

基礎論文

歩行者飛出し予測のための周辺車両の半隠消表示法

藤重 秀斗^{*1} 松室 美紀^{*1} 木村 朝子^{*1} 柴田 史久^{*1}

Half-DR Expression of Peripheral Vehicles for Pedestrian Prediction

Shuto Fujishige^{*1}, Miki Matsumuro^{*1}, Asako Kimura^{*1}, and Fumihisa Shibata^{*1}

Abstract --- The existence of blind areas in road environments may cause traffic accidents and stress to passengers. In order to solve this problem, we propose a system to visualize the blind areas by sharing information with vehicles observing the blind areas. In this paper, we focus on a scene in which a pedestrian jumps out from a parked vehicle and confirm the effectiveness of the proposed system through an evaluation experiment. In the experiment, we applied one of the expression methods of the proposed systems, a Half-DR expression that intentionally reduces transparency. The experimental results confirmed the superiority of the proposed system over the other two systems in terms of visibility of blind areas and ease of danger prediction.

Keywords: Diminished reality, Driving support, Driver behavior

1 はじめに

自動車を運転する際、道路上の障害物は歩行者との衝突事故を誘発する恐れがある。国土交通省によると、平成 28 年度の分析対象のヒヤリハットデータのうち、約 6 割が障害物の存在が要因であるとされ、さらにその障害物の種類として最も多いのが路肩に存在する駐車車両であった[1]。国土交通省は交通事故の削減を目標に、先進技術を利用して運転者の安全運転を支援するシステムを搭載した先進安全自動車 (Advanced Safety Vehicle; ASV) に関する技術の開発・実用化・普及を促進するプロジェクトを長年進めてきている。これに則って各自動車メーカーでは車載センサやカメラを活用した先進運転支援システム (Advanced Driver Assistance System; ADAS) の開発が盛んに行われている。前方の自動車や歩行者との衝突を回避・軽減する衝突被害軽減ブレーキ (Advanced Emergency Braking System; AEB) は ADAS の機能の一部となっており、国産の新型車については 2021 年 11 月以降、輸入車や継続生産車についても今後、搭載が義務付けられる。しかし、AEB は先に述べたヒヤリハットのようなケースでは事故の回避が難しい場合があることや、急制動は搭乗者に負担が大きく後続車による自車両への追突を誘発する可能性も考えられることなど、課題も多い。そのため、このようなケースでは運転者が前もって自車両を減速して安全に回避できるシステムが必要だと考えられる。AEB では、前方に

物体を検知した場合に、まずは警告灯や警告音によって運転者にブレーキを促す。警告音による聴覚に情報を伝達する場合、運転者の視線を奪うことなく危険性を伝達できる利点がある。しかし、このような提示方法は予測が困難なヒヤリハットには期待した効果が得られない可能性が高い。例えば、死角から歩行者が飛び出すといった状況では、警告ができたとしても「どこから何が飛び出す」といった、危険事象の発生位置や状態を伝えることが困難である。また、運転者は音情報の解釈に時間がかかってしまうことから判断・操作への移行に遅れが生じる。よって、運転行動の 3 要素である「認知・判断・操作」をスムーズに行うことができる注意喚起方法が必要である。

このような考えから、我々の研究グループでは、隠消現実型安全運転支援システムの開発を進めてきた[2-6]。これは、周辺の障害物を視覚的に透過することで、その障害物によって生じている死角領域の風景を運転者に提示するシステムである (図 1)。例えば、交差点の曲がり角の先や駐車車両の陰から飛

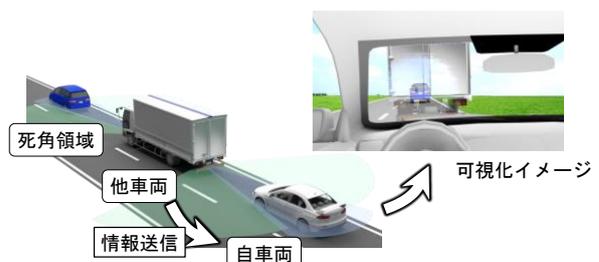


図 1 隠消現実型安全運転支援システムの概念
Fig. 1 Concept of diminished reality based driving safety support system

*1 立命館大学大学院情報理工学研究所

*1 Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

び出してくる車両や歩行者など運転者から直接視認できない物体を可視化することができる。これによって、死角内の物体の挙動予測が容易になることや、直接視覚での認知が可能になることから、交通事故の防止や搭乗者のストレスの低減に貢献することができると思われる。

そこで本論文では、他車両に搭載されたカメラで取得した死角領域の色情報を自車両に送信し、その色情報を自車両のカメラ画像内の障害物に重畳描画することで死角領域を可視化するシステムについて提案する。さらに、提案システムの有効性を確認するために、運転シミュレータによる運転実験を実施した結果について述べる。提案システムの有効性が期待される状況として、路肩に存在する駐車車両から歩行者が飛び出すといった危険事象に着目し、実験を実施した。実験では、提案システムにおける可視化方法の1つである半隠消表示を採用している。提案システムを含めた3つの方式を比較し、それらの差異について論じる。

2 関連研究

2.1 隠消現実感

近年、現実世界とCGオブジェクトを重畳する拡張現実感 (Augmented Reality; AR) や複合現実感 (Mixed Reality; MR) [7][8]に対して、現実空間に実在する物体を視覚的に除去・透過する技術として隠消現実感 (Diminished Reality; DR) [9]に注目が集まりつつある。DR技術の応用範囲は広く、その1つとして、自動車の運転支援のためにDRを応用し、周辺の建物や車両などを透過することで死角領域を可視化する研究はこれまでも行われている。

例えば Kameda らは監視カメラから得られる映像を使用し、死角情報を可視化するシステムを提案した[10]。このシステムでは、監視カメラで撮影した映像を体験者に提示することで死角領域を可視化する。しかし、可視化する領域が平面と近似できる環境を前提としている。そのため、複雑な地形を持つ道路環境での実現性は低い。また、Oishi らは、魚眼カメラとLiDARで構成されるRGB-Dカメラを利用して建物の奥の死角領域を可視化するシステムを提案した[11]。このシステムは死角領域を観測するカメラとユーザが持つカメラの画像の特徴点マッチングを行い、各画像の画素同士を対応付けることで死角領域を可視化する。このシステムではLiDARで取得した3次元点群の活用により、道路上の複雑な環境での利用が期待できる。しかし、ユーザと観測カメラの位置関係や周囲の環境、照明条件などによって画像間の特徴点マッチングが行えない場合、

画素の対応付けが困難であり、正しい可視化結果が得られないことが課題である。

対して Rameau らはステレオカメラを用いて、自車両の前方を走行する車両を透過するシステムを提案している[12]。このシステムでは、前方車両に搭載されたステレオカメラから取得した点群にテクスチャマッピングし自車両と共有することで、自車両から見た死角領域を可視化するシステムである。そのため、Kameda らのような可視化領域の地形による制約やOishi らのような特徴点マッチングによる制約は受けず、実現性も高い。しかし、位置関係の算出方法の都合上、自車両は前方車両が走行した経路を追従するように走行しなければならないという制約がある。

2.2 運転支援システム

死角から歩行者が飛び出すといったヒヤリハットにおいて、危険性を直感的に認識できるシステムとしてHead-up Display (HUD) による情報提示が有効ではないかと期待されている。

例えば Kim らは、歩行者の歩行予測経路と奥行き知覚をARにより表現する歩行者衝突警告システムを開発した[13]。このシステムは、運転席前方に搭載した光学シースルー型HUDに、歩行者の進行方向を示す仮想オブジェクトを投影する。この仮想オブジェクトは経路を示すラインと進行方向を示す半球状のオブジェクトで構成される。半球オブジェクトのサイズが歩行者との距離によって変更されることで歩行者の存在位置の奥行き知覚をサポートしている。これにより、歩行者との衝突の危険性を運転者に示唆することが可能である。実験結果から、遠方の歩行者の飛び出しに対して、より事前に停止可能であることが示唆された。しかし、歩行者の検出方法が確立されていないことや、投影のタイミングが事前に定義されたトリガーポイントに依存していることから、改善点が残されている。

また Calvi らは、歩行者の頭上にアイコンを投影することで運転者に飛び出しの危険性を認識させるシステムの実証実験を行った[14]。簡易的なアイコンにより運転者は情報の理解が容易になる他、景観を損なう恐れが少ないため過度に注意してしまうという恐れがない。実験では、死角から歩行者が飛び出すといった事故ケースにおいて事故の発生が31%から2%に減少した。しかし、アイコン提示では歩行者が複数存在する場合、かえって情報の煩雑性が生じる問題があるため、実用性についてはさらに検討が必要である。

3 隠消現実型安全運転支援システム

3.1 概要

駐車車両による死角領域から飛出した歩行者との衝突事故を回避することを目的としてシステムを設計した。これまでの開発[3,4]では、透過処理をどのタイミングで開始するのかを決めていなかった。そこで、透過処理開始のタイミングを決定するアルゴリズムを運転の安全性に配慮して実装し、システムに組み込む。

3.2 使用する運転支援モジュール

周辺状況をセンシングするデバイスとしては LiDAR と RGB カメラを車両に搭載することとした。システムは、Robot Operating System (ROS)[15]をベースに開発し、モジュールには Autoware[16]で提供されている、LiDAR や RGB カメラのセンサ情報を取得するセンシングモジュール、自己位置推定と 3 次元地図作成を行う SLAM モジュール、LiDAR スキャンデータと RGB カメラ画像によって歩行者や車両を検出する物体検出モジュールを活用した。

この他、死角領域の可視化に利用する点群を抽出する点群抽出モジュール、抽出した点群を自車両の画像上に投影する点群投影モジュールを使用する。さらに、画像に投影された点群を用いて死角領域の可視化を行う死角可視化モジュール、自車両のカメラ画像に可視化表現を適用して透過処理を行う可視化表現モジュールを使用する。また、3 次元地図を管理する共有データベースを構築している。このデータベースは基盤的地図情報及び付加的地図情報を載せたダイナミックマップの一部として仮定したものである。

モジュールの接続関係を図 2 に示す。透過処理の開始タイミングに関するモジュールは、車両情報モジュールと可視化制御モジュールである。車両情報モジュールでは、車両の現在速度やブレーキ減速度、車体の大きさなどの情報を管理し、必要に応じて他車両に送信する。可視化制御モジュールでは、透過処理を開始するか否かの制御を行う。制御には車両情報モジュールから取得した情報や、センシングモジュールによる物体検出を活用する。このようなモジュール間の情報のやり取りを通じて、透過処理を行うタイミングを制御する。

3.3 死角領域の可視化方法

他車両が観測した死角領域の情報を自車両に送信した後、自車両は受信した情報を基に色情報を自車両のカメラで観測した画像上に重畳描画することで可視化を実現する。また、本システムにおける情報の送受信は ROS 上のトピック通信[15]を利用する。

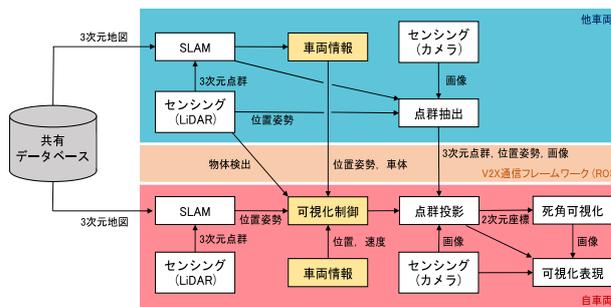


図 2 モジュール接続関係

Fig. 2 Connection relationship of modules

可視化処理には 3 次元点群、画像、位置姿勢の情報をを用い、以下の手順を毎フレーム行う。

- (i) 事前作成された 3 次元地図と LiDAR のスキャンデータから、各車両の位置姿勢を推定する。
- (ii) 他車両 LiDAR で取得した死角領域の 3 次元点を他車両カメラ画像に投影する。
- (iii) (2)の投影点を自車両カメラ画像にも投影する。
- (iv) 他車両画像に投影された点の周辺画素を探索してパッチを生成する。
- (v) パッチを自車両カメラ画像の除去対象領域に重畳描画する。
- (vi) (ii)~(v)を繰り返す。

3.4 歩行者飛出し予測のための設計

駐車車両による死角領域から歩行者が飛び出すイベントに限定し、透過処理開始までのアルゴリズムを設計した。ここでは、駐車車両を他車両と考える。透過処理を開始するまでの手順は以下のようになる。

- (a) 死角内の歩行者を他車両が検出
- (b) 自車両の速度・位置情報から透過処理開始のタイミングを判断
- (c) 他車両を透過処理

- (a) 死角内の歩行者を他車両が検出

本システムでは他車両を透過する条件を、死角内に歩行者が存在する場合にのみ限定する。死角内に歩行者が存在するか否かについては、他車両に搭載した LiDAR の物体検出により判断する。

ただし、歩行者が飛び出すか否かについては判断しないものとする。理想的には、車道上へ飛び出しそうな歩行者に限定して検出することが運転者への負担を考慮すると好ましい。実際に、歩行者の飛び出しを予測する研究はこれまでも活発に行われている[17]。しかし、歩行者の行動予測アルゴリズムは誤検出が多く信頼性が低い[18]。そのため本研究では、一定距離内に歩行者が検出されたこと条件とする。

- (b) 自車両の速度・位置から透過処理開始のタイミングを判断

他車両を透過することは死角を視認できると同時

に、他車両の視認性を少なからず低下させることを意味する。よって、不必要に透過することは避けるべきである。また、システムを自動化するために透過処理を開始するタイミングを決める必要がある。タイミングが早いと、ユーザは死角を視認するための時間を十分にとれるが他車両の視認性やユーザのストレスを考慮すると早いほど良いとは言えない。一方、タイミングが遅いと、死角を視認することが遅れることから急ブレーキなどの危険運転や、衝突事故の発生につながる。つまり、透過処理を開始するタイミングは両者の条件を考慮して決定する必要がある。

そこで、本システムでは死角ポイントまで安全に減速・回避が可能である条件を満たさなくなったタイミングで透過処理を適用することとした。このタイミングは自動運転技術の研究によって開発されている死角ポイントまでの減速モデル[19]に基づいて設計しており、システムの有効性がより発揮されるタイミングと考えている。安全に減速することができる上限速度 $v_{pbs}(m/s)$ は、現在の自車両の速度を $v_0(m/s)$ 、ブレーキによる許容減速度を $a_{pbs}(m/s^2)$ 、死角ポイントまでの距離を $d(m)$ から、等加速度直線運動の関係式より以下の式(1)のように導出される。

$$v_{pbs} = \sqrt{v_0^2 - 2a_{pbs}d} \quad (1)$$

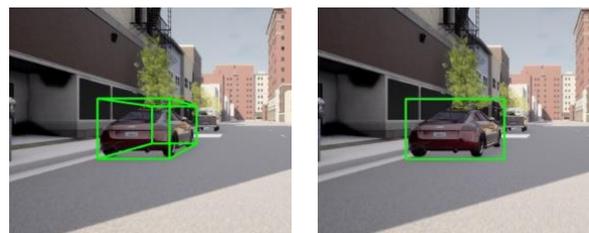
許容減速度 a_{pbs} は、運転者にとってストレスのかからない許容できる減速度合いを示すパラメタである。つまり、自車両は v_{pbs} で走行していれば死角ポイントまでスムーズに減速することができ、仮に歩行者が飛出しても安全な回避がしやすくなることを目論んだ。このような定義より、透過処理を開始するタイミングは以下の式(2)のように導出される。

$$v_0^2 - 2a_{pbs}d > 0 \quad (2)$$

(c) 他車両を透過処理

(a), (b) で述べた条件を満たしたとき透過処理を行う。このとき、透過対象車両のみを透過処理する必要があり、その処理領域を自動で決定する必要がある。これまで、カメラ入力による画像認識を用いた手法[20]が提案されていたが、領域推定の安定性が低いことが懸念された。

そこで、他車両の位置情報と車体の大きさを基に処理領域を設定する手法を実装した。まず、車体を包含する8点の3次元バウンディングボックスを作成する(図3(A))。続いて、他車両の3次元位置情報と8点座標を自車両に送信する。最後に、自車両側で座標変換を行い8点の中から外側4点を抽出し、4点の2次元バウンディングボックスを透過処理領域として設定する(図3(B))。この手法は、カメラ性能に依存しないことや画像認識精度を考慮する必



(A) 8点ボックス (B) 4点ボックス

図3 透過処理領域の設定手順

Fig. 3 Procedure for setting the transparent processing areas

要がなく、領域設定の安定性の向上が期待される。

4 実験

4.1 実験概要

提案システムの有効性を確認するために、駐車車両から歩行者が飛び出すといったヒヤリハットに着目して評価実験を実施した。また、駐車車両を透過することによるデメリットとして挙げられる、障害物の視認性による車間距離への影響や、死角を確認できることによる運転速度への影響についても分析した。

本実験では、3つの方式を参加者間で比較することで提案システムの有効性を確認した。比較する方式は以下の通りである(図4)。

- 支援無表示方式：システムなし(通常運転)
- アイコン表示方式：アイコン提示システム
- 半隠消表示方式：提案システム

支援無表示方式は、通常の運転状態である。アイコン提示方式は、駐車車両の死角領域に歩行者が存在する場合に、歩行者頭上に赤い矢印アイコンを投影する方式である。この方式は、Calviら[14]によって開発されたシステムを参考に実装した。アイコン提示方式におけるシステム適用の条件は提案システムと同様のものとし、3.4節の手順で適用される。提案システムの透過処理については、先行研究[6]の分析結果から対象を完全に透過するのではなく、半隠消表示を適用することとする。半隠消表示における透過度は平野らの研究[21]に基づいて50%を設定値とした。

実験には実験の説明を十分にうけた上で実験の参加に同意した、普通自動車第一種運転免許を保有する計21名(男性：19名、女性：2名、平均年齢：29.2歳)が参加した。免許取得からの平均年数は9.4年であった。また、実験参加者のうち運転頻度は「ほぼ毎日」が14名、「週に2,3回」が2名、「週に1回」が3名、「月に1回」が2名、「それ以下」が0

名であった。実験参加者は同一シナリオにおいて 3 つの方式のうちいずれか 1 つの方式を適用した状態で走行した。各方式の実験参加者数の内訳はそれぞれ 7 名であった。

4.2 実験環境

本実験では、ヒヤリハットという危険性を伴うイベントを対象にしているため、運転による安全性の確保と実験条件の統一のために運転シミュレータを用いて実験を実施した。運転シミュレータには CARLA を用いた[22]。

走行コースとして直線 5 km、片側 1 車線、車線幅員 3.5 m、制限速度 40 km/h の道路を作成した(図 5)。コースは都市部・市街地を想定し、対向車、駐車車両、歩行者、標識、横断歩道、木々や建物などの CG モデルを配置した。運転中は駐車車両の死角領域から歩行者が飛び出すという評価対象のイベントに加えて、ダミーイベントを複数用意した。これは参加者が駐車車両に注意しすぎることを防止するためである。ダミーイベントは、突然横断歩道を渡る歩行者や、対向車の追い越しによる自車線への侵入など、現実世界で起こりうる危険事故を模して作成した。

作成したコースが反映されたシミュレータで、実験参加者はハンドル型コントローラ (Logicool G29) を用いて運転を行った(図 6)。なお、シミュレータでは、アクセルペダルを踏んでいる間は、踏力に応

じて車両は加速もしくは一定の速度を保ち、アクセルペダルを離すと、車両は緩やかに減速する。これを惰性走行と呼ぶ。

4.3 実験手順

実験は以下の手順で実施し、約 70 分の時間を要した。

- (1) システム・実験の説明・教示を行う
- (2) 練習用コースを 5 分間走行させる
- (3) 2 分間休憩させる
- (4) 実験用コースを走行させる
- (5) 3 分間休憩させる
- (6) (4) ~ (6) を 4 回行う

実験において、参加者が通常の運転とは異なった不自然な速度で走行することを防ぐために以下の説明・教示を行った。

- 普段どおりの自然な運転を心がけること。
- 走行中、被験者の安全運転を指標とする運転レベルの採点を行う。基準のスコアを満たさなかった場合は、ペナルティとして実験時間内でペナルティ用コースを走行してもらう。
- 速度を上げて走行すれば実験時間が短くなり、そのような場合も通常と同じだけの謝金が支払われる。ただし、制限速度の超過はスコアの減点に繋がる。



(A) 支援無表示方式 (B) アイコン表示方式 (C) 半隠消表示方式 (D) 他車両視点

図 4 比較する 3 方式と他車両視点

Fig. 4 Three methods to be compared and the view from the other vehicle



(A) 作成した直線道路 (B) ヒヤリハットシーン

図 5 実験コース

Fig. 5 Experimental course



図 6 実験環境

Fig. 6 Experimental environment

上記の説明・教示は、参加者に自然な運転を心がけてもらうことを目的に行っている。2つ目の説明・教示によって大幅な速度超過は実験時間の短縮にならないこと伝えると同時に、3つ目の説明・教示によって周辺車両の運転を乱すような過度な低速走行を防ぐことを意図している。各参加者には実験完了時間によらず同じだけの謝金が支払われることは事前に伝えた。

実験用コースでは、直線 5 km のうち自車線側の路肩に駐車車両を 3 台配置した。このとき、走行中に駐車車両に接近した際に発生する計測対象イベントとして以下の 3 つを用意した。

- (A) システムが適用され、歩行者が飛び出した (以下、適用あり/飛び出しありと示す)
- (B) システムが適用されたが、歩行者は飛び出さなかった (適用あり/飛び出しなし)
- (C) 歩行者がいなかったため、システムが適用されない (適用なし/歩行者なし)

なお、ここでは便宜上「システムが適用され」という表現を用いているが、支援無表示方式の場合はシステムが適用されても何も起こらない点に留意されたい。

本研究で実装したシステムでは、他車両に搭載した LiDAR の物体検出機能を利用しているため、物体の誤検出によりシステムエラーが発生することが考えられる。そこで、実験の設計では、予め歩行者認識がしやすいように駐車車両および歩行者を配置するとともに、LiDAR センサのスキャンライン数を高性能な LiDAR と同等の 128 本に設定することで対策した。また、仮にシステムエラーが発生した場合には、分析対象外にすることとした。なお、本実験では全実験参加者が正常に実験を完了したことを確認している。

3 つの計測対象イベント (A)~(C) は表 1 に示す順序で発生させた。駐車車両の位置やイベントの発生やその順序は全ての参加者において同様とした。

また、ペナルティコースについては被験者の実験時間を浪費するためのコースのため、特別なイベントは用意しなかった。ただし、本実験ではペナルティ該当者はいなかった。

表 1 各走行の発生イベント
Table. 1 Event of each run

走行回数	発生イベント
走行 1	ダミーイベント 3 回
走行 2	ダミーイベント 3 回
走行 3	ダミー → (A) → (B) → ダミー → (C)
走行 4	(C) → ダミー → (B) → ダミー → (A)

4.4 実験結果

図 7 はイベント(A)における歩行者との衝突点までに行われた運転操作および停止したタイミングの平均値を各方式で示したグラフである。グラフ内に提示した用語の詳細については以下の通りである。

- 状態1 アクセルオンの状態
- 状態2 アクセルオフかつブレーキオフの状態
- 状態3 ブレーキオンの状態

グラフ内の棒グラフのデータは、状態 1 の間に走行した距離、状態 2 の間に走行した距離、状態 3 の間に停止するまでに走行した距離を合算した値となる。ただし、実験参加者の内の数名の運転操作では、停止せずに徐行して歩行者が通り過ぎるのを待っていたケースが見られた。そのようなケースは徐行とみなせる速度 (約 8 km/h) 以下で一定時間走行した開始地点を状態 3 とみなした。また、状態 2 の間にアクセルをもう一度踏むといったケースも見られたが、微小なアクセル量のためアクセルオフとして判断した。各状態の間に走行した距離を確認することで、アクセルオフ、ブレーキオン、停止した地点を算出することができ、各状態の終了地点がそのタイミングに相当する。また、アイコン提示方式と半隠消表示方式では、システムが適用されるタイミングは 3.4 節で説明した方法によって導出された。本実験では、式(1)(2)の許容減速度を 1.1 m/s²の固定値として設定した。システム適用のタイミングの平均値はアイコン表示方式が歩行者の手前 51.34 m、半隠消表示方式が歩行者の手前 50.84 m であった。システム適用時の自車両の速度 v_0 の平均は、アイコン表示方式が 10.63 m/s (約 38km/h)、半隠消表示方式が 10.57 m/s (約 38km/h) であった。

続いて、アクセルオフ・ブレーキオン・停止したタイミングについてそれぞれシステム間で比較分析を行う。図 8 は各タイミングを歩行者との衝突点手前の距離で示したデータである。図 8(a) はアクセルオフについて比較した結果である。得られた結果について参加者間要因の分散分析を行ったところ、システムの主効果が有意であった ($F(2, 18) = 10.544, p < .001$)。下位検定として Ryan 法による

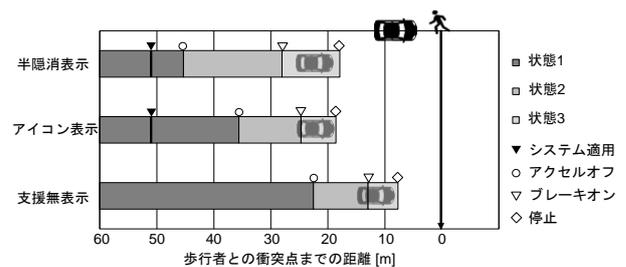


図 7 各状態中の走行距離の平均値

Fig. 7 Average distance during each situation

多重比較を行ったところ、アイコン表示方式と支援無表示方式の間、半隠消表示方式と支援無表示方式の間において有意差 ($ps < .05$) が認められた。これは、システムを適用することで支援無表示方式と比較して参加者がより事前に減速行動へ移行したことを示す。図 8(b) はブレーキオンについて比較した結果である。分散分析を行ったところ、システムの主効果が有意であった ($F(2, 18) = 6.484, p < .01$)。下位検定を行ったところ、アイコン表示方式と支援無表示方式の間、半隠消表示方式と支援無表示方式の間において有意差 ($ps < .05$) が認められた。これは、システムを適用することで支援無表示方式と比較して参加者がより事前に停止・徐行行動へ移行したことを示す。図 8(c) は停止したタイミングについて比較した結果である。分散分析を行ったところ、システムの主効果が有意であった ($F(2, 18) = 5.859, p < .05$)。下位検定を行ったところ、アイコン表示方式と支援無表示方式の間、半隠消表示方式と支援無表示方式の間において有意差 ($ps < .01$) が認められた。これは、システムを適用することで支援無表示方式と比較して参加者が自車両をより手前で停止させたことを示す。

各状態中に進行した距離から、アクセルオフ・ブレーキオン・停止したタイミングに着目すると、そ

れぞれのタイミングに関して、アイコン表示方式、半隠消表示方式が支援無表示方式と比較して有意に早いことが確認できた。一方で、アイコン表示方式と半隠消表示方式の間では大きな差は見られていない。そこで、アイコン表示方式と半隠消表示方式の間で差異を調査するために、これまでのデータをさらに詳細に分析した。ここではブレーキのタイミングについて着目した。図 9 はアクセルオフからブレーキオンまでの間に自車両が進んだ距離を比較したデータである。すなわち、先に述べた状態 2 の間に進行した距離である。この距離を確認することで、参加者がどれだけ惰性走行を行ったかを分析することが可能である。分散分析を行ったところ、システムの主効果が有意であった ($F(2, 18) = 5.660, p < .05$)。下位検定を行ったところ、半隠消表示方式と支援無表示方式の間にのみ有意差 ($p < .005$) が認められた。これは、半隠消表示方式を適用することで支援無表示方式と比較して、より惰性走行で進んだことを示す。

次に、自車両と歩行者との衝突余裕時間 (Time-to-Collision; TTC) について分析した (図 10)。TTC は自車両と衝突対象物体との距離を相対速度で除した値であり、運転者の判断タイミングの指標である。本実験では、歩行者は自車両の進行方向に対して垂

Ryan 法より *: $p < .05$, **: $p < .01$, ***: $p < .005$, ****: $p < .001$

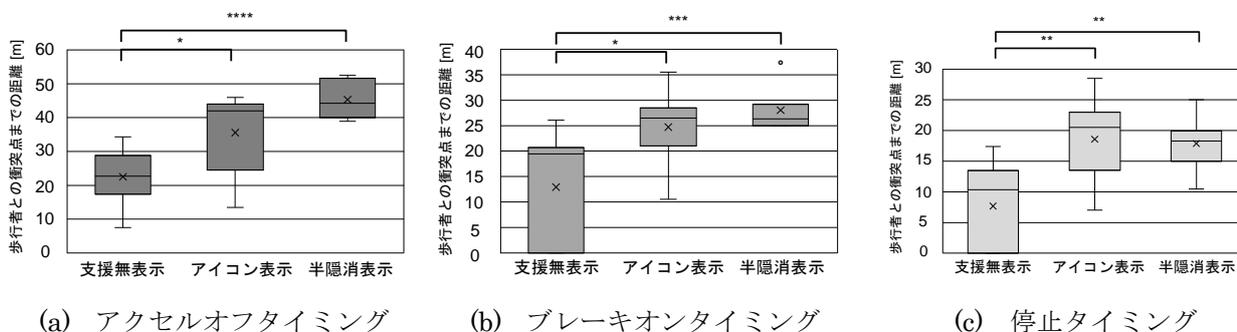


図 8 アクセルオフ・ブレーキオン・停止した時点の歩行者との衝突点までの距離

Fig. 8 Distance to the collision point with the pedestrian when the accelerator is off, the brake is on, and the vehicle stops

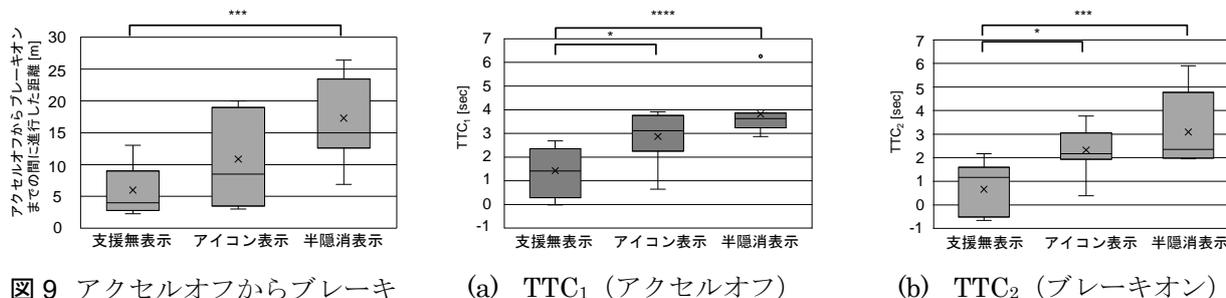


図 9 アクセルオフからブレーキオンまでの間に進行した距離

Fig. 9 Distance traveled from accelerator off to brake on

(a) TTC_1 (アクセルオフ) (b) TTC_2 (ブレーキオン)

図 10 Time-to-Collision の比較

Fig. 10 Time-to-collision comparison

直方向に移動するため、歩行者の移動速度は 0 km/h として分析を行った。よって、分析において TTC は車間時間 (Time-Headway; THW) の算出方法と同一となる。ここではアクセルペダルを離れたタイミングを TTC_1 、ブレーキペダルを踏んだタイミングを TTC_2 とした。図 10(a) は TTC_1 について比較した結果である。分散分析を行ったところ、システムの主効果が有意であった ($F(2, 18) = 8.451, p < .005$)。下位検定を行ったところ、アイコン表示方式と支援無表示方式の間、半隠消表示方式と支援無表示方式の間において有意差 ($ps < .05$) が認められた。これは、システムを適用することで支援無表示方式と比較して参加者がより事前に減速行動へ移行したことを示す。図 10(b) は TTC_2 について比較した結果である。分散分析を行ったところ、システムの主効果が有意であった ($F(2, 18) = 6.617, p < .01$)。下位検定を行ったところ、アイコン表示方式と支援無表示方式の間、半隠消表示方式と支援無表示方式の間において有意差 ($ps < .05$) が認められた。これは、システムを適用することで支援無表示方式と比較して参加者がより事前に停止・徐行行動へ移行したことを示す。

次に、駐車車両追い越し時の自車両との側方距離について分析を行った。この分析の意図は、半隠消表示することで駐車車両自体の視認性が低下することが確認されており [6]、この影響で駐車車両と衝突してしまうことや、通常運転と比較して側方距離に差が出てしまうという懸念点について確認するためである。アイコン表示方式については、支援無表示方式と同様に駐車車両がはっきりと視認できることから、影響は少ないと考えた。図 11 は駐車車両追い越し時の自車両と駐車車両との側方距離を方式間で比較したデータである。分散分析を行ったところ、システムの主効果は有意でなかった ($F(2, 18) = 0.048, p = .9536$)。少なくとも、半隠消表示方式を適用することで駐車車両と衝突するという事はなかった。

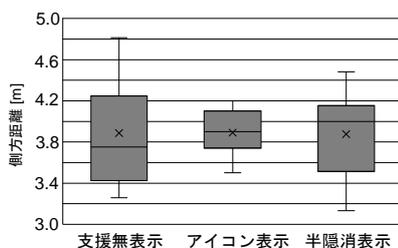


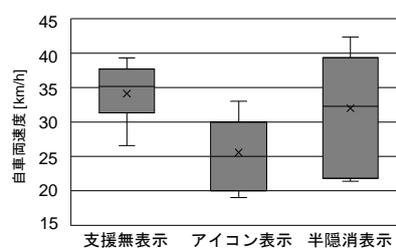
図 11 駐車車両追い越し時の側方距離

Fig. 11 Side distance when overtaking a parked vehicle

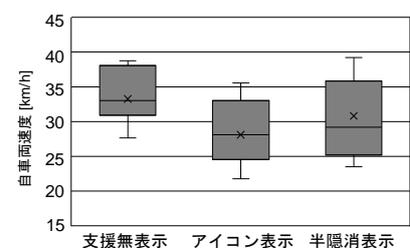
次に、駐車車両追い越し時の自車両速度の分析を行った。イベント(B) (適用あり/飛出しなし) については、半隠消表示方式を適用することにより、歩行者の挙動が視認できることから運転者の判断により減速しないことが懸念される。イベント(C) (適用なし/歩行者なし) については、システムが適用されていないことから駐車車両の死角領域には歩行者がいないということを運転者が解釈することになる。これにより、同様に減速しないことが懸念される。しかし、駐車車両に接近時の危険事象としては、歩行者の飛び出しだけではなく、駐車車両から乗り降りした搭乗者との衝突の危険なども考えられる。よって、駐車車両が存在する場合は、自車両は減速することが望ましい。図 12 は駐車車両追い越し時に自車両速度についてシステム間で比較したデータである。図 12(a) はイベント(B) (適用あり/飛出しなし) についてのデータである。分散分析を行ったところ、システムの主効果は有意傾向であった ($F(2, 18) = 3.419, p = .0551$)。特にアイコン表示方式が他の 2 つの方式と比較して速度が低いことが確認できる。図 12(b) はイベント(C) (適用なし/歩行者なし) についてである。分散分析を行ったところ、システムの主効果は有意でなかった ($F(2, 18) = 1.897, p = .1788$)。

5 考察

各状態中に走行した距離からアクセルオフ・ブレーキオン・停止のタイミングの結果について着目した。アイコン表示方式および半隠消表示方式ではアクセルオフ・ブレーキオン・停止の全ての項目で早いタイミングであったことが示された。これにより、システムを適用することで事前に歩行者の存在を運転者に対して認知させることが狙い通りにできたことが確認できた。さらに、アクセルオフ・ブレーキオンのタイミングが早まったことから、認知だけでなく判断・操作のタイミングについてもより事前に行わせることが確認できた。これは、死角内にい



(a) 適用あり/飛出しなし



(b) 適用なし/歩行者なし

図 12 駐車車両追い越し時の自車両速度

Fig. 12 Ego vehicle speed when overtaking a parked vehicle

る歩行者の移動が視認できることが最も大きな要因であると考えられる。運転中の判断タイミングの指標である TTC についても同様の結果が得られ、アイコン表示方式および半隠消表示方式を適用することでアクセルオフ・ブレーキオン時における TTC を上昇させることが確認できた。また、支援無表示方式では歩行者と衝突することもあったが、システムを適用した場合、衝突は 0 件であった。これらから、駐車車両から歩行者が飛び出すといったヒヤリハットにおいて、アイコン表示方式および半隠消表示方式を適用することは衝突防止への安全対策として期待できる結果となった。

ここまで、アイコン表示方式および半隠消表示方式の適用は優位性が高い結果であることが示されたが、両者の間での大きな差は見られなかった。しかし、アクセルオフからブレーキオンまでのタイミングの差について詳細に分析すると、半隠消表示方式のみ、支援無表示方式と比較してより惰性走行を行っていることが確認できた。これはより早いタイミングで衝突回避などの予測行動をとれることを意味しており、急ブレーキとなるような強い減速を抑えることや、自車両の搭乗者への身体やストレスへの負荷を抑制できること、後続車両からの追突の危険性も低減、が期待される。また、3.4 節で説明した透過処理を適用するタイミングの妥当性については今後も検討していくべきであり、タイミングの違いによる影響の有無を分析する必要がある。

本研究では分析を行わなかったが実際の運転環境では歩行者が複数存在することが考えられる。そのような場合に、各方式について本実験と同様の結果が得られるかどうかは不明なため、さらなる検討が必要である。また、状態 3 について着目すると実際の運転のようなタイヤと路面の摩擦力の再現がシミュレータでは忠実に再現できていない可能性がある。そのため、現実の車両で実験を行った場合に同様の結果が得られるとは言い切れない。

半隠消表示方式を適用することによるデメリットとして考えられた駐車車両との側方距離については支援無表示方式と比較して大きな差は見られなかった。これにより、透過対象車両の視認性を保持しつつ死角を可視化する半隠消表示の効果が示されたと考えられる。少なくとも、透過することで駐車車両と衝突するということはなかったため、追い越し時の側方距離については影響が小さいと考えられる。また、死角を可視化するという半隠消表示方式の仕様上、歩行者が存在しない場面や歩行者が飛び出しそうにないと運転者が判断した場面において、運転者は自車両の速度を加速させる可能性があるといった懸念点があった。しかし、両者の場面でも半隠消

表示方式が自車両の加速を助長させるといったことは認められなかった。ただし、本実験では制限速度を設けたことにより、自車両速度が制限速度付近に偏った可能性があるため、より詳細な分析には速度に関する条件を変更した実験が必要とされる。以上より、デメリットとして挙げられたことについても支援無表示方式である通常運転状態と比較して大きな差は見られなかったことから、半隠消表示方式による危険性についても影響は小さいと考えられる。

これらのことから、半隠消表示方式が、死角内に存在する歩行者の視認性を高めることや、透過車両に対しての視認性が保持できていることが確認できた。危険予測が容易になることや危険性への影響が小さいことから、駐車車両から歩行者が飛び出すヒヤリハットに対しても半隠消表示方式の効果が期待される。本実験では、比較手法としてアイコン提示方式を作成したが、アイコン提示方式には拡張可能な要素が多い。例えば、アイコンで歩行者の移動方向情報を付与すれば、飛び出し予測がより容易になることが期待される。先行研究では、人型アイコンの向きを歩行方向によって変更する手法を検討している[6]が、その効果については検証できていない。よって、今後の課題として、様々なシステムを比較対象として半隠消表示方式の有効性を分析する必要がある。また、歩行者の飛び出し時の周囲の状況にも変化を加えて実験を行う必要がある。例えば、歩行者が複数存在した場合には情報提示に煩雑性が高まることが懸念される。特に、AR によって歩行者の存在を示すシステムでは、改善が求められる可能性が高い[13,14]。半隠消表示方式においても、得られた課題に応じて対応策を検討すべきである。また、本論文での実験は、運転シミュレータを用いて実施しており、対象とした状況も限定されていることから、どの程度、事故防止に有効かについてはさらなる検証が必要である。

6 むすび

本稿では、隠消現実型安全運転支援システムを提案し、運転シミュレータを用いて、路肩に存在する駐車車両の死角領域から歩行者が飛び出すといったヒヤリハットにおける提案システムの効果について実験した。実験は、提案システムにおける可視化方法の 1 つである半隠消表示を採用して実施した。その結果、提案システムによってアクセルオフ・ブレーキオン・停止のタイミングが早まることが確認できた。また、提案システムによって死角領域の歩行者を可視化することにより、より早いタイミングで予測行動に移ることが可能であることが示唆された。

今後の展望として、対象とするヒヤリハットの間

面を広げて評価実験を行うことが考えられる。本研究では、1人の歩行者が車道に飛び出すといった最もシンプルな場面を想定して実験を行った。しかし、実際の運転では歩道には歩行者が複数存在することや、歩行者の飛び出しは子供や高齢者のような人が多く見られる。このように、実際の運転を想定して様々な場面において本システムが有効であるか実験を通して検証し、その都度発生した課題に対してシステムの再設計する必要がある。また、実験参加者の性別や年齢構成による影響については検討できていないため、さらなる検討が必要である。加えて、提案システムが実際の事故防止について有効であるかを確認するためには、運転シミュレータにおいて多様な状況での実験を実施する、現実即した実車による実験を実施する、なども今後の課題として挙げられる。

謝辞

本研究の一部は、科研費 17H01747, 19K22882, 21H03487 の支援を受けた。

参考文献

- [1] 国土交通省 平成 28 年度第 3 回車両安全対策検討会 (2017.3.30) 資料 8 『さらなる死者数削減に向けた事故分析(最終報告)(案) -「人対四輪」「自転車対四輪」のヒヤリハット場面の分析-』; <https://www.mlit.go.jp/common/001182521.pdf> (参照日 2022 年 2 月 24 日)
- [2] 竹村岩朗, 池田聖, 柴田史久, 木村朝子: 自動運転ソフトウェアを活用した死角領域の半隠消表示; 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 14D-1 (2018)
- [3] 平松黎, 有富友紀, 若林優, 木村朝子, 柴田史久: 安全運転支援のための周辺車両の半隠消表示法 (1) - 車車間通信モジュールの設計と実装 -; 第 25 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 3B1-3 (2020)
- [4] 若林優, 竹村岩朗, 平松黎, 木村朝子, 柴田史久: 安全運転支援のための周辺車両の半隠消表示法 (2) - 移動物体を含む死角領域の可視化 -; 同上, 3B1-4 (2020)
- [5] 平松黎, 若林優, 佐々木俊希, 木村朝子, 柴田史久: 安全運転支援のための周辺車両の半隠消表示法(3) - 5G 環境下における性能評価実験 -; マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2021) シンポジウム, pp. 980 - 986 (2021.7.1)
- [6] 藤重秀斗, 若林優, 松室美紀, 木村朝子, 柴田史久: 安全運転支援のための周辺車両の半隠消表示法 (4) - 半隠消表示法の拡張と評価 -; 電子情報通信学会 ITS 研究会, Vol. 121, No. 436, ITS2021-63, pp. 1 - 6 (2022)
- [7] Y. Ohta and H. Tamura (eds.): Mixed Reality Merging Real, and Virtual Worlds; Ohmsha & Springer Verlag (1999)
- [8] B. MacIntyre and M. A. Livingston (eds.): (Special Issues) Moving Mixed Reality into the Real Worlds; IEEE Computer Graphics, and Applications, Vol. 25, No. 6, pp. 22 - 56 (2005)
- [9] 森尚平, 一刈良介, 柴田史久, 木村朝子, 田村秀行: 隠消現実感の技術的枠組と諸問題 - 現実世界に実在する物体を視覚的に隠蔽・消去・透視する技術について -; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 2, pp. 239 - 250 (2011)
- [10] Y. Kameda, T. Takemasa, and Y. Ohta: Outdoor See-Through Vision Utilizing Surveillance Cameras; Proc. Int'l Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2004), pp.151 - 160 (2004)
- [11] K. Oishi, S. Mori, and H. Saito: An Instant See-through Vision System Using a Wide Field-of-view Camera and a 3D-Lidar; Proc. Int'l Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2017), pp. 344 - 347 (2017)
- [12] F. Rameau, H. Ha, K. Joo, J. Choi, K. Park, and I. S. Kweon: A Real-time Augmented Reality System to See-through Cars; IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, Vol. 22, No. 11, pp. 2395 - 2404 (2016)
- [13] H. Kim, J. L. Gabbard, A. M. Anon and T. Misu, Driver Behavior and Performance with Augmented Reality Pedestrian Collision Warning: An Outdoor User Study; IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, Vol. 24, No. 4, pp. 1515 - 1524 (2018)
- [14] A. Calvi, F. D'Amico, C. Ferrante and L. Bianchini, Effectiveness of Augmented Reality Warnings on Driving Behavior whilst Approaching Pedestrian Crossings: A Driving Simulator Study; Accident; Analysis & Prevention, Vol 147 (2020)
- [15] M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, E. Berger, R. Wheeler, and A. Ng: ROS: An Open-source Robot Operating System; ICRA workshop on Open Source Software, Vol. 3, No. 3.2, p. 5 (2009)
- [16] S. Kato, E. Takeuchi, Y. Ishiguro, Y. Ninomiya, K. Takeda, and T. Hamada: An Open Approach to Autonomous Vehicles; IEEE Micro, Vol. 35, No. 6, pp. 60 - 69 (2015)
- [17] J. Zhao, Y. Li, H. Xu and H. Liu: Probabilistic Prediction of Pedestrian Crossing Intention Using Roadside LiDAR Data; IEEE Access, Vol. 7, pp. 93781 - 93790 (2019)
- [18] S. Zhang, R. Benenson, M. Omran, J. Hosang and B. Schiele: How Far Aare We from Solving Pedestrian Detection?; IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1259 - 1267 (2016)
- [19] Y. Fujinami, P. Raksincharoensak, D. Ulbricht, and R. Adomat: Risk Predictive Driver Assistance System for Collision Avoidance in Intersection Right Turns; Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.30, No.1, pp.15 - 23 (2018)
- [20] 有富友紀, 竹村岩朗, 池田聖, 木村朝子, 柴田史久: 自動運転ソフトウェアを活用した周辺車両の半隠消表示 - 物体検出モジュールによる半隠消候補領域の抽出 -; 情報処理学会第 81 回全国大会講演論文集, 6R-04, pp. 2-215 - 2-216 (2019)
- [21] 平野愛子, 池田聖, 木村朝子, 柴田史久: 直進走行時における前方車両の半隠消表現に関する基礎検討; 情報処理学会第 78 回全国大会講演論文集, 1U-07, pp. 3 341 - 3-342 (2016)
- [22] A. Dosovitskiy, G. Ros, F. Codevilla, A. Lopez, and V. Koltun: CARLA: An Open Urban Driving Simulator; Conference on Robot Learning, PMLR, pp. 1 - 16 (2017)

(2023 年 3 月 7 日受付)

[著者紹介]

藤重 秀斗



2021年立命館大学情報理工学部卒業, 2023年同大学大学院情報理工学研究科修了, 現在に至る. 複合現実感および運転支援に関する研究に従事. 修士(工学)

松室 美紀 (正会員)



2008年お茶の水女子大学文教育学部卒業, 2013年名古屋大学大学院情報科学研究科博士後期課程 単位取得退学. 名古屋大学大学院情報学研究科心理・認知科学専攻研究員, 立命館大学情報理工学部特任助教, 助教を経て, 2023年4月より Penn State College of IST 研究員. 推論, 機器使用時のユーザの認知プロセスに興味があり, 認知アーキテクチャを用いた認知プロセスのシミュレーション, 心理実験を用いた研究に従事. 博士(情報科学)

木村 朝子 (正会員)



1996年大阪大学基礎工学部卒業, 1998年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了. 同大学助手, 立命館大学理工学部助教授, 科学技術振興機構さきがけ研究員等を経て, 2009年4月より立命館大学情報理工学部准教授. 現在, 同 教授. 実世界指向インターフェース, 複合現実感, マルチモーダル・クロスモーダルインターフェースの研究に従事. 博士(工学)

柴田 史久 (正会員)



1996年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了. 1999年同研究科博士後期課程修了. 大阪大学産業科学研究所助教授を経て, 2003年より立命館大学理工学部助教授. 同大学情報理工学部准教授を経て, 2013年より同教授. 博士(工学). モバイルコンピューティング, 複合現実感等の研究に従事. IEEE, 電子情報通信学会, 日本ロボット学会, 情報処理学会等の会員. 本学会学術奨励賞・論文賞を受賞.