

平成 30 年 5 月 29 日現在

機関番号：34416

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26730110

研究課題名(和文) 重大交通事故回避のためのドライバの操舵意図・状態推定技術の開発

研究課題名(英文) Development of Estimation Technique of Driver's Steering Intention and Driver States toward Avoidance of Serious Traffic Accidents

研究代表者

朝尾 隆文 (Asao, Takafumi)

関西大学・システム理工学部・助教

研究者番号：10454597

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ハンドル角度と操舵トルクから、時々刻々と変化するドライバの運動インピーダンスを動的に推定する技術を開発することを目的とした。カルマンフィルタにより、時々刻々と変化するドライバの運動インピーダンスを推定する技術を開発した。評価実験の結果、運動インピーダンスの推定誤差は10%程度であった。また、ドライバが実際にハンドルを変位させる250 ms程度前から運動インピーダンスが変化することが分かった。以上より、逐次的に運動インピーダンスを推定することで、操舵意図の予測可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study was to develop dynamical estimation technique of time-varying mechanical impedance only by using steering wheel angle and torque. The estimation technique which was constructed by using Kalman filter had been developed. As the result of evaluation experiments, the estimation error of mechanical impedance was about 10%. Moreover, as the result of experiments in which human steered quickly, the impedance, especially viscosity and stiffness, started to change at 250 ms before the steering wheel angle started to change. From these results, the possibility to estimate steering intentions by the mechanical impedance was shown.

研究分野：人間-機械システム

キーワード：運動インピーダンス パラメータ同定 カルマンフィルタ 操舵意図 急操舵 スティフネス 粘性剛性

1. 研究開始当初の背景

昨今、居眠り、飲酒運転、薬物使用、てんかん発作などによる重大事故が相次いでおり、これらの事故の防止に向けた取り組みは急務である。一方、ドライバの安全性や快適性の向上をめざし、運転支援システムに関する研究・開発・製品が増えてきている。運転支援システムは、ドライバの認知、判断、操作の一部を機械が代行するシステムと言い換えることができる。運転支援システムの種類が増え、またその技術が高度となることにより、支援の可能な状況が多くなる一方で、ドライバとシステムの意図の対立が問題視されている。したがって、安全をサポートするだけでなく、支援方法や支援タイミングを適切に設定し、ドライバが煩わしいと感じない支援が望まれている。

運転支援のためにシステムが必要とする情報は「車両情報」、「周辺情報」、「ドライバ情報」に大別できる。「車両情報」には車両位置、ヨー角などの運転車両の情報、「周辺情報」には各種外界センサで取得・認識される道路形状、他車両・歩行者等の動体の情報、「ドライバ情報」にはドライバの操作の情報、生理情報が含まれる。既存の運転支援システムの多くは「車両情報」、「周辺情報」のみを利用している。ドライバにとって煩わしくなく、適切なタイミングでの支援を実現するためには、「車両情報」、「周辺情報」に加えて、「ドライバ情報」を積極的にシステムへ取り込む必要がある。もし、「ドライバ情報」として、操作の意図および覚醒度などのドライバ状態を推定することができれば、それらと「車両情報」、「周辺情報」を統合して、ドライバの操作の妥当性、安全性を総合的に判断したうえで運転支援を行うことが可能となる。

ドライバ状態の異常の検出を目的とした研究は多数あるが、大きくは二系統に分類できる。一つは、ドライバの生体情報に着目した研究である。もう一つは、左右方向もしくは前後方向の車両のふらつきに着目した研究である。また、操舵意図の推定を試みている研究では、脳波や視線情報が用いられている。生体情報は、「車両情報」よりもドライバに近い情報であるため、早い時点でドライバの意図・状態を反映すると考えられる。しかしながら、脳波などの生体情報を実車内で計測することはノイズの観点において問題があるだけでなく、電極を貼付することでドライバを拘束してしまう。また、生体計測機器を実車内で使用することは、コストの観点から実用性が低い。

2. 研究の目的

ヒトは運動前にあらかじめ筋の粘弾性の調節をおこない、適切な硬さに設定することで、環境、操作対象、目的に応じた適切な運動をおこなっている。自身が思い描くとおりにすばやく運動を開始するためには、運動前

に筋を緊張させることで手先の剛性、粘性を高め、応答を良くしていると考えられる。特に、把握に伴って収縮する前腕の筋により、手先の剛性、粘性を高めていると考えられる。また、ドライバ状態が異常ならば、このような操舵のための準備ができていないはずである。そこで本研究では、ハンドルを把持している腕に着目する。

図1に本研究のコンセプトを示す。たとえば、ドライバが素早くハンドルを切ろうと考えた場合には、筋を通常よりも硬くし、また、滑らないように強くハンドルを握ると考えられる。すなわち、筋活動、筋の粘弾性、ハンドルの把持力にはドライバの意図が反映される。

本研究では、ドライバを拘束しないために、1)ハンドルの角度とトルクのみで推定する筋の粘弾性の変化、2)把持力の変化を利用して、ドライバの操舵意図、状態推定をおこなうことを目的とする。



図1 本研究のコンセプト

3. 研究の方法

以降では、人の腕の質量・慣性モーメントによる慣性係数、人の腕の筋収縮による粘性係数、弾性係数を運動インピーダンスと呼ぶことにする。

(1) 実験装置

本研究助成により製作、改良した装置の外観を図2に示す。ダイレクトドライブモータ(SGMCS-14C3C41, 安川電機)により 14.0 Nm のトルクをハンドルに加えることが可能で、20 bit の分解能でハンドル角度を計測可能である。また、ハンドルコラム部には6軸力学センサ(IFS-105M50A220-163, Jr3 Inc.)を備えており、人がハンドルに加えたトルクおよび力を計測可能である。



図2 ステアリング・システム

(2) 運動インピーダンスのモデル化

ハンドルの運動方程式は次式で表される。

$$I_s \ddot{\theta} + B_s \dot{\theta} = \tau_c + \tau_p + \tau_h \quad (1)$$

ただし、 I_s, B_s はそれぞれハンドルの構造的な慣性モーメント、粘性係数であり、 θ はハンドル角度、 τ_c, τ_p, τ_h はそれぞれモータがハンドルを制御するトルク、モータがハンドルに加える摂動トルク（後述）、ハンドルが人から受けるトルクである。

ロボット工学の分野でしばしば用いられるインピーダンス制御により、外力 τ_h に対する運動インピーダンスを τ_c により制御する場合には、ハンドル軸まわりの運動方程式は次式となる。

$$I_d \ddot{\theta} + B_d \dot{\theta} + K_d \theta = \tau_p + \tau_h \quad (2)$$

ただし、 I_d, B_d, K_d はそれぞれ制御の目標である慣性モーメント、粘性係数、弾性係数である。

一方、ハンドルを回す人の運動方程式は、ハンドル軸まわりに等価なものとして考えたと次式で表される。

$$I_h \ddot{\theta} + B_h \dot{\theta} + K_h (\theta - \theta_e) = -\tau_h \quad (3)$$

ただし、 I_h, B_h, K_h はそれぞれハンドル軸まわりに等価な人の慣性モーメント、粘性係数、弾性係数であり、 θ_e は人の筋に由来する力学的平衡点である。

式(2)、(3)より、人 - ハンドル系の運動方程式は次式となる。

$$I \ddot{\theta} + B \dot{\theta} + K \theta - K_h \theta_{he} = \tau_p \quad (4)$$

ただし、 $I = I_d + I_h, B = B_d + B_h, K = K_d + K_h$ と置いた。

式(4)において、ハンドル角度、角速度、角加速度、およびトルク τ_p は装置により計測可能であるが θ_e が未知であるため不良設定問題となり、人の運動インピーダンスを求めることができない。

そこで、以下の3つの仮定を設け、ハンドルに微小な摂動を印加することを考える。すなわち、微小時間の間にハンドルに微小なトルクを加え、ハンドル角度を微小に変化させる。

仮定 i) 摂動の前後で人の力学的平衡点は変化しない。

仮定 ii) 摂動の前後で人の運動インピーダンスは変化しない。

仮定 iii) 摂動の前後で人の腕姿勢は変化せず、人がハンドルに加える力は変化しない。

これらの仮定は、ハンドル操作および運動インピーダンスに人の随意運動成分が含まれないことを意味する。

摂動によって生じた微小変位を $\Delta\theta$ 、摂動トルクを $\Delta\tau_p$ とすると、摂動後の人 - ハンドル系の運動方程式は次式となる。

$$I(\ddot{\theta} + \Delta\ddot{\theta}) + B(\dot{\theta} + \Delta\dot{\theta}) + K(\theta + \Delta\theta) - K_h \theta_{he} = \tau_p + \Delta\tau_p \quad (5)$$

式(5)から式(4)を引くと

$$I\Delta\ddot{\theta} + B\Delta\dot{\theta} + K\Delta\theta = \Delta\tau_p \quad (6)$$

となり、運動インピーダンスについて解くことができる。

本研究では時々刻々と変化する運動インピーダンスを動的に推定することを目的としているため、随意運動成分を含まない式(6)の代わりに、高域通過周波数フィルタにより随意運動成分を除去することとした。フィルタを施したハンドル角度を θ^* 、トルクを τ_p^* とすると、式(6)は次式に置き換えることができる。

$$I\ddot{\theta}^* + B\dot{\theta}^* + K\theta^* = \tau_p^* \quad (7)$$

(3) 運動インピーダンスの動的推定法

本研究では、時々刻々と変化する運動インピーダンスを動的に推定することを目的としているため、カルマンフィルタを用いることとした。同様な方法に逐次最小二乗法があるが、これに比べてカルマンフィルタは数値的に安定である。

同定に用いた線形時変離散時間システムの状態方程式および出力方程式は次式である。

$$A[i] = A[i-1] + \xi[i-1] \quad (8)$$

$$\tau_p[i] = \theta^T[i]A[i-1] + v[i] \quad (9)$$

ただし、 i はサンプリング番号を表し、

$$A = [I \quad B \quad K]^T \quad (10)$$

$$\theta = [\ddot{\theta}^* \quad \dot{\theta}^* \quad \theta^*]^T \quad (11)$$

であり、 ξ R^3 は平均値 θ 、分散 L $R^{3 \times 3}$ のシステム雑音ベクトル、 v R は平均値 0 、分散 σ_v^2 R の観測雑音である。すなわち、運動インピーダンスがシステム雑音によりランダムウォークするというモデルである。本研究で用いたカルマンフィルタを以下に記す。

$$M[i] = R[i-1] + L \quad (12)$$

$$k[i] = \frac{M[i]\theta[i]}{\sigma_v^2 + \theta^T[i]M[i]\theta[i]} \quad (13)$$

$$\hat{\tau}_p[i] = \theta^T[i]A[i-1] \quad (14)$$

$$e[i] = \tau_p[i] - \hat{\tau}_p[i] \quad (15)$$

$$\hat{A}[i] = \hat{A}[i-1] + k[i]e[i] \quad (16)$$

$$R[i] = [I - k[i]\theta^T[i]]M[i] \quad (17)$$

(4) 計測条件

装置の制御、計測周期は 1 ms とした。また、ハンドルに印加した摂動は、原始多項式を $f(x) = x^7 + x + 1$ とした。周期長 127 の最大周期長列による擬似白色信号としたが、30 ms 毎に値を変化させるようにした。モータによる摂動の指令トルク τ_p 、ハンドル角度 θ を計測し、中央差分によりハンドル角速度、角加速度を算出した。また、カットオフ周波数 33 Hz

の低域通過フィルタを施し、高周波ノイズの除去をおこなった。

(5) 急操舵実験のタスク

インピーダンス制御を施していない状態において、実験参加者はハンドルの10時10分を把持した。通常の自動車運転時と同じ程度の力でハンドルを把持してもらい、実験開始を開始した。開始の合図を伝えたら、ハンドルと連動した操作視標が目標視標を通過するように、任意のタイミングで急操舵した。操舵開始時のハンドル位置である停止視標から目標視標までの操作量は60 degとした。

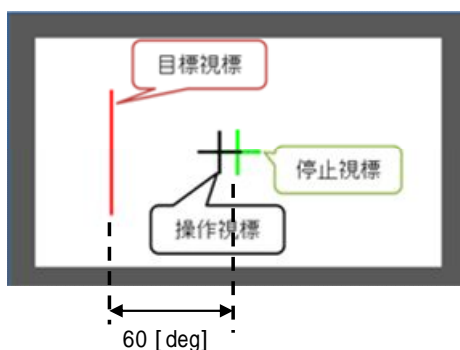


図3 画面表示の例

4. 研究成果

急操舵実験における同定結果の一例を図4に示す。横軸が1秒の時点で急操舵を開始したデータである。図の上段から順に、同定で得られた慣性モーメント、粘性係数、弾性係数、およびハンドル角度、捩動トルクである。図中の青い実験は、それぞれの計測データに高域通過フィルタを施した上で同定した結果を表す。弾性係数 K の同定結果を見ると、時間経過とともにドリフトしてしまっていることが分かる。図4のハンドル角度 θ を見ると、高域通過フィルタによってハンドル角度の変化がほとんどなくなってしまっており、これが弾性係数 K の同定結果に影響を及ぼしたと考えられる。運動インピーダンスに関する従来研究では、筋骨格が有する運動インピーダンスを推定することに主眼が置かれており、そのために人の随意運動成分を除去している。一方、本研究は随意運動によって時々刻々と変化する運動インピーダンスを推定することを目的としているため、従来研究と同様な手法では適切に運動インピーダンスが推定できなかったと考えられる。

そこで、周波数フィルタによって随意運動成分を除去しない場合に、運動インピーダンスの推定結果がどのようなものかを検証した。その結果を図4中に赤の実線で示す。粘性係数 B は、随意運動成分を除去した場合に比べて、変化の度合いがより顕著となった。一方、弾性係数 K における発散現象はなくなったが、変化の度合いは分かりにくくなった。随意運動成分を除去しない場合には、弾性係数の力学的平衡点は $\theta_e = 0$ の位置にあること

になるが、操舵中には θ_e は時々刻々と変化しているはずである。それらの不整合を成り立たせるために、弾性係数がほとんど0になってしまったと考えられる。

以上のことから、高域通過フィルタの有無で運動インピーダンスの推定をおこない、それらの推定結果を組み合わせれば、操舵時の粘性係数の変化と弾性係数の変化を捉えることが可能である。

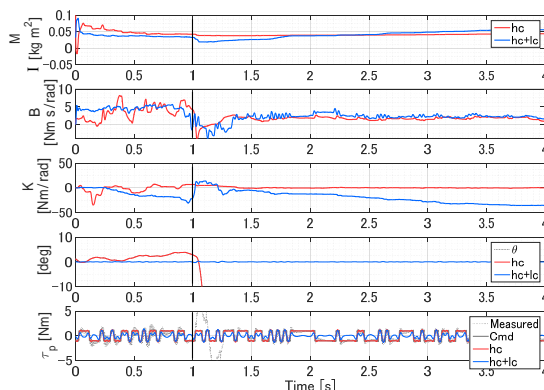


図4 運動インピーダンスの同定結果の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

朝尾 隆文 (ASAO, Takafumi)

関西大学・システム理工学部・助教

研究者番号：10454597