

2022年度 卒業論文

論文題目

自動運転車開発に向けた右折速度を可変にした場合の  
右折運転行動の解析

指導教員

舟橋 健司 准教授

名古屋工業大学 工学部 情報工学科

2019年度入学 31114049番

木村 亮太

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
<b>第2章</b>	<b>実験概要とシミュレータ</b>	<b>5</b>
2.1	実験目的	5
2.2	実験概要	5
2.3	シミュレータと各パラメータの説明	8
<b>第3章</b>	<b>実験</b>	<b>13</b>
3.1	実験の流れ	13
3.1.1	右折行動把握	13
3.1.2	直進時間把握	16
3.1.3	右折速度把握	16
3.1.4	右折実験練習	17
3.1.5	右折実験本番	18
3.2	分析の準備	19
3.3	結果と考察	23
3.3.1	アンケート1	23
3.3.2	アンケート2	25
3.3.3	右直残マージン時間	27
<b>第4章</b>	<b>むすび</b>	<b>30</b>
	謝辞	31
	参考文献	32

## 第1章 はじめに

政府の統計 [1] によると、日本での 2021 年の交通事故発件数は約 30 万件であり、10 年前の 2011 年の交通事故件数である約 70 万件と比較すると、半分以下となっているものの、決して少ない数とはいえない。また、2021 年の自動車乗車中の事故による死傷者数は約 22 万人であり、これは同年の全死傷者数の約 60% である。このような自動車乗車中の交通事故の対策の 1 つとして、自動車の自動運転が挙げられる。今日、世界中で自動運転技術の開発が進められており、日本政府も 2030 年までの長期的な自動運転・運転支援のロードマップを作成している [2]。

自動車技術会によると、自動運転は 0 から 5 の 6 段階のレベルに分けられる [3]。レベル 0 は「運転自動化なし」であり、運転手が全ての動的運動タスク (道路交通において車両を操作するために必要な、全てのリアルタイムで実行する操作上および戦略上の機能) を実行する。つまり予防安全システムを除き、運転自動化システムが一切搭載されていない。レベル 1 は「運転支援」と呼ばれ、運転自動化システムが縦方向または横方向のいずれかの車両運動制御を特定の範囲で実行する。その他の動的運動タスクは運転手が行う。レベル 2 は「部分運転自動化」と呼ばれ、運転自動化システムが縦方向および横方向の両方の車両運動制御を特定の範囲で実行する。運転手はその他の動的運動タスクを行う。レベル 3 は「条件付運転自動化」と呼ばれ、自動運転システムが全ての動的運動タスクを特定の範囲で実行する。運転手は、自動運転システムが出す介入の要求を受け入れ、応答することが期待される。レベル 4 は「高度運転自動化」と呼ばれ、自動運転システムが動的運動タスクを特定の範囲で行う。運転手の介入の必要は期待されない。レベル 5 は「完全運転自動化」と呼ばれ、自動運転システムが動的運動タスクを無制限に行う。運転手の介入の必要は期待されない。レベル 0~1 は運転支援、3~5 は自動運転と呼ばれる。特にレベル 4, 5 では、自動運転システムの作動中は、運転手は乗員と扱われ、自動運

転システムに作動停止を要求したあと、再び運転手になることができる。

自動運転に関して2017年に行われたインターネット調査では、1000人の有効回答者のうち51.5%が自動運転に「全く関心がない」「あまり関心がない」と回答した[4]。これらの回答をした人のうち36.5%が「自動運転について不安や不満があるから」関心がないと回答した。自動運転車両における運転手の不安感を評価した論文がある[5]。この論文では、実験により各運転シーンにおける心理評価値(不安感、客観的距離感、許容度合い)と車間距離・速度の関係を高い精度で明らかにした。この実験で使用された模擬自動運転車両は、助手席に実際のステアリングと連動するダミーステアリングホイール、ダミーペダル、メーターパネルが設置されており、実験参加者は自動運転車の運転手としてこの助手席に座る。実際の車両の運転は運転席に座ったプロドライバーが行う。模擬自動運転車両が一般車を左後ろから追い抜いてその車の前に合流する合流タスクでは、「横に並んだ時の距離が接近していて危険な感じがした」「合流するタイミングがわからないことが不安なのかもしれない」というコメントが挙がった。模擬自動運転車両が一般車の後ろを走行している状況で、一般車のブレーキランプが点灯してから、模擬自動運転車両がブレーキをかけるブレーキタスクでは、「前走者のブレーキランプが点いてすぐに自車のブレーキがかからないと不安になる」というコメントが挙がった。減速なしでカーブに侵入し走行するカーブタスクでは、「カーブに入る前の減速が感じられなかった。自動運転なので安全なんだろうとは思っていたが、スピード感から不安を覚えた」というコメントが挙がった。模擬自動運転車両は先の自動運転のレベルのうち、運転手が一切の操作を行わないという点において、レベル5の完全運転自動化に当てはまるだろう。上記のコメントが得られたということは、自動運転車の運転手は、安全が保証されているにも関わらず、車間距離や車両の動作タイミング、速度に対して不安を覚える可能性があることを示している。株式会社デンソーの伊能寛氏は、「ただ走らせるのではなく、安心して快適な自動運転を実現しないと商品性というのは出てこない」と述べている[6]。人間の視覚的な運動知覚や人間が気持ちよくコントロールされるG感などをもとに自動運転技術の設計開発を行うことで、例えば複数のカーブがある山岳路のような複雑なテストコースでも、自動運転車は安全を保証しつつ、乗員に安心感を与えることができると述べている。

ところで、先に述べた 2021 年の約 30 万件の交通事故のうち、約 57%が交差点内および交差点付近で起きた [1]。文献 [7] では、交差点で起きる事故のうち、特に右直事故(交差点右折車と対向直進車の衝突事故)に注目している。右折車の運転手が対向直進車を見落とすことで起きる右直事故の人的要因として、右折車の運転手の焦り、右折待機をすることで油断が生じること、右折車の運転手の視界が自車の先行車や対向車によって遮られること等が挙げられている。自動運転技術で人間の認知・判断を補うことで、このような事故を回避できるだろう。しかし、先に述べたように自動運転では安全面だけでなく、心理面も追求する必要がある。

当研究室では、自動運転における適切な右折運転を実現することを最終目標とし、その中でも特に、安全の確保を主題にするのではなく、右折車の搭乗者が不快感を覚えない、また対向直進車に不快感を覚えさせないような右折行動の分析を行っている [8]。交差点で右折車と対向直進車が混在する場合において、安全を確保するための余裕(マージン)として、お互いの車両の間隔(右直マージン)に注目している。右折車が、右折に必要な時間と対向直進車が交差点に侵入するまでに必要な時間とが同じとなるタイミングで右折を開始すれば、右折車後端が交差点を出ると同時に直進車前端が交差点に侵入することになるため、衝突事故は発生しない。このときのマージンを「最小マージン」と呼ぶ。しかし実際には、何らかの理由で右折車が交差点内で停止する可能性がある。その場合、右折車との衝突を回避するために、対向直進車の運転手はブレーキを踏み、車を停止させる必要がある。このとき、対向直進車と右折車のマージンが停止距離(空走距離+制動距離)未満だと、直進車は右折車に衝突してしまう。したがって、真に安全と言えるマージンは、最小マージンに対向直進車の停止距離分のマージンを加えたものとなる。このマージンを「十分マージン」と呼ぶ。この2つのマージンは、安全面に注目したものである。右折車の運転手の感情に注目すると、十分マージンより短いマージンでも不快感を覚えないかもしれないし、逆に十分マージンでも不快感を覚えるかもしれない。このような運転手の心理面に注目したマージンを「心理的マージン」と呼ぶ。これらの距離を右直マージン距離と呼ぶ。直進車が一定の速度で走行するとすれば、交差点端に到達するまでの時間を単純に求めることができる。そのときの時間的なマージンを右直マージン時間と呼ぶ。この研究では実車実験ではなく、簡易的なシミュレータ

を用いた実験を行い、直進車と右折車双方の立場から心理的右直マージンを推定した。心理的右直マージン時間は、直進車の走行速度に比例して大きくなるという仮説に反して、速度に反比例する傾向が見られた。対して心理的右直マージン距離は直進車の走行速度に比例した。実際の自動車運転では、運転手はアクセルペダルを踏む量を調整することで、車の速度を変化させることができるが、この実験で使用したシミュレータでは、車の右折速度は約 12km/h で一定である。そのためこの研究では右折車の運転手の心理面を右折開始時および終了時のマージンで評価している。しかし運転手は右折開始時および終了時だけでなく、右折中も様々な要因で不安を感じ、それが右折行動に反映されるだろう。反映されるタイミングを明らかにすることで、自動運転において搭乗者が不安を感じるより前にその右折行動ができるようになり、右折車の搭乗者が安心である右折を実現できるだろう。そこで右折行動のうち、本研究では具体的に右折中の追加加速を調べる。右折車と直進車が混在している交差点を想定し、被験者がアクセルペダルで右折車の速度を調整できる右折シミュレータを用いた実験を行う。右折中に被験者が追加加速を行うタイミングに着目し、安心な右折に求められる右折行動を分析する

以下、第2章では使用するシミュレータと実験概要および実験環境について述べる。第3章では実験の詳細と結果について述べる。第4章ではむすびを述べる。

## 第2章 実験概要とシミュレータ

### 2.1 実験目的

本研究では自動運転における適切な右折の実現を最終的な目標とし、その実現の足がかりとして右折車の搭乗者が安心を感じる右折動作の要件を、右折車の速度と加速の仕方に着目して解明したい。簡易的なドライビングシミュレータを用いた交差点右折実験を行う。ある交差点において、被験者は自動車を操作し右折を行う。そのときの右折車の速度や加速度の変化、被験者が覚えた安心感の関係を分析する。

### 2.2 実験概要

実験で想定する交通状況を述べる (図 2.1)。信号のない片側一車線の交差点を想定する。右折車は交差点中央で右折待ちをしており、複数の直進車が対向車線を等速で走行している。複数車線の場合、被験者は全ての車線の対向車に気を配らねばならず、右折の判断基準や安心感の要因が複雑になってしまうため、片側一車線とする。同様の理由で、右折車と対向車線の直進車以外の車両は存在せず、歩行者も存在しないこととする。

被験者はシミュレータ内の右折車を、現実の自動車運転と同じようにアクセルペダルを用いて操作する。被験者がペダルを踏むと右折車は発進し、被験者がペダルを踏む量に応じてその速度は変化する。実験を容易に進めるために、被験者が複数の対向車のどの車間を通過して右折するかを明確にする。最後尾の車両とその前方の車両にわざと間隔を設け、被験者はその間に対して右折実施の判断をする。前方の車両及びさらにその前を走る複数の車両の間隔は狭くなっており、被験者はその間を通過して右折することはできない。また被験者は右折車が対向車に衝突しないように右折実施の判断をしなければならない。対向車と衝突せずに右折できると判断した場合に、被験者はペダルを踏んで右折をする。なお被験者はペダル以外の機器を

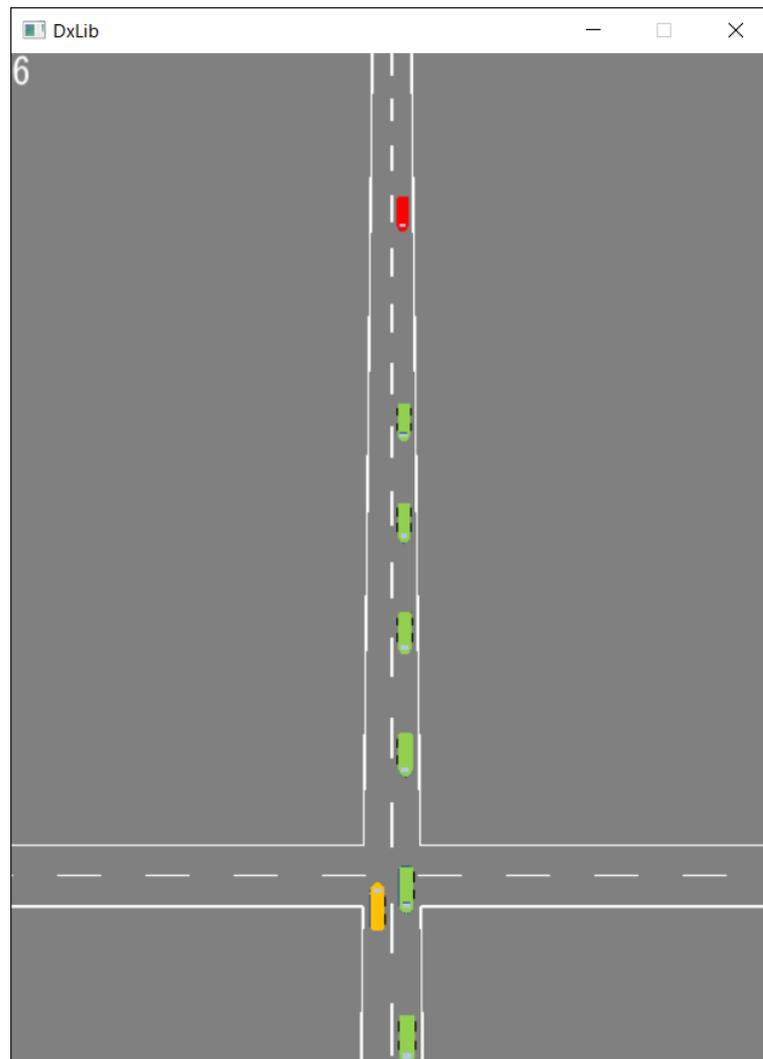


図 2.1: 交差点と車両の様子

操作する必要はなく，右折車は自動で右折軌道を進む．最後尾の直進車とその前方の車両の間隔を数パターン用意し，それぞれの状況で右折判断をしてもらう．

俯瞰視点での車の運転性を評価した研究 [9] では，シミュレータの操作者は俯瞰視点の方が車の挙動を認識しやすく，主観視点と比較して慎重な運転を行う傾向があることを示した．そこで，本実験でのシミュレータは俯瞰視点を採用する．実験では速度や加速の仕方に注目するので，車の挙動がわかりやすく，操作者が走行速度や加速タイミングを慎重に判断するという点において，俯瞰視点のシミュレータは適している．また，俯瞰視点であることで操作者がゲームをプレイしているような

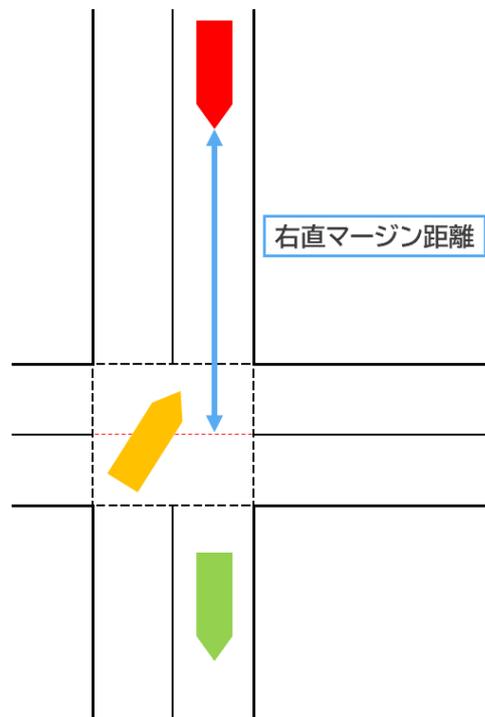


図 2.2: 右直マージン距離

感覚になってしまい、車両速度を適切に判断できなくなるという危険はなさそうである。しかし現実の自動車運転は主観視点であるため、視点の違いによる結果の差異については、別途研究が必要だろう。

用語の整理を行う。被験者が操作する右折車を「右折自車」、複数の対向車のうち被験者がその前を右折するかどうかを判断する最後尾の車両を「対向直進車」、対向直進車の前方を走行する直進車全てを「直進先導車」とする。また右折自車と対向直進車間の距離を「右直マージン距離」とする。なお簡単のため、便宜的に対向直進車と交差点中央の距離を右直マージン距離として扱うこととする(図 2.2)。この距離を時間に直したものを「右直マージン時間」とする。

自動車はその重量や馬力によって加速のしやすさが決まる。その指標としてパワーウエイトレシオがある [10]。パワーウエイトレシオは車の重量を馬力で除算した値

であり、1馬力あたりの重量負担を示すので、この値が小さいほどその車は加速しやすいことになる。つまり馬力が同じ場合、重量が大きい大型車よりも、重量が小さい軽自動車のほうが加速しやすい。実験では、重力や馬力、パワーウエイトレシオなどの実際の値には言及せず、被験者は3種類の「加速特性<低>」、「加速特性<中>」、「加速特性<高>」の右折自車を操作する。

### 2.3 シミュレータと各パラメータの説明

右折自車、対向直進車、直進先導車のサイズは全て長さ5m幅2mとする。

道路構造令第五条 [11]によると、道路の幅員はその種類や交通量に応じて2.75～3.5mの範囲で決定される。高速自動車国道および自動車専用道路を除く都市部の道路のうち、交通量が1日につき4000台以上となる普通道路の幅員は3.25mと定められている。これをもとに、本実験の交差点の幅員は3.25mとする。このような交差点では、長さ5mの右折自車の右折経路は約10mとなる。

道路交通法第三十四条 [12]では、自動車が右折する際は徐行するように定められている。一般に徐行は10km/h程度とされている。先行研究 [8]では、人間は3秒先の未来を予測しながら行動すること [13] [14]を根拠に、右折時間を3秒に設定し実験を行った。本研究でも同様に、この交差点での一般的な右折時間を3秒とする。右折経路が約10mであることから、この右折時間を速度に直すと約12km/hである。これを交差点での一般的な右折速度とする。

被験者はシミュレータをロジクール社製のGT Force Proで操作する。これは自動車のハンドルおよびアクセル、ブレーキペダルを想定したゲーム用のコントローラである。なお実験ではアクセルペダルのみを使用して、ハンドルおよびブレーキペダルは使用しない。PCに接続して、アクセルペダルの踏み込み具合を整数値として取得できる。このアクセルの値  $Accel_{org}$  はペダルが全く踏まれていない状態で1000、最大まで踏まれている状態で-1000であり、ペダルが踏み込まれる量に応じて線形に変化する。ペダルを踏むほど値が減るのは直感的ではないため、以下の式で正規化する。

$$Accel = -100 \times (Accel_{org} - 1000) / 2000 \quad (2.1)$$

正規化した値  $Accel$  はペダルが全く踏まれていない状態で 0, 最大まで踏まれている状態で 100 であり, すなわちペダル踏み込み量の百分率である。

実際の自動車ではアクセルペダルを踏み込むと吸気量が変わり, 合わせて燃料の量が変わり, と複雑な過程を経て, 車両や傾斜などの道路状況までも関係して, 速度が変化する. ここでは大胆な単純化をして, 被験者がアクセルペダルを踏み込むほど, 次の式に従い単純に右折車の速度  $v$  を速くする. (図 2.3)

$$v = v_{max} \times Accel / 100 \quad (2.2)$$

$v_{max}$  は最大速度であり, ペダルを最大まで踏み込んだときの速度が  $v_{max}$  である. ペダルを全く踏まなければ速度は 0km/h である. 実験では, 3種類の加速特性の右折自転車を操作してもらう.  $v_{max}$  の値を変更することで, 加速のしやすさの違いを擬似的に再現する. 最も加速しにくい加速特性<低>は  $v_{max}=15$  とし, ペダルを 8割踏み込むことで一般的な右折速度である 12km/h となる. 加速特性<中>は  $v_{max}=25$  であり, ペダルを約 5割踏み込むことで 12km/h となる. 最も加速しやすい加速特性<高>は  $v_{max}=35$  とし, ペダルを 3~4割ほど踏み込むことで, 12km/h となる.

対向車の速度について述べる. 道路交通法第二十二條 [12] で車は最高速度が指定されている道路ではそれを超える速度を, 指定されていない道路では政令で定める最高速度を超える速度を出してはいけないとしている. 道路交通法施行令 [15] において, 一般道路での自動車の最高速度は 60km/h と定められている. 令和 3年に改正された交通規制基準 [16] では, 一般道路の基準速度を, 市街地の 2車線道路の基準速度は歩行者が多い場合は 40km/h, 少ない場合は 50km/h, 非市街地の場合は歩行者が多い場合は 50km/h, 少ない場合は 60km/h と設定している. これらのことを踏まえ, 本実験では全ての直進車速度を 50km/h で一定とする.

対向直進車と直進先導車の車間距離について述べる. 車間距離は対向直進車速度の 50km/h で除算することで時間に変換できる. この時間を車間時間と呼ぶ. 前述の通り, 実験における交差点での標準的な右折時間を 3秒と想定している. 車間時間が 3秒ならば右折自転車は対向直進車と直進先導車の間を, それらに衝突することなく右折することができる. しかし, なんらかの理由で右折自転車が交差点内で停止した場合, 対向車の停止が間に合わず衝突してしまう. タイヤの摩擦係数を 0.7, 人

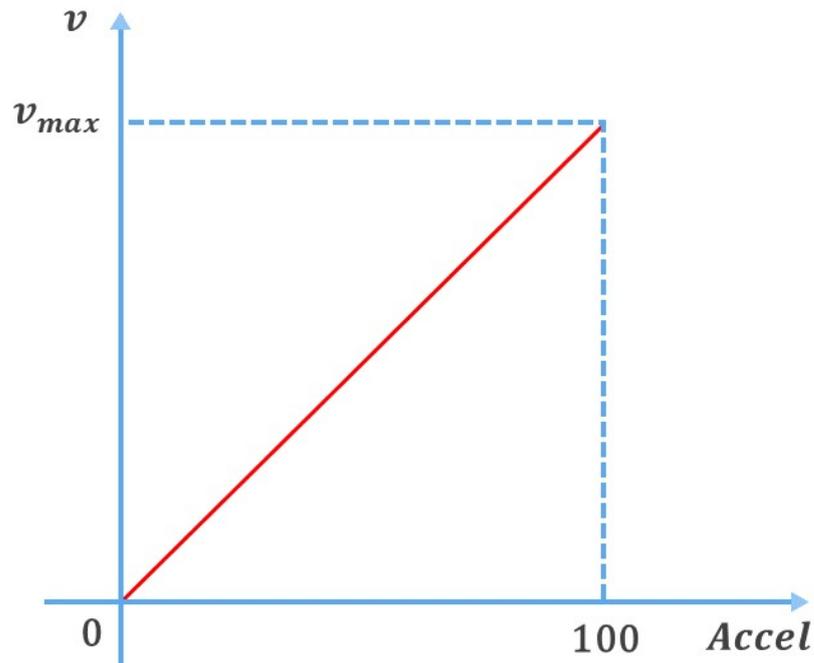


図 2.3: 速度とアクセルの値の関係

間の反応時間を 0.7 秒とすると、50km/h の車の停止時間 (空走時間+制動時間) は 2.72 秒となる [17]。したがって右折時間の 3 秒に対向直進車の停止時間を加えた 5.72 秒が車間時間であれば、右折中に右折自車が交差点内最終地点で停止したとしても、対向直進車の停止が間に合うため、衝突しない。以上のことと、本実験では速度が可変であり 3 秒より短い時間あるいは長い時間での右折が可能なことを踏まえ、車間時間は 2 秒、3 秒、4 秒、5 秒、6 秒の 5 通りとする。車間距離に変換すると、それぞれ約 27.8m、約 41.4m、約 55.6m、約 69.4m、約 83.3m である。被験者が右折判断を行うのは、直進先導車群の最後尾の後端が交差点で交差する道路の中心線を通り過ぎた時点である。したがって先に述べた車間距離に交差点の幅員である 3.25m を加えた、約 31.0m、約 44.9m、約 58.8m、約 72.7m、約 86.6m が実験で設定する車間距離である。

最後に実験環境を整理する。実験は先行研究 [8] と同様に、PCを大型モニタ (SHARP 製 PN-L702B, 横 1538.9mm, 縦 865.6mm) に繋いで行う (図 2.4, 2.5)。被験者はモニタに向かって着席する。被験者の足元にペダルを設置し、実際の自動車運転のようにペダルを踏むことができるようにする。また被験者の右側にテンキーを配置し、後述するアンケートに回答する際に押下してもらふ。位置関係についても、先行研究と同様とする。人は垂直視野角が仰角  $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$  の場合、表示空間内にいるような間隔を得られる [18] ため、 $a$  を被験者の頭部からモニタまでの距離、 $b$  を被験者の視点の高さからモニタに表示されたシミュレータの画面上部までの距離としたとき、 $b/a \doteq \tan 35^{\circ}$  を基準に、 $a=1.3\text{m}$ ,  $b=0.6\text{m}$  とする。



図 2.4: 実験中の被験者の様子



図 2.5: 足元のアクセルペダル

## 第3章 実験

### 3.1 実験の流れ

実験は「右折行動把握」,「直進時間把握」,「右折速度把握」,「右折実験練習」,「右折実験本番」の5つの作業からなる(図 3.1)。「右折実験本番」にて分析に必要なデータを記録する。他の4つの作業は,被験者にシミュレータの操作方法及び「右折実験本番」の内容を理解させるために行う。

はじめに,被験者は「右折行動把握」と「直進時間把握」の2つの作業を行う。続いて,「右折速度把握」,「右折実験練習」,「右折実験本番」の3つの作業を1セットとし,加速特性<低>, <中>, <高>の3種類の右折自転車ごとに1セットずつ,計3セット行う。3種類の右折自転車をどの順番で操作するかはランダムに決定する。被験者はどの右折自転車を操作するかは知らされない。

被験者は20~23歳の男性の大学生および大学院生8名である。年齢の平均は21.9歳,標準偏差は1.19歳である。

#### 3.1.1 右折行動把握

「右折実験本番」で行う操作を,被験者に映像を見せながら説明する。この作業では,被験者はシミュレータを操作しない。はじめに右折車が直進先導車と対向直進車の間を右折する様子を見せ,どの車両の間を右折すればよいかを被験者に理解させる(図 3.2(a))。続いて見せる映像では,右折中,交差点横から猫が飛び出してきた,右折自転車が交差点内で停止する(図 3.2(c))。このとき対向直進車は右折自転車が停止したタイミングで制動を開始する。右直マージン距離が長い例であり,対向直進車の停止が間に合い,右折自転車と衝突しない。次の映像では,同様に右折自転車が交差点内で停止し,対向直進車が制動を行うも,右直マージン距離が短い例であり,停止する前に右折自転車と衝突してしまう(図 3.2(b))。以降の作業では猫は飛び出し

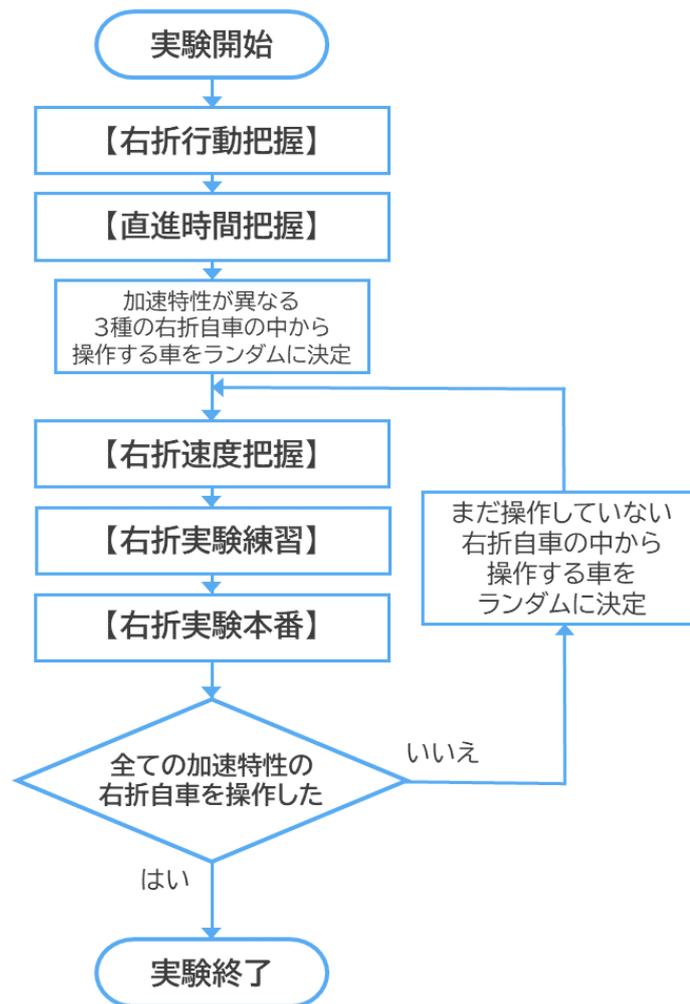


図 3.1: 実験の流れ

てこないものの、このような交差点内での急停止を考慮し、もしものことがあっても事故が起きないように、余裕を持った右折をしなければならないことを被験者に理解してもらう。なお「右折実験本番」を除き、交差点の横に猫を表示しておくことで、常に余裕を持った右折をすることを被験者に心がけてもらう。最後の映像では、右折見送りの説明をする(図 3.2(d))。「右折実験本番」では、直進先導車と対向直進車の車間が狭く、その車間を余裕を持って右折することが困難であると被験者が判断した場合、被験者はアクセルペダルを踏まずに全ての直進車を見送る。そうすると対向直進車が交差点から出た時点で、システムが自動で右折自転車を右折させる。これを「右折見送り」と呼ぶ。被験者に右折を見送らなければならないことも

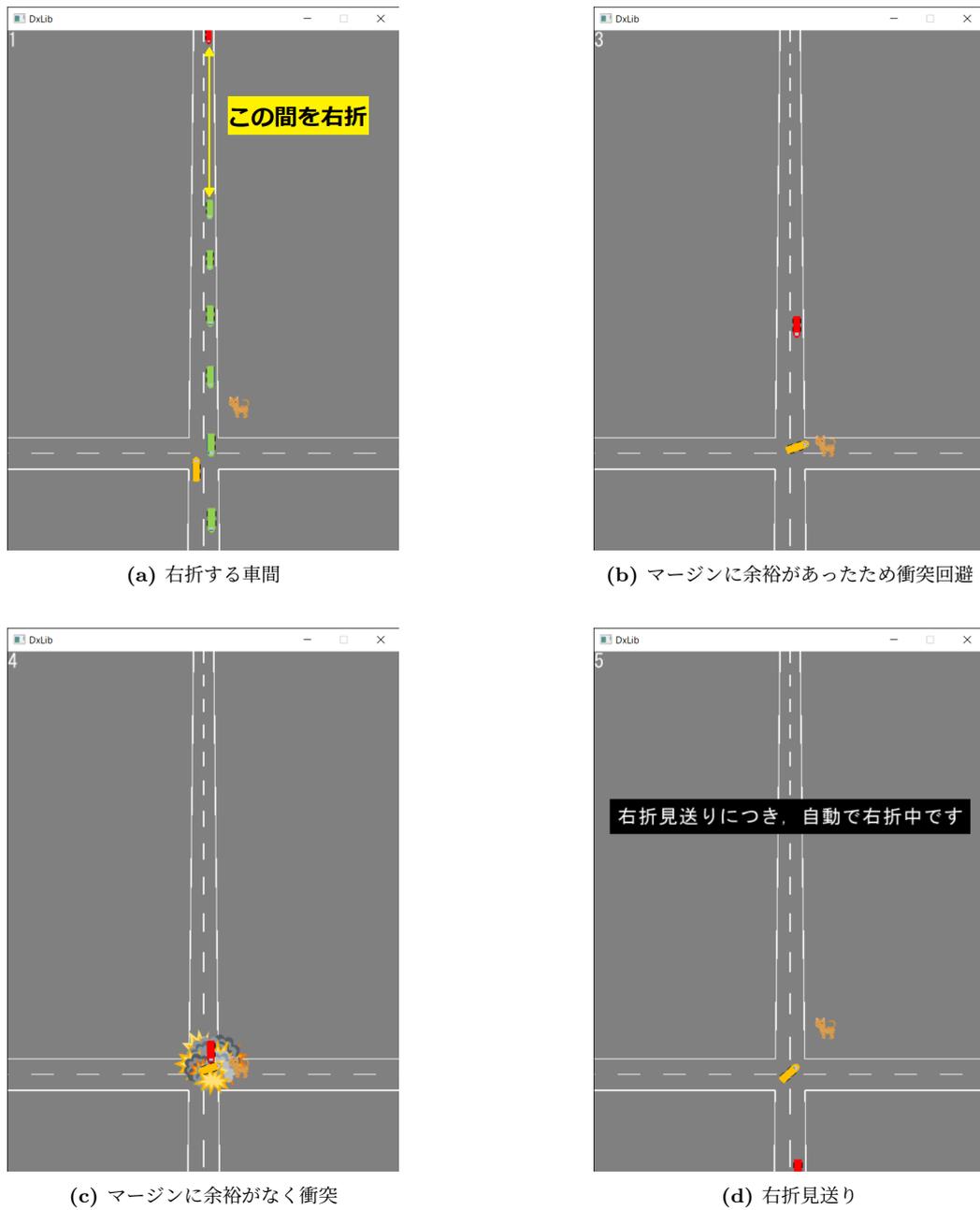


図 3.2: 被験者に見せる映像の例

あると理解してもらおう。

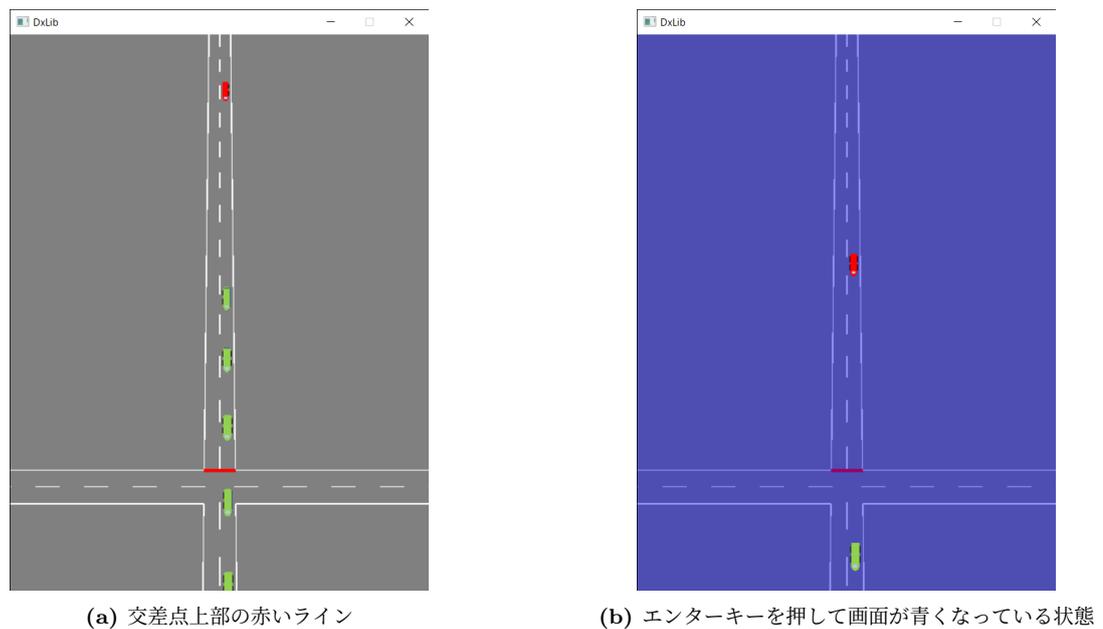


図 3.3: 直進時間把握の画面

### 3.1.2 直進時間把握

被験者に対向直進車と直進先導車の車間時間を把握してもらおう。交差点上部に赤いラインが引いてある(図 3.3(a))。被験者は、複数の直進先導車のうち最後尾の車両の後端がラインを通過したら、エンターキーを押す。そのまま押し続けている間、シミュレータの画面は青色で表示される(図 3.3(b))。対向直進車の先端がラインを通過したらエンターキーを離す。このようにして、右折の時間的猶予を漠然とではなく、また秒数でもなく、身体動作により把握してもらおう。対向直進車と直進先導車の車間距離は5通りある。各車間距離に対して1回ずつ、計5回この操作を行う。5回の操作の順番はランダムである。

### 3.1.3 右折速度把握

被験者に右折自車の操作方法を覚えてもらおう。交差点には右折自車のみ存在し、対向車は存在しない(図 3.4(a))。被験者には5回右折してもらおう。被験者はアクセルペダルを踏んで右折自車を発進、右折させる。右折終了後もペダルを踏み続け、道路を画面右方向に進み続けると、画面に「アクセルをもとに戻してください」と表

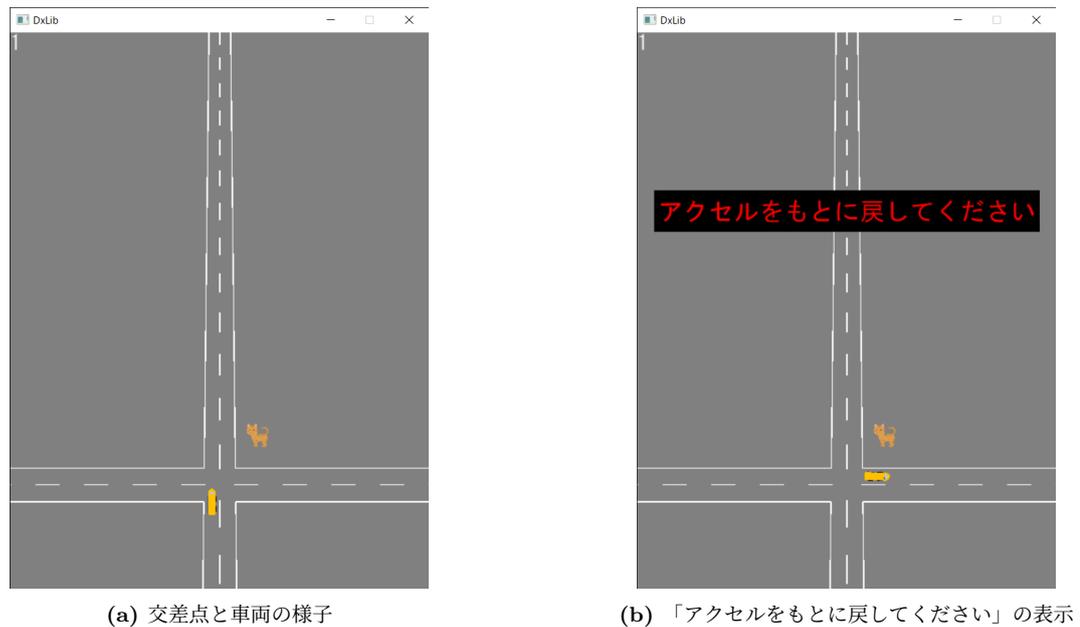


図 3.4: 右折速度把握の画面

示される (図 3.4(b)). 被験者は指示に従い、ペダルを踏むことをやめると、次の右折に移る。なお3種類の加速特性の右折自車は、それぞれペダルを踏み込む量に対する増加速度が異なる。現在操作する右折自車のペダルの踏み込み量と速度の関係も、この作業で被験者に理解させる。

#### 3.1.4 右折実験練習

被験者は本番と同じ作業を練習する (図 3.5)。被験者は直進先導車と対向直進車の間を、それらに衝突しないように右折できるかどうか判断する。右折できると判断した場合は、アクセルペダルを踏んで右折する。「右折速度把握」と同様、右折終了後も道路を進み続け、画面の指示に従いペダルを踏むことをやめると、次の右折に移る。右折できないと判断した場合は、「右折見送り」をする。対向直進車と直進先導車の車間距離は5通りある。実験の趣旨から、見切り発進は控えてもらうように伝える。各車間距離に対して3回ずつ、計15回この操作を行う。15回の操作の順番はランダムである。

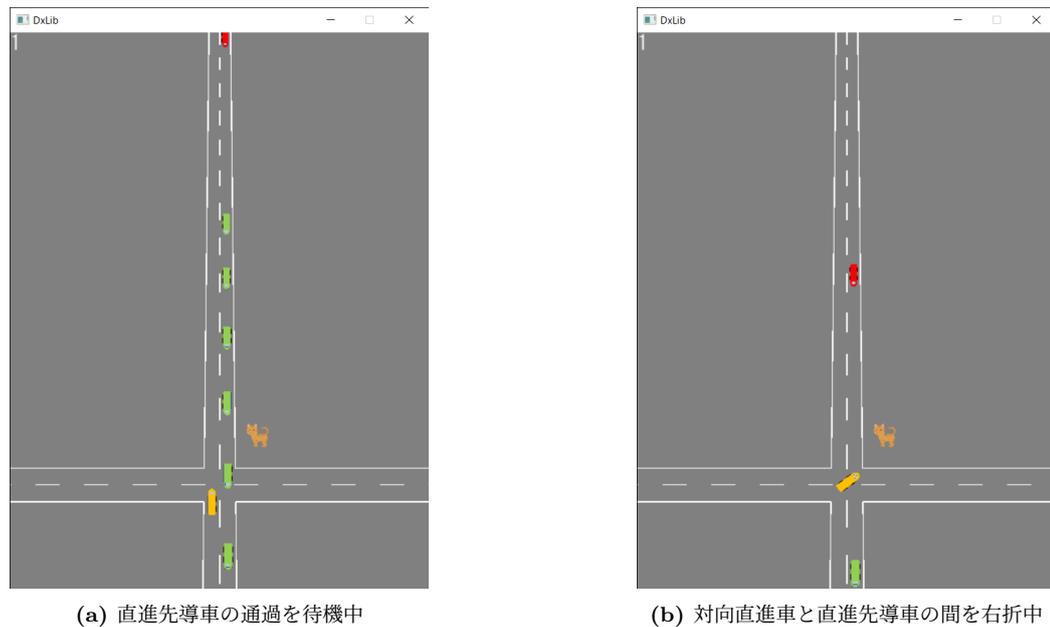


図 3.5: 右折実験練習の画面

### 3.1.5 右折実験本番

練習と同様に被験者は交差点を右折する。直進先導車と対向直進車の間を右折できた場合、被験者はアンケートに2問回答する(図 3.6)。「右折見送り」をした場合は回答しない。1問目は「右折中に加速度が変化しましたか?」であり、「右折速度把握」と比較し、右折自車の加速度合いの体感や加速のしやすさが変化したと感じたかどうかの質問である。「1:遅く感じた」、「2:やや遅く感じた」、「3:変わらない」、「4:やや速く感じた」、「5:速く感じた」、の5段階のリッカート尺度で評価する。2問目は「右折中に安心感がありましたか?」であり、右折中に被験者が覚えた感情を評価する質問である。「1:とても不安だった」、「2:不安だった」、「3:なんともいえない」、「4:安心だった」、「5:とても安心だった」、の5段階のリッカート尺度で評価する。5通りの車間距離に対して8回ずつ、計40回この操作を行う。40回の操作の順番はランダムである。

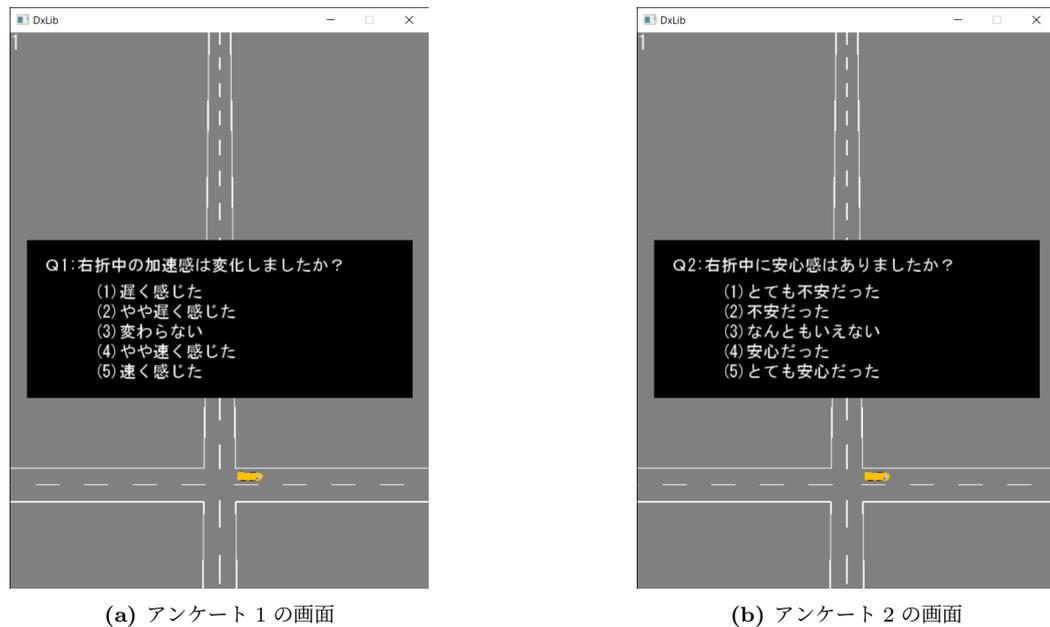


図 3.6: 右折実験本番の画面

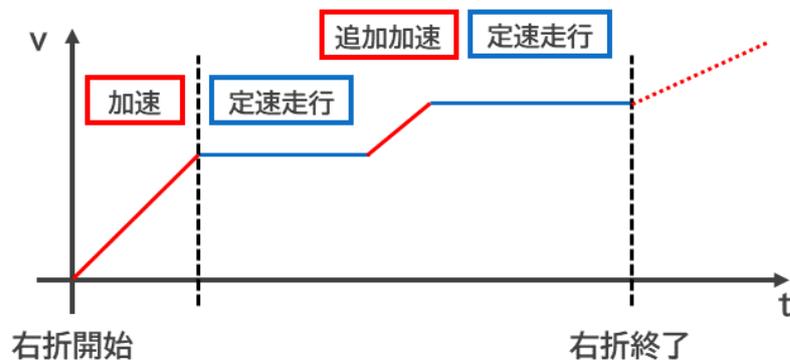
## 3.2 分析の準備

各被験者は1つの加速特性につき、5通りの車間距離に対して8回ずつ、計40回右折判断を行った。被験者全体で1つの加速特性につき、320回右折を行った。実験の趣旨は安心な右折に必要な右折行動の分析であるので、「右折見送り」を行ったものは分析対象としない。また右折中に対向車と衝突したものや右折中に交差点内で停止したのも、分析対象としない。なお右折中に右直マージン距離が0mとなった場合に、右折自転車と対向直進車が衝突したと判断する。分析対象とする右折数は加速特性<低>は215回、加速特性<中>は226回、加速特性<高>は223回であった。

理想的な右折中の速度変化を図 3.7(a) のように想定する。運転手はアクセルペダルを踏み右折を開始し、そのままアクセルを踏み続け速度を上げ、ある程度の速度になったら、その速度を保ちながら右折する。右折終了後はその道路の制限速度に合わせて再び加速する。しかし速度が安定した後、何らかの理由で運転手が追加加速を行う場合がある(図 3.7(b))。対向直進車が定速であれば、対向直進車が交差点に到達するまでの時間(右直マージン時間)が計算できるので、それをもとに右折判断を行えば、理論的には追加加速は不要である。しかし実際の道路では対向直進車の



(a) 理想的な右折中の速度変化



(b) 追加加速を行った場合の速度変化

図 3.7: 右折中の速度変化

速度は可変である。例えば対向直進車が加速した場合、右直マージン時間は、右折開始時の想定より短くなる。あるいは右折する際に、右直マージン時間を実際より長く見積もってしまう場合がある。最初の加速が不十分な場合もある。いずれの場合でも、右折中に右直マージンが不足したら、運転手は追加加速を行い、右折車の速度を上げ、右直マージンを確保しようとする。つまり、右折車の運転手が右直マージンの不足を感じたときに追加加速を行うと考えられる。

右折実験本番で得たアクセルペダルの値  $Accel$  をもとに、各右折で追加加速を行った時刻を抽出する。実験シミュレータは 60fps で動作する。 $Accel$  は 1f (フレーム) ごとに、すなわち 1/60 秒ごとに記録される。右折開始直後の加速に 1 秒 (60f) が必要であると仮定して、1 秒以降に行った加速を追加加速と判断する。具体的には 0.1

		加速特性		
		低	中	高
閾値	1.00	0.26G	0.43G	0.60G
	1.50	0.38G	0.64G	0.89G
	2.00	0.51G	0.85G	1.19G

図 3.8: 加速特性および閾値  $\epsilon$  ごとの加速度



図 3.9: 定速走行と追加加速および加速判断時刻の例

秒 (6f) 以上の間,  $Accel$  の増分が各直前のフレームから閾値  $\epsilon$  未満であれば, 定速での走行と判断する. すなわち極めて低い加速度の場合は定速走行と判断している. 減速は考慮していない. 定速走行時間以外は追加加速時間と判断する. なお閾値  $\epsilon$  は経験的に 1.00, 1.50, 2.00 に設定した. これらはそれぞれ, 各加速特性において,  $1G=9.8m/s^2$  とすると, 低: 0.26G, 0.38G, 0.51G, 中: 0.43G, 0.64G, 0.85G, 高: 0.60G, 0.89G, 1.19G に相当する (図 3.8). 追加加速開始の 1f 前を「加速判断時刻」と呼ぶ. なお上記定義より, 定速走行開始と判断される直前のフレームでは定速走行速度と (ほぼ) 同じであるが, このフレームは加速の終了フレームである. 図 3.9 の例では, 40f~45f および 51f~56f が定速走行を行っている時間, 46f~50f が追加加速を行っている時間であり, 45f が加速判断時刻である. 閾値  $\epsilon$  が 1.00, 1.50, 2.00 において, 加速特性<低>では 152, 69, 46 回, 加速特性<中>では 72, 30, 23 回, 加速特性<高>では 107, 67, 62 回追加加速が行われた (図 3.10). なお一度の右折で複数回追加加速を行った場合もある.

加速判断時刻における右折自転車の速度と残りの右折道のりから, その速度を維持

		加速特性		
		低	中	高
閾値	1.00	152	72	107
	1.50	69	30	67
	2.00	46	23	62

図 3.10: 加速特性および閾値  $\epsilon$  ごとの追加加速回数

		加速特性		
		低	中	高
閾値	1.00	131	71	104
	1.50	63	29	65
	2.00	45	22	61

図 3.11: 外れ値を除外した追加加速回数

した場合、つまり追加加速を行わない場合の右折終了までにかかる時間が計算できる。これを「右折残所要時間」と呼ぶ。また加速判断時刻における右直マージン時間は、あと何秒で対向直進車が交差点に到達するかという、右折車との衝突までの時間的猶予を意味している。これを「右直残マージン時間」と呼ぶ。右折所要時間は3秒を想定しているため、右折残所要時間が3秒を超える追加加速は外れ値として分析対象から除外する。除外した後の追加加速回数は、閾値  $\epsilon$  が 1.00, 1.50, 2.00 において、加速特性<低>では 131, 63, 45, 加速特性<中>では 71, 29, 22, 加速特性<高>では 104, 65, 61 である (図 3.11)。右折残所要時間と右直残マージン時間が等しければ、右折自転車は追加加速を行わない限り、右折終了と同時に対向直進車が交差点に到達する。右折残所要時間が右直残マージン時間より短ければ、右折自転車が追加加速を行わない場合、その差分が右折終了時の右直マージン時間となる。右折残所要時間が右直残マージン時間より長ければ、右折自転車は追加加速を行わない限り、右折終了前に対向直進車と衝突してしまう。

### 3.3 結果と考察

#### 3.3.1 アンケート1

アンケート1は、対向直進車が存在しないとき(右折速度把握)を基準に、加速感を強く感じたか弱く感じたかを評価する質問である。対向直進車が存在することで、被験者は早く右折を終えたいという気持ちが高まるだろう。また右折中に対向直進車は除々に右折自転車に近づいてくる。したがって追加加速のタイミングにおいて右折残所要時間が短いほど、早く右折を終えてしまいたいという気持ちが大きく高まり、加速が鈍く感じるかもしれない。横軸を右折残所要時間、縦軸をアンケート1の評価とする散布図を加速特性および閾値 $\epsilon$ ごとに示す(図3.12, 図3.13, 図3.14)。いずれの加速特性および閾値 $\epsilon$ でも、右折残所要時間と加速感の評価に関連は見られない。加速感は右折残所要時間に影響されていないようである。今回の実験では俯瞰視点のシミュレータを用いたため、加速感は車の挙動を見ることでしか感じられない。実際の運転では、頭の直線加速度は耳の耳石器という器官で、角加速度は半規管という器官で受容する[19]。そのため被験者は加速感を正しく評価できなかった可能性もある。

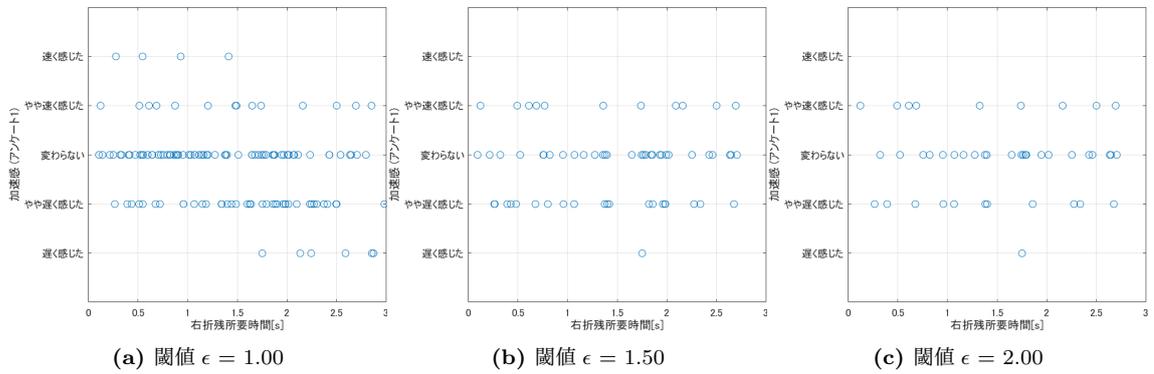


図 3.12: 右折残所要時間とアンケート 1 (加速特性<低>)

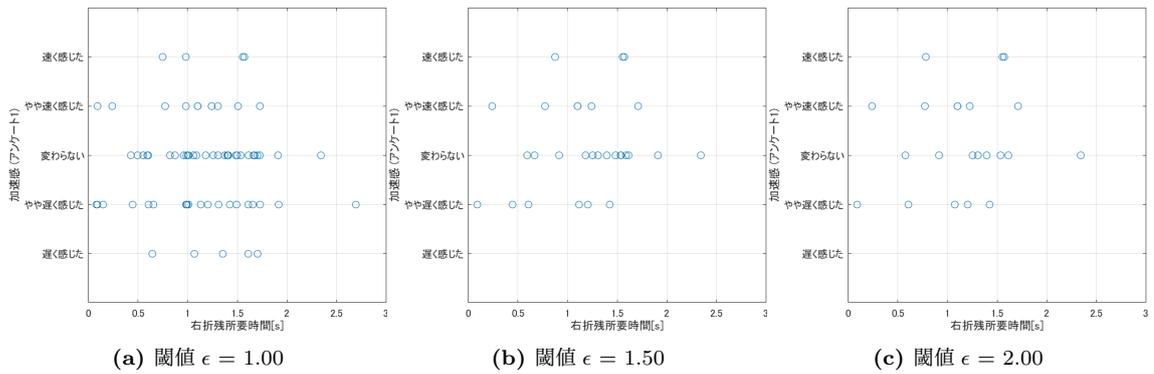


図 3.13: 右折残所要時間とアンケート 1 (加速特性<中>)

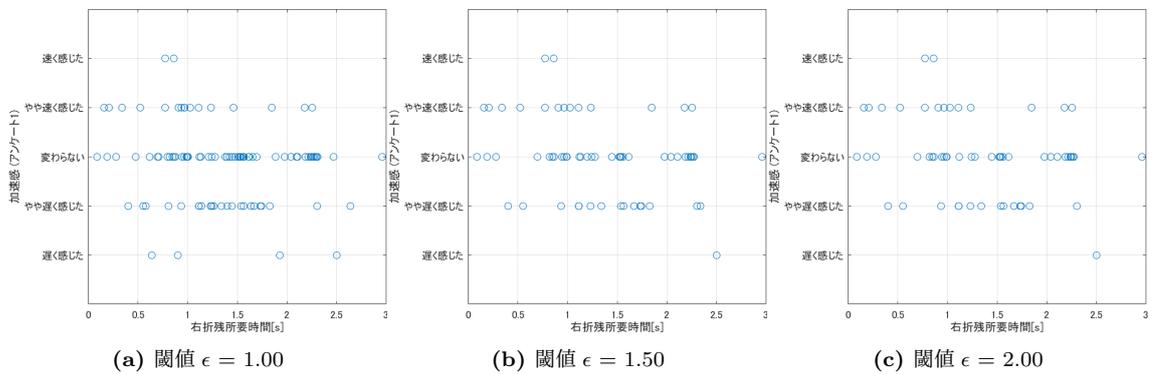


図 3.14: 右折残所要時間とアンケート 1 (加速特性<高>)

### 3.3.2 アンケート2

アンケート2は右折中の安心感を評価する質問である。横軸を右折残所要時間、縦軸をアンケート2の評価とする散布図を加速特性および閾値 $\epsilon$ ごとに示す(図3.15, 図3.16, 図3.17)。いずれの加速特性および閾値 $\epsilon$ でも、右折残所要時間と安心感の評価に関連は見られない。安心感は右折残所要時間に影響されていないようである。なお、どの右折残所要時間の追加加速も、対向直進車とのマージンに不安感を覚えて追加加速を行ったのか、あるいは、追加加速を行ったことでその加速の感覚に不安感を覚えたのか、質問が不十分で判断できなかった。

加速の有無によって安心感が変化したかどうかを、マンホイットニーのU検定で分析する。この検定は、加速の有無により安心感に差があるかどうか分析する。有意水準を0.05とする。加速特性<低>215回、加速特性<中>226回、加速特性<高>223回の右折について、一度でも追加加速を行ったものは加速あり、一度も追加加速を行わなかったものを加速なしとする。加速特性および閾値 $\epsilon$ ごとの検定結果を図3.18に示す。加速特性<中>では全ての閾値 $\epsilon$ で安心感に有意な差があり、追加加速を行った方が、行わなかった場合と比較して安心感が低い。すなわち加速した場合に不安を感じている。加速特性<低>、<高>では全ての閾値 $\epsilon$ で有意な差は見られなかった。不安を感じて追加加速を行うのであれば、安心感は小さくなることが予想される。一方で、追加加速を行うことで十分なマージンを確保できて、安心感を覚えることも考えられる。加速特性<低>、<高>で有意な差が見られなかったのは、追加加速を行うきっかけとなった不安感や追加加速という行為自体の不安感よりも、追加加速を行った結果得られた安心感のほうが重要視されたからかもしれない。

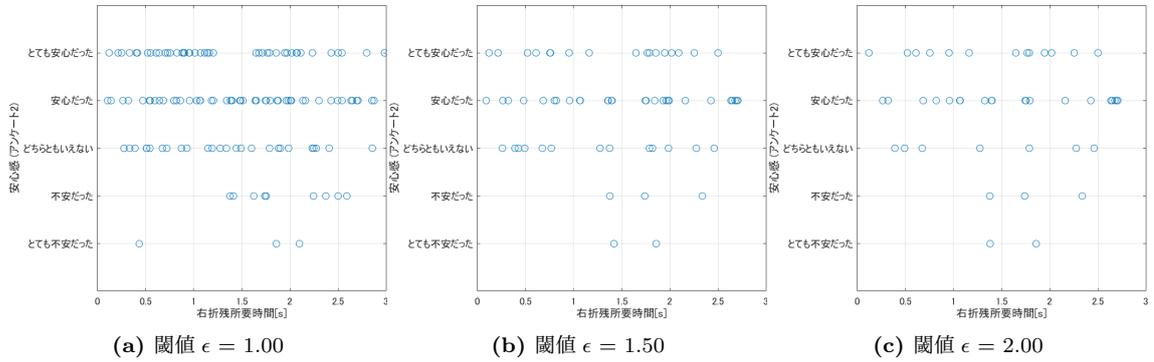


図 3.15: 右折残所要時間とアンケート 2 (加速特性<低>)

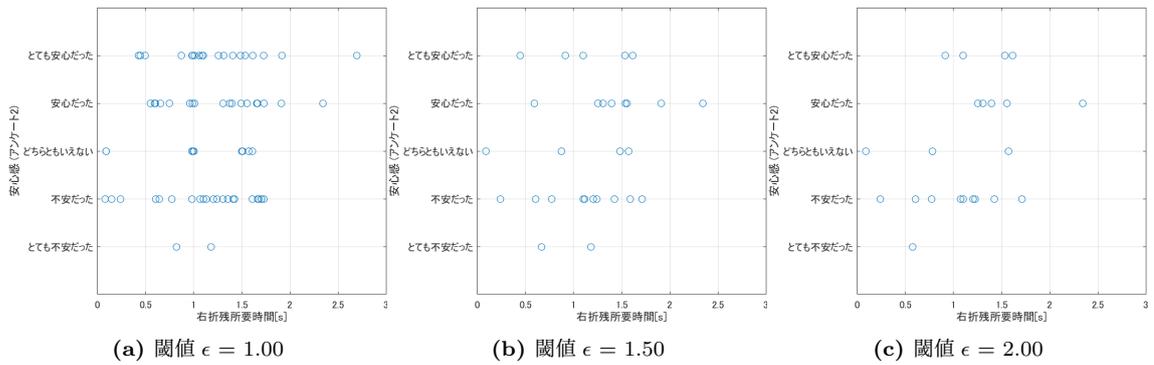


図 3.16: 右折残所要時間とアンケート 2 (加速特性<中>)

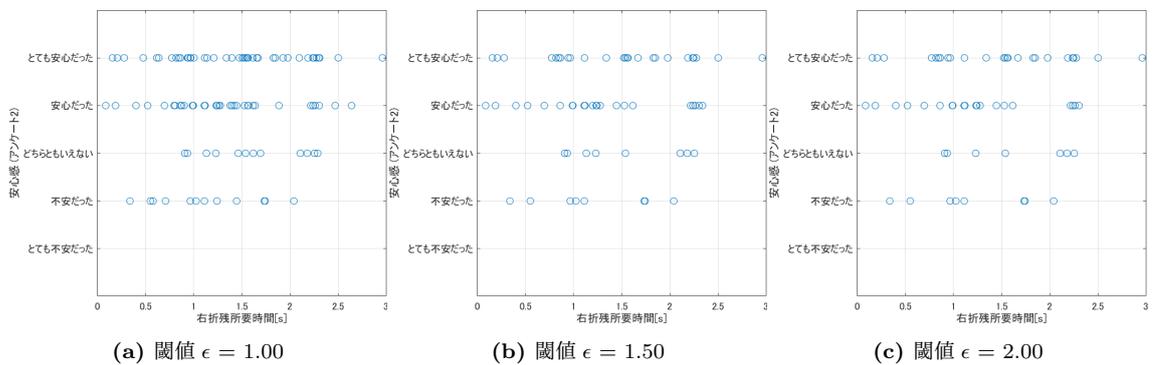


図 3.17: 右折残所要時間とアンケート 2 (加速特性<高>)

加速特性<低>				
アンケート2の平均値(右折数)				
		加速あり	加速なし	p値
閾値	1.00	3.97(86)	3.82(129)	0.42
	1.50	4.00(49)	3.84(166)	0.50
	2.00	3.95(38)	3.86(177)	0.73

加速特性<中>				
アンケート2の平均値(右折数)				
		加速あり	加速なし	p値
閾値	1.00	3.55(56)	4.24(170)	<.001
	1.50	3.24(25)	4.17(201)	<.001
	2.00	3.15(20)	4.16(206)	<.001

加速特性<高>				
アンケート2の平均値(右折数)				
		加速あり	加速なし	p値
閾値	1.00	4.07(75)	4.14(148)	0.69
	1.50	4.03(60)	4.15(163)	0.61
	2.00	4.05(59)	4.14(164)	0.77

図 3.18: アンケート2の平均値と検定結果

### 3.3.3 右直残マージン時間

右折車の運転手が追加加速を行うタイミングが分かれば、自動運転において、右折車の搭乗者が不安を感じる前に追加加速を行うことができるようになり、搭乗者に不安感を与えない安心な右折を実現できるだろう。そのタイミングを右直残マージン時間を基準に分析する。横軸を右折残所要時間、縦軸を右直残マージン時間とする散布図および回帰直線を加速特性および閾値  $\epsilon$  ごとに示す(図 3.19, 図 3.20, 図 3.21)。いずれの加速特性でも、右折残所要時間が長くなるほど、右直残マージン時間も長くなる傾向がある。つまり追加加速は右直残マージン時間のみで判断するのではなく、右折自車の右折残所要時間、すなわち加速判断時刻における右折自

車の速度と残りの右折道のりも考慮して判断している。ほぼ全ての追加加速が右折残所要時間 < 右直残マージン時間 (図中の点線よりも上, すなわちその状態を継続すれば衝突しない) であるタイミングで行われた。右折残所要時間と右直残マージン時間の差分が右折終了時の右直マージン時間である。右折車の運転手は右折終了時のマージンを確保することを意識しながら, 追加加速の判断をしているのだろう。右折残所要時間 > 右直残マージン時間となるタイミングでの追加加速はほとんどない。追加加速の必要がないというわけではなく, そのような状態になる前に追加加速をしたのだろう。閾値  $\epsilon$  による大きな違いはみられなかった。ノイズによる影響は  $\epsilon=1.00$  で除去できたと考えられる。これらの散布図の回帰直線 (図中の実線) は, 追加加速するか否か判断した平均的な閾値とみなせるだろう。すなわち, 右折車の運転手は右折残所要時間と右直残マージン時間の組み合わせがこの実線を下回ると追加加速を行いたくなる。この回帰直線のある程度上に閾値直線 (曲線) を引くことができれば, 右折する自動運転車の搭乗者が不安を覚えない (覚えにくい) 安心な右折を実現できるだろう。例えば適切な有意水準 (5% にしてしまうと極端に不安を覚える被験者をも考慮してしまうおそれがある) における予測区間の上端を閾値にすることが考えられる。図中の破線は 75% の予測区間の上端である。これを基準に追加加速を行えば, 十分に安心と感じられる右折が期待できるだろう。ただし, 加速特性が高いほど早めの追加加速を行う傾向がみられる。加速特性が低ければ予め余裕を確保する必要があるはずで, 矛盾した結果にも思える。右折自車の性能が高いと対向直進車の性能も高いと思ってしまうのか, あるいは, 自車性能が低いと, 勢いよくアクセルを踏んでもすぐに反応しないと思って緩やかに踏み込んでいったのかもしれない。さらなる検討が必要だろう。

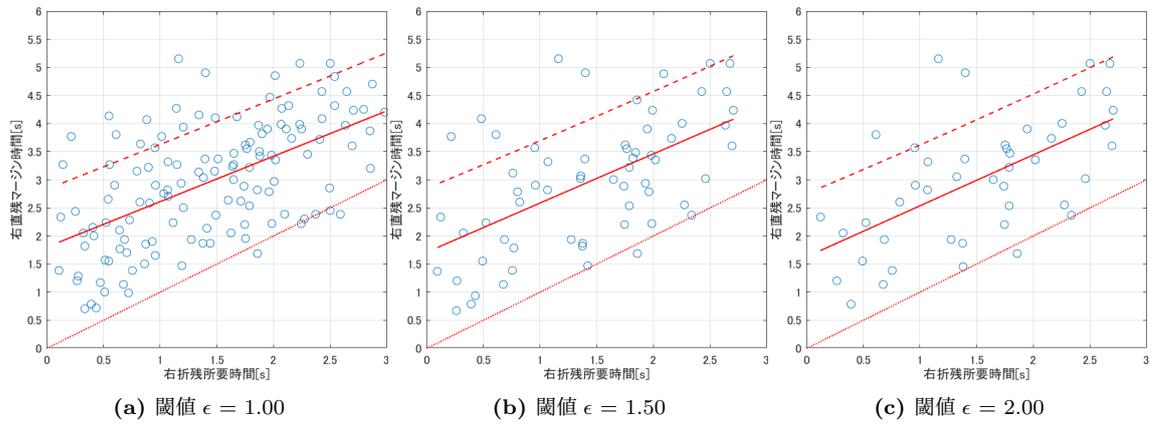


図 3.19: 右折残所要時間と右直残マージン時間 (加速特性<低>)

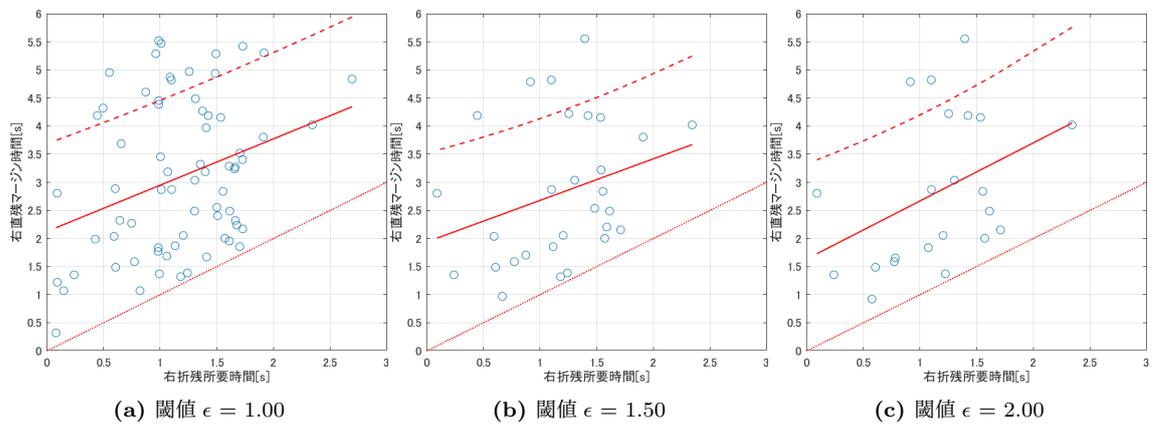


図 3.20: 右折残所要時間と右直残マージン時間 (加速特性<中>)

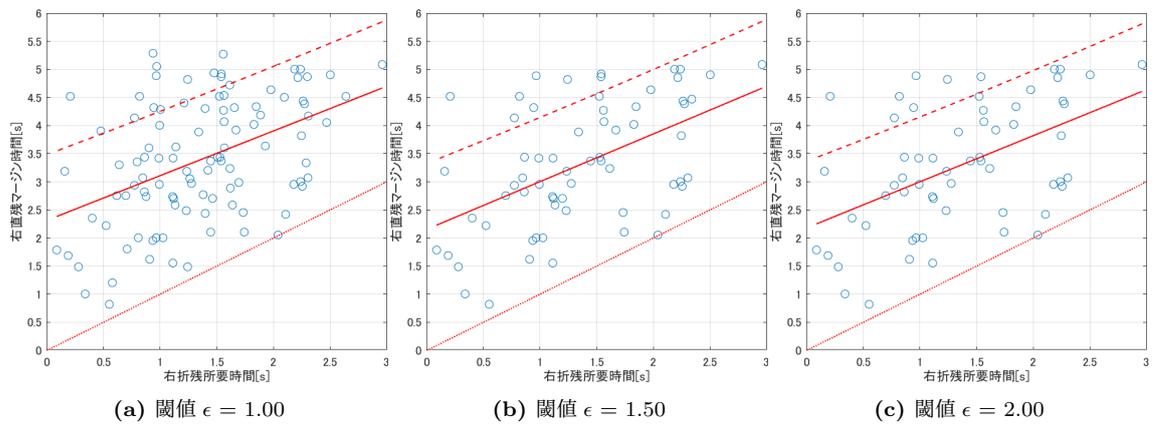


図 3.21: 右折残所要時間と右直残マージン時間 (加速特性<高>)

## 第4章 むすび

本研究では自動運転における安心な右折の実現を目標とし、右折車の搭乗者が安心を感じる右折動作の要件を明らかにするために、右折車と直進車が混在する交差点において、右折車の運転手が追加加速を行うタイミングに着目し、追加加速の判断基準を分析した。右折車の運転手は、追加加速を行うか否かを直進車が交差点に到達するまでの時間のみで判断するのではなく、自車の速度と残りの右折道のりも考慮して判断することがわかった。右折車の運転手が追加加速を行いたくなる前に追加加速を行うことで、安心な自動運転が実現できるだろう。

今後の展望を述べる。本研究では右折車側の心理面しか評価できておらず、直進車側の心理面は評価できていない。様々なタイミングで追加加速を行う右折車に対して直進車の搭乗者が抱く感情を分析する実験を行うことで、直進車側が不安を覚えない右折車の追加加速のタイミングが分かり、右折車の搭乗者と直進車の搭乗者の双方が安心である右折を実現できるだろう。また追加加速と安心感の因果関係も明らかにしていきたい。

## 謝辞

本研究を進めるにあたって、日頃から多大なご尽力を頂き、ご指導を賜りました名古屋工業大学、舟橋健司准 教授、伊藤宏隆 助教に心から感謝致します。また、本研究は近畿大学、株式会社 本田技術研究所との共同研究の一部であり、研究の機会を与えてくださった近畿大学の谷田公二様、本田技術研究所の上田雄悟様、木村真弘様、皆様に深く感謝致します。最後に、本研究に多大なご協力をいただきました舟橋研究室諸氏ならびに被験者の方々に心から感謝致します。

## 参考文献

- [1] e-Stat(政府統計の総合窓口), “道路の交通に関する統計-令和3年中の交通事故の発生状況”, <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00130002&tstat=000001027457&cycle=7&year=20210&month=0&tclass1val=0> (2023年1月13日参照)
- [2] デジタル庁, “デジタルを活用した交通社会の未来 2022”, [https://www.digital.go.jp/assets/contents/node/information/field\\_ref\\_resources/22791050-006d-48fd-914d-e374c240a0bd/1ae00570/20220802\\_news\\_mobility\\_outline\\_01.pdf](https://www.digital.go.jp/assets/contents/node/information/field_ref_resources/22791050-006d-48fd-914d-e374c240a0bd/1ae00570/20220802_news_mobility_outline_01.pdf) (2023年1月13日参照)
- [3] 公益社団法人自動車技術会, “自動車用運転自動化システムのレベル分類及び定義”, <https://www.jsae.or.jp/08std/> (2023年1月13日参照)
- [4] 三井ダイレクト損保損害保険株式会社, “～「三井ダイレクト損保」と「西成教授(東京大学)」が共同リサーチ～「自動運転」に関するアンケート調査”, <https://news.mitsui-direct.co.jp/topics/20171023/index.html?id=40299> (2023年1月13日参照)
- [5] 嶋田淳, 河原健太, 城戸恵美子, 朴信映, 吉武良治, “自動運転車両における運転者の不安感評価”, ヒューマンインターフェース学会論文誌, Vol.19, No.4, pp.333-342, 2017.
- [6] 伊能寛, 伊藤直紀(株式会社デンソー), “クルマを運転する人間の感覚をエンジニアリングに落とし込む自動運転システムを開発するデンソーの挑戦”, スピーチ対談ログサイト <https://logmi.jp/tech/articles/322955> (2023年1月13日参照)

- [7] 公益財団法人 交通事故総合分析センター, “右直事故発生における人的要因の分析”, 平成20年 第11回交通事故・調査分析発表会, [https://www.itarda.or.jp/presentation/11/show\\_lecture\\_file.pdf?lecture\\_id=55&type=file\\_jp](https://www.itarda.or.jp/presentation/11/show_lecture_file.pdf?lecture_id=55&type=file_jp) (2023年1月13日参照)
- [8] 秋元遼太, “自動運転車開発に向けた対向直進車に不快感を与えない右折運転行動の解析”, 名古屋工業大学大学院, 2022.
- [9] 帆足拓海, “主観視点と俯瞰視点での車の運転性の違いに関する検討”, 東京都市大学, 2022.
- [10] “優れたパワーウェイトレシオにはイイ加速。車種別に見ればさらに納得!?”, <https://autos.goo.ne.jp/column/1015328/> (2023年1月23日参照)
- [11] e-GOV 法令検索, “道路構造令 (昭和四十五年政令第三百二十号)”, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=345C00000000320> (2023年1月23日参照)
- [12] e-GOV 法令検索, “道路交通法 (昭和三十五年法律第五号)”, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=335AC0000000105> (2023年1月23日参照)
- [13] K. Tanida, E. Pöppel, “A Hierarchical Model of Operational Anticipation Windows in Driving an Automobile”, *Cognitive Processing*, Vol.7, No.4, pp. 275–287, Sep., 2006.
- [14] E. Pöppel, “Pre-semantically defined temporal windows for cognitive processing”, *Journal of Experimental Psychology*, Vol.364 (1525), pp.1887-1896, Jul., 2009.
- [15] e-GOV 法令検索, “道路交通法施行令 (昭和三十五年政令第二百七十号)”, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=335C00000000270> (2023年1月23日参照)
- [16] 警察庁, “交通規制基準”, <https://www.npa.go.jp/laws/notification/koutuu/kisei/kisei20211130.pdf> (2023年1月23日参照)

- [17] “交通事故における車速と停止距離を考える”，<http://www5d.biglobe.ne.jp/Jus1/Keisanki/JTSL/TeisiSyasoku.html> (2023年1月23日参照)
- [18] 畑田豊彦，“人工現実感に要求される視空間知覚特性”，人間工学，29巻，第3号，pp.129-134，1993.
- [19] 白日淑，内野善生，“直線・回転加速度感受容性増強のメカニズム”，東医大誌，61巻，6号，pp.487-495，2003.