

講演 10. 自動運転から手動運転への引継ぎ要請に用いる警告音の断続周期が運転引継ぎ行動に与える影響

自動車安全研究部
中央大学

※阿部 晃大
戸井 武司

加藤 洋子

関根 道昭

1. はじめに

レベル 3 以上の自動運転では、あらかじめ定められた運行設計領域 (ODD: Operational Design Domain) 内において、車両の運転に必要な「認知・判断・操作」を自動運転システムが担う。そのため、自動走行中にドライバは運転操作から解放されることとなる。国連協定規則第 157 号¹⁾ (以下、UN-R157) は、レベル 3 の自動運転車に対して、システムの故障や ODD からの逸脱が発生して自動運転が継続困難となった際に、運転引継ぎ要求 (TD: Transition Demand) を提示することを求めている。TD は少なくとも光学式の信号とし、それに加えて音響式または触覚式の信号のいずれかによるものとされている。TD 提示後 10 秒以上経過してもドライバが応じない場合は、リスク最小化制御 (MRM: Minimum Risk Manoeuvre) が開始される。そのため、TD を受けたドライバは速やかに運転を引継ぐ必要がある。

自動運転システムはまだ普及初期の段階であり、また TD の適切な提示方法に関する検討も十分ではない。筆者らの既報²⁾では、TD の警告音として断続音を使用する場合の断続周期や自動運転中に行う運転以外の作業 (二次タスク) の内容が運転引継ぎ時のドライバ行動に与える影響を調べるシミュレータ実験を行った。1.6kHz の警告音が 1 秒間に ON/OFF を繰り返す回数 (cps: cycle per second) として 2 回 (2cps) と 6 回 (6cps) の 2 条件を設定し、運転引継ぎ後の左カーブ走行中の車両挙動を分析したところ、6cps 条件は 2cps 条件よりも車線に対して左右方向への移動量が少なく (車線の中心に近い位置を走行でき)、走行が安定することを確認した。また、実験後に行った断続音に対する印象評価では 6cps は 2cps より緊急感が高く評価され、この特性がカーブ路における車線の追従性に寄与したと考えられた。その一方で、6cps は「不快感」も高く評価されることが確認されており、自動運転中に強い緊急感、不快感を生じさせる音が提示された場合にドライバを不要に驚愕させ、不安全な行動を誘発する恐れがあると考えられる。また、二次

タスクとしてスマートフォンを用いた 2 種類の課題を設定し、課題なし条件 (スマートフォンを手に持つのみ) との比較を行ったところ、TD の提示から前を向くまでの時間が課題なし条件、動画視聴課題、計算課題の順に増加したほか、課題への没入によって TD に対応しなかったとみられる事例が確認された。

ドライバが TD に対して適切に反応しない場合、TD の警告を強めることによってドライバの行動を促す必要がある。UN-R157 では、TD は提示から遅くとも 4 秒後に強化 (escalate) されなければならないと規定している。しかしながら、その手法について具体的な記述はない。本研究では、TD の強化方法の一つとして「警告音の断続周期の変化」に着目した。既報²⁾にて用いた 2 種類の断続音を使用し、2cps で鳴り始め、その後 6cps に変化する音を用いた場合、鳴り始めにおけるドライバの驚愕感を抑えつつ、断続周期の増加により引継ぎ後に車線に沿った走行となり、走行が安定する効果が期待される。これを検証するためドライビングシミュレータ実験を行った。

2. 実験条件

断続音の断続周期がドライバの運転引継ぎ動作に与える影響を調べるため、パターンの異なる 3 種類の断続音を用意した。また、二次タスクによる影響も確認するため、既報²⁾にて用いた 2 種類の課題を設定した。これらを組み合わせた計 6 条件を全被験者に対して 1 回ずつ実施した。

2. 1. 警告音

実験に使用した断続音の断続パターンを図 1 に示す。このうち、図 1 の上段と中段は既報²⁾にて使用したもの (それぞれ、2cps 条件、6cps 条件) であり、図 1 下段は 2cps で鳴り始め、2 秒後に 6cps に変化するもの (エスカレーション条件) である。エスカレーション条件における警告音変化までの時間については、既報²⁾にて警告音が鳴ってからアクセルペダルを踏み込むまでの時間を計測した際、非高齢者の結果が 2.5 秒程度 (二次タスクの種類によって変化) であっ

たことから、2秒に設定することによって警告音の変化による効果を確認できると考えた。断続音は、いずれも周波数 1.6kHz、音圧レベル 60dB(A)（運転席着座時のドライバの耳元位置で計測）とし、TD と同時に助手席側に設置したスピーカから提示して、自動運転の解除とともに停止した。

2. 2. 二次タスク

二次タスクは動画視聴条件と計算条件の 2 種類を実施した。どちらも実験用のスマートフォン（縦 149mm、横 71mm）を手を持って行うものである。

動画視聴条件は、5 種類の動画の中から被験者が好きなものを選んで視聴する。動画視聴中は音量調整や再生場面の操作を禁止し、タスクに集中させる目的で走行後に動画に登場するキーワードを問う簡単なテストを行った。動画の音量は 1 分間の平均音圧レベルで約 57dB(A)であった（スマートフォンをステアリングの手前に設置した場合）。

計算条件では、図 2 に示すようにスマートフォンの画面上に一桁の数字をランダムに 2 個表示し、その下の一桁をタップ操作で入力する作業を繰り返し行う。本課題は、視覚情報を理解し、考え、指で入力することから、メール等のテキスト入力に類似する作業と考えられる。なお、これらの二次タスクは先行研究³⁾にて作業負荷に関する検討を行っており、NASA-TLX などを用いた評価から、動画視聴よりも計算のほうが高い作業負荷を持つことを確認している。

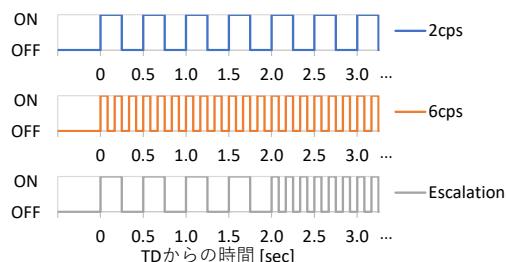


図 1 警告音の断続パターン

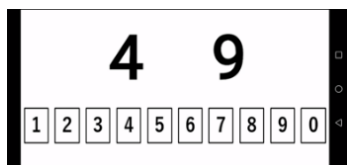


図 2 計算条件におけるスマートフォン画面

3. 実験方法

3. 1. 実験シナリオ

被験者は図 3 に示すドライビングシミュレータに乗車し、他交通の存在する片側 3 車線の高速道路の第

2 車線を時速 80km で自動走行した。走行中はスマートフォンを持ち、指定された二次タスクを行った。走行開始から 6 分後に TD に相当する警告音を提示した。警告音が聞こえたらできるだけ速やかに二次タスクを中断し、アクセルペダルもしくはブレーキペダルを踏み込むか、ステアリングを操作することによって運転を引継ぐよう被験者に教示した。

実験に使用したコースは直線区間と曲線区間から構成される道路とした（図 4）。TD は曲線半径 300m のカーブで提示されるため、運転を引継いだ直後に被験者が適切に操舵を行う必要がある。実験は図 5 に示す順序で行い、走行風景から TD のタイミングを予測されないよう、走行ごとに往路と復路を入れ替え、他車の配置を変更した。また、TD が直線区間で発生するダミー走行を 2 回設けた。



図 3 実験の様子

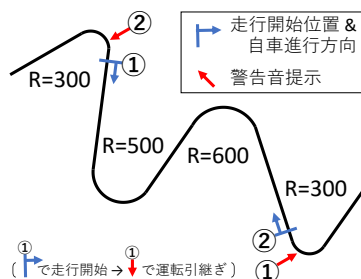


図 4 実験コース

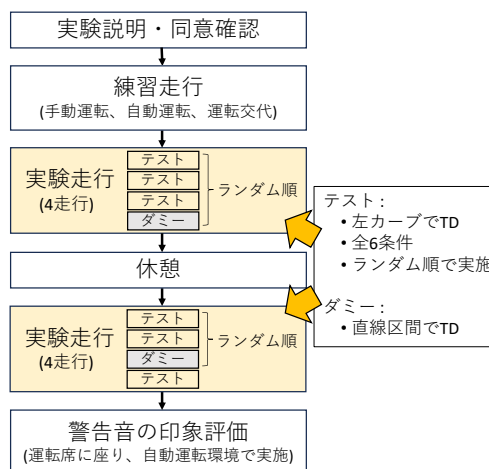


図 5 実験の流れ

既報²⁾では、二次タスクの中断後、直ちにスマートフォンを助手席に置き、運転を引継ぐよう指示した。一方、今回の実験では、端末側面にある電源ボタンを押して画面を消灯させ、助手席に設置した箱（縦160mm、横83mm、深さ53mm）に入れてから運転を引継ぐよう教示した。これは、現実の運転引継ぎ場面を想定した際、スマートフォンをむやみに放置するのではなく、画面を消灯し、小物入れなど安定した場所に置くことが多いと考えたためである。また、これら一連の動作にある程度時間を要するため、警告音の変化を確実に被験者に聴かせることができると考えた。

3. 2. 被験者

運転免許を保有する被験者を研究所外部から募集し、20歳代から50歳代の非高齢者16名（男性8名、女性8名、平均年齢38.8歳）が参加した。実験は交通安全環境研究所の「人間を対象とする倫理規定」に基づく事前審査を経ており、全被験者から同意を得た上で実施した。被験者には視力検査と聴力検査を実施し、実験の実施に問題がないことを確認している。

3. 3. 取得データ

実験中の被験者の動作を複数台のカメラを用いて毎秒30フレームで記録した。運転引継ぎ後の操作はドライビングシミュレータのログ機能を用いてサンプリング周波数60Hzで取得した。また、すべての実験が終了後、実験と同じ状態で警告音をランダムな順序で提示し、警告音に対する印象を8項目、7段階で評価させた。

4. 実験結果

4. 1. 警告音に対する主観評価

警告音の印象評価の平均値を図6に示す。6cpsは「危機感がないー危機感がある」「緊急感がないー緊急感がある」「些細なー重要な」「不明瞭なー明瞭な」「注意を引かないー注意を引く」の項目で評価値が高かった。2cpsは全体的に中立的な評価値（3-5）となり、「快いー不快な」では6cpsより「快い」側に評価された。エスカレーションの評価値は、8項目中7項目で2cpsと6cpsの中間となった。

断続音の断続周期の変化がドライバの緊急感や心理的負担に与える影響を調べるため、「緊急感がないー緊急感がある」「不快なー快い」の2項目に対して警告音（3水準）を一要因とする分散分析を行った。

緊急感については主効果が有意（ $F(2,30)=7.241$, $p<.01$ ）であり、Holm法による多重比較の結果、6cpsとエスカレーションが2cpsに対して評価値が高い（ともに $p<.05$ ）ことがわかった。一方、快不快について警告音の主効果は有意ではなかった。断続音の断続周期を変化させたことにより緊急感は一時的に上昇したものの、不快感の上昇は見られなかった。

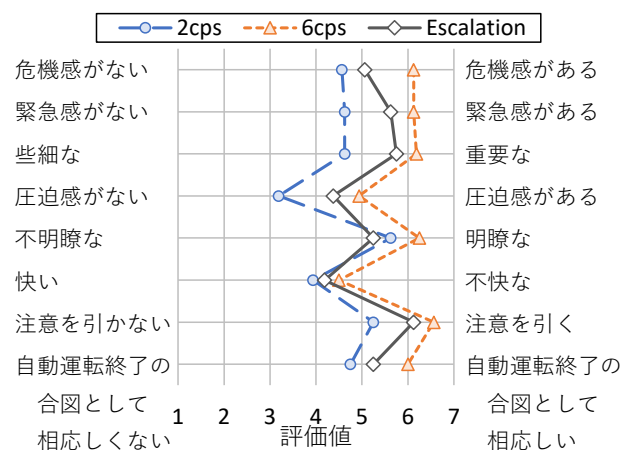


図6 警告音に対する印象

4. 2. 警告音に対する反応

警告音が提示されてから運転を引継ぐまでの行動について、以下の4種類の動作に着目し、警告音が鳴り始めてから各動作が観測されるまでの時間（反応時間）を実験映像から計測した。

- ・前を向く
- ・ステアリングを握る
- ・アクセルペダルに足を載せる
- ・アクセルペダルの踏み込みを開始する

反応時間の平均値と標準偏差を図7に示す。引継ぎに要した時間が10秒を超える事例や、エスカレーション条件にて警告音の変化前に引継ぎを終える事例はなかった。平均反応時間に対して警告音（3水準）と二次タスク（2水準）の二要因分散分析を行った結果、有意差は確認されず、エスカレーション条件は2cps条件、6cps条件と同等であった。既報²⁾では2cps条件と6cps条件の間に差は見られなかったものの、動画視聴条件の反応時間は計算条件よりも0.4秒程度長かった。今回の実験映像を確認したところスマートフォンの画面消灯に手間取る被験者がいたため、実験条件間の差が生じにくくなった可能性がある。

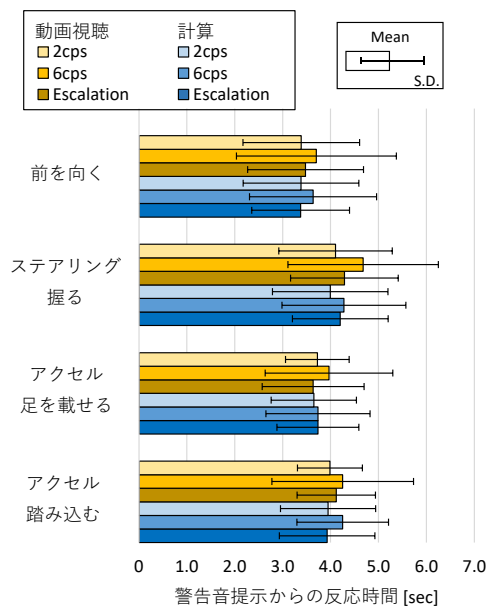


図7 警告音提示からの反応時間

4. 3. 車両挙動

運転引継ぎ後の走行の安定性を評価する一つの手法として、運転引継ぎ後 10 秒間の「進行方向の移動量に対する左右方向の移動量の割合」を求めた。条件ごとの平均値と標準偏差を図 8 に示す。値が小さいほど道路線形に沿って走行したことを意味しており、動画視聴、計算ともに、平均では 6cps 条件が最も小さく、次いでエスカレーション条件、そして 2cps 条件が最も大きかった。警告音 (3 水準) と二次タスク (2 水準) の二要因分散分析を行った結果、有意差は見られなかった。

既報²⁾では 6cps の条件においてこの指標が有意に小さかったものの、今回の実験では確認されなかった。今回の実験では TD と同時に警告音を開始し、運転引継ぎと同時に停止したため、警告音の提示時間は約 4 秒間であった。一方、既報²⁾では運転を引継いでも TD から 10 秒間持続する設定であった。そのため、警告音の提示時間が運転の安定度に影響した可能性があると考えられる。

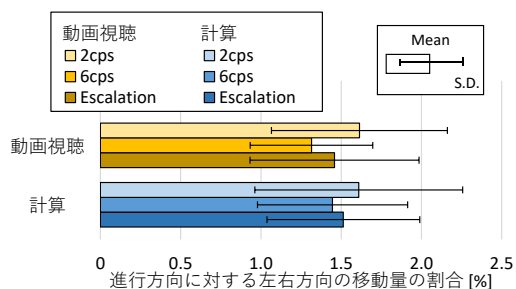


図8 進行方向に対する左右方向の移動量の割合

5. まとめ

自動運転から手動運転への運転引継ぎ時に用いる警告音について、断続周期の変化が運転引継ぎ行動に与える影響について調査を行った。

断続周期が毎秒 2 回 (2cps 条件)、毎秒 6 回 (6cps 条件)、2cps で開始し 2 秒後に 6cps に変化するもの (エスカレーション条件) の 3 種類を比較した。警告音の印象を評価したところ、断続周期の増加によって緊急度は上昇したものの、不快感は上昇しなかった。警告音に対する反応時間や運転引継ぎ後の車両挙動を比較した結果、エスカレーション条件は他の条件と同等であった。これらの結果より、エスカレーション条件は、断続周期が高い警告音により生じる不快感や緊迫感を抑えつつ、安定した運転引継ぎを促すことができると期待される。

今回の実験結果は既報²⁾と異なる傾向を示す部分が多かった。特に車両挙動の指標に、警告音の提示時間が影響した可能性が懸念された。TD は自動運転から手動運転への引継ぎを求める信号であるため、引継ぎが終了した時点で TD を停止することが自然と考えられる。しかしながら、警告音の持続により運転が安定するのであれば、一定時間警告を継続することが望ましいと考えられる。今後の実験により、運転引継ぎ時間の短縮や車両挙動の安定化に寄与する要因を特定する予定である。

参考文献

- 1) UN Regulation No.157, “Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to Automated Lane Keeping Systems”, E/ECE/TRANS/505/Rev.3/Add.156 (2021)
- 2) 阿部晃大, 加藤洋子, 関根道昭, 五十部健太, 速水亮, 戸井武司, “二次タスクと警報音が運転引継ぎ行動に与える影響”, 自動車技術会 2022 年秋季大会学術講演会予稿集, No.075, pp.1-6 (2022)
- 3) 関根道昭, 加藤洋子, 榎本恵, 五十部健太, 戸井武司, “自動運転中の二次タスクが運転引継ぎの安全性に及ぼす影響 (第 1 報) 二次タスクの分類と作業負荷の定量化に関する考察”, 自動車技術会 2021 年秋季大会学術講演会予稿集, No.086, pp.1-6 (2021)