



THE VIRTUAL REALITY SOCIETY OF JAPAN

自動運転車開発に向けた右折運転行動における心理的側面の解析

Analysis of Psychological Aspects of Right-Turning Behavior
for Development of Autonomous Vehicles

高寺昭至¹⁾, 舟橋健司²⁾, 谷田公二³⁾, 水野慎士⁴⁾

Shoji TAKATERA, Kenji FUNAHASHI, Koji TANIDA, and Shinji MIZUNO

- 1) 名古屋工業大学 (〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町, s.takatera.523@stn.nitech.ac.jp)
- 2) 名古屋工業大学 (〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町, kenji@nitech.ac.jp)
- 3) 近畿大学 (〒 577-8502 東大阪市小若江 3-4-1, tanida@mech.kindai.ac.jp)
- 4) 愛知工業大学 (〒 470-0392 豊田市八草町八千草 1247, s.mizuno@aitech.ac.jp)

概要: 本研究では自動運転における、安全だけでなく当該車や周囲の車の搭乗者が不快に感じない制御の実現を目的に、右折運転行動の解析について議論する。その中で、右折車とその対向車線の直進車が存在する交差点において、右折車および対向直進車の搭乗者が不快感を覚えない、覚えさせないような右折開始の判断の傾向について VR システムにより調査した。その結果、心理面からも検討する重要性が確認できた。

キーワード: 自動運転, 不快感, 心理的余裕

1. はじめに

自動運転技術の研究は 1950 年代頃から開始されている [1]–[4]。自動運転だけでなく、もちろん手動運転においても安全を確保するための余裕 (マージン)、すなわち車間距離を確保しておく必要がある。例えば、同一直進車線上の前走車が当該車両と同速度で走行中に何らかの要因で急制動を行った際に、その後方を走行している当該車両が前走車と同強度の制動を遅滞なく行えるならば、当該車両が前走車に衝突しないための車間距離は空走距離である。そしてこれは非常に極端な議論ではあるが、衝突しないための最小の安全な車間距離だと考えることができるだろう (これを比較指標として「最小マージン」と呼ぶ)。実際には、前走車が急制動以上の減速をする場合や自身の制動が遅れる場合も考えられるため最小マージンより余裕のある車間距離を保つことが望まれるだろう。例えば前走車が道路上に停車している大型車に追突して瞬時にほぼ停止状態になった場合などを想定すれば、当該車両はその瞬間の速度に応じた制動距離を含む停止距離以上の車間距離、すなわち安全を確実に確保するためのマージンを保つことが望まれるだろう (これを比較指標として「十分マージン」と呼ぶ)。同様に右折車と対向車線の直進車が混在する交差点について考えてみる。迫ってきている直進車に対して右折車がかろうじて衝突しない最小限のマージン (最小マージン) を確保できる時、つまり、右折車後端と直進車前端が交差点内で接触しないタイミングで右折が開始されれば衝突事故は起こらない。しかし、実際は右折車が歩行者の飛び出しなどの要因で対向直進車線上で停止してしまった場合を

想定して、右折車の挙動にかかわらず直進車が衝突しないためのマージン (十分マージン) が確保できる時に右折を開始すべきだろう。自動運転車の制御は、その議論は他に譲るが、物理的 (論理的) な安全性に主眼が置かれている。一方でパーソナルスペースに関する研究もある [5]。運転者の心理面について考えてみる。前走車が一瞬にして停車状態になることは考えにくく、また、危険時に運転者は当該車に制動を行うだけでなくステアリングも操作するだろう。十分マージンでは車間距離が空きすぎている、と不満に感じる運転者や搭乗者がいるかもしれない。右折車が交差点内で停車した際に直進車は制動を行うだけでなくステアリングも操作して衝突の危機を回避すると考えられ、また、右折車が乗用車であれば交差点を完全にふさいでしまうとは考えにくい。そのため、右折開始時に対向直進車が確保できる交差点までのマージンが十分マージン程度で右折を見送ると、右折できたはずのタイミングを逃したと不快感が生じるかもしれない。自動運転を実現するには、安全面を担保した上で心理的なマージンも考慮すると良いだろう。運転者や搭乗者が不快感を覚えずに適切だと感じるこのマージンを「心理的適切マージン」と呼ぶ。本研究では安全面からの対策が進む自動運転開発を商品面から支えるべく当該車や周囲の車の搭乗者が不快に感じない制御の実現を目標に、右折運転行動の解析について議論する。具体的には、右折車とその対向車線の直進車が存在する交差点において、右折車および対向直進車の搭乗者が不快感を覚えない、覚えさせないような右折開始の判断の傾向について VR システムにより調査する。

2. 実験

2.1 実験概要

直進車の速度に応じて、不快に感じない、すなわち心理的に適切な、右折対直進(右直)マージン(距離, 時間)がどのように変化するか調べる. 想定する交差点は, 片側1車線の道路が直角に交差する構造で信号機は存在しない. 図1(a)における青色の自動車(図2(a),(b)の①)を「右折車」, 赤色の自動車(同②)を「直進車」, そしてその前方を走行している複数の灰色の前走車(同③)を「直進先導車」とする. 対向直進車と直進先導車は一定速度で直進する. 左右方向の道路に自動車は存在しない. 右折車は停止線を越えた位置で右折待ちをする. 複数の直進先導車間の距離は後述する最小マージンより短く設定してあり, 右折車はこの間を右折できない. 右折車は, 直進先導車と直進車との間か, 直進車が通り過ぎた後に一定速度で右折する. 実験参加者は右折車または直進車を必要に応じて操作し, それ以外の自動車の動きはシミュレータが制御する. 実験参加者が操作する自動車を「自車」とすると, 参加者視点によって見える視界は「自車右折」時は図1(b), 「自車直進」時は図1(c)である.

自車右折実験では, 右折自車は, 最後尾の直進先導車の後端が交差点で交差する道路の中心線を通じたタイミングで右折を実行するかどうか判断する. 自車直進実験では, 対向右折車は, このタイミングで右折を開始する. この時点における図2(a),(b)の①が右直マージンを表す. 右折時刻(右折判断時刻)から右直マージン時間が経過すると対向直進車の先端がちょうど交差点に差し掛かる. 右折車が右折開始して右折自車の後端が交差点を脱出するまでの経路である同図②を右折経路と称する. 右折経路を右折自車の速さで除算した値が右折時間である. 右折車が対向直進車と接触することなく交差点を脱出するために必要な最小右直マージン時間は右折時間である. 対向直進車が交差点

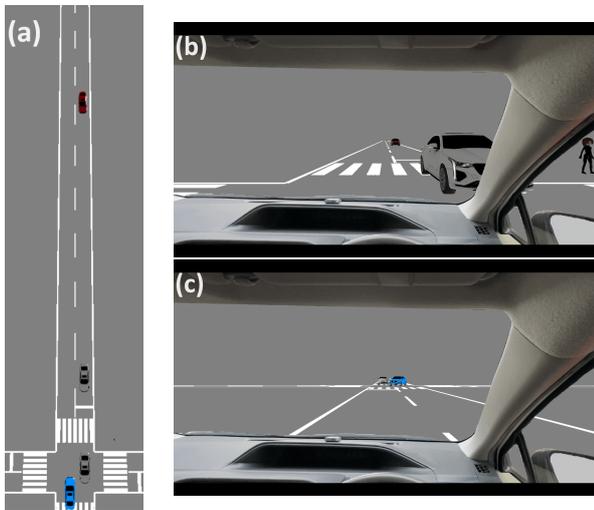


図1: 実験シーン, (a) 交差点状況, (b) 自車右折実験運転者視点, (c) 自車直進実験運転者視点

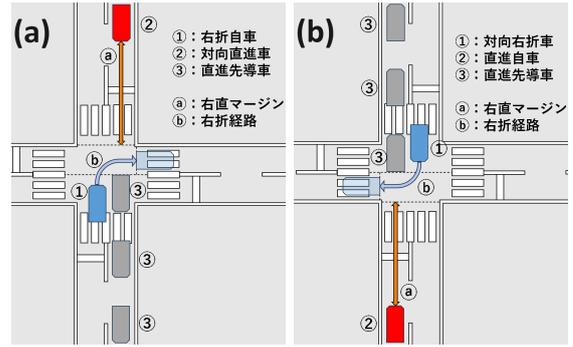


図2: 模式図, (a) 自車右折実験, (b) 自車直進実験

手前で十分安全に停止するために必要な十分右直マージン時間は, 右折車が右折完了直前で停止した場合にそれまで定速走行していた対向直進車とその時点で急制動を始めてそれでも十分に停止できると考え, 右折時間+直進車停止時間とする.

2.2 実験システム

実験は大型のモニタ (SHARP 製 PN-L702B, 69.5インチ (横 1538.9mm, 縦 865.6mm)) で行った. 実験参加者は各実験の操作に必要なキーを必要に応じて即座に押せるようにキーボードに手を配置し, モニタに向かって着席する. モニタには運転者視点の風景を表示する. モニタに対する視野角が 90° になるように実験環境を構築する. 実験シミュレータでは, 車のサイズは, 実験参加者が操作する車としてトヨタ社のアクア (全長 3.995m, 全幅 1.695m, 全高 1.445m) を, その他の車として本田技研工業のレジェンド (全長 5.03m, 全幅 1.89m, 全高 1.48m) を想定した. 実際の自動車は停止状態からアクセルを踏むと加速して徐々に速さが増していくが, 実験の簡略化のため定速走行状態と停止状態, および一定の加速度での制動 (減速) 状態に制限する. 直進車は実験開始時には既に定速走行している. 車線数は片側1車線, 車線幅は 3.25m とする. 右折車の速度と右折時間については, 右折経路を 9.5m と仮定し, 右折所要時間を 3sec と設定した (すなわち右折速度は 11.4km/h 定速). 直進車が制動する際は, 制動を始めてから停止するまで不快に感じ始めるしきい値と言われている 0.3G [6] で等加速度 (減速度) 直線運動をする.

2.3 実験の流れ

実験の様子を図3に示す. 実験参加者は操作方法に慣れるために, まず自車右折の練習を行う. 実際の右折時には歩行者が飛び出してくる可能性が考えられるため, 対向車と歩行者に気を配りつつ右折判断をする必要がある (練習時にはランダムに歩行者が飛び出す設定あり). 参加者には 3sec での右折の感覚を覚えてもらう. 次に自車直進の練習を行う. 直進中の自車は制動をかけてもすぐには停止しない. 実験参加者には減速度 0.3G の感覚を覚えてもらう. 続いて自車右折実験と自車直進実験を行う. 自車右折実験では, 実験参加者は最後の直進先導車の後端が交差点で交差する道路の中央線を通り過ぎた瞬間から対向直進車が交差点に進入

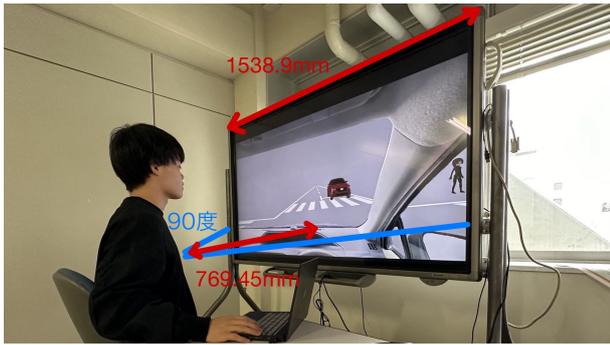


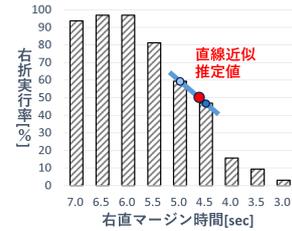
図 3: 実験の様子

してくるまでに、対向直進車に不快感を与えることなく右折完了可能であるかどうか判断する。つまり、心理的適切マージンが確保されていると判断した場合に右折を開始する。そうでなければ、対向直進車が通り過ぎるまで右折待ちをする。自転車直進実験では、最後尾の直進先導車の後端が交差点で交差する道路の中心線を通り過ぎた瞬間から対向右折車は自動的に右折を開始する。実験参加者は対向右折車の右折行動によって不快感を与えられた場合、すなわち心理的適切マージンが確保されていなかった場合に直進自車を減速させる。実験参加者はどの程度の不快感を覚えたのかアンケートに回答する。評価は、1: 全く不快ではない、2: どちらかというとき不快ではない、3: どちらでもない、4: どちらかというとき不快、5: 非常に不快、のリッカート尺度で行った。右直マージン時間 9 パターン (3.0sec-7.0sec, 0.5sec step) と直進車速度 3 パターン (40, 50, 60km/h) の計 27 パターンの試行を 1 セットとして行う。これらのパターンに重複はなく、実験参加者は 1 セットにつき各試行をランダムに一度ずつ行う。これらの 2 つの実験を交互に行い、それぞれ 2 セット実施する。実験参加者は、普通自動車第一種運転免許を所有する大学生および大学院生 16 名であった。

3. 実験結果

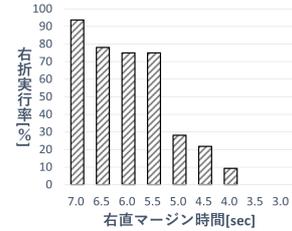
各パターンごとに、全試行のデータに対して、自転車右折実験では右折した回数を試行総数で除算して右折実行率を求める。自転車直進実験では不快感主観評価値の平均を求める。各値に対して Steel-Dwass 法を用いた多重比較検定により解析する。図 4 は対向直進車がそれぞれ 60, 50, 40km/h で走行する場合の自転車右折実験結果である。各速度における右折実行率の各パターン間の有意差をそれぞれのグラフの右の表に示す。直進車 60km/h では、3.0-4.5sec のパターンと 5.0-7.0sec のパターンとの間で差があると思われるため、右折実行判断境界である右直マージン時間を 4.75sec と推定する。同様に 50km/h では 5.25sec と推定する。一方で 40km/h では、3.0-5.5sec のパターンと 5.5-7.0sec のパターンとの重複部分で差があると思われるため、5.5sec と推定する。また、右折実行率が 50% に最も近いパターンと、50% を挟み隣接するパターンに注目して、両者を直線近似

(a) 直進車 60km/h



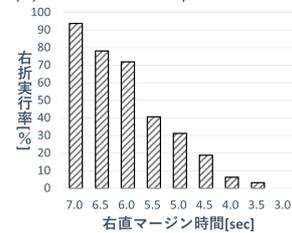
時間	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
7.0	**	**	**		
6.5	**	**	**	*	
6.0	**	**	**	*	
5.5	**	**	**	**	
5.0	**	*			
4.5					

(b) 直進車 50km/h



時間	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
7.0	**	**	**	**	**	
6.5	**	**	**	*		
6.0	**	**	**	*		
5.5	**	**	**	*		
5.0						

(c) 直進車 40km/h



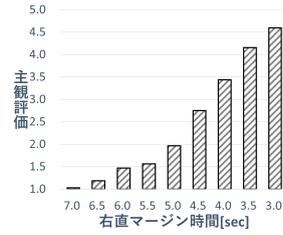
時間	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
7.0	**	**	**	**	**	*	
6.5	**	**	**	**	*		
6.0	**	**	**	*			
5.5	*						
5.0							

図 4: 自転車右折実験の右折実行率とパターン間有意差

することで直接的に右折実行判断境界である右直マージン時間を推定する (例: 図 4(a) 左, 赤丸)。直進車 60, 50, 40km/h に対してそれぞれ 4.63, 5.23, 5.65sec である。自転車直進実験結果についても、図 5 に示す。主観的判断境界である右直マージン時間は、有意差検定の結果からは、60, 50, 40km/h に対してそれぞれ 4.5, 4.5, 4.75sec と推定する。また、主観評価 3.5 を判断境界とみなして線形近似により直接的に推定すると、それぞれ 3.96, 4.04, 4.57sec である。

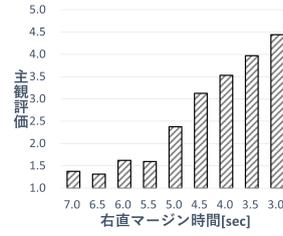
直進車速度に対する心理的適切マージン時間の各推定値を図 6 に示す。まず右折時間は一定なため、最小マージン時間は直進車速度に無関係で一定である。直進車速度が増加すれば緊急時の制動時間は長くなるため、十分マージン時間は増加する。研究当初では、心理的に適切な右直マージン時間も増加することを予想していたが、実験結果では予想とは逆に、対向直進車の走行速度が速くなるにつれて短くなった。そこで、マージン時間に直進車速度を乗ずることでマージン距離とした推定値を図 7 に示す。対向直進車の走行速度が速くなるにつれて心理的適切マージン距離も長くなるという、一般的な経験則に近いグラフ形状になった。危険までの時間を過小評価して、目視しやすい距離で安全を判断してしまっているのか、あるいは速度に応じた距離が確保されていると判断した上で、制動以外の危険回避も期待しているのか、今後の考察が必要であろう。自動運転の実現においては、安全面をないがしろにするわけにはいかないが、様々な面から安全を確保した上で心理的に

(a) 直進車 60km/h



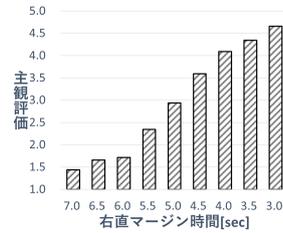
時間	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
7.0	**	**	**	**	*	
6.5	**	**	**	**		
6.0	**	**	**	*		
5.5	**	**	**	*		
5.0	**	**	*			
4.5	**	**				
4.0	*					
3.5						

(b) 直進車 50km/h



時間	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
7.0	**	**	**	**	*	
6.5	**	**	**	**		
6.0	**	**	**	*		
5.5	**	**	**	*		
5.0	**	**				
4.5	*					
4.0	*					
3.5						

(c) 直進車 40km/h



時間	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
7.0	**	**	**	**	**	
6.5	**	**	**	**	*	
6.0	**	**	**	**	*	
5.5	**	**	**			
5.0	**	**	*			
4.5	*					
4.0	*					
3.5						

図 5: 自転車直進実験の主観評価値とパターン間有意差

適切と判断するマージンに近づけることで、乗員の不快感を軽減すると良いだろう。また、自転車右折実験では直進車 40km/h において論理的に求めた十分マージンよりも心理的な適切マージンの方が長かった。比較指標としての十分右直マージンは、実際には直進車が右折車を視認した時点で安全を考慮して速度を控えることもあるだろうが、右折完了直前まで一切減速せずにその時点で右折車が急停止したら直進車も急制動する想定で算出した。実験では、実験参加者は練習で通常の制動を体験しただけで危険回避の制動 (0.5G-0.7G 程度 [6]) の選択肢はなかったため、心理的適切マージンの方が長いという逆転が起こったのかもしれない。このようなことから、低速域では論理的に求めた安全マージンよりも心理的に判断する適切マージンの方が長い可能性があり、自動運転実現にあたっては乗員の不快感を誘発しないためには安全面に加えて心理面からも検討する必要があるだろう。

4. むすび

本研究では右折車と対向直進車が存在する交差点において、右折車の搭乗者が不快感を覚えない、また対向直進車の搭乗者に不快感を覚えさせない右折運転行動について VR システムにより調査した。直進車速度が増加すれば、心理的に適切な右折対直進のマージン時間も増加することを予想していたが、実験結果では逆の傾向が見られた。また、直

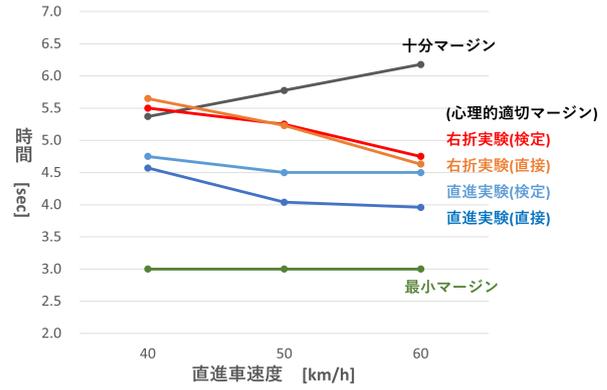


図 6: 右直マージン時間の比較

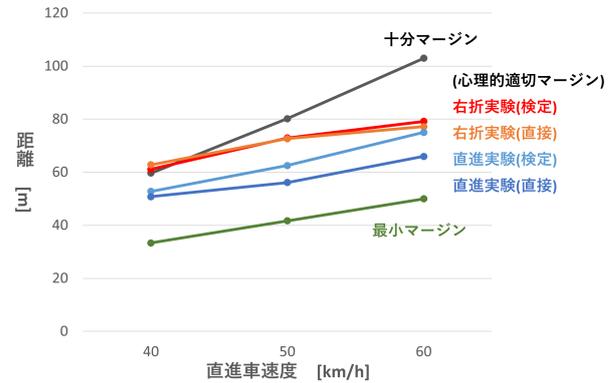


図 7: 右直マージン距離の比較

進車速度が低速な場合には、論理的に求めた必要十分な安全マージンよりも心理的に判断する適切マージンの方が長くなる結果もあった。自動運転における、安全だけでなく当該車や周囲の車の搭乗者が不快に感じない制御の実現にあたっては、心理面からも検討する重要性を確認できた。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 JP23K11182 および JP22 K12337 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 津川定之: 自動運転の課題; 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, Vol.10, No.2, 93-99, 2016.
- [2] 横山利夫, 武田政宣, 藤田進太郎, 安井裕司: Honda の運転支援および自動運転の現状と今後; 計測と制御, Vol.54, No.11, 828-831, 2015.
- [3] 内藤貴志: トヨタにおける自動運転技術への取組み; 石油学会 年会・秋季大会講演要旨集, Vol.46, 214, 2016.
- [4] 安藤 敏之: 日産の自動運転実現に向けた取り組みと展望; 計測と制御, Vol.54, No.11, 832-835, 2015.
- [5] 佐藤寛明: 自動車乗車中のパーソナルスペースの検討; 交通心理学研究, Vol.36, No.1, 10-21, 2020.
- [6] 菊地春海: プローブ情報を活用した道路の安全性評価手法に関する研究; 首都大学東京 2013 年度博士論文, 2013.