

Investigating the effect of urgency and modality of pedestrian alert warnings in driver acceptance and performance

David R. Large, Hyungil Kim, Coleman Merenda, Samantha Leong, Catherine Harvey, Gary Burnett, Joseph Gabbard. (2019)

Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 60, 11-24

2024/05/28 輪講
ブン

VRU事故の現状

- ヨーロッパでは交通事故の40%, 世界では約50%が交通弱者 (VRU) に関係している (WHO, 2015)
- 歩行者が特にリスクが高く、車両乗員より1.5倍のリスクで致命的な負傷を負う (Beck et al., 2007, Clifton et al., 2009)
 - 都市部で歩行者関連の事故が多発 (Graves et al., 2013)
 - 横断歩道外で歩行者の死亡事故の80%以上が発生 (Yanagisawa et al., 2014)
 - 歩行者が障害物のない直線道路を横断するシナリオが最も一般的、死亡の主な原因となる (PROSPECT, 2016)

歩行者安全システムが発展

歩行者安全システムの進展

- このシステムは、ドライバーに衝突のアラームを与え、衝突が差し迫った場合には自動的にブレーキや回避行動を取る
 - ヨーロッパでは年間2100人以上の死亡者と62900人以上の負傷者を減少させる可能性がある (Silla et al., 2015)

システムのアラーム

- すべてのシステムは、行動を起こす前にドライバーにアラームを提示、アラームは、リスクレベルに応じて緊急度を増やして提供
- PROSPECTシステム (2017) は2種類のアラームを提供
 - 「早期アラーム」：VRUと車両の進行予測に基づく情報アラーム、速度は考慮されない
 - 「緊急アラーム」：予測された進行経路の幾何学的特性と衝突までの時間 (TTC) を考慮し、音声と視覚でアラーム
- DaimlerシステムはTTCで3段階のアラームを提供
 - TTC 4s (早期アラーム)、TTC 2.6s (アラーム)、TTC 1.1 (緊急アラーム、ブレーキをかける)

システムのFalse Alarm

- 歩行者の動的な行動（進行方向や速度の急な変更、突然の停止や開始）により、False Alarmの増加が予想される
 - 特に早期アラームは、技術の制約（センサーの範囲、検出アルゴリズムの精度）や歩行者の行動の特異性により精度が低下し、False Alarmの数が増える
 - 例: 歩行者が道路を横断するつもりで歩道に近づいたが、歩道で止まる場合、システムが歩行者を潜在的な危険と認識してドライバーにアラームを提示する可能性がある
- 初代の歩行者安全システムは、全歩行者の20 ~ 30%をMiss、10回のアラームに1回のFalse Alarmを発生（Zhang et al., 2016）

False Alarmの影響

- False Alarmの発生とその頻度は、ドライバーのシステムに対する受容に悪影響を与える
 - システムを無視したり、無効にすることを促す可能性がある
(Parasuraman and Riley, 1997)
- False Alarmを最小限に抑え、ドライバーの受容を向上させるために、いつどのようにアラームを提示するかの研究が重要

受容と決定要因

- 受容: 個人がシステムを運転に取り入れる度合い、またはシステムが利用できない場合に使用しようとする意図 (Adell, 2009)
- 受容は、システムに対する信頼 (trust)、信用 (confidence)、または煩わしさ (annoyance) などの要因に影響される
- 受容はドライバーのリスク認識と関連 (Sheridan, 2008)
 - ドライバーは、自分がすでに潜在的な脅威と認識している状況で提示されたアラームを受け入れやすい (Källhammer and Smith, 2012)
 - **アラームの提示タイミングが重要**

アラームのタイミングの影響

- 歩行者安全システムには、アラームの提示タイミングが重要である
 - 早すぎるアラームは、ドライバーにFalse Alarmと解釈され、将来のアラームへの注意を減少させる可能性がある (De Boer et al., 2010)
 - 遅すぎるアラームは (短い**TTC**)、実用性が低く、ドライバーに驚きを与え、ブレーキプロセス中の反応と性能に悪影響を与える可能性がある (Lee et al., 2002)

アラームの提示方法

- 視覚フィードバック:
 - 伝統的な視覚ディスプレイ: ドライバーの注意を道路から逸らす可能性があり、表示位置が前方視野から遠いほど、目を離す時間が長くなる
 - HUD (ヘッドアップディスプレイ)
 - HUDは、運転者の通常の視野に透明なディスプレイを使用して視覚情報を提示する。HUDは情報を運転者の前方視線内に直接提示し、視線を下げたり逸らしたりすることなく情報にアクセスできる
 - アラームシステムの文脈では、HUDを使用した視覚フィードバックは脅威の位置を早期に特定するのに役立つ

アラームの提示方法

- 聴覚フィードバック
 - アラームの認識を高め、意味的な関連付けを提供し、ドライバーの反応を改善する
- マルチモーダルフィードバック:
 - 聴覚と視覚情報を組み合わせた「マルチモーダル」フィードバックは、反応時間を短縮し、空間注意の再定位に効果的である
 - 場合によって、単一フィードバックが適している場合もある (PROSPECT, 2017)

本研究の目的

- 本研究は、歩行者安全システムによって検出された危険な歩行者に関連するアラームの緊急性（アラームタイミング）とモダリティ（提示方法）の影響を調査することを目的とした

実験手続き

- 参加者: ドライバー24名 (男性15名、女性9名)
- 年齢: 19歳 ~ 55歳
- 運転経験: 2年以上が必要、平均10.7年

実験装置と環境

- 固定式運転シミュレーター
 - 270度の前方および側面の画像を提供する曲面スクリーン内に配置された自動車から構成される
 - 3台のオーバーヘッドHDプロジェクターと後方およびサイドミラーディスプレイを備えている

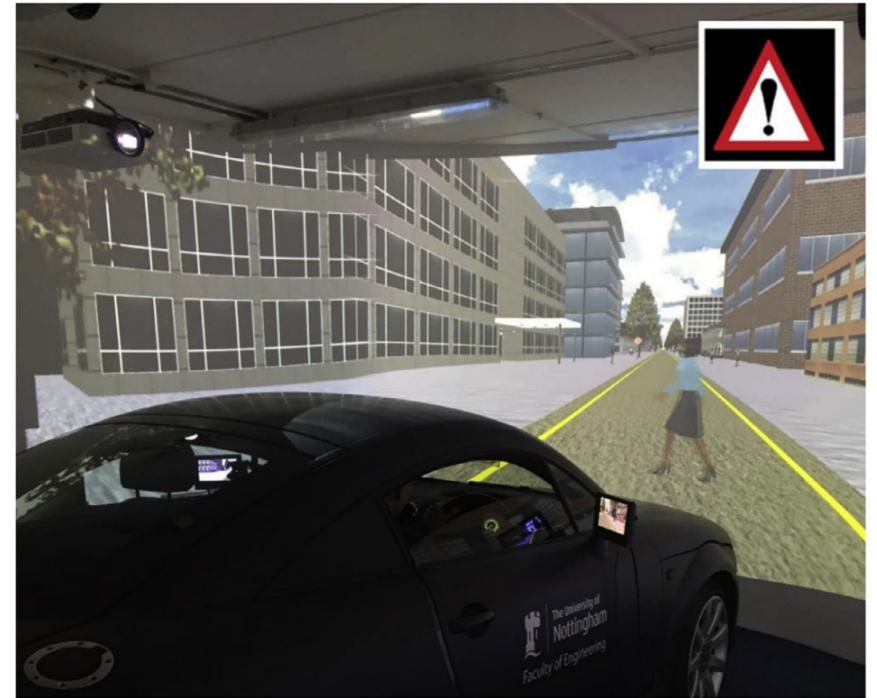


Fig. 1. Driving simulator showing urban high-street scenario and pedestrian crossing road ahead, with visual alert icon that was presented on the HUD (inset).

運転シナリオ

- 運転シナリオはSTISIM Driveを使用して作成され、都市環境を通る直線の片側車線の道路を再現し、横断歩道はない
- 歩道には、50feetごとに、5～10人の歩行者がランダムに配置され、道路に平行して前後に歩いたり、道路に向かって立っているだけの状態であった
- これらの歩行者は、「視覚的に混雑な都市」の背景として提供され、**危険な歩行者**（道路に向かって歩く歩行者）を識別することが容易でないようにした

運転シナリオ

- 危険な歩行者

- 5人の歩行者がランダムな距離に配置され、道路を横断する意図があるかのように路側に近づく
- 各危険な歩行者は、最初に道路から約1メートル離れて静止しており、道路を向いて立っていた
- シナリオに応じて、一部の危険な歩行者は道路を横断し続け、他の歩行者は路側で停止した
- すべての危険な歩行者はシステムによって検出され、横断しない歩行者はFalse Alarmを引き起こす（システムが歩行者の存在を正確に検出したが、道路に入る意図を誤って予測した）

実験手続き

- 緊急性
 - 緊急性はTTCによって定義、TTCは5.0秒（FA率 80%）から2.0秒（FA率 20%）まで、4条件を設定
 - TTCとFA率の間に線形関係を適用し、長いTTCで提示されるアラームに関連するFA率が高くなるようにした（Keller and Gavril, 2014）
- モダリティ
 - 3条件を設定
 - 聴覚アラーム: 75dBで車内に提示
 - 聴覚アラーム + 視覚アラーム: HUDで高コントラストのアイコンを提示
 - アラームなし
 - 視覚と聴覚アラームは空間的に一致して提示

実験手続き

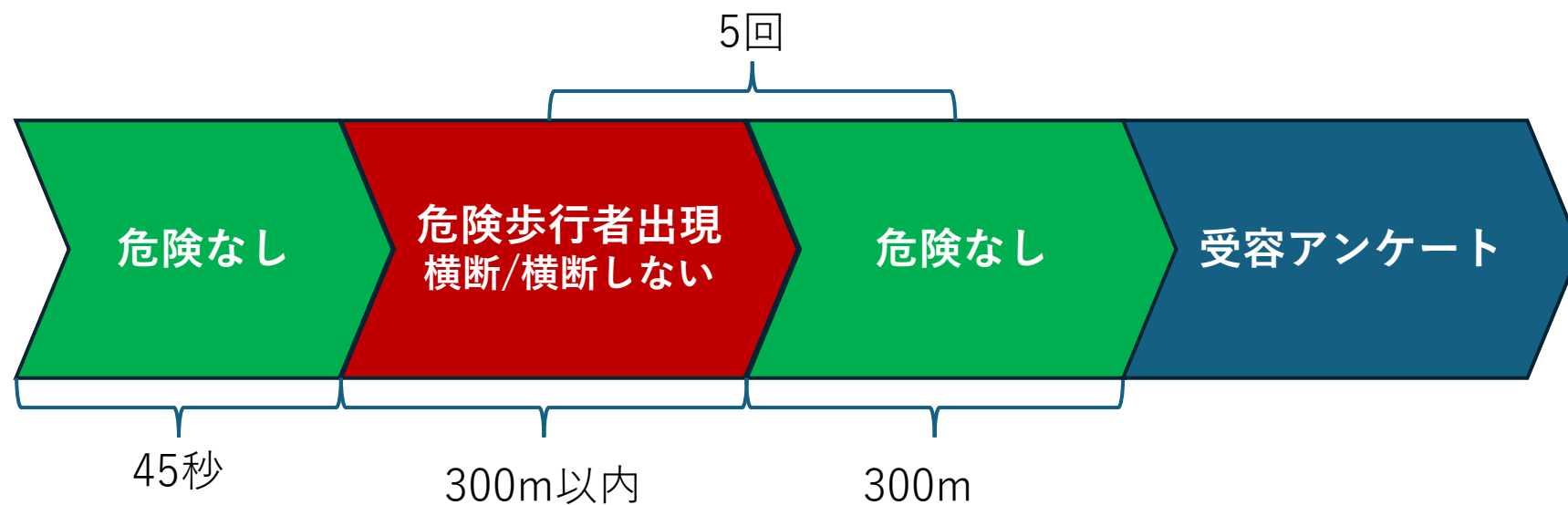
- 走行シナリオ
 - 参加者は、全部で12回（3（モダリティ）× 4（緊急性））の走行を完了
 - 各条件はカウンターバランスを取った

Table 1

Twelve scenarios completed by all participants, showing TTCs and false alarm rates (i.e. number of pedestrians who did not step into the road but were nevertheless highlighted by the PCDS).

Urgency Level	TTC (when warning presented)	Audio Only (4 scenarios)	Combined (Audio + HUD) (4 scenarios)	No Warning (4 scenarios)
L1	2.0-s	20% (1 in 5)	20% (1 in 5)	20% (1 in 5)
L2	3.0-s	40% (2 in 5)	40% (2 in 5)	40% (2 in 5)
L3	4.0-s	60% (3 in 5)	60% (3 in 5)	60% (3 in 5)
L4	5.0-s	80% (4 in 5)	80% (4 in 5)	80% (4 in 5)

タイムライン



受容アンケート

- 7項目に構成される (Brooke, 1996)
 - 11段階で評価 (0 = 「not at all」 から 10 = 「completely」)
- (1) Overall, how much do you trust the system? (信頼 Trust)
- (2) How confident are you that the system will be able to cope with all situations in the future? (信用 Confidence)
- (3) How annoying was the system? (煩わしさ Annoyance)
- (4) How likely would you be to use the system if it was available in your own car? (望ましさ Desirability)
- (5) To what extent can the system's behaviour be predicted from moment to moment? (予測可能性 Predictability)
- (6) To what extent can you count on the system to do its job? (依存性 Reliance)
- (7) To what extent will the system's actions have a harmful or injurious outcome? (リスク Risk)

パフォーマンスの測定

- パフォーマンスはシミュレーターソフトウェアと視覚行動からのデータに基づいて決定された
 - TTC(s) @ gaze on PED
 - TTC(s) @ foot off accelerator
 - TTC(s) @ foot on brake
 - Headway(m) @ car stopped

実験結果_アンケート

Table 3
Drivers' acceptance, reported by subjective ratings, showing means (standard error of the means, corrected for within-subject variability) in each experimental condition.

Modality (HMI)	Urgency	Trust	Confidence	Annoyance	Desirability	Predictability	Reliance	Risk
Audio	L1	5.7 (0.42)	5.6 (0.42)	4.5 (0.43)	5.1 (0.47)	6.0 (0.39)	6.4 (0.38)	5.4 (0.47)
Audio + HUD	L1	6.6 (0.42)	6.3 (0.42)	4.7 (0.43)	5.8 (0.48)	6.1 (0.39)	6.5 (0.38)	5.1 (0.47)
Audio	L2	6.6 (0.42)	6.4 (0.43)	4.9 (0.43)	5.8 (0.48)	6.7 (0.39)	7.2 (0.38)	5.3 (0.47)
Audio + HUD	L2	7.1 (0.42)	6.9 (0.42)	4.5 (0.43)	6.0 (0.48)	6.8 (0.39)	7.5 (0.38)	4.6 (0.47)
Audio	L3	7.0 (0.42)	6.6 (0.42)	4.5 (0.43)	5.8 (0.47)	6.6 (0.39)	7.3 (0.38)	4.6 (0.47)
Audio + HUD	L3	6.9 (0.42)	6.9 (0.42)	4.5 (0.43)	5.9 (0.47)	7.2 (0.39)	7.4 (0.38)	4.6 (0.47)
Audio	L4	6.4 (0.42)	6.3 (0.42)	4.5 (0.43)	5.8 (0.48)	6.6 (0.39)	6.8 (0.38)	4.7 (0.47)
Audio + HUD	L4	6.7 (0.42)	6.5 (0.42)	5.0 (0.43)	5.8 (0.48)	6.7 (0.39)	7.2 (0.38)	4.7 (0.47)

実験結果_アンケート

- 2要因分散分析を行なった
 - 緊急性の主効果:
 - 信頼 ($p < .01$)、信用 ($p < .01$)、望ましさ ($p < .05$)、予測可能性 ($p < .001$)、依存性 ($p < .01$)、リスク ($p < .05$)
 - モダリティの主効果:
 - 信用 ($p < .05$)

Table 4

Main and interaction effects of the urgency and modality of PCDS on driver subjective ratings (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$).

Effect	Trust	Confidence	Annoyance	Desirability	Predictability	Reliance	Risk
Urgency	F(3, 137.1) = 5.111**	F(3, 69.0) = 4.148**	F(3, 67.9) = 0.660	F(3, 137.1) = 2.843*	F(3, 68.1) = 6.021***	F(3, 68.8) = 5.534**	F(3, 67.8) = 3.623*
Modality	F(1, 22.7) = 2.586	F(1, 23.0) = 4.590*	F(1, 22.9) = 0.082	F(1, 23.0) = 1.036	F(1, 22.9) = 0.471	F(1, 22.9) = 0.932	F(1, 21.9) = 1.069
Urgency * Modality	F(3, 137.1) = 1.868	F(3, 69.0) = 0.535	F(3, 68.6) = 1.703	F(3, 137.1) = 1.308	F(3, 68.5) = 1.115	F(3, 68.8) = 0.389	F(3, 69.2) = 0.961

実験結果_アンケート

- 緊急性

- 信頼、信用、望ましさ、予測可能性、依存性:

L1 < L2、L1 < L3

- リスク:

L1 > L3

- モダリティ

- 信用

音声のみ < 音声+HUD

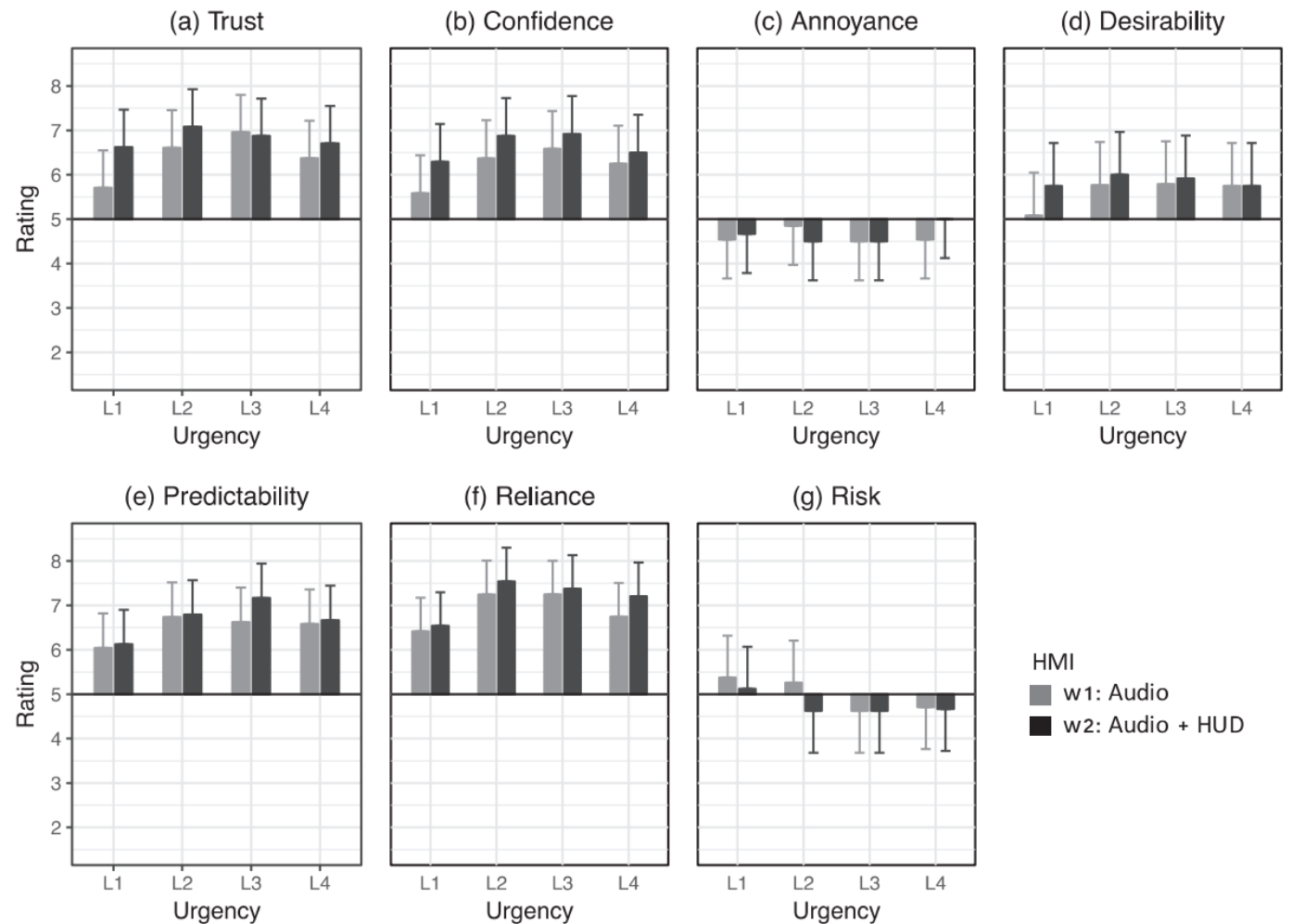


Fig. 2. Drivers' subjective ratings by urgency and modality, where 0 = 'not at all' and 10 = 'completely', with 95% confidence intervals.

運転パフォーマンス

Table 5

Driving performance measures, reported by surrogate safety metrics – means (standard error of the means, corrected for within-subject variability) in each experimental condition.

Modality (HMI)	Urgency	TTC (s) @ Gaze on Pedestrian	TTC (s) @ Foot off Accelerator	TTC (s) @ Foot on Brake	Headway (m) @ Car Stopped
None	L1	1.59 (0.12)	1.42 (0.02)	1.05 (0.04)	18.44 (1.56)
Audio	L1	1.43 (0.11)	1.46 (0.02)	1.11 (0.04)	20.49 (1.67)
Audio + HUD	L1	1.39 (0.09)	1.47 (0.02)	1.12 (0.04)	21.03 (1.71)
None	L2	2.31 (0.14)	2.26 (0.02)	1.56 (0.05)	37.41 (3.08)
Audio	L2	2.44 (0.14)	2.37 (0.03)	1.73 (0.05)	44.39 (3.61)
Audio + HUD	L2	2.36 (0.13)	2.42 (0.03)	1.71 (0.05)	43.65 (3.55)
None	L3	2.84 (0.17)	3.05 (0.03)	1.87 (0.06)	41.57 (3.47)
Audio	L3	3.23 (0.19)	3.28 (0.03)	2.22 (0.07)	57.48 (4.68)
Audio + HUD	L3	3.07 (0.16)	3.33 (0.04)	2.22 (0.07)	54.10 (4.40)
None	L4	3.12 (0.18)	3.42 (0.04)	2.28 (0.07)	42.50 (3.50)
Audio	L4	3.44 (0.19)	4.23 (0.05)	2.85 (0.09)	64.69 (5.41)
Audio + HUD	L4	3.74 (0.20)	4.33 (0.05)	3.14 (0.10)	64.20 (5.29)

Table 6

Main and interaction effects of the urgency and modality of PCDS on surrogate safety metrics ($^{\#}p < 0.1$, $^*p < 0.05$, $^{**}p < 0.01$, $^{***}p < 0.001$).

Effect	TTC (s) @ Gaze on Ped.	TTC (s) @ Foot off Acc.	TTC (s) @ Foot on Brake	Headway (m) @ Car Stopped
Urgency	F(3, 44.6) = 89.94***	F(3, 67.4) = 5037.10***	F(3, 67.6) = 427.09***	F(3, 45.8) = 117.97***
Modality	F(2, 36.9) = 0.50	F(2, 44.1) = 103.84***	F(2, 45.8) = 41.73***	F(2, 44.1) = 15.12***
Urgency*Modality	F(6, 82.3) = 1.73	F(6, 132.8) = 33.03***	F(6, 135.8) = 5.79***	F(6, 106.4) = 2.00 [#]

運転パフォーマンス

- TTC @ Gaze on Pedestrian :
 - 緊急性の主効果あり ($p < .001$)
 - すべての緊急性レベル間で有意差があり (すべて $p < .001$)
 - 早期アラームであるほど、歩行者を視認するTTCも増加
 - モダリティの主効果なし ($p = .608$)
 - 相互作用なし ($p = .125$)

運転パフォーマンス

- TTC @ Foot off Accelerator :
 - 緊急性の主効果あり
($p < .001$)
 - モダリティの主効果あり
($p < .001$)
 - 相互作用あり
($p < .001$)
- すべてのアラームタイプで緊急性レベル間に有意差があり、アラームが長いTTCで提供された場合、ドライバーは歩行者から離れたところでアクセルを離した
- アラームのTTCが増加するにつれて、アラームがある場合とない場合の違いは顕著になった

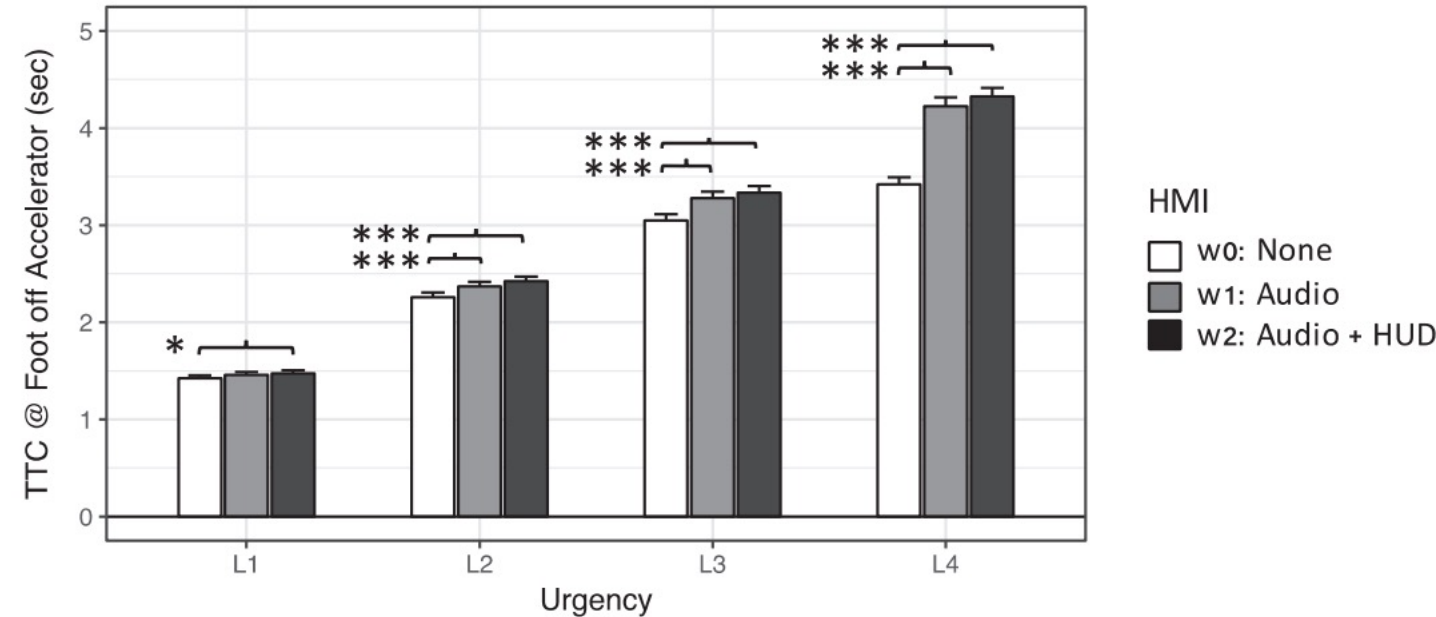


Fig. 3. TTC @ Foot off Accelerator by urgency and modality, with 95% confidence intervals. (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$).

Table 7

Significant post-hoc tests for TTC @ Foot off Accelerator between warning types (W0 = None, W1 = Audio, W2 = Audio + HUD).

Contrast	Urgency	Statistics
w0 - w2	L1	$t(168.9) = -2.55, p = 0.031$
w0 - w1	L2	$t(163.6) = -3.63, p = 0.001$
w0 - w2	L2	$t(163.6) = -5.34, p < 0.001$
w0 - w1	L3	$t(166.2) = -5.50, p < 0.001$
w0 - w2	L3	$t(166.2) = -6.77, p < 0.001$
w0 - w1	L4	$t(165.1) = -15.92, p < 0.001$
w0 - w2	L4	$t(166.9) = -17.78, p < 0.001$

運転パフォーマンス

- TTC @ Foot on Brake :
 - 緊急性の主効果あり
($p < .001$)
 - モダリティの主効果あり
($p < .001$)
 - 相互作用あり
($p < .001$)
- すべてのアラームタイプで緊急性レベル間に有意差があり, アラームタイプ間の有意差はTTC=5秒でのみ見られた
- アラームのTTCが増加するにつれて、アラームがある場合とない場合の違いは顕著になった

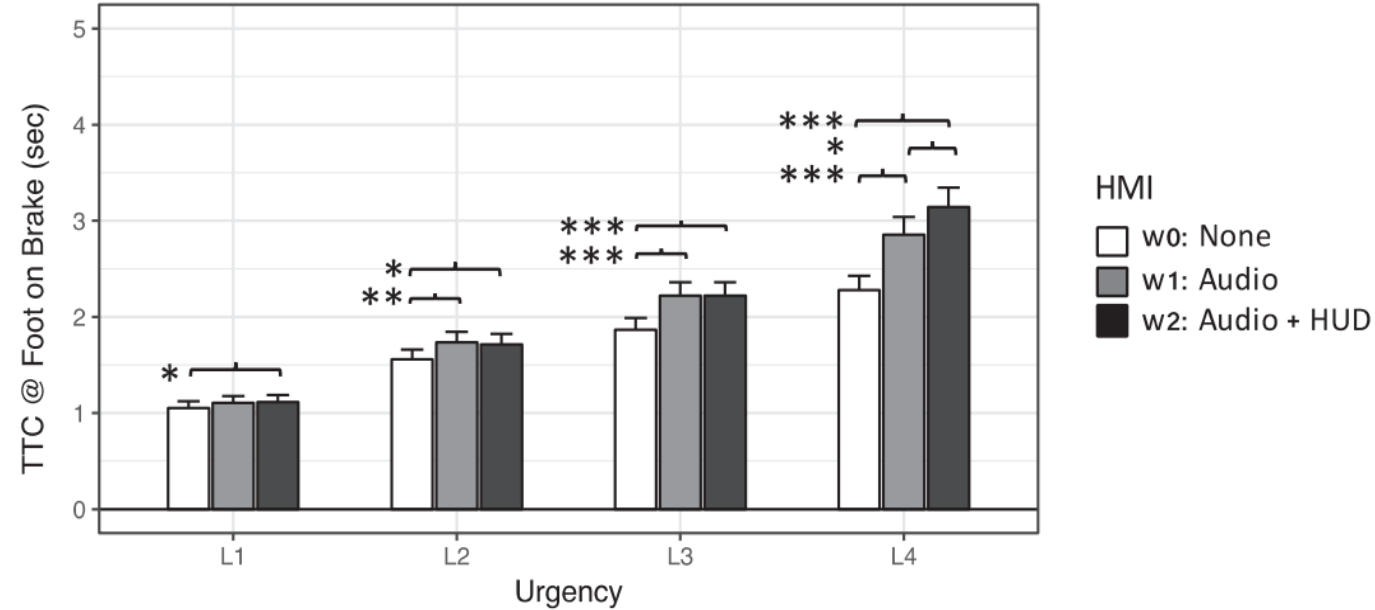


Fig. 4. TTC @ Foot on Brake by urgency and modality, with 95% confidence intervals. (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$).

Table 8

Significant post-hoc tests for TTC @ Foot on Brake between warning types (W0 = None, W1 = Audio, W2 = Audio + HUD).

Contrast	Urgency	Statistics
w0 - w1	L2	$t(173.7) = -3.02, p = 0.008$
w0 - w2	L2	$t(173.7) = -2.70, p = 0.021$
w0 - w1	L3	$t(175.6) = -4.83, p < 0.001$
w0 - w2	L3	$t(175.6) = -4.83, p < 0.001$
w0 - w1	L4	$t(173.9) = -6.19, p < 0.001$
w0 - w2	L4	$t(176.8) = -8.93, p < 0.001$
w1 - w2	L4	$t(178.9) = -2.65, p = 0.024$

運転パフォーマンス

- Headway @ Car Stopped :
 - 緊急性の主効果あり
($p < .001$)
 - モダリティの主効果あり
($p < .001$)
 - 相互作用の有意傾向が見られた
($p < .1$)
- すべてのアラームタイプでL1と{L2, L3, L4}、音声のみでL2と{L3, L4}、および音声+HUDでL2とL4の間に有意差が見られた
- L3とL4でアラームなしと{音声のみ、音声+HUD}の間に有意差が見られた
- アラームのTTCが増加するにつれてアラームがある場合とない場合の違いは顕著になった

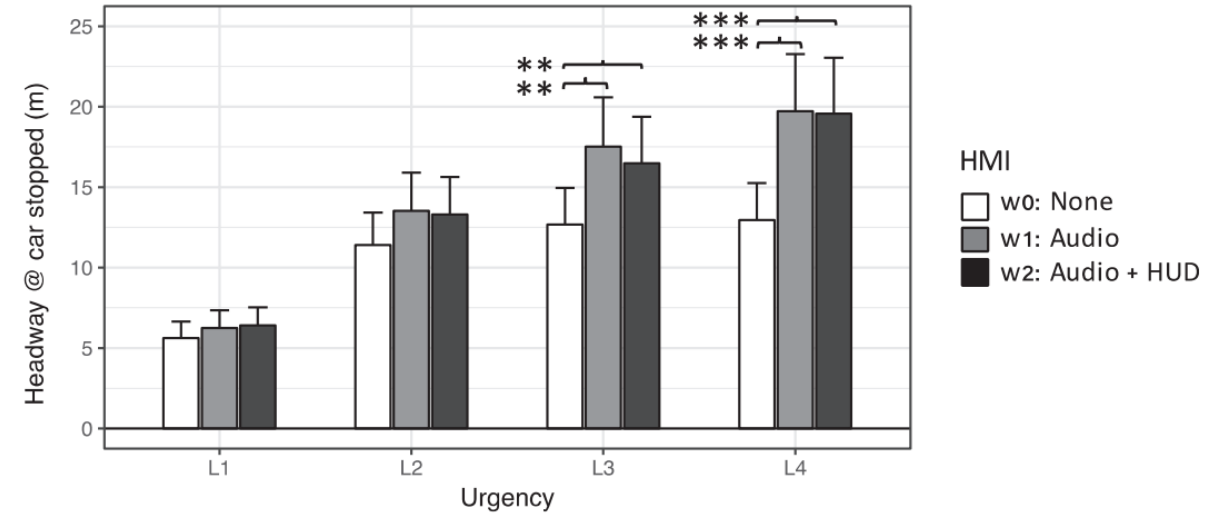


Fig. 5. Headway @ Car Stopped by urgency and modality, with 95% confidence intervals of the means (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$).

Table 9

Significant post-hoc tests for Headway @ Car Stopped (W0 = None, W1 = Audio, W2 = Audio + HUD) (* $p < 0.1$).

Contrast	HMI / Urgency	Statistics
L1-L2	w0	$t(181.8) = -7.79, p < 0.001$
L1-L3	w0	$t(184.7) = -8.84, p < 0.001$
L1-L4	w0	$t(181.2) = -9.19, p < 0.001$
L1-L2	w1	$t(170.4) = -8.92, p < 0.001$
L1-L3	w1	$t(170.4) = -11.90, p < 0.001$
L1-L4	w1	$t(175.3) = -12.95, p < 0.001$
L2-L3	w1	$t(170.4) = -2.98, p = 0.017$
L2-L4	w1	$t(175.3) = -4.24, p < 0.001$
L1-L2	w2	$t(170.4) = -8.43, p < 0.001$
L1-L3	w2	$t(170.4) = -10.91, p < 0.001$
L1-L4	w2	$t(173.1) = -12.74, p < 0.001$
L2-L3	w2	$t(170.4) = -2.48, p = 0.067^{\#}$
L2-L4	w2	$t(173.1) = -4.40, p < 0.001$
w0 - w1	L3	$t(142.1) = -3.76, p = 0.001$
w0 - w2	L3	$t(142.1) = -3.06, p = 0.007$
w0 - w1	L4	$t(140.6) = -4.84, p < 0.001$
w0 - w2	L4	$t(143.3) = -4.79, p < 0.001$

考察

- アラームが提示されるタイミング（TTC）に関連する主観的評価の違いが顕著だった
 - 特にTTCが2.0秒のアラームは最もFA率が低いにもかかわらず、信頼、信用、望ましさ、予測可能性、依存性、リスクの評価が最低であった
 - アラームが遅すぎで、反応時間が少ない
 - 早期アラームは運転者が回避行動を取る時間を増やし、制御感を維持するため、受容される傾向があった
 - TTCが最も高いところでは、いくつかの評価が下がる傾向が見られた
 - この距離では、ドライバーは歩行者がもたらす具体的な脅威を知らなかったため、システムの評価がどの程度正確なのか疑問であった可能性がある
 - ドライバーはシステムの支援なしでも対応できる十分な時間があると感じた可能性がある

考察

- ドライバーは、より長いTTCでアラームが提示された場合、歩行者を注視するタイミングが遅くなった
- アラームが長いTTCで提供された場合、ドライバーは危険から離れた場所でアクセルを離し、ブレーキを踏む傾向があった
- これらの行動は、アラームが長いTTCで提供された場合、ドライバーが実際に歩行者から離れた場所で車両を停止させることにも対応した
 - 特に、アラームが2秒で提供された場合、車両が停止する際の車間距離は、より長いTTCでのアラームよりも短くなった
- アラームが提示された場合とされなかった場合の違いは、すべてのパフォーマンスにおいてTTCが増加するにつれて顕著になった
 - アラームがドライバーに潜在的な危険を特定し、主要な制御を行うのに役立つことを示している
 - ドライバーがシステムの判断を受け入れ、それに基づいて行動する意欲があることを示している

考察

- モダリティは主要な制御介入において有意な差を示したが、アラームの存在自体が反応を促す一方で、モダリティの違いは大きな影響を与えなかった
 - 聴覚および視覚アラームの組み合わせがドライバーの信用を高める一方で、実際のパフォーマンス向上には限界があることが示された

結論

- 早期アラームは車と歩行者の間の安全余裕を増加させる可能性があり、受容を損なうことはない
- マルチモーダルアラームはシステムへの信用を高める可能性があるが、運転パフォーマンスの改善には限界がある