

Deceleration parameters as implicit communication signals for pedestrians' crossing decisions and estimations of automated vehicle behaviour

歩行者の横断判断と自律走行ビークルの挙動推定における暗黙的コミュニケーション
シグナルとしての減速行動

著者

Tian, K., Tzigieras, A., Wei, C., Lee, Y. M., Holmes, C., Leonetti, M., Merat, N., Romano, R., & Markkula, G. (2023)

雑誌

Accident Analysis & Prevention, 190, 107173.

導入：自律走行ビークルへの期待と課題

- 近年, 自律走行ビークルの実現が, 渋滞や事故などの交通問題を解決することが期待されている (El Hamdani et al., 2020)
- しかし, 自律走行ビークルはドライバーの周囲への不注意やドライバー自体の不在という特徴から, 歩行者などの交通弱者はビークルとコミュニケーションを取ることが難しく, ビークルの動きのみからビークルの行動を推測する必要がある (de Clercq et al., 2019)
- そのため, 交通利用者の行動研究 (Lee et al., 2022), 計算モデリング (Pekkanen et al., 2022), eHMI (de Clercq et al., 2019) などの研究がなされている

明示的/暗黙的コミュニケーションシグナル

- 歩行者とビークルのインタラクションで用いられるコミュニケーションシグナルの分類
 - 明示的コミュニケーションシグナル：アイコンタクト, ジェスチャー, パッシング など
 - **暗黙的コミュニケーションシグナル：ビークルの減速, 歩行者との距離 など**
- 暗黙的コミュニケーションシグナルは, ビークルの動きや意図と直接に結びついているため, 明示的なものよりも信頼性が高いと考えられる (Tian et al., 2022a; Rasouli et al., 2018)
 - 歩行者の道路横断行動は, ビークルの速度, 歩行者とビークルの距離, TTC (衝突までの時間, Time To Collision) に影響される (Tian et al., 2022a)

暗黙的コミュニケーションシグナルとしての減速行動

- 多くの場合, ビークルは減速あるいは停止することで歩行者に道を譲ることができる
(Sucha et al., 2017; Ghasemi et al., 2022)
- ビークルの減速は暗黙的コミュニケーションシグナルとして, 歩行者の行動に大きな影響を与えることが示されている (Ackermann et al., 2019; de Clercq et al., Lee et al., 2022)
- ビークルの**早めのブレーキ**により, 歩行者は**安心して素早く横断を開始**できるが
(Zimmermann and Wettach, 2017), 反対に**遅めで急なブレーキ**は歩行者の**回避行動を引き起こす** (Dey et al., 2021; Risto et al., 2017)

リサーチギャップ

- 歩行者とビークルのコミュニケーションに, 暗黙的シグナルが重要な役割を果たしていることが示されてきた
- 先行研究では, 歩行者がビークルの挙動や意図を認識しているという前提があるが, この前提を直接検証した研究は限られている
 - 歩行者がどのようなビークルの挙動についてどのような推定をし, その推定が時間と共にどのように変化するかということについての知見が不足
- 更に, 歩行者が主観的なビークルの挙動推定を横断判断の材料にしているは不明瞭
- これまでに, ビークルの挙動の主観的推定と客観的な横断データを同一の交通シチュエーションで取得し, これらの直接的な比較を行った先行研究は存在しない

リサーチクエスト

1. 接近するビークルの暗黙的シグナルは、歩行者のビークルの挙動推定と道路横断判断にどのような影響を与えるのか？
2. 歩行者の主観的なビークルの挙動推定と道路横断判断にはどのような関係があるのか？

方法：参加者, 装置

- 参加者

- 20-67歳 ($M = 30.73$, $SD = 8.63$) の30人 (男性17人)

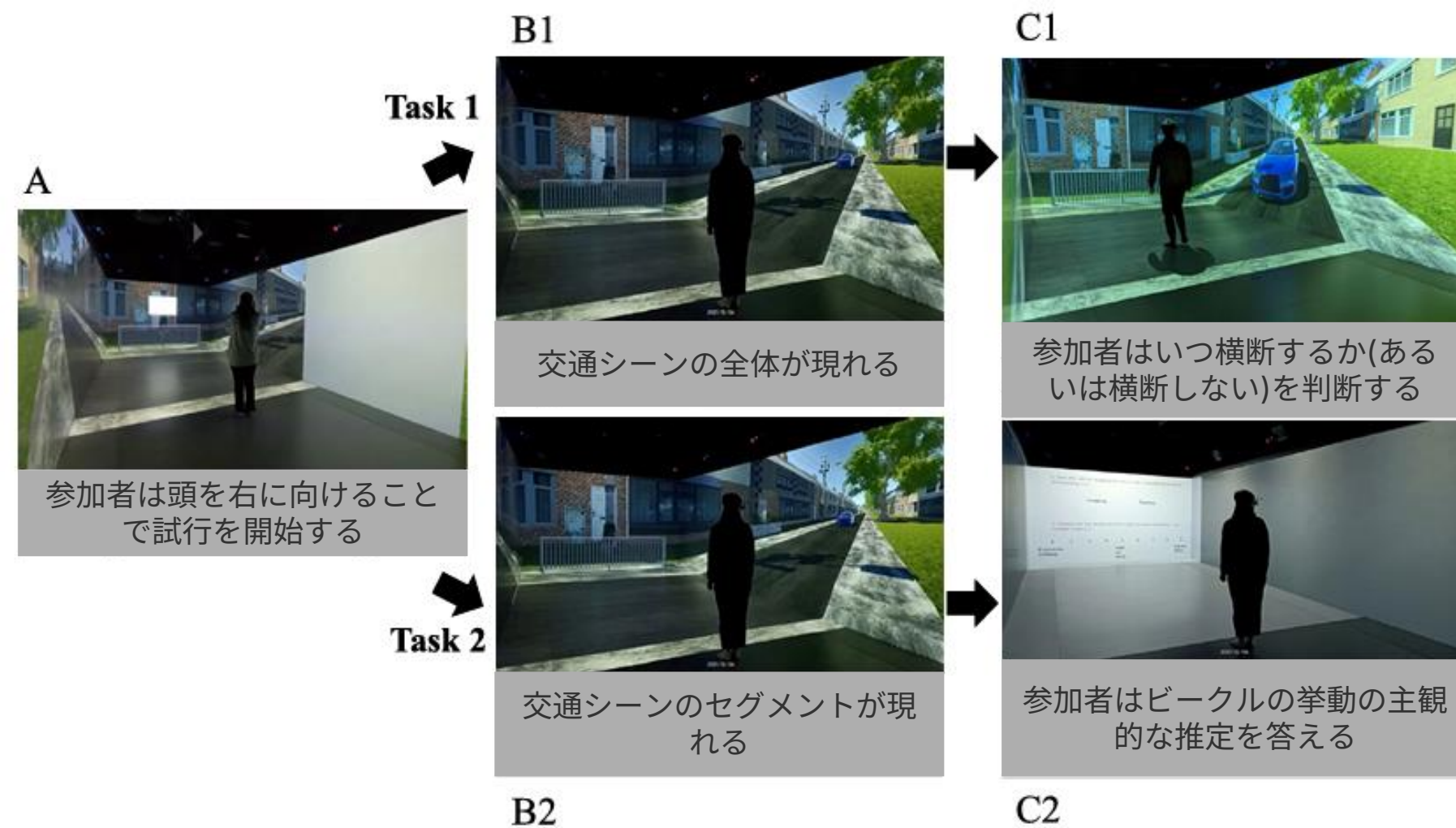
- 装置

- **CAVE-based pedestrian simulator** at the Highly Immersive Kinematic Experimental Research (HIKER) lab (<https://uolds.leeds.ac.uk/facility/hiker-lab/>)



方法：2つの実験タスク

- タスク 1：道路横断タスク
- タスク 2：ビークルの挙動推定タスク (タスク 1 が終了した10分後に開始)
- ビークルはドライバー不在の自律走行ビークル



方法：タスク 1 (道路横断タスク)

- 教示：「道路を横断すると決めたら, 日常生活で行っているように自然に歩き, 壁の前で止まってください. 横断しないと決めたら, ビークルが通り過ぎるのを待ってください」
 - 横断行動を取った際は, 参加者が道路の反対側に着いた時点で試行が終了
 - 横断行動を取らなかった際は, ビークルが参加者の目の前を通り過ぎた時点で試行が終了

A



参加者は頭を右に向けることで試行を開始する

B1



交通シーンの全体が現れる

C1



参加者はいつ横断するか(あるいは横断しない)を判断する

- 36試行：18種類の交通シナリオ(3(減速行動) × 2(初期TTC) × 3(初期速度)) × 2(繰り返し)

方法：交通シナリオのパラメータ

■ ビークルの減速行動

- **定速** (減速なしで停止なし)
 - ・ 試行開始から同じ速度で走行
- **減速** (早めの減速開始)
 - ・ 試行開始時から減速を始め, 最終的に歩行者から**2.5mの距離で停止**
- **混合** (遅めの減速開始)
 - ・ 試行開始時からしばらく定速で走行し, その後減速して最終的に歩行者から**2.5mの距離で停止**

■ その他

- 初期TTC (3, 6s)
- 初期速度 (25, 40, 55km/h)

■ 交通シナリオ18種類： 3(減速行動) × 2(初期TTC) × 3(初期速度)

方法：交通シナリオのパラメーター一覧

減速行動	初期TTC	初期速度	歩行者との初期距離	減速度	定速で進む時間
減速	3s	25 km/h	20.75 m	-1.32 m/s^2	n/a
		40 km/h	33.21 m	-2.00 m/s^2	
		55 km/h	45.67 m	-2.69 m/s^2	
	6 s	25 km/h	41.61 m	-0.62 m/s^2	n/a
		40 km/h	66.58 m	-0.96 m/s^2	
		55 km/h	91.55 m	-1.31 m/s^2	
混合	3 s	25 km/h	20.75 m	-3.05 m/s^2	1.5 s
		40 km/h	33.21 m	-4.36 m/s^2	
		55 km/h	45.67 m	-5.72 m/s^2	
	6 s	25 km/h	41.61 m	-1.55 m/s^2	3.4 s
		40 km/h	66.58 m	-2.34 m/s^2	
		55 km/h	91.55 m	-3.14 m/s^2	
定速	3 s	25 km/h	20.75 m	n/a	3 s
		40 km/h	33.21 m		
		55 km/h	45.67 m		
	6 s	25 km/h	41.61 m	n/a	6 s
		40 km/h	66.58 m		
		55 km/h	91.55 m		

方法：独立変数と従属変数 (タスク 1)

- 独立変数

- 減速行動 (減速, 混合, 定速)
- 初期TTC (3, 6 s)
- 初期速度 (25, 40, 55 km/h)

- 従属変数

- Z_c : 歩行者が横断を始めた時の歩行者とビークルの距離 (m)

方法：タスク 2 (ビークルの挙動推定タスク)

- 交通シナリオのシーンを4つのセグメントに分割
 - タスク 1 の交通シーンが途中で途切れる
- 交通シーンのセグメントを見て, ビークルが停止するか通り過ぎるかを回答
 1. 「ビークルは停止しようとしていましたか, それとも通り過ぎようとしていましたか？」
 - 回答：停止 (stopping) or 通過 (passing)
 2. 「1の答えにどれぐらい自信がありますか？」 ← 分析には使用しなかった

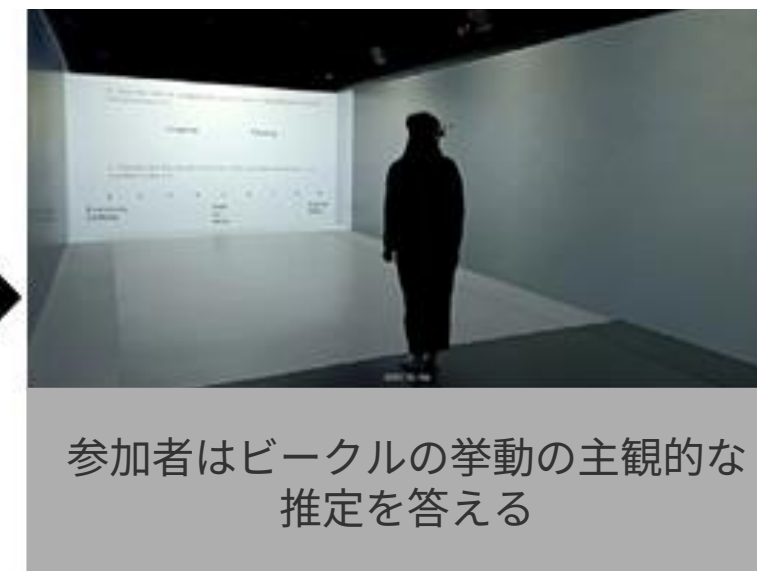
A



B2



C2



方法：交通シナリオのセグメンテーション

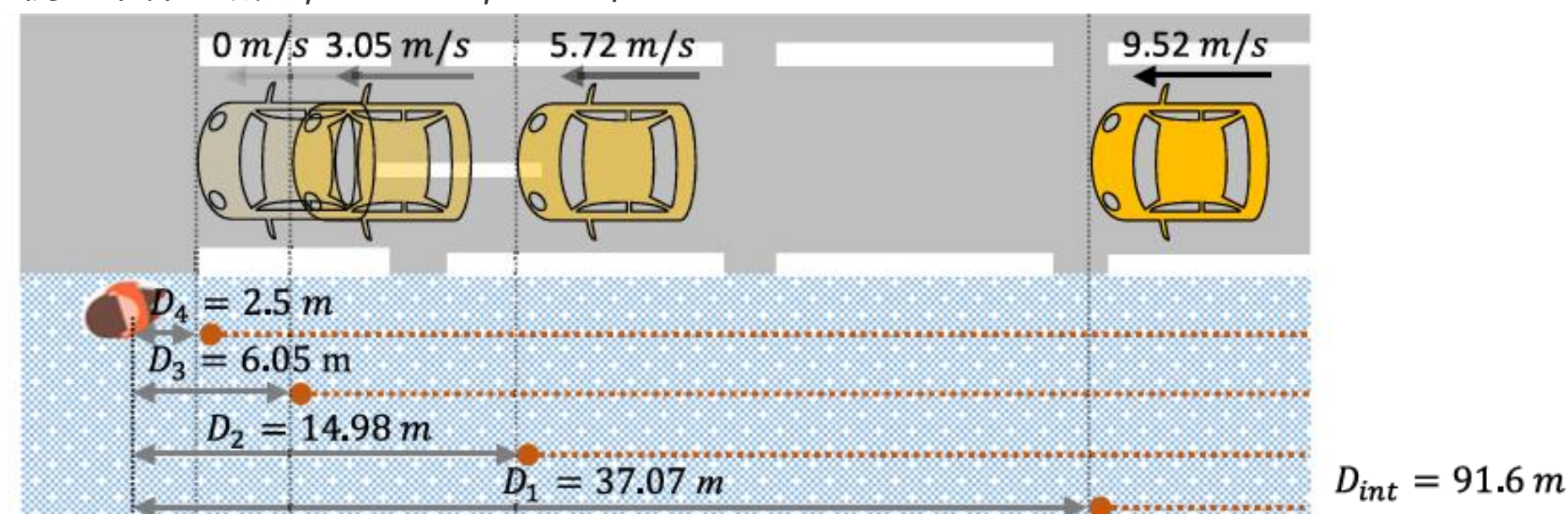
- ビークルの減速の確からしさによる判断の違いを見るため、タスク1の交通シーンを4つのセグメントに分割

- 物体との視角の変化率に関わる値 τ と関連

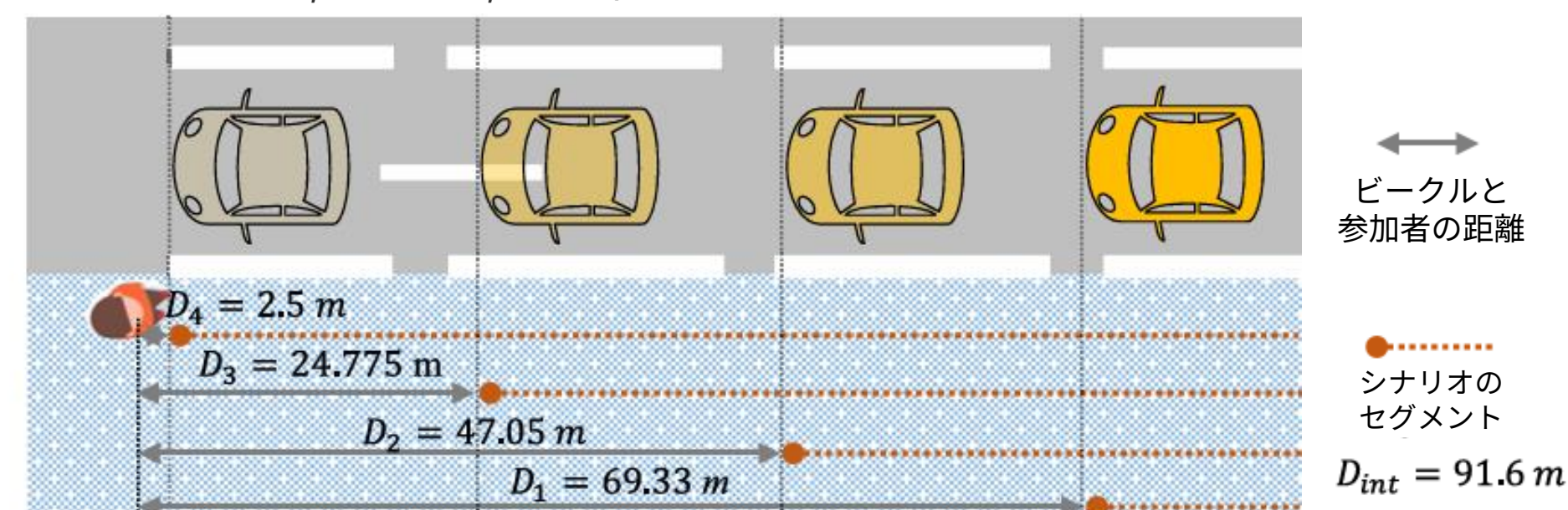
$$D_i = a^{5-i}; a = \sqrt[5]{D_{int}}, i = 1, \dots, 3; D_4 = 2.5$$

- 18種類 × 4 = 72種類の交通シーン
- 第1セグメント**：交通シーンは、ビークルが比較的参加者から**遠い位置**で途切れる
- 第4セグメント**：交通シーンは、ビークルが比較的参加者に**近い位置** (2.5m) で途切れる

例1. 条件：減速, TTC=6s, 55km/h



例2. 条件：定速, TTC=6s, 55km/h



方法：独立変数と従属変数 (タスク 2)

- 独立変数

- 減速行動 (減速, 混合, 定速)
- 初期TTC (3, 6s)
- 初期速度 (25, 40, 55km/h)
- セグメント (第1セグメント – 第4セグメント)

- 従属変数

- 停止判断の割合：ビークルが「停止」と回答した割合

結果：データ処理 (横断行動の基準)

- 横断行動の基準 (Tian et al., 2022b)
 1. 歩行者の経度の位置がペーブメントの縁を超える
 2. 参加者の経度の位置変化が, 120分の1秒 (120Hz) あたり0.003mを超える
 3. 1, 2を2秒間満たした後,ペーブメントから1.1m以上離れていること
- 上記3つを初めて満たした瞬間を横断開始時点とする

方法：独立変数と従属変数 (タスク 1)

- 独立変数

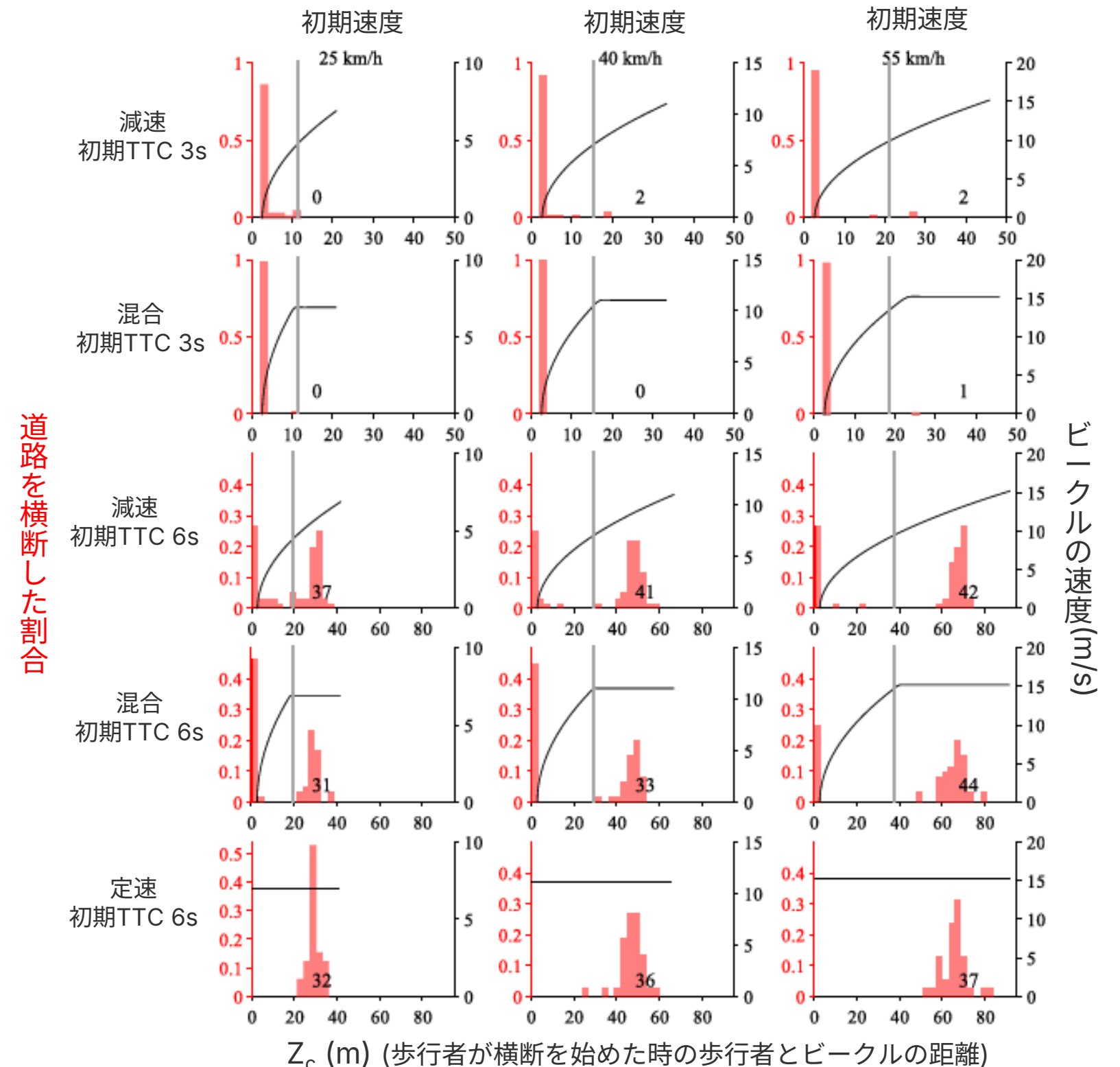
- 減速行動 (減速, 混合, 定速)
- 初期TTC (3, 6 s)
- 初期速度 (25, 40, 55 km/h)

- 従属変数

- Z_c : 歩行者が横断を始めた時の歩行者とビークルの距離 (m)

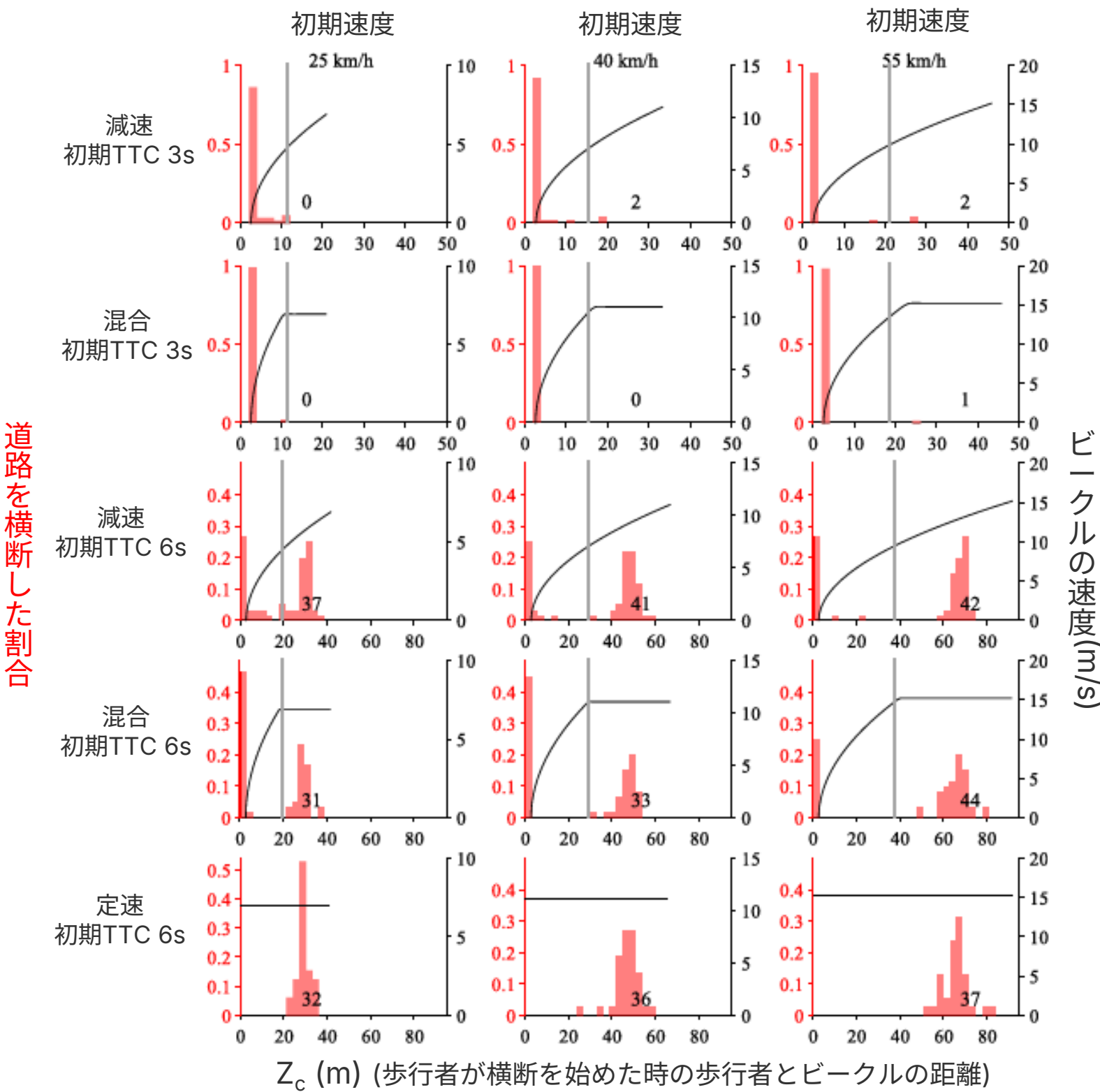
結果：タスク 1

- 減速条件と混合条件では全参加者が道路を横断
- 線形混合効果モデル (参加者をランダム効果)
 - 従属変数： Z_c (m)
 - 減速条件と混合条件で、定速条件との有意差あり (Coef. = -11.00, $z = -6.25$, $p < .001$;
Coef. = -12.80, $z = -7.29$, $p < .001$)
 - 減速することは参加者の道路横断を促進した
 - 初期速度と初期TTCの主効果あり (Coef. = 0.62, $z = 14.47$, $p < .001$; Coef. = 9.88, $z = 26.66$, $p < .001$)
 - 初期速度や初期TTCが増加するにつれて、参加者はビークルからより遠い位置で横断した



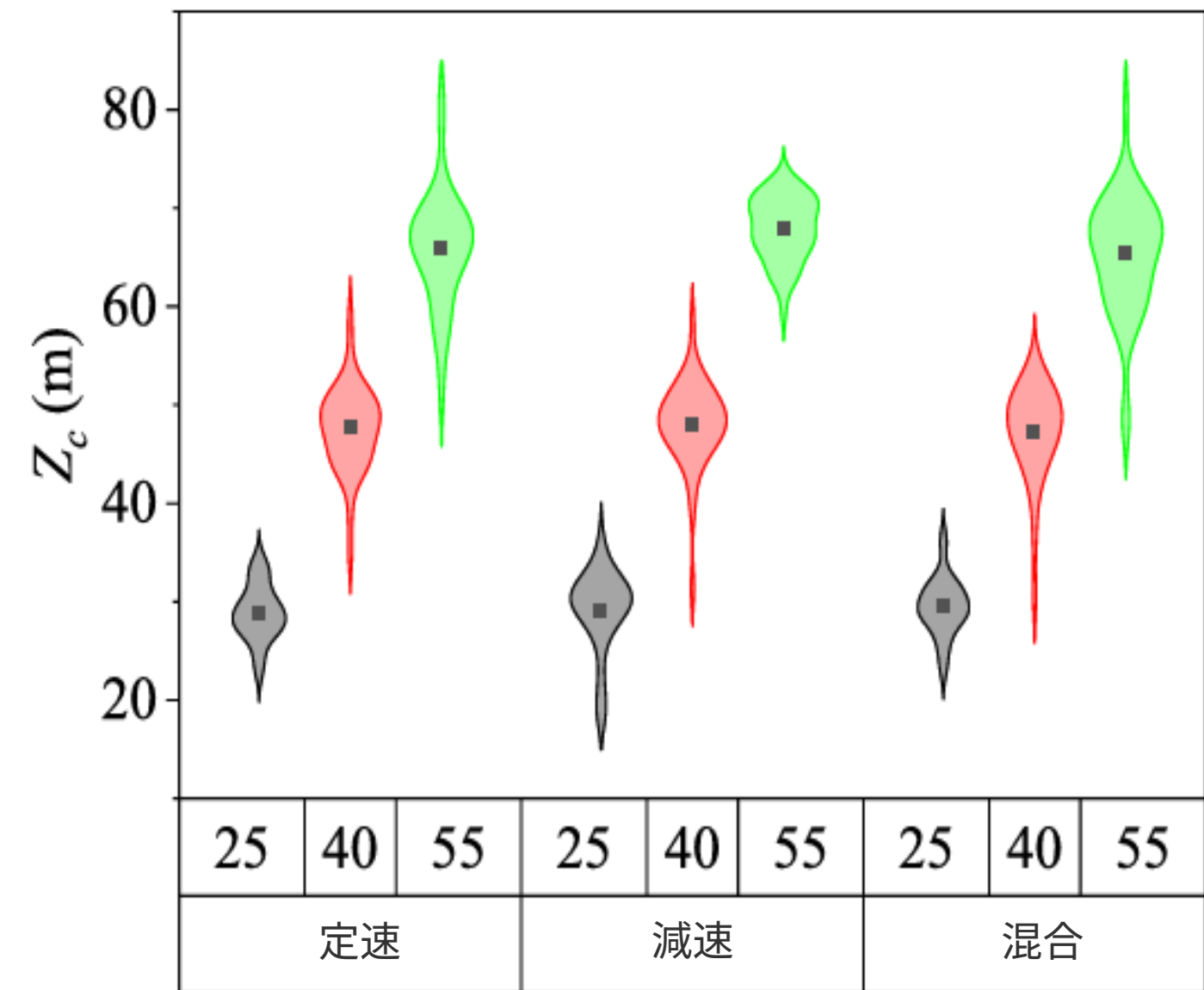
結果：タスク 1 (早期横断と後期横断への分類)

- 減速条件と混合条件の初期TTC 6s (図3, 4行) で横断タイミングが2極化
 1. 試行開始直後に横断
 2. ビークルの停止前後に横断
- 横断行動を, 第1セグメントの終わり (図中の灰色の縦線) を境に**早期横断**と**後期横断**に分類
 - 図中の数字は, 早期横断の数を表す



結果：タスク 1 (早期横断)

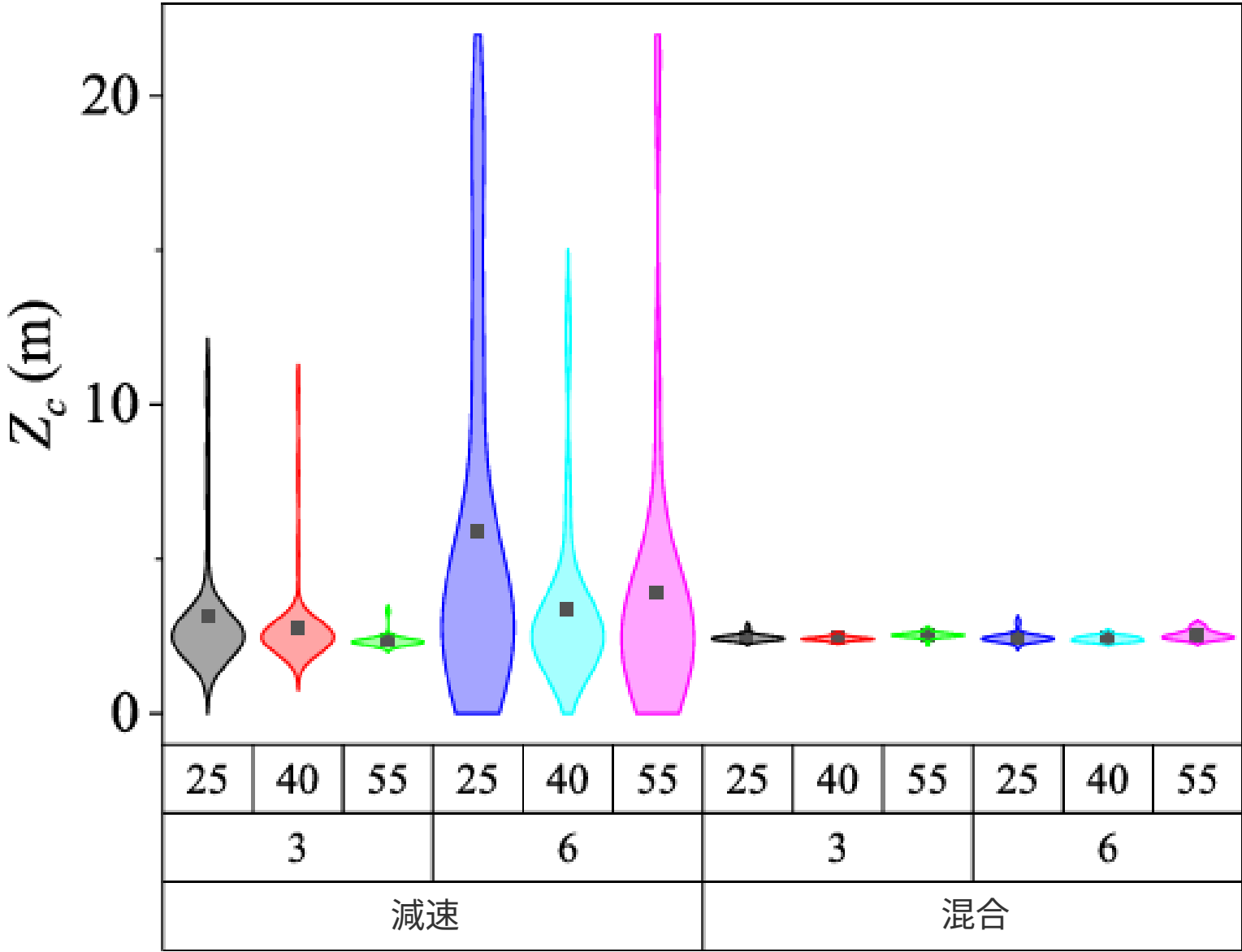
- 線形混合効果モデル(参加者をランダム効果)
 - 従属変数： Z_c (m)
 - 3つの減速行動において有意差なし
 - ・ 早期横断の場合, ビークルの減速行動は横断判断に影響しない
 - 初期速度は全ての交通シナリオにおいて, 横断行動にポジティブな影響を与えた (Coef. = 1.22, $z = 68.75$, $p < .001$)
 - ・ 初期速度が速いほど, ビークルから遠くの距離で横断する



初期TTC 6sの場合で, 早期横断と分類された横断の Z_c の分布

結果：タスク 1 (後期横断)

- 線形混合効果モデル (参加者をランダム効果)
 - 従属変数： Z_c (m)
 - 初期速度, 初期TTC, 減速行動に有意な主効果
 - 減速条件
 - ・ 初期TTCが増加するにつれて, 参加者はビークルから遠い距離で横断した (Coef. = 0.28, $z = 4.34$, $p < .001$)
 - ・ 初期速度が増加するにつれて, 参加者はビークルから近い距離で横断した (Coef. = -0.02, $z = -2.40$, $p < .05$)
 - 混合条件
 - ・ 減速条件よりもビークルに近い距離で横断した (Coef. = 0.78, $z = 4.57$, $p < .001$)
 - ・ ほとんどの参加者がビークルが完全に停止してから横断した



減速条件と混合条件において後期横断と分類された横断の Z_c の分布

方法：独立変数と従属変数 (タスク 2)

- 独立変数

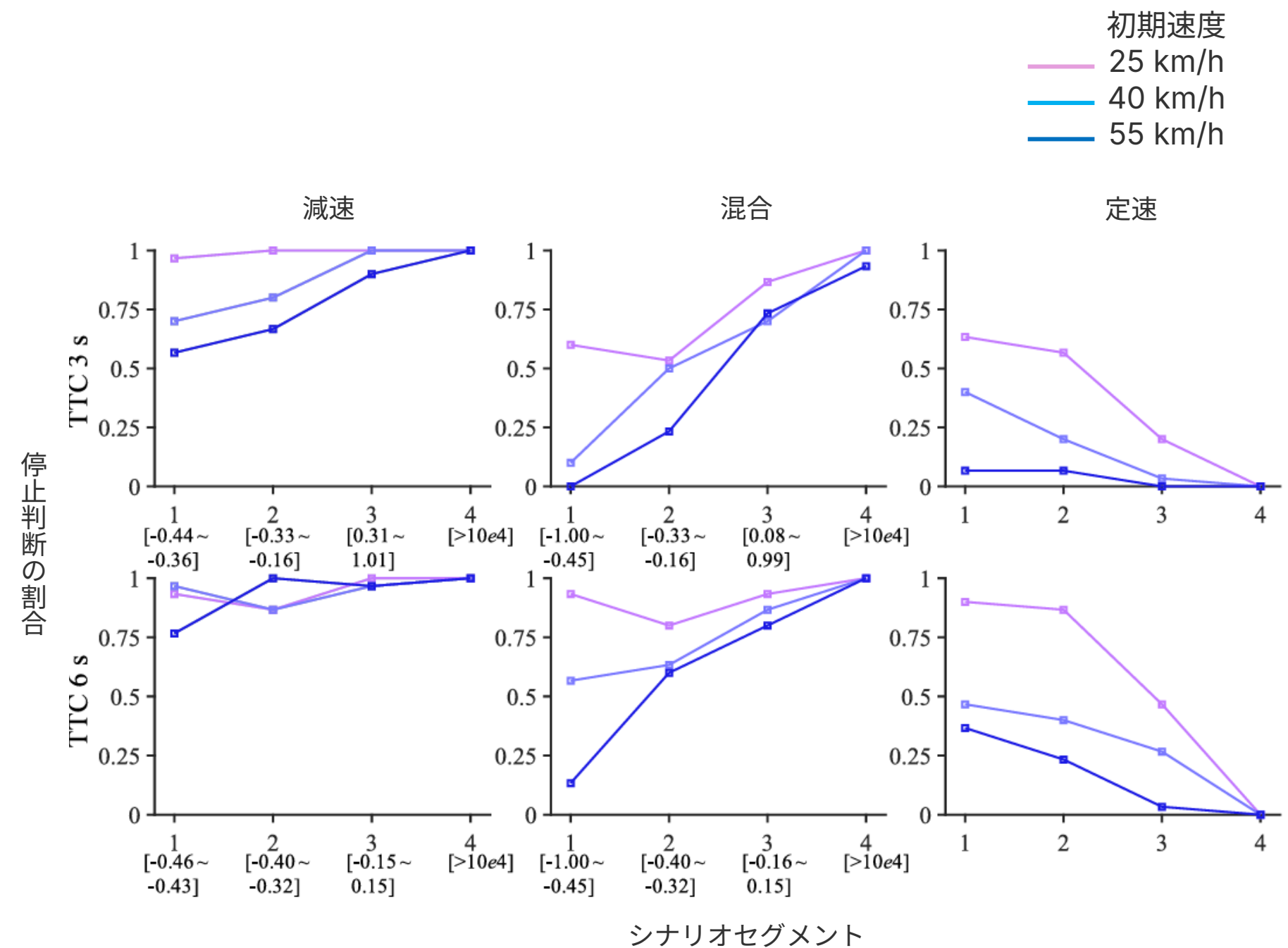
- 減速行動 (減速, 混合, 定速)
- 初期TTC (3, 6s)
- 初期速度 (25, 40, 55km/h)
- セグメント (第1セグメント – 第4セグメント)

- 従属変数

- 停止判断の割合：ビークルが「停止」と回答した割合

結果：タスク 2

- 線形混合効果モデル (参加者をランダム効果)
 - 従属変数：停止判断の割合
 - 初期速度, 初期TTC, 減速行動の主効果あり
 - **初期速度** (Coef. = -0.06, $z = -11.80$, $p < .001$)
 - 初期速度が遅いほど停止判断の割合が高かった
 - **初期TTC** (Coef. = 0.94, $z = 7.84$, $p < .001$)
 - 初期TTC 6sの場合で, 3sの場合より停止判断の割合が高かった
 - **減速行動** (Coef. = 3.39, $z = 8.38$, $p < .001$)
 - 減速条件と混合条件で, 定速条件より停止判断の割合が高かった



結果：タスク 2 (定速条件と減速条件)

■ 定速条件

- 初期TTCが大きい場合と初期速度が小さい場合に停止判断の割合が高かった (Coef. = 2.99, $z = 9.90$, $p < .001$; Coef. = -0.10, $z = -9.02$, $p < .001$)
- 第1セグメントから第4セグメントにかけて, 停止判断の割合は低下していった (Coef. = -1.18, $z = -10.00$, $p < .001$)
 - ・ ビークルが近づくにつれ, 参加者はビークルが停止しないことを正しく認識できた

■ 減速条件

- 定速条件と同様に, 初期TTCが大きい場合と初期速度が小さい場合に停止判断の割合が高かった (Coef. = 1.40, $z = 4.33$, $p < .001$; Coef. = -0.05, $z = -3.38$, $p < .001$)

定速条件と減速条件では, 参加者はより初期TTCが大きい場合と初期速度が小さい場合にビークルが停止すると判断する傾向があった

結果：タスク 2 (混合条件)

- 定速条件の第 1 セグメントと, 減速条件の第 2 - 4 セグメントの結果の組み合わせのように見えるので, 第 1 セグメントとそれ以外で別々に分析
- **第 1 セグメント**
 - 混合条件と定速条件で有意な差は見られなかった (Coef. = -0.08, $z = -1.64$, $p = 0.1$)
- **第 2 - 4 セグメント**
 - 初期TTCとセグメントに有意な交互作用あり (Coef. = -0.21, $z = -9.29$, $p < .001$)
 - **初期のセグメントでの停止判断の割合は, 初期TTC 6sの場合に初期TTC 3sの場合よりも高かった**

考察：道路横断行動における暗黙的シグナルの影響 (タスク1)

- 参加者はビークルの減速行動に関わらず, ビークルの初期速度や初期TTCが増加するにつれて, ビークルからより遠い位置で横断した
 - 早期横断と後期横断に分けての分析でも, 早期横断において減速行動は関係しなかった
- ビークルの減速行動の違いは, 参加者の横断行動に有意な違いをもたらした
 - 減速条件と混合条件では, 定速条件より多くの参加者が道路を横断した
 - ・ 後期横断において, 減速条件では混合条件よりも多くの参加者がビークルが停止する前に横断



- 歩行者の横断判断
 - ビークルとの距離が離れている時 : ビークルの減速行動よりTTCやビークルとの距離を基に判断
 - ビークルとの距離が近づいてきた時 : ビークルの減速行動を基に判断

考察：ビークルの減速行動と挙動推定の関連 (タスク2)

- タスク2において、混合条件の減速度は減速条件の減速度よりも大きかったにも関わらず、参加者は減速条件においてビークルが停止することをより正確に予測できた
 - 減速条件において、混合条件よりもビークルが完全に停止する前に横断を始めた参加者が多かったというタスク1の結果と一致



早めの減速開始は歩行者に、ビークルが道を譲ろうとしていることを気づかせ、横断を促す

考察：歩行者の横断判断とビークルの挙動推定の関連

- 初期速度はビークルの停止判断にネガティブな影響を与えていた
 - 参加者は**低速での走行を, ビークルが道を譲ろうとしてるサイン**として受け取る傾向が見られた
 - 歩行者はビークルの速度を基にビークルの挙動推定を行っている
- しかし, 早期横断においては, 初期速度はビークルの停止判断にポジティブな影響を与えた
 - より速い初期速度においてより多くの参加者が道路を横断した
 - ビークルとの距離が離れている時, 参加者はビークルの挙動推定の結果に関わらず横断した



ビークルとの距離が十分に離れている時, 歩行者のビークルの主観的な挙動推定は, 横断判断に直接的な影響を与えない

考察：示唆

- 歩行者はビークルの低速での走行を, 道を譲るサインだとして受け取る傾向がある
- **ビークルの早めの減速は, 歩行者にビークルの意図を伝えるだけでなく, 横断を促進する**



- **様々な交通シナリオにおいて, 歩行者は安全に横断するために異なるビークルからの手がかりに注意を向ける**
 - 歩行者とビークルの距離が離れている時, 歩行者はTTCやビークルとの距離に注意し, ビークルとの距離が近い時, 歩行者はビークルの減速行動に注意する

結論：リサーチクエスチョンへの回答

1. 接近するビークルの暗黙的シグナルは、歩行者のビークルの挙動推定と横断判断にどのように影響するのか？

- 初期速度がビークルの挙動推定に影響する
- 歩行者はビークルの低速での走行を停止するサインとして受け取る傾向にある
- 早めの減速開始は、歩行者にビークルが道を譲ろうとしていることを伝え、横断を促進する

2. 歩行者の主観的なビークルの挙動推定と横断判断にはどのような関係があるのか？

- 歩行者はビークルの異なる減速行動を認識できる
- 歩行者の横断判断とビークルの挙動推定の結果はおおよそ一致する
- ビークルとの距離が近い場合、歩行者は挙動推定の結果を積極的に横断判断に利用する
- しかし、ビークルとの距離が十分に離れている時、ビークルの挙動推定の結果は横断判断にそれほど影響を与えない

結論：応用

- 本実験の結果は, 自律走行ビークルの開発における減速の重要性を強調している
 - 自律走行ビークルの挙動をより明確に伝えるために, TTCが比較的大きい段階から減速を開始するようなプログラムが考えられる
 - 更に, eHMIを実装することにより, より明確にビークルの挙動を伝えることができる
- 本実験の結果は同時に, TTCが比較的大きい時には歩行者は減速行動を横断判断の材料として用いないことも示している
 - eHMIのデザイン設計で考慮する必要あり

本研究は, 歩行者と自律走行ビークルのインタラクションにおける暗黙的コミュニケーションシグナルの重要性を再発見し, より安全な設計への手がかりを提示した

引用文献

- Ackermann, C., Beggiato, M., Bluhm, L.-F., Low, A., Krems, J.F., 2019. Deceleration parameters and their applicability as informal communication signal between pedestrians and automated vehicles. *Transp. Res. F* 62, 757–768, Publisher: Elsevier.
- de Clercq, K., Dietrich, A., Nunez Velasco, J.P., de Winter, J., Happee, R., 2019. External human-machine interfaces on automated vehicles: effects on pedestrian crossing decisions. *Hum. Factors* 0018720819836343.
- Dey, D., Matviienko, A., Berger, M., Pfleging, B., Martens, M., Terken, J., 2021. Communicating the intention of an automated vehicle to pedestrians: The contributions of eHMI and vehicle behavior. *IT-Inf. Technol.* 63 (2), 123–141.
- El Hamdani, S., Benamar, N., Younis, M., 2020. Pedestrian support in intelligent transportation systems: Challenges, solutions and open issues. *Transp. Res. C* 121, 102856.
- Ghasemi, N., Acerra, E.M., Lantieri, C., Simone, A., Rupi, F., Vignali, V., 2022. Urban mid-block bicycle crossings: The effects of red colored pavement and portal overhead bicycle crossing sign. *Coatings* 12 (2), 150.
- Lee, Y.M., Madigan, R., Uzundu, C., Garcia, J., Romano, R., Markkula, G., Merat, N., 2022. Learning to interpret novel eHMI: The effect of vehicle kinematics and eHMI familiarity on pedestrian crossing behavior. *J. Saf. Res.* 80, 270–280.
- Pekkanen, J., Giles, O.T., Lee, Y.M., Madigan, R., Daimon, T., Merat, N., Markkula, G., 2022. Variable-drift diffusion models of pedestrian road-crossing decisions. *Comput. Brain Behav.* 5 (1), 60–80.
- Risto, M., Emmenegger, C., Vinkhuyzen, E., Cefkin, M., Hollan, J., 2017. Human vehicle interfaces: the power of vehicle movement gestures in human road user coordination. Publisher: University of Iowa.
- Sucha, M., Dostal, D., Risser, R., 2017. Pedestrian-driver communication and decision strategies at marked crossings. *Accid. Anal. Prev.* 102, 41–50.
- Tian, K., Markkula, G., Wei, C., Lee, Y.M., Madigan, R., Merat, N., Romano, R., 2022a. Explaining unsafe pedestrian road crossing behaviours using a psychophysics-based gap acceptance model. *Saf. Sci.* 154, 105837.
- Tian, K., Markkula, G., Wei, C., Sadraei, E., Hirose, T., Merat, N., Romano, R., 2022b. Impacts of visual and cognitive distractions and time pressure on pedestrian crossing behaviour: A simulator study. *Accid. Anal. Prev.* 174, 106770.
- Zimmermann, R., Wettach, R., 2017. First step into visceral interaction with autonomous vehicles. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. pp. 58–64.

補足：視覚的手がかり

- 歩行者は横断判断において、ビークルの速度やTTC, 距離などよりも、視角や視角の変化率といった視覚的手がかりを基にしている可能性がある (Lee et al., 2019; Petzoldt, 2014; Sun et al., 2015)
 - 視角：観測者の網膜に映る像の大きさ
 - 視角の変化率：網膜に映る像の拡大率
- ビークルが道を譲らない状況では、歩行者の横断判断は視角の変化率と強く相関することが示されている (Tian et al., 2022a)
- 更に、視角の変化率に対する視角の比率である τ は、接近するビークルとのTTCを特定する
 - τ の変化率が-0.5より大きい時、近づくビークルの減速率は、歩行者の目の前で停止するのに十分な大きさとなる