

ドライビングシミュレータにおける路上駐車の際のドア開閉が認知的狭さに及ぼす影響について

成瀬 詩織[†] 飯田 空[†] 福井 雅弘[†] 高久 拓海[†] 中村 聡史[†]
山中 祥太^{††}

[†] 明治大学総合数理学部 〒164-8525 東京都中野区中野 4 丁目-21-1

^{††} LINE ヤフー株式会社 〒102-8282 東京都千代田区紀尾井町 1-3 東京ガーデンテラス紀尾井町 紀尾井タワー
E-mail: [†]snn114017@gmail.com, ^{††}syamanak@lycorp.co.jp

あらまし 適切な車のナビゲーションのためには、道路形状や運転者の心理状態を反映した運転難易度のモデル化が必要となる。我々はこれまでの研究において、道路幅が徐々に変化する経路や、路上駐車により道路幅が変化する経路での運転難易度について調査してきた。その結果から、路上駐車により道路幅の変化がある経路において、運転者は実際の道路幅よりも狭い幅と認識して運転を行っている可能性が示唆された。そこで本研究では、ドライビングシミュレータを用いて路上駐車の際のドアの開閉動作に着目した実験を行い、認知的狭さが運転行動に与える影響について調査を行った。実験の結果、路上駐車の際のドア開閉が運転難易度に影響を及ぼすこと、その影響の度合いはステアリングの法則に関するモデルを用いて推定できることを明らかにした。

キーワード 運転, ドライビングシミュレータ, 認知の狭さ, 路上駐車, 道路幅, ステアリングの法則, モデル化

Effects of Cognitive Narrowness Caused by the Opening and Closing of Doors of Street-Parked Cars on Driving Behavior in a Driving Simulator

Shiori NARUSE[†], Sora IIDA[†], Masahiro FUKUI[†], Takumi TAKAKU[†], Satoshi NAKAMURA[†],
and Shota YAMANAKA^{††}

[†] Meiji University Nakano 4-21-1, Nakano-ku, Tokyo, 164-8525 Japan

^{††} LY Research, LY Corporation Kioi Tower, 102-8282, Tokyo Garden Terrace Kioicho, 1-3, Kioi-cho,
Chiyoda-ku, Tokyo, 102-8282 Japan

E-mail: [†]snn114017@gmail.com, ^{††}syamanak@lycorp.co.jp

Abstract For a proper car navigation system, it is necessary to model the level of driving difficulty based on the road geometry and the psychological status of drivers. Our previous studies investigated and modeled driving difficulty on roads where the width gradually changes or is affected by on-street parking. Our findings indicate that drivers tend to perceive the road as narrower than it actually is when its width changes due to on-street parking. In this study, we investigated the effects of cognitive narrowness on driving behavior by conducting an experiment using a driving simulator, focusing on the opening and closing of parked vehicle doors. Experimental results showed that the opening and closing of the door of car parked on the street affected the driving difficulty, and the degree of the influence can be estimated using a refined model of the steering law.

Key words Driving Simulator, Cognitive narrowness, on-street parking, Steering law, Modeling

1. はじめに

カーナビゲーションシステムの高性能化により、現在地から目的地までの経路推薦や到着時間予測など様々な形で運転者に対する支援が行われている。しかし、こうしたカーナビゲ-

ーションシステムでは、人通りの多い道路や道路幅の狭い道を通過する際の技量不足からくる不安といった精神状態についての考慮は行われていない。Nakagawa ら [1] が Yahoo!クラウドソーシング上で実施した 2000 人の運転免許保有者を対象とし

たアンケート調査によると、特に初心者の運転者は道路幅の狭い道や合流、高速道路、カーブや右折など特定の道路条件を苦手とする人が多く、技量を考慮した支援が必要であるといえる。初心者の運転者が快適に運転を行うためには、最短経路や短時間で到着を目的とした経路推薦を行うよりも、自分が運転しやすい経路選択を行えることが望ましい。運転者に合わせた経路推薦を行えるようにするためには、道路条件ごとに運転に与える影響を考慮し、運転難易度や技量を数値化して、モデル化する必要がある。運転難易度のモデル化には、実際の運転データや交通状況を利用する手法 [2] [3] があるが、実環境での実験は試すことが可能な道路条件も限られているため、様々な道路条件における運転難易度を網羅的にモデル化することは難しい。

ここで、複数の道路条件を考慮した運転難易度のモデル化を行ううえで、人間の特性を分析して構築された GUI 操作タスクの難易度に関するモデルが応用できることが明らかになっている [4] [5]。我々はこれまでの研究で、ドライビングシミュレータを用いて複数の地理的条件を生成可能な仕組みを実装し [6]、カーブの角度や半径に着目した経路 [7] や道路幅の変化がある経路 [8]、路上駐車のある経路 [9] における運転難易度のモデル化を行ってきた。しかしこれまでの研究では、路上駐車車両のドアが突然開く可能性を予測することで、運転者が道路幅を実際より狭く感じるような、認知的狭さを考慮できていなかった。このような、駐車場や路上でのドアの開閉は日常的に発生しているため、それを考慮したモデルは実際の運転環境により適合すると考えられる。また、こうした状況をモデルに反映することで、危険予測による運転の安全性を向上させることが可能である。

そこで本研究では、路上駐車がある区間において認知的狭さが運転難易度に及ぼす影響について検証を行う。具体的には、路上駐車車両のドアが開閉しない区間と、ドアが開閉する区間をつなげた経路を用意し、その区間長と通過時の道路幅を組み合わせたコースを走行する実験を行う。また、ステアリングの法則がドライビングシミュレータ上での実験データに適用できるかどうかを検証する。

2. 関連研究

2.1 ステアリングの法則

Accot ら [10] は、全長 A 、幅 W の経路を通過する際の時間 (MT) が次のような関係になるステアリングの法則を発見した。なお、本稿においてイタリックの小文字 a, b, c, d, e, n は回帰分析で決定されるフリーパラメータである。

$$MT = a + b \frac{A}{W} \quad (1)$$

ここで、 A/W の値はタスクの難易度 (ID) を表し、 ID が高くなるほど MT も増加する。このことから、移動距離 A が長い場合や幅 W が狭くなる場合には操作が困難になり、その結果、より所要時間が長くなることが示されている。また、ステアリングの法則はマウスやスタイラス操作だけでなく、VR 空間における操作にも適用可能であることが知られている [5]。特に、VR 空間での自動運転のシミュレーションでは、この法則が安

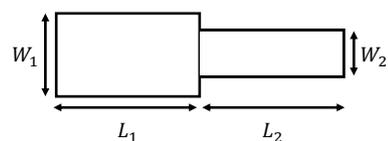


図 1: Yamanaka らのモデル

全速度の検証において重要な役割を果たしている。

2.2 幅と長さが異なる 2 つの直線経路を連結した経路におけるステアリングの法則

Yamanaka ら [11] は、図 1 のような幅と長さが異なる 2 つの直線経路の中央を揃えて連結した経路の通過時間を推定するためのモデルを比較した。最初に通過する経路の長さ L_1 と幅 W_1 、次に通過する経路の長さ L_2 と幅 W_2 として、以下の 4 つが候補であった。

$$\text{モデル\#1.1: } MT = a + b \left(\frac{L_1}{W_1} + \frac{L_2}{W_2} \right) \quad (2)$$

これはステアリングタスクにおいて、経路幅に関わらず単一の回帰係数 (傾き) を適用できるという Accot ら [10] の Global モデルに基づく。Yamanaka ら [11] はさらに、以下のように経路幅によって異なる回帰係数を適用した方がモデル適合度が向上することを発見した。

$$\text{モデル\#2.1: } MT = a + b \frac{L_1}{W_1} + c \frac{L_2}{W_2} \quad (3)$$

また、幅が狭い区間に進入するよりも少し手前から、ゲートをクロッシングする操作を開始すると見なすモデルの方が、モデル適合度が向上すると報告されている。どの程度だけ手前からクロッシングタスクを開始するかを係数 n で表し、次の 2 つのモデルが導出された。

モデル\#3.1:

$$MT = a + b \left(\frac{L_1 - nW_1}{W_1} + \frac{L_2}{W_2} \right) + c \log_2 \left(\frac{nW_1}{W_2} + 1 \right) \quad (4)$$

モデル\#4.1:

$$MT = a + b \frac{L_1 - nW_1}{W_1} + c \frac{L_2}{W_2} + d \log_2 \left(\frac{nW_1}{W_2} + 1 \right) \quad (5)$$

2.3 認知的注意に関する研究

実際の道路において、運転中の思考や路上物体による認知的注意散漫が、運転者に与える影響について調査する研究はいくつか行われている。Cvahte ら [12] は、運転者の視覚的および認知的注意が交通環境の変化に対する認識に与える影響についてアンケート調査を実施し、運転中の思考や広告、自然環境が、交通環境の重要な変化を見逃す原因となることを明らかにした。また、Dukic ら [13] は、路上物体である電子看板が運転者の視覚行動に与える影響について 41 名の運転者を対象に調査し、電子看板に対する注視時間、注視回数が増加することを明らかにした。しかし、これらの研究では、路上駐車車両のドアが突然開く可能性を予測することで、運転者が道路幅を実際より狭く感じるような認知的狭さについての調査は行われていない。



図 2: コースのイメージ

また、対象となった道路条件は少なく、道路条件ごとの運転難易度のモデル化には不十分である。

3. ドライビングシミュレータによる認知的狭さを考慮した運転難易度実験

3.1 実験概要

本実験では、ドライビングシミュレータを用いて図2のようにドアが開閉する路上駐車による複数の道路幅や区間長を持つコースにおいて、路上駐車区間を通過する速度や走行経路，エラー率に着目して実験を行う。ここでは、Accot ら、Yamanaka らのモデルが運転実験に適合するかを検証する。ドライビングシミュレータは、これまで我々が構築してきたシステム [6] [7] [8] [9] を改良し、生成された3つの区間それぞれに対し、路上駐車車のドア開閉の有無，路上駐車車の左右の設置位置について設定したコースを生成できるようにした。なお、ドライビングシミュレータには HMD として Meta Quest3，ステアリングコントローラは Fanatec 社の ClubSport Wheel Base V2.5，ステアリングホイールは Fanatec 社の Podium Hub Lenkrad Classic 2，ペダルは Fanatec 社の ClubSport Pedals V3 inverted，シートは Next Level Racing 社の NLR-S010 を使用した。

3.2 実験設計

李ら [3] の、都心部の一方通行区間における路上駐車を考慮し、通過車両の走行幅とその幅による速度の変化を調査した研究では、4.1m 以上の幅員では速度の変化が小さくなることが示されている。また、我々のこれまでの研究から、実験協力者が運転する車両に対して幅が広すぎる条件では運転の難易度に影響を与えにくいことが確認されている。そのため、実験を行う際はベースとなる道路幅 W_b (以下、ベース幅) を 5m と設定し、路上駐車を想定した車 (以下、路上駐車) の車両の幅を W_c とした。また、道路の端から走行車両までの走行不可領域 W_x をベース幅から引いたものを通過幅 W_s とし、ドアが開いている時のドア幅を W_d とした (図3)。そのため、ドアが開いている時の通過幅 (最狭幅) は $W_s - W_d$ となる。何も無い区間の経路の長さを経路長 L_n とし、路上駐車が置かれている区間 (以下、路上駐車区間) を経路長 L_p とした。路上駐車区間の経路長 L_p は、縦並びに設置してある路上駐車車の列の先頭車両の先端から、最後尾の車両の後端までの距離を指す。

本実験では、路上駐車車のドアが開閉する場合と開閉しない場合の2通りを区間ごとにランダムに用意した。路上駐車車のドアが開閉しない場合、通過幅 W_s は 3m, 4m, 5m の中から、区間長は 40m, 100m, 200m の中からそれぞれランダムに1つ選定した2つを1組とする9種類の組み合わせを採用した。路上

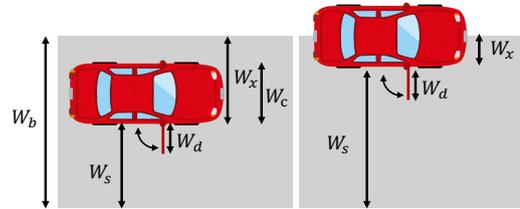


図 3: 経路幅の関係

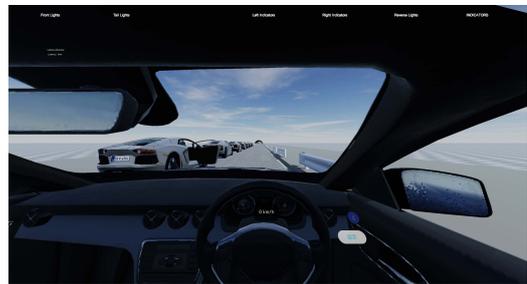


図 4: 実験者から見た開閉車両

駐車のドアが開閉する場合は、通過幅 W_s は 4m, 5m, 6m の中からランダムに1つ選定する。これは、ドアの幅 W_d を 1m に設定しており、ドアが最も開いた状態での通過幅と開閉しない場合の通過幅 (以下、いずれの通過幅も最狭幅) を揃えるためである。また、路上駐車のうち中央にある1台のドアが、走行車との距離が 40m 内に入った時に開く仕組みとした (図4)。なお、路上駐車車両の幅 W_c は 1.77m とした。

それぞれの区間前の走行条件を揃えるために、最初に提示される第1区間の前にはスタート位置から第1区間が始まるまでに 100m の何も無い区間を設けた。また、区間の間の走行速度と車体位置の統制をするため、第1区間と次に提示される第2区間の間と、第2区間と第3区間の間にはトンネル区間 100m を設けた (図2)。

3.3 実験手順

路上駐車区間は1コース3種類の区間で構成されており、18種類 (ドアの開閉の有無，最狭幅，区間長の組み合わせ) 全てを提示するために、6コース用意した。それを1セットとし、実験の慣れによる運転のプレをなくすため、3セット実験を行った。よって、実験協力者一人当たりの走行回数は18回となる。また、実験開始前に、実験協力者が HMD を使用したシミュレータに慣れてもらうため、最大1セット分の練習走行を行った後に実験を行った。

各コースはカウントダウンから始まり、カウントが0になると計測を開始し、車の車面がゴールの地点に達すると計測が終

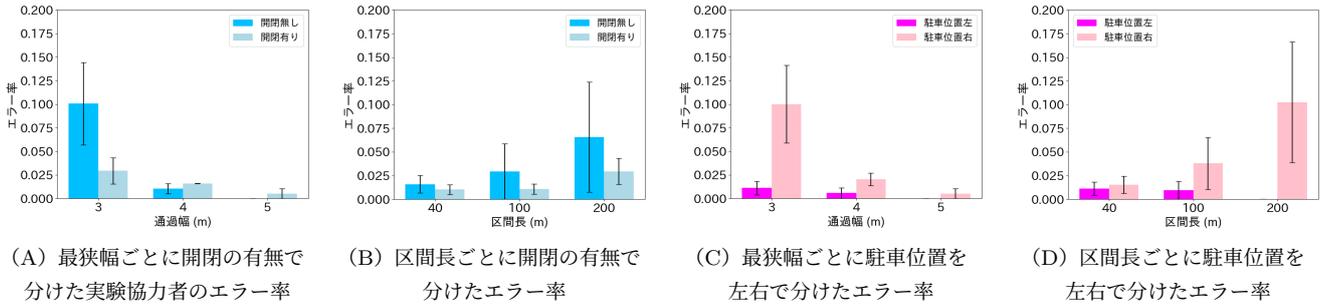


図 5: 各最狭幅, 区間長における開閉区間, 左右ごとのエラー率

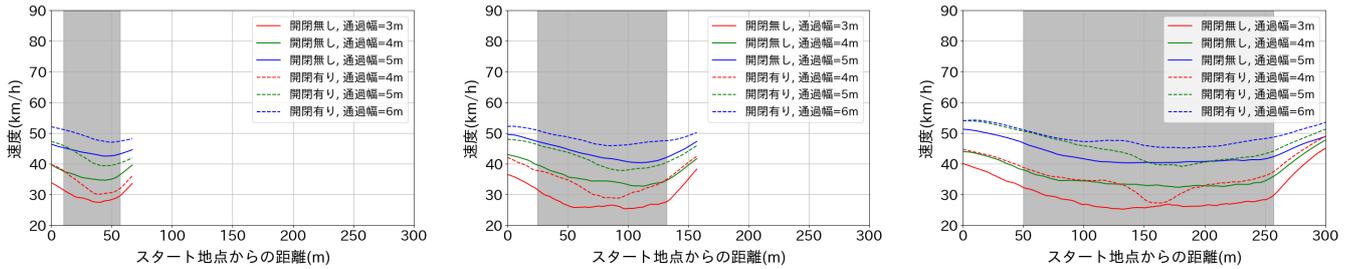


図 6: 区間長 (左) 40m, (中) 100m, (右) 200m のときの区間における開閉有無別の速度変化

了となる。コース内には路上駐車が左右どちらかに無作為に設置してある区間が3つある。なお、この実験では3種類のコースのエラー基準を設定しており、ガードレールと路上駐車に当たった場合、車が縁石に乗り上げた場合、開閉した車のドアに当たった場合の3種類とした。無事にゴールしてもいずれかのエラーをしていた時、セットの最後に繰り返しそのコースをエラーせず成功するまで行う。また、分析を行う際はエラーに該当する区間のみ除外した。

実験協力者には、路上駐車がない区間では、時速40km以上の運転を求め、極端に遅い運転や最高速度を目指す運転ではなく、エラーを起こさない範囲で普段通りの運転を心がけるよう事前に指示を出して実験を行った。なお、HMDの使用によるVR上での見え方に個人差があるため、各セットの終了時に実験協力者の体調や集中力を確認し、セット毎に最大5分ずつ休憩時間をとった。走行後はアンケートに回答してもらい終了とした。実験は、練習走行から測定終了まで1名あたり約1時間を要した。

4. 実験結果

実験協力者は自動車運転免許を持っている大学生20名(女性9名, 男性11名)であった。条件ごとの区間内の平均速度, 及び平均通過時間において外れ値となる実験協力者はいなかったため, 全実験協力者を分析対象とした。本章では, 最狭幅, 区間長, 開閉の有無の組み合わせごとの1つの区間におけるエラー率や平均速度, 平均通過時間の結果を示す。最狭幅とは, 路上駐車区間で車が通過できる最も狭い幅であり, ドアが閉まっているときは W_s , ドアが開いているときは $W_s - W_d$ となる。そのため, ドアが開く区間では, ドアが最大まで開いたときに通過幅が1m狭くなり, ドアが開かない区間の通過幅と同じ幅になる。以降の分析で取り扱う最狭幅は, すべてこの定義

に基づいて検討する。

表 1: 各組み合わせの条件別平均通過時

道路幅 (最狭幅, 開閉有無)	平均通過時間 (秒)		
	区間長 40m	区間長 100m	区間長 200m
(3m, 無)	7.31	17.95	34.25
(3m, 有)	6.02	13.26	25.76
(4m, 無)	5.34	12.85	25.41
(4m, 有)	4.34	10.32	19.06
(5m, 無)	4.17	9.70	19.61
(5m, 有)	3.68	8.78	17.10

4.1 各最狭幅, 区間長における開閉区間, 左右ごとのエラー率

本実験における全体のエラー発生回数は, 実験協力者20名による総走行1151回のうち34回であった。図5は(A)最狭幅ごとに開閉の有無で分けた実験協力者のエラー率, (B)区間長ごとに開閉の有無で分けたエラー率, (C)最狭幅ごとに駐車位置を左右で分けたエラー率, (D)区間長ごとに駐車位置を左右で分けたエラー率を示している。なお, エラーバーは標準誤差を示す。図5(B)および(D)のグラフに示すように, 区間長が長くなるほどエラー率は高くなっている。また, (B)の区間長ごとの開閉の有無条件と比較すると, 開閉無しの場合では開閉有りの条件よりも全ての区間長でエラー率が高くなることがわかる。次に, (A)に示す最狭幅ごとに開閉の有無で分けたエラー率では, 最狭幅が狭まるにつれてエラー率が高くなっていることがわかる。特に最狭幅3mでは, 他の最狭幅と比較して顕著にエラー率が高い。一方, 最狭幅4m, 5mの条件では, 開閉有りの区間の方がエラー率が高い傾向が見られる。また, 図5(C)および(D)のグラフが示すように, 駐車位置を左右で分けた時のエラー率では, 走行方向に対して駐車位置が右に位置する場合のエラー率が高いことがわかる。

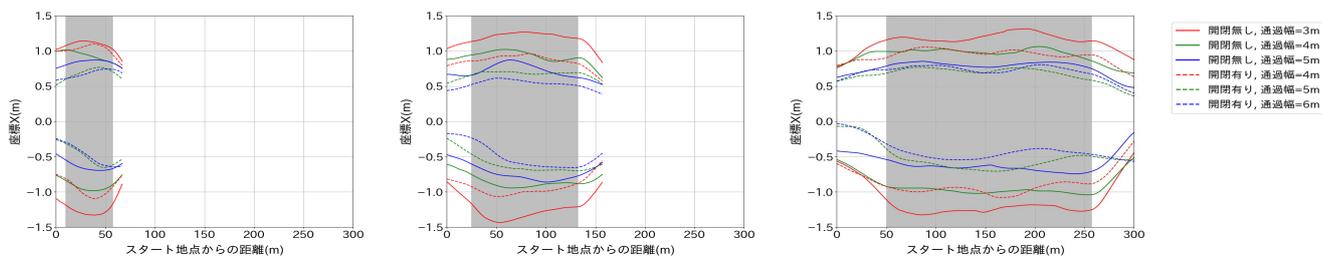


図 7: 路上駐車区間に入る前に予め車体を端に寄せているグループ

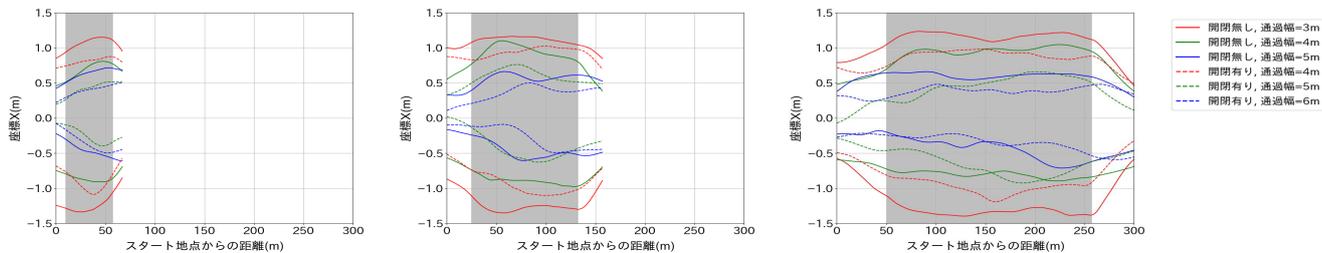


図 8: 路上駐車区間に入った後に車体を端に寄せようとしたグループ

4.2 平均通過時間と区間ごとの平均速度の変化

道路条件ごとの実験協力者の平均通過時間を表 1 に示す。区間長が等しく、最狭幅が異なる条件を比較すると、最狭幅が狭いほど路上駐車区間を通過する際にかかる時間は長くなる。また、開閉がない区間の方が平均通過時間が長くなっている。

図 6 は横軸に区間ごとのスタート地点からの距離、縦軸に全実験協力者のその区間での平均速度をとったグラフである。グラフの凡例はその時の通過幅と、ドア開閉の有無を表している。実線は開閉しない車両の平均速度を表しており、点線で示されているグラフは開閉する車両の平均速度を表している。また、背景色が灰色の部分、路上駐車区間を表している。図 6 より、全ての区間長において、通過幅が大きくなるにつれて、平均速度が速くなるのがわかる。次に、それぞれの開閉の有無での比較を見ると、区間長が 40m と 100m の時の最狭幅では、平均速度は開閉有り条件の方が速い。また、どの区間長においても、開閉有りの区間では、開閉する車両が位置する路上駐車区間の中央付近で速度が落ちている。特に、通過幅が狭くなるにつれて速度の低下がより顕著に現れている。

5. 考 察

5.1 路上駐車の際のドア開閉が認知的狭さに及ぼす影響

図 5 (A) および (C) のグラフが示すように、最狭幅ごとのエラー率を分析した結果では、通過幅が狭まるほどエラー率が上がる傾向が見られた。特に、通過幅 3m では他の通過幅と比較してエラー率が高かった。このことから、狭い通過幅が運転者に認知的狭さを感じさせ、実際の道路幅よりも狭く見えることで運転操作のミスをしたと考えられる。

一方、最狭幅ごとに開閉の有無で分けたエラー率の図 5 (A) のグラフから、最狭幅 4m および 5m の条件において、ドア開閉がある場合にエラー率が上がる傾向が見られた。このことから、ドアが開閉するという意識が認知的狭さに影響を与え、

運転操作のミスをする可能性が上がるのが考えられる。また、図 5 (C) および (D) のグラフが示す路上駐車位置によるエラー率の結果をみると、路上駐車位置が右側にある場合、縁石やガードレールにぶつかるエラー率が左側に比べて高くなるのが確認された。これは、今回の実験では運転席が右側に設定されていたため、右側に並んでいる路上駐車との距離感が測りやすかった一方で、縁石やガードレールが設置された左側は助手席によって視界が遮られ、実際の道路幅に対する認知的狭さが強調されたために発生した現象であると考えられる。

次に、各条件ごとの平均通過時間および速度の変化を分析した結果、通過幅が狭いほど路上駐車区間を通過する際の平均通過時間が長くなり、エラー率が増加する傾向が見られた。また、最狭幅の平均通過時間を比較した場合、ドア開閉がある場合の方が平均通過時間が長く、運転者がより慎重に車両を操作していることが示された。特に、開閉の有無による通過速度の違いは、開閉がある条件下で車両付近の速度が大幅に低下することを示しており、これは運転者がドアの開閉による認知的狭さを感じたことによる結果であると考えられる。

5.2 各組み合わせにおける左右ごとの走行経路

図 7 および図 8 は、実験協力者ごとに走行経路を個別に分析し、特に特徴が顕著だった 2 グループを定義したグラフである。図 7 を路上駐車区間に入る前に予め車体を端に寄せて走行しているグループ (8 人)、図 8 を路上駐車区間に入った後に車体を端に寄せるグループ (7 人) とした。また、座標 X (m) はベース幅 5m での車体の位置を示しており、道路の中央に位置する時、座標 X (m) は 0 になる。座標 X (m) の値が 0 よりも大きいグラフは走行方向に対して左側に路上駐車が配置された際の走行経路を示し、座標 X (m) の値が 0 よりも小さいグラフは右側に路上駐車が配置された際の走行経路を示している。まず、いずれのグラフにおいても、最狭幅が狭いほど路上駐車のない側に車体が寄る傾向が見られる。左右で比較すると、座標

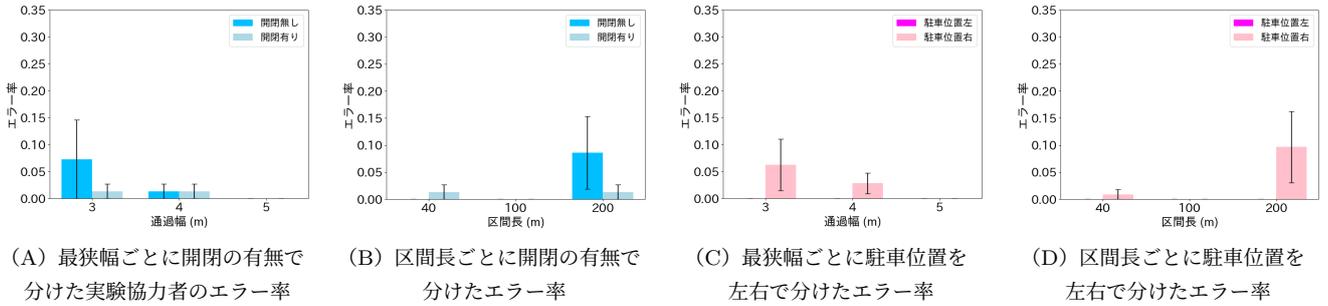


図 9: 路上駐車区間に入る前に予め車体を端に寄せているグループのエラー率

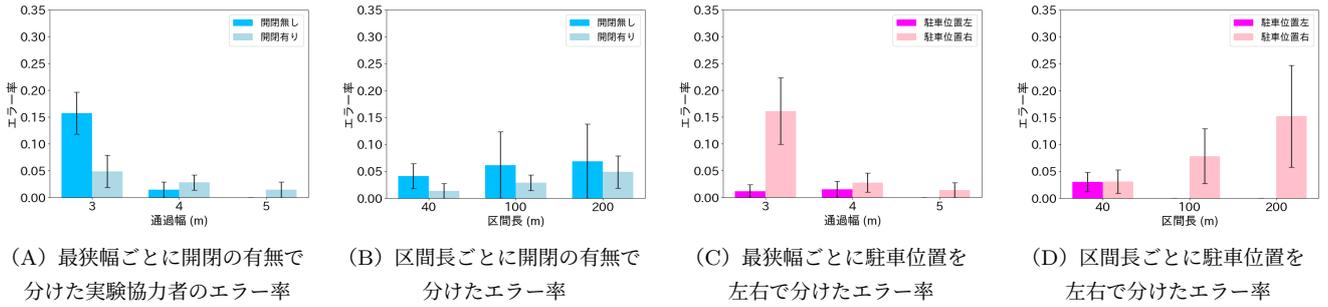


図 10: 路上駐車区間に入った後に車体を端に寄せようとしたグループのエラー率

X (m) の値が 0 よりも小さく右側に路上駐車がある走行経路の場合、路上駐車区間からの始まりの座標の変化が急で、外側に大きく避ける傾向があった。さらに、エラー率を比較すると、右側に路上駐車がある場合のほうが、ガードレールや縁石に衝突するエラー率が高かった (図 5)。これは、実験協力者が右ハンドルで運転しているため右側は窓が近く距離感を測りやすいが、左側は助手席があることで視野が狭まり、左側に対する認識が難しくなることが一因と考えられる。

5.3 特徴別の走行経路グループとエラー率の比較

路上駐車区間に入る前に予め車体を端に寄せて走行しているグループ (図 7) と、路上駐車区間に入ってから車体を寄せるグループ (図 8) を比較すると、前者のグループの方がエラー率が低く、後者ではエラー率が高くなった。また、図 8 のグループでは、路上駐車区間に入った後も走行位置が安定せず、左右の振れ幅が大きい傾向が見られた。同じグループ内でエラー率を比較したところ、図 8 のグループのほうが、エラー率が高い傾向にあった (図 10)。グループ間のエラー率が異なる原因として、路上駐車区間に入る際の車体位置に起因している可能性が高いと考えられる。予め車体を外側に寄せて危険を予測している場合、エラー率は低下している (図 9)。これらの結果から、走行経路の位置とエラー率には関連があり、危険を予測して事前に車体を端に寄せて走行することで、エラー率の低減が期待できると考えられる。また、駐車位置が右側にある場合は、左側の助手席位置による死角が生じ、エラー率が高まり、運転難易度は駐車位置の左右によって異なる可能性が示された。

6. 運転難易度のモデル化

6.1 モデル適合度

図 1 に例示したのは経路が 2 つ連結した場合だが、本実験で

は路上駐車区間の前後に幅が広い経路があり、3 つの経路が連結していると見なすことができる。そのため、ステアリング難易度に路上駐車区間の後にある 25 m 区間の難易度 L_1/W_1 も加わることに注意しつつ、モデル #1.1 から #4.1 を改良し、本実験において幅が広い区間と狭い区間で同一の係数を用いるモデル (#1.2) と異なる係数を用いるモデル (#2.2)、さらにクロッシング動作を考慮するモデル (#3.2 と #4.2) を以下のよう

$$\text{モデル\#1.2: } MT = a + b \left(2 \times \frac{L_1}{W_1} + \frac{L_2}{W_2} \right) \quad (6)$$

$$\text{モデル\#2.2: } MT = a + b \times 2 \times \frac{L_1}{W_1} + c \frac{L_2}{W_2} \quad (7)$$

モデル #3.2:

$$MT = a + b \left(\frac{L_1 - nW_1}{W_1} + \frac{L_2}{W_2} + \frac{L_1}{W_1} \right) + c \log_2 \left(\frac{nW_1}{W_2} + 1 \right) \quad (8)$$

モデル #4.2:

$$MT = a + b \left(\frac{L_1 - nW_1}{W_1} + \frac{L_1}{W_1} \right) + c \frac{L_2}{W_2} + d \log_2 \left(\frac{nW_1}{W_2} + 1 \right) \quad (9)$$

ここで、 L_1 は 25 m、 L_2 は区間長から前後の 25 m ずつを引いた長さである。また W_1 は路上駐車区間の前後にある幅が広い区間の値である 5 m を適用し、 W_2 にはドアの開閉を考慮した残りの幅 (表 1 の最狭幅) を適用する。すなわち、ドアの開閉がない場合には $W_2 = W_s$ であり、開閉がある場合は最終的に利用できる幅である $W_2 = W_s - 1$ を適用した。

表 2 の上 4 行に、モデル #1.2 から #4.2 までの適合度および各係数の値を示す。モデルの適合度の指標として、 R^2 に加え

表 2: モデル適合度と係数

モデル	R^2	補正 R^2	AIC	係数
#1.2	0.91865	0.90781	35.746	$a = 1.5750, b = 0.45210$
#2.2	0.91865	0.90122	37.746	$a = -2.9862, b = 0.90830, c = 0.45210$
#3.2	0.94313	0.92564	33.301	$a = -4.4523, b = 0.43750, c = 6613.3, n = 0.000500$
#4.2	0.94313	0.91944	35.301	$a = -1.1891, b = 0.11100, c = 0.43750, d = 3007.4, n = 0.00110$
#1.3	0.96356	0.95575	23.289	$a = 0.76530, b = 0.52730, c = 1.3845$
#2.3	0.96356	0.95235	25.289	$a = 0.95760, b = 0.50810, d = 0.52730, c = 1.3845$
#3.3	0.99781	0.99690	-23.343	$a = -6.0548, b = 0.48910, c = 0.92620, d = 81083, n = 0.000100$
#4.3	0.99781	0.99662	-21.328	$a = -1.1834, b = 0.000900, c = 0.92630, d = 0.48910, e = 1881.1, n = 0.00230$

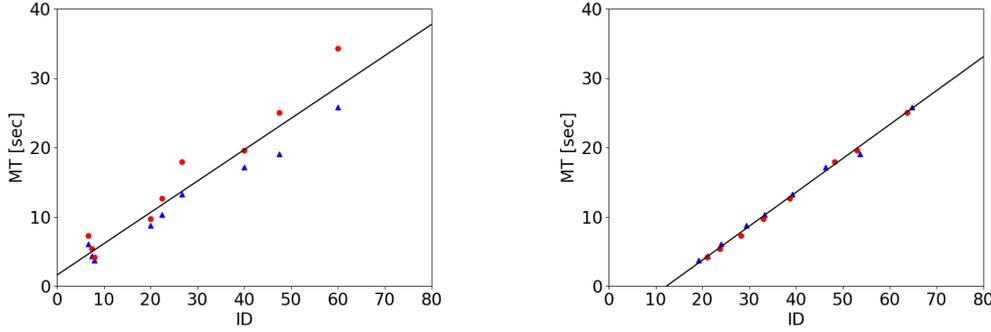


図 11: ID と MT の回帰直線. 左: ベースラインのモデル#1.1. 右: 最も適合度の高かったモデル#3.3.
赤色の丸: ドアの開閉なし条件 ($open = 0$). 青色の三角形: ドアの開閉あり条件 ($open = 1$).

て、フリーパラメータの個数を考慮した補正 R^2 も表 2 に記載した。モデル#3.2 が最も補正 R^2 が高く、それよりもフリーパラメータ数を増やしたモデル#4.2 は過剰なフィッティングをしていることがわかる。また、モデルの複雑さと適合度のバランスを考慮した指標 AIC (値が小さいほど良いモデルで、10 以上の差があれば有意といえる) を見ても、モデル#3.2 が最良であることがわかる。しかし、上記 4 つのモデルは、5.1 節で議論したようなドアの開閉の有無による影響を考慮していない。ここでは、狭い方の経路幅 W_2 として、ドアが開ききった場合の猶予である $W_2 - 1$ を適用したが、実際には開いたドアの影響が路上駐車区間全体には及んでいなかった。そこで、ドアの開閉がある条件を $open = 1$ 、ない条件を $open = 0$ として、路上駐車区間の経路幅 W_2 を広げるように $W_2 + c \times open$ に調整する。

$$\text{モデル\#1.3: } MT = a + b \left(2 \times \frac{L_1}{W_1} + \frac{L_2}{W_2 + c \times open} \right) \quad (10)$$

$$\text{モデル\#2.3: } MT = a + b \times 2 \times \frac{L_1}{W_1} + d \frac{L_2}{W_2 + c \times open} \quad (11)$$

モデル#3.3:

$$MT = a + b \left(\frac{L_1 - nW_1}{W_1} + \frac{L_2}{W_2 + c \times open} + \frac{L_1}{W_1} \right) + d \log_2 \left(\frac{nW_1}{W_2 + c \times open} + 1 \right) \quad (12)$$

モデル#4.3:

$$MT = a + b \left(\frac{L_1 - nW_1}{W_1} + \frac{L_1}{W_1} \right) + d \frac{L_2}{W_2 + c \times open} + e \log_2 \left(\frac{nW_1}{W_2 + c \times open} + 1 \right) \quad (13)$$

上記 4 つのモデルの適合度を表 2 の下 4 行に示す。モデル#1.2 から#4.2 に比べ、ドアの開閉を考慮したモデル#1.3 から#4.3 の方が補正 R^2 、 AIC ともに適合度が高いことがわかる。最も適合度が高かったのはモデル#3.3 であり、補正 $R^2 = 0.99690$ 、 $AIC = -23.343$ であった。なお、クロッシング難易度の係数が非常に大きく、たとえばモデル#3.3 では $d = 81083$ だが、これは n の値が小さいこととバランスをとってモデル適合度を最大化する非線形回帰の特性であるため問題ない。実際に、モデル#3 (開閉考慮) において係数を含めた部分 ($d \log_2 \left(\frac{nW_1}{W_2 + c \times open} + 1 \right)$) の数値は 5.4 から 10.6 秒であり、 MT に影響する秒数として妥当な範囲に収まっている。

ベースラインのモデル#1.2 と、最良のモデル#3.3 の散布図と回帰直線を図 11 に示す。横軸の ID の値は、各モデルの係数 b 以降の値をすべて b で括った値であり、いずれも $MT = a + bID$ の形になるように揃えたものである。図 11 左によると、タスク難易度が高くなるほど 1 本の回帰直線ではうまく MT を推定できず、回帰直線がデータ点のない部分を通っていることがわかる。一方で図 11 右では、タスク難易度の値が適切に調整され、ドアの開閉に関わらず高精度に MT を推定できている。

6.2 モデル適合度の比較

ドアの開閉を考慮しないモデル#1.2 から#4.2 について、補正 R^2 の値は 0.90 から 0.93 の間であり、 MT を高精度に推定できることがわかる。 AIC は 33 から 38 の範囲であり、これらのモデルの間では有意差がなかった。この場合は、フリーパラメータの個数が少ないほうがオーバーフィッティングの危険が小さくなるため、ベースラインのモデル#1.2 を採用するのが良いといえる。

ドアの開閉を考慮するモデル#1.3から#4.3を見ると、考慮しないモデル群と比較して AIC が 10 以上減少しており、有意にモデル適合度が向上していた。よってドアの開閉を考慮したモデルの方が、ドライバーの挙動を適切に捉えられているといえる。特にクロッシング動作を考慮したモデル#3.3と#4.3の補正 R^2 が 0.99 を超えており、また AIC の値がそれぞれ -23.343 と -21.328 だった。これはクロッシングを考慮しないモデル#1.3と#1.3の AIC (23から26) よりも有意に高い適合度であるため、道幅の広い区間から路上駐車区間に向けて減速する挙動も考慮した方が良いことがわかる。

最後に、モデル#3.3と#4.3を比較すると、 AIC の差が2程度で有意差がなかったため、どちらのモデルを採用しても MT の推定精度は大きく変わらない。そのため、フリーパラメータ数の少ないモデル#3.3を採用すべきである。また、モデル#3.3はすでに補正 R^2 が 0.996 を超えており、これ以上にフリーパラメータ数を増やしてもモデル適合度を向上させる余地がほぼ残されていないことから、モデル#4.3よりも#3.3を用いるのが良いといえる。

7. おわりに

本研究では、運転難易度のモデル化を行うために、路上駐車のドアの開閉が運転に及ぼす影響について調査を行った。実験は路上駐車のドア開閉の有無条件と、路上駐車の区間長、通過幅、左右位置の組み合わせからなる18種類のコースで実施し、エラー率、区間内での平均通過時間やその地点での平均速度、走行経路について分析を行った。実験の結果、最狭幅が等しくなる条件では、ドア開閉有りの区間の方がエラー率が高く、平均通過時間が長くなる傾向が見られた。また、路上駐車の位置において、路上駐車が右側にある場合、全ての区間でエラー率が高くなった。走行経路におけるグループ間の比較では、路上駐車区間に入る前から予め車体を路上駐車が無い側に寄せておくことで、エラー率を低減できる可能性が示された。

また、本実験では、ステアリングの法則に基づいた Yamanaka らの長さや幅が異なる2つの直線経路の中央を揃えて連結した経路のモデルを改良して構築した、ドアの開閉が通過幅に与える影響を考慮したモデルを用いて、道路条件から算出した難易度 (ID) によって平均通過時間 (MT) を推定できるか検証した。その結果、モデル#1.2から#4.2、#1.3から#4.3までの適合度を比較した時、モデル#1.3から#4.3で高い適合度が確認され、タスク難易度に基づく MT の推定が十分な精度で可能であることが分かった。特に、ドア開閉の有無を反映したモデル#3.3が最も適合度が高く、補正 R^2 や AIC の値において優れていた。ドアが開いた際の狭い通過幅が認知的負荷を増加させることが示唆されたことから、クロッシング動作も MT に影響を与える重要な要素であると考えられる。

今後の展望として、運転難易度のさらなるモデル化に向けて、コース条件の再設計を行う予定である。また、今回の実験で用いたモデルでは、路上駐車区間の前後に幅が広い経路があるため、3つの経路が連結しているとした条件に基づいていたが、今後は異なる連結方法についても検討する予定である。これに

より、複雑な走行経路や異なる道路幅に対するモデルの適応性を検証し、運転難易度のモデルのさらなる精度向上を図る。

文 献

- [1] Y. Nakagawa, S. Matsuda, T. Takaku, S. Nakamura, T. Komatsu, T. Torii, R. Sumikawa, and H. Takao, "A Study on the Effects of Intrinsic Motivation from Self-determination on Driving Skill," *HCI International 2023*, pp.73–81, 2023.
- [2] N. Distefano and S. Leonardi, "Evaluation of the Benefits of Traffic Calming on Vehicle Speed Reduction," *Civil Engineering and Architecture*, vol.7, pp.200–214, 07 2019.
- [3] 李相光, 樗木武, and 辰巳浩, "都心部区画道路の路上駐車に対するドライバー意識とそのために必要な車道幅員に関する研究," 第29回日本都市計画学会学術研究論文集, no.29, pp.277–282, 1994.
- [4] S. Yamanaka and H. Miyashita, "Modeling Pen Steering Performance in a Single Constant-width Curved Path," *Proceedings of the 2019 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, ISS '19*, New York, NY, USA, p.65–76, Association for Computing Machinery, 2019.
- [5] S. Zhai, J. Accot, and R. Woltjer, "Human action laws in electronic virtual worlds: an empirical study of path steering performance in VR," *Presence: Teleoper. Virtual Environ.*, vol.13, no.2, p.113–127, April 2004.
- [6] Y. Funazaki, N. Seto, K. Ninomiya, K. Hikawa, S. Nakamura, and S. Yamanaka, "Driving Experiment System Using HMDs to Measure Drivers' Proficiency and Difficulty of Various Road Conditions," *HCI in Mobility, Transport, and Automotive Systems*, Cham, pp.247–257, Springer International Publishing, 2022.
- [7] S. Yamanaka, T. Takaku, Y. Funazaki, N. Seto, and S. Nakamura, "Evaluating the Applicability of GUI-Based Steering Laws to VR Car Driving: A Case of Curved Constrained Paths," *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, vol.7, no.ISS, Nov. 2023.
- [8] M. Fukui, T. Takaku, S. Nakamura, and S. Yamanaka, "Evaluating the Applicability of GUI-based Steering Laws to Virtual Reality Car Driving: A Case of Width-Changing Paths," *Proceedings of the 35th Australian Computer-Human Interaction Conference, OzCHI '23*, New York, NY, USA, p.316–323, Association for Computing Machinery, 2024.
- [9] 飯田空, 福井雅弘, 高久拓海, 中村聡史, and 山中祥太, "ドライビングシミュレーターにおける路上駐車による道路幅の変化が運転に及ぼす影響," *信学技報, MVE2023-47*, vol.123, pp.29–34, 2024.
- [10] J. Accot and S. Zhai, "Beyond Fitts' law: models for trajectory-based HCI tasks," *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '97*, p.295–302, 1997.
- [11] S. Yamanaka, W. Stuerzlinger, and H. Miyashita, "Steering Through Sequential Linear [p],"
- [12] T.C. Ojsteršek and D. Topolšek, "Influence of drivers' visual and cognitive attention on their perception of changes in the traffic environment," *European Transport Research Review*, vol.11, p.45, 2019.
- [13] T. Dukic, C. Ahlstrom, C. Patten, C. Kettwich, and K. Kircher, "Effects of electronic billboards on driver distraction," *Traffic Injury Prevention*, vol.14, no.5, pp.469–476, 2013.