

[研究助成 (S)]

行動予測を用いた制約充足判定に基づく行動誘導型運転支援

New Driver Assistance System for Driving Behavior Improvement based on
Model Predictive Constraint Satisfaction

2158002



研究代表者	名古屋大学 大学院工学研究科	教授	鈴木 達也
共同研究者	名古屋大学 大学院情報学研究科	教授	三輪 和久
	三重大学 大学院工学研究科	教授	池浦 良淳

[研究の目的]

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推し進められており、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的目標として利便性の向上以外に運転能力の向上があってもおかしくはない。

本研究では、このように安全性を確保しつつ、ドライバーの成長を促進する知能化自動車との関係性を「人間と機械の融和」と捉え、「指導員型運転支援」として具体的に定式化し、その実現に取り組んだ。ただし、指導員型運転支援においても安全性の向上が最優先の目標であることに何ら変わりはない。指導員型運転支援では、知能化自動車とドライバーの共生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) ドライバーの受容性が高いこと、(3) ドライバー自身の運転能力が向上すること、を定めることになり、今までにない新たな運転支援の概念が創出される。以下に成果の概要を示す。

[研究の内容, 成果]

1. 指導員型運転支援のアーキテクチャ

図1に提案する指導員型運転支援システムのアーキテクチャを示す。提案するシステムは、モデル予測型制約充足判定と情報提示/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

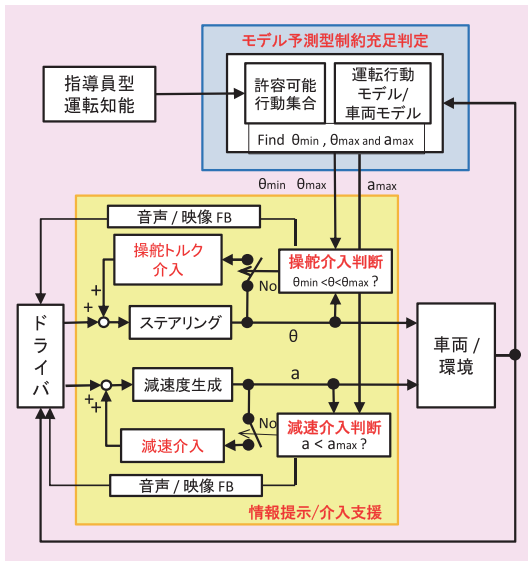


図1 指導員型運転支援アーキテクチャ

合として表現する。そして、ドライバの挙動を運転行動／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、ドライバの操作量がこの範囲内であれば安全であるとみなす。

情報提示／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への情報提示・介入を行う。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、車両の将来挙動がそれを破りそうなときに支援を実行する。つまり、「してはいけないことをしそうなときに情報提示・介入をする」という考え方であり、運転指導員の指導を疑似的に実現した着想と言える。

提案する支援システムの操舵介入において、ステアリングに加える介入支援トルクは以下の式のように定めた。

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

ここで、粘性係数を D_a [Nm・s/rad]、ばね定数を K_a [Nm/rad]、指導員型制御介入の許容ステアリング回転角度を θ_i [rad] とする。 D_a と K_a は自由に設定できるパラメータである

が、安全性とドライバの受容性に大きな影響を与える。これらのパラメータのうち、ばね定数 K_a については、操舵介入時のドライバへのアシストトルクに関係するため主に安全性の観点から決定した。一方、粘性係数 D_a は受容性に大きな影響を与えることが判明し、アンケートに基づき最適値を導出した。

指導員型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、実時間での「安全性」は確保される。また、必要な時以外は制御介入等を行わないという思想により、「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、ドライバ自身が主体性を失うことはないため、支援により運転能力が低下することなく、逆にしてはいけないことを適切に指摘されることで運転能力の改善につながる。

2. 運転シミュレータを用いた検証

運転シミュレータを用いて行った検証実験結果を図2示す。図2は上から順に、車両の横方

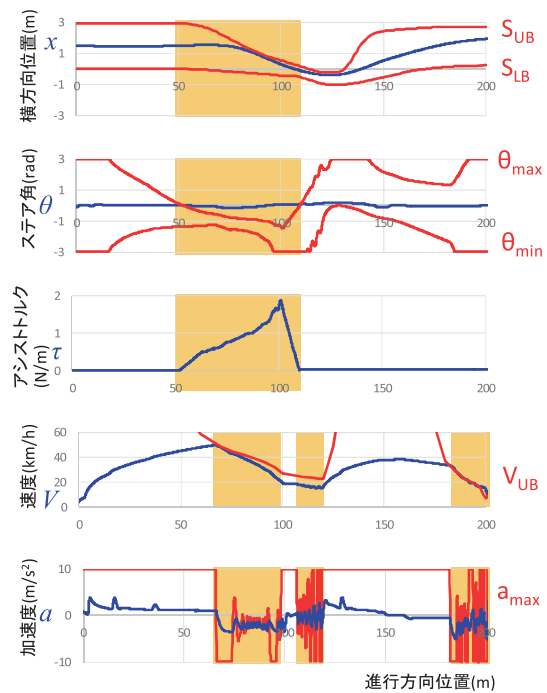


図2 DSによる検証実験結果

向挙動（赤線：許容可能経路境界，青線：実際の挙動），ステア角（赤線： $(\theta_{\min}(t), \theta_{\max}(t))$ ，青線：実際のステア角）アシストトルク，車両の縦方向挙動（赤線：許容可能速度境界，青線：実際の速度），減速度（赤線： $a_{\max}(t)$ ，青線：実際の減速度）をそれぞれ表す。横軸はいずれも車の進行方向距離を表す。ハッチングしてある領域は制御による介入が行われた領域である。例えば，横方向支援の場合，実際のステア角（上から二つ目のグラフの青線）が許容範囲（赤線）を超えた時点で操舵トルクによる介入が行われている。また，縦方向支援についても，実際の減速度（一番下のグラフの青線）が許容範囲（赤線）を超えた時点で減速支援が行われている。結果として，想定した安全な駐車車両脇通過が達成できている。また，許容可能領域を狭めることで，システム側のエフォートが増大し，より，安全性を意識した支援も可能となる。

3. 短期的運転能力改善効果の検証

2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年以上の運転経歴を持っている。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

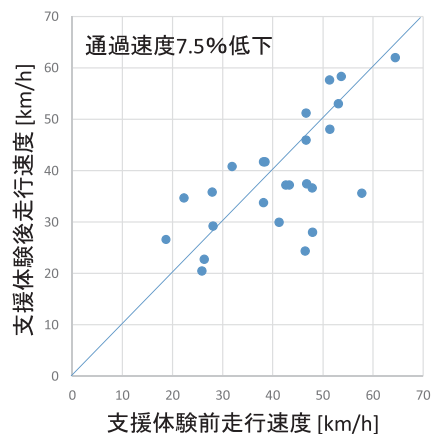


図3 駐車車両脇通過速度の変化（パターン[1]）

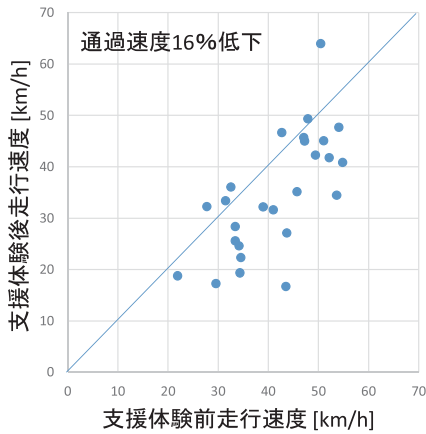


図4 駐車車両協通過速度の変化 (パターン[2])

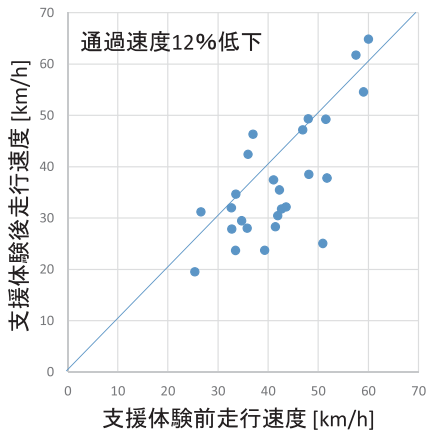


図5 駐車車両協通過速度の変化 (パターン[3])

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、ドライバー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ー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. 継続的使用による長期的運転能力改善効果の検証

3章での実験の結果、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、ドライバー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、ドライバー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・歩行者協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ー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。速度の推移を図6, 7, 8に, マージンの推移を図9に示す。その結果, 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「漸進的効果出現パターン」と定義する。

・漸進的効果出現パターン

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・歩行者側通過時の速度がこのパターンに該

当する(図6, 7)。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。無信号交差点の通過速度, 歩行者協通過時のマージンがこのパターンに該当する(図8, 9)。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。

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, 駐車車両協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。

漸進的効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効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

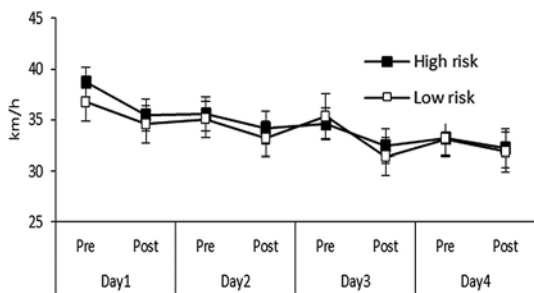


図6 歩行者協通過速度

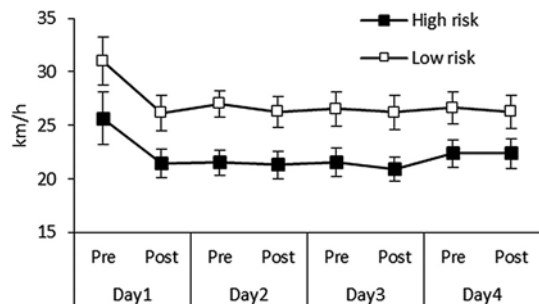


図8 無信号交差点通過速度

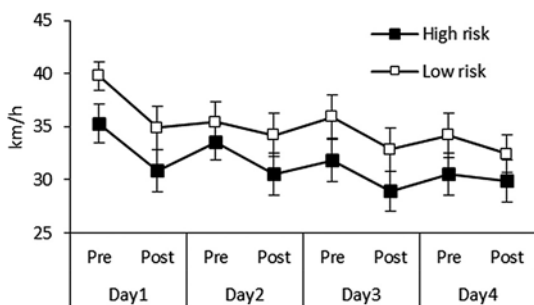


図7 駐車車両協通過速度

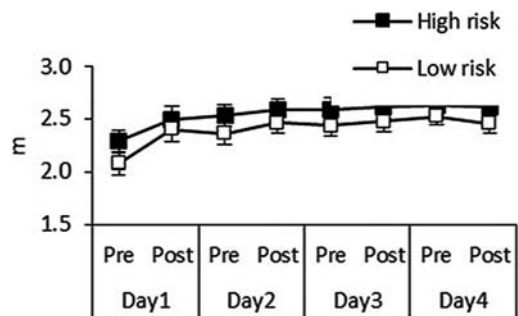


図9 歩行者協通過マージン

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. 実車への実装

提案する指導員型運転支援を図10に示す小型の一人乗り電気自動車（COMS）に実装し、動作を確認した。運転能力改善効果の検証はまだできていないが、運転支援を伴った運転行動自体は、運転シミュレータで観測された運転行動と大きな差異はなく、運転能力改善効果についても実車でも同様な効果が期待される。



図10 小型一人乗り電気自動車（COMS）

6. まとめと今後の展望

本研究では、安全性を確保しつつドライバの成長を促進する知能化自動車とドライバとの関係性を「人間と機械の融和」と捉え、「指導員型運転支援」として具体的に定式化し、その実現に取り組んだ。運転シミュレータを用いた100名程度を対象とした検証実験の結果、短期的な能力改善効果のみならず、継続的に使用することで長期的な能力改善効果があることを確認した。今後の課題は以下の通りである。

- ・他の様々な運転シーンにおける効果検証
- ・実車を用いた運転能力改善効果の検証
- ・安全性、ユーザビリティ、運転能力改善の3項目を統合した運転支援評価手法の構築
- ・ドライバと知能化自動車の両者がともに成長するシステムの創出

本成果をもとにした今後のプロジェクト活動は以下の通りである。

トヨタ自動車 共同研究 H30.4～

JST 未来社会創造事業 H30.4～

「認知科学と制御工学の融合による知能化機械と人間の共生」研究代表者：鈴木

【論文・国際会議発表】

1. A. Maehigashi, K. Miwa, H. Aoki, T. Suzuki, "Investigation of determinative factors on usability evaluation of adaptive cruise control", International Conference on Human-Computer Interaction, LNCS (HCI 2018), pp. 445-456, 2018
2. T. Wilhelm, H. Okuda, T. Suzuki, "Identification of Time-Varying Parameters of Hybrid Dynamical System Models and Its Application to Driving Behavior", IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E100-A, No. 10, pp. 2095-2105, 2017.
3. S. Matsubayashi, K. Miwa, T. Yamaguchi, T. Kamiya, T. Suzuki, et. al, "Empirical Investigation of Changes of Driving Behavior and Usability Evaluation Using an Advanced Driving Assistance System." Proc. of the T13th Int. Conf. on Autonomic and Autonomous Systems (ICAS 2017), pp. 36-39
Best paper Award 受賞
4. 山口拓真, 奥田裕之, 鈴木達也, 早川聡一郎, 池浦良淳, 武藤健二, 伊藤隆文, "運転教習員型運転支援の提案とその評価", 自動車技術会論文集 48 (3) 717-724 2017年5月.
5. 佐藤大地, 山口拓真, 奥田裕之, 鈴木達也, "個人適成型ポテンシャル法に基づく障害物回避アシスト制御 (第2報)", 自動車技術会論文集, Vol. 48, No. 1, pp. 97-102, 2017
6. 前東晃礼, 三輪和久, 小島一晃, 寺井仁, 鈴木達也, 自動化システムのユーザビリティ評価アンケートの開発. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J100-A, No. 6, pp. 240-250, 2017
7. T. Yamaguchi, H. Okuda, T. Suzuki, et. al, Implementation and verification of supervisory

cooperative control by model predictive method,
IEEE ITSC, pp.1180-1185, 2016

交通医学工学研究会 第 26 回学術総会, 2017 年 9
月

【招待講演】

8. 鈴木達也, “人間と共生する知能化機械をめざして”, 知識型 AI 技術とその応用, 活用手法を学ぶ, 日本情報技術センター, 2018 年 8 月
9. 鈴木達也, “人と機械の協調運転について”, 日本

【特許】

10. 運転支援装置, 特願 2015-65761, 海外出願 (米国, ドイツ)
- その他に解説記事 2 編 (自動車技術会, 人工知能学会, 執筆中)