

講演 6. 自動運転車の制動制御の安全性評価手法の開発

自動車安全研究部 ※後閑 雅人 田中 信壽 岩瀬 常利 廣渡 太一
安本 まこと 古川 修 (客員研究員)

1. はじめに

日本政府は、2020年までに交通事故によって24時間以内に亡くなった人数（以下、交通事故死者数）を2,500人以下まで減らすことを目標に掲げ、世界一安全な道路交通の実現を目指している¹⁾。国内における2018年の交通事故死者数は、3,532人であり²⁾、政府の目標を達成するためには、より効果的な交通事故対策が求められ、その対策の一つとして、自動運転車の普及を推進している³⁾。自動運転車の普及に伴い、ドライバが運転する車両との混合交通を想定する必要があり、自動運転車には、この混合交通下において安全に走行することが求められる。これを実現するためには、周りのドライバが安全に走行できることが重要であり、自動運転車の車両制御はドライバが予測できることに加えて、危険を感じさせないことが必要であると考えられる。そこで、周りのドライバが感じる衝突の危険を考慮して、自動運転車の車両制御を評価する手法を検討した。

過去7年間（2011～2017年）に一般道路において発生した交通事故件数⁴⁾を事故形態別に分析すると、追突事故の発生割合が最も多く、全体の約35%を占める（図1参照）。本研究では、後方車のドライバが感じる追突に対する危険感及び追突の有無から追突事故に関わる自動運転車の制動制御の安全性を評価する手法を検討した。

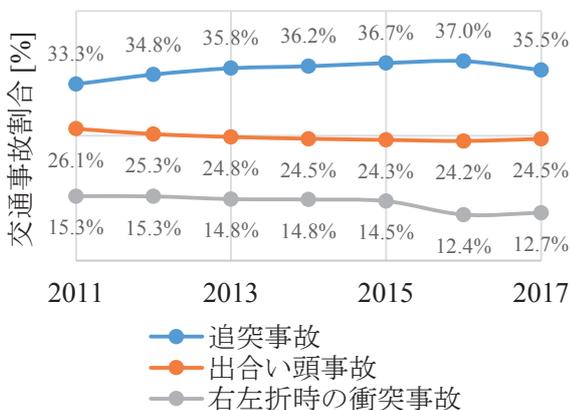


図1 交通事故形態別の交通事故発生割合

2. 評価手法の考案

評価手法は、自動運転車の制動制御に対して、後方車が追突するかどうかを判定する式（以下、追突判定式：式(1)参照）及び後方車のドライバが危険を感じるかどうかを判定する式（以下、危険判定式：式(2)参照）を求め、各判定式に評価対象とする制動制御の減速度及び減速開始車間距離を代入することで、安全性を評価するものである。ここで、各判定式の偏回帰係数及び定数項は、ドライビングシミュレータ（以下、DS）上で異なる減速度及び減速開始車間距離の制動制御をドライバが評価する被験者実験を実施し、評価結果を基に重回帰分析から求める。

【追突判定式】

$$aX_1 + bX_2 - c \geq 0 \dots\dots\dots(1)$$

【危険判定式】

$$dX_1 + eX_2 - f \geq 0 \dots\dots\dots(2)$$

X_1 : 減速度[m/s²] X_2 : 減速開始車間距離[m]

a, b, d, e : 偏回帰係数 c, f : 定数項

3. 被験者実験

3. 1. 評価環境の設定

評価手法を検討する環境を設定するために、追突事故が多発する道路形状を分析した。図2は、道路形状別における追突事故件数の発生割合を示す⁴⁾。追突事故が最も発生している道路形状は、カーブ・屈折部を除いた一般道路の単路（以下、直進単路）であり、追突事故全体の約60%を占める。本分析より直進単路を想定し、法定速度60km/hからの制動制御を対象とする。

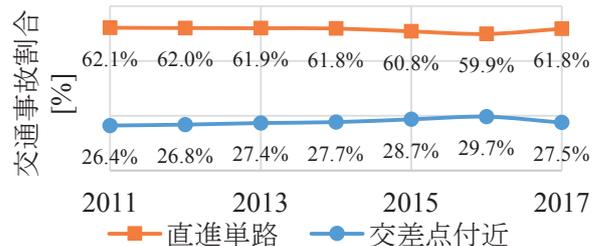


図2 道路形状別の追突事故発生割合

3. 2. 減速度及び減速開始車間距離の選定

DS 上で被験者が制動制御を評価する実験を効率的に実施するために、評価する減速度及び減速開始車間距離を選定する。減速度及び減速開始車間距離は、実車を用いて被験者が行う制動制御時の車両挙動の特性を計測し、その特性に基づいて選定する。なお、本研究では、当研究所における「人間を対象とする実験に関する倫理規定」に基づいて事前に審査が行われ、その承認のもとに実験を実施した。

3. 2. 1. 減速開始車間距離の選定

自動運転ロボットにより操作される前方車は、60km/h まで加速 (1.44m/s^2) した後、20 秒間定速走行を行い、その後減速 (4.81m/s^2) する。この後方を被験者 (人数 : 8 名、平均年齢 45.6 歳、標準偏差 : 12.7 歳) は追従走行し、その際の減速開始車間距離を計測する。なお、計測回数は、被験者ごとに 5 回とする。

図 3 は、減速開始車間距離の計測結果を示す。青色のデータが各被験者、赤色のデータが全被験者の平均値と標準偏差を示す。全被験者の減速開始車間距離の平均値は、28.3m (標準偏差 : 9.6m) である。追突判別式及び危険判別式を求めるには、追突を回避できる減速開始車間距離及び追突が生じる減速開始車間距離において、制動制御を評価する必要がある。そこで、DS 実験で評価する減速開始車間距離として、28.3m (平均値) , 19.2m (平均値 - 標準偏差) , 9.1m (平均値 - 2×標準偏差) の 3 種類を選定することとした。

3. 2. 2. 減速度の選定

被験者 (被験者人数 : 9 名、平均年齢 45.4 歳、標準偏差 : 11.9 歳) は、Adaptive Cruise Control (以下、ACC) を使用し、車両速度を 60km/h で定速走行させた状態から、過去に被験者自身が経験したことがある急制動を再現する。なお、本実験は被験者自身が急制動を再現できたと判断するまで繰り返す。計測項目は、被験者が運転する車両の速度であり、その車両速度から減速度を算出する。

図 4 の青色のデータは、全被験者の急制動時における車両速度の変化を示す。本実験結果より、急制動時は全被験者がほぼ一定の減速度で車両を停止させる傾向を確認した。そこで、実験データから車両速度が 59km/h 以下、1km/h 以上の区間を抽出し、線形回帰分析により、全被験者の急制動時における平

均減速度を求めることとした。その結果、この平均減速度は 4.64m/s^2 (以下、基準減速度) となった。この基準減速度で 60km/h から停止するまで減速する制動制御を基準制動制御とする (図 4 の赤色のデータ)。そこで、DS 実験で評価する減速度として、基準減速度の 80% (3.71m/s^2) , 100% (4.64m/s^2) , 130% (6.03m/s^2) , 160% (7.42m/s^2) , 200% (9.28m/s^2) の 5 種類を選定することとした (図 5 参照)。

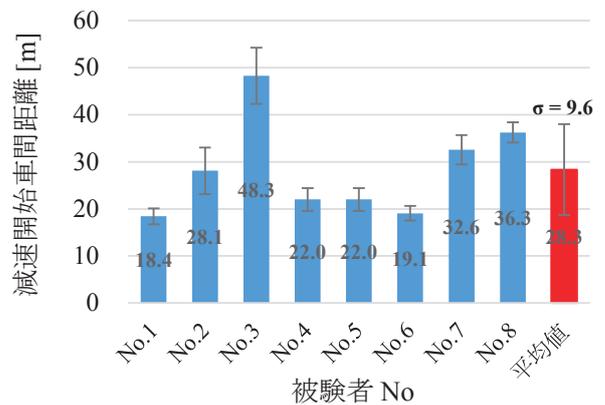


図 3 各被験者の減速開始車間距離

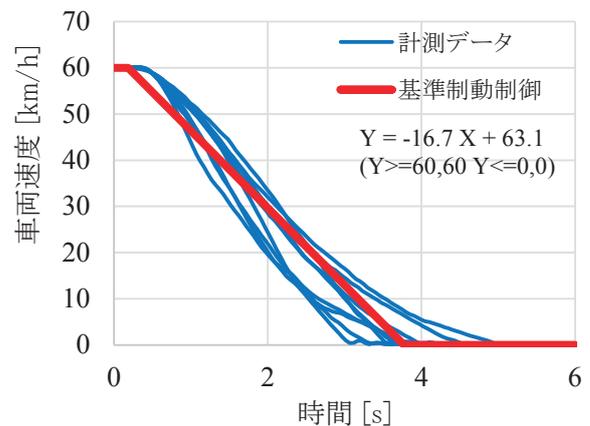


図 4 被験者の急制動と基準制動制御の車両速度

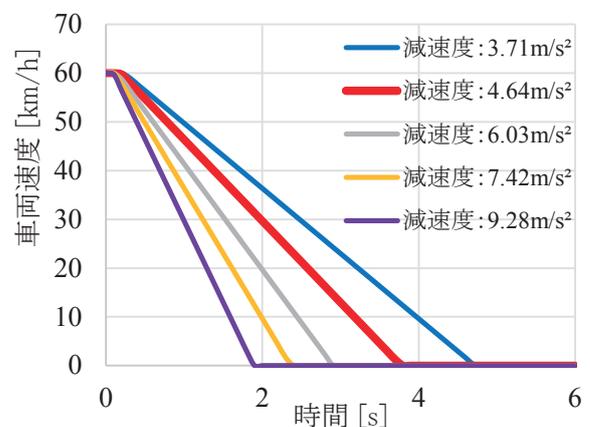


図 5 選定した制動制御の車両速度

3. 3. 制動制御の評価実験 (DS 実験)

3. 3. 1. 評価実験の概要

本実験では、制動制御について、後方車の被験者(人数:12名、平均年齢47.9歳、標準偏差:9.6歳)が感じる追突に対する危険感及び追突の有無を評価する。以下に実験内容を示す。

- ①被験者がハンドル付近のACCボタンを押すと、前方の自動運転車が60km/hまで加速する。
- ②被験者が乗車する後方車が、ACCで自動追従走行を開始する。ただし、ハンドル操作については、被験者が行う。
- ③追従走行を継続すると、減速開始車間距離(28.3, 19.1, 9.1m)が一定になり、車両速度が60km/hで安定する。
- ④走行安定後、自動運転車が一定の減速度(3.71, 4.64, 6.03, 7.42, 9.28m/s²)で制動制御を開始する。
- ⑤被験者は、自動運転車との追突をさけるために制動操作を行い、車両を停止させる。なお、ACCは被験者の制動操作開始時に解除される。
- ⑥被験者が前方の自動運転車による制動制御に対して主観評価を行う。

3. 3. 2. 評価指標

3. 3. 1. ⑥では、前方の自動運転車による制動制御に対し、被験者が感じる追突に対する危険感を、5段階(1:危険、2:やや危険、3:普通、4:やや安全、5:安全)の主観評価値で評価する。また、追突の有無は、DS上の前方車と後方車との相対距離の最小値(以下、最小仮想車間距離)で評価する。

3. 3. 3. 実験結果

3. 3. 3. 1. 最小仮想車間距離の分析

表1は、減速度及び減速開始車間距離ごとに全被験者の最小仮想車間距離の平均値を示す。本表の負の値(赤字)は、追突の可能性が高い制動制御であることを意味する。また、相関分析より最小仮想車間距離の平均値に対して、減速度は負の相関(相関係数:-0.71)、減速開始車間距離は正の相関(相関係数:0.66)が確認できた。

3. 3. 3. 2. 主観評価値の分析

表2は、減速度及び減速開始車間距離ごとに全被験者の主観評価値の平均値を示す。相関分析より主観評価値の平均値に対して、減速度は負の相関(相関係数:-0.68)、減速開始車間距離は正の相関(相関係数:0.70)が確認できた。

表1 最小仮想車間距離の平均値

減速度 [m/s ²]	減速開始車間距離 [m]		
	28.3	18.2	9.1
3.71	10.8m	8.4m	5.7m
4.64	8.4m	6.0m	4.2m
6.03	6.5m	4.7m	1.0m
7.42	5.8m	1.7m	-2.1m
9.28	4.9m	0.4m	-2.5m

表2 主観評価値の平均値

減速度 [m/s ²]	減速開始車間距離 [m]		
	28.3	18.2	9.1
3.71	4.1	3.4	2.3
4.64	3.8	2.9	2.0
6.03	3.2	2.4	1.4
7.42	2.7	1.7	1.1
9.28	2.1	1.4	1.1

3. 4. 判定式の定量化

3. 4. 1. 実施内容

各判定式の定量化を図るために、評価結果に対して、以下の内容を実施する。

- ①重回帰分析を用いて、最小仮想車間距離と主観評価値を推定する回帰式を求める。
- ②①で推定した回帰式を用いて、追突判定式及び危険判定式の偏回帰係数と定数項を求める。

3. 4. 2. 重回帰分析

重回帰分析より求めた最小仮想車間距離と主観評価値を推定する回帰式を以下に示す。

【MinD: 最小仮想車間距離 [m]の回帰式】

$$\text{MinD} = -1.34X_1 + 0.31X_2 + 6.78 \dots\dots\dots(3)$$

【EV: 主観評価値の回帰式】

$$\text{EV} = -0.32X_1 + 0.08X_2 + 2.82 \dots\dots\dots(4)$$

X₁: 減速度[m/s²] X₂: 減速開始車間距離[m]

3. 4. 3. 追突判定式及び危険判定式

回帰式(3)を用いて、最小仮想車間距離が0未満になる判定式を追突判定式とした。同様に回帰式(4)を用いて、主観評価値が2.5未満になる判定式を危険判定式とした。その判定式を以下に示す。

【追突判定式】

$$-1.34X_1 + 0.31X_2 + 6.78 < 0 \dots\dots\dots(5)$$

【危険判定式】

$$-0.32X_1 + 0.08X_2 + 0.32 < 0 \dots\dots\dots(6)$$

X₁: 減速度[m/s²] X₂: 減速開始車間距離[m]

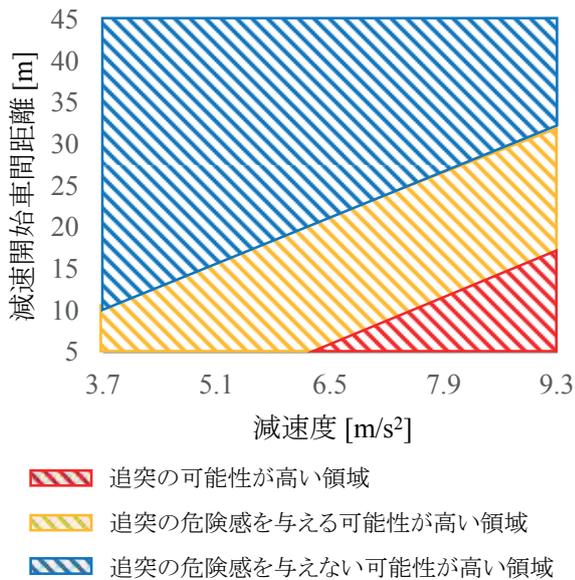


図6 制動制御の安全性評価

図6は、判定式(5)及び(6)を用いて、制動制御の安全性評価を図示したものである。赤色でハッチングした領域は、後方車のドライバが追突する可能性が高い制動制御の減速度及び減速開始車間距離を示す。黄色でハッチングした領域は、追突の可能性は低いが、後方車のドライバに追突の危険感を与える可能性が高い制動制御の減速度及び減速開始車間距離を示す。また、青色でハッチングした領域は、追突の可能性は低く、かつ、後方車のドライバに追突の危険感を与えない可能性が高い制動制御の減速度及び減速開始車間距離となる。

4. 考察

本評価手法は、最小仮想車間距離及び主観評価値を推定する回帰式から、追突判定式及び危険判定式を求め、制動制御の安全性を評価するものである。追突判定式を求めるには、自動運転車の制動制御に対して、後方車のドライバが追突する減速度及び減速開始車間距離から、追突を回避できる減速度及び減速開始車間距離までを包括して評価する必要がある。また、危険判定式を求めるには、自動運転車の制動制御に対して、後方車のドライバが追突の危険を感じる減速度及び減速開始車間距離から、追突の危険を感じない減速度及び減速開始車間距離までを包括して評価する必要がある。

本研究で得られた最小仮想車間距離を推定する回帰式は、評価した減速度及び減速開始車間距離に対して、 $-2.8 \sim 10.6m$ の範囲で推定が可能であった（実験値と推定値に有意差なし：P値 <0.01 ）。これは、追突が発生する状況から、追突を回避できる状況までを推定できている。また、主観評価値を推定する回帰式は、評価した減速度及び減速開始車間距離に対して、 $1 \sim 3.9$ の範囲で推定が可能であった（実験値と推定値に有意差なし：P値 <0.01 ）。これは、主観評価値の1（危険）～5（安全）までの73%の範囲で推定できている。

5. 結論

本研究では、一般道路における直進単路を想定した自動運転車の制動制御の安全性を、後方車のドライバが感じる追突に対する危険感及び追突の有無から評価する手法を検討した。DS上で異なる減速度及び減速開始車間距離の制動制御をドライバが評価する被験者実験を実施し、その結果を基に追突判定式及び危険判定式を求め、制動制御の安全性を評価する手法を開発した。

6. 今後の展望

本研究では、一般道路における直進単路を想定した60km/hからの制動制御を評価の対象としたが、高速道路や直進単路以外における適用の可否についても検討する必要があると考える。

参考文献

- 1) 内閣府，“第10次交通安全基本計画”
- 2) 警視庁，“平成30年における交通死亡事故の特徴について”
- 3) 国土交通省，“自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決の方向性に関する調査・検討におけるダイナミックマップの多用途利用に向けた実現可能性の調査検討”
- 4) 公益財団法人 交通事故総合分析センター，“交通統計平成23～29年版”