

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モデル化

高久拓海¹ 船崎友稀奈¹ 瀬戸徳¹ 中村聡史¹ 山中祥太²

概要: 運転の習熟度はドライバーによって大きく異なる。ドライバーごとに得意とする道や苦手とする道に差があるため、運転しやすい経路を選択することが事故の予防や安全な運転を行う上で重要である。ここで、現在のナビゲーションシステムではドライバーの習熟度や心情に合わせた道提示は行われておらず、ドライバーの習熟度に合わせたナビゲーションシステムを実現するためには、運転の難易度に影響を及ぼす要因を分析し、運転の難易度をモデル化する必要がある。我々は過去の研究で、ドライビングシミュレータ上でカーブ半径や道路幅の異なるカーブを走行する実験を行い、運転の難易度に及ぼす影響について調査してきた。しかし、実験の参加人数に限りがあり詳細な分析や運転難易度のモデル化に限界があった。そこで、本研究では同じ条件で再度実験を行い、カーブ半径と道路幅が運転に及ぼす影響について調査を行った。実験の結果、道幅やカーブ半径が運転の難易度に影響を及ぼすことを明らかにし、その影響の度合はステアリングの法則に関するモデルを用いて予測できる可能性が示唆された。

キーワード: 運転, ドライビングシミュレータ, カーブ半径, 道路幅, 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、ルート推薦や到着時間予測など様々な形でドライバーへの支援が行われるようになった。ここで、運転の習熟度はドライバーによって大きく異なり、ドライバーごとに得意とする道や苦手とする道に差がある。中川ら[1]がYahoo!クラウドソーシングで実施した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、特に初心者ドライバー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ことが多かった。そのため、最短時間で目的地に到着するよりも、ドライバー個人の運転しやすい経路選択をすることが事故の予防や安全な運転を行ううえで重要である。しかし、現在のカーナビゲーションシステムでは、ドライバーの習熟度や苦手意識に合わせた経路の推薦は行われていない。ドライバーに合わせた経路推薦システムの実現のためには、ドライバーの行う運転に影響する要因を分析し、運転技量や運転の難易度を数学的な式やアルゴリズムに置き換えて概念化するモデル化を行う必要がある。

ここで、人間の特性を分析し操作をモデル化したものとして、GUIに関するモデル化がある。Yamanakaら[2]は、ペンをを用いたステアリングの法則のモデル化において、カーブ半径とコースの幅がペンをスライドさせる動作にどのように影響を及ぼすかについての実験を行った。その結果、カーブ半径が小さいカーブではペンを動かす速度が遅いものに対して、カーブ半径が大きいカーブでは速度が速くなり、難易度が下がることが明らかになった。また、コースの幅が狭い試行ではペンを動かす速度が遅いものに対して、幅の広い試行では速度が速くなること明らかになった。一方Zhai[3]らは、ステアリングの法則を仮想現実空間における

運転にも適用できることを明らかにしている。このことからステアリングの法則を現実即した運転操作にも適用でき、カーブ半径や道路幅などに基づく運転の難易度が推定可能になると期待される。こうした様々な道路条件における運転のモデル化が可能になれば、習熟したドライバーと、何らかの道路条件に対して苦手意識をもつドライバーの自動判別も行うことができ、それらのドライバーに合わせた最適な経路を自動で推薦することが可能になると考えられる。しかし、こうしたモデル化に適した実験用シミュレータは存在していない。

我々はこれまで道路条件ごとの運転のモデル化を行うために、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および改良してきた[4][5]。また、提案システムを用いてカーブ走行時のカーブ角度やカーブ半径、道路幅が運転の難易度にどのような影響を与えるか実験を行った。実験の結果、初心者と上級者でカーブ角度の大小によって1試行にかかる走行時間にばらつきがあることや、ハンドルの操作量に違いが見られ、難易度との関係が示唆された。一方で、カーブ半径と道路幅が難易度に与える影響については、実験の参加人数に限りがあったため詳細な分析に限界があり、運転難易度のモデル化が行えていなかった。

そこで本研究では、過去に行ったカーブ半径と道路幅が運転の難易度に与える影響について再度実験を行い、より詳細な分析を行う。また、カーブ半径と道路幅が運転難易度に与える影響がGUIに関するモデルを用いてモデル化を行うことができるか調査を行う。

1 明治大学
Meiji University
2 ヤフー株式会社

2. 関連研究

2.1 ステアリングの法則

Accot ら[6]は幅 W の経路を通過する際の速度 V 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文字 k_n ($n = 1, 2, 3, \dots$) 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のことである。

$$V = k_1 + k_2 W \quad (1)$$

また数式 1 について、時間 = 距離/速さの関係から、全長 A 、幅 W の経路を通過する時間 (MT) を次のように表した。

$$MT = k_3 + k_4 \frac{A}{W} \quad (2)$$

ここで、 A/W の値はタスクの難易度 (ID) を表しており、ID が高いときは MT が増加する。このことから、移動距離 A が長い場合や幅 W が小さくなると、その操作が難しく時間がかかることを示している。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[7]や VR 空間での自動車の運転[3]などにも適用できることが知られている。特に、自動車の運転とステアリングの法則は、安全速度[8][9][10]などの重要な検証に利用されている。

2.2 曲線の経路におけるステアリングの法則

Montazer ら[11]はペンで描画を行うタスクにおいて、移動速度 V がカーブ半径 R を用いて次のような式で表せることを明らかにした。

$$V = k_5 + k_6 \frac{1}{R} \quad (3)$$

また、Yamanaka ら[2]は数式 3 についてカーブ半径とコースの幅の影響を考慮した数式を次のように表した。

$$V = k_7 + k_8 W + k_9 \frac{1}{R} + k_{10} W \frac{1}{R} \quad (4)$$

また、数式 2 と数式 4 を組み合わせて経路を通過する時間 MT の式を次のように表した。

$$MT = k_{11} + k_{12} \frac{A}{k_{13} + k_{14} W + k_{15} \frac{1}{R} + k_{16} W \frac{1}{R}} \quad (5)$$

2.3 カーブ走行に関する研究

自動車でのカーブの運転は、カーブ区間に入る前の減速の調整や先が見えないことによるハンドルの切り具合などにより運転を苦手とする要因の一つであることが考えられる。そのため、走行時のカーブに着目した研究が行われており、金澤ら[12]はカーブ区間進入前に速度を検知し音声によって減速を促すシステムを、四辻ら[13]はカーブ手前の直線区間に減速のマーク表示をコース中に設置し安全に減速させる手法を提案し、実車を用いて実験を行った。実験の結果、一部の条件で通常の運転よりも安全に速度を減速させる結果が得られた。しかし、実験設定ではカーブの半径や道路の道幅などが実際の道路条件を再現できていな

い可能性が高く、現実世界の道路のモデル化をするためには適切とは言えない。また、高地ら[14]のカーブ走行時の運転挙動特性に関する年齢依存性を調べた研究や、李ら[15]のカーブ走行時の操舵に着目したドライバの運転特徴抽出はシミュレータを用いて実験を行った。これらの研究は運転頻度や年齢など実験協力者の運転熟練度における特徴抽出は行っているが、道路の地理的条件がドライバに及ぼす影響については調査されていない。

そこで、本研究ではドライビング実験システムと HMD (Head Mounted Display) を用いて、より実世界の道路条件に近いコースで運転の難易度に及ぼす影響について調査する。

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カーブ半径と道路幅における速度に着目した実験を行う。ここでは、「カーブ半径の値が小さいほど運転の難易度が上がり運転速度が遅くなり、カーブ半径の値が大きいほど運転の難易度が下がり運転速度が速くなる」というカーブ半径についての仮説と、「道路幅が狭いほど運転の難易度が上がって運転速度が遅くなり、道路幅が広いほど運転の難易度が下がって運転速度が速くなる」という道路幅の仮説を立てた。この2つの仮説について、ドライビングシミュレータを用



図1 ドライビングシミュレータ



図2 コース生成システムの実行画面図

いた実験を行い、検証する。

ドライビングシミュレータ（図 1）は、これまで我々が構築してきたシステム[4]を改良し、任意のカーブ半径と道路幅を持つコースを生成できるようにした（図 2）。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 道路の条件

カーブ半径の値を変更するだけでは、カーブ区間の全長が統一できず実験に他の影響を与えると考えられる。そこで、カーブ半径と同時にカーブ角度の値を変更し、カーブ区間の長さが 100m になるよう調整した。具体的にはカーブ半径を R 、カーブ角度を θ としたときに、 $\theta = 180$ 度となるカーブ半径 R の値を次の数式より算出し、カーブ半径の最小値を 32m に設定した。このカーブ半径 32m を基準として、カーブ半径を 2 倍にしていき、それぞれでカーブ角度の値を調整してカーブ区間が 100m となるようにした（図 3）。

$$R = 100 \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{360}{\theta}$$

その結果、カーブ半径とカーブ角度の種類は下の表 1 に示す 8 種類となった。なお、道路幅はシミュレータ上で事故が頻発しない最小の値が 4m であったこと、また道路幅の広さの影響は等差的なものに比べ等比的なものの方が、運転速度に影響を及ぼすと考え、4m、6m、9m の 3 種類を実験に使用することとした。またコースの全長は 200m で最初と最後の 50m は直線、昼の道の一般道一方通行のコースとした。一方通行の道を採用した理由は、中央線からはみ出すといった要因を取り除くためである。

また、実験慣れによる運転速度のブレを小さくするため、ある道路幅におけるカーブ半径とカーブ角度の組み合わせ 8 種類がランダムに提示されるのを 1 セットとした。ここで、道路幅の提示順による順序効果の影響を減らすため、道路幅 4m、6m、9m を 1 セットずつ行うのを 1 つのセットグループとして、4m、6m、9m の 3 種類の道幅を並び替えてできる 6 つのセットグループを作成した。すべてのセットグループで道路幅 4m、6m、9m を 1 セット行うため、実験協力者一人あたりの走行数は 144 回となる。

3.3 実験手順

各コースは、カウントダウンから始まり（図 4）、カウントが 0 になると計測を開始し、車が 200m の地点に達すると計測終了となる。また、車の横幅の当たり判定を 2m とし、全長 200m のコースで道の左右に設置されているガードレールに車が接触すると事故（エラー）となるようにした。ここで、カーブ区間 100m で起こったエラーと、前

後 50m の直線区間で起こったエラーは区別せず、同一のエラーとして扱うものとした。エラーを起こしたコースはセットの最後にもう一度提示され測定を行うものとし、成功するまで繰り返した。

実験協力者には、ガードレールに接触しないように運転

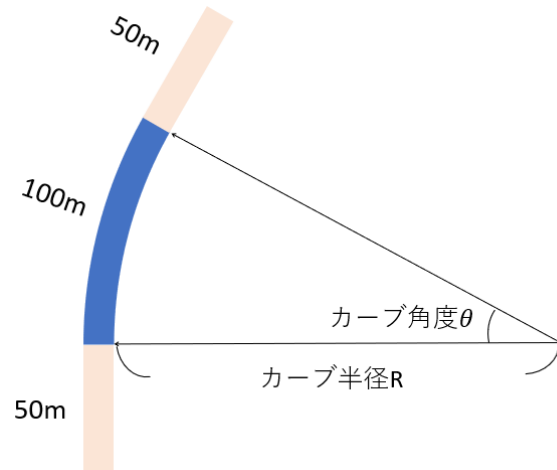


図 3 実験コースのイメージ図

表 1 カーブ半径とカーブ角度の組み合わせ

カーブ半径 (m)	カーブ角度 (度)
32	180
64	90
129	45
258	23
517	11
1033	6
2067	3
4134	1

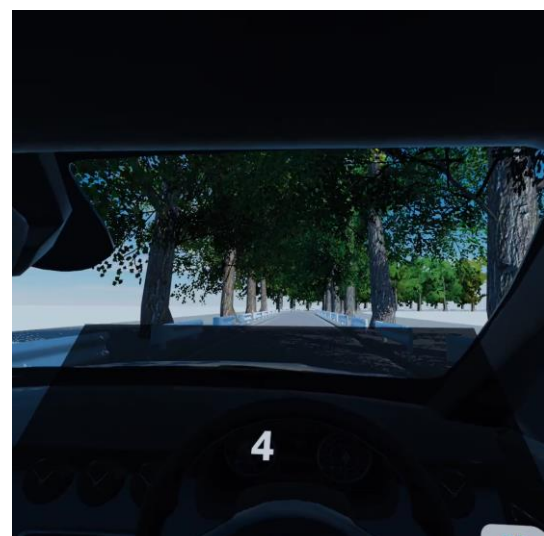


図 4 各施行時のカウントダウンの様子

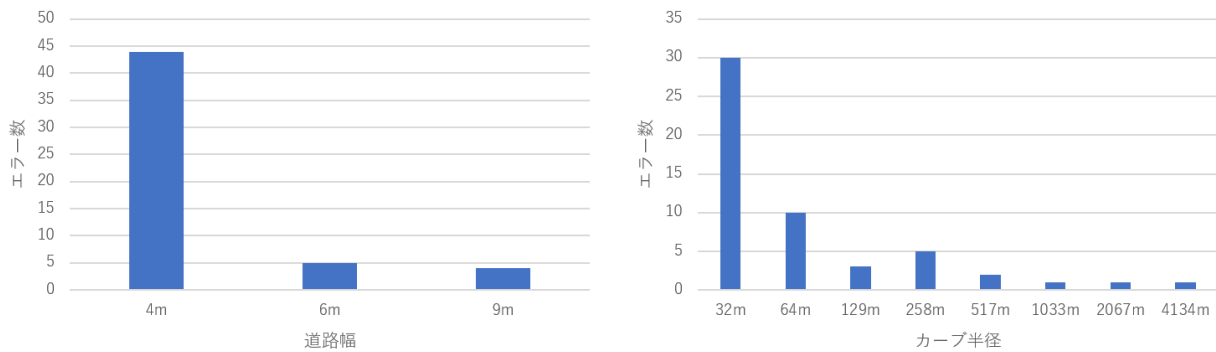


図5 実験参加者全体のエラー数（左：道路幅ごと 右：カーブ半径ごと）

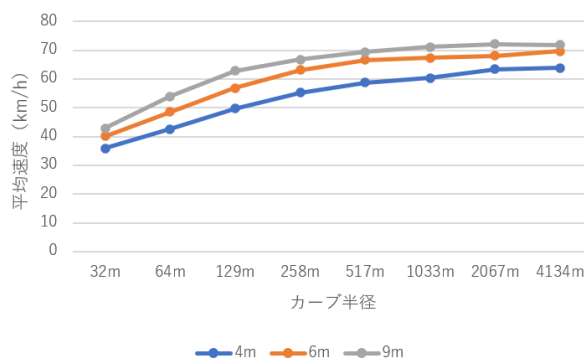


図6 カーブ区間の平均運転速度

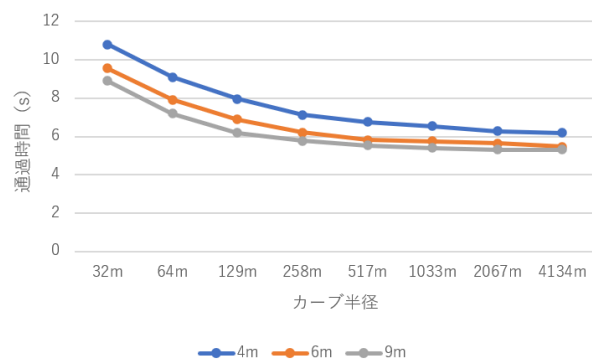


図7 カーブ区間の平均通過時間

すること、極端に遅い運転や無理をして最高速度を狙うような運転ではなく、エラーを起こさない前提でスピードを出せる範囲で出してほしい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と考え、各セット終了時に実験協力者に体調を確認し、実験協力者の好きなタイミングで休憩を取れるようにした。また、実験協力者が休憩を取らない場合は6セット目と12セット目終了時に強制的に休憩を取るようにした。実験は、テストコース走行から測定終了まで1名あたり1時間半を要した。なお、実験協力者は自動車運転免許を持っている大学生および大学院生21名（女性6名、男性15名）であった。

4. 実験結果

本実験では、「カーブ半径の値が小さいほど運転の難易度が上がり運転速度が遅くなり、カーブ半径の値が大きいほど運転の難易度が下がり運転速度が速くなる」というカーブ半径についての仮説と、「道路幅が狭いほど運転の難易度が上がって運転速度が遅くなり、道路幅が広いほど運転の難易度が下がり運転速度が速くなる」という道路幅の仮説の2つを検証する実験を行った。そこで、カーブ半径および道路幅とエラー率、カーブ区間の平均運転速度、カーブ区間の平均通過時間との関係について結果を示す。また、これらの結果と過去の研究[5]の結果について比較する。

4.1 カーブ半径および道路幅とエラーの関係

本実験における全体のエラー数は、実験協力者21名の総試行3,077回のうち、53回であった。図5に道路幅ごとのエラー数の分布およびカーブ半径ごとのエラー数の分布を示す。この結果より、4mの道路幅、カーブ半径32mでそれぞれ最もエラーが多いことがわかる。

4.2 カーブ区間の平均運転速度

平均運転速度について調べるため、カーブ区間のみの平均運転速度を計算した。なお速度の分析の対象をカーブ区間100mのみに絞った理由は、カーブ区間の前後50mの直線で極端な急アクセルを踏むなどの実際の運転とは異なる走行が多く行われたためである。

図6に各カーブ区間の平均運転速度の結果を示す。この図より、全ての道路幅でカーブ半径が大きくなると平均運転速度も速くなるという過去の研究結果[5]と同じ傾向が見られた。また、平均運転速度が最も遅かったのはいずれの道路幅でもカーブ半径が最も小さい32mのときの条件であり、最も速かったのは道路幅が4mおよび6mでは4134m、道路幅が9mでは2067mの条件であった。これらの結果は、道路幅が9mのときの最も速い運転速度を除いて全て過去の研究で得られたデータと同じ結果であった。

4.3 カーブ区間の平均通過時間

ステアリングの法則と経路を通過する時間の関係より、道路条件の難易度に応じて区間を通過する時間に差が出る

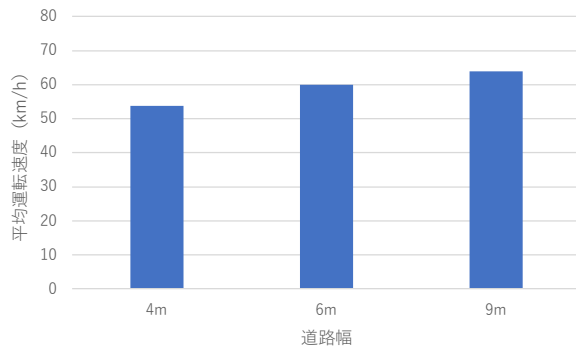


図8 道路幅ごとの平均運転速度

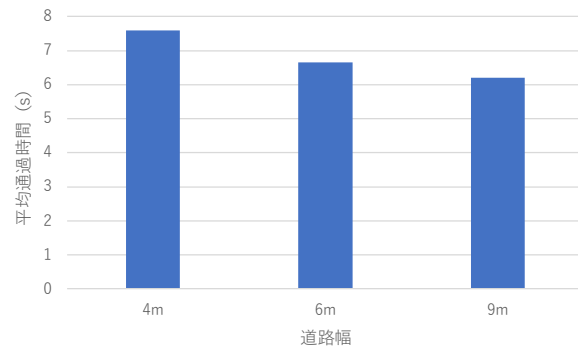


図9 道路幅ごとの平均通過時間

と考えた。そこで、カーブ区間の平均通過時間について計算した。なお 4.2 節同様にカウントダウン以降にアクセルを踏みだすタイミングが実験協力者ごとに異なり正確な走行時間が取れないと考えたため、カーブ区間のみを分析の対象とした。

図7にカーブ区間の平均通過時間の結果を示す。この図より、全ての道路幅でカーブ半径が大きくなるほど平均通過時間が短くなり、一定の値を超えてからは平均通過時間に大きな差が出なくなった。これは過去の研究[5]の結果と同じ傾向であった。また、道路幅が4mの時は6mと9mの時に比べて全てのカーブ半径で通過する時間が長かかっていた。道路幅が6mと9mの時は、カーブ半径が大きくなると通過時間に大きな差は見られず、おおむね過去の研究と同じ傾向であるといえる。

5. 実験結果の分析

4章で得られた実験結果と3章で立てた2つの仮説を比較し、実験データの分析を行う。

5.1 カーブ半径および道路幅がエラーに及ぼす影響

4.1 節より、カーブ半径の値が一番小さい32mの試行で全エラー数53回の内の30回が起きており、カーブ半径が大きくなるにつれてエラー数も減少している。このことから、カーブ半径の値が小さいほど運転の難易度が上がるという概ね仮説に近い結果が得られた。

また、道路幅が1番狭い4mの条件で45回のエラーが起きていることから、道路幅が狭いと運転難易度が上がるという仮説通りの結果であるといえる。一方で、道路幅が6mと9mの条件ではエラー数がそれぞれ5回と4回であり、大きな差は見られなかった。

5.2 カーブ半径および道路幅が運転速度に及ぼす影響

4.2 節の結果より、全ての道路幅の条件でカーブ半径が大きいほど平均運転速度も速くなっていったことがわかった。また、カーブ半径が32mのときと4134mの速度を比べると、いずれも運転速度に25km/h以上の差があったことがわかった。一方で、平均運転速度の上昇幅については、い

ずれの道路条件でもカーブ半径が32mから129mでは値が15km/h近く上昇しているのに対して、1033mから4134mでは3km/h近くしか上昇していない。このことよりカーブ半径が大きい場合より、カーブ半径が小さい場合に上昇幅が大きいことがわかる。このことから、「カーブ半径が小さいほど運転速度が遅くなり、カーブ半径が大きいほど運転速度が速くなる」の仮説を部分的に支持する結果であったといえる。

道路幅が運転速度に与える影響を調べるため、道路幅の条件に絞った平均運転速度の結果を図8に示す。この図より、道路幅が大きくなるほど平均運転速度が上昇していることがわかる。ただし、4mから6mでは約6km/h、6mから9mでは約3km/h速度が上昇していることから、上昇幅は減少していることがわかる。これらのことから、「道路幅が狭いほど運転速度が遅くなり、道路幅が広いほど運転速度が速くなる」の仮説通りの結果ではあるが、速度の上昇幅は一定でないことがわかる。

5.3 カーブ半径および道路幅が運転速度に及ぼす影響

4.3 節の結果より、カーブ半径が大きいほど平均通過時間が長いことがわかった。ここで、ステアリングの法則より、タスクの難易度が上がると通過時間が長くなることがわかっている。今回、カーブ半径が小さい条件ではカーブ区間の通過時間が長くなっているため、カーブ半径が小さい条件は運転の難易度が高いといえる。また、通過時間はカーブ半径がある一定の値まで大きくなるごとに減少しており、以降は一定の値に収束している。

5.2 節の運転速度と同様に、道路幅が通過時間に与える影響を調べるため、道路幅の条件に絞った平均運転速度の結果を図9に示す。この図より、道路幅が大きくなるほど平均通過時間が短くなっていることがわかる。ただし、4mから6mでは約1秒、6mから9mでは約0.4秒時間が短くなっていることから、運転の難易度はある一定まではカーブ半径に応じて決まり、以降は一定に収束していくことがわかる。

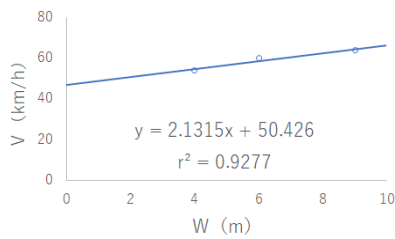


図 10 数式 1 の回帰モデル

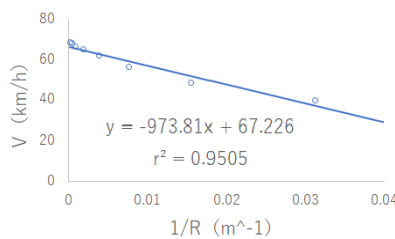


図 11 数式 3 の回帰モデル

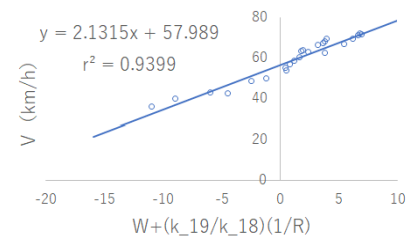


図 12 数式 6 の回帰モデル

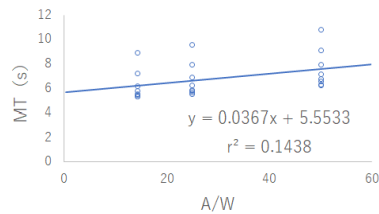


図 13 数式 2 の回帰モデル

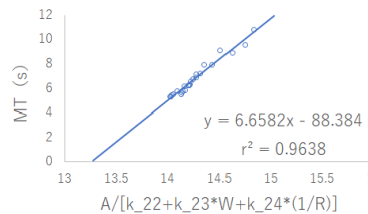


図 14 数式 7 の回帰モデル

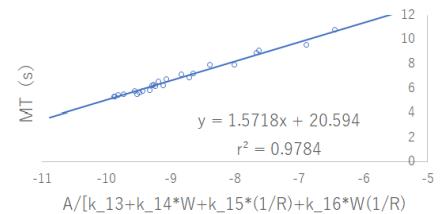


図 15 数式 5 の回帰モデル

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カーブ半径および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 運転速度とモデルの適合性

運転速度におけるモデル化について、道路幅の影響を考慮した数式 1、カーブ半径の影響を考慮した数式 3 の 2 つの運動速度 V を求めるモデルとの適合性を調査した。図 10、図 11 はそれぞれ数式 1、数式 3 の場合において、横軸にそれぞれの数式の独立変数、縦軸に V を取ったグラフである。なお、数式 1 は独立変数が道路幅のみであるため、同じ道路幅の試行 8 種類を平均した値を描画している。同様に、数式 3 は独立変数がカーブ半径のみであるため、同じカーブ半径の試行 3 種類を平均した値を描画している。また、モデルの適合性を比較する指標として、最小二乗法 (OLS) を使用した。以降、最小二乗法の決定係数を r^2 として表す。

図 10、11 より、数式 1、数式 3 における r^2 の値は、それぞれ 0.9277、0.9505、であった。このことから、カーブ半径および道路幅のどちらのモデルも、 $r^2 \geq 0.92$ と高い値であったため、十分に高い精度で推測できていることがわかる。

また、カーブ半径と道路幅の両方の影響を調べるため、数式 4 についても調査した。ここで、数式 4 における k_{10} の値がモデル化の適合にあまり寄与していないことがわかったため、数式 4 を次のように改善した。

$$V = k_{17} + k_{18}W + k_{19} \frac{1}{R} \quad (6)$$

図 12 は上記の数式 6 を図 10、図 11 と同様に描画したグラフである。なお、数式 6 は独立変数に道路幅とカーブ半径のどちらも含まれているため、24 条件全てを描画してい

る。

この図より、数式 6 における r^2 の値は 0.9414 であることがわかった。この値は先ほど同様に $r^2 \geq 0.92$ と高い値であったため、カーブ半径と道路幅の両方の影響を考慮した場合でも十分に高い精度で推測できていることがわかる。このとき、数式 6 におけるフリーパラメータ k_{17} , k_{18} , k_{19} はそれぞれ $k_{17} = 57.99$, $k_{18} = 2.132$, $k_{19} = -973.8$ であった。

6.2 通過時間とモデルの適合性

運転速度と同様に通過時間 MT を求めるモデルとの適合性について調査を行った。調査を行ったモデルは数式 2、数式 5、および数式 6 を数式 2 と組み合わせて次のように表した数式 7 である。

$$MT = k_{20} + k_{21} \frac{A}{k_{22} + k_{23}W + k_{24} \frac{1}{R}} \quad (7)$$

図 13、14、15 はそれぞれ数式 2、数式 7、数式 5 において、横軸にそれぞれの数式の独立変数、縦軸に MT を取ったグラフである。なお、運転速度の時と異なりカーブ半径と道路幅を考慮した 24 条件をそれぞれのグラフに描画した。また、運転速度の時と同様にモデルの適合性を比較する指標として、非線形回帰分析の r^2 を使用した。

図 13、図 14、図 15 より、数式 2、数式 7、数式 5 における r^2 の値はそれぞれ 0.1438、0.9638、0.9784 であった。このことから、数式 2 のモデルでは推測が上手くできていない一方で、数式 7 および数式 5 では、カーブ半径と道路幅を考慮した推測が高い精度で予測できることがわかる。また、運転速度のときは異なり、数式 4 を基準として導出した数式 5の方が、数式 6 を基準として導出した数式 7 よりも r^2 の値が高いことがわかった。このことから、数式 7 と数式 5 はどちらもカーブ半径と道路幅を考慮したモデルであるが、数式 5の方がより高い精度で推測できるモデルであるといえる。なお、数式 5 におけるフリーパラメータ k_{11} , k_{12} , k_{13} , k_{14} , k_{15} , k_{16} はそれぞれ $k_{11} = 20.59$, $k_{12} = 1.572$,

$k_{13}=-10.98$, $k_{14}=0.1266$, $k_{15}=-176.4$, $k_{16}=11.72$ であった。

6.3 運転速度および通過時間のモデル

6.1 節および 6.2 節の結果をもとに、運転速度と通過時間のモデルを定式化する。ここで、運転速度や通過時間はドライバの性格や経験によって異なるため、それぞれの運転に合わせた予測を行うためには、より近いドライバの実験結果を用いる必要がある。そこで、本実験の参加者 21 人を 144 試行の平均速度をもとに 7 人ずつ 3 つのグループ（速い、普通、遅い）に分類した。この 3 つのグループについて、運転速度と通過時間のモデルを定式化する。

6.1 節より数式 6 のモデルを 3 つのグループに合わせて定式化したものを下に示す。

$$\text{速い} : V = 73.10 + 2.311W - 1266 \left(\frac{1}{R} \right)$$

$$\text{普通} : V = 57.11 + 2.059W - 982.4 \left(\frac{1}{R} \right)$$

$$\text{遅い} : V = 43.76 + 2.025W - 672.9 \left(\frac{1}{R} \right)$$

これらのモデルを用いることで、運転速度の予想ができる。例えば今回の実験で行っていない道路幅 W が 5.5m、カーブ半径が 1000m の条件において、速い、普通、遅いグループの運転速度はそれぞれ 79.92, 63.33, 50.18km/h のように予想することができる。

同様に、6.2 節より数式 5 のモデルを 3 つのグループに合わせて定式化したものを下に示す。

$$\text{速い} : MT = 22.5 + \frac{4.14A}{-23.1 + 0.115W - 262 \left(\frac{1}{R} \right) + 18.0W \left(\frac{1}{R} \right)}$$

$$\text{普通} : MT = 24.3 + \frac{4.23A}{-23.4 + 0.216W - 282 \left(\frac{1}{R} \right) + 15.6W \left(\frac{1}{R} \right)}$$

$$\text{遅い} : MT = 22.5 + \frac{1.46A}{-13.9 + 0.296W - 360 \left(\frac{1}{R} \right) + 27.5W \left(\frac{1}{R} \right)}$$

これらのモデルを用いることで、通過時間についても予想ができる。先ほどの運転速度の場合と同様に、道路幅 W が 5.5m、カーブ半径が 1000m の条件において、速い、普通、遅いグループの運転速度はそれぞれ 4.497, 5.776, 7.337 秒のように予測することができる。

7. 考察と今後の課題

7.1 カーブ半径と道路幅が及ぼす影響

本稿では、「カーブ半径の値が小さいほど運転の難易度が上がり運転速度が遅くなり、カーブ半径の値が大きいほど運転の難易度が下がり運転速度が速くなる」というカーブ半径についての仮説と、「道路幅が狭いほど運転の難易度が上がって運転速度が遅くなり、道路幅が広いほど運転の難易度が下がり運転速度が速くなる」という道路幅の仮説を立てた。4 章および 5 章では、道路幅が 6m や 9m の場合やカーブ半径が 1033m 以上になると、速度や通過時間など

の数値的には差はないと思われた。しかし、ステアリングの法則に照らし合わせたモデル化により数式を定式化できた。このことから、上記の 2 つの仮説は採択されたと言え、運転難易度をモデル化することができた。

7.2 今回のモデル化の課題

今回のモデル化における課題の 1 つとして、調査したパラメータ数の異なりが挙げられる。今回行ったモデル化はカーブ半径と道路幅が運転難易度に及ぼす影響を調査するものだったが、カーブ半径は 8 種類で調査を行ったのに対して、道路幅は 3 種類しか調査を行っていない。また、カーブ区間の経路長は 100m の 1 種類のみであった。このことにより、導出したモデルに不確実性が生じることが考えられる。例えば、全長 $A=300$ m、道路幅 $W=4$ m、カーブ半径 $R=129$ m における数式 5 の通過時間 MT は次の値になる。

$$MT = 20.6 + \frac{1.57 * 300}{-11.0 + 0.127 * 4 - \frac{176}{129} + \frac{11.7 * 4}{129}} = -20.4$$

通過時間が負の値になることはないため、この値は明らかな間違いであることがわかる。このように既知の内容から未知の内容を推定する場合に問題が起こることは回帰分析ではよくあることだが、より詳細な予測を行うためには複数のパラメータで実験を行うことが必要である。

7.3 今後の展望

今回の実験における試行では最初から最後まで道路幅の大きさが一定であった。しかし、現実世界の道路では、車線数の減少や狭窄のように道路幅が運転中に変化することが考えられる。この道路幅が変化する場合については、福井ら[16]によって調査が行われているが、彼らは直線区間の走行条件のみを調査しており、カーブ区間走行中の道路幅が変わる条件については調査が行われていない。これらの条件における調査を行いモデル化することで、より詳細な予測を行えるモデルを見つけることが可能になると考えられる。

また、今回行った試行では走行中の条件として日中の視界が良い場合のみに絞った実験であった。そのため、視界が悪い夜間の運転などを考慮した条件についても調査を行う必要がある。我々はすでに、夜間の道路を模したコースをドライビングシミュレータ上で実装している (図 16) ため、これらの条件でも再度調査を行う予定である。

8. おわりに

本研究では、ドライバに合わせた経路推薦システムを実現するための運転技量のモデル化について、カーブ走行時のカーブ半径と道路幅が運転の難易度に及ぼす影響について調査を行った。実験では、異なる 8 種類のカーブ半径と 3 種類の道路幅から生成されるコースで、実験協力者一人あたり 144 試行走行し、得られたデータからエラー数の条

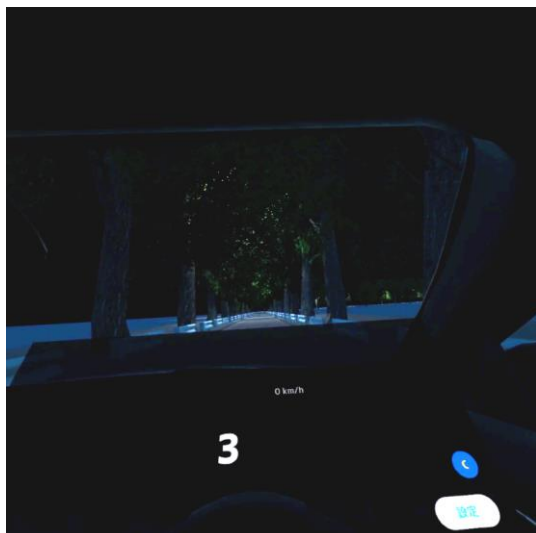


図 16 夜間の走行を模した様子

件分布, カーブ区間の平均運転速度と平均通過時間について分析, 考察を行った. その結果, カーブ半径が小さいほど平均運転速度が遅く平均通過時間が長くなることや, 道路幅が狭いと平均運転速度が遅く平均通過時間が長くなることわかった. また, 運転速度と通過時間について複数のモデルとの適合性について調査し, 運転速度と通過時間のモデルを新たに数式化した.

今後の展望としては, カーブ走行時に道路幅が変化する条件における運転難易度の影響について調査を行い, 今回のモデルと合わせてより高い精度で予測が可能なモデルの導出を進めることである. また, カーブ半径や道路幅の道路条件に加えて, 走行中の視界という新たな条件に着目し, 視界が悪くなる夜間を想定した条件で運転難易度の影響を調査することで, より複雑な条件に対応したモデル化を行う予定である.

参考文献

- [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, 澄川溜一, 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ーインタラクション (HCI) .2022, vol. 2022-HCI-196, no. 9, pp. 1-8.
- [2] Yamanaka, S., and Miyashita, H.. Modeling Pen Steering Performance in a Single Constant-width Curved Path. ISS '19: In Proceedings of the 2019 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces. 2019, pp. 65-76.
- [3] Zhai, S., Accot, J., and Woltjer, R.. Human action laws in electronic virtual worlds an empirical study of path steering performance in VR. Presence: Teleoper. Virtual Environ. 2004, vol. 13, no. 2, pp. 113-127.
- [4] 船崎友稀奈, 瀬戸徳, 二宮洗太, 樋川一幸, 中村聡史, 山中祥太. 運転難易度のモデル化に向けた実験システムの構築とカーブ角度の影響調査. 情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピューターインタラクション (HCI) . 2019, vol. 2019-HCI-185, no. 17, pp. 1-8.
- [5] 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ーインタラクション (HCI) . 2021, vol.2021-HCI-195, no.17, pp.1-8.

- [6] Accot, J., and Zhai, S.. Beyond Fitts' law: models for trajectory-based HCI tasks. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '97). 1997, pp. 295-302.
- [7] Accot, J., and Zhai, S.. Performance evaluation of input devices in trajectory-based tasks: an application of the steering law. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '99). 1999, pp. 466-472.
- [8] Bottoms, D. J.. The interaction of driving speed, steering difficulty and lateral tolerance with particular reference to agriculture. Ergonomics. 1983, vol. 26, no. 2, pp. 123-129.
- [9] Drury, C. G., and Dawson, P.. Human Factors Limitations in Fork-Lift Truck Performance. Ergonomics. 1974, vol. 17, no. 4, pp.447-456.
- [10] Rashevsky, N.. Mathematical biophysics of automobile driving. Bulletin of Mathematical Biophysics. 1959, vol. 21, no. 4, pp. 375-385.
- [11] Montazer, M. A., Drury, C. G., and Karwan, M. H.. An optimization model for self-paced tracking on circular courses. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 18. 1988, vol. 18, no. 6, pp. 908-916.
- [12] 金澤文彦, 岩崎健. 首都高速道路の急カーブ区間における安全運転支援サービスの効果検証実験. 土木技術資料= Civil engineering journal: 土木技術の総合情報誌. 2013, vol. 55.5, pp. 10-13.
- [13] 四辻裕文, 邢健, 喜多秀行, 米村圭一郎, 甲斐徳高, 松本猛秀. カーブの平面曲線半径に適した減速マーク表示に関する屋外実験研究. 交通工学論文集. 2019, vol. 5, no. 4, pp. A_32-A_41.
- [14] 高地康宏, 村岡一信, 沢田康次, 太田博雄. 高齢運転者のカーブ走行時運転挙動特性について. 2008, vol. 44, no. 3, pp. 165-170.
- [15] 李曙光, 山邊茂之, 佐藤洋一, 平沢隆之, 須田義大. チャンドラスリ ナイワラ P, 那和一成, 松村健, 田口康治. カーブ走行の操舵に着目したドライバの運転特徴抽出に関する研究. 自動車技術開論文集. 2012, vol. 43, no. 6, pp. 1387-1392.
- [16] 福井雅弘, 高久拓海, 中村聡史, 山中祥太. 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. 信学技報. 2023, vol. 122, no. 440, MVE2022-54, pp.32-37.