

Response of Vulnerable Road Users to Visual Information from Autonomous Vehicles in Shared Space

歩車混在空間における自走ビークルからの視覚的情報に対する交通弱者の反応

著者

Alvarez, W. M., De Miguel, M. A., García, F., & Olaverri-Monreal, C. (2019)

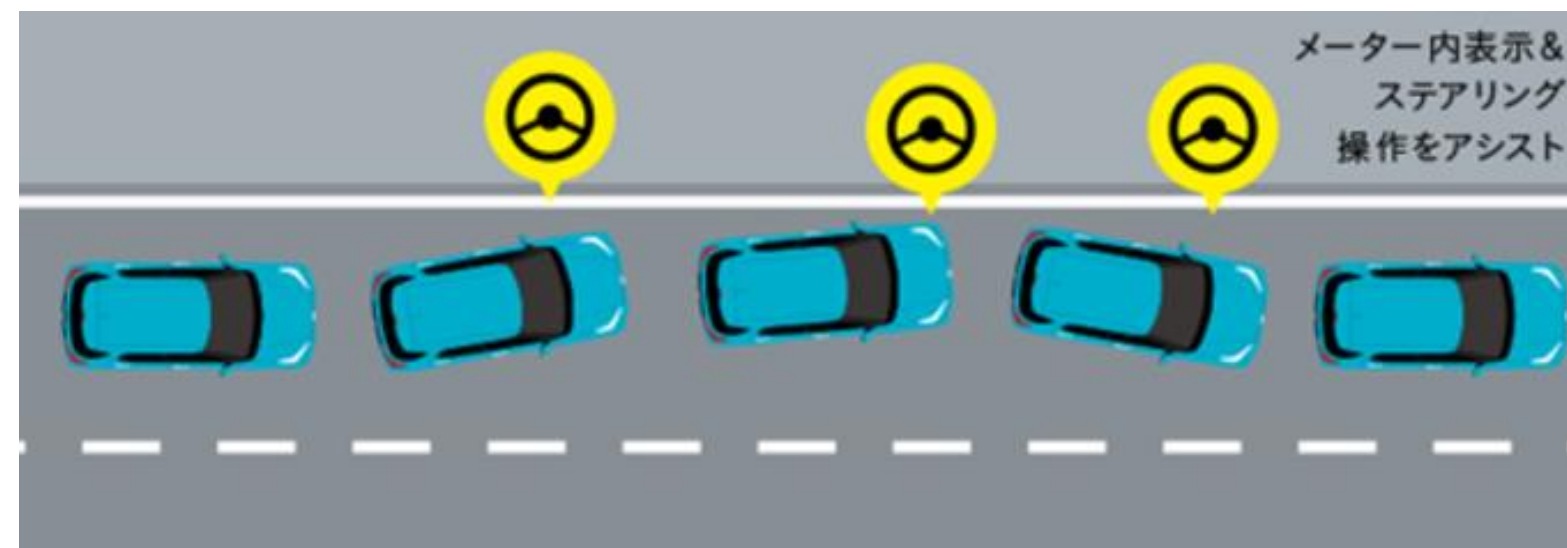
雑誌

In *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)* (pp. 3714-3719). IEEE.

導入：自動走行車

- 近年、便利さや安全性、交通状況の改善のために、自動走行車の実現が期待されている
- 自動システムが運転を部分的に肩代わりする機能は既に実装されている
(例：車線維持アシスト、自動ブレーキ)

車線維持アシスト



<https://toyota.jp/safety/scene/highway/index2.html>

自動ブレーキ



<https://toyota.jp/safety/scene/scenes/>

導入：VRUと自走ビークル

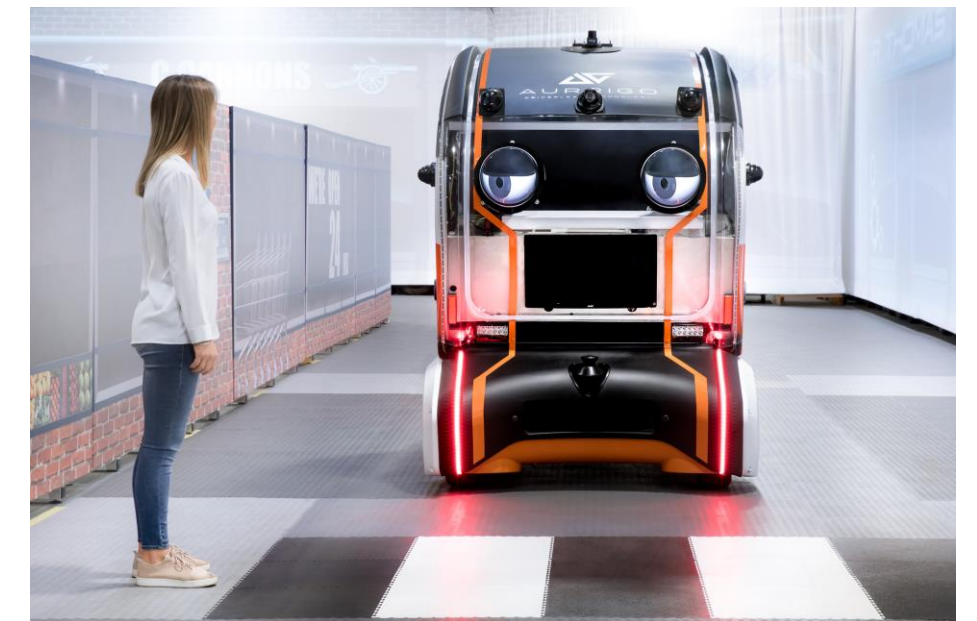
- **交通の安全性**の大部分はビークルと歩行者、自転車などの**VRU***(交通弱者) との**インタラクション**で決定される
- VRUは、アイコンタクトなどの古典的な手段では自走ビークルと**コミュニケーション**を取ることができない
- 自動走行テクノロジーに対する信頼感と交通の安全性を高めるために、**自走ビークルとVRUのコミュニケーションツールが必要**



<https://holdings.panasonic.jp/corporate/mobility/projects/rideshare.html>

導入：近年の研究 (eHMI)

- 自走ビークルとVRUのインタラクションにおける**コミュニケーションシグナル**に注目
- **eHMI***：ビークルが歩行者や周りの車両に対して外向けにメッセージを伝える**コミュニケーションシグナル**
- **自走ビークルにeHMIを搭載することで、VRUがより安全な判断をできるようになるかどうか**が検討されている
→ 同時に、どのようなeHMIのデザインが有効なのか



https://www.motorauthority.com/news/1118468_jaguar-land-rover-tests-self-driving-cars-that-look-alive

* external Human-Machine Interface

導入：先行研究 (Fridman et al., 2017)

■ 目的

- どのようなeHMIのデザインが、(有人)自走ビークルの意図を正確に伝えるかを検討

■ 参加者

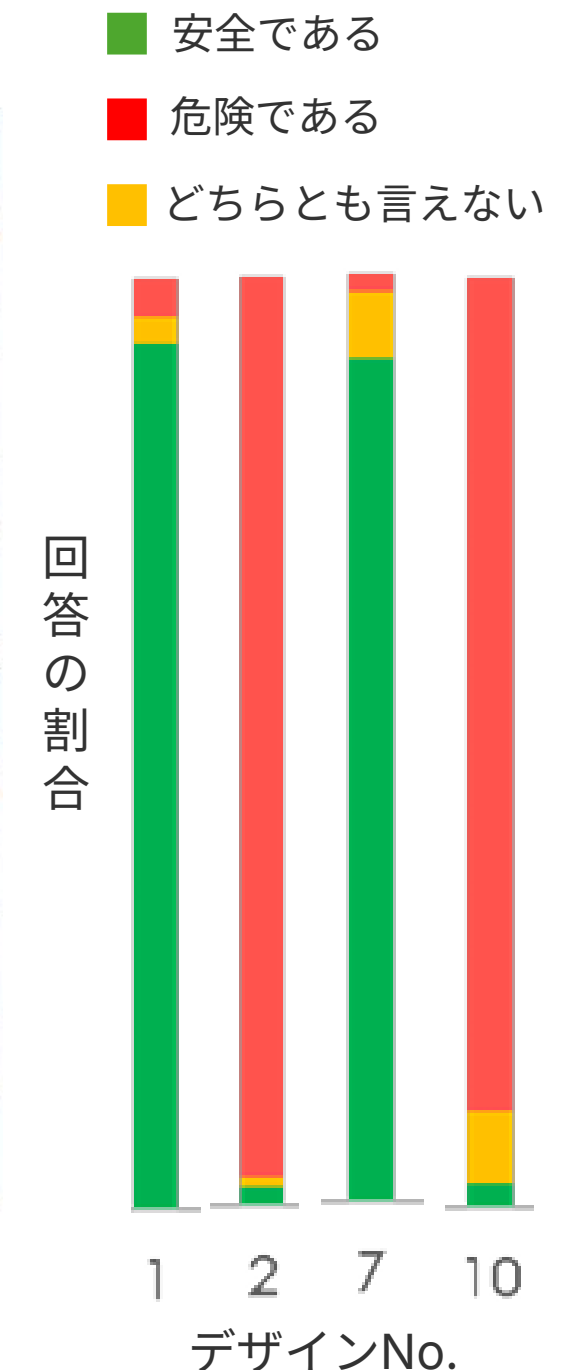
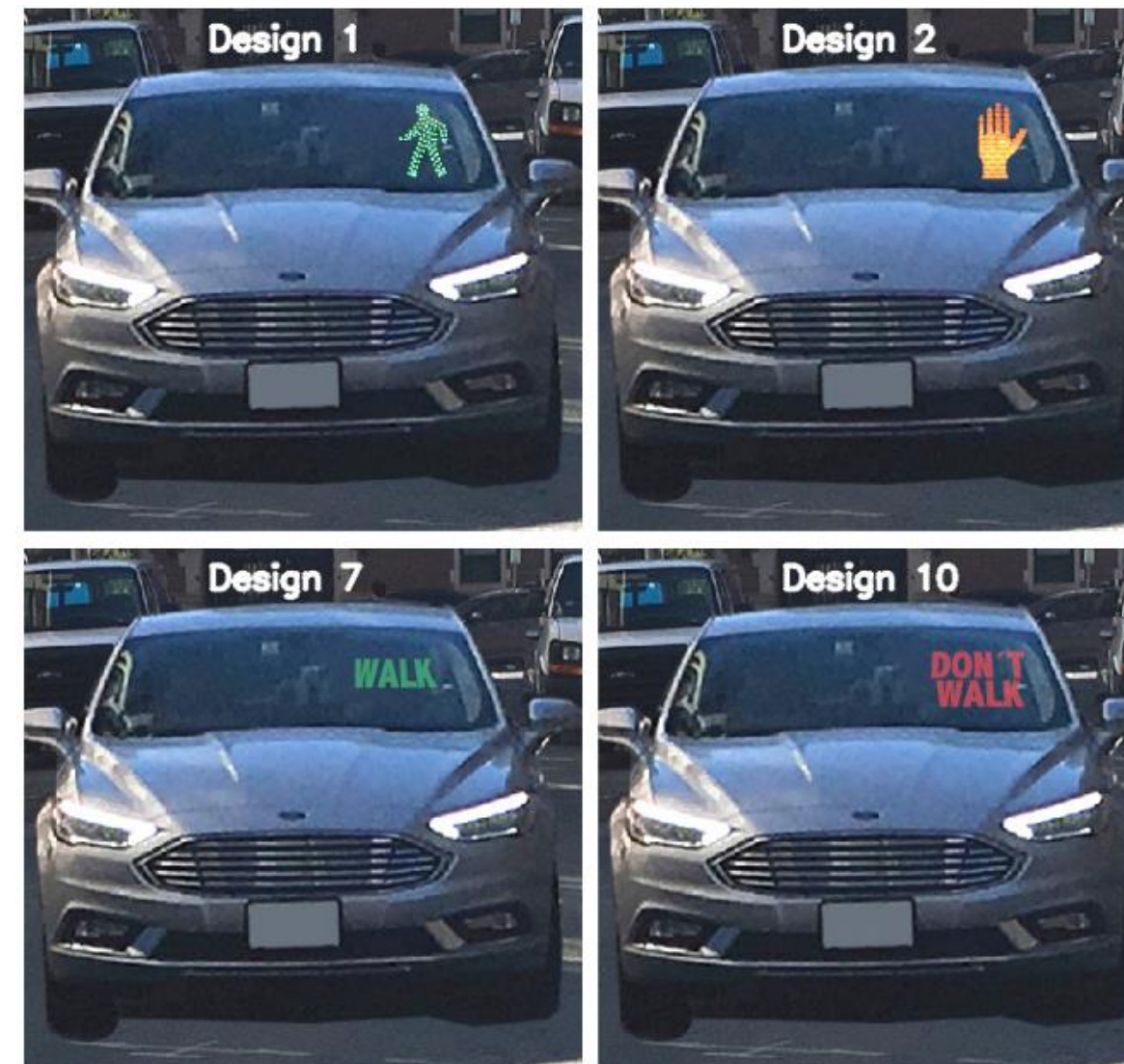
- Amazon Mechanical Turkで集めた200人

■ 方法

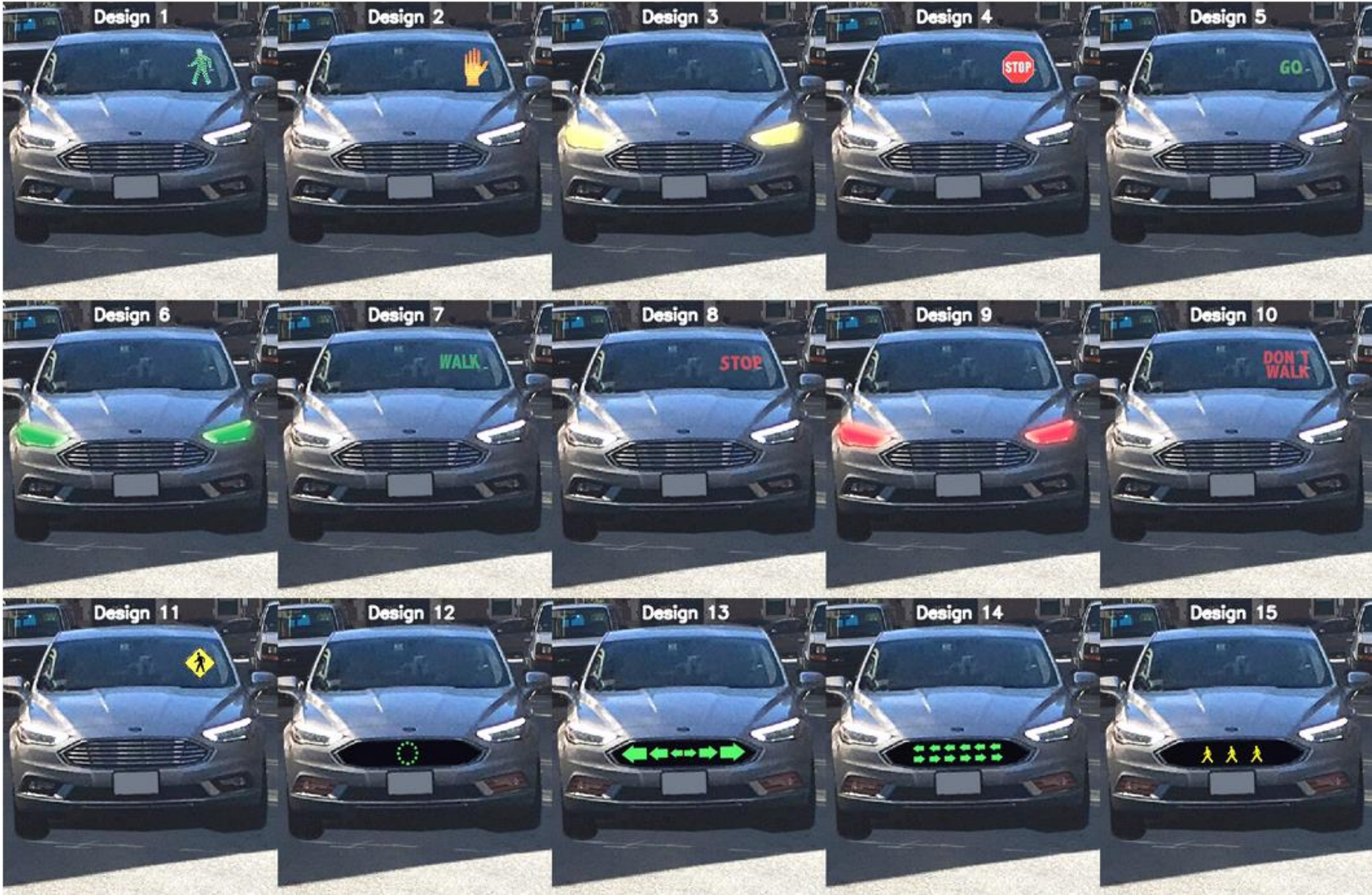
- 参加者は、30個のeHMIのデザインについて、**車の前を横断することが安全であるかどうか**を回答

■ 結果

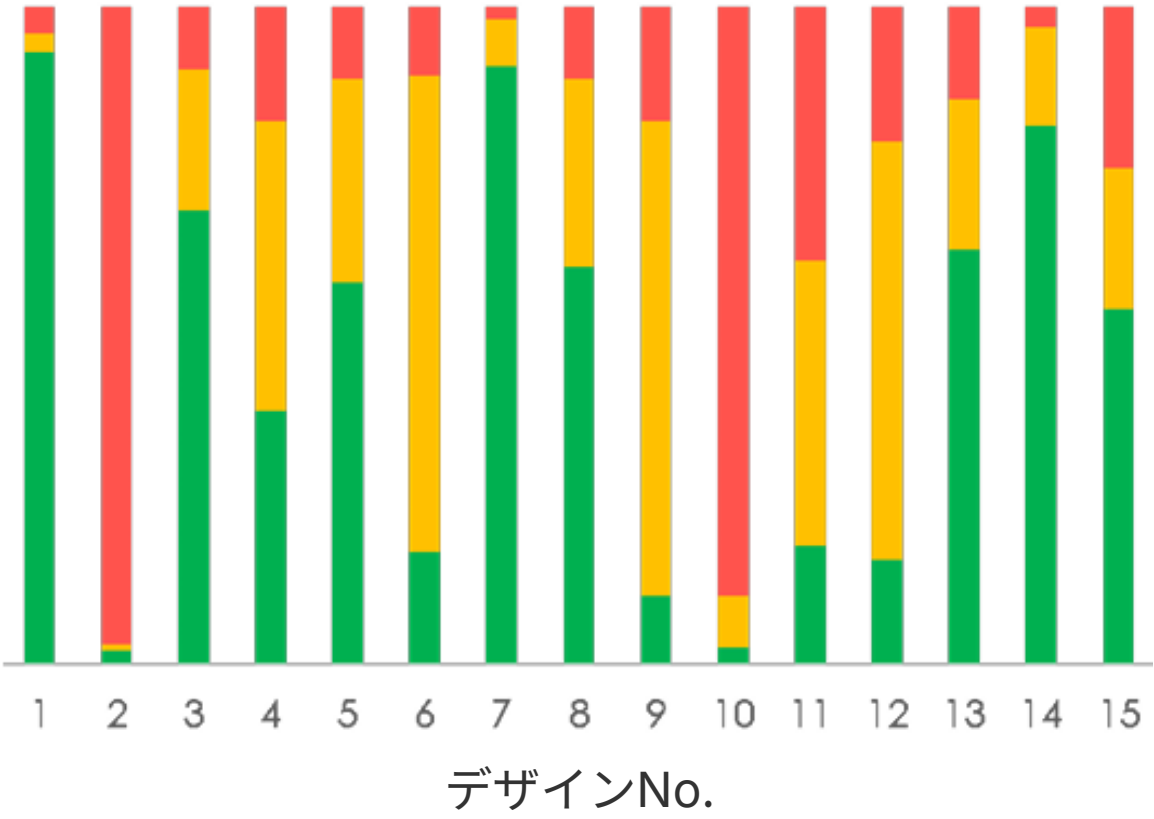
- 右の4つのデザインが、特に高い回答の一貫性を持っていた
→ デザイナーのメッセージ意図と合致



導入：Fridman et al., 2017 (デザインNo. 1 - 15)



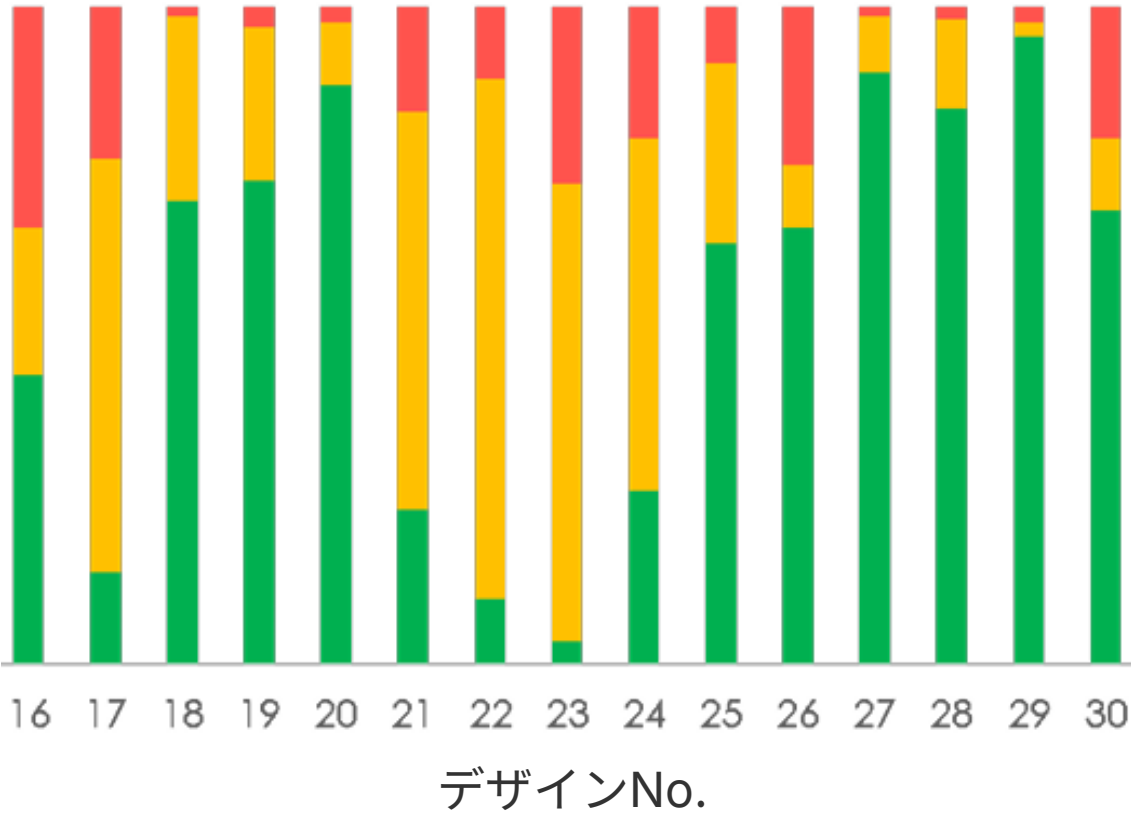
■ 安全である
■ 危険である
■ どちらとも言えない



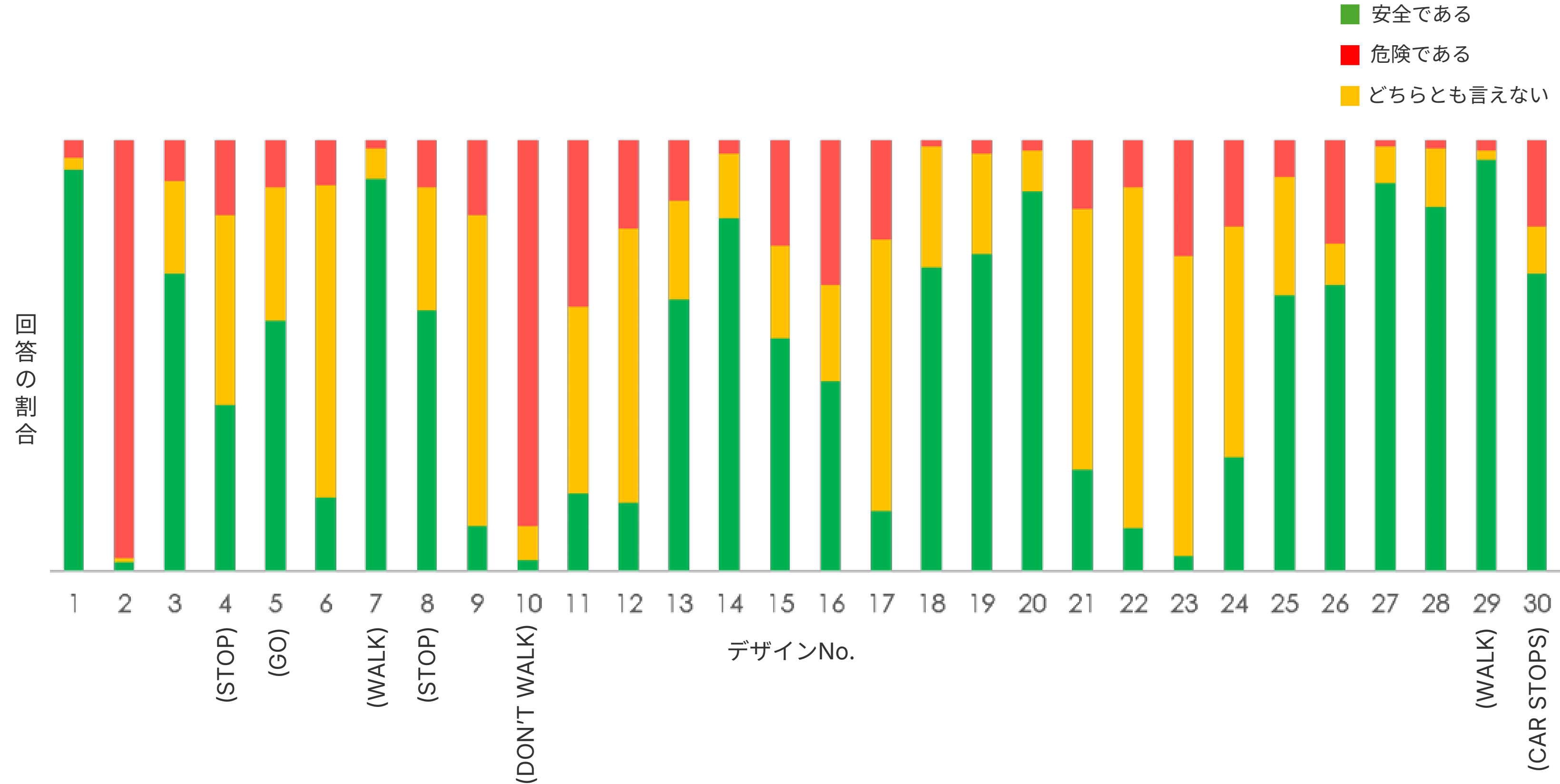
導入：Fridman et al., 2017 (デザインNo. 16 - 30)



- 安全である
- 危険である
- どちらとも言えない



導入：Fridman et al., 2017 (全デザインの結果まとめ)



導入：先行研究 (Clamann et al., 2017)

■ 目的

- (有人) 自走ビークルに搭載されたeHMIの種類が歩行者の横断行動に与える違いを検討

■ 参加者

- 19-60歳 ($M=25.7$) の55人 (女性35人)

■ 方法

- 参加者がビークルを視認し、道路の横断を始めるまでの時間 (行動時間) を計測
- 独立変数：eHMIの種類 (アイコン/ビークルの速度)、横断場所 (横断歩道 or 横断歩道なし)

■ 結果

- **eHMIの種類は行動時間に影響をもたらさなかった**
- 横断場所は行動時間に影響をもち、横断歩道では横断歩道なしの場所より行動時間より短かった



導入：先行研究のまとめ

- Lagström & Lundgren, 2016; Yang, 2017
 - (有人)自走ビークルの搭乗者からアイコンタクトがあると歩行者はより安心して道路を横断できた
- Rothenbucher et al., 2016
 - eHMIが無くても、ほとんどの歩行者が (無人)自走ビークルの前を横断した
- **Fridman et al., 2017** (スライドP5)
 - クラウドソーシングによって、どのような**eHMIのデザイン**が (有人)自走ビークルを前にした時の歩行者の**横断する/しないの判断を決定**づけるかを検討
- **Clamann et al., 2017** (スライドP9)
 - (有人)自走ビークルからの**eHMIのデザインの違い**は、歩行者が道路の**横断を決定するまでの時間**に差を生まなかった

導入：先行研究の限界と本研究の目的

- 2019年時点で、eHMIのデザインが歩行者と自走ビークルのインタラクションに与える影響は小さいと考えられている
- 先行研究の限界
 - 実際の自走ビークルを用いた訳ではなく、人が運転しているビークルを歩行者に自動運転だと信じ込ませていただけだった (Rothenbucher et al., 2016; Clamann et al., 2017)
 - 交通ルールがあり、ビークルと歩行者の優先順位がある程度決まっている環境だった
- 本研究の目的
 - **実際の自走ビークル (無人) を用いて、歩車混在空間における自走ビークルと歩行者のインタラクションにeHMIが与える影響の量的なデータを得ること**

導入：リサーチクエスチョンと帰無仮説

■ リサーチクエスチョン

- 歩車共存空間において、自走ビークルが歩行者を検知したというeHMIを出すことと、eHMIの種類は、歩行者が自走ビークルの前を横断する行動にどのような違いを生むのか？

■ 帰無仮説

- 自走ビークルの出すeHMIと歩行者の横断行動には関係がない

方法：フィールド実験の環境

- **歩車混在空間***：交通ルールが最低限で、歩行者や自転車、自動車などが**同じ道を共有して使用する空間**
- 実験フィールドとして、マドリード・カルロス3世大学のキャンパス (歩車混在空間) を設定
 - 道が直角に整備されているため、歩行者とのインタラクションが直角で起きやすい
- 実際の道路状況に近付けるため、歩行者はデータが収集されていることを知らされていなかった
- 本論文の著者と同じ大学の別の研究チーム(Gomez et al., 2016)が開発した自走ビークルを使用



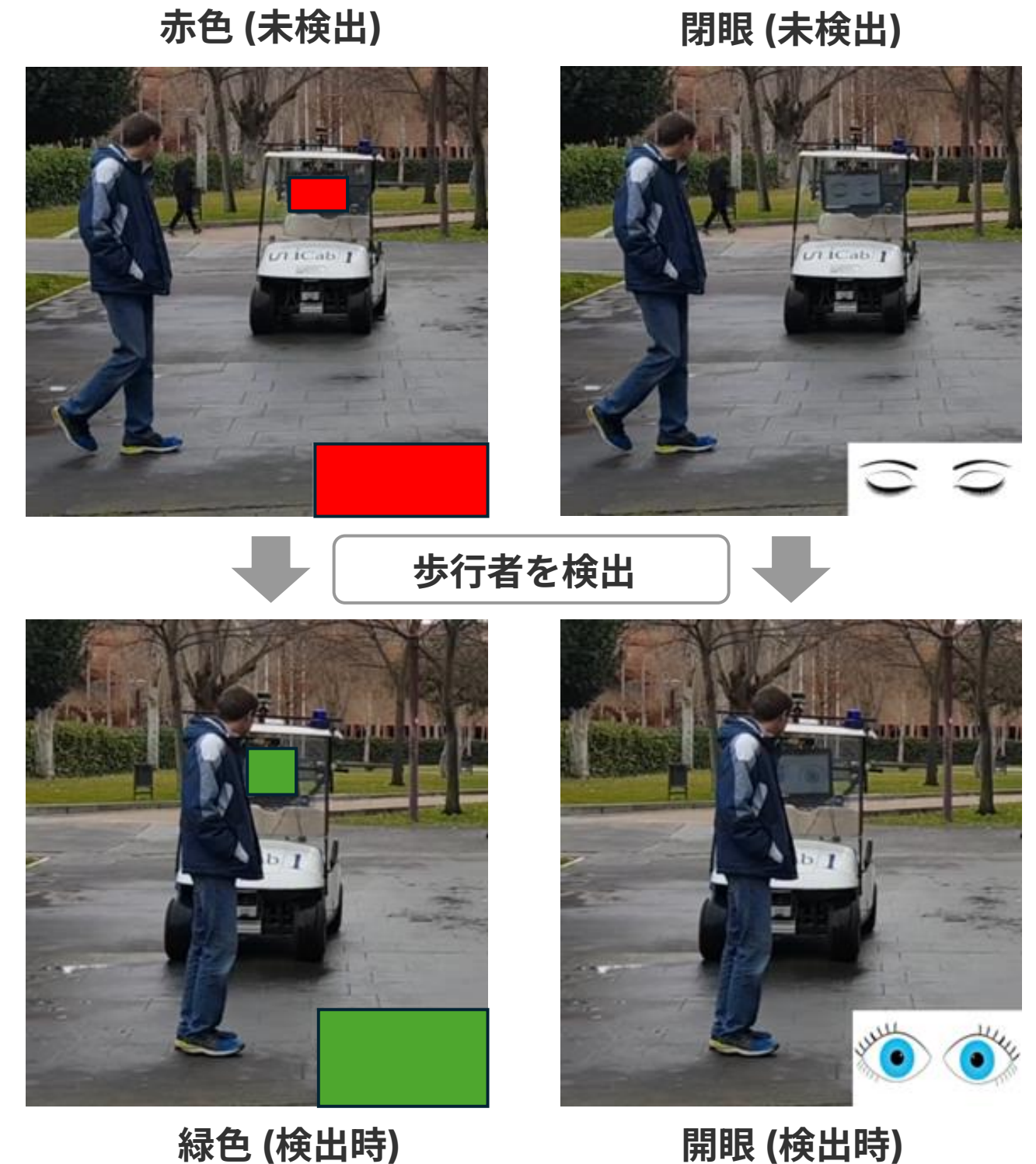
<https://www.flickr.com/photos/eventosuc3m/37696405594>



Gomez et al. (2016)

方法：eHMIの種類

- eHMIなし (ベースライン)
- 赤/緑色のeHMI
 - 歩行者を検出していない間は赤色で、検出時は緑色
 - 赤は歩行者の横断が危険であることを示し、緑は安全に横断できることを示すように意図
 - ・ 信号機の色とメッセージを参考
- 閉眼/開眼のeHMI
 - 歩行者を検出していない間は閉眼で、検出時は開眼
 - 閉眼は歩行者の横断が危険であることを示し、開眼は安全に横断できることを示すように意図



方法：交通の安全性を評価するパラメータ

以下のパラメータを**交通の安全性を評価する指標**とし、eHMIの種類による違いを検討

1. **歩行者の頭と体の姿勢** (横断行動の判別に使用)
2. **ビークルと歩行者の距離**
3. **ビークルの速度**
4. **TTC***(衝突までの時間)

方法：歩行者の姿勢同定アルゴリズム

■ 姿勢の同定

- CMUI-Panoptic labs (Cao et al., 2018; Wei et al., 2016) によって開発されたOpenPoseライブラリを使用
- 姿勢のキーポイントが最もよく現れる箇所のヒートマップを計算し、関節の点同士を繋ぐ

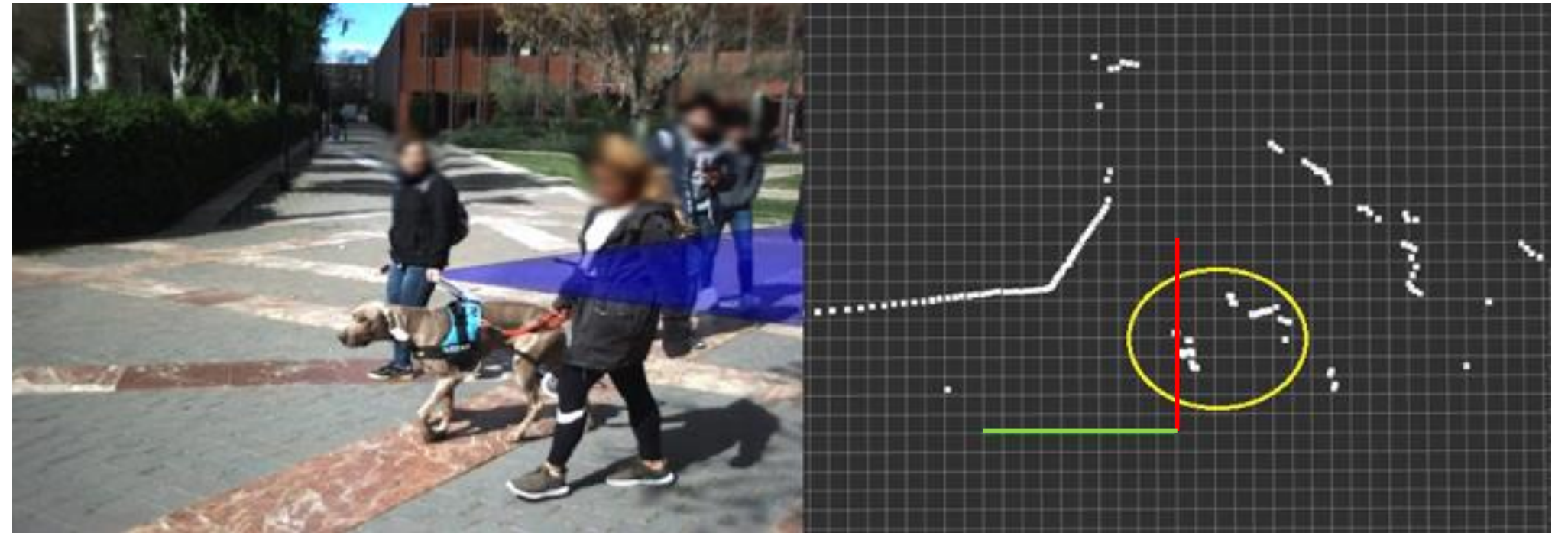
- 歩行者のアイコンタクト、顔表情、頭の向きを分析し、**歩行者の横断行動 (停止/横断)** を決定するように学習させた



OpenPoseライブラリによって計算された姿勢 (有色点) と顔 (白点)

方法：歩行者との距離推定アルゴリズム

- ビークルに備えられていた2Dレーザーにより歩行者との距離を取得
- 取得した距離を、Rviz可視化パッケージにより連続点として視覚化
- RVIZツールを用いて歩行者に相当する点を分析することにより、インタラクション時の歩行者とビークルの距離を計算



左：自走ビークルに搭載された立体視カメラで撮影された画像。

右：RViz ROS可視化ウィジェット上の一連の距離点としてのVRUの表現。基準軸は画像の中央に位置し、その平面は自走ビークルの移動平面に平行。

方法：データの取得

- 自走ビークルは、2日間で決まったルートを何度か走行し、135人の歩行者とのインタラクションを収めた36個のビデオを取得
- 135人の歩行者のうち、**92人のデータを分析**に使用
 - 92人 (68.1%)：ビークルのモニターを視認
 - 43人 (31.9%)：ビークル自体を視認せず
- 追加の分析(スライドP25)では、ビークルに気づかなかった43人のデータも分析し、アイコンタクトの影響を検討
 - 交通標識の無い交差点ではアイコンタクトが非常に重要
 - アイコンタクトを取らないことは、交通上でのドライバー同士のインタラクションにおいて、他者に対して支配的な態度であることを意味する (Vanderbilt, 2009)

方法：データの加工

- 歩行者の行動パターンのカテゴライズ

1. ビークルのeHMIを視認して、少しの間**立ち止まる**など、行動を変えた歩行者 (**停止**)
 2. ビークルのeHMIを視認したが、そのまま**歩き続ける**など、行動を変えなかった歩行者 (**横断**)
- 以降、行動パターンを、**停止/横断**、として分析

- TTCの計算

- インタラクション時の歩行者とビークルの距離を計算し、この距離とビークルの速度に基づき、TTCを計算

方法：独立変数と従属変数

- 独立変数

- eHMIの種類 (eHMIなし、赤/緑、閉眼/開眼)

- 従属変数

- 停止/横断した歩行者の割合
- インタラクション時の歩行者とビークルの距離
- インタラクション時のTTC

結果：eHMIの種類が行動パターンに与える影響

各eHMI時に横断/停止した歩行者の人数

	eHMIなし	緑色	開眼	赤色	閉眼
横断	17	9	11	25	21
停止	3	2	1	1	2

- **eHMIの種類が歩行者の行動パターン (停止/横断) に与える影響を検討するために χ^2 検定を実施 (右)**
- 歩行者の行動パターンの割合に有意な差は見られず
- ビークルのモニターを見た歩行者の多くが、**eHMIの有無・種類に関係なく、ビークルの前を横断**

χ^2 検定の結果一覧

- (n.s.) eHMIなし vs. 緑色： $\chi^2 (1, N=31) = 1.99, p = 0.16$
- (n.s.) eHMIなし vs. 開眼： $\chi^2 (1, N=32) = 0.49, p = 0.48$
- (n.s.) eHMIなし vs. 赤色： $\chi^2 (1, N=46) = 1.77, p = 0.18$
- (n.s.) eHMIなし vs. 閉眼： $\chi^2 (1, N=43) = 0.41, p = 0.52$
- (n.s.) 緑色 vs. 閉眼： $\chi^2 (1, N=34) = 0.65, p = 0.42$
- (n.s.) 緑色 vs. 開眼： $\chi^2 (1, N=23) = 0.49, p = 0.48$
- (n.s.) 緑色 vs. 赤色： $\chi^2 (1, N=27) = 2.13, p = 0.14$
- (n.s.) 開眼 vs. 赤色： $\chi^2 (1, N=38) = 0.33, p = 0.57$
- (n.s.) 閉眼 vs. 赤色： $\chi^2 (1, N=49) = 0.50, p = 0.48$
- (n.s.) 開眼 vs. 閉眼： $\chi^2 (1, N=35) = 0.01, p = 0.97$

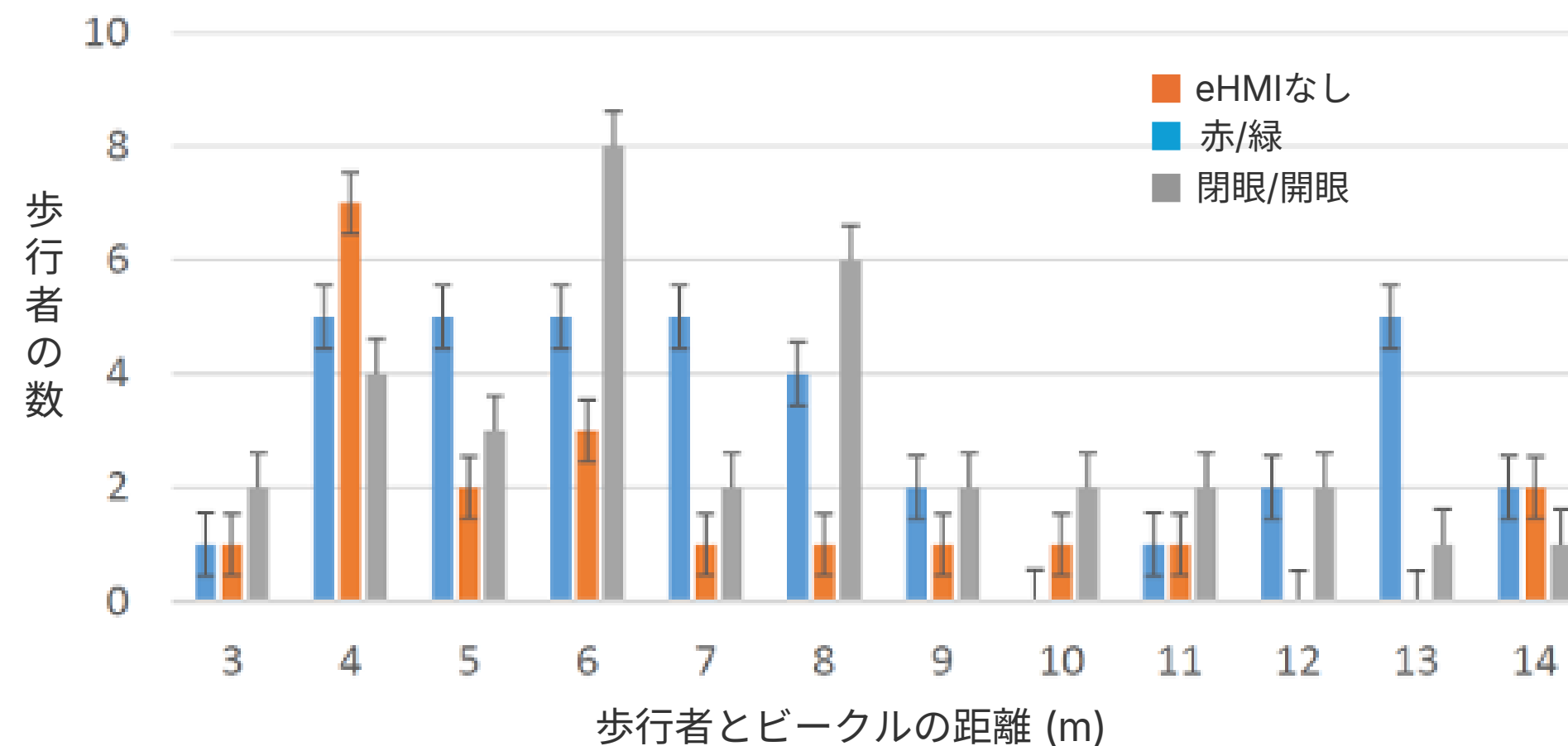
結果：インタラクション時の距離 (記述統計)

■ 歩行者とビークルの距離

- 69人 (71.7%) が4-8mの距離*で横断

■ eHMIごとの平均 (m)

- eHMIなし：6.14 (SD=3.56)
- 赤/緑：7.38 (SD=3.48)
- 閉眼/開眼：6.88 (SD=2.76)



* 論文中には5-9mとあったが、4-8mの間違いだと思われる

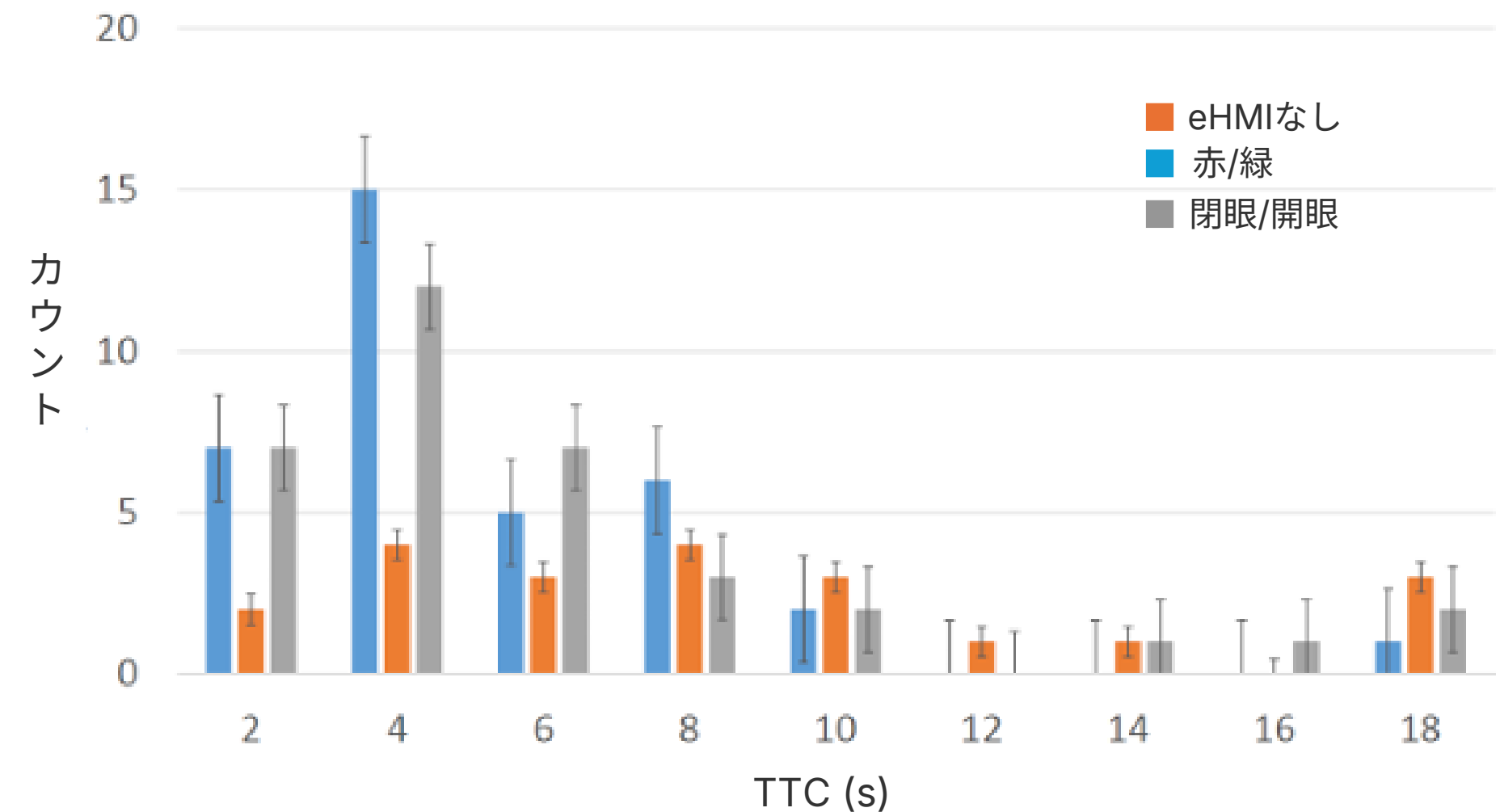
結果：インタラクション時のTTC (記述統計)

■ TTC

- ほとんどが2-8秒

■ eHMIごとの平均 (s)

- eHMIなし：7.31 (SD=4.64)
- 赤/緑：4.90 (SD=6.23)
- 閉眼/開眼：5.10 (SD=7.91)



結果：インタラクション時の距離とTTC (検定)

記述統計	eHMIなし		赤/緑		閉眼/開眼	
	平均	SD	平均	SD	平均	SD
距離 (m)	6.14	3.56	7.38	3.48	6.88	2.76
TTC (s)	7.31	4.64	4.90	6.23	5.10	7.91
t検定($\alpha=0.05$)	eHMIなし vs. 赤/緑		eHMIなし vs. 閉眼/開眼		赤/緑 vs. 閉眼/開眼	
	t(92)	p 値	t(92)	p 値	t(92)	p 値
距離 (m)	1.27	0.20	0.85	0.39	0.67	0.55
TTC (s)	1.51	0.13	1.07	0.28	0.90	0.12

- 歩行者とビークルの距離
 - eHMIあり (赤/緑 or 閉眼/開眼) の場合よりもeHMIなしの場合の方が距離は近かったが、**非有意**
- TTC
 - eHMIなしの場合よりもeHMIありの場合の方がTTCは短かったが、**非有意**
- 距離・TTCの両方で、eHMIの種類 (赤/緑、閉眼/開眼) は有意な差を生まず

結果：歩行者のアイコンタクトの有無 (追加の分析)

■ 歩行者のアイコンタクトの有無が距離とTTCに与える影響

- 92人 (68.1%)：ビークルのモニターを視認 ← アイコンタクトあり
- 43人 (31.9%)：ビークル自体を視認せず ← アイコンタクトなし

	アイコンタクトなし		アイコンタクトあり		t検定 ($\alpha=0.05$)	
	平均	SD	平均	SD	$t(133)$	p 値
距離 (m)	6.93	3.28	7.81	3.56	1.41	0.16
TTC (s)	5.87	6.71	8.93	12.22	1.37	0.17

■ 距離・TTCの両方で、歩行者のアイコンタクトの有無は有意な差を生まず

考察：eHMIの有無と種類の影響

- eHMIの有無と種類は、ビークルの横で停止した歩行者と前を横断した歩行者の割合に有意な差をもたらさなかった
→ **ほとんどの歩行者が、赤色や閉じた目のeHMIの場合でも横断した**
- eHMIの有無と種類は、横断時の歩行者とビークルの距離、そしてTTCに有意な差をもたらさなかった
→ **eHMIの有無と種類は、交通の安全性を高めなかった**
- ビークルの最高速度が5m/sと遅く、歩行者にとって危険ではなかったことが原因であると考えられる

考察：アイコンタクトの影響

- 歩行者のアイコンタクトの有無と、交通の安全性に関わるビークルと歩行者の距離やTTCに統計的な有意差は見られなかった
 - 歩車混在空間での歩行者と自走ビークルのインタラクションにおいて、**歩行者のアイコンタクトが交通の安全性を高めるかどうかは明らかにできず**

考察：観察からの気づき

- 歩行者は「ビークルが私を見ていた」というコメントを残している
→ **閉眼/開眼のeHMIは、実際に見られているという感覚を誘発した**
- 実験中、ほとんどの歩行者は電話や会話に気を取られていたことが観察された
- 安全上のため、歩行者がビークルに気づいていない場合はビークルは停止したが、多くのそうした歩行者は**ビークルが停止して初めてビークルの存在に気付いた**

考察：結論

- **結論：歩車混在空間のような、公的な交通ルールが無い場面において、自走ビークルの視覚的なeHMIは、VRUとのインタラクションに影響を与えない**
- 自走ビークルのeHMIは、歩行者の横断行動に影響を与えないとする先行研究と一致
(Rothenbucher et al., 2016; Clamann et al., 2017; Pillai, 2017; Rasouli & Tsotsos, 2019)
→ 先行研究では、ビークルの速度や歩行者との距離が横断行動にとって重要と結論
- 本研究では、歩車共存空間において実際の無人自走ビークルと歩行者のインタラクションの観察から得られたデータで先行研究での結論を支持

考察：今後の研究

- 今後の研究では音を用いたeHMIなどの、**視覚的なeHMI以外にも検討が必要**
- また、歩行者の行動の更なるデータ収集のために、ビークルの後ろを通る歩行者のデータも集められるようなセンサーを実装する必要あり

引用文献

-
- Cao, Z., Hidalgo, G., Simon, T., Wei, S. E., & Sheikh, Y. (2018). OpenPose: realtime multi-person 2D pose estimation using Part Affinity Fields. in arXiv preprint arXiv:1812.08008.
- Clamann, M., Aubert, M., & Cummings, M. L. (2017). Evaluation of vehicle-to-pedestrian communication displays for autonomous vehicles (No. 17-02119).
- Fridman, L., Mehler, B., Xia, L., Yang, Y., Facusse, L. Y., & Reimer, B. (2017). To walk or not to walk: Crowdsourced assessment of external vehicle-to-pedestrian displays. arXiv preprint arXiv:1707.02698.
- Gomez, D., Marin-Plaza, P., Hussein, A., Escalera, A., & Armingol, J. (2016). Ros-based architecture for autonomous intelligent campus automobile (icab). UNED Plasencia Revista de Investigacion Universitaria, 12, 257-272.
- Lagström, T., & Malmsten Lundgren, V. (2016). AVIP-Autonomous vehicles' interaction with pedestrians-An investigation of pedestrian-driver communication and development of a vehicle external interface.
- Miguel, M. A., Fuchshuber, D., Hussein, A., & Olaverri-Monreal, C. (2019). Perceived Pedestrian Safety: Public Interaction with Driverless Vehicles. *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Paris, France, 2019*, pp. 90-95, doi: 10.1109/IVS.2019.8814145.
- Pillai, A. (2017). Virtual reality based study to analyse pedestrian attitude towards autonomous vehicles (Master's thesis).
- Rasouli, A., & Tsotsos, J. K. (2019). Autonomous vehicles that interact with pedestrians: A survey of theory and practice. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 21(3), 900-918.
- Rothenbücher, D., Li, J., Sirkin, D., Mok, B., & Ju, W. (2016, August). Ghost driver: A field study investigating the interaction between pedestrians and driverless vehicles. *In 2016 25th IEEE international symposium on robot and human interactive communication (RO-MAN) (pp. 795-802). IEEE*.
- Schmidt, S., & Faerber, B. (2009). Pedestrians at the kerb—Recognising the action intentions of humans. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 12(4), 300-310.
- Vanderbilt, T. (2009). *Traffic Why We Drive the Way We Do (and What It Says About Us)*. Vintage. (酒井泰介(訳) (2008). とよりの車線はなぜスイスイ進むのか？ 交通の科学 早川書房).
- Yang, S. (2017). Driver behavior impact on pedestrians' crossing experience in the conditionally autonomous driving context.
- Wei, S. E., Ramakrishna, V., Kanade, T., & Sheikh, Y. (2016). Convolutional pose machines. In *Proceedings of the IEEE conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 4724-4732).
-