

自動運転車からの視線提示による交通事故低減の可能性の検討

張家銘* 戸田光紀* Xinyue Gui* Stela H. Seo† 五十嵐健夫*

概要. 様々な自動車メーカーや研究者が、自動車に目を追加することで、歩行者とのコミュニケーションを円滑にするアイデアを提示している。我々の以前の研究では、自動運転車に視線を提示できる目を付与することにより、歩行者の道路横断の判断の迅速化が可能であることを示した。本研究では、より重要な問題である "視線の提示によって交通事故を減らすことができるのか?" について検討した。歩行者が急いで自動運転車の前を横断しようとしている状況を考える。この時、車が歩行者を見ていないということは、車が歩行者を認識していないことを意味する。したがって、歩行者は道路を渡るべきではないと判断でき、潜在的な交通事故を回避することができる。我々は、モーターで駆動される物理的な目を付与した実験車両を製作し、それを撮影した仮想環境において被験者実験を行った。その結果、視線提示によって危険な道路横断を低減できる可能性があること、歩行者の主観的な安全感・危険感を高めることができることが分かった。また、視線を提示する自動運転車とのインタラクションにおいて、男性と女性の行動の間に差異があることも示唆された。

1 はじめに

自動運転車の課題の1つに、自動運転車と歩行者の間のインタラクションの問題が挙げられる [1]。以前の我々の研究では、歩行者が道路を横断するために立っているシナリオにおいて、自動運転車の目が歩行者の道路横断の判断をより早くすることを示した [7]。しかし、道路横断が少し速くなったり遅くなったりすることは、交通事故（けがや死亡など）ほど重大ではないといえる。交通事故を減らすこと（＝正しい判断をすること）の方が、早く判断できるようにすることよりもずっと重要である。本研究では、「視線の提示によって交通事故を減らすか」という研究課題への解答を試みる。

歩行者が急いで歩いて道路を渡るという重要な道路横断のシナリオを考える。車（目）が歩行者を見ていない場合、車は歩行者を認識していないことを意味するとする。そのため、歩行者は道路を渡るべきではないと判断し、交通事故の可能性を回避することができる。しかし、車（目）が歩行者を見ている場合は、車が歩行者を認識していることを意味する。そのため、歩行者は横断歩道を渡っても安全かどうかを判断することができる。

18名の参加者を対象に、視線提示の効果を調べる実証実験を行った。実車のプロトタイプを製作し、実際の交通環境での360度動画を撮影し、バーチャ

ルリアリティ環境に取り込んだ。4つの条件（図1）について、重要な道路横断のシナリオで、目のない車と目のある車を比較した。参加者はVRの中で歩行者となり、道路横断の判断を行った。参加者の判断の誤り率を計測した。

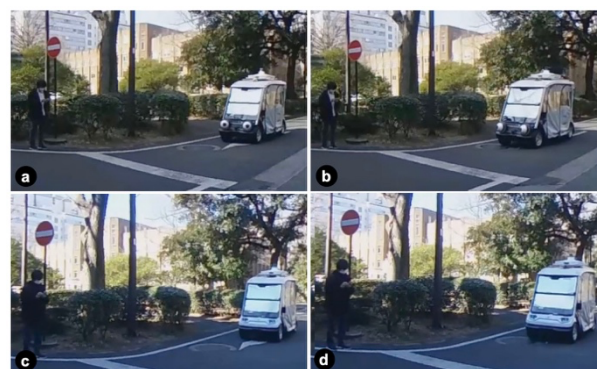


図1. 実証研究における参加者の視点。(a) 安全な場合、(b) 危険な場合、(c) 安全な場合、(d) 危険な場合。

最も注目すべき結果は、目が男性歩行者の潜在的な交通事故を減らす可能性がある点である。本論文では、実際のモーターで駆動される目のプロトタイプ設計と、正確なタイムラインによるシナリオ、さらに、目に対する性別の影響についての考察を行う。

本論文は、ACM AutomotiveUI 2022 で発表された論文の内容をまとめたものである [20]。

2 関連研究

車両とドライバーの合図は、車両が接近した際に歩行者が道路横断の判断をするのに役立つ2種類の情報である[2]。しかし、自動運転車と歩行者のインタラクションは、人間が運転する車両とは異なる。近年、自動運転車と歩行者のインタラクションが広く検討されており、多くの研究が自動運転車と歩行者のインタラクションのための様々なコミュニケーション様式を提案している。例えば、自動運転車に外部ディスプレイを搭載することは、自動運転車と歩行者のインタラクションのための一般的なソリューションである[3, 4]。このディスプレイは、歩行者とコミュニケーションをとるために、テキストやシンボルを提示する[8]。また、自動運転車と歩行者のインタラクションのための外部ヒューマンマシンインタフェース(eHMI)で、光の異なる色やアニメーションについていくつかの研究が行われている[5, 6]。また、自動車に搭載された「目」[7, 8, 9, 10, 11]や「笑顔」[8, 12, 13]を用いて歩行者とインタラクションを行うなど、人間らしいコミュニケーションインタフェースが研究されている。Chang ら[7]は、自動運転車に「目」を搭載するコンセプトを提案し、「目」が歩行者の道路横断の判断をより早くすることを示した。Jaguar Land Rover [11]も同様のコンセプトを提案し、歩行者の自動運転技術に対する信頼感を調査した。さらに、研究[10]では、複数の視線方向を用いて車の進行方向を示すという概念を提案した。本研究では、先行研究とは異なり、歩行中の歩行者が横断歩道を急いで渡るという重要な交通シナリオに着目し、視線方向を用いて車が周囲の歩行者を認識していることを提示している。

実環境で自動運転車による実証研究を行うことは困難である[14]。多くの研究が、3DCGを使用して、提案したeHMIコンセプトを提示し、VR環境における自動運転車対歩行者のインタラクションを評価している[15, 16, 17]。しかし、VR環境における3DCGの自動車モデルは、実環境における実車とは大きく異なる可能性がある。実環境における実車を用いた実証研究がいくつか行われている[18]。本研究では、実環境とVRの混合法によって研究を行った。同様の混合法は、自動運転車-歩行者間のインタラクションを評価するために使用された[14]。この混合法は、実世界とVR環境のバランスをとることができると考えている。

3 提案手法

本研究では、歩行者が急ぎ足で信号機のない横断歩道を渡ろうとする重要な道路横断のシナリオに着目した。これは交通事故が発生する典型的なケース

であり、調査[19]によれば、90%以上のドライバーが信号機のない横断歩道で歩行者が横断待ちをしても停止しないことが分かっている。このような場合、歩行者は危険な状況(=傷害や死亡)を回避するために、車両の合図だけを頼りに道路横断の判断をすることになる。我々は、[7]のような歩行者が立っていてこれから道路を渡るという危険でないシナリオよりも、すでに歩行者が歩いて渡っているというこのシナリオの方がはるかに重要であると考えている。

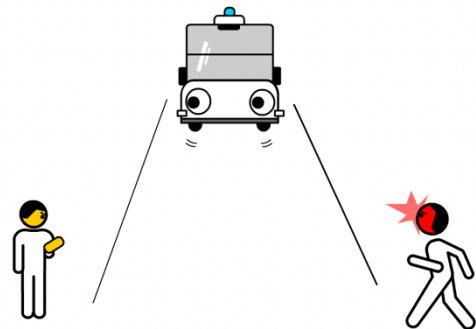


図2. 重要な道路横断のシナリオにおける自動車への視線。

図2は、急ぎ足の歩行者が道路を渡ろうとしたときに、突然、車の接近に気づくというシナリオである。歩行者は車が止まるかどうかを判断しなければならない。車が止まると判断した場合、歩行者は止まらずに横断歩道を渡り続けることができる。しかし、車が止まらなと判断した場合、歩行者は安全のために止まらなければならない。(1)車が止まっても歩行者も止まる場合はエラー、(2)車が止まらなくても歩行者が歩き続ける場合はエラーと、2つの判断をエラーと考える。

提案手法では、歩行者への視線提示によって、自動運転車が停止するかどうかの情報提示を行う。歩行者への情報提示方法としては、ディスプレイやライトなども考えられるが、以下の理由により視線を選択した。まず、手動運転車では、歩行車の84%が道路を横断するときに、運転者とのアイコンタクトを求めている[21]。よって、自動運転車においてもアイコンタクトを利用することで、歩行者が混乱することなく情報を受け取ることができる。また、ディスプレイやライトでは、個別の歩行者に対して異なる情報を提示することが難しいが、視線では、視線を向けている歩行者と視線を向けていない歩行者にそれぞれ異なる情報を提示することができる。

4 ユーザー実験

我々は、図3に示すように、ゴルフカート上に「制御可能な」目を設置した。目には3つの視線方向(左、

直、右)があり、矢印キー(物理ボタン)を使って手動で操作することができる。このカートは完全な自動運転機能を有しているが、安全性の観点から、ユーザー調査の際には手動で運転した。フロントガラスとサイドガラスにスモークガラスを貼り、自動運転であることを装った。



図3. 実車のプロトタイプ(左, 直, 右).

提案する歩行者用道路横断状況の実環境で360度動画を撮影した。図5に歩行者道路横断の環境と状況を示す。図4(a):この場所から歩行者は歩道を歩き始め、歩行者は完全な道路状況を見ることができない。図5(b):歩行者が歩き続けていると、突然、自動車近づいてくるのが見える。図5(c):歩行者は歩き続け、道路(つまり車線)に出る前に道路を横断するかどうか判断する必要がある。



図4. 360度動画を実環境で。

映像には、(1)目なし車は歩行者に譲らないつもり(危険な場合)、(2)目なし車は歩行者に譲るつもり(安全な場合)、(3)目線あり車は歩行者を見ておらず、歩行者に譲らないつもり(危険な場合)、(4)目線あり車は歩行者に譲るつもり(安全な場合)の4つの車の挙動が収録されている(図5)。

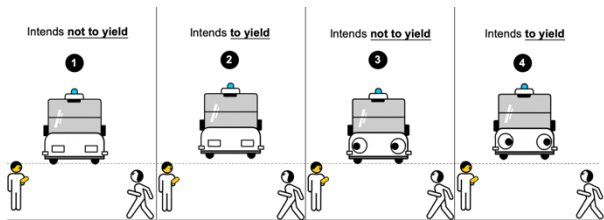


図5. 車の挙動に関する4つの条件。

ユーザースタディのために、18名(男性9名、女性9名、18~49歳)を募集した。ユーザースタディは、2022年2月15日から3月10日にかけて実施した。募集は外部に委託した。手続き費用と謝礼を含めた総費用は約2,160ドル(参加者1人あたり

約120ドル)であった。

実証研究では、動画をVR環境に配置した。参加者にはHMDを装着してもらい、今にも道路を横断しそうな歩行者になりきってもらった。参加者のタスクは、周囲の交通状況を観察し、道路横断の判断を行うことである。具体的には、横断歩道を渡る際に危険を感じた場合(衝突を避けるため)には横断を止める判断をする必要がある。しかし、安全に横断できる場合は、何もする必要がない。実証研究では被験者内法を用い、各参加者に40回(各条件10回、図6)道路横断の判断をさせた。4つの条件の順番は参加者ごとにランダムとした。

参加者を部屋に招き、360度動画が見られるVR環境を設置した(図6)。参加者に対しては、口頭で概要説明と詳細な説明を行った。評価自体は、指示・試行(10~15分)、VRタスク(15~25分)、アンケート(5分)の3部構成とした。30~40分程度で全ての評価が終了した。



図6. ユーザー実験の写真。

VR実験中の被験者への説明とタスク:

“VR, では急いでいる歩行者が道路(信号なし)を渡ろうとしているところです。まず、障害物(自転車や建物)に阻まれ、道路状況を完全に見ることができません(つまり、車が近づいているのが見えません)。しかし、その障害物を通り過ぎようと歩き続けていると、突然、車が近づいてくるのが見えます。車はあなたに譲るかもしれませんし、譲らないかもしれません。横断が危険と感じたら「STOP」横断の判断をする必要があります。”

本実験で実施するタスクの手順:ステップ1:「開始」ボタンを押してタスク開始。ステップ2:(危険を感じたら)「停止」ボタンを押して道路の横断を停止。

図7は、VR環境における車の挙動と歩行者の動きの関連する3つの場所を示している。a地点:タスクが開始されると、車と歩行者はこの場所から移動を開始する。この位置では歩行者は車を見ることができない。b地点:車と歩行者はb地点まで前進を続け、この地点に到達すると、歩行者は車を見ることができる。c地点:車と歩行者がこの場所に到着するまでに3秒のカウントダウンが提示される。参加者はカウントダウン終了直後に道路横断の判断をする必要がある。

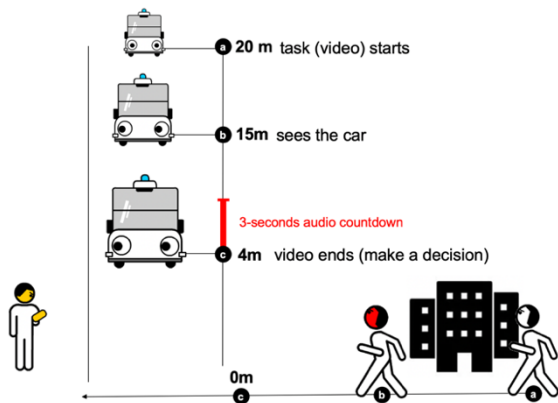


図 7. VR 環境における自動車の挙動と歩行者の動き。

道路横断の判断の誤りをカウントした。条件 2, 4 (安全な場合) では、停止判定をエラーとカウントした。しかし、条件 1, 3 (危険な場合) では、横断判定をエラーとしてカウントした。

5 結果

図 8 は、全体のエラー率である。全体のエラー率は、目なし車で 50.56%，目あり車で 29.44%であった。Paired t 検定による誤り率の解析の結果、両車種間の差は統計的に有意であった ($p < 0.01$)。このことから、目あり車は一般的に目なし車よりも歩行者の道路横断の判断をより正しく行うことができることがわかった。

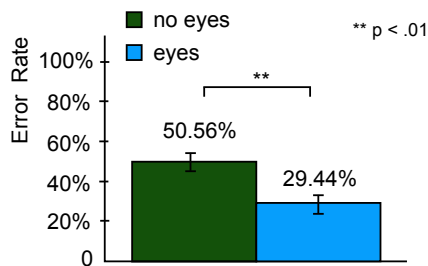


図 8. 全体のエラー率。目なし：平均=50.56, SD=13.81, 目あり：平均=29.44, SD=14.54。

図 9 は、男性参加者のエラー率を示している。危険のあるケースにおいて、男性参加者のエラー率は、目なし車で 48.89%，目あり車で 17.78%であった。対応のある t 検定分析の結果、その差は統計的に有意であった ($p < 0.05$)。しかし、危険のないケースでのエラー率は、目なし車で 55.56%，目あり車で 35.56%となり、統計的に有意な差は見られなかった ($p > 0.05$)。これらの結果は、男性参加者にとって、目は安全性には寄与するが、効率性には寄与しないことを示している。

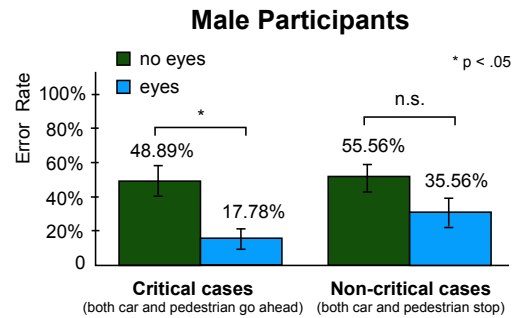


図 9. 男性参加者のエラー率。危険な場合 (Critical cases)。目なし：平均 48.89, SD=31.4, 目：平均 17.78, SD=17.87。安全な場合 (Non-critical cases)。目なし：平均=55.56, SD=26.03, 目あり：平均=35.56, SD=27.44。

図 10 は、女性参加者のエラー率を示している。危険のある場合、エラー率は、目なし車で 25.56%，目あり車で 31.11%であった。対応のある t 検定分析の結果、その差は統計的に有意ではなかった ($p > 0.05$)。一方、危険のない場合では、エラー率は目なし車で 72.22%，目あり車で 34.44%となり、両者の間に統計的に有意な差 ($p < 0.05$) が認められた。これらの結果から、女性参加者にとって目は効率性に寄与するが、安全には寄与しないことがわかった。

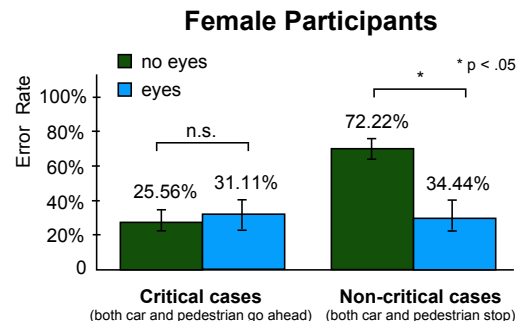


図 10. 女性参加者のエラー率。危険な場合 (Critical cases)。目なし：平均 25.56, SD=20.68, 目：平均 31.11, SD=29.77。安全な場合 (Non-critical cases)。目なし：平均値=72.22, SD=17.87, 目あり：平均値=34.44, SD=31.67。

男性歩行者と女性歩行者に分けて異なるシナリオ (危険な場合と危険でない場合) の集計を行うとともに、ANOVA により性差 (=エラー率) を分析した。その結果、男女間の差は統計的に有意であった ($F(7, 64) = 4.195, p = 0.0007$)。このことから、男性歩行者と女性歩行者は、自動運転車と目対話する際に、異なる道路横断行動をとることがわかった。

6 今後の課題

将来的には、実際の自動運転車のシステム (AI) と目を統合し、AI の内部状態に応じて目の視線を制

御することを目指したいと考えている。例えば、さまざまな交通状況に対応するために、異なるアルゴリズムを開発して、異なる視線制御（＝異なる自動運転モード）を行うことが可能である。さらに、本研究では、実際の自動運転車と歩行者の対話において、危険な場合とそうでない場合で興味深い性差が見られたことから、歩行者の性別を認識し、実際の自動運転車の挙動を変更する技術の開発も有用であると考えられる。また、歩行者の性別だけでなく、子供や高齢者など、道路利用者によっても実際の自動運転車との対話方法が異なる可能性があると考え、異なる道路利用者についても調査する予定である。VRの評価については、VR環境においてユーザーは現実の交通事故の危険をどのように認識することができるのか、といった点について検証したいと考えている。

7 結論

目が歩行者の道路横断判断の効率化に役立つとした先行研究[7]とは異なり、本研究では、状況によっては目を使って交通事故を減らすことができる可能性があることを示したものである。我々は、視線を提示できる目を搭載した実車のプロトタイプを製作し、重要な道路横断のシナリオにおいて、目を搭載した車と搭載していない車を比較する実証実験を実施した。その結果、目があることで男性歩行者の潜在的な交通事故を減らすことができ（危険な場合）、女性歩行者の交通効率を高めることができることが示された（危険でない場合）。また、視線の方向によって、道路横断時における歩行者の「安心感」（車が自分を見ている）や「危機感」（車が自分を見ていない）を高められることが判明し、本研究では、実際の自動運転車と歩行者のインタラクションにおいて、危険な場合（車も歩行者も先に進む）とそうでない場合（車も歩行者も止まる）の対応の性差について考察した。これらの知見は、今後の自動運転車-歩行者間インタラクションの開発において有用な知見と興味深い方向性を提供するものである。

謝辞

本研究は JST CREST JPMJCR17A1 の支援を受けたものである。また、車両は株式会社ティアフォーから提供されたものである。

参考文献

[1] Daniel J. Fagnant, and Kara Kockelman. 2015. Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy

recommendations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 77: 167-181.

[2] Stefanie M. Faas, Johannes Kraus, Alexander Schoenhals, and Martin Baumann. 2021. Calibrating Pedestrians' Trust in Automated Vehicles: Does an Intent Display in an External HMI Support Trust Calibration and Safe Crossing Behavior?. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-17).

[3] Yeti Li, Murat Dikmen, Thana G. Hussein, Yahui Wang, and Catherine Burns. 2018. To Cross or Not to Cross: Urgency-Based External Warning Displays on Autonomous Vehicles to Improve Pedestrian Crossing Safety. In *Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI '18)*. ACM, New York, NY, USA, 188-197.

[4] Karthik Mahadevan, Sowmya Somanath, and Ehud Sharlin. 2018. Communicating Awareness and Intent in Autonomous Vehicle-Pedestrian Interaction. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18)*. ACM, New York, NY, USA, Article 429, 12 pages.

[5] Debargha Dey, Marieke Martens, Chao Wang, Felix Ros, and Jacques Terken. 2018. Interface Concepts for Intent Communication from Autonomous Vehicles to Vulnerable Road Users. In *Adjunct Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI '18)*. ACM, New York, NY, USA, 82-86.

[6] Debargha Dey, Kai Holländer, Melanie Berger, Berry Eggen, Marieke Martens, Bastian Pfefing, and Jacques Terken. 2020. Distance-Dependent EHMI for the Interaction Between Automated Vehicles and Pedestrians. In *12th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (Virtual Event, DC, USA) (AutomotiveUI '20)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 192-204.

[7] Chia-Ming Chang, Koki Toda, Daisuke Sakamoto, and Takeo Igarashi. 2017. Eyes on a Car: an Interface Design for Communication between an Autonomous Car and a Pedestrian. In *Proceedings of the 9th international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications (AutomotiveUI '17)*, pp. 65-73.

- [8] Chia-Ming, Chang, Koki Toda, Takeo Igarashi, Masahiro Miyata, and Yasuhiro Kobayashi, 2018, September. A Video-based Study Comparing Communication Modalities between an Autonomous Car and a Pedestrian. In Adjunct Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI '18), pp. 104-109.
- [9] Yoichi Ochiai and Keisuke Toyoshima. 2011. Homunculus: The Vehicle as Augmented Clothes. In Proceedings of the 2nd Augmented Human. 3-6
- [10] Xinyue Gui, Koki Toda, Stela H. Seo, Chia-Ming Chang and Takeo Igarashi. 2022. "I am going this way": Gazing eyes on a self-driving car show multiple moving directions. In Proceedings of the 14th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI '22).
- [11] Jaguar Land Rover Automotive Plc., 2018. The Virtual Eyes Have it. Retrieved June 19, 2022 from <https://www.jaguarlandrover.com/2018/virtual-eyes-have-it>
- [12] Hiroshi Hayakawa, Paul S. Fischbeck, and Baruch Fischhoff. 2000. Traffic accident statistics and risk perceptions in Japan and the United States. *Accident Analysis & Prevention*, 32(6), 827-835.
- [13] Chia-Ming Chang, Koki Toda, Daisuke Sakamoto, and Takeo Igarashi. 2017. Eyes on a Car: an Interface Design for Communication between an Autonomous Car and a Pedestrian. In Proceedings of the 9th international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications (AutomotiveUI '17), pp. 65-73.
- [14] Marius Hoggenmüller, Martin Tomitsch, Luke Hespanhol, Tram Thi Minh Tran, Stewart Worrall, and Eduardo Nebot. 2021. Context-based interface prototyping: Understanding the effect of prototype representation on user feedback. In Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1-14.
- [15] Andreas Löcken, Carmen Golling, and Andreas Riener. 2019. How should automated vehicles interact with pedestrians? A comparative analysis of interaction concepts in virtual reality. In Proceedings of the 11th international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications, pp. 262-274.
- [16] Uwe Gruenefeld, Sebastian Weiß, Andreas Löcken, Isabella Virgilio, Andrew L. Kun, and Susanne Boll. 2019. VRoad: gesture-based interaction between pedestrians and automated vehicles in virtual reality. In Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications: Adjunct Proceedings, pp. 399-404.
- [17] Sebastian Stadler, Henriette Cornet, Tatiana Novaes Theoto, and Fritz Frenkler. 2019. A tool, not a toy: using virtual reality to evaluate the communication between autonomous vehicles and pedestrians. In *Augmented reality and virtual reality* (pp. 203-216). Springer, Cham.
- [18] Dirk Rothenbücher, Jamy Li, David Sirkin, Brian Mok, and Wendy Ju. 2016. 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.
- [19] The Japan Automobile Federation (JAF), 2016. JAF finds over 90% of drivers ignore pedestrian crosswalks. Retrieved April 23, 2022 from <https://mainichi.jp/english/articles/20161002/p2a/00m/0na/015000c>
- [20] Chia-Ming Chang, Koki Toda, Xinyue Gui, Stela H. Seo and Takeo Igarashi, 2022, Can Eyes on a Car Reduce Traffic Accidents?. The 14th ACM International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI 2022)
- [21] Šucha, Matúš. 2014. Pedestrians and drivers: their encounters at zebra crossings. In Proceedings of the Fit to drive: 8th International Traffic Expert Congress.

未来ビジョン

Society 5.0において、自動運転は重要な役割を担っている。近年、自動運転技術が高度に発達し、私たちは日常生活の中で自動運転車と出会い、接する機会が増えている。しかし、自動運転技術自体は完成に近づいているかもしれないが、そのような技術を受け入れる社会の準備が整っていない可能性がある。自動運転技術は、信頼性や安全性に関するさまざまな問題をもたらす「ブラックボックス」であり、道路利用者は自動運転車とどう接していいかわからないという問題がある。この点は、もっと慎重に検討されるべき重要なテーマだと考えている。