

安藝研究室

井梅 拓海, 國枝 航輝, 添野 航也

Aki Lab.

Takumi IUME, Kouki KUNIEDA, Kouya SOENO

This paper deals with a lane-keeping control under a tire blowout using a driving simulator. It is necessary to tilt a driver's seat to give a driver a realistic feeling of the tire blowout in a driving simulator experiment. Therefore, a small motion platform was integrated into a stationary driving simulator for reproducing the tire blowout situation. Using this movable driving simulator, three kinds of experiments were carried out: (1) To measure driver's driving characteristics based on differences in occurrence positions of tire blowout, (2) To examine effectiveness of assist to driver by auditory information after a tire blowout, and (3) To conform effectiveness of lane-keeping control system.

1. 緒言

高速道路において、走行中のタイヤバースト及びパンク等のタイヤ異常の発生が目立ちつつあり、しかし、関連した研究は極めて少ないのが現状である。そこでタイヤバースト発生時の運転支援トルクによる車線維持制御を目指し、先行研究²⁾で扱ったドライビングシミュレータ(以下 DS)にモーション装置を組み込み、可動式 DS を構築した。タイヤバースト発生時にドライバにより臨場感を与えられる DS を用いて(1)バースト後の前後左右輪でのバースト後の運転特性調査、(2)音声案内、警報によるドライバの異常行動低減の検討、(3)バースト後の車線維持支援システムの評価を行った。

2. 車両モデル

今回用いるのは図 1 に示す平面 2 自由度 4 輪車両モデルである。バーストが発生するとタイヤ内の空気の流れによりタイヤ径が減少し、リム径へと変化する。タイヤ径の変化によって、幾何学的にバーストによる舵角が生じる。地上固定の X-Y 座標系に対する車両横偏差を y_{cr} 、車両のヨー角を ϕ 、車速を V 、重心から前輪及び後輪までの距離を l_f と l_r 、各タイヤ横力を $F_1 \sim F_4$ 、前輪舵角を δ_f 、重心点での横滑り角を β 、前輪及び後輪での横滑り角を β_f と β_r 、フロント及びリアのトレッドを d_f 、 d_r とする。角度は反時計回りを正とする。

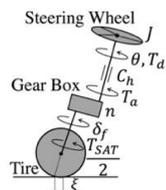
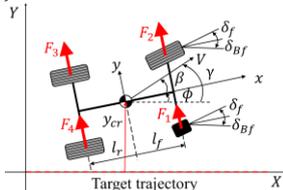


Fig. 1 Four-wheel vehicle model with blowout on right front wheel

図 1 のモデルにおける車両の運動方程式を式に示す。

$$\begin{aligned} m\ddot{y}_{cr} &= F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \\ I\ddot{\phi} &= l_f(F_1 + F_2) - l_r(F_3 + F_4) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、車両質量を m 、重心回りの慣性モーメントを I とする。タイヤモデルはタイヤ横力が横すべり角に比例する線形モデルを使用した。

また、図 2 の操舵系の運動方程式は以下のように表せる³⁾。

$$J\ddot{\theta} = -C_h\dot{\theta} + T_{SAT} + T_a + T_d \quad (2)$$

セルフアライニングトルクはトレール ξ とタイヤ横力に比例するモデルを使用した。

3. 制御系設計

状態変数を式(3)、状態方程式を式(4)にそれぞれ示す。ここで、 $u_1 = T_a$ (制御入力)、 $u_2 = T_d$ (ドライバ入力)、 $w = \delta_B$ (バーストにより生じる舵角 $\delta_B = \delta_{Bf}$ or δ_{Br}) とする。

$$\mathbf{x} = [y_{cr} \quad \dot{y}_{cr} \quad \phi \quad \dot{\phi} \quad \theta \quad \dot{\theta}] \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}_1u_1 + \mathbf{B}_2u_2 + \mathbf{B}_3w \quad (4)$$

ドライバと運転支援システムの協調性を考慮し、操舵制御トルク T_{LQ} に重み係数 w_0 をかけて操舵支援トルク T_a とする。

先行研究²⁾の LQ 制御のみでは車線復帰時に定常偏差が残る。これを支援システムとドライバ間の競合の一因になると考え、目標車線中央との定常偏差に対する積分器を組み込んだ LQI 制御を用いた制御系を導入し、制御入力を設計する。

図 3 に車線維持システムの概要を示す。本システムでは、トルクによる操舵支援とともに、バーストの発生を検知すると聴覚情報を提示する。

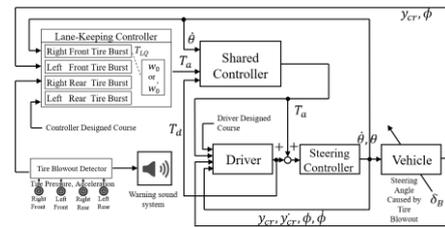


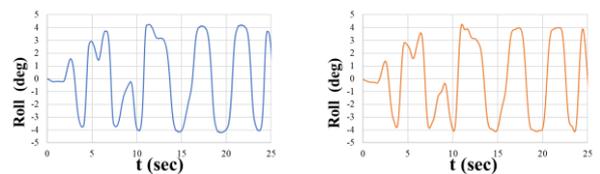
Fig. 3 Lane-keeping assistance system under tire blowout

4. DS 実験

4.1 実験装置

4.1.1 モーション装置導入

固定式 DS のシート下部に小型モーション装置(SIMVR 6DOF)を組み込み、可動式 DS を構築した。これにより、バースト時の急な姿勢変化が再現され、臨場感の高いタイヤバースト実験が可能となった。モーション装置を姿勢制御するため CarSim から Simulink に送られた車両姿勢データをさらに UDP 通信により装置に送信し連携を行う。装置の挙動とシミュレーション結果が一致するようにロール各とピッチ角及び、それぞれの角加速度にスケールファクタを乗じてチューニングした。図 4 にロール角の時刻歴応答の比較を示す。



(a) Command value (b) Achieved motion
Fig. 4 Comparison between command value and achieved motion

4.1.2 実験装置概要

装置の外観を図 5 に示す。CarSim Driving Simulator とステアリングコントローラ(SENSO-Wheel SD-LD)を使用した。



Fig. 5 Movable driving simulator.

タイヤバーストを再現するため文献⁴⁾よりタイヤの縦力及び横力を 1/10 倍、転がり抵抗の増加による旋回を再現するため転がり抵抗を 30 倍とした。

4.2 実験方法

運転免許を保有する 20 代 19 名を対象に、DS を用いた高速道路運転時のハンドル操作、車両軌跡および皮膚電位を計測した。また本実験は一般社団法人人間生活工学研究センターの倫理審査による承認を得て実施した。

4.3 実験条件

(1) 走行実験 1 は図 6 のようにバースト位置がドライバ挙動に与える影響を計測するものである。実験条件をまとめたものを表 1 に示す。

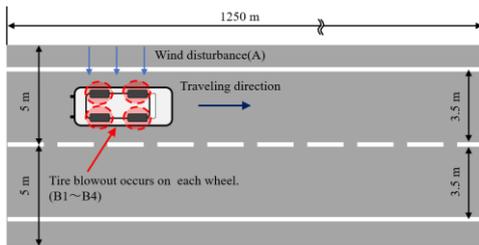


Fig. 6 Driving scenario
Table1 Experiment 1 condition.

Conditions	Driving conditions	Blowout condition	Auditory information	Steering support	Participants
A	Normal driving	—	—	—	
B1	Blowout	Right front	OFF	OFF	1, 3, 17
B2		Left rear			5, 7
B3		Left front			2, 4, 19
B4		Right rear			6, 8

(2) 走行実験 2 はバースト後の聴覚情報提示の効果を評価する。(3) 走行実験 3 は操舵支援システムの評価をする実験である。これらの実験条件をまとめたものを表 2 に示す。

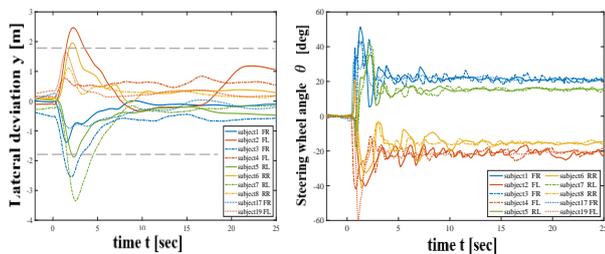
Table2 Experiment 2, 3 condition.

Conditions	Driving conditions	Blowout condition	Auditory information	Steering support	Participants
B	Blowout	Right front	OFF	OFF	1, 3
C			OFF	ON	
D			OFF	OFF	9, 10
E			Buzzer	ON	
F			Auditory information(1)	OFF	14, 18
G			Auditory information(1)	ON	
H			Auditory information(2)	OFF	15, 16
I			Auditory information(2)	ON	

4.5 実験結果

(1) 走行実験 1

実験 1 の車両横偏差と操舵角の時刻歴応答を図 7 に示す。姿勢変化の影響で後輪バースト直後に逆ハンドルを切る傾向が見られる。また、後輪の方が横変位の立ち上がりが遅いが、車線中央付近へと復帰できている傾向がある。前輪では車線復帰後も修正操舵が比較的多く見られる。

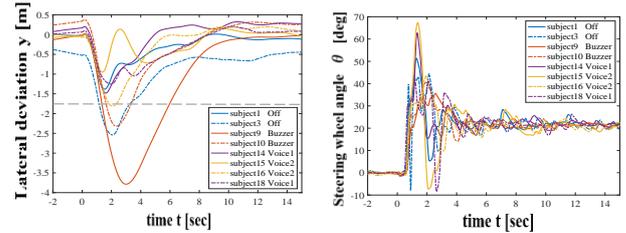


(a)Lateral deviation (b)Steering wheel angle
Fig. 7 Lateral deviation and Steering wheel angle (Exp.1)

(2) 走行実験 2

実験 2 (条件 B,D,F,H) の車両横偏差とハンドル角の時刻歴応答を図 8 に示す。音声案内による横変位量への効果はおよそ確認できない。音声が届く前にドライバは既に姿勢変化によりバーストを感知しているためと考えられる。ブザー音では逸脱が大きくなる場合もあり、インタビューよりブザー

音に恐怖感を感じていた影響も考えられる。音声提示には好印象が多く心理的な側面では効果的という声が多かった。

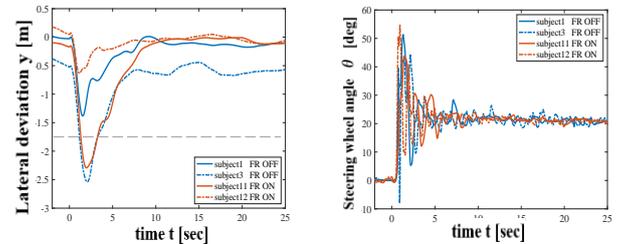


(a)Lateral deviation (b)Steering wheel angle

Fig. 8 Lateral deviation and Steering wheel angle (Exp.2)

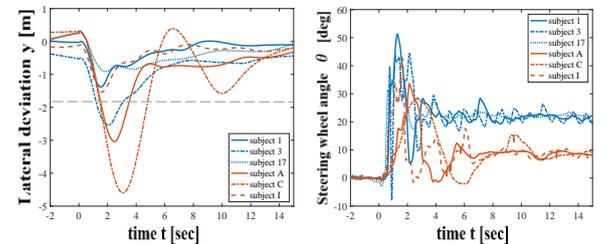
(3) 走行実験 3

実験 3(条件 B,C)の車両横偏差と操舵角の時刻歴応答を図 9 に示す。制御有では、車線中央へ滑らかに復帰しており、復帰後の修正操舵も少ない。一方逸脱量は制御の有無で大きな差はない。インタビューにてバースト直後の制御介入は感じ取り辛いとの声も多かった。原因として、可動式 DS を実装により被験者のバーストへの反応速度が向上したと考えられる。そこで図 10 に定置式 DS を用いていた先行研究²⁾との制御無しでの応答の比較を示す。Subject A, C, I が先行研究²⁾の結果である。この図から、復帰操舵開始の早まりにより横偏差が減少していることが確認できる。



(a)Lateral deviation (b)Steering wheel angle

Fig. 9 Lateral deviation and Steering wheel angle (Exp.3)



(a)Lateral deviation (b)Steering wheel angle

Fig. 10 Lateral deviation and Steering wheel angle
(Comparison with ref.2)

5. 結論

構築した可動式 DS を用いた実験により、各タイヤでのバースト後の運転特性と、右前輪バースト時のトルク制御と聴覚情報提示の効果が確認された。今後は、より適切な音声提示内容の検討やバースト直後と復帰後で制御ゲイン切替により、さらに効果的な支援システムへの実現を目指す。

引用文献

- 1) 本宮嘉弘, 井上浩史, 福山邦男: 走行中のタイヤバーストが車両挙動に及ぼす影響, 日本機械学会第 13 回交通・物流部門大会論文集, (2004), pp.255-258.
- 2) 高橋直希: タイヤバースト発生時の運転支援トルクによる車線維持制御およびドライバと運転支援トルク間に生じる競合の低減に関する研究, 日本大学大学院理工学研究科 修士論文, (2023)
- 3) 安部正人: 自動車の運動と制御-車両運動力学の理論形成と応用-, 東京電機大学出版局, (2012).
- 4) Wang, F., Chen, H., and Cao, D: *Nonlinear Coordinated Motion Control of Road Vehicles after a Tire Blowout*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.24, No.3, (2016), pp.965-970.