

操舵角に応じた音提示の音高変化がカーブ走行時の操舵に及ぼす影響

渡邊 健斗[†] 松田 さゆり[†] 大石 琉翔[†] 中川 由貴[†] 中村 聡史[†] 小松 孝徳[†]

鳥居 武史[‡] 澄川 瑠一[‡] 高尾 英行[‡]

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

[‡] 株式会社 SUBARU 〒181-8577 東京都三鷹市大沢 3-9-6

E-mail: [†] kento.wata0628@gmail.com

あらまし 自動車の初心者ドライバにとって、カーブ走行は操舵の量やタイミングが感覚的で習得が容易ではない。我々はこれまでの研究において、操舵角に応じた音を鳴らすことで運転を支援するドレミハンドルという手法を提案してきた。これまでにに行った実験において、ドレミハンドルが修正舵回数を減少させることを明らかにしてきたものの、音の変化が運転行動へ及ぼす影響については明らかにできていなかった。そこで本稿では、ドレミハンドルにおける音高変化がハンドル操作に与える影響について分析を行った。その結果、音高が変化する操舵角を基準にハンドルを操作している傾向がみられた。

キーワード ドレミハンドル, ハンドル操作, カーブ走行, ドライビングシミュレータ, 操舵角, 音階

1. はじめに

初心者ドライバにとって、カーブや登板路、交差点などでの運転は容易ではなく、苦手意識をもつ人が多い。我々のこれまでの調査[1]では、自動車運転免許を保有する初心者ドライバの23%が運転を苦手であると回答し、そのうちの52%がハンドル操作を難しいと回答していた。

ここで、カーブ走行はハンドル(ステアリングホイール)の操作が特に重要な運転技能のひとつであるが、走行中は道路の先が見えづらく、ハンドル操作のタイミングや量は視覚と腕の感覚に委ねられている。このカーブ走行を習得するためには、様々なカーブを数多く運転することで経験を積み感覚を掴むことが重要である。しかし、初心者ドライバにはその経験が少なく、またハンドル操作に苦手意識をもっていることが多いため、カーブ走行に問題を抱えやすい。

こうした問題を踏まえ、我々は運転初心者のカーブ走行習得を支援することを目的とし、操舵角(ステアリングホイールの回転角度)に応じて離散的に音階のサイン波を鳴らす「ドレミハンドル」を提案してきた[2]。また実験により、ドレミハンドルがカーブ走行において修正舵を減少させることを明らかにした[3]。さらに、ドレミハンドルの音高変化の粒度に着目した実験を実施し、カーブの種類ごとに適切な音階幅が異なり、急なカーブでは広い音階幅が、緩いカーブでは通常の音階幅が適していることなどが明らかになった[4]。

ここで、これまでの実験では修正舵回数やハンドル角速度など、ドレミハンドルが運転技能に与える影響について分析を行ってきたが、ドレミの音の変化がハンドルの切り方などの運転行動に与える影響については明らかにできていなかった。もし、音の変化を頼りにハンドル操作を行っているのであれば、その音の変化

が起こったタイミングなどにそのハンドル操作が起こっていることが考えられる。この、操舵角に応じた音提示とその変化をドライバがどのように意識し、運転していたかを明らかにすることで、よりカーブ走行が上達しやすいドレミハンドルを設計することができると考える。

そこで本稿では、これまでの実験で得た走行データをもとに、音高の変化に注目した分析を行うことで、ドレミハンドルにおける音高変化がカーブ走行中の操舵に与える影響について検証する。

2. 関連研究

2.1. 数値データの可聴化

数値データの大きさを音で表現する研究は様々なものがある。

奥川ら[5]はサイクルスポーツにおいて、回転速度を聴覚的にフィードバックする手法を提案し、回転速度の分散を減少させることに成功した。

Bruceら[6]は、数値データの大きさを音階で表現することによって感覚的に理解することを可能とした視覚障害者のためのアプリケーション AudioAbacusを提案している。また実証実験の結果、このアプリケーションを使用したユーザが、ほとんど練習やトレーニングをすることなく音声化された数字の桁数を判断することができることを明らかにした。

我々の研究は、こうした研究と同じく数値の可聴化に着目し、ハンドルの操作量を音階にマッピングすることで、カーブの運転の上達を支援するものである。

2.2. 音階を用いた聴覚フィードバック

音階を用いた聴覚フィードバックにより、人の行動などの支援を行う研究も多数行われている。

表 1 操舵角と音階の関係

音階 (周波数[Hz])	ハンドル操舵角[度]		
	音階幅が狭いドレミハンドル	音階幅が通常のドレミハンドル	音階幅が広いドレミハンドル
ド (261.6)	0.00 ~ 7.50	0.00 ~ 15.00	0.00 ~ 30.00
レ (293.7)	7.50 ~ 15.00	15.00 ~ 30.00	30.00 ~ 60.00
ミ (329.6)	15.00 ~ 18.75	30.00 ~ 37.50	60.00 ~ 75.00
ファ (349.2)	18.75 ~ 26.25	37.50 ~ 52.50	75.00 ~ 105.00
ソ (392.0)	26.25 ~ 33.75	52.50 ~ 67.50	105.00 ~ 135.00
ラ (440.0)	33.75 ~ 41.25	67.50 ~ 82.50	135.00 ~ 165.00
シ (493.9)	41.25 ~ 45.00	82.50 ~ 90.00	165.00 ~ 180.00
ド (523.2)	45.00 ~ 52.50	90.00 ~ 105.00	180.00 ~ 210.00

木村[7]は、末梢神経に障害をもった患者の正常な歩行の再学習を支援するため、踵だけを感じると「ド」、踵と母趾球の両方を感じると「レ」、母趾球のみを感じると「ミ」を鳴らす手法を提案している。また実際の患者による実験の結果、この装置の使用により、進行方向を見ることができるようになったことを明らかにしている。

前川ら[8]は、視覚障害者が色の変化を認識可能とするために、色の RGB と音階を心理的屬性に考慮してマッピングしておき、色の変化をリアルタイムに音の変化で提示する色模様認識システムを提案している。また、患者に協力してもらった実験の結果、様々な色模様において識別することが可能で、音から色名を特定可能な場合もあったと述べている。

このように音階を用いた聴覚フィードバックに関する研究は様々に行われてきており、その有用性も明らかになっている。我々の研究は、ハンドルの操舵角を音階にマッピングし、絶対的・相対的にハンドルの操舵角を把握可能とするものである。

2.3. 運転支援における聴覚フィードバック

聴覚フィードバックにより、運転技能を向上させる研究も多数行われている。

澄川ら[9]は車両挙動の安定化を目的として、車両挙動の変化を可聴化することで挙動を安定するように誘導するシステムを提案している。具体的には、車両挙動の不安定時に常時高音が鳴る仕組みと安定時に報酬音が鳴る仕組みを提案した。実験によりどちらの音刺激も車両挙動安定に有効であるが、ドライバへの負担度合いから、報酬音が鳴る聴覚刺激の方が、効果が高かったとしている。

鬼丸ら[10]は、車の左右位置を両耳音圧差により、定量的にリアルタイムでフィードバック提示するシステムを提案している。ここでは、ホワイトノイズの有無と、不連続に2値変化するものと定量的に連続変化するもので比較実験を行い、定量的に連続変化する刺激が運転負荷を増加させずに離脱距離を減少させること

を明らかにしている。

このように、運転においても聴覚フィードバックを利用した支援は様々研究されている。我々の研究も、こうした研究と同様に運転を支援するものであるが、その中でも特にカーブ運転におけるハンドル操作の上達を目指すものである。

3. 分析データ

本稿で分析に用いるのは、これまでの実験[3][4]で得られた走行データである。本章では、その実験の概要について説明する。

3.1. 実験条件

実験条件は、ドレミハンドル無し群と、それぞれ音階幅が異なるドレミハンドルを使用した3群（広い・通常・狭い）の合計4群である。3種類のドレミハンドルの操舵角と音階の関係を表1に示す。なお、音階幅は周波数に合わせて割り当てているため、前の音階から半音しか上がらない「ミ」と「シ」は他の音に比べ音階幅が半分になっている。

3.2. 実験設計

運転は天候、時間帯、人通りなど、他の外的要因によって走行方法が大きく変化するため、実験条件を統一するために、Funazakiら[11]のドライビングシミュレータをドレミハンドルに対応するために改良したものをを用いた。

実験で使用したコース経路を図1に示す。全て道幅5mで、間に直角に曲がるカーブを設置した。ここでは、カーブ半径2種類と、左カーブと右カーブを合わせた合計4種類のコースを用いた。また、システムを用いることによる修正舵回数の変化などを調査するために、実験を3つのフェーズ（ベース・練習・テスト）に分けた。

詳細を以下に説明する。

- ベース走行: 実験参加者の練習をする前の実力を調査するためのもので、2種類のカーブを左右2本ずつ（合計8本）走行してもらった。

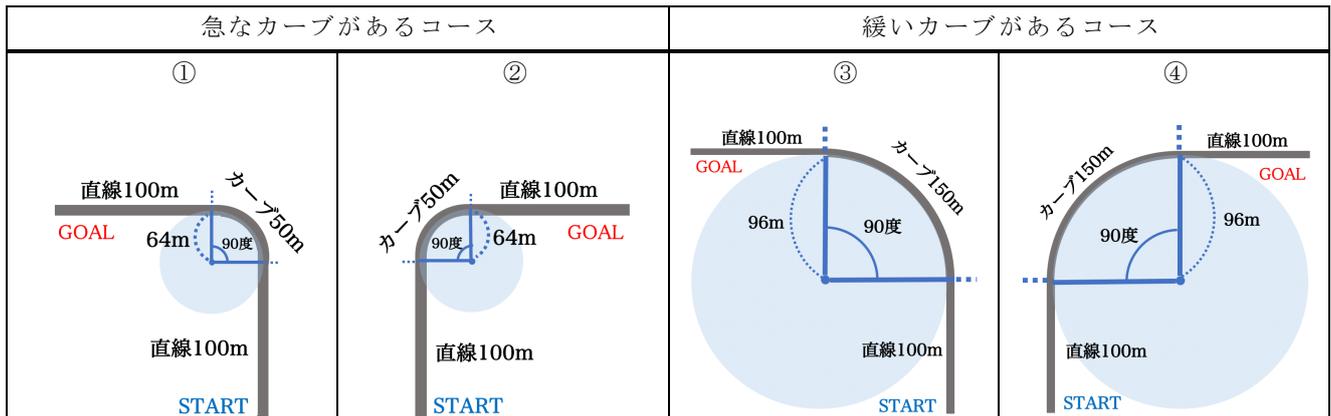


図1 使用したカーブの経路図

- 練習走行: 実験参加者にシステムを利用しつつカーブ走行を練習してもらうためのもので、2種類のカーブを左右5本ずつ(合計20本)走行してもらった。
- テスト走行: 実験参加者の成長を計測するためのもので、実験参加者にテスト走行としてテストを行うことを説明し、2種類のカーブを左右2本ずつ(合計8本)走行してもらった。

3.3. 実験手順

実験では、実際に走行する前に事前説明を行った。注意点として、「運転にはハンドルを切り足したり、切り戻したりする修正舵が少ない方が良い運転とされているため注意して欲しい」ということを伝えた。また、通常の運転と同様に走行してもらうため、実験参加者には速度が遅くなりすぎないように、具体的には目安として30km/h以上の速度を出すように指示した。

実際の走行では、まず実験参加者にドライビングシミュレータに慣れてもらうために、事前に4種類のコースを1本ずつ(合計4本)走行してもらった。その後、ベース走行、練習走行に取り組んでもらい、5分の休憩を挟んでテスト走行に取り組んでももらった。

全てのフェーズで、カーブの種類はランダムな順番で走行してもらった。また、実験参加者は事前に前述の実験条件に分けられ、各指定のハンドルを用いて実験を行ってもらった。なお、ドレミハンドルを使用する実験参加者には、カーブ走行の際にハンドルの角度に合わせて音が鳴ることも教示した。

実験参加者は今までに本研究で用いたドライビングシミュレータを使用したことのない大学生、大学院生の48名であり、全員自動車運転免許を所持していた。ここで、実験参加者のうち4名は実験条件が統制できておらず正しい分析ができなかったため、分析対象から除外した。最終的なそれぞれの条件の実験参加者は11名ずつであった。

なおこれ以降、ドレミハンドルなしは「Nothing」、音

階幅が広いドレミハンドルは「Wide」、音階幅が通常のドレミハンドルは「Normal」、音階幅が狭いドレミハンドルは「Narrow」として表記する。

4. 結果

4.1. ハンドル操舵角の軌跡

音高が変化した際のハンドル操作の変化を調べるため、各群の練習走行とテスト走行におけるカーブ付近のハンドル操舵角の変化を可視化したものが図2である。

図2の横軸はスタート地点からの距離(m)、縦軸は操舵角(度)であり、1つの軌跡がその群の実験参加者の1つの走行を意味している。また、図の背景色として示されている色は、その条件における各音階を意味している。なお、ドレミハンドル非使用群(Nothing)は実際には音提示を行っていないが、比較のため音階幅が通常の場合のもの(Normal)で塗り分けた。図は上から順に、Nothing, Wide, Normal, Narrowであり、Wideに比べてNormalが、Normalに比べてNarrowが1つの音階あたりの角度が狭いことがこの図からもわかる。

結果より、ドレミハンドル使用群(Wide, Normal, Narrow)は音階が切り替わる境目の角度付近で操舵角を維持しようとする傾向にあることがわかる。一方ドレミハンドル非使用群(Nothing)は、ドレミハンドル使用群に比べて、操舵角を維持できず、ハンドル操作が不安定であることがわかる。

4.2. 各音階の持続距離

実験参加者がどの程度同じ音階を維持しようとしていたかを分析するため、各実験条件におけるそれぞれの音階が継続して鳴っていた最大持続距離を求め、その平均を計算した結果を図3に示す。

図3の横軸は音名(音階_オクターブ)、縦軸は最大持続距離(m)である。また、ドレミハンドル非使用群のデータにおいて、それぞれの音階幅のドレミハンド

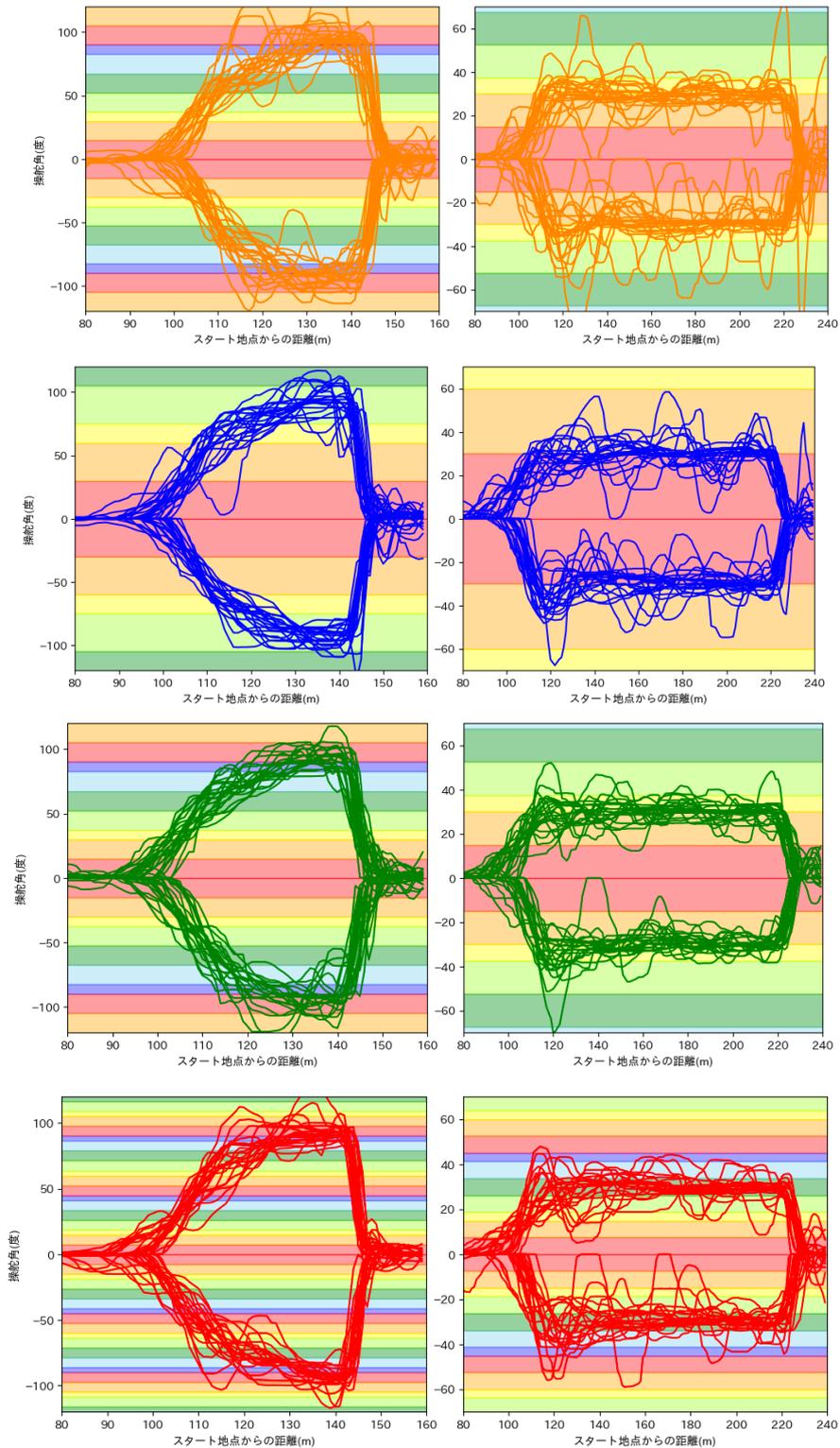


図2 カーブ付近の操舵角（左：急なカーブ 右：緩いカーブ 上から Nothing, Wide, Normal, Narrow）

ルを用いた場合における結果を点線で示している．なお，ここでは比較のため，音階幅が半分である「ミ」と「シ」は値を2倍にして補正したものを示している．結果より，いずれの群においてもピークがあるが，ドレミハンドル使用群に比べドレミハンドル非使用群

の方が，ピークの値が小さいことがわかる．つまり，ドレミハンドル使用群の方がドレミハンドル非使用群に比べ，ハンドル操舵角を維持する最大距離が長いといえる．

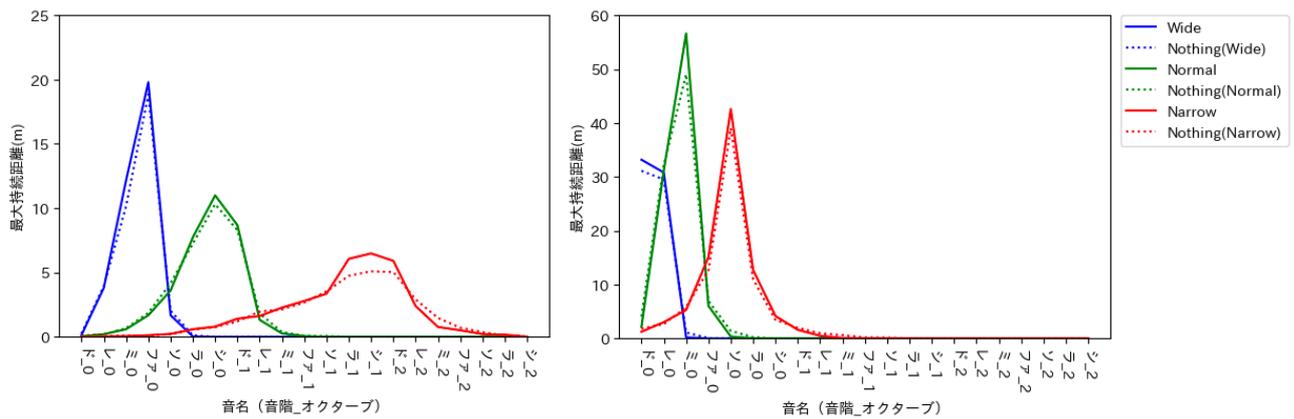


図3 各音階を維持した最大距離 (左：急なカーブ 右：緩いカーブ)

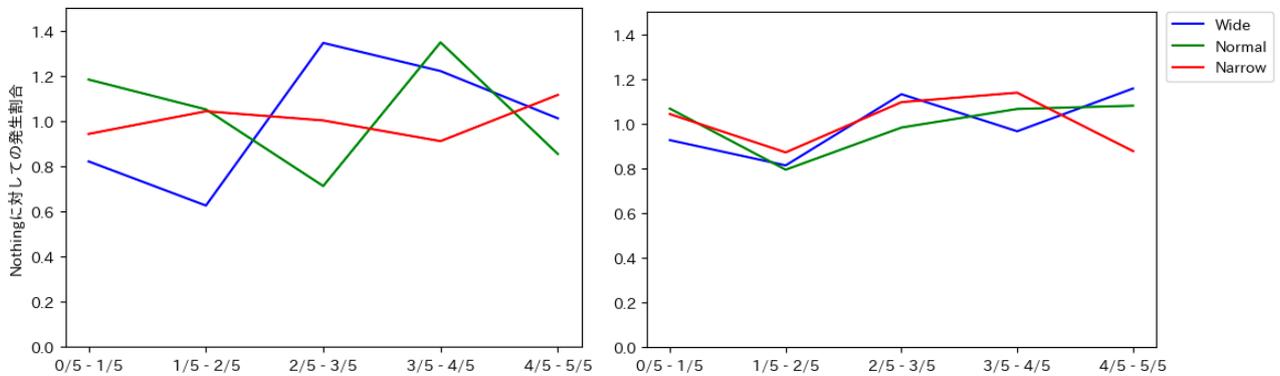


図4 修正舵の発生位置の割合 (左：急なカーブ 右：緩いカーブ)

4.3. 修正舵の発生位置

音の変化を頼りにハンドル操作を行っているのであれば、その音高変化のタイミングでハンドル操作を行っている可能性がある。そこで、修正舵の発生位置に着目した分析を行った。

修正舵が発生した際にそれが音階幅のどの位置で発生していたかについて、ドレミハンドル非使用群と比較した割合を図4に示す。ここでは、音が変わってすぐ修正舵があるのか、音が変わる直前に修正舵があるのか、それともその間に修正舵があるのかを明らかにするため、各条件において、1つの音が鳴る角度を5等分してその修正舵の頻度を求めた。なお、緩いカーブや急なカーブを曲がる際に適切な角度が、その5等分した領域の一部に偏ることを避けるため、ドレミハンドル非使用群との比を求めることで正規化した。この値が1より大きければ、その領域での修正舵発生回数がドレミハンドル非使用群よりも多く、1より小さければドレミハンドル非使用群より少ないということになる。図の横軸が音階幅を5等分した際の修正舵の発生位置で、縦軸はドレミハンドル非使用群に対する修正舵の発生割合である。

グラフから、Narrowは分布に偏りが無いが、Normal

では音が変わってから次の音に変わるまでの中央付近で修正舵が減り、次の音に変わる少し手前で修正舵が増えることがわかる。また、Wideでは音が変わってから少しハンドルを回したところで修正舵が減り、中央付近で修正舵が増えることがわかる。この傾向は、急なカーブにおいて顕著であった。

5. 考察

分析結果をもとに、ドレミハンドルの音高変化による運転行動への影響について考察を行う。

4.1 節で得られた操舵角の変化に関する結果より、ドレミハンドル使用群は音が切り替わる境目付近でハンドルを維持しようとする傾向にあることがわかった。これは、実験参加者が音を参考にハンドル操作をしているためであると考えられる。

4.2 節で得られた各音階の持続距離に関する分析により、各実験条件で特定の音階にピークがあることがわかった。この結果より、ある程度同じ音階を維持して走行できているといえる。また、ドレミハンドル使用群は、非使用群に比べてピークの音階の持続距離が長いことから、ドレミハンドル使用群はできるだけ同じ音階を維持して走行しようとしていると考えられる。

文 献

4.3 節で得られた修正舵の発生位置に関する分析より, Narrow は一様に分布しており, Wide と Normal には偏りがあることがわかった. これは, 実験参加者が音の境目付近を維持して走行しようとしているためその区間ではあまり修正舵をしないが, それよりも多くハンドルを回すと修正舵をするためだと考えられる. また, その許容範囲は角度にもとづいているため, 音階幅が異なるとその音階の角度幅を 5 等分した際の角度が異なり, 修正舵の発生が少なくなる角度と多くなる角度に差が出たものと考えられる.

修正舵の発生角度について詳しく分析を行ったところ, 音高が変化した後, Normal (一音階が約 15 度) では約 9 度, Wide (一音階が約 30 度) では約 12 度までは修正舵が少なかった. このことより, 音高が変化する角度から 10 度程度で操舵角を維持していることがわかる. Narrow では, 一音階あたり最大 7.5 度であるため, 10 度程度で維持しようとする次の音階に変化してしまうため, 分布に偏りがあまりみられなかったと考えられる.

以上のことから, ドレミハンドル使用群は音高が変化した角度から 10 度程度でハンドルを維持しようとし, それを超えるると修正舵をする傾向があるといえる. つまり, そのカーブにおいて維持すべき操舵角付近が音高変化の境目であると, ドレミハンドルの効果を得やすいと考えられる. また, 音階幅が 10 度以下の場合修正舵が少なくなる傾向がなくなってしまうため, ドレミハンドルの 1 つの音階幅は, 10 度より広くすることが望ましいといえる.

6. おわりに

本稿では, 運転初心者にとって難易度が高いカーブ走行の習得を支援するドレミハンドルについて, これまでの実験で得たデータをもとに, 音高の変化に注目した分析を行った. その結果, ドレミハンドル使用群は音高が変化する境目付近でハンドルを維持する傾向があり, ドレミハンドル非使用群に比べてその最大距離が長いことが明らかになった. また, 音高が変化する角度から 10 度程度でハンドルを維持し, それを超えると修正舵が多くなる傾向があることがわかった.

今後は, 適切な音階幅について検証するとともに, 音のデザインや鳴らし方についても検討していく予定である. また, これまでは 1 つのカーブをもつコースのみで実験を行っていたが, 周回路や交差点などでも実験を行い, ドレミハンドルが効果的に機能する場面についても検討を行う. 一方, 本システムがシミュレータだけでなく, 実車でも有効であるかについて, 実車での検証を行っていく予定である.

- [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, Jan.2022.
- [2] S. Matsuda, Y. Funazaki, T. Komatsu, N. Matsuyama, Y. Nakagawa, S. Nakamura, H. Takao, R. Sumikawa, and T. Torii, “DoReMi Steering Wheel: Proposal for a Driving Assist System with Sound Display Depending on the Rotation Angle of Steering Wheel,” Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems: Proc. of the 26th International Conference KES2022, no. 207, pp.4504-4513, Verona, Italy, Sept.2022.
- [3] 松田さゆり, 中川由貴, 船崎友稀奈, 渡邊健斗, 大石琉翔, 中村聡史, 小松孝徳, 鳥居武史, 澄川瑠一, 高尾英行, “ドレミハンドル:操舵角に応じた音提示手法の複数種のカーブを用いた検証,” 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-200, no.8, pp.1-8, Nov.2022.
- [4] 渡邊健斗, 松田さゆり, 大石琉翔, 中川由貴, 中村聡史, 小松孝徳, 鳥居武史, 澄川瑠一, 高尾英行, “ドレミハンドルにおける一音階に対する角度幅がカーブ走行の上達に与える影響の調査,” 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.2023-HCI-201, no.36, pp.1-8, Jan.2023.
- [5] 奥川遼, 村尾和哉, 寺田努, 塚本昌彦, “聴覚フィードバックを利用したペダリングトレーニングシステム,” 日本ソフトウェア科学会第 22 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ(WISS 2014)論文集, vol.33, no.1, pp.41-51, Nov.2014.
- [6] B. N. Walker, J. Lindsay, and J. Godfrey, “The Audio Abacus: Representing Numerical Values with Nonspeech Sound for the Visually Impaired,” Proc. of The Sixth International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility, vol.77-78, pp.9-15, Atlanta, USA, Oct.2004.
- [7] 木村和樹, “圧力センサのフットスイッチを用いた聴覚フィードバック装置の開発と信頼性,” 日本義肢装具学会誌, vol.32, no.1, pp.45-49, Oct.2016.
- [8] 前川満良, 今井有希子, 関啓明, 神谷好承, 橋爪慎哉, “視覚障害者のための色模様認識システムの開発,” 精密工学会学術講演会講演論文集, 2004 年度精密工学会春季大会, no.25, pp.1229-1230, Mar.2004.
- [9] 澄川瑠一, 鳥居武史, “直線とカーブ走行時の車両挙動の変化を用いた聴覚刺激による運転行動の誘導に関する研究,” 自動車技術学会誌, vol.75, no.6, pp.112-117, May.2021.
- [10] 鬼丸真一, 北崎充晃, “光強度と音圧による位置フィードバック情報がドライビングシミュレータの運転に及ぼす効果,” 基礎心理学研究原著論文, vol.32, no.1, pp.2-13, Dec.2013.
- [11] 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. HCII 2022, vol.LNCS 13335, pp.247- 257, Jun.2022.