 4 種類で行った。

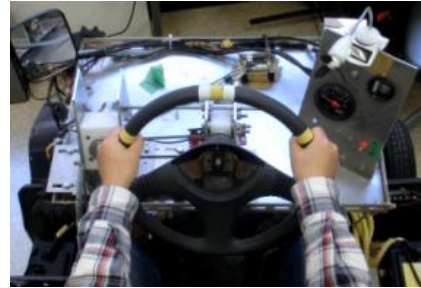
実験協力者は各操作角でステアリングホイールを 5 秒間保持したあと、送り手側の上腕部に感じる負担に関して図 3-9 に示す質問紙にて「非常に負担, 負担, やや負担, どちらでもない, やや楽, 楽, 非常に楽」の 7 段階で評価するよう教示した [3-6]。

3.3.2 実験結果

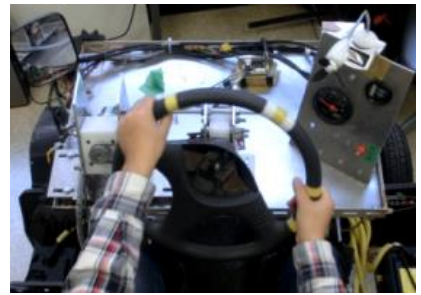
全実験協力者の主観評価の平均値を図 3-10 に示す。同図は送り手側のみの結果であり、(a)は時計回りに切り込んだ際の左腕上腕部、(b)は反時計回りに切り込んだ際の右腕上腕部である。両図より時計回り、反時計回りどちらの場合においても、操作角が 0 deg., 45 deg., 90 deg. とステアリングホイールを切り込んでいくに従って負担感が増加する傾向が確認できた。また反力の増加に伴い各角度での負担感も増加する傾向が得られた。



0 deg.



45 deg.



90 deg.



図 3-8 時計回りと反時計回りの操舵角度 [1-67]

Sensibility evaluation sheet

Reaction Force 0.0 N/m



0 deg.

Left arm

Much burden Burden Slight burden Neither Somewhat comfortable Comfortable Very comfortable

7 6 5 4 3 2 1

Right arm

Much burden Burden Slight burden Neither Somewhat comfortable Comfortable Very comfortable

7 6 5 4 3 2 1

45 deg.

Left arm

Much burden Burden Slight burden Neither Somewhat comfortable Comfortable Very comfortable

7 6 5 4 3 2 1

Right arm

Much burden Burden Slight burden Neither Somewhat comfortable Comfortable Very comfortable

7 6 5 4 3 2 1

90 deg.

Left arm

Much burden Burden Slight burden Neither Somewhat comfortable Comfortable Very comfortable

7 6 5 4 3 2 1

Right arm

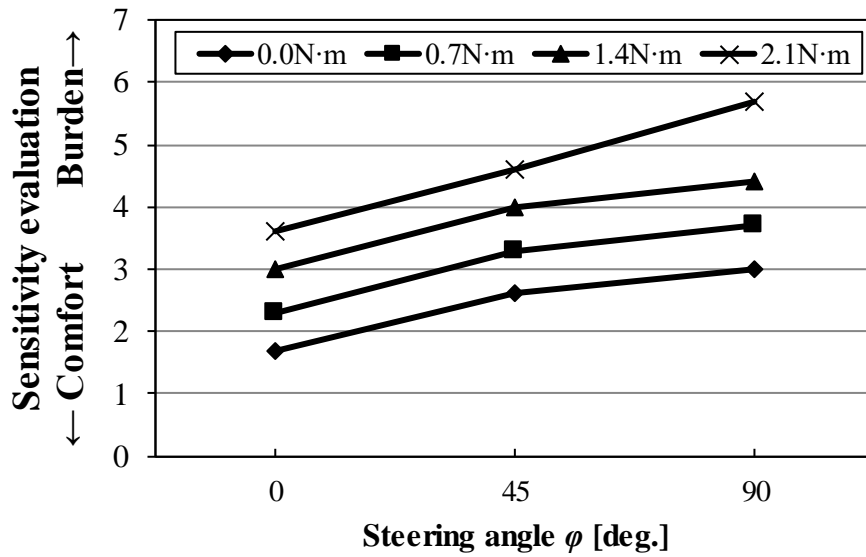
Much burden Burden Slight burden Neither Somewhat comfortable Comfortable Very comfortable

7 6 5 4 3 2 1

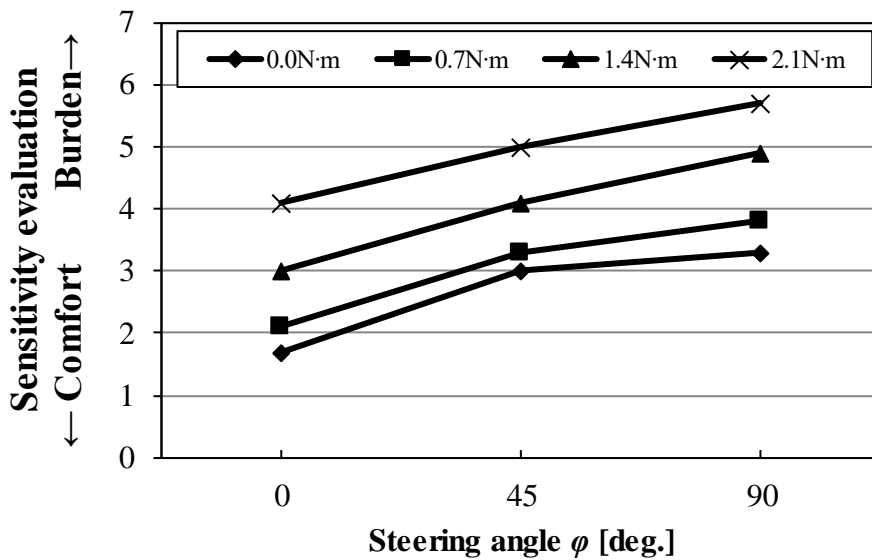
Much burden Burden Slight burden Neither Somewhat comfortable Comfortable Very comfortable

7 6 5 4 3 2 1

図 3-9 送り手側の上腕部に感じる負担に関する質問紙 [1-67]



(a) ステアリングホイールを時計回りに操作した場合
(左腕が送り手となる場合)



(b) ステアリングホイールを反時計回りに操作した場合
(右腕が送り手となる場合)

図 3-10 ステアリングホイールを操作した際に送り手側の上腕部に感じる負担の主観評価 [1-67]

3.4 筋電位計測によるステアリング操作時の負担評価 [1-67]

3.4.1 異なる操舵反力での操作角保持実験

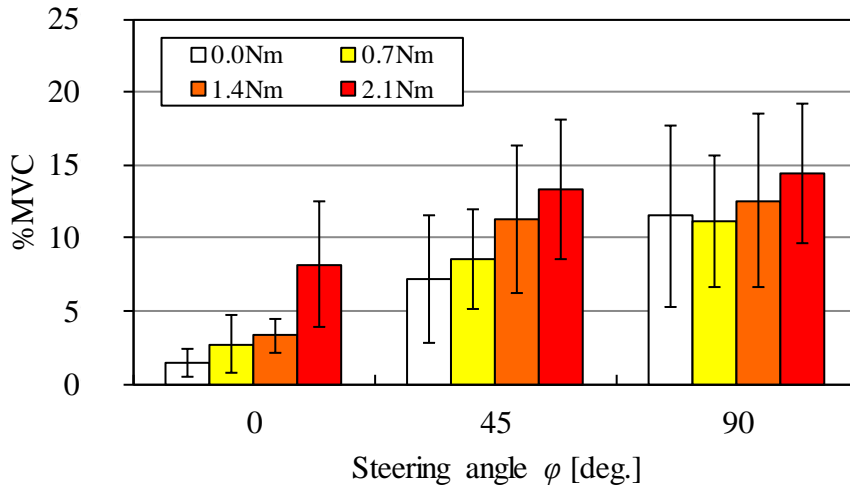
実験協力者は図 2-10 の実験車両に停車した状態で、反力モータの反力を $0.0 \text{ N}\cdot\text{m}$, $0.7 \text{ N}\cdot\text{m}$, $1.4 \text{ N}\cdot\text{m}$, $2.1 \text{ N}\cdot\text{m}$ に設定した状態でステアリングホイールの操作を行い、その際の三角筋前部の筋電位を測定した。実験協力者は図 3-5 に示した通り、9 時 15 分の位置でステアリングホイールを把持する。3.3 節の実験と同様に、実験協力者には各反力でステアリングホイールを 0 deg. , 45 deg. , 90 deg. で 5 秒間保持するよう教示した。実験は時計回りと反時計回りでそれぞれ行い、このときの送り手側の三角筋前部の表面筋電位を測定し、%MVC でステアリングホイールを保持したときの上肢の負担を評価した。実験協力者は前節と同じように、普通自動車運転免許を取得している 10 名の男子学生を対象とした。

3.4.2 実験結果および考察

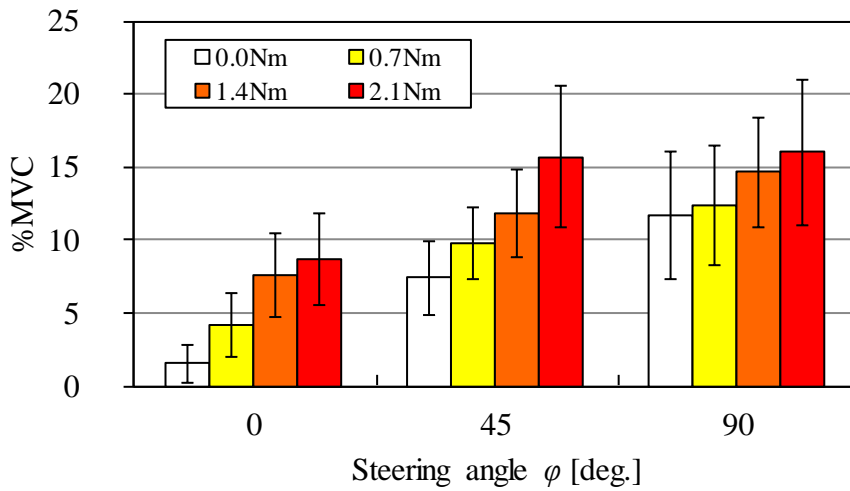
各ステアリングホイール操作角における実験結果を図 3-11 に示す。同図の縦軸は実験協力者 10 人の%MVC の平均値を示す。同図(a)の時計回りの結果において、いずれの反力モータのトルクで実験を行った場合でも、ステアリングホイールの操作角が増加するに従って、送り手となる左腕の三角筋前部の%MVC が大きくなっていることが分かる。同図(b)の反時計回りの結果でも同様にステアリングホイールの操作角が増加するに従って、送り手となる右腕の三角筋前部の%MVC が大きくなっていることが分かる。これはステアリングホイールを回す際に 90 deg. 付近の角度において腕を最も上げる動作が含まれることで%MVC の値が上昇したと考えられる。

また反力モータのトルクを増加させるといずれの操作角においても%MVC が増加しており、発生する反力に応じて上肢の負担が増加する傾向を確認することができた。

さらに前節の実験協力者の主観評価の結果と比較すると、三角筋の筋電位計測による定量的な負担評価の結果は主観評価の結果と同じ傾向であることが得られた。



(a) ステアリングホイールを時計回りに操作した場合
(左腕が送り手となる場合)



(b) ステアリングホイールを反時計回りに操作した場合
(右腕が送り手となる場合)

図 3-11 各ステアリングホイール操作角における送り手側三角筋前部の %MVC [1-67]

3.5 ステアバイワイヤシステムによるステアリングホイール操作の負担低減に関する検討 [1-68]

3.5.1 操作角による反力のフィードバックシステム

ステアバイワイヤシステムはステアリングホイールとラックアンドピニオンなどのタイヤの転舵機構の間に機械的結合が存在しないため、反力を任意に設定することができる。本節ではステアバイワイヤシステムの利点を活かして反力を任意に設定し、運転者のステアリングホイール操作の負担低減について検討する。これまでの実験結果から、ステアリングホイールの操作角を増加させていくと上肢の負担が増加し、ステアリングホイールで発生する反力が増加した場合にも負担が増加する傾向が得られた。そこでステアリングホイールの操作角に応じてステアリングホイールに発生する反力を変化させるシステムを構築し、ステアリングホイールの操作実験を行う。

ステアバイワイヤシステムではステアリングホイールの操舵角をロータリーエンコーダより検知し、操舵角の信号を DSP に入力し、操舵角に対応するステアリング反力を計算する。算出したステアリング反力信号をモータドライバに入力し、制御信号に変換してから、反力モータを駆動させる。そこで操舵角に応じて DSP から出力する反力信号を図 3-12 のように変化させた。同図の横軸はステアリングホイール操作角、縦軸はステアリングホイールに発生する反力である。同図(a)の反力一定パターンは駐車時もしくは停車時の据え切りを想定し、ステアリングホイールの操作角が変化しても、反力モータに一定のトルクを発生させる。同図(b)の反力増加パターンはステアリングホイールの操作角に比例して反力モータのトルクを増加させた。これは一定の速度で走行中にステアリングホイールを操作した際に発生するセルフアライニングトルクを簡易的に再現したものである。同図(c)の反力減少パターンはステアリングホイールの操作角に比例して反力モータのトルクを減少させた。これまでの検討からステアリングホイールの操作角が増加すると負担も増加していく傾向が見られた。このことから、ステアリングホイールの操作角が増加した際に反力を減少させて負担の低減を図った。

3.5.2 力学計算によるステアリング操作時の負担評価

まず力学モデルを用いてステアリングホイール操作時の運転者の上肢にかかる負

担を評価する。運転者のステアリングホイールとシートの位置関係が一定の場合、ステアリングホイールを操作すると図 3-13 のように肩関節における上腕と体幹のなす角度 θ が増加していく。このとき上腕の動きに着目すると、ねじり動作のような上腕の軸方向の回転はほとんど行われていない。そこで本研究はステアリングホイールの操作時の肩関節の運動は上腕の上下運動のみの平面的な動作であるとして、送り手側の肩関節にかかる負担を 2 次元的な力学的モデルにより検討した。本項では運転操作を行った際のステアリングホイール操作角に対する肩関節周りのモーメントを算出し、肩関節の負担として評価した。

運転者の送り手側の上肢を図 3-14 のようにモデル化した。ここで a : 肩関節から腕の重心までの距離 [m], b : 肩関節から手首までの距離 [m], W : 上肢の重量 [kgf], W_0 : ステアリングホイール反力により手首に加わる力 [kgf] である。同図における A 点は腕の肘関節であり、この点を腕の重心とした。B 点はステアリングホイールを把持する点であり、この点にステアリングホイールによる反力が作用するものとした。

ステアリングホイール操作角 $\varphi = 90 \text{ deg.}$ の時は図 3-14(a) のように腕がほぼ水平になっているとする。このとき上肢には腕の重さ W とステアリングホイール反力による重さ W_0 が垂直に作用するため W , W_0 に対するモーメント腕の長さはそれぞれ a , b である。したがって肩関節 (O 点) 回りのモーメント M_0 は、

$$M_0 = aW + bW_0 \quad (1)$$

となる。

一方、腕が屈曲した場合のモデルでは、図 4-2 (b) より肩関節から腕の重心までの距離 a' は肩関節の角度 θ によって変化し、

$$a' = a \sin \theta \quad (2)$$

となり、肩関節からステアリングホイールまでの距離 b' は

$$b' = a' + (b - a) \quad (3)$$

となる。式(2), (3)にて求めた a' , b' より肩関節回りのモーメント M_1 を算出すると以下のようなになる。

$$M_1 = a'W + b'W_0 \quad (4)$$

前節の実験協力者の身体パラメータを計測し、3 つの反力変化パターンでステアリング操舵操作する際の数値計算を行った。

一例として次項の操作実験における実験協力者の身体パラメータ ($b = 0.7 \text{ m}$, $W =$

3.6 kgf, $a=0.35$ m) の運転者が、前項で示したステアリングホイール操作角をフィードバックするシステムでステアリングホイール操作を行った際のステアリングホイール操作角に対する肩関節のモーメント M_1 の関係を図 3-15 に示す。同図(a)の反力一定パターンではステアリングホイール操作角の増加に対して肩関節モーメントは緩やかに増加する傾向が得られた。同図(b)の反力増加パターンでは操作角の増加に対して肩関節モーメントは大きく増加し、同図(c)の反力減少パターンでは同図(c)の反力減少パターンではステアリングホイール操作角の増加に対して肩関節モーメントは大きく減少した。

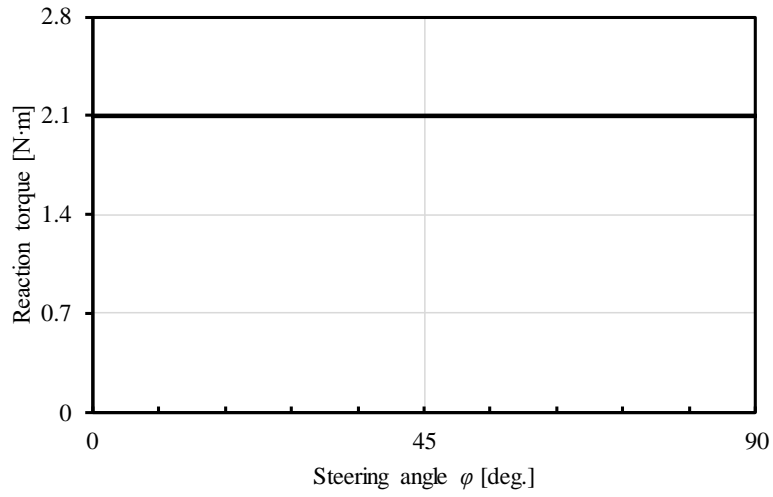
3.5.3 操舵角反力フィードバックシステムを用いた連続操舵実験

ステアリングホイール操作を行った際の運転者の上肢の負担を定量的に評価するため、ステアリングホイール操作角によって反力モータのトルクを変化させたステアバイワイヤシステムでステアリングホイールの操作実験を行った。実験車両を停車させた状態で、実験協力者は各反力パターンを適用した状態でステアリングホイールの操作を行い、その際の三角筋前部の筋電位を測定した。ステアリングホイールの反力トルクは図 3-12 に示すように、ステアリングホイールの角度に応じて一定、増加、減少 3 つのパターンで設定し、ステアリングホイールの操作方向は時計回りと反時計回りでそれぞれ実験を行った。それぞれ送り手となる方の三角筋前部の筋電位を測定するため、時計回りの場合は左腕にし、反時計回りの場合は右腕の表面筋電位を測定した。三角筋前部の表面筋電位は前節と同様の方法で測定し、筋電位原波形に対して 0.1 秒間毎に 0.1 秒区間の RMS を算出した。筋力の発揮には個人差があることから、%MVC で評価を行った。本実験の操作条件においては、実験車両を停車させた状態で実験協力者に 9 時 15 分の位置でステアリングホイールを握るよう教示し、持ち替えることなくステアリングホイール頂点の目印箇所を 0 deg.として 90 deg.まで操舵を行うものとした。なおステアリングホイールの操作速度は 45 deg./s とした。

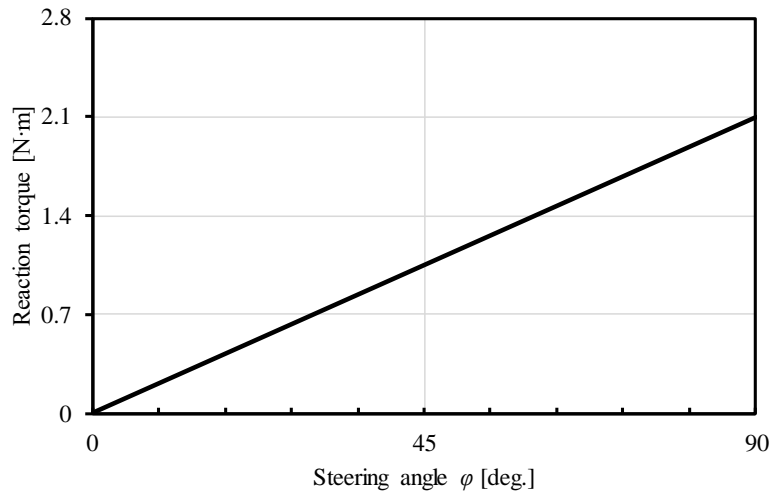
3.5.4 実験結果および考察

それぞれの反力パターンでステアリングホイールを操作したときの、送り手側の三角筋前部表面筋電位の時刻歴を図 3-16 に実線で示す。同図中の破線はステアリング

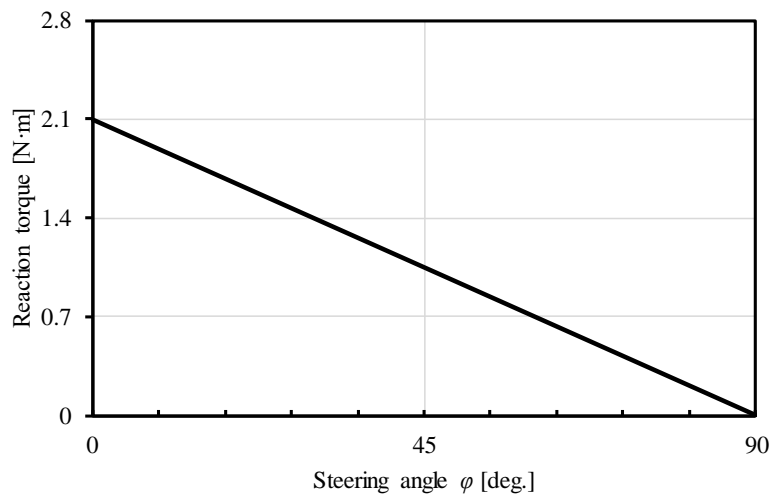
ホイールに反力トルクを発生しないときの **RMS** 時刻歴であり，太い実線は反力トルクの時刻歴である．同図(a)の反力トルクが一定の場合，同図(b)の反力トルクが増加した場合は，ステアリングホイール操作角の増加に伴い，送り手側の筋電位も増加していることを確認できた．同図(c)の反力トルクが減少する場合，最初の1秒間 ($\varphi = 0 \text{ deg.} \sim 45 \text{ deg.}$) に操舵角が増加することにつれて筋電位も増加していくが，1～2s ($\varphi = 45 \text{ deg.} \sim 90 \text{ deg.}$) の区間においては操舵量が増加しても，筋電位は減少していく傾向を確認できた．図中の破線との差分がステアリングホイール操作角のフィードバックによる負担となるが，それぞれ図 3-15 に示した力学モデルによるステアリングホイール操作時の上肢負担の結果と傾向が一致した．このことから，操舵量が同じ場合，ステアリングホイール操作角に応じてステアリングホイールでの反力を調整することで，ステアリングホイール操作時の操舵負担を軽減することを期待できる．



(a) 反力一定パターン

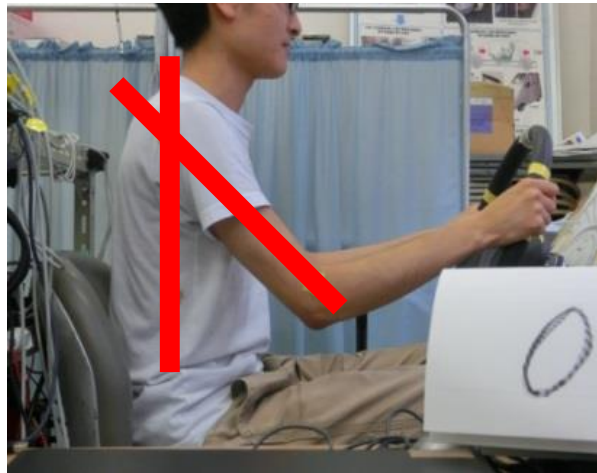


(b) 反力増加パターン

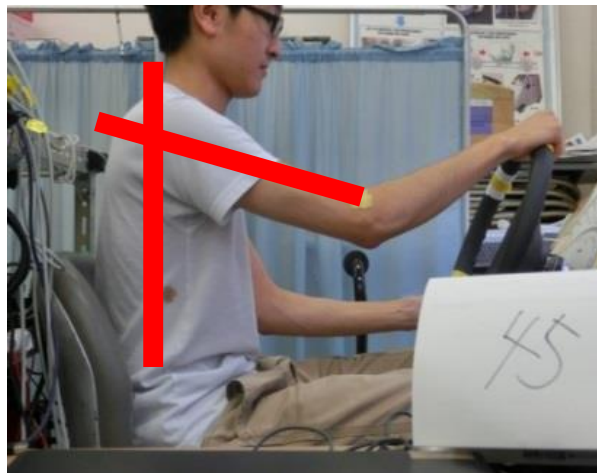


(c) 反力減少パターン

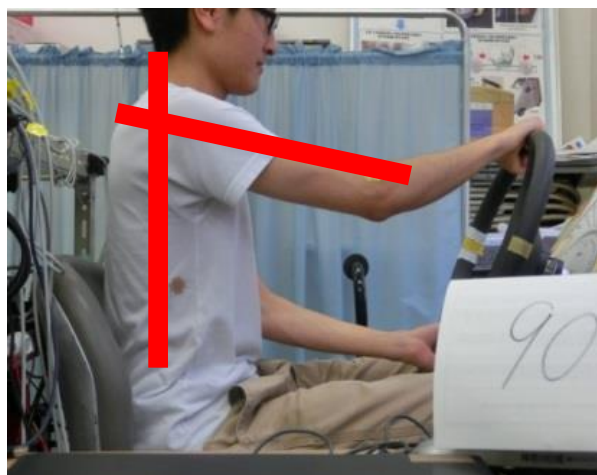
図 3-12 ステアリングホイール操作角に対して発生させるトルク [1-68]



(a) $\varphi = 0$ deg.

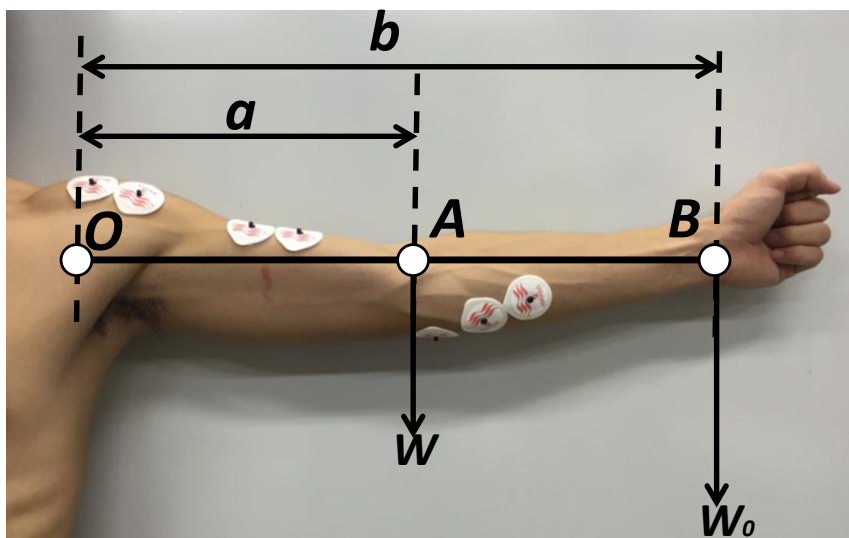


(b) $\varphi = 45$ deg.

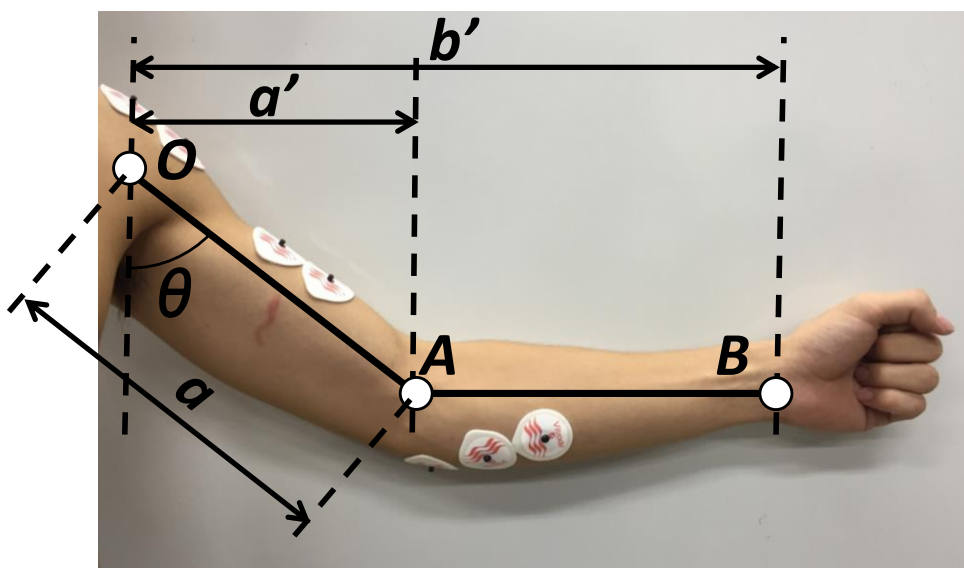


(c) $\varphi = 90$ deg.

図 3-13 操舵角 φ における肩関節角度 θ の変化 [1-67]

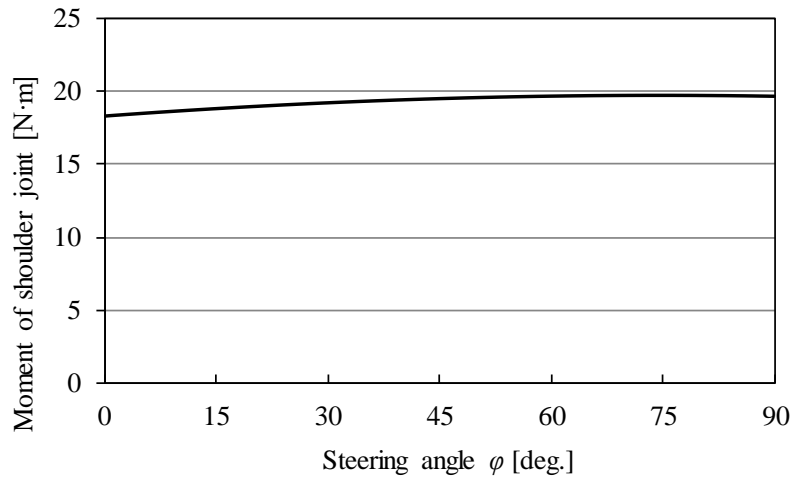


(a) 腕を水平に伸ばした状態 ($\varphi = 90$ deg.)

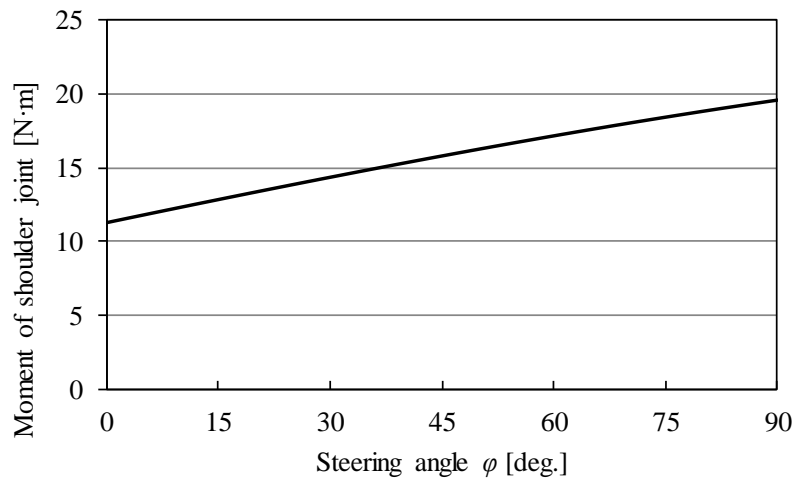


(b) 肩関節角度を変化させた状態

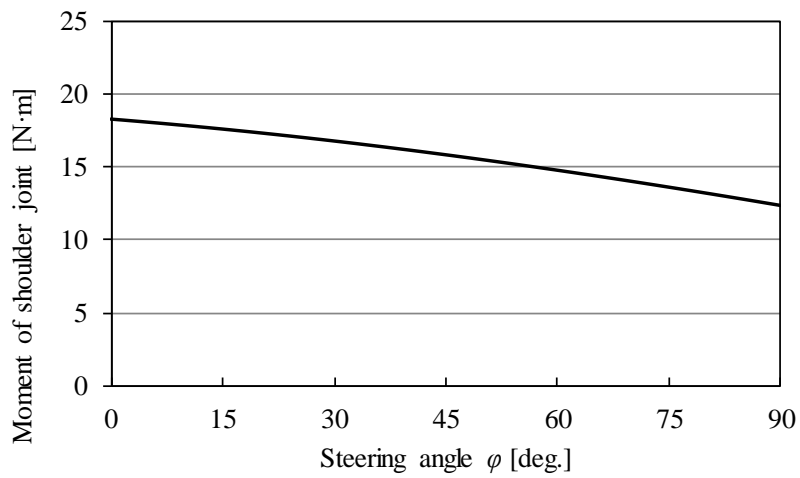
図 3-14 送り手側上肢の力学モデル [1-67]



(a) 反力一定パターン

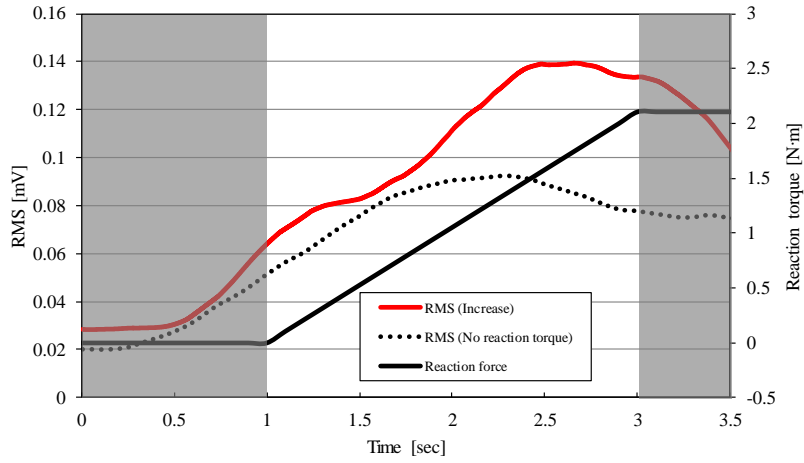


(b) 反力増加パターン

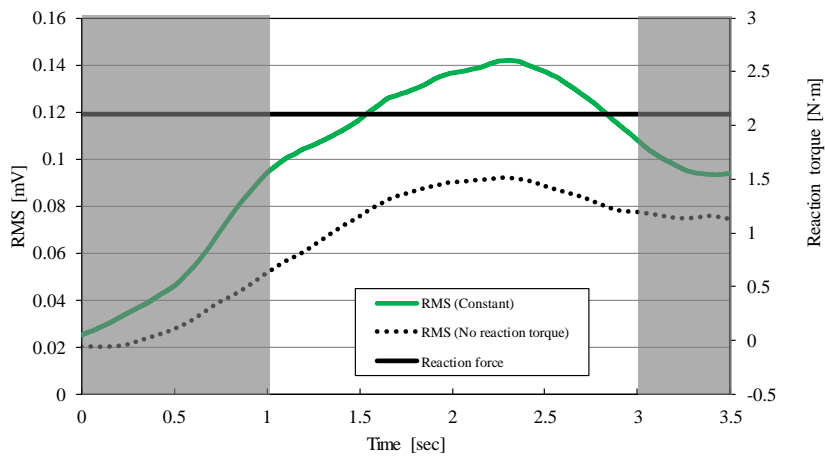


(c) 反力減少パターン

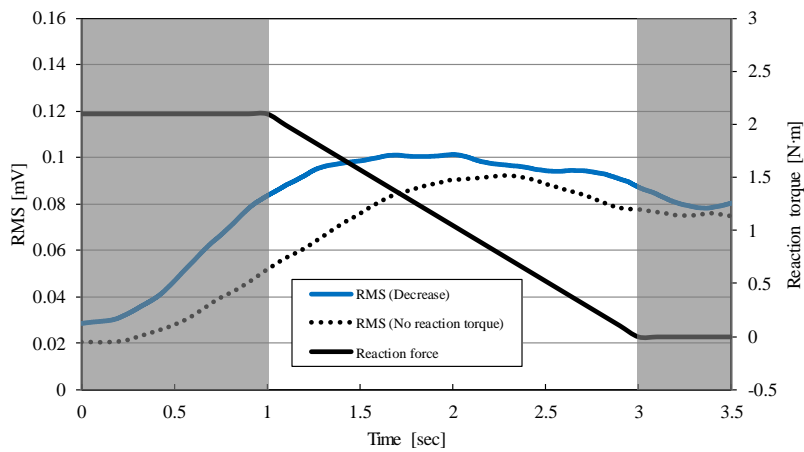
図 3-15 力学モデルにて算出したステアリングホイール操作時に肩関節に発生するモーメント



(a) 反力増加パターン



(b) 反力一定パターン



(c) 反力減少パターン

図 3-16 各反力パターンに対する送り手側三角筋前部の表面筋電位の時刻歴 [1-68]

3.6 まとめ

第3章は操舵状況による腕部筋活動について検討を行った。操舵操作を行う際の上肢部の負担を定量的に評価するために、非侵襲式でステアリングホイールを操作する際に最も活発となる筋肉を特定できた。また、質問紙を用いて実験協力者がステアリングホイールを操作する際の負担に関する主観評価を行い、ステアリングホイールの操作量と負担感の関係性を明らかにした。さらに、ステアリングホイール操作中の実験協力者の筋肉の表面筋電位を計測し、主観評価の結果と比較し、両者が同じ傾向になっていることから表面筋電位測定による上肢負担評価の有用性を示すことができた。

またステアリングホイールの操作角に応じてステアリングホイールの反力を変化させるフィードバックシステムを構築した。本システムを用いて、連続してステアリングホイールを操作したときの筋電位を計測し、本システムを使用した時の操舵負担低減の可能性を確認できた。また力学的観点からステアリングホイール操作時の負担を算出し、測定した筋電位の測定結果と同様の傾向であることが確認できた。

第4章

運転姿勢変化による筋負担変化に関する実験

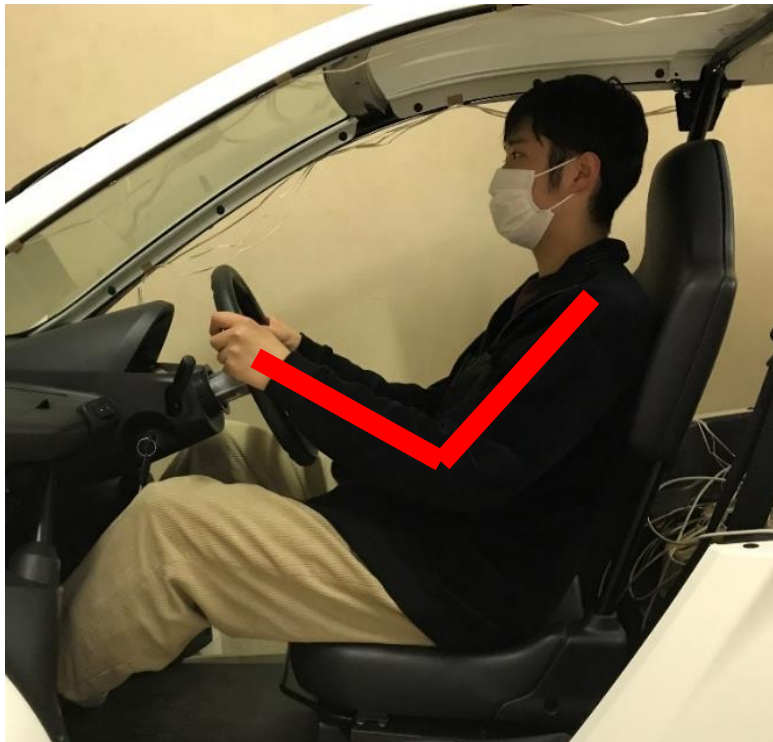
4.1 本章の目的

第4章は運転姿勢変化による筋負担変化について検討を行う。超小型モビリティはシートの調整量が少ないため、運転者が利用時に適切な運転姿勢が取れない課題がある。調整量の少ない超小型モビリティに乗車すると、運転姿勢は運転者の体格によって図4-1のように著しく異なる。このため運転者の体格によっては適切な運転姿勢が取れず、ステアリングホイールを操作する際の負担が増加する可能性がある。

そこで本章は運転者の体格がステアリングホイール操作負担への影響を検討する。まず実験協力者を体格によって3つのグループに分類した [4-1]。各体格グループが前章で構築したステアリングホイールの操作角をステアリングホイールの反力にフィードバックするシステムにおいてステアリングホイールを操作した際の筋負担について力学的に検討した。そして実験車両を用いてステアリングホイールの操作実験を行い、各体格グループの実験協力者の三角筋前部の筋電位を測定し、体格がステアリングホイール操作の負担に与える影響について検討を行った。加えてそれぞれの体格にグループにおいて、ステアリングホイールの操作角を反力トルクにフィードバックするシステムの負担低減効果について検討を行った。



(a) 身長 175.5 cm



(b) 身長 180.1 cm

図 4-1 体格が異なる運転者の運転姿勢の比較

4.2 運転者の体格が操作負担に与える影響 [1-69]

4.2.1 体格が操舵操作の負担に与える影響に関する力学的検討

体格の異なる運転者が超小型モビリティのような限定された車両でステアリングホイール操作を行う際の負担を評価するため、実験協力者の身長、体重、腕の長さおよび重量を測定した。実験協力者は、乗用車の運転免許を持つ男子学生 15 名である。実験内容は事前に説明し、東海大学「人を対象とする研究」の倫理規定の遵守に関しては書面をもって確認し、承諾を得た。

測定した実験協力者の身体パラメータを表 4-1 に示す。腕の重量を測定するには、実験協力者の腕を地面と水平にし、腕を軽く曲げて、肩に力をかけない状態で電子天秤に置いて、上肢の重量を測定した [4-1], [4-2]。実験協力者の身長と腕の全長の関係を図 4-2 に示す。同図より身長と腕の全長には正の相関関係があり、身長が高い実験協力者ほど腕の全長が長くなる傾向が得られた。本章では、実験協力者を腕の全長で 3 つのグループに分けて検討を行う。腕の全長が 0.70 m 未満の実験協力者をグループ I、腕の全長が 0.75 m 以上の実験協力者をグループ III、それ以外の実験協力者をグループ II と定義する。

まず、各体格グループの実験協力者がステアリングホイールを操作した際に、それぞれの操作角における肩関節角度を計測した。各体格グループの傾向を把握するために、各体格グループの代表者の測定結果を図 4-3 に示した。グループ別に比較すると、全てのグループにおいて、ステアリングホイール操作角の増加につれて、肩関節の角度も増加する傾向が確認できた。また、腕の全長が長いグループほど肩関節角度が小さくなることが分かった。これはステアリングホイールとシートの位置が固定されている場合、腕の全長が長い運転者ほど小さな肩関節角度でステアリングホイールを操作できることを示す。同図よりステアリングホイールの切れ角が 45 deg. までは肩関節の角度が線形に増加することが確認でき、45 deg. を過ぎると緩やかに増加することが分かる。

この結果を用いて、ステアリングホイールに発生する反力が一定の場合の肩関節に発生するモーメントを算出し、ステアリングホイール操作時の負担を評価する。各体格グループにおいて平均的なパラメータの実験協力者がステアリングホイールを操作した際の各操作角における肩関節モーメントを図 4-4 に示す。同図より、3 つのグループのモーメントが同じ傾向を示し、ステアリングホイールの操作角が増加するに

従って、肩関節回りのモーメントが増加した。また、いずれのステアリングホイール操作角において、腕の全長の長いグループIIIの肩関節モーメントが他の体格の実験協力者と比較して最も大きくなった。この結果から、腕の全長が長い運転者ほど肩関節の負担が増加することが分かった。

4.2.2 筋電位測定による体格が操舵操作の負担に与える影響の検討

各体格グループの実験協力者のステアリングホイール操作時の表面筋電位を計測し、定量的に評価を行う。実験条件は、停車した実験車両において実験協力者にステアリングホイール操作をさせ、その際の実験協力者の送り手側の三角筋前部の表面筋電位を計測する。実験協力者に9時15分の位置でステアリングホイールを握るよう教示し、ステアリングホイールを持ち替えることなく0 deg.から90 deg.まで操作するよう教示した。実験は時計回り、反時計回りでそれぞれ行い、ステアリングホイールの操作速度は45 deg./sとした。送り手側の三角筋前部の表面筋電位は前章で述べた方法で測定し、%MVCを算出して負担を評価した。各体格グループにおける実験協力者の%MVCの平均値を図4-5に示す。同図より腕の全長が最も長いグループIIIの%MVCが最も高くなり、腕の全長が長い運転者ほどステアリングホイール操作時に活発に活動する三角筋前部の負担が大きいことが得られた。

表 4-1 実験協力者の身体パラメータ [1-69]

| Participant | Body height [m] | Body weight [kgf] | Arm length b [m] | Upper arm length a [m] | Forearm length $b-a$ [m] | Arm weight [kgf] |
|-------------|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|
| A | 1.65 | 59.7 | 0.66 | 0.24 | 0.42 | 3.4 |
| B | 1.71 | 65.4 | 0.67 | 0.24 | 0.43 | 3.6 |
| C | 1.66 | 57.3 | 0.65 | 0.23 | 0.42 | 3.5 |
| D | 1.71 | 64.0 | 0.66 | 0.20 | 0.46 | 3.4 |
| E | 1.72 | 79.8 | 0.70 | 0.25 | 0.45 | 4.7 |
| F | 1.69 | 58.0 | 0.71 | 0.27 | 0.44 | 3.0 |
| G | 1.75 | 65.4 | 0.73 | 0.28 | 0.45 | 3.9 |
| H | 1.71 | 56.3 | 0.70 | 0.26 | 0.44 | 3.1 |
| I | 1.71 | 68.5 | 0.72 | 0.28 | 0.44 | 3.6 |
| J | 1.73 | 48.1 | 0.70 | 0.26 | 0.44 | 2.7 |
| K | 1.77 | 63.5 | 0.72 | 0.27 | 0.45 | 3.8 |
| L | 1.78 | 67.0 | 0.75 | 0.28 | 0.47 | 3.9 |
| M | 1.81 | 75.2 | 0.77 | 0.29 | 0.48 | 4.0 |
| N | 1.73 | 74.0 | 0.75 | 0.29 | 0.46 | 4.4 |
| O | 1.77 | 65.8 | 0.77 | 0.32 | 0.45 | 4.2 |

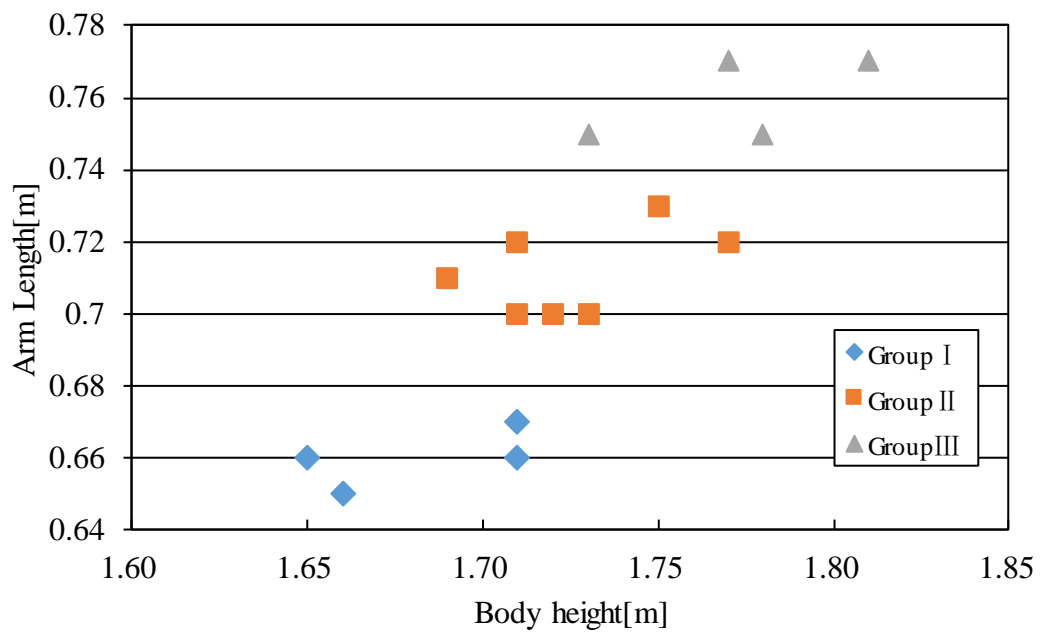


図 4-2 実験協力者の身長と腕の全長の関係 [1-69]

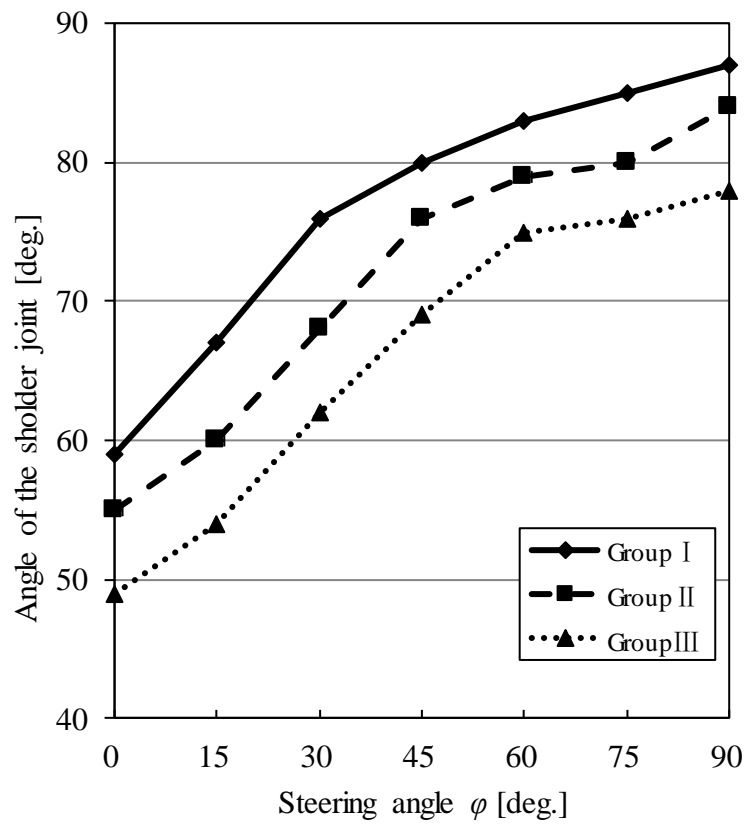


図 4-3 各体格グループにおける操作角度 φ と肩関節角度 θ の関係 [1-69]

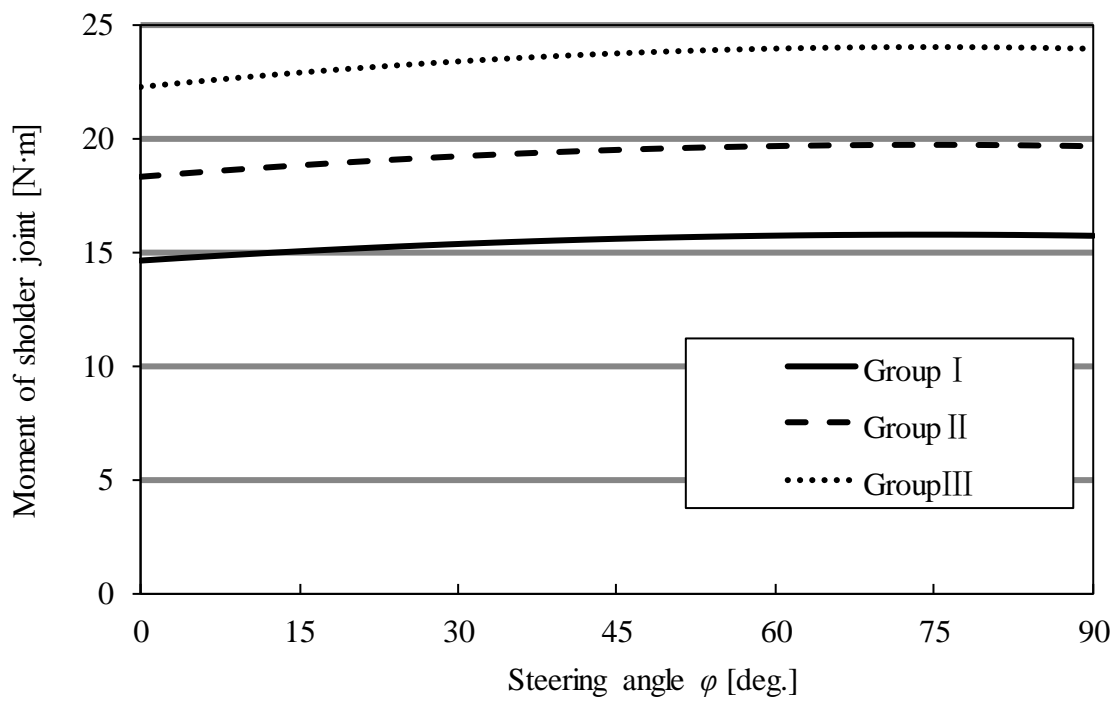
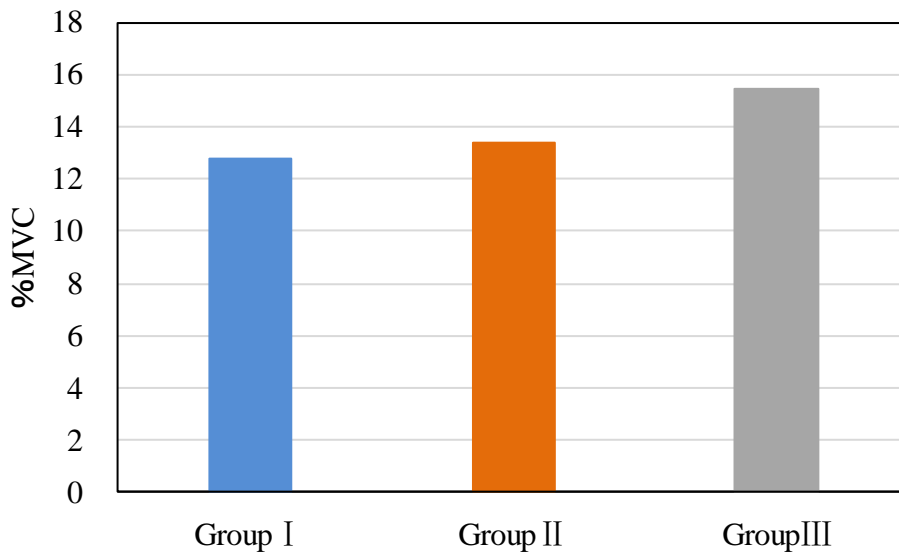
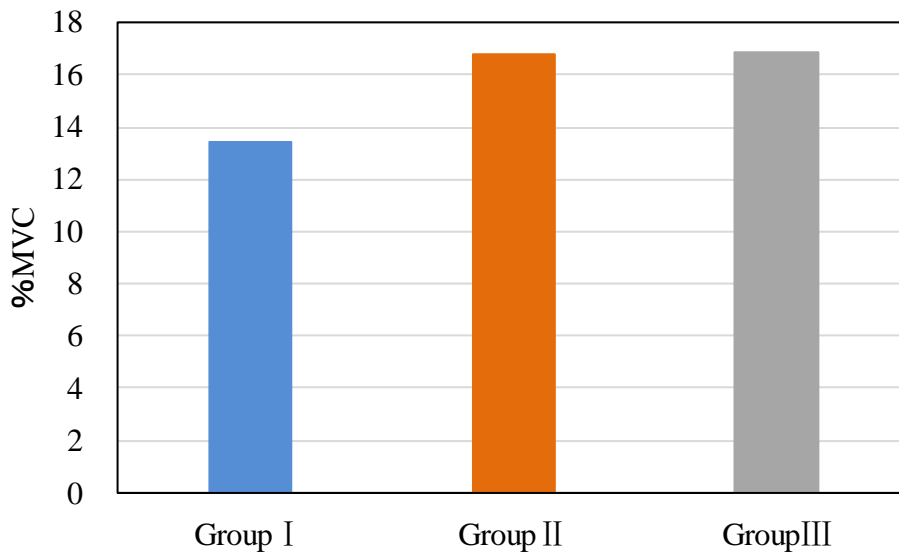


図 4-4 操作角度 φ と肩関節モーメント M_1 の関係 [1-69]



(a) ステアリングホイールを時計回りに操作した場合
(左腕が送り手となる場合)



(b) ステアリングホイールを反時計回りに操作した場合
(右腕が送り手となる場合)

図 4-5 各体格グループにおけるステアリングホイール操作時の%MVC の平均値

[1-69]

4.3 操作角フィードバックによる負担低減 [1-69]

4.3.1 操作角フィードバックが負担に与える影響に関する力学的検討

これまでの検討により、腕の全長が長い運転者が超小型モビリティを運転する際に、腕の全長が短い運転者よりも、同じステアリングホイール操作における肩関節にかかるモーメントが大きいことが得られた。特にステアリングホイール操作角が大きい姿勢において、肩関節にかかるモーメントが大きいことが得られた。

そこで、前章で提案したステアリングホイールの操作角をステアリングホイールで発生する反力にフィードバックする制御を行った際に、ステアリングホイール操作の負担に与える影響について、力学モデルを用いた検討と表面筋電位を用いた検討から考察する。

まず前章で述べた力学モデルを用いて、操作角のフィードバックを行った際の肩関節回りのモーメントを算出する。適用する操作角フィードバックの反力変化のパターンは図 3-12 に示す通りステアリングホイールの操作角に応じてステアリングホイールに発生する反力トルクを一定、増加と減少の3種類のパターンで解析を行った。各反力パターンにおける操作角と各体格グループの肩関節に発生するモーメントの関係を図 4-6 に示す。同図より、反力一定のパターンと反力増加のパターンでは、ステアリングホイール操作角が増加すると肩関節モーメントが増加し、反力減少のパターンでは肩関節モーメントが減少することが分かった。またどの反力パターンを適用した場合でも、腕の全長が最も長いグループⅢの実験協力者の肩関節回りのモーメントが大きく、肩関節に掛かる負担が大きいことがわかった。

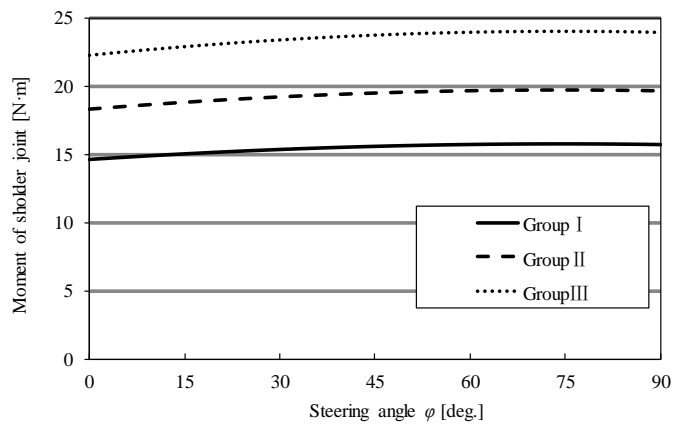
4.3.2 筋電位測定による操作角フィードバックがステアリングホイール

操作の負担に与える影響に関する検討

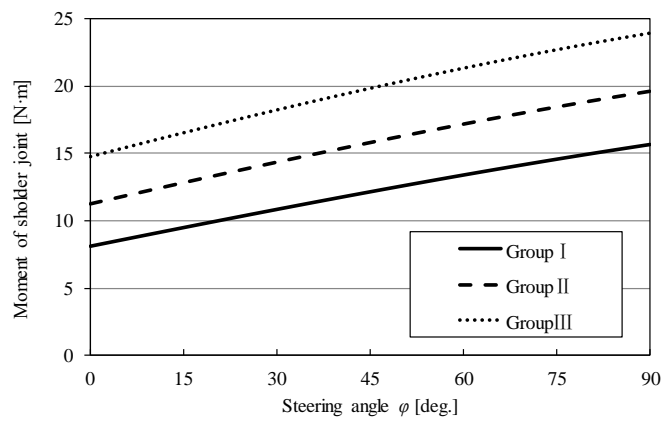
各体格グループの実験協力者のステアリングホイール操作時の表面筋電位を計測し、定量的に評価を行う。実験条件は前節と同様に、停車した実験車両において実験協力者にステアリングホイール操作をさせ、その際の実験協力者の送り手側の三角筋前部の表面筋電位を計測する。このとき図 3-12 に示す通りステアリングホイールの操作角に応じて反力モーメントが発生するトルクを一定、増加と減少の3種類のパターン

に設定して実験を行った。実験協力者に 9 時 15 分の位置でステアリングホイールを握るよう教示し、ステアリングホイールを持ち替えることなく 0 deg. から 90 deg. まで操作するよう教示した。実験は時計回り、反時計回りでそれぞれ行い、ステアリングホイールの操作速度は 45 deg./s とした。送り手側の三角筋前部の表面筋電位は前章で述べた方法で測定し、%MVC を算出して負担を評価した。

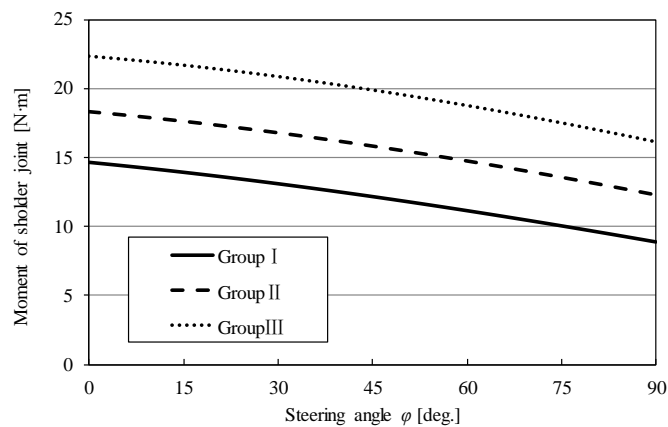
全実験協力者の各反力パターンにおける反時計回りの%MVC を体格のグループごとに図 4-7 に示す。いずれの体格に属する実験協力者においても反力パターンが一定の場合に%MVC が高く、減少のパターンで最も%MVC が低い結果を示した。さらに各体格グループに属する実験協力者のそれぞれの反力パターンにおける%MVC の平均値を図 4-8 に示す。時計回り、反時計回りどちらの結果においても同様の傾向を示すことが確認できる。この結果から、超小型モビリティのようなステアリングホイールとシート位置の位置関係が限定されている条件においてステアリングホイールを操作する際に、どのような反力変化パターンにおいても、腕の長い運転者ほど、操作時の負担が大きいことが分かった。また腕の全長が最も短いグループIの反力が一定の場合における%MVC よりも、腕の全長が最も長いグループIIIの反力を減少させた場合の%MVC が小さくなった。このことから、超小型モビリティに乗車した際に適切な運転姿勢がとれない体格の大きい運転者であっても、ステアリングホイールに発生させる反力を調整することで、負担の少なくなる体格が小さい人が反力一定で操作した場合よりも負担の低い運転環境を構築できると考えられる。



(a) 反力一定パターン

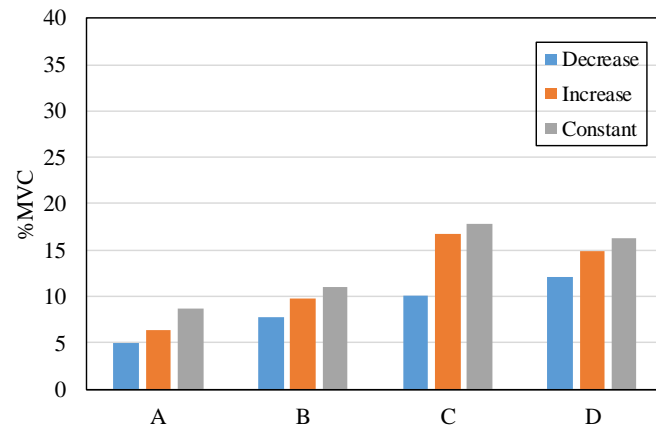


(b) 反力増加パターン

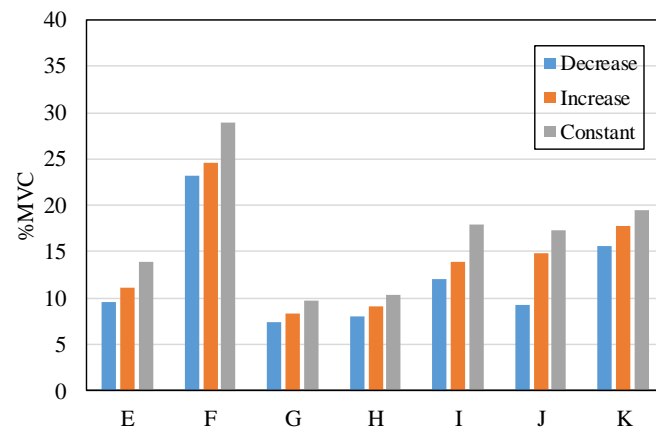


(c) 反力減少パターン

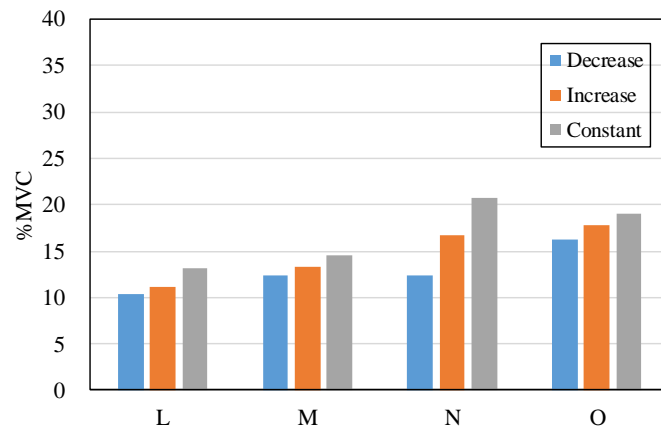
図 4-6 各反力パターンにおける操作角 ϕ と各体格グループの肩関節に発生するモーメント M_1 の関係 [1-69]



(a) グループI

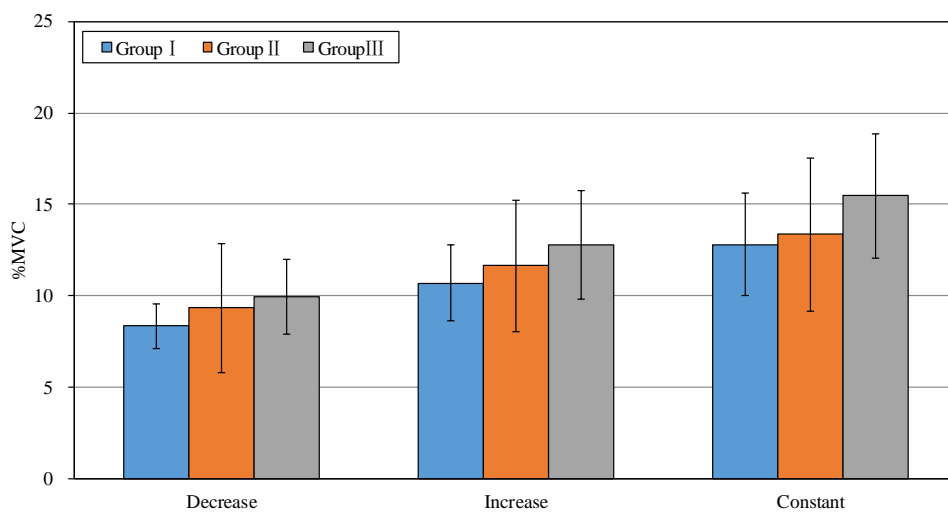


(b) グループII

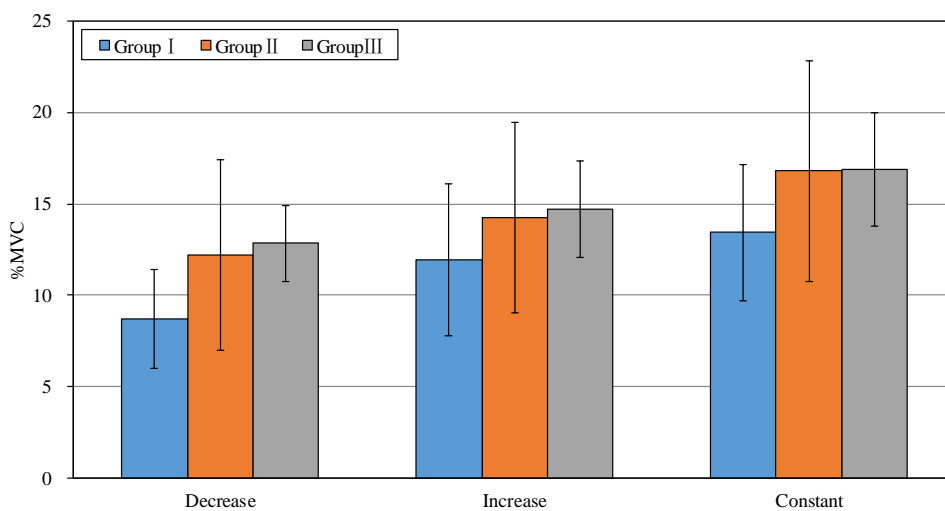


(c) グループIII

図 4-7 実験協力者の送り手の筋電位計測結果



(a) ステアリングホイールを時計回りに操作した場合
(左腕が送り手となる場合)



(b) ステアリングホイールを反時計回りに操作した場合
(右腕が送り手となる場合)

図 4-8 各反力パターンにおける%MVC の平均値 [1-69]

4.4 まとめ

第4章は運転姿勢変化による筋負担変化について検討を行った。超小型モビリティはシートの調整量が少ないことから、運転者が利用時に適切な運転姿勢が取れない課題がある。実験協力者を身長と腕の全長からグループ分けを行い、各体格グループの操舵時の筋負担について力学モデルから算出した。その結果、超小型モビリティの限られている車室空間で操舵動作を行う際に、体格差が起因でステアリングホイール操作時の負担への影響を明らかにした。

また、前章のステアリングホイールの操作角をフィードバックしてステアリングホイールの反力を制御するシステムを用い、実験協力者のステアリングホイール操作時の負担の評価を行った。その結果、超小型モビリティを利用時に適切な運転姿勢が取れない課題に対し、操舵反力を動的に変化させることで、操舵時の負担を低減させることの可能性を示した。

第5章

結論

本研究では1人から2人乗りの超小型モビリティに着目し、この車両に搭載可能なステアバイワイヤシステムについて研究を行った。まず超小型モビリティに機械的結合を持たないステアバイワイヤシステムを構築した。また運転時の操作に関する負担について定量的に評価し、構築したステアバイワイヤシステムによる負担低減について研究を行った。

以下に各章において得られた研究結果について述べる。

第1章では本論文にて行った研究の背景となる超小型モビリティの普及とその操舵を補助するシステムの現状について明らかにした。さらに、本研究にて用いたステアバイワイヤシステムの概要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章では、ロータリーエンコーダによりステアリング角度を検知し、DSPに入力し、ステアリングモータを駆動することで機械的な連結のない操舵システムを構築した。また、ステアリングホイールに設置した反力モータをステアリング角度に応じて駆動することで、ステアリングホイールで反力を発生させることができた。

上記のシステムで、超小型モビリティのステアリングシステムの簡略化およびシートポジションの調整量が少ないという超小型モビリティの操作性に関する課題に対し、機械的な連結がなく、操舵角とタイヤの切れ角の仮想ギア比を無段階で調整でき、操舵反力を自在に設定することができるステアバイワイヤを構築できた。

第3章では、ステアリングホイールを操作した際の腕部筋活動について検討を行った。操舵操作を行う際の上肢部の負担を定量的に評価するために、非侵襲式で上肢の表面筋電位を測定し、ステアリングホイールを操作する際に最も活発となる筋肉を特定できた。また、アンケートを用いて実験協力者の操作時の負担の主観評価実験を行い、ステアリングホイールの操作量と負担感の関係性を明らかにした。さらに、ステアリングホイール操作中の実験協力者の筋肉の表面筋電位を計測し、主観評価の結果と比較し、両者が同じ傾向になっていることから表面筋電位測定による上肢負担評価の有用性を示すことができた。

またステアリングホイールの操作角に応じてステアリングホイールの反力を変化させるフィードバックシステムを構築した。本システムを用いて、連続してステアリングホイールを操作したときの筋電位を計測し、本システムを使用した際の操舵負担低減の可能性を確認できた。また力学的観点からステアリングホイール操作時の負担を算出し、測定した筋電位の測定結果と同様の傾向であることが確認できた。

第4章では運転姿勢変化による筋負担変化について検討を行った。超小型モビリティはシートの調整量が少ないことから、運転者が利用時に適切な運転姿勢が取れない課題がある。実験協力者を身長と腕の全長でグループ分けを行い、各体格グループの操舵時の筋負担について力学モデルから算出した。その結果、超小型モビリティの限られている車室空間で操舵動作を行う際に、体格差が起因でステアリングホイール操作時の負担への影響を明らかにした。

また、前章のステアリングホイールの操作角をフィードバックしてステアリングホイールの反力を制御するシステムを用い、実験協力者のステアリングホイール操作時の負担の評価を行った。その結果、超小型モビリティを利用時に適切な運転姿勢がとれない課題に対し、操舵反力を動的に変化させることで、操舵時の負担を低減させることの可能性を示した。

上記の知見から今後の展望としては、操作負担に加え、運転者一人ひとりの好みや操作感覚に応じて、ステアリングシステムの制御手法を調整できるシステムを構築することができると考えられる。さらに生体情報を測定することで、運転者の意思を読み取り、身体の不自由な人でも、ステアリングホイールを直接に操作せずに、自動車の操作ができ、運転を楽しめるシステムの構築が期待できる。

謝 辞

本研究を行な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 動力機械工学科 加藤英晃 講師ならびに成田正敬 講師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 動力機械工学科 森山裕幸 教授, 本学 工学部 機械工学科 岩森暁 教授, 本学 工学部 精密工学科 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, 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.

令和2年9月16日

劉 暁俊

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 [1-66] , [1-67] , [1-68] , [1-69] に掲載された内容を基に構成されている. Proceedings of the School of Engineering of Tokai University, Series E に掲載された内容 [1-66] は第 2 章 2.2~2.3 節, 日本 AEM 学会誌に掲載された内容 [1-67] は第 3 章 3.2~3.4 節, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics に掲載された内容 [1-68] は第 3 章 3.5 節, Actuators に掲載された内容 [1-69] 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 [1-68] の最終版については <http://dx.doi.org/10.3233/JAE-209427> で公開されている (The final publication [1-68] that used in this doctoral thesis is available at IOS Press through “<http://dx.doi.org/10.3233/JAE-209427>”).

参考文献

第1章 序論

- [1-1] 国土交通省自動車局, 地域から始める超小型モビリティ導入ガイドブック, (2014).
- [1-2] 国土交通省, 超小型モビリティの認定制度について, (2014).
- [1-3] 国土交通省, 道路運送車両の保安基準第 55 条等に規定する告示等の一部改正について, (2018).
- [1-4] 国土交通省車両安全対策検討会, 超小型モビリティの安全対策, (2019).
- [1-5] (株) 矢野経済研究所, 次世代モビリティ市場の最新動向と将来展望, (2020), https://www.yano.co.jp/market_reports/C61122700.
- [1-6] 星明彦, 超小型モビリティによるスマートライフの提案, 自動車技術, Vol.67, No.3, 2013, pp. 18-23.
- [1-7] 国土交通省自動車局安全・環境基準課, 超小型モビリティの導入事例, (2020).
- [1-8] 自動運転ラボ編集部, 超小型モビリティが、高齢者の移動に革新をもたらす, (2019), https://jidounten-lab.com/u_senior-mobility-innovation.
- [1-9] 土井健司, 紀伊雅敦, 佐々木昭恵, 高齢者の外出とまちなかの回遊性を促進するためのスローモビリティとコモビリティに関する研究, IATSS review, Vol.36, No.3, (2012), pp.152-161.
- [1-10] 鎌田実, 藤井直人, 秋山哲男, 高齢者の使用に適した移動具の研究 (第1報 高齢者の特性調査とそれに基づく移動具への要求機能の検討), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, No.665, (2002), pp.220-227.
- [1-11] 鎌田実, 畝田真宏, 寺島義人, 藤井直人, 秋山哲男, 高齢者の使用に適した移動具の研究 (第2報 シルバービークルコンセプトの提案とプロトタイプの製作・評価), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, No.669, (2002), pp.1487-1497.
- [1-12] 鎌田実, 寺島義人, 藤井直人, 秋山哲男, 高齢者の使用に適した移動具の研究 (第3報 タウンモビリティ社会実験による提案コンセプトの評価とまちづくりの方向性), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, No.669, (2002), pp.1495-1502.
- [1-13] (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.
- [1-14] 国土交通省, 超小型モビリティの認定要領, (2018).
- [1-15] 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.
- [1-16] Meghan E.Vidt, Melissa Daly, Michael E.Miller, Cralen C.Davis, Anthony P.Marsh, Katherine R.Saul, Characterizing upper limb muscle volume and strength in older adults: a comparison with young adults, Journal of Biomechanics, Vol.45, Issue 2, (2010), pp.334-341.
- [1-17] トヨタ車体 (株), 超小型 EV 「コムス」, (2018), <http://coms.toyotabody.jp/spe>

cs/index.html.

- [1-18] 本田技研工業（株），従来の自動車の枠にはまらない超小型 EV，(2013)，
<https://www.honda.co.jp/factbook/motorshow/2013/ja/P07.pdf>.
- [1-19] トヨタ自動車（株），トヨタ自動車、首都圏で「TOYOTA i-ROAD」のモニター調査を実施，(2014)，<https://global.toyota.jp/detail/1228754>.
- [1-20] 佐藤桂，永井正夫，高齢者の自動車の運転，運転免許証の自主返納および返納後の移手段に対する意識調査，日本機械学会第 20 回交通・物流部門大会，(2011)，pp.317-320.
- [1-21] 高木友博，西達也，山口亨，新田洋志，田野俊一，和田文雄，鎌田実，バリアフリーカーにおける人間中心型運転支援システムの構成法，電気学会論文集 C，Vol.121，No.7，(2000)，pp.1227-1236.
- [1-22] 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.
- [1-23] 青木健一郎，遊星歯車を用いた電動パワーステアリングによるアクティブ操舵実現に関する研究，東京大学大学院修士論文，(2005).
- [1-24] Sutherland, Major J.P., Fly-by-wire flight control systems, AGARD Conference Proceeding, No 58, (1970).
- [1-25] F. O'hara, Stability Augmentation in Aircraft Design, The Aeronautical Journal, Vol.75, Issue 724, (1971), pp.293-304.
- [1-26] 川野武義，デジタル・フライ・バイ・ワイヤ，日本航空宇宙学会誌，Vol.25，No.279，(1977)，pp.189-194.
- [1-27] 森幹彦，フライ・バイ・ワイヤと自動飛行制御技術，日本航空宇宙学会誌，Vol.25，No.279，(1977)，pp.176-183.
- [1-28] 日産自動車（株），「意のままの走り」をもたらす新しいステアリング技術，(2013)，https://www.nissan-global.com/JP/TECHNOLOGY/OVERVIEW/direct_adaptive_steering.html.
- [1-29] 葉山良平，中野史郎，熊本博光，西原修，ステアバイワイヤ車両の転舵応答性評価と運転者：自動車系の閉ループ解析，精密工学会誌論文集，Vol.72，No.11，(2006)，pp.1374-1379.
- [1-30] 柿沼徹也，小竹元基，鎌田実，低速域における操舵システムのギヤ比と操舵反力制御の検討，日本機械学会交通・物流部門大会講演論文集，Vol.15，No.6，(2006)，pp.317-320.
- [1-31] 松岡耕平，立和名慎一，土居俊一，和田隆広，車速連動小操舵角制御がドライバに与える影響，日本機械学会講演論文集，Vol.46，No.85，(2008)，pp.495-496.
- [1-32] 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.
- [1-33] 本山廉夫, ステアバイワイヤと車両運動制御, 自動車技術会, Vol.57, No.2, (2003), pp.39-43.
- [1-34] 竹原昭一郎, 深田修, 下山修, 須田義大, ドライビングシミュレータを用いたドライバ操舵行動特性解析, 日本機械学会年次大会講演論文集, Vol.8, No.8, (2008), pp.315-316.
- [1-35] 富田憲二, R.ポンサトーン, 永井正夫, 左右独立インホイールモータとステアバイワイヤの統合制御による操縦安定性向上, 日本機械学会交通・物流部門大会講演論文集, Vol.14, No.5, (2005), pp.219-222.
- [1-36] 木原三津夫, 加藤英司郎, 松浦和利, 感性に基づく車両運動性能評価, NISSAN TECHNICAL REVIEW, No.45, (1999), pp.12-15.
- [1-37] 石橋基範, 大桑政幸, 土居俊一, 赤松幹之, ドライバの運転負担感受性の指標化と経路選択嗜好分析への応用, 自動車技術会論文集, Vol.39, No.5, (2008), pp.169-174.
- [1-38] 水野康文, 横山清子, 高田和之, “自覚症状しらべ”による二輪車・四輪車運転時の疲労感評価, 人間工学, Vol.33, No.3, (1997), pp.183-192.
- [1-39] 徳田良英, 車いすの下り勾配における身体負担に関する実験研究, 福祉のまちづくり研究, Vol.11, No.1, (2009), pp.40-47.
- [1-40] 川上満幸, 兼子和香子, 青木真一, 自動車運転における作業負担に香りが及ぼす影響, 日本経営工学会論文誌, Vol.51, No.3, (2000), pp.213-219.
- [1-41] 山崎信寿, 山本真路, 井上剛伸, 移乗介助動作の計測と腰部負担の評価, バイオメカニズム, Vol.16, (2002), pp.195-205.
- [1-42] 米田郁夫, 糟谷佐紀, 阪東美智子, 末田統, 藤澤正一郎, 奥英久, 鎌田実, 手動車いすによる縦断勾配走行時の負担と操作難易度評価, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.71, No.701, (2005), pp.237-244.
- [1-43] 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, バイオメカニズム学会誌, Vol.34, No.1, (2010), pp.41-52.
- [1-44] 森岡大輔, 北山一郎, 手すりを用いたトイレでの立ち上がり動作における負担の定量的評価方法の検討, 人間工学, Vol.49, No.5, (2013), pp.219-228.
- [1-45] 長谷和徳, 井上剛伸, 木塚朝博, 金子誠喜, 廣瀬秀行, 数藤康雄, 介助作業負担の事前評価を目指した身体動作のシミュレーション, バイオメカニズム学会誌, Vol.22, No.3, (1998), pp.115-120.
- [1-46] 西川一男, 古川浩二, 河手功, 宮崎透, 農沢隆秀, 辻敏夫, 人間の上肢力学特性に基づく自動車ステアリングホイールの操作性解析, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.831, (2015), pp.15-00023.
- [1-47] 茅原崇徳, 和泉太樹, 瀬尾明彦, 関節モーメントに基づく上肢の総合的負担感の定式化, 設計工学・システム部門講演会講演論文集, Vol.2013.23, (2013).

- [1-48] 澤田東一, 操舵制御に及ぼす操舵角ゲインおよび操舵力の影響, 人間工学, Vol.22, No.5, (1986), pp.239-246.
- [1-49] 青柳宗一郎, 佐藤晴彦, 伊東敏夫, 山崎健太, 吉富輝雄, 谷澤悠輔, 神頭忠雄, 個人差を考慮した運転負担推定に基づくドライバへの情報制御手法, 自動車技術会論文集, Vol.49, No.1, (2018), pp.74-81.
- [1-50] 高田和之, 渡辺與作, 掛布英辰, 心拍動の自己回帰モデルによる生体負担度の評価, 医用電子と生体工学, Vol.22, No.2, (1984), pp.97-102.
- [1-51] 小林弘明, 仙田晶一, 心拍変動データによる操船者の知的負担の研究, 日本航海学会論文集, Vol.98, (1998), pp.247-255.
- [1-52] 倉森章, 高口紀貴, 上條正義, ドライバの筋活動に着目した運転しやすさ評価の検討, 自動車技術会, Vol.61, No.6, (2007), pp.116-121.
- [1-53] 倉森章, 高口紀貴, 石川浩二郎, 上條正義, 佐渡山亜兵, 清水義雄, 運転者の筋活動と操縦安定性 - 拮抗する筋群の同期的収縮に着目した解析について -, 自動車技術会, Vol.83, No.3, (2003), pp.1-4.
- [1-54] 梅原清和, 上條正義, 細谷聡, 佐渡山亜兵, 清水義雄, 倉森章, 高口紀貴, 石川浩二郎, 感性工学に基づいた運転者の自動車操縦性評価, 日本自動車技術会学術講演会前刷集, No 33, (2002).
- [1-55] 近藤貴洋, 上條正義, 佐渡山亜兵, 清水義雄, 倉森章, 高口紀貴, 石川浩二郎, 操舵動作中における筋活動バランスによる自動車操縦性評価, 日本自動車技術会学術講演会前刷集, No 83, (2003).
- [1-56] 倉森章, 高口紀貴, 石川浩二郎, 上條正義, 佐渡山亜兵, 運転者負担に操縦性が及ぼす影響についての筋電図による評価, 自動車技術会, Vol.33, No.2, (2002), pp.5-8.
- [1-57] 倉森章, 高口紀貴, 上條正義, 佐渡山亜兵, 運転者の筋活動による自動車の操縦性の評価, 日本電気整理運動学会論文集, No 11, (2003).
- [1-58] 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, (2012), pp.3705-3714.
- [1-59] 徳光文広, 鐵本雄一, 車両を運転する人間の姿勢変化の観察に基づく考察, マツダ技報, No.36, (2019) pp.229-234.
- [1-60] 伊藤一也, 岡野滉, 中島萌, 筋活動に着目した学生フォーミュラ車両の運転姿勢の検討, 人間工学, Vol.54, Supplement 号, (2018), p.1E4-3.
- [1-61] 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, Vol.42, 特別号, (2012), pp.180-181.
- [1-62] 横山貞洋, 谷田公二, 橋本兼明, 旋回中の運転姿勢保持のための力み評価の試みとシートによる軽減効果, 自動車技術会論文集, Vol.39, No.4, (2008), pp.177-182.
- [1-63] 山田高寛, 土門憲司, 入江英嗣, 坂井修一, 運転環境における高精度関節位

- 置推定と姿勢評価システム, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2016 論文集, Vol.2016, (2016), pp.846-852.
- [1-64] 片桐友美, 岡田明, 山下久仁子, 姿勢変化による着座時の身体負担軽減に関する研究, 日本人間工学会大会講演集, (2012), P-31.
- [1-65] 小竹元基, 杉原寛, 飯島勝矢, 田中友規, 荒井香里, 伊藤光仁, 北井一城, 自動車乗車時における高齢者の動作の特徴と負担因子の抽出, 自動車技術会論文集, Vol.48, No.2, (2017), pp.477-484.
- [1-66] Xiaojun Liu, Ayato Endo, Keigo Ikeda, Mohamad Heerwan bin Peeie, Hideaki Kato, Takayoshi Narita, Evaluation of the Burden of Steering Wheel Switching Operation in an Ultra-Compact EV with Steer-by-Wire System, Proceedings of the School of Engineering of Tokai University, Series E, Vol.43, (2018), pp.24-30.
- [1-67] 梅本貴史, 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.
- [1-68] Xiaojun Liu, Takahumi Umemoto, Hideaki Kato, Takayoshi Narita, Hiroyuki Moriyama, Muscle burden effect of ultra-compact electric vehicles equipped with steer-by-wire driving assist system, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 59, No. 93 (2019), pp. 1143-1151.
- [1-69] Xiaojun Liu, Daigo Uchino, Keigo Ikeda, Ayato Endo, Mohamad Heerwan Bin Peeie, Takayoshi Narita, 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 ステアバイワイヤシステムを用いた超小型モビリティ のドライバアシストシステム

- [2-1] 岩野孝, ポンサトーンラクシンチャラーンサク, 山崎彬人, 毛利宏, 永井正夫, ステアバイワイヤを用いた自律運転知能システムの人間機械協調特性に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.46, No.2, (2015), pp.503-508.
- [2-2] 任宰成, 松永信智, 川路茂保, 受動性に基づくバイラテラル制御を用いた電気自動車のステアバイワイヤ制御, 日本機械学会論文集C編, Vol.74, No.748, (2008), pp.2918-2925.
- [2-3] 皆木亮, 星野洋, 堀洋一, 運転者の反力制御に基づくアクティブ前輪操舵の実験的検証, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), Vol.132, No.8, (2012), pp.778-787.
- [2-4] 遠藤修司, 操舵場面に応じ運転負荷軽減を目指したステアリング機構特性に補償する EPS 制御設計方法, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.844, (2016), pp.16-00044.
- [2-5] 浅井彰司, 畔柳洋, 服部義和, 小野英一, 久代育生, 操舵反力模擬装置の開発, 交通・物流部門大会講演論文集, (2007), pp.195-198.
- [2-6] 高松孝修, 中野史郎, ステアバイワイヤの操舵制御, KOYO Engineering Journal, No.158, (2000), pp.21-26.
- [2-7] オムロン株式会社, ロータリエンコーダ, E6C3-CWZ3EH 360P/R 2M, <https://www.fa.omron.co.jp/product/item/2629/>.
- [2-8] エムアイエス株式会社, SBOX, <https://www.mttis.co.jp/item/sbox/>.
- [2-9] オリエンタルモーター株式会社, ステッピングモータ, CRK556APB-N10, <https://www.orientalmotor.co.jp/products/detail.action?hinmei=CRK556APB-N10>.

第3章 操舵状況による腕部筋活動に関する検討

- [3-1] 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).
- [3-2] 廣瀬和彦, 筋電図判読テキスト (第2版), 文光堂, (2007).
- [3-3] 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).
- [3-4] 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.
- [3-5] 日本自動車連盟, <http://www.jaf.or.jp/>.
- [3-6] 池浦良淳, 星野広行, 横井大介, 兼原洋治, 星野光弘, 水谷一樹, 澤井秀, 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, (2006), pp.33-38.

第4章 運転姿勢変化による筋負担変化に関する実験

- [4-1] 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.
- [4-2] 大西昇, 土屋和夫, 切断部に対する義手の重量比について, 日本義肢装具研究会会報, Vol.1983, No.24, (1983), pp.85-89.