

令和元年5月31日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02353

研究課題名(和文) 知能化自動車のためのスーパーバイザ型協調制御とその実証

研究課題名(英文) Supervisory Driver Assistance Control and Its Verification

研究代表者

鈴木 達也 (Suzuki, Tatsuya)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：50235967

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,200,000円

研究成果の概要(和文)：次世代の知能化自動車では、自動運転から手動運転まで、システムとドライバが幅広い協調形態をとり得るアーキテクチャが求められる。本研究では、システム/ドライバの協調系が満たすべき要件として、1.安全性が確保されること、2.ドライバの受容性が高いこと、3.支援システムの経験を通してドライバ自身の運転特性が改善されること、の3要件を設定した。この3要件を満たす協調制御系として、指導員型運転支援、すなわち運転知能に基づいて生成される許容可能行動集合内に車両挙動を制約する新しい支援制御を提案し、80名程度の被験者を対象として認知科学的見地を交えてその妥当性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近未来の知能を持った自動車とドライバの協調関係において、安全性の確保や受容性の向上は喫緊の重要な課題である。しかしながら、通常は支援をすればするほどドライバ自身の運転能力は劣化するとされており(認知的疲労性萎縮)、この点は知能を持った機械と人間の関係を考えるうえで重要なポイントとなる。本研究では、高齢者の実時間での運転支援と運転者自身の運転能力向上を両立させる新しい支援手法を提案した。研究の最終段階では、その特徴に鑑み、提案手法を「指導員型の運転支援」と名付けた。これにより近未来の知能を持った機械と人間の関係に関する新たな一つの形態を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：Safety and acceptability are main concerns in the design of driver assistance system. In fact, these two requirements sometimes may conflict with each other depending on a situation and driver. This conflict is more emphasized particularly in the case of considering elderly driver. In order to solve this problem, this paper proposes a new driver-vehicle cooperation scheme, a 'supervisory cooperation control' which consists of model predictive constraint satisfaction and multimodal human-machine interface. The proposed cooperation scheme enables us to realize the safety without losing acceptability. In addition, we have verified that the proposed assistance system improve the driver's original driving characteristics, i.e., the driver can learn how to realize the safety driving.

研究分野：制御工学、人間機械系

キーワード：知能化自動車 高齢者 運転行動 人間機械協調 制約充足

### 1. 研究開始当初の背景

機械学習や認識技術の向上により、機械の知能化は今後ますます加速する。機械の知能化を積極的に押し進め、人間がより生き生きと暮らせる社会づくりをすることは人類にとって喫緊の重要課題である。この観点から自動車においても知能化が押し進められており、完全な自律型自動運転を目指す取り組みが今後加速すると予想される。一方で知能化自動車とドライバーとの関係において、機械（自動車）のみ一方的に知能化が進み、人間（自動車ドライバー）の機能低下が加速する共生形態は「人らしさの損失」という意味において決して好ましくはないという考え方は根強い。自動車に搭載される知能が高度化すればするほど、ドライバーの努力は減少し、その努力が減れば減るほど利便性は向上するが、本来持っていた運転能力を喪失していく。これは認知科学の分野では認知的廃用性萎縮と呼ばれ、一方的にシステムの知能化が進んだ時の負の側面の一つとして捉えられている。そもそも自動車の知能化における最大の目標は安全性の向上であり、利便性の向上は二次的な目標のはずである（安全性は普遍的な価値だが、利便性が生み出す価値の評価は人による）。そう考えると別の二次目標として利便性の向上以外に運転能力の向上を考えることは自然と言える。

### 2. 研究の目的

近未来の知能を持った自動車とドライバーの協調関係において、安全性の確保や受容性の向上は喫緊の重要な課題である。本研究では、高齢者の運転能力評価システムと運転能力向上システムを検証するとともに、世界に先駆けて「指導員型の運転支援」を提案し、これらの課題解決をはかる。また提案する運転支援を通して、ドライバー自身が成長することを「人間と機械の融和」と捉え、シミュレータを用いて老若男女合わせて 100 名規模での実証実験を行う。また、シミュレータと実際の車両との差異、特に体感加速度の違いによる差異を検証するため、実機（小型電気自動車 COMS）を用いて 10-20 名程度の実証実験を特定区域で行う。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 行動誘導型介入支援

本研究では、運転指導員を模倣した支援システムの設計を行い、この支援システムによるドライバーの安全性向上、および運転技術の向上を目指す。図 1 は提案する運転指導員型支援システムであり、モデル予測型制約充足判定と HMI/介入支援から構成される。

モデル予測型制約充足判定では、運転指導員の運転行動を許容可能行動集合として表現する。そして、ドライバーの挙動を運転行動/車両モデルにより予測し、許容可能行動集合に含まれているか判定する。この充足判定では、運転行動が安全である操作量の範囲を実時間で求めており、ドライバーの操作量がこの範囲内であれば安全であるとみなす。

HMI/介入支援では、モデル予測型制約充足判定に基づきドライバーの行動誘導を行う。これは緊急回避のように、危険な状況になってから強制力の強い支援を行うのではなく、規範運転行動から定められる許容可能行動集合と照らして、それを破りそうなときに（危険

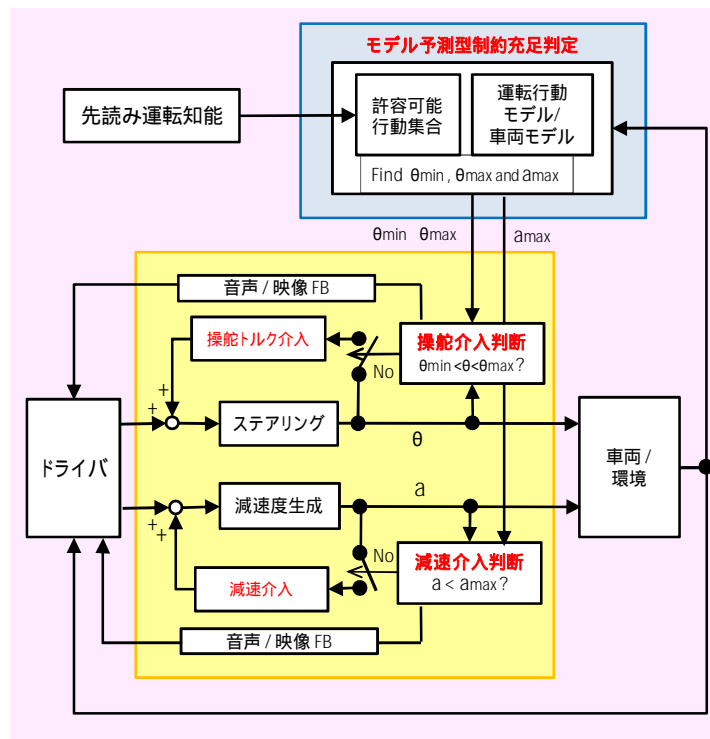


図 1 提案システムのアーキテクチャ

回避より早いタイミングで) 支援を実行する。このように、HMI/介入により運転指導員の指導を疑似的に実現し、早い段階から安全な運転方法を提示することにより、ドライバの行動誘導を行う。

行動誘導型の運転支援においては、規範運転行動により定義された許容可能行動集合から逸脱しないことを制約とするため、緊急回避より広い意味での「安全性」が高い確率で満たされる。また、必要な時以外は操作介入等を行わないという行動誘導の思想により、「高受容性」が期待できるばかりか、許容可能行動集合を可変とすることでシステムと人間の「エフォートバランスの調整」も可能となる。さらには、支援を経験することで少なくともその後しばらくの間はドライバの運転行動自体が改善される(ドライバ自身の行動変容)可能性が期待できる。

### 3.2 許容可能行動集合の決定

行動誘導型介入支援では、運転指導員の過去の走行データから許容可能行動集合を決定する必要がある。しかし、この許容可能行動集合は走行道路や他の交通参加者に応じて変化するため、この集合を決定するための運転知能の構築は容易ではない。

この問題を解決するため、周囲環境と自車の状態から衝突確率を求め、この確率をリスク指標として許容可能行動集合を決定する。また、運転指導員は様々なリスクに対し対応しているため、目に見える顕在的なリスク要因だけではなく、目に見えない潜在的なリスク要因も考慮する。

時刻  $t$ 、操作量  $\theta$  における自車の予測挙動を  $D(t + \tau | t, \theta)$  と表現し、他の交通参加者  $i$  の予測挙動を  $D_i(t + \tau | t)$  と表現するとき、時刻  $t + \tau$  の衝突確率は

$$P_i(|D(t + \tau | t, \theta) - D_i(t + \tau | t)| < l + l_i | t, \tau, \theta) \quad (1)$$

と表現できる。ただし、 $l$  は自車の大きさ、 $l_i$  は交通参加者  $i$  の大きさを表す。この衝突確率は非線形計算を含み、解析的には計算することができない。この問題を解決するため、サンプル計算により、確率を求める手法を考える。この手法では、確率を表現するためのサンプル数(計算機能力)が必要となるが、統計理論によりサンプル数に応じた信頼度を計算することができ、また、潜在的なリスクも容易に考慮できる。図2の扇状のグラフはサンプル計算により求められた図下部の状況における衝突確率を示している。

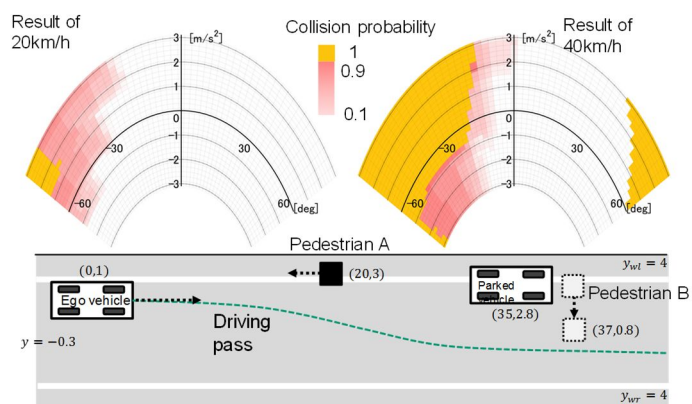


図2 衝突確率とステアリング操舵角

より求められた図下部の状況における衝突確率を示している。円周方向が操作ステア角、半径方向が操作加速度を表しており、これらの操作量を行った場合の3秒以内における衝突確率をカラースケールとして表現している。このとき、歩行者や駐車車両などの顕在化リスクは確率的な要素を含まないため、衝突確率が1(グラフ中では黄色)となる。一方、駐車車両背後から歩行者が飛び出すことも想定しており、的リスク(グラフ中では赤のカラースケール)として計算される。グラフの左図は20km/hで走行中の衝突確率を、右図は40km/hで走行中の衝突確率を表しており、車両の状態や操作量に応じて大きく衝突確率が異なることわかる。

このように状況に応じて許容可能行動集合は大きく異なるため、最終年度では本手法を利用して許容可能行動集合を設定し、運転指導員型支援システムの検証を行う。

## 4. 研究成果

### 4.1 短期的運転能力改善効果の検証

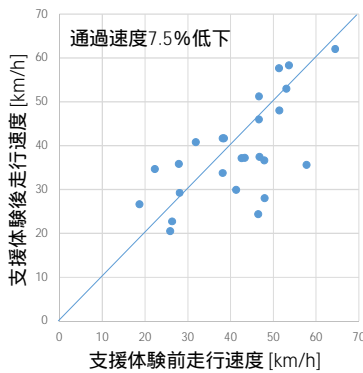


図3 駐車車両脇通過速度の変化  
パターン[1]

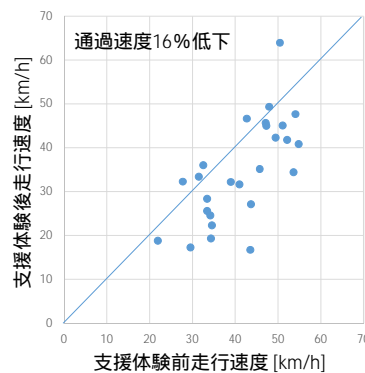


図4 駐車車両脇通過速度の変化  
パターン[2]

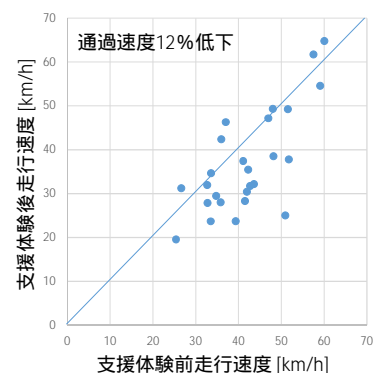


図5 駐車車両脇通過速度の変化  
パターン[3]

前章で述べた指導員型運転支援がドライバにどのような学習効果すなわち運転行動変容をもたらすかを検証するため、ドライビングシミュレータを用いて実験を実施した。参加者は、駐車車両・歩行者脇通過と無信号交差点の通過を含むコースを走行した。3地点はいずれも死角からの飛び出しに備えるため、速度を落としてマージンを広く取った走行が望ましいとされる運転シーンである。実験ではまず、システムによる運転支援が働かない状態で走行を行い（プレ走行）、その後に教習支援を経験し（支援走行）、最後に支援が働かない状態で再度走行を行った（ミッド走行、ポスト走行）。支援内容による影響の差異を検討するため、

- (1) 情報提示支援を行わず、システムが持つ許容可能行動集合が広い「情報提示なし・弱制御介入条件」
- (2) 情報提示支援を行い、システムが持つ許容可能行動集合が広い「情報提示あり・弱制御介入条件」
- (3) 情報提示支援を行い、システムが持つ許容可能行動集合が狭い（介入頻度が高い）「情報提示あり・強制御介入条件」

の3条件を設定した。さらに、これらの条件を組み合わせ、以下の3つの順序パターンにて実験を行った。

- [1] 計測走行(プレ) (1) 計測走行(ミッド) (2) 計測走行(ポスト)
- [2] 計測走行(プレ) (2) 計測走行(ミッド) (3) 計測走行(ポスト)
- [3] 計測走行(プレ) (3) 計測走行(ミッド) (2) 計測走行(ポスト)

参加者は日常的に運転を行う88名の男女であり（ただし、そのうちの8名は体調の悪化により実験を中止したため、計80名）平均年齢60歳となっている。なお、参加者は全て運転免許を保有し、5年以上の運転経験を持っている。これらの参加者に対し、上記の[1]、[2]、[3]のいずれかの試行にランダムに割り当てられた。運転能力改善を検証するため、駐車車両付近におけるプレ走行とポスト走行間の通過速度の比較を行った。図3, 4, 5はそれぞれ、条件[1]、[2]、[3]における通過速度を示す。条件[1]では、プレ-ポスト走行間において全体平均通過速度が7.5%、条件[2]では16.0%、条件[3]では12.0%減少している。これらのデータより、指導員型運転支援を体験することにより通過速度が下がり、ドライバの安全運転に対する運転能力が向上したことがわかる。この運転能力の改善は条件ごとに効果が異なり、条件[1]では効果が最も低くなった。これは情報提示がないため、システムの意図が伝わりにくく、安全な行動へ支援するという目的が理解しづらかったためであると考えられる。また、条件[2]、[3]間の比較では、条件[2]の方の速度低下効果がより大きいことがわかる。このとき、強制御介入条件では制御介入の頻度が高く、かつ自由に運転できず、システムの意図が伝わりづらい。そのため、先に強介入を体験するとシステムを煩わしく感じてしまい、速度の低下効果に差が生じたと考えられる。このように、運転能力改善効果はドライバの認知的側面にも大きく影響を受けるが、比較的高齢ドライバを対象とした実験にもかかわらず、総じて運転能力改善効果が得られていることは興味深い。

#### 4.2 継続的使用による長期的運転能力改善効果の検証

前節での実験の結果、指導員型運転支援により短期的な運転能力改善効果が観測されたこと、および制御介入の程度と情報提示の有無がその運転能力改善効果に影響を与えることが示された。しかしこの運転能力改善結果は、約90分の実験の中で生じた短期間の学習効果を示したに過ぎない。今後このような運転支援システムが実際に実用化されることを見据え、ドライバが本システムを長期的かつ継続的に使用した際の効果を明らかにする必要がある。そこで本研究では、支援を継続的に経験することによって、ドライバの運転能力改善効果がどのような変化を見せるのかを検証した。18名の参加者（平均年齢30.5歳）が1日90分の実験に計4日参加した。実験間には1週間の間隔を設けたため、完了まで4週間を要した。4日の実験手続きはすべて同一で、まずシステムによる運転支援が働かない状態で走行を行い（プレ走行）、その後に教習支援を経験し（支援走行）、最後に支援が働かない状態で再度走行を行った（ポスト走行）。本システムが支援を行う対象として、短期的能力改善効果検証実験と同様、駐車車両・歩行者脇通過と無信号交差点の通過を想定した。また、各対象はそのリスクの高さが異なる2種類がそれぞれ設けられた。例えば、交差点はその付近の塀が高く死角が大きい場合をリスクの高い交差点とし、一方、塀が低く死角が小さい場合をリスクの低い交差点として設定した。本運転支援システムの仕様として、リスクの高い対象に対しては低い対象に比べて制御介入が頻繁に行いやすい。その関係性にドライバが気付くことができれば、リスクに対する理解が深まり、安全運転に関する能力が改善することが期待される。本研究では、同じ日のプレ走行からポスト走行への変容を「短期的能力改善効果」、週を追うごとに観測される変容を「長期的能力改善効果」として定義する。システムによる支援の意図について、ドライバの理解が徐々に進むのであれば、短期的能力改善とその忘却を繰り返しながら、長期的能力改善が観測され、一方、一度の経験で十分理解できれば、1日目に短期的能力改善が観測され、その後、長期的な変容が見られないと予測される。速度とマージンの推移の分析には、4（日：1日目 / 2日目 / 3日目 / 4日目）×2（走行：プレ走行 / ポスト走行）の分散分析を用いた。速度の推移とマージンの推移を分析した結果、以下に述べる2種類の推移パターンが出現した。ここではそれぞれを「初期的効果出現パターン」と「漸進的效果出現パターン」と定義する。

##### 漸進的效果出現パターン

各日においてプレ-ポスト間に短期的能力改善効果が生じ、いったん忘却するが、再度短期的能力改善効果が現れる。つまり、週を追うごとに長期的運転能力改善効果が現れる。駐車車両脇通過時の速度がこのパターンに該当する（図6）。統計的には、日の主効果と走行の主効果がともに有意で、交互作用は見られない。

##### 初期的効果出現パターン

1日目のプレからポストにかけて短期的能力改善効果が現れるが、それ以降は短期的変容も長期的変容も生じない。無信号交差点の歩行者脇通過時のマージンがこのパターンに該当する（図7）。統計的には日と走行の交互作用が有意で、1日目プレがその他との間に有意差が見られる。

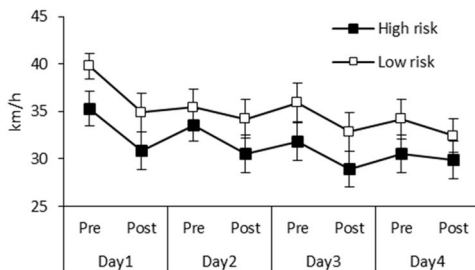


図6 駐車車両脇通過速度の推移  
（漸進的效果出現パターン）

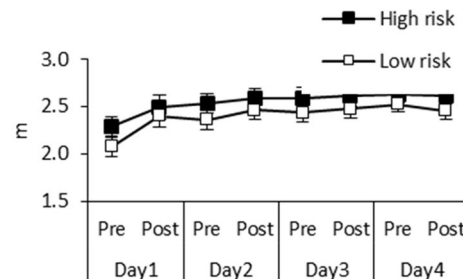


図7 歩行者脇通過マージンの推移  
（初期的効果出現パターン）

これら2つのパターンはいずれも、リスク対象と運転行動の種類が同じであれば、リスク高低によらず同じであった。なお、駐車車両脇通過時のマージンについては、上記の2パターンには該当しなかった。漸進的效果出現パターンは支援経験直後には変容が見られ、かつ週を追うごとに徐々に効果が深まる漸進的效果を表していると解釈できる。週を挟むことで短期的に見られ

た効果が一旦消失するため、上下変動が起きている。システムを短時間経験するだけではドライバは安全な走行について十分に学習できなかったが、期間を空けて支援を繰り返し経験することで、徐々に理解が深まっていったと考えられる。これに対し、初期的効果出現パターンは、ドライバがシステムを通して潜在的なリスクの存在を即座に理解し、その学修内容が1週間保持され続けていたことを示唆している。このように同じ長期的能力改善効果でもリスクや操作の内容によってその現れ方が異なる点は興味深い。

## 5. 主な発表論文等

- 1) Matsubayashi, S., Miwa, K., Yamaguchi, T., Kamiya, T., Suzuki, T., Ikeura, R., Hayakawa, S., Ito, T. (2017). "Empirical Investigation of Changes of Driving Behavior and Usability Evaluation Using an Advanced Driving Assistance System." Proceedings of the Thirteenth International Conference on Autonomic and Autonomous Systems, pp.36-39, 2017 **Best paper Award 受賞**
- 2) Short- and Long-Term Effects of an Advanced Driving Assistance System on Driving Behavior and Usability Evaluation, Shota Matsubayashi, Kazuhisa Miwa, Takuma Yamaguchi, Tatsuya Suzuki, Proceedings of The Twelfth International Conference on Advances in Computer-Human Interactions, pp.1-6, 2019 **Best paper Award 受賞**

〔雑誌論文〕(計9件)

〔学会発表〕(計12件)

〔産業財産権〕

取得状況(計1件)

名称：運転支援装置

発明者：山口拓真、奥田裕之、鈴木達也

権利者：国立大学法人 名古屋大学

種類：特許

番号：特許 6315827

取得年：2018年

国内外の別：米国、ドイツにも出願中

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名	村瀬洋	三輪和久	田崎勇一	山口拓真
ローマ字氏名	Hiroshi Murase	Kazuhisa Miwa	Yuichi Tazaki	Takuma Yamaguchi
所属研究機関名	名古屋大学	名古屋大学	神戸大学	名古屋大学
部局名	情報学研究科	情報学研究科	工学研究科	未来社会創造機構
職名	教授	教授	准教授	特任助教
研究者番号	90362293	90219832	10547433	30745964

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。