

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月8日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760180

研究課題名（和文） ハンドル型入力装置における触覚振動による安全・安心の向上

研究課題名（英文） Safety and security improvement by tactile vibration in steering wheel type input

## 研究代表者

吉田 秀久（YOSHIDA HIDEHISA）

防衛大学校・システム工学群・准教授

研究者番号：00332635

研究成果の概要（和文）：自動車のハンドルの操舵動作を対象に、注意喚起のための触覚刺激を加える際に、タイヤ等からの基本情報の伝達に悪影響を与えない振動トルクを設計するための設計指針を得ることを目的とした。生理指標のひとつである、表面筋電位による生体信号を用いた客観データを用いる手法の確立を目指した。表面筋電位により評価することで、ハンドルの操舵角度や車両挙動の出現よりも前のタイミングで、客観的な生理指標としての筋電位を用いて警報を評価する設計指針を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：For the driver's steering wheel operation of the automobile, the purpose of this research is to design the tactile torque warning which does not give negative effect for the basic information from the tire and steering mechanism etc.. It is to establish of the design method using the surface myoelectricity as the object data which is one of the physiology indexes. It is possible to obtain the early response timing using the surface myoelectricity response further than the appearance of steering wheel angle and vehicle behavior in designing of tactile torque warning.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	0	1,800,000
2010年度	1,100,000	0	1,100,000
2011年度	500,000	0	500,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	0	3,400,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：交通機械制御・振動伝達・操作

## 1. 研究開始当初の背景

振動は、人間にとって不快な振動と不快と感じさせない振動が存在する。また振動によって情報を伝達することが可能である。これらの特徴を明らかにすることで、従来、一方的に振動を抑制するという発想とは逆に、区別した振動を積極的に利用することが可能となる。驚きから誤解を与えずに確実に意図

した情報を伝達させる振動の特徴を明らかにすることで、積極的に安全性の向上に寄与する方策に適用が可能となる。

具体的な人体への振動伝達経路として、座位/立位における脚部・臀部・腰部・背部を介した振動伝達経路と、操作端末を介する手部・腕部を介した振動伝達経路が存在する。本研究では後者を対象とする。

人間が機械を操作する際に機械の操作情報として得ている操作反力は、機械の状態を操作者に知らせる触覚インターフェイスである。人間が操作する自動車の運転操作において、ドライバがハンドルを切る際に操作情報として得ている、ハンドルからのトルク反力（操作反力）は、タイヤが発生する旋回横力や、路面との状態（滑りやすさ、タイヤの能力限界）を運転者に知らせている。

操舵の際にトルク反力とドライバが入力する操舵トルクは釣り合い、ハンドルの操舵角（タイヤの舵角）が決まるが、これらの間には明確な整理はなされておらず、操作感の評価は、設計対象毎にテストドライバなどの被験者実験による主観評価が行われている。特に人間の感覚に基づく主観評価では、経験と専門的な知識を要する場合が多く、そのため生理指標を用いて客観的に定量化できる技術が要望されている。

## 2. 研究の目的

本研究では、自動車のハンドルの操舵動作を対象にし、操舵時に注意喚起のための触覚刺激を加える際に、タイヤなどからの基本情報の伝達に悪影響を与えない振動トルクを設計するための設計指針を得ることを目的とする。特に生理指標を用いた評価として、身体・運動系の筋電位、中でも計測の容易な表面筋電位計測による反力トルクに対する客観評価のための基盤技術を確立することを目的とする。

## 3. 研究の方法

図1に車両実験による状況を示す。図2にハンドルに取り付けられた操舵角センサ出力、操舵軸上に取り付けられた操舵トルクセンサ出力、右側上腕二頭筋の表面筋電位の時間刻み(3kHz)で時間積分した積分筋電位(iEMG)の1例を示す。筋電位計測として表面筋電位計（追坂電子機器製、Personal EMG）を使用し、ハイパスフィルタを通して10Hz以上のデータを収録し、後に解析ソフトウェア上でローパスフィルタ、ハイパスフィルタ、更に交流電源による50Hz付近を除去するフィルタ処理を行っている。また積分筋電位は図3の通りに得ている。

実車両を用いた実験では、ドライバが受けるトルク反力を管理し、再現性の有る実験を構成することは難しい。そこで、反力を任意に設定可能な台上試験による被験者実験を検討した。

なお本研究の一連の実験は防衛大学校倫理委員会の審査を受け実施した。

台上試験によるトルク反力の呈示には、図4に示す通り、ハンドル操舵軸にDDモータ（横河電気、SGMCS-05BDB11）を直列接続し、ソフトウェア（Mathworks, MATLAB & Simulink）により設計した任意の反力トルクを、DSP（dSPACE, DS1103）により、リアルタイムにモータへ指令する構成とした。被験者の運転動作計測として、腕部にマークを貼り、2台のカメラ画像による3次元位置座標計測（Photoron 製、TEMA）を用いた構成とした。図5に装置構成、計測状況をカメラ画像により示す。



図1 車両操舵実験の状況

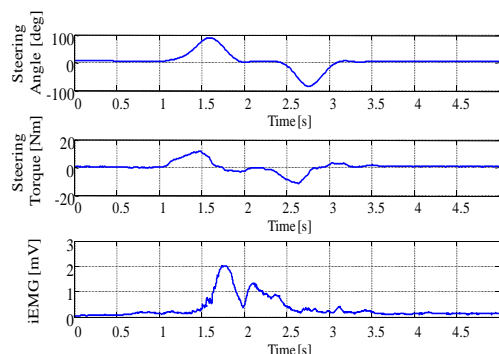


図2 操舵と右上腕二頭筋の応答

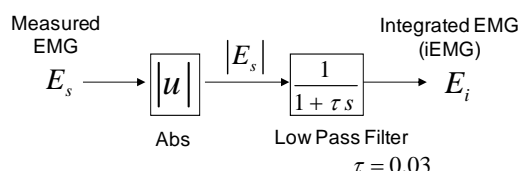


図3 筋電位から積分筋電位の獲得

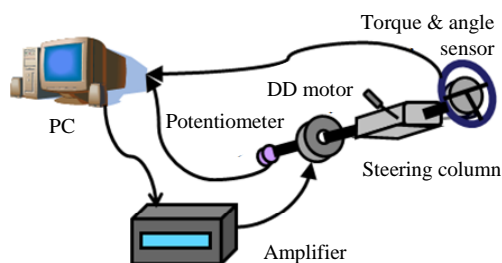


図4 台上装置によるトルク反力呈示構成



図5 台上装置による計測状況

#### 4. 研究成果

##### 4.1 ハンドル操舵の活動筋

はじめに本実験のために実車両の据え切り操舵からハンドル操舵に用いられる筋の選定を行った。実車両において大きな操舵力を必要とする据え切り操舵時において、およそ操舵角は中立位置から左右にそれぞれ45~90deg程度とした。主に手首の内転、手首の伸展力・固定力、肘関節の屈曲・伸展、肘関節の屈曲に伴う回内などに関わる筋を対象とした。

右腕を対象とし、各筋の積分筋電位を操舵トルクの比で結果を規格化した結果を図6に示す。繰り返し試行した実験から、操舵時の最大出力による比の値(平均値)を比較する。腕の動作から時計回りにハンドルを引くpull動作、反時計回りにハンドルを押し込むpush動作に分けて整理した。

据え切り操舵時に反力トルクを受けた状況下で、能動的にハンドルを操舵するため支配的な筋として、(d)上腕二頭筋と(e)上腕三頭筋の寄与度が高いことを確認した。また、ハンドル操舵方向により比の値の大小関係が逆転することから、ハンドル操舵動作方向への筋の寄与度も確認した。

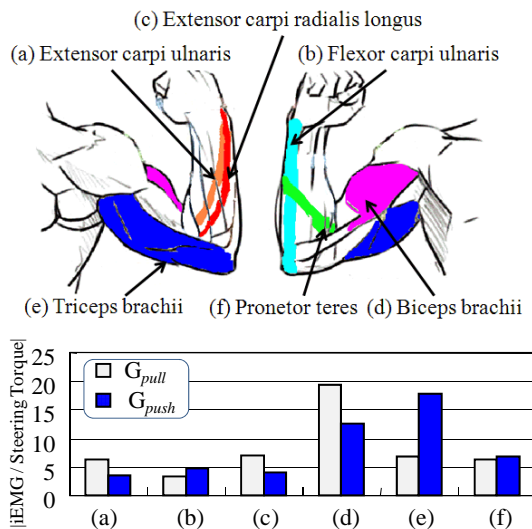


図6 操舵トルクと積分筋電位の比

##### 4.2 ハンドル操作時の上腕・前腕の筋活動

筋電位を用いたハンドル操作動作のモデルを検討する。積分筋電位と筋張力が比例関係であると仮定する。水平面上で石臼を挽くような動作における屈筋と伸筋の筋張力を考慮したモデルが図7のように提案されている。そこで、ハンドル操作動作においても、本モデルが適用可能であるか、台上試験により確認した。ある被験者1名にトルク反力5Nmを呈示した、ある1回分の実験結果を図8(a), (b)に示す。(a), (b)はほぼ同様なハンドル角度の応答であるが、上腕二頭筋の積分筋電位 $r_f$ 、上腕三頭筋の積分筋電位 $r_e$ の大きさが異なり、トルク反力の違いによる筋活動の違いがわかる。実験で得られた $r_f$ 、 $r_e$ を用いて、図7のモデルから肘関節の屈曲角度を算出した。これより本モデルで、ハンドル操舵においても、およそ肘関節の屈曲角度が推定できることがわかった。しかし推定に際しては、応答の遅れ、ピーク値の精度が課題として残された。また、被験者の違いによる挙動の解釈、同一被験者であってもセンサを付け外しすることによる筋電位の再現性のある取得方法の課題が挙げられる。本手法による手法に一般性を持たせる際、もう一段の工夫が必要であることを確認した。

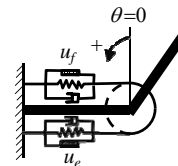
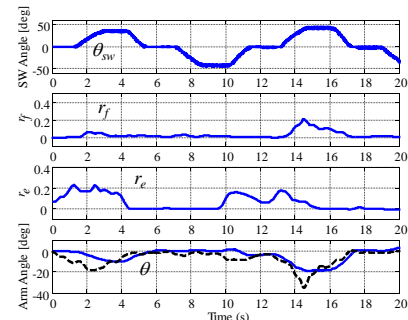
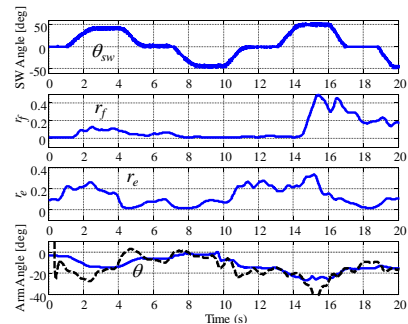


図7 上肢筋骨格系の力学モデル



(a) 反力トルク 5Nm を呈示



(b) 反力トルク -5Nm を呈示

図8 ハンドル操舵時の実験応答

#### 4.3 中立位置保舵時の筋電位特性

一定のトルク反力に対して、ハンドルが動かないように操舵トルクを釣り合わせる保舵動作を検討する。このときの被験者が入力する操舵トルクと積分筋電位を実験により計測した。トルク反力の主因であるタイヤ横力によるセルフライニングトルクの値から、タイヤすべり角 $1^\circ$ で $15\text{Nm}$ 程度のトルク反力が発生することから、一定で作用するトルク反力の振幅は $-7.5, -5.0, -2.5, +2.5, +5.0, +7.5\text{Nm}$ とした。

作用する一定のトルク反力と被験者が入力する操舵トルクの関係を図9に示す。ばらつきが小さく、トルク反力の回転方向によらずほぼ線形関係にあることが確認できる。

このときに被験者が入力する操舵トルクと積分筋電位の関係を図10に示す。

図10より、ハンドルに作用するトルク反力の向きにより、左右の各筋の出力が異なっており、全般的にハンドルの時計回りに作用するトルク反力(負の値)が印加される際に平均値が高く、ばらつきを示す標準偏差も大きい。

筋電位計測を行う場合、対象筋の筋腹を選んで双極電極を配置するが、左右同一の運動に対し、左右同一筋から計測できる筋電位の大きさが異なる可能性がある。更に被験者により操舵トルクを構成する際に、舵を切る方向によって運動に寄与する筋構成が異なることが考えられる。

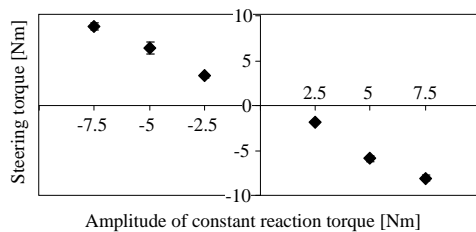


図9 トルク反力と操舵トルク

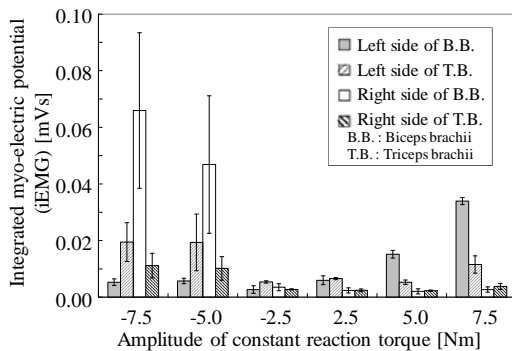


図10 操舵トルクと積分筋電位

以上より、被験者によって舵を実現する際に寄与する筋構成が異なり、ハンドル操舵の客観評価の際に筋電位の値の大小関係を用いる場合には、予めこれら個性を考慮し、それを前提とした評価をする必要がある。また多くの被験者データから統計的な解析結果を得ることで解析結果の一般化が必要であることもわかる。

#### 4.4 操舵時の筋電位特性

一定のトルク反力が作用中に、ドライバの意志でハンドルをおおよそ $\pm 45 \sim 90^\circ$ の範囲で周期1~2秒程度の操舵をした際の筋電位特性を実験する。前節では積分筋電位の大きさを評価の対象とした。筋電位は脳からの操舵指令として計測できるので、積分筋電位の出力タイミングから得られる時間に着目する。実験条件は3.1節と同様である。

ハンドルを能動的に操舵する際に筋電位出力から操舵トルクが発生するまでに要する応答時間を図11, 更に筋電位出力から操舵角が発生するまでの応答時間を図12に示す。

ここで積分筋電位の出力タイミングは当該操舵動作に起因する左右の上腕二頭筋, 上腕三頭筋のうち最初に立ち上がった筋のタイミングを採用した。またハンドルを中立位置から反時計回りに操舵する左操舵と, 中立位置から時計回りに操舵する右操舵に分けて結果を示す。

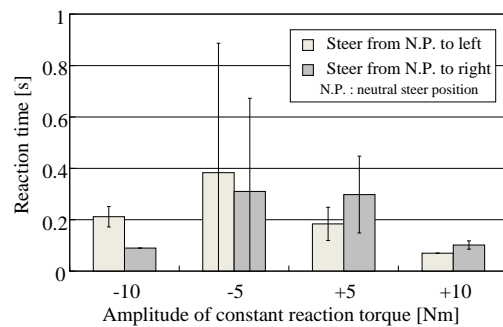


図11 積分筋電位から操舵トルクまでの応答時間

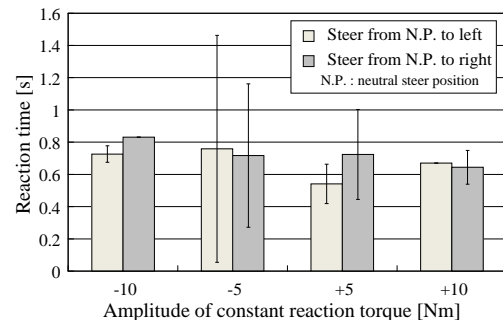


図12 積分筋電位から操舵角までの応答時間



トルク反力の振幅が大きい方が積分筋電位から操舵トルクへの反応時間のばらつきも少なく、平均値も若干小さい。またトルク反力を打ち消す向きに操舵する場合は、反力トルクと同じ向きへの操舵に比べ、若干反応時間が大きくなる傾向が見られる。

一方、トルク反力の振幅が大きい方が積分筋電位からハンドル操舵角への反応時間のばらつきが少ない。反応時間の平均値自体には傾向や差が見られない。

以上より、ハンドルを介してドライバへ情報伝達するトルク反力の振幅が小さい場合に、操舵行動の反応時間にばらつきを与える可能性があることがわかった。

#### 4.5 トルク振動による警報システム

脇見などにより運転時に危険な状況に陥る場面において、ハンドル操舵を促す操舵回避支援のために、操舵軸にトルク振動を加える警報システムが提案されている。これは被験者による主観評価と車両へ加えられた操作入力から警報設計が行われている。そこで筋電位情報を用いた客観指標による設計を試みる。

実験では、被験者が脇見運転をしている状態を意図的に作成するため読書課題を負荷し、被験者の視線を前方視野から逸らせる。その後、被験者正面の走行車線上の左右どちらかに障害物を出現させると同時にトルク振動による警報を呈示する。

警報振動の開始した時間を基準時間として、被験者が警報に反応して前方を確認し、障害を回避するためにハンドルを能動的に操作し始めるまでに要する時間（反応時間）を計測し、警報システムの評価を行う。

##### 4.5.1 警報振動のトルク設計

###### (1) パルス警報

本実験で適用する警報振動は予備実験による主観評価の結果、振動の発生する時間と発生しない時間のある図 13 に示すパルス波とした。またパルス波には基本振動として正弦波状のトルク振動を適用する。この基本振動である正弦波状トルクの振幅、周波数の設計に筋電位情報を用いる。

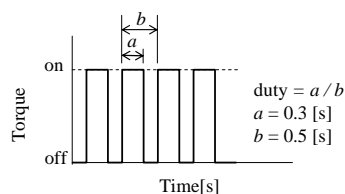


図 13 トルク警報のパルス構成

###### (2) 呈示振動

実験中は、走行感覚をより現実近づけるため、60km/h 程度の走行を仮定し、この際の道路ノイズとして、0.40Nm、23Hz の振動を常にハンドルには印加した。

警報として呈示する基本振動は、高トルクであるほど反応時間は短く、周波数は 10Hz 以上が望ましく、20Hz になると路面ノイズとの区別が付きにくいという知見が得られている。しかしトルクの最大値に関する議論は検討されていない。そこで周波数も含め、振動の条件を振幅 1.25、1.75、2.25Nm（周波数 15Hz に固定）及び、周波数の条件を 10、15、20Hz（振幅 1.75Nm に固定）にて比較する。実験において、これらの振動をランダムに発生させて反応時間を計測し、それぞれの振幅、周波数の違いに対する警報効果を検証する。

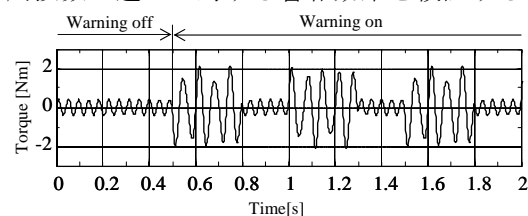


図 14 呈示トルク振動波形の例 (1.75Nm / 15Hz)

###### (3) 認知・判断に要する時間

これまでの知見から、腕の屈曲に関与する上腕二頭筋を対象とした。更にハンドル操舵開始に着目し、握力や手首の角度変化をつかさどるとされる総指伸筋を筋電位計測した。

積分筋電位の応答例を図 15 に示す。0.5s 手前で警報後、0.5s 以降に小さな筋反応があり、その後一端収束し、その後 1.2s 付近に大きな筋反応が確認された。当初の小さな筋反応は両腕の総指伸筋の反応が顕著であることから、ハンドル振動に対してハンドルを握る反射的な運動であることが分かる。よってハンドルの操作開始時刻は、一度増加した筋電位が最小値まで低下し、再び増加を始めた時刻と定義する。そこで筋電位の強弱に関わらず、警報開始から、いずれかの筋肉がハンドル操作のために要した時間を認知・判断、操作開始までに要した時間と定義した。

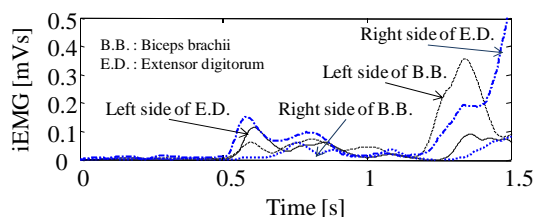


図 15 警報振動による積分筋電位応答 (1.75Nm / 15Hz)

#### 4.5.2 呈示振動の違い

警報開始から筋電位の応答開始までの反応時間を図 16, 17 に示す。操舵挙動の確認のためカメラ画像(60Hz)によって測定したハンドル動作開始までの時間も併せて併記する。

図 16 より、トルク振幅を 1.25Nm から 1.75Nm に大きくすると反応時間が短くなり、また片側確率 5%の有意差検定より有意差が有ることを確認した。更に大きな 2.25Nm にすると 1.75Nm よりも反応時間が若干遅れる結果となった。またばらつきを示す標準偏差も大きくなっている。これはトルク振幅が大きすぎると逆に被験者を混乱させ、前方視界の認知・判断に時間を要する事が原因と考えられる。

図 17 より、振動周波数に対して 10Hz と 20Hz の反応時間がほぼ同じ結果となり、15Hz がこの中では適値である。

加えて、カメラを用いた測定による反応時間が筋電位計測による反応時間と同傾向を示すことから、筋電位の計測部位が操舵行動を反映する部位であることが確認できる。

以上より操舵回避警報としてトルク振動を適用する場合、人間がより短い時間で警報を認知・判断するトルク振動の、振幅と周波数には、適値があり、生理指標である表面筋電位による応答時間から、警報を設計することが可能であることを明らかにした。

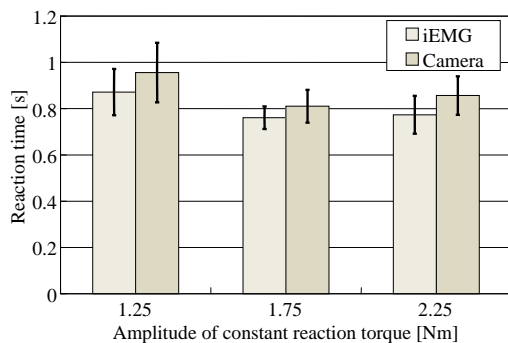


図 16 警報のトルク振幅特性

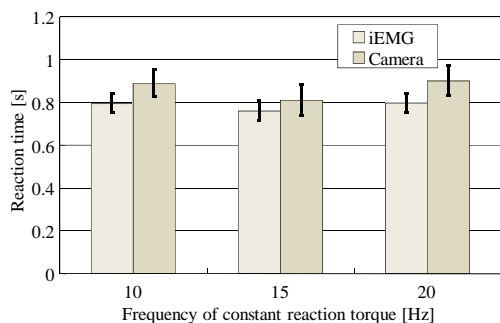


図 17 警報振動の周波数特性

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 1 件)

吉田秀久, 山口秀谷, 筋電位指標による操舵トルク警報の設計, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 2011 年 9 月 12 日, 東京工業大学 (東京都)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

吉田 秀久 (YOSHIDA HIDEHISA)

防衛大学校・システム工学群・准教授

研究者番号: 00332635