

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 23 日現在

機関番号：14101  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2017～2019  
課題番号：17K06262  
研究課題名(和文) インピーダンス制御を導入した先進運転支援システムのドライバ受容性向上に関する研究  
  
研究課題名(英文) A Study on Improvement of Driver Acceptability for Advanced Driver Assistance System with Impedance Control  
  
研究代表者  
早川 聡一郎 (Hayakawa, Soichiro)  
  
三重大学・工学研究科・准教授  
  
研究者番号：50288552  
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)： 運転支援システム使用時のドライバ受容性向上を実現するため、運転支援システムのHMIに関する研究を行った。HMIの中でも重要な力覚支援については、ロボット分野で使用されているインピーダンス制御を導入することを提案し、ドライバ受容性が改善することを示した。また、その複雑なパラメータ設定を減衰比を用いた評価指標により統一的に決定できる手法を提案し有効性を示した。また、聴覚支援は運転支援開始の1秒前に効果音を用いて予告をすることが良いという結論を得た。その他、視覚・聴覚的にドライバの受容性を改善する支援予告提示手法について各種検討を行い、どのように情報提示を行うことがドライバにとって有効かを示した。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

自動運転車両の実用化や、人が運転する車の全廃にはまだ時間がかかると考えられる。このような中、人が運転する車をより安全化する研究は重要である。本研究はより安全な運転を実現するため、ドライバ受容性の高い運転支援システムを実現するために実施された研究である。本研究の成果は今後開発される車両へ適応され、より安全な自動車の実現に貢献することが期待でき、社会的意義があった。  
また、人間-機械協調ロボット分野で操作性改善に使用されているインピーダンス制御を、主従関係が逆転する運転支援システムに適用した場合でも、ドライバの受容性改善に効果があることが検証され、学術的にも大きな意義があった研究となった。

研究成果の概要(英文)： In order to improve the driver's acceptability during using a driver assistance system, a study on HMI of the driver assistance system was conducted. For force-sensing support system, we proposed to introduce the impedance control, which is used in the field of robotics. And, we proposed a method in which the parameter setting can be uniformly defined by an evaluation index using the damping ratio. Then, the effectiveness of the proposed methods was shown. In addition, it was concluded that it is better to use a sound effect to warn the driver one second before the start of driving assistance for the auditory assistance. Furthermore, a method of presenting the support start warning information to improve the acceptability of the driver by visual and auditory information was investigated. Then, It was shown what kind of presentation information was effective for the driver.

研究分野：人間情報学

キーワード：人間機械システム 運転支援 ヒューマンマシンインターフェイス インピーダンス制御 減衰比 ヘッドアップディスプレイ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

現在、自動運転車両の研究・開発が盛んに行われているが、完全な自律走行の実現にはまだかなりの期間が必要である。それまでは、人が運転する自動車の予防安全は先進運転支援システム(以下 ADAS と略す)が担うこととなる。現在の運転支援時のステアリング操舵介入支援では、ステアリングを回転させたい方向にトルクを加え、ドライバのステアリング操作を誘導する方式を採用している。今後、事故直前の緊急状態だけでなく、通常走行時より積極的に車両安全確保のための支援を行うようになると考えられる ADAS において、ステアリングに対して回転させたい方向に単にトルクを加える現在の介入支援方式では問題がある。なぜなら、教習所での運転指導員による教示操作などにみられるような人同士の協調動作において重要となる要素が、ドライバと自動車(運転支援システム)間においては実現できていないため、ドライバ受容性が高いとは言えないからである。これからの ADAS で求められるドライバ受容性を向上させるには、ステアリングへの介入支援時のトルクの加え方、運転状況において生じた問題に対して支援システムがいつどのように支援を行うかをドライバに対してどのように情報伝達するかが重要であり、これらを考慮した運転支援システムを実現することでよりドライバ受容性が向上すると考えた。

### 2. 研究の目的

現在の自動車は電子制御された機械システムであり、ロボットと見なすこともできる。ドライバが自動車を運転することは操作者が人間-機械協調ロボットを操作することと同じであると見なせる。そして、人間-機械協調ロボット分野においては、操作者の操作性向上のため各種の研究が行われてきた。その一つに、操作者のロボット操作性改善のためのインピーダンス制御手法に関する数々の研究がある。このインピーダンス制御手法を本研究におけるドライバの操作機構となるステアリングに適用することで、介入支援時のドライバの受容性向上が実現できると考えた。こうしたことから、介入支援時にステアリングに対して粘性係数とばね定数に基づき導出されるトルクを印加することでインピーダンス制御を実現し、各自動車において固有のステアリングのインピーダンスを変化させることで介入支援を実現する手法を提案する。しかし、ばね定数は操舵介入支援時のドライバへのアシストトルクに関連するパラメータであり、粘性係数はステアリングの操作感改善に関与するパラメータであり、これらの 2 つのパラメータのドライバ受容性を高める最適な値の組み合わせを導出するのは容易ではない。実際、アシスト強度毎、車両毎、走行状況毎に実験により個々に最適値の組み合わせを導出するため手間がかかりすぎるという問題がある。そこで、車両のステアリングダイナミクスと導入したこれら二つのインピーダンスパラメータが一つの式にまとまる減衰比を評価指標として使用することで、パラメータ設定を容易にする手法を併せて提案する。そして、これらの提案手法の有効性を検証することを一つの目的とする。

さらに、このインピーダンス制御を導入した運転支援システムに各種のヒューマンマシンインターフェイス(以下 HMI と略す)を加えることで、よりドライバ受容性を高めることを検討する。介入支援時に更に HMI を加えることで、インピーダンス制御による介入支援の評価が変わる可能性は十分あり、ドライバ受容性向上が期待できる。このために追加する HMI としては、音声、効果音、振動、発光、画像表示など提示法がこれまで各種考えられおり、それらの中から検討する。検討すべき要素は多数あるため、提示情報量などに基づいて評価を行い有望な HMI を検討し、最終的にインピーダンス制御を用いた介入支援システムのドライバ受容性が向上する構成を明らかにすることを本研究のもう一つの目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究で提案する運転支援システム用インピーダンス制御手法は、上位のスーパーバイザ型協調制御システムなどから、操舵介入支援のためのステアリング操舵目標角  $\theta$  [rad] が与えられることを前提とする。そして、これに基づき操舵支援時に操舵支援トルク  $\tau_a$  として、

$$\tau_a = D_a \dot{\theta} + K_a (\theta - \theta_i) \quad (1)$$

をステアリングに印加する。ここで、印加粘性係数を  $D_a$  [Nm s/rad]、印加ばね定数を  $K_a$  [Nm/rad]、ステアリング回転角度を  $\theta$  [rad] とする。また、自動車の通常運転時のステアリングダイナミクスは近似的に、

$$J_m \ddot{\theta} + D_m \dot{\theta} + K_m \theta = \tau_h \quad (2)$$

として表現できる。ここで、車両のステアリングダイナミクスのイナーシャを  $J_m$  [kgm<sup>2</sup>]、粘性係数を  $D_m$  [Nm s/rad]、ばね定数を  $K_m$  [Nm/rad]、ドライバのステアリングへの印加トルクを  $\tau_h$  [Nm] とする。通常運転時にはドライバが感じるのは式(2)に示されるように自動車ステアリング系のダイナミクスである。しかし、介入支援時に提案する式(1)の介入支援トルク

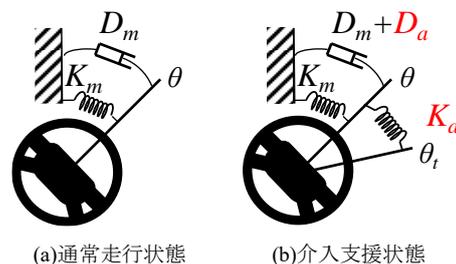


図1 ステアリングダイナミクスの変化

ク $\tau_a$ をステアリングに印加することにより、粘性項が変化し、ばね項による平衡点が追加されることで、ドライバが感じるダイナミクスが通常状態の図 1(a)から図 1(b)のように変更されることになる。このようにステアリングダイナミクスを変化させて、操舵介入支援を行うのが提案するインピーダンス制御を用いた操舵介入支援手法である。

このようにして実現したインピーダンス制御であるが、二つの設定パラメータがあり、その設定値をどのように決定するかという問題があることは研究目的で示した通りである。そのため、操舵介入支援時のステアリングダイナミクスに基づく減衰比を評価指標とすることで、車両毎のステアリング機構部の差異の影響を受けない統一的な評価手法が実現できないかと考えた。操舵介入支援時のステアリングダイナミクスの減衰比 $\zeta$ は、

$$\zeta = \frac{(D_m + D_a)}{2\sqrt{J_m(K_m + K_a)}} \quad (3)$$

として、関係するパラメータを全て含む数式となる。本研究では、この操舵介入支援時のステアリングダイナミクスの減衰比に基づいてドライバの受容性評価を行う。

実験には図 2 に示すような、インピーダンス制御を可能とする EPS を模擬したダイレクトドライブモータに直結したステアリングや、アクセルとブレーキを有し、自動車運転シートと三つの 4K 大型モニターで構成されるドライビングシミュレータ(以下 DS と略す)を構築して使用した。そして、この DS を用いて介入支援による停車車両の回避行動を対象として実験を行い、提案手法の有効性を検証する。実験での走行環境は狭い一方通行の市街地道路を想定している。その道を速度約 30km/h で走行し、途中の路肩に停車している車両に対して余裕をもち、かつ、安全を確保する回避行動を誘導する運転支援が行われるタスクとする。(本研究は緊急時の回避支援用システムは対象としていない。) また、実験の際には各種のアンケート調査による主観調査により受容性評価を行い、更に介入支援時のステアリング挙動などに基づく客観評価により車両安全性評価を行い、主観・客観評価の両面より有効性を検証する。



図 2 使用したドライビングシミュレータ

(2) 上述したインピーダンス制御を用いた運転支援システムや実験装置や基本的な実験条件は同一として、視覚 HMI や聴覚 HMI を追加して導入することで介入支援時のドライバ受容性変化に関する検証実験を行う。聴覚に関してはスピーカーより発せられる効果音もしくは音声とし、視覚についてはドライバの見やすさを重視し HUD を使用するものとした。本実験では DS 画面上に仮想的に表示する HUD を使用した。ドライバ視点から HUD 表示までの距離は約 1.4m であり、HUD のドライバ視野に対する表示範囲は上下角が $-9.2 \pm 4.3 \text{deg}$ 、水平角が $0 \pm 9.0 \text{deg}$ である。画面上の HUD 表示エリアの実サイズは横 0.235m、縦 0.129m である。

まず、支援開始のどれくらい前の時間から支援開始予告を行うことがドライバ受容性改善につながるのかについて、力覚、聴覚、視覚のどの知覚情報を用いて行うかを検討した。視覚は運転時の周辺環境情報などの把握に重要な役割を果たしており、力覚は本研究で提案した手法により介入支援時に中核の役割を果たすため、本システムで有効な役割が与えられていない聴覚情報にて介入支援の予告を行うことにした。(予備実験において、聴覚情報が予告に適しているとの結果も出た。) そして、予告効果音提示により、介入支援開始前のどの程度の時間に予告を行うのが良いかの検証実験を行う。

次に、これまでの成果をふまえて、ドライバに対して提示する各種介入支援用情報として、シンボルアイコン表示、文字表示、音声発声の三種類の情報提示手段を全て同時に提示することにより、介入支援時にドライバがシステム側から提示されるどの提示情報を重視するかの検証実験を行う。文字表示については文字数を変化させ、音声については発音時間と発音速度を変化させた条件を用意し、それぞれの情報提示におけるドライバの許容提示情報量の検証を行う。また、システム側より提示される情報として、システムが行う支援に関する情報を提示するか、ドライバが行うべき操作に関する情報を提示するか、どちらの情報がドライバにとって望ましいかの検証も行う。

最後に上記の全ての結果から、見やすさを重視した疎ピクセルアイコンを提案して導入し、文字とピクトグラムを組み合わせたアイコン表示を用いた HMI による介入支援システムを構築し、それを用いてドライバ受容性と表示アイコンの提示情報量について検討する。表示するアイコンの大きさを小中大の 3 つのサイズを用意し、大きさと提示時間を変化させて検証実験を行う。

以上の実験より、インピーダンス制御を用いた介入支援システムにおける有効な HMI デバイス構成に関して検討を行い結論を出す。

#### 4. 研究成果

##### (1) インピーダンス制御を導入した介入支援システム

まず、提案する減衰比がパラメータ設定の際に統一的に使用できる評価指標になるかを検証した。その結果、アシスト力に関連するばね定数値をアシスト力の強弱で用意し、粘性係数 $D_a$ を変化させるとドライバ受容性が最大となる粘性係数値が異なっていたのに対し、減衰比を变

化させた場合は同じ値となった。このように、ドライバ受容性が高い減衰比を事前の実験により決定しておけば、粘性係数の最適値を各種条件に対して個々に評価実験を行う必要はなくなり、車両のステアリングダイナミクスが決まれば容易に受容性が高いインピーダンスパラメータを決定できることが確認でき、提案するパラメータ評価指標の有効性が確認できた。

そして、この評価指標を用いて、インピーダンス制御を用いた運転支援システムと従来の運転支援システムのドライバ受容性の比較を行った。図3に「使用した操舵支援システムをどう思うか」という被験者全体のアンケートに基づく主観評価の平均値の結果を示す。このグラフは縦軸が全被験者の主観評価の平均値を示しており、正值が大きい程受容性が高い評価で、負値が小さくなる程受容性が低い評価となる。横軸は減衰比を示しており、減衰比の値が0の場合が従来の運転支援システムであり、それ以外が提案する運転支援システムとなる。図中のオレンジ色の線が結果を示している。この結果より、減衰比0の従来の運転支援システムに対して、減衰比10や20の設定の提案運転支援システムはドライバ受容性が負から正に大きく改善していることが確認できる。同時に、ステアリング操舵角速度などの客観的な評価でも、介入支援中の角速度の最大値やステアリングのふらつきは減衰比が大きくなる程小さくなっており、車両挙動的には減衰比が大きい程安全になることが確認された。以上の結果より、提案するインピーダンス制御を用いた操舵介入支援システムについての有効性も確認できた。

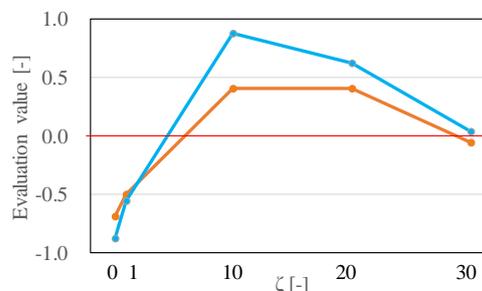


図3 減衰比によるドライバ受容性評価結果

## (2)HMI デバイスを加えた介入支援システムの評価

音声提示 HMI デバイスによる介入支援開始予告の最適時間の検証のための実験を行った。その結果、介入支援開始一秒前において効果音によって介入支援予告を行うのが最適な支援予告時間であることが確認された。そして、一秒前に効果音による介入支援予告を行う設定に基づき、先に行った停止車両回避タスクの実験と同様の実験を行い、ドライバ受容性の評価を行った結果を図3の青色の線で示す。予告用音声提示 HMI が無い状態の上述の実験結果であるオレンジ色の線と、予告 HMI 有りの青色の線と比較すると、ドライバ受容性が最大となる減衰比は10と同じ値のままであり、また、他の主観評価結果でのステアリングの操作感評価なども差は無かったが、効果音による介入予告導入前と同様の減衰比10においてドライバ受容性が約2倍向上したことが確認できる。この結果より、支援開始一秒前に効果音により支援予告を行うことはドライバの受容性向上に寄与することが確認できた。

次に、介入支援時に三種の情報提示を全て同時に提示する実験を行った。実験の結果、三種類の提示情報の中で重視する情報は被験者毎に異なる結果となり、個人毎に好む提示情報には差異があることが確認されどれか一つに確定できなかった。HMI にて提示される支援情報については、システムが行う支援に関する情報提示より、ドライバが行うべき操作に関する情報提示を行う方が良いという結果が得られた。さらに、提示情報量について検討した結果、文字表示であれば文字提示量は8文字程度、音声発声であれば発声時間は一秒程度かつ一秒あたりの発音文字数は6文字から7文字程度となり、さらに簡潔な二つの単語で構成される意味が明快な情報提示が求められるという結果が得られた。これらを検討した結果、少ない文字とピクトグラムを組み合わせて、いつ何をドライバが行うべきかに関する情報提示を行えば良いのではないかと考えた。

このため、さらに文字とピクトグラムで構成される疎ピクセルアイコンを HUD 表示するインピーダンス制御による介入支援システムの評価実験を行った。その結果、表示時間が長い方が表示されたアイコンの情報を正しく認識するのに妥当との結果が得られたが、時間が長すぎると介入支援が始まるまでに時間があきすぎて良くないと被験者の指摘もあり、これは前述の一秒前予告が良いという結論と一致する。また、中サイズ以上の大きさのアイコンによる表示で、かつ、一秒以上の予告情報提示という条件において、二つまでのアイコンの認識であればドライバの認識率はほぼ100%となる結果が得られた。

## (3)研究成果まとめ

本研究の結論を総括すると、操舵介入支援システムにインピーダンス制御を導入し、そのインピーダンスパラメータを減衰比に基づき適切な値(今回の結果であれば10)と設定することで、ドライバ受容性が従来型運転支援システムと比較して向上することが確認された。さらに、介入支援開始一秒前に介入支援開始予告効果音を発音すると同時に、HUD上に介入支援の原因となる要因情報アイコンやドライバが行うべき操作情報アイコンを提示し、また、その表示数を最大二つまでとし、なおかつHUDの表示エリアに制限があることを考慮し、アイコンの大きさは中サイズとすることでドライバにとって良好な介入支援が行えるという結論が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 平田拓也, 早川聡一郎, 堤 成可, 池浦良淳
2. 発表標題 複数のHMIを搭載したインピーダンス制御を用いた操舵支援システムの受容性評価
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平田拓也, 早川聡一郎, 堤 成可, 池浦良淳
2. 発表標題 複数HMI導入によるインピーダンス制御型操舵支援手法の受容性評価
3. 学会等名 自動車技術会2018年秋季大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平井翔大, 平田拓也, 早川聡一郎, 堤 成可, 池浦良淳
2. 発表標題 複数のHMI導入によるインピーダンス制御を用いた操舵支援システムの受容性評価
3. 学会等名 日本人間工学会東海支部2018年研究大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平井翔大, 平田拓也, 早川聡一郎, 堤 成可, 池浦良淳
2. 発表標題 複数のHMI搭載によるインピーダンス制御を用いた操舵支援手法の受容性評価
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第68期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土居雅歩, 平田拓也, 早川聡一郎, 堤 成可, 池浦良淳
2. 発表標題 力覚と聴覚を組み合わせたHMIを用いたインピーダンス制御型操舵支援手法の受容性評価
3. 学会等名 日本人間工学会東海支部2019年研究大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuya Hirata, Soichiro Hayakawa, Shigeyoshi Tsutsumi and Ryojun Ikeura
2. 発表標題 Evaluation of Acceptability of Steering Support Method Using Impedance Control with Multiple HMIs
3. 学会等名 The 4th International Conference on Robotic Automation System (ICORAS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考