

ドライビングシミュレータにおける道路幅の変化が運転に及ぼす影響

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

[‡] 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: [†] ev200587@meiji.ac.jp

あらまし 適切な車のナビゲーションのためには、道路形状に応じた運転の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、カーブの角度や半径に着目した運転の難易度をモデル化するための調査を行ってきた。ここで、車線減少や幅員減少といったように道路幅が変化する経路の運転は容易ではない。そこで本研究では、ドライビングシミュレータ上で道路幅が変化する経路を設計して実験を行い、運転の難易度に及ぼす影響について調査を行った。実験の結果、道路幅の変化が運転の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測できる可能性を明らかにした。

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

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、経路推薦や到着時間予測など様々な形で自動車ドライバへの支援が行われている。ここでドライバによって得意とする道や苦手とする道が大きく異なり、中川ら[1]の運転免許保有者 2,000 人を対象としたアンケート調査によると、幅の狭い道路や合流などの特定の道路条件を苦手とする初心者が多かった。このようなドライバが安全かつ快適に運転できるよう支援するには、運転にかかる時間が最も短い経路より、運転しやすい経路を推薦することが望ましい。そのようなドライバ個人の選好を反映した経路推薦システムの実現には、この道路条件が運転に及ぼす影響を明らかにし、難易度を数値化する必要がある。道路条件による難易度の数値化には、繰り返し運転することが必要であるが、ドライバの特性も考慮しつつ様々な条件を網羅するのは現実的でない。

ここで、GUIにおける操作難易度のモデル化に関する膨大な知見を、運転難易度の数値化に対して応用することが考えられる。Zhai ら[2]は、ステアリングの法則を仮想現実空間でも適応できることを明らかにしている。また我々もこれまで、複数の地理的条件を3次元空間内で繰り返し再現可能なドライビングシミュレータを実装[3][4]し、カーブ走行時のカーブ角度や半径、道路幅の運転難易度への影響を調査する実験を行い、ステアリングの法則と同様にカーブ半径が大きいほど運転難易度が上がることを明らかにした。一方、道路幅が広いほど運転難易度が下がるという仮説は支持されなかった。これは、設定した道路幅が現実世界で一般的な車線幅よりはるかに大きかったためだと考えられる。

運転難易度に関連した道路形状としては、先述した道路幅の狭さに加え、合流や幅員減少といった道路の幅の変化[5][6]などが知られている。そこで本研究では、

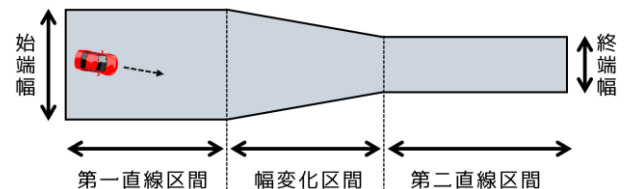


図1 コース全体のイメージ図

運転難易度のモデル化のため、経路における道路幅の変化が運転の難易度に及ぼす影響を調査する。具体的には図1のように直線区間、道路幅が変化する区間、直線区間の順に構成されるコースを走行する実験を行う。また、ステアリングの法則の実験結果がドライビングシミュレータ上で道路幅が変化する経路の実験に適用できるかを検証する。

2. 関連研究

2.1. ステアリングの法則

Accot ら[7]は、全長 A 、幅 W の経路を通過する時間 (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、この数式に含まれる a 、 b はフリーパラメータと呼ばれる回帰分析で決定される定数である。

$$MT = a + b \frac{A}{W}$$

ここで、 A/W の値はタスクの難易度 (ID) を表しており、 ID が大きいほど MT も大きくなる。このことから、移動距離 A が長い場合や幅 W が小さい場合では、その操作が難しく時間がかかりやすいことを示している。また、ステアリングの法則は単純な直線や円形の経路を通過するタスクだけではなく、タッチスクリーンを使用した場合[8]や VR 空間での自動車の運転[2]などにも適用できることが知られている。

2.2. 幅が変化する経路におけるステアリングの法則

Accot ら[7]のモデルによると、下記のように幅が狭

まる場合、幅変化区間を通過するのにかかる時間 MT_{NT} は幅変化区間を通過する難易度 ID_{NT} を用いて

$$MT_{NT} = a + b \cdot ID_{NT}$$

と表される。また、この難易度 ID_{NT} は始端幅 W_S と終端幅 W_E 、幅変化区間長 $Length$ を用いて

$$ID_{NT} = \frac{Length}{W_S - W_E} \ln \frac{W_E}{W_S}$$

と表される。

さらに Yamanaka ら[9]は、幅が広がる経路を通過するのにかかる時間 MT_{WT} も、下記のように Accot らと同様のモデルで表せることを示した。

$$MT_{WT} = a + b \cdot ID_{WT}, \quad ID_{WT} = \frac{Length}{W_S - W_E} \ln \frac{W_E}{W_S}$$

ただし、幅が狭まる場合の方が広がる場合より難易度が上がり通過時間が増加する。そのため ID の値は経路の幅が狭まるか広がるかという要素によって異なる。Yamanaka らはこの点に着目し、Accot らのモデルに改良を加えた。具体的には、ある幅が変化する経路を幅が狭まる方向に通過する難易度と、その逆の広がる方向に通過する難易度との差 $ID_{Gap(k)}$ は

$$ID_{Gap(k)} = \frac{Length(W_S - W_E)}{kW_S W_E}$$

で求められ、 ID_{NT} を以下の式で補正するものである。

$$ID_{NT} = ID_{WT} + ID_{Gap(k)}$$

なお、 k は実験ごとに定められる定数である。

2.3. 幅が変化する道路の影響

実際の道路において、通行車両の速度抑制を目的として、狭さくと呼ばれる車線幅員を一定区間狭くする工夫がなされている。この狭さくが運転速度に与える効果を調べる研究はいくつか行われている。

鈴木ら[5]は狭さくの設置前後における自動車の通過速度の変化について7箇所で調査を行い、道路狭さくの設置に速度抑制効果があること、9割程度の自動車利用者が車両の速度を下げるよう意識したことを明らかにした。また伊藤ら[6]は、15箇所で速度抑制効果が大きい狭さくの構造を調査し、狭さくの前後で速度が下がる傾向が見られること、狭さく幅員が狭く区間が長いほど速度が低くなることを明らかにした。

しかし、これらの研究で扱われた道路条件は少なく、道路幅の変化量に着目した実験設計ではなかったため、道路条件ごとの運転難易度のモデル化に利用するには不十分である。

3. ドライビング実験

3.1. 実験概要

本研究では、ドライビングシミュレータを用いて複数の道路幅や経路長を持つコースにおいて、速度や幅変化区間を通過するのにかかった時間に着目して実験



図2 システムを使用している様子



図3 コース生成システムの実行画面

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(図2)は、これまで我々が構築してきたシステム[3][4]を改良し、図1に記載されている始端幅、幅変化区間の長さ(以下、幅変化区間長と呼ぶ)、終端幅などのパラメータを任意の数値に設定したコースを生成できるようにした(図3)。

なお、ドライビングシミュレータには HMD として Oculus Quest2、ステアリングコントローラーは 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

我々のこれまでの研究[4]から、道路幅が広すぎる場合は幅が運転難易度に影響を与えにくいことがわかっている。そのため、始端幅及び終端幅には、2.5m、5m、7m から異なるもの2つを組とする6種類を採用した。また、幅変化区間長は20m、50m、100mとした。

ここで、今回のコースの形状ではスタート時に車が正面を向いているとハンドルを操作せずにアクセルをベタ踏みして走行できてしまうため実験にならない。そのため、正面から右に一度ずれた状態でスタートし、全ての実験協力者が第一直線区間で必ずハンドルを操作しなければならないようにした。

スタート直後はハンドルやアクセルの操作が不安定になるため、第一直線区間を 100m とした。また、幅変化区間の終端をゴールにすると、区間の通過ではなくゴールラインへの接触自体が目的になる恐れがあり、極端に急な角度でゴールするといった不適切な運転が行われる可能性があった。その対策として、幅変化区間の後に 100m の第二直線区間を置き、第二直線区間の終わりにゴールラインを置くこととした。

さらに、これまでの研究では口頭で特定の速度を維持するよう伝えても実験者により走行速度が大きく異なる問題が見られた。そのため、初速度を 60km/h に設定し、実験者間での速度の統制を図った。

3.3. 実験手順

実験慣れによる影響を小さくするため、幅の組み合わせ 6 種類と経路長 3 種類を掛け合わせた合計 18 種類のコースがランダムに提示されるのを 1 セットとし、実験協力者には合計で 5 セット (90 試行) 行ってもらった。図 4 に各コースの形状を示す。

各試行では、まずカウントダウンが始まる (図 5)。その際、実験協力者が運転の参考にできるように、コースの情報を文字付きのイラストで提示した。また、カウントダウンが 0 になると計測を開始し、車の前面がゴール地点に到達すると計測を終了した。なお、コースの左右の縁石に乗り上げるとエラーとなるようにし、エラーを起こした試行はセットの最後に成功するまで繰り返し測定を行うものとした。

実験協力者には、縁石に乗り上げないように注意すること、極端に遅い運転や最高速度を極めるような運転ではなく、エラーを起こさない範囲でなるべく速度を出すことを事前に伝えて実験を行った。なお休憩については、HMD を用いた VR の見え方に個人差があることを考え、各セット終了時などに実験協力者に体調や集中できているかを確認し、好きなタイミングで休憩を取れるようにした。実験は、練習走行から測定終了まで 1 名あたり 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もつ大学生及び大学院生 20 名 (男性 12 名, 女性 8 名) であった。外れ値となる実験協力者はいなかった。本章では始端幅, 終端幅, 幅変化区間長ごとの幅変化区間内におけるエラー率や平均通過時間の結果を示す。

4.1. 各道路幅, 幅変化区間長におけるエラー率

本実験における全体のエラー数は、実験協力者 20 名の総試行 2,373 回のうち、573 回であった。その中で、幅変化区間中に起きたものは 82 回であった。

図 6 に始端幅及び終端幅の組ごとの実験協力者の平均エラー率, 図 7 に幅変化区間長ごとの、幅変化区間

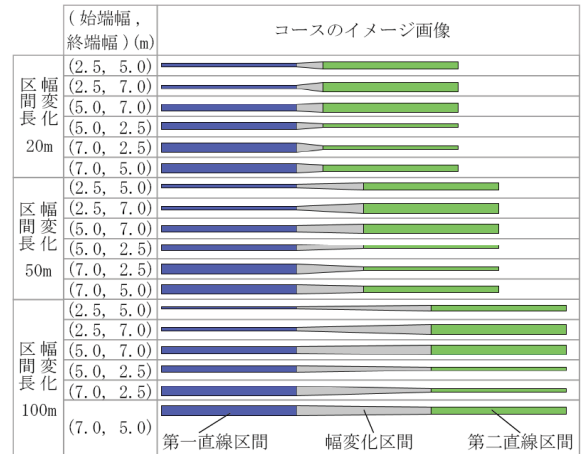


図 4 実験で使用した 18 種類のコース形状

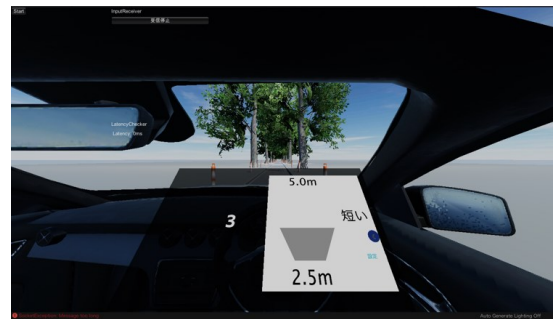


図 5 カウントダウン時のシミュレータの様子

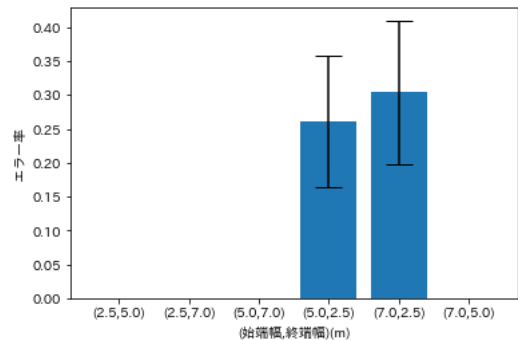


図 6 始端幅と終端幅の組ごとのエラー率

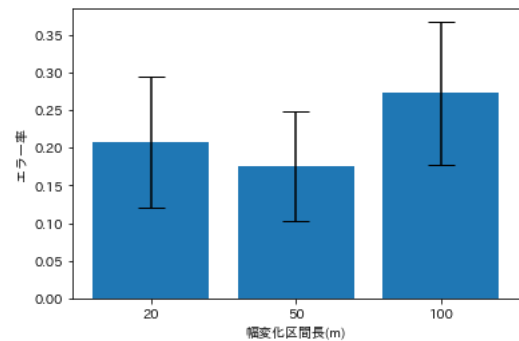


図 7 幅変化区間長ごとのエラー率

中の平均エラー率を示す。なお、エラーバーは 95%信頼区間を表している。

グラフから、エラー率は広がる条件すべてにおいて 0 であったこと、幅変化区間長 100m、始端幅 7.0m と終端幅 2.5m の組の時にそれぞれ最も高かったことが分かる。また、幅変化区間長が 50m 以下のとき、100m の時と比べかなり低かった。なお、終端幅 2.5m では、始端幅が 5.0m のときより 7.0m のときの方が高いエラー率であった。

4.2. 各道路幅、幅変化区間長における通過時間

表 1 に道路条件ごとの幅変化区間を通過するためにかかった時間の平均を示す。同じ形状の経路を逆方向に通過している 2 条件を比較すると、どの条件においても幅が狭まる条件の方が広がる条件よりも通過時間が長かった。なお、幅が 5.0m 以上の時、両者における通過時間の差は小さかった。例えば経路長 100m の条件において、始端幅及び終端幅が 2.5m と 7.0m の組では 0.50 秒差がある一方で、5.0m と 7.0m の組では 0.02 秒差しかなく、幅の広狭の影響は 5.0m 以上の幅の経路では小さいと考えられる。

5. 考察

5.1. 道路幅の変化が運転の難易度に及ぼす影響

実験結果より、道路幅が常に 5.0m 以上のとき、他の条件と比べ平均通過時間が短いこと、同じ形状の経路を逆方向に通過する 2 条件において、平均通過時間の差が非常に小さいことから、運転難易度は幅の変化によらずかなり低くなると考えられる。

一方で、始端幅が 2.5m のとき、終端幅が広いほど平均通過時間が短かったことから、運転難易度は道路幅の増加量が多いほど低下すると考えられる。また、終端幅が 2.5m で幅変化区間長が 20m の場合、始端幅が広いほどエラー率と平均通過時間が増加した。幅変化区間長が 50m 以上の場合でも、始端幅が広いほどエラー率が高くなったが、平均通過時間は短くなった。これは、始端幅が広いほど最初の加速の度合いが大きくなるためだと考えられる。

以上より始端幅と終端幅がともに 5.0m 以上である

表 1 コース条件ごとの幅変化区間の平均通過時間

(始端幅, 終端幅)(m)	平均通過時間(s)		
	区間長 20m	区間長 50m	区間長 100m
(2.5, 5.0)	1.09	2.71	5.12
(5.0, 2.5)	1.15	2.98	5.64
(2.5, 7.0)	1.08	2.66	4.95
(7.0, 2.5)	1.20	2.83	5.45
(5.0, 7.0)	0.77	2.00	3.93
(7.0, 5.0)	0.80	2.04	3.95

とき、運転難易度は幅の変化による影響を受けにくいと言える。また幅が 5.0m 未満になる区間があるとき、例外的に通過時間が短くなる場合があるものの、運転難易度は基本的に幅が大きく広がるほど減少し、大きく狭まるほど増加すると考えられる。

5.2. 道路幅の変化がアクセル操作に及ぼす影響

図 8 は横軸にスタート地点からの距離、縦軸に全実験協力者のその地点を通過した時の平均アクセル量をとったグラフである。グラフの凡例は(始端幅, 終端幅)(m)の値を表しており、背景色が灰色の部分幅変化区間を表している。なお、図は左から順に幅変化区間長が 20m, 50m, 100m となっている。

図 8 より、アクセル操作量は、幅が常に 5.0m 以上において始めに一気に増加したのち、道路幅の増減にわずかに影響されていることがわかる。また終端幅が 2.5m のとき、序盤で始端幅の広さに応じてある程度加速したのちアクセルを弱め、幅変化区間付近で最小値をとり、下に凸の曲線のように推移することがわかる。さらに、幅変化区間長が長いほど低い値となる傾向がある。始端幅が 2.5m のとき操作量が序盤急激に増加し、幅変化区間に到達すると最大値に達する。この最大値及び序盤のアクセル増加量は、終端幅が広い方が大きい。

以上より、道路幅の変化がアクセルに与える影響は幅が常に 5.0m 以上であるとき限定的であるが、幅が 2.5m から広がる条件では幅の広がりが多いほど強くアクセルが踏まれること、幅が 2.5m に狭まる条件

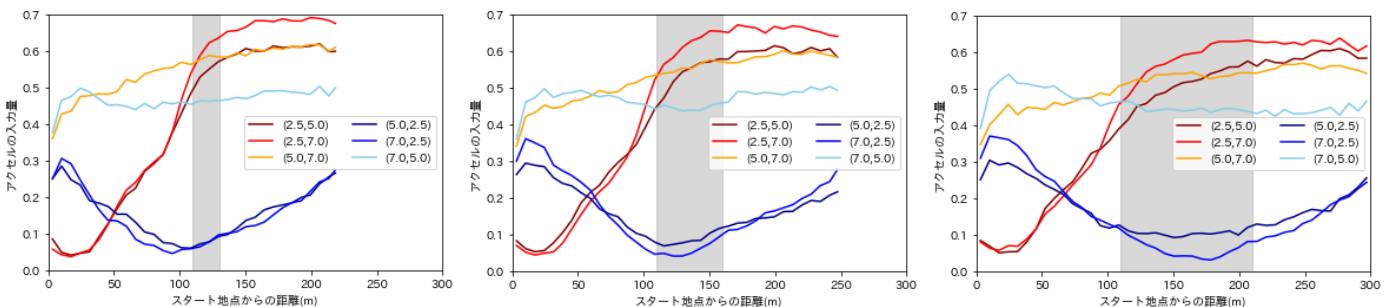


図 8 幅変化区間長が (左) 20m, (中) 50m, (右) 100m のときの幅変化区間におけるアクセル操作量

では、始端幅が広いほど強くアクセルを踏むが、その後幅変化区間長が長いほどアクセルが抑制されることがわかる。

6. ステアリングの法則による運転難易度のモデル化

実験結果をもとに、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道路幅が変化する経路の運転難易度の数値化に適用できるかを検証する。

6.1. モデルとの適合性

まず Accot らのモデルの適合性について、図 9 は幅が狭まる場合、図 10 は幅が広がる場合、図 11 は全ての場合において横軸に ID 、縦軸に MT を取ったグラフである。図中の青い点は狭まる場合、赤い点は広がる場合において実験から得られたデータであり、直線はデータを線形近似したものである。

本来、Accot らのモデルは幅が狭まる経路において使用することを想定して設計されている。しかし、3つのグラフの中では図 9 のグラフが $R^2 = 0.98$ と最も高い適合度を示したものの、図 10, 11 のグラフにおいても $R^2 \geq 0.96$ と高かったことから、広がる条件においても十分に高い精度で推測できることがわかった。

次に、Yamanaka らのモデルの適合性を検証する。このモデルで用いられる、幅が狭まる経路を通過するときとその逆方向に通過するときの難易度の差 $ID_{Gap(k)}$ の定数 k は実験ごとに定まるが、今回は $k = 9.15$ が最適であったため、この値を用いて ID_{NT} の補正を行った。

図 12 は補正後のデータをプロットしたグラフである。このグラフは図 11 のグラフよりも $adjR^2$ の値が大きく AIC の値が小さかったことから、全ての幅条件が対象である場合 Accot らのモデルよりも高い精度で MT を推測できることがわかった。しかし図 9 のグラフと比べ $adjR^2$ の値が小さく AIC の値が大きかったことから、幅が狭まる条件に絞ると Accot らのモデルの方が精度が高いと言える。

ここで、実験協力者らがエラーを避けるために常に最も狭い幅に合わせて運転し、幅の変化を考慮していなかった可能性も考えられる。その場合幅変化によらないモデルによる推測の方が適切であると考えられるため、幅変化区間を始端幅と終端幅のうち狭い方の幅と同じ大きさの一定の幅を持つ経路とみなし、

$$ID = \frac{Length}{\min(W_S, W_E)}$$

として計算してグラフ（図 13）を得た。結果として、このグラフは図 9～12 のグラフと比べ $adjR^2$ の値が小さく AIC の値が大きかった。そのため、運転難易度が幅変化により影響されていることが明らかとなった。

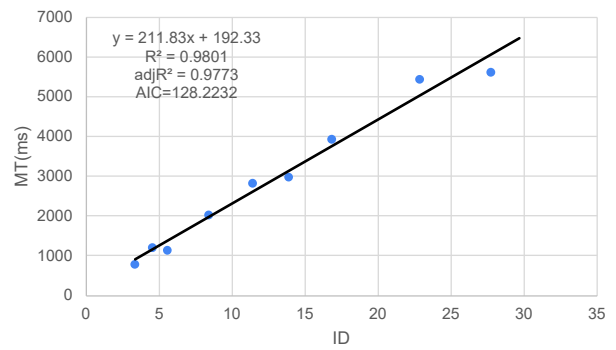


図 9 幅が狭まる条件における ID と MT の関係

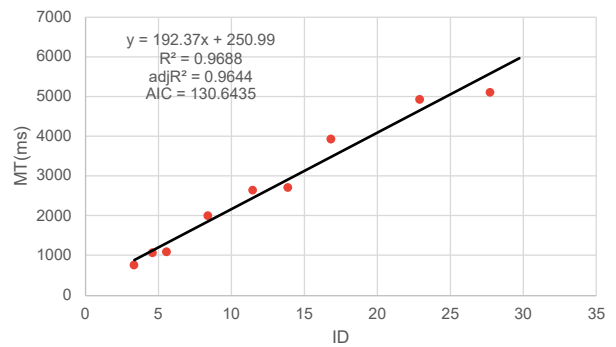


図 10 幅が広がる条件における ID と MT の関係

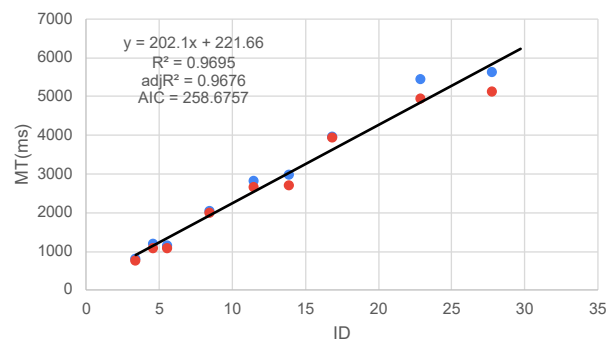


図 11 全ての条件における ID と MT の関係
(青：広がる条件，赤：狭まる条件)

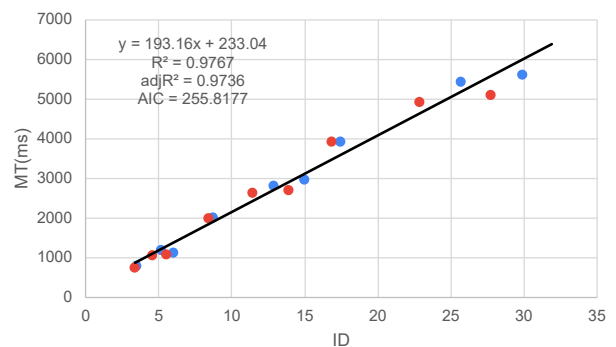


図 12 ID_{Gap} による補正後の ID と MT の関係

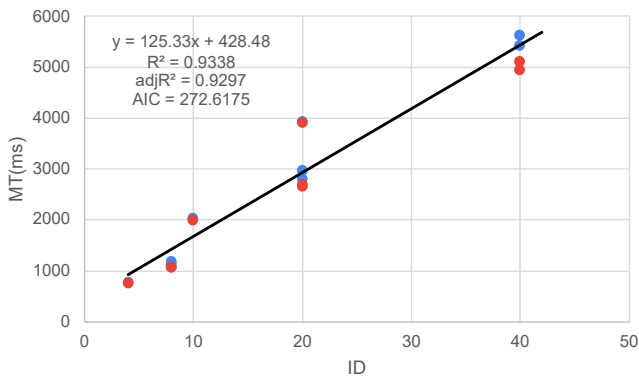


図 13 幅変化区間を一定幅経路とみなした時のIDとMTの関係（青：広がる条件，赤：狭まる条件）

6.2. 幅変化区間の通過時間の推測においてモデルを使用することの妥当性

Accot らと Yamanaka らのモデルを用いてIDからMTを推測することが可能かを検証した結果，両者とも十分に高い精度となることが明らかになった．また，幅が広がる条件と狭まる条件全てを対象にした場合，Yamanaka らのモデルの方が適合度が高いことが明らかになった．

今回の実験で採用した道路条件には，両モデルの精度に差が出やすい，広がる場合と狭まる場合でのMTの差が大きいものが少なかった．これは調査した条件のIDが小さすぎたためだと考えられる．具体的には，図11から分かるように，広がる場合と狭まる場合でMTの差が小さいID ≤ 20のタスクを多く採用したことが原因である．一方で，ID > 20においてはMTに差がある条件が多く見られるため，Yamanaka らのモデルはID > 20のデータに対して特に効果的であると考えられる．そこで今後は，道路幅や幅変化区間長などの設定を見直し，道路幅をより狭くしたり，幅変化区間長を長くしたりすることでID > 20となるタスクを設計し，検証していく予定である．

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，道路幅の変化が運転難易度に与える影響について調査を行った．実験は，異なる6通りの始端幅，終端幅の組と3種類の幅変化区間長からなるコースで実施し，エラー率，幅変化区間での平均通過時間，アクセルの操作量について分析や考察を行った．その結果，始端幅と終端幅がともに5.0m以上の条件における道路幅の変化が運転難易度に及ぼす影響は限定的であったが，それ以外の条件では幅の変化量が運転難易度の増減に影響することがわかった．また，ステアリングの法則

に基づいた Accot らのモデルと Yamanaka らのモデルを用いて，道路条件から算出したIDによってMTを推定できるかを検証した結果，Yamanaka らの手法の方が高い適合性を示したものの，両モデルとも十分な精度で推定が可能であることがわかった．

今後はコースの難易度を再設計したうえで，運転難易度のモデル化をさらに進める予定である．また，それ以外のコースにおいても実験を実施することでモデル化の可能性を検証し，幅広い条件に対応した経路推薦システムの実現を目指す．

文 献

- [1] 中川由貴，松田さゆり，船崎友稀奈，松山直人，中村聡史，小松孝徳，鳥居武史，澄川瑠一，高尾英行，“自己決定に基づく内発的動機づけが運転に及ぼす影響，”情報処理学会研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション（HCI），Vol. 2022-HCI-196, No.9, pp.1-8, January 2022.
- [2] Shumin Zhai, Johnny Accot and Rogier Woltjer, Human action laws in electronic virtual worlds: an empirical study of path steering performance in VR, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, vol. 13, no. 2, pp.113-127, April 2004.
- [3] Yukina Funazaki, Noboru Seto, Kota Ninomiya, Kazuyuki Hikawa, Satoshi Nakamura and Shota Yamanaka, Driving Experiment System Using HMDs to Measure Drivers' Proficiency and Difficulty of Various Road Conditions, HCI in Mobility, Transport, and Automotive Systems, " HCII 2022, Vol. LNCS 13335, pp.247-257, June 2022.
- [4] 高久拓海，船崎友稀奈，瀬戸徳，中村聡史，山中祥太，“ドライビングシミュレータにおけるカーブ走行時のカーブ半径と道路幅が運転に及ぼす影響の調査，”情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション（HCI），Vol. 2021-HCI-195, No.17, pp.1-8, November 2021.
- [5] 鈴木弘司，伊藤大貴，“道路狭さくの設定効果と交通安全対策に対する住民意識の変化に関する分析，”2019 土木学会論文集 D3, 75 号, no.5, pp.1189-1196, December 2019.
- [6] 伊藤克広，本田肇，高橋治，金子正洋，“生活道路における狭さくの速度抑制効果に関する研究，”2010 土木計画学研究・講演集, 41 号, no.114, June 2010.
- [7] Johnny Accot and Shumin Zhai, Performance evaluation of input devices in trajectory-based tasks: an application of the steering law, Proc. of CHI '99, pp.466-472, May 1999.
- [8] Johnny Accot and Shumin Zhai, Beyond Fitts' law: models for trajectory-based HCI tasks, Proc. of CHI '97, pp.295-302, March 1997.
- [9] Shota Yamanaka and Homei Miyashita, Modeling the Steering Time Difference between Narrowing and Widening Tunnels, Proceedings of CHI 2016, pp.1846-1856, March 2016.