

運転手の運動主体感及びそれに付随する行動と運動意図が一時的な運転支援によって受ける影響

東京大学 ○釜木 優人, 東京大学 温 文, 東京大学 尹 碩珉, 東京大学 山下 淳, 東京大学 浅間 一

1. 序論

近年自動運転技術は大きく進歩している。しかし現在の自動運転システムは依然として人間の監視者を必要とし、もし運転手が運転に従事していない場合、運転手がシステムからの要請に答えられず問題が生じる可能性がある。また、運転手の運転への従事は視覚的レベルではなく、認知的レベルで議論する必要がある [1]。運転手の認知を反映する指標として、本研究では運動主体感に着目した。運動主体感とは、ある運動を引き起こしているのは自分自身であるという主観的な感覚のことである。また、運動主体感が下がると事象への反応が遅くなることが先行研究により明らかになっている [2]。このように、システムの支援を受けて運動主体感が下がった状態で運転をすることは、運転手が運転に従事しなくなり、事象への反応が遅くなるため非常に危険である。そこで、運転手の運動主体感を維持できる運転支援システムの開発が重要である。

運転支援システムを使用する際の運転手の運動主体感に着目した研究は既に行われている。谷田ら [3] の研究により、一定時間運転手が運転支援を受け続けると運動主体感が低下することが分かった。しかし、この研究では一時的にシステムが介入するという条件は考慮されていない。現在実用化されている運転支援システムにおいて、このように車のハンドルや加減速を操作する主体（対応主体）が運転手からシステムに移る場合があるが、対応主体の変化による影響はまだ分かっていない。仮に運動主体感が低下した状態で、対応主体が再び運転手に戻ると危険である。

そこで本研究では、運転手が遭遇しうる危険として突然障害物が現れる状況を想定し、障害物回避のためシステムが一時的に運転手の代わりに車の制御を行う場合、運転手の運動主体感及びそれに付随する行動と運動意図への影響を調べることを目的とする。

2. 研究手法

2.1 概要

本研究ではドライビングシミュレータを使い、被験者に突然現れた障害物を避ける試行に取り組んでもらった。試行中、初めは支援なしで運転を行うが、障害物が出現すると同時にハンドル操作にシステムが介入し、被験者が回避行動をとる間一時的に支援を行う。このシステムの支援の程度を変えることで、運転手の行動や運動意図に違いが生まれ、運転手の運動主体感にも違いが生まれるのではないかと考えた。

2.2 運転条件

実験では障害物出現以降、運転支援の程度の違いにより以下の 3 つの運転条件を設定した。システムは図 1 のような目標軌道に車が従うよう、ハンドル操作を支援する。トルクのフィードバックは行わない。

- ・手動回避条件：ハンドル操作への介入なし。
- ・回避支援条件：運転手のハンドル操作 50 % システムの支援 50 % に切り替わる。
- ・自動回避条件：システムの支援 100 % に切り替わる。

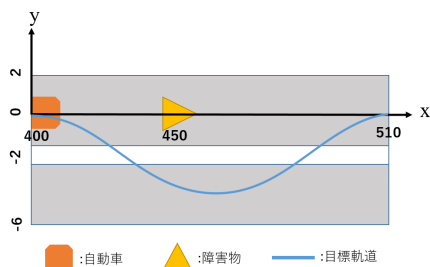


図 1 実験コース

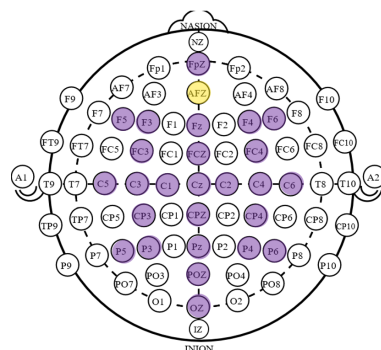


図 2 脳波の計測箇所

2.3 運動主体感の計測

1 つの試行が終わるごとに被験者に「障害物を避けて元の車線に戻る際に、車の動きに対してどのくらい自分のハンドル操作が効いたと感じたか」7 段階（1～7 の整数、7 が最大）で評価してもらった。

2.4 運動意図と行動の解析方法

運動意図を調べるために事象関連脱同期（event related desynchronization: ERD）に着目した。ERD とは刺激などの事象の前後である周波数成分の脳波の振幅が減少することをいう。ERD は、運動をする直前と運動をする最中に α 帯域や β 帯域において、対象となる運動に対応する運動野付近で発生する。ERD を測定することで運転支援下で運転手が運動意図を維持しているか調べた。また、運動意図に従い運転手が実際にどのような行動を取ったか調べるためハンドル操作に着目し、車の軌跡と合わせて行動を解析した。

3. 実験

3.1 実験方法

本研究では、健康者 20 名（平均年齢 23.1 歳：男性 15 名、女性 5 名）を被験者として実験を行った。本研究で行った実験の方法は以下の通りである。x 座標は図 1 で示すように、車の直進距離を表す。

(i) $x < 400$ m : 運転支援なしでコースに沿って運転する。コースは一直線に続く 2 車線の道路で、被験者は左車線になるべくはみ出さずに時速 60 km で運転してもらう。また、スタート地点は $x = -100, -50, 0, 50, 100$ m のいずれかからランダムに選ばれる。

(ii) $x = 400$ m : 車の前方 50 m に障害物が突然出現する。システムによる運転支援が始まる。

(iii) $400 < x < 510$ m : 被験者は障害物を右車線に移動することで避ける。その後、すみやかに左車線に戻る。

(iv) $x = 510$ m : システムの支援が終わる。

(v) $510 < x \leq 610$ m : 左車線の真ん中を走行する。

これを 1 試行とし、後述する 3 つの運転条件について 20 試行ずつ、合計 60 試行の実験を行った。データに偏りが生じることを防ぐため、試行の順番はランダムとした。また能動的に操作を行ってもらうため、被験者には各試行の運転条件について事前に知らせなかった。また、障害物を避ける際はブレーキ操作は行わずハンドル操作によって回避するよう指示した。

3.2 脳波の計測・解析

脳波の計測では先行研究 [4] にならい、拡張 10-20 法に従い図 2 のように脳波の計測位置を選択した。グランド電極を AFz、左耳朶 (A1) を基準電位とし、サンプリング周波数を 512 Hz とした。

解析では、0.5-60 Hz のバンドパスフィルタを施した後 3 サイクルの連続ウェーブレット変換を行った。障害物が現れる時間を 0 s とし、-1~0 s における脳波の振幅スペクトルの平均を基準として 0~6.8 s の振幅スペクトルの相対的变化 (event-related spectral perturbation: ERSP) を計算した。

3.3 結果

3.3.1 運動主体感の主観的評価

まず、運動主体感の平均は図 3 の通りとなった。エラーバーは標準誤差を表す。運動主体感の各運転条件での平均値 (± 標準誤差) は、手動回避条件で 6.3 ± 0.2 、回避支援条件で 3.7 ± 0.2 、自動運転条件で 2.1 ± 0.2 であった。

3.3.2 被験者のハンドル操作及び車の軌跡

次に、各運転条件における被験者自身が操作するハンドルの角度の平均及び車の軌跡を図 4 に示す。この角度はハンドルを右に回したとき負の値、左に回したとき正の値を取る。3 条件を比べるため、(i) $x = 460$ m 付近における左に回したハンドル角度 (絶対値) の最大値と (ii) $x = 500$ m 付近における右に回したハンドル角度 (絶対値) の最大値に着目した。また、 x 座標は図 1 で示したように、車の直進距離を表し、 y 座標は車の横方向の変位を表す。

3.3.3 ERD の変化

まず、各電極における α 帯域の脳波について、ERSP の平均を 0 ~ 6.8 s の間 0.2 s の時間窓で求めた。そして 3 つの運転条件について、被験者間の平均を取り、ERSP の時間変化を調べた (図 5)。その結果、3 つの運転条件で 0.5 s 以降 ERS の減少 (ERD) が見られた。エラーバーは標準誤差を表す。

4. 考察

運動主体感は手動回避条件で最も大きく、次に回避支援条件、自動回避条件の順になった。また、反復測定による分散分析を行った結果、3 条件間で有意な差があった。この結果より、回避支援条件で手動回避条件よりは運動主体感が下がるが、自動回避条件よりは

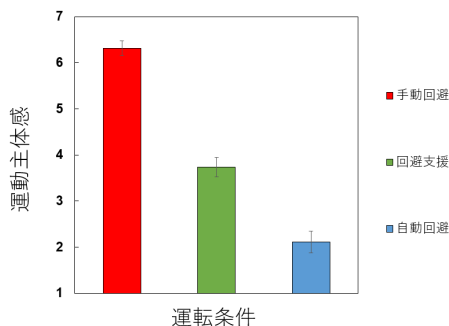


図 3 各運転条件における運動主体感

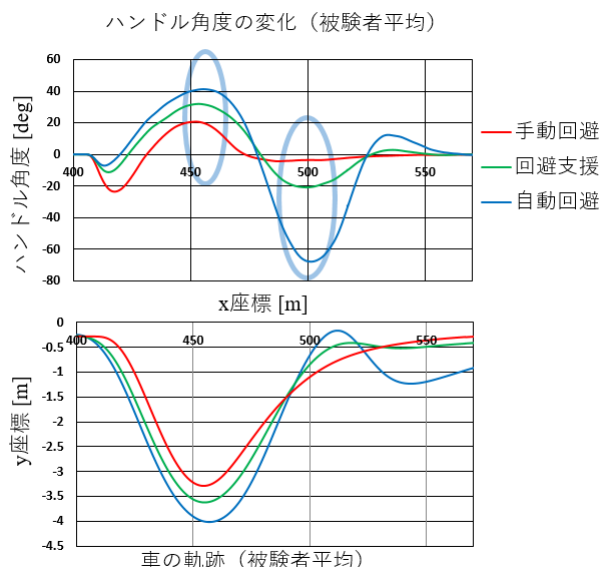


図 4 ハンドル角度の変化及び車の軌跡

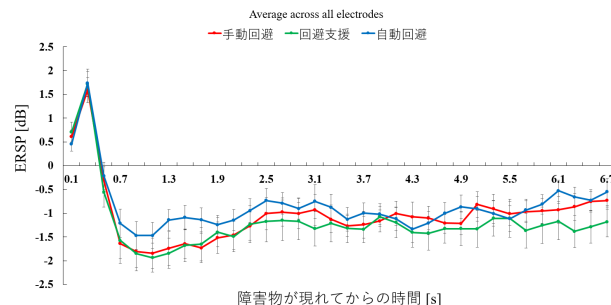


図 5 ERS の変化

運動主体感が保たれることが分かった。ここから、一時的な運転支援下で運転手の操作を完全に無効にせず、操作余地を残すことで運動主体感の低下を抑制できると考えられる。

次にハンドル操作の変化について、(i) は障害物を避けた後元の車線に戻るために被験者が行ったハンドル操作、(ii) は元の車線に車がおおよそ戻った後におけるハンドル操作を反映している。(i) と (ii) について、反復測定による分散分析を行った結果 3 条件間で有意な差があった。

グラフを見ると (i), (ii) を与える x 座標において、共に手動回避条件の軌跡と比べて回避支援条件・自動回避条件で車の軌跡に差が大きく生じている。ここから、被験者は自身の想定している軌跡 (手動回避条件の軌跡) との差を埋めるためにこのようなハンドル操作を行おうとしたと考えられる。特に (ii) においては、自動回避条件において車がほぼ元の車線に戻っていたにもかかわらず、右にハンドルを平均 60deg 以上切っていた。これは、被験者は車を自身の想定している軌道に合わせようとハンドルを操作するが、自動回避条件では運転手のハンドル操作が無効なため、自身のハンドル操作が車の動きに反映されず、ハンドル操作を抑制することなくこのような極端なハンドル操作を行ったと考えられる。そして、510m 以降運転手に対応主体が戻った際、自動回避でハンドルが戻しきれずに車の軌道が不安定になる傾向が見られた。回避支援条件では、(ii) において右にハンドルを切っているが、自分の操作が有効であるため自動回避条件のような極端なハンドル操作とはならず、510m 以降の軌跡も安定した。ここから、一時的な運転支援下で運転手の操作を完全に無効にせず、操作余地を残すことで対応主体が運転手に戻った後の運転操作の安定につながると考えられる。

ERD については、0.5~6.7 s 間の ERD の平均値を求め、反復測定による分散分析を行った。その結果、3 つの運転条件間で有意差は見られなかった。この結果から、被験者はシステムの介入に気づいた後も車をコントロールする運動意図を比較的維持していた可能性が考えられる。

5. 結論

本研究の結果から、一時的な運転支援下で運転手のハンドル操作を残すことで、完全な自動化よりも運動主体感が保たれ、運転支援が終わり対応主体が運転手に戻った後の運転操作の安定に繋がることが分かった。今後の展望としては運転手の運動主体感や行動、運動意図の関係を明確にし、より安全な運転支援システムの設計に役立つ知見を提供することを目指す。

参考文献

- [1] T.W. Victor, E. Tivesten, P. Gustavsson, J. Johansson, F. Sangberg and M.L. Aust: "Automation Expectation Mismatch: Incorrect Prediction Despite Eyes on Threat and Hands on Wheel", Human Factors, Vol. 60, pp. 1095-1116, 2018.
- [2] M. R. Longo and P. Haggard: "Sense of Agency Primes Manual Motor Responses", Perception, Vol. 38, pp. 69-78, 2009.
- [3] 谷田 公二, 片岡 俊樹, 船橋 健司: "自己主体感に基づく運転支援システム設計の研究", 自動車技術開論文集, Vol. 49, no. 5, pp. 1018-1023, 2018.
- [4] W. Wen, A. Yamashita and H. Asama: "Measurement of the Perception of Control during Continuous Movement using Electroencephalography", Frontiers in Human Neuroscience, Vol. 11, Article 392, 2017.