

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 —

藤重 秀斗, 若林 優, 松室 美紀, 木村 朝子, 柴田 史久

立命館大学大学院 情報理工学研究科 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

E-mail: is0428hx@ed.ritsumei.ac.jp

あらまし 道路環境における死角領域の存在は、交通事故の発生や搭乗者のストレス発生の原因となる恐れがある。我々はこのような問題に対し、死角領域を観測している車両と情報を共有することによって、死角領域を可視化するシステムを提案している。先行研究では、安全性や視認性向上を念頭に死角領域に対する可視化表現を実装したが、その有効性については確認していなかった。そこで本稿では、これまで提案した可視化表現についての問題を改善するとともに、SAGATによるSA評価を行い、システムの有効性を確認した。

キーワード 隠消現実感, 高度道路交通システム, 状況認識, LiDAR

1. はじめに

道路環境における死角領域の存在は、交通事故の発生や運転者のストレス発生の原因となる。このような問題に対する解決策として、運転者に対して死角領域の情報を提示するシステムを開発している[1]。本システムは、隠消現実感 (Diminished Reality; DR)[2]とよばれる現実物体を透過する技術をITSに応用し、車両間で共有する情報を基に周囲の車両や建物などを視覚的に除去し、死角領域を可視化する。これにより、死角領域に潜む危険事象を認知可能となり、衝突事故の防止や搭乗者のストレス軽減への貢献が期待される。

本システムは図1のようにして死角領域を可視化する。具体的には、ユーザが乗車している車両(自車両)に対して、周囲に存在する死角領域を観測している車両(他車両)から死角領域を観測したセンサ情報を取得することで、死角領域を可視化する。本システムは、自動運転車が普及に伴い将来車両に搭載される可能性の高いセンサとソフトウェアを最大限に活用することで実現している。

先行研究では、システムに視認性や安全性を考慮した可視化表現を実装した[3]。除去対象を半隠消表示にすることによる除去対象自身の見落とし防止や、歩行者に対して3Dモデルを投影する強調表示の表現を導

入した。しかし、これらの可視化表現の有効性は確認していなかった。

本システムや導入した可視化表現は、運転者の状況認識 (Situation Awareness; SA) に影響を与えることが予想される。SAは、Endsleyによって提唱された「ユーザが周囲の状況をどの程度認識できているか」を表す概念であり、3つのレベルで定義されている[4]。各レベルを自動車の運転を行う際の認識として解釈すると以下の内容と対応する。

レベル1 現在の状況知覚 (Perception)

現在の周辺車両や歩行者などの存在、道路標識などを知覚すること

レベル2 現在の状況理解 (Comprehension)

知覚した車両や歩行者などの状態、現在の道路にどの道路標識が適用されているのかを理解すること

レベル3 将来の状況予測 (Projection)

レベル2までに得られた情報を基に近い将来、車両や歩行者などが取る行動を予測すること

上記のようにSAはレベル1~3の段階があるとされており、このSAは運転行動の3要素である「認知」「判断」「操作」のうち「認知」にあたる部分である。その後の「判断」「操作」は「認知」に基づいて行われるため、運転行動の根幹となる重要な要素である。

そこで本研究では、導入した可視化表現の有効性をSAに着目して確認する実験を行った。実験では、これまでの可視化表現に関する問題を改善したシステムをシミュレータ上で実装した。実験参加者には、事前に作成した運転シナリオを運転者視点の映像として提示し、シナリオ中における道路環境の状況認識レベルを測ることで、データの収集・分析を行った。

2. 提案システム

2.1. 概要

本システムでは従来のシステムを拡張し、照明条件

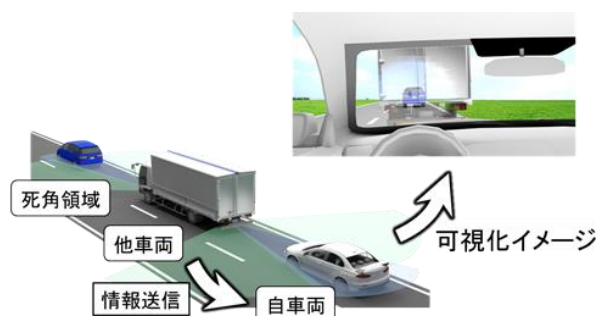


図1 提案システムの利用イメージ

に依らず、死角領域内の移動物体を運転者に提示できるようにした。従来のシステムでは移動物体の可視化にはカメラ画像から生成した 3D モデルの投影を行った。この手法では、照明条件などによりカメラ画像から 3D モデルが作成できない場合があるという問題がある。そこで、本システムの汎用性をより高めるため、移動物体に 2D アイコンを投影する表現を導入した。

本稿では、除去対象には従来と同様に半隠消表示を適用し、移動物体には 2D アイコンの投影を行う表現を提案する。またアイコンの投影対象は人に限定した。

2.2. 使用する運転支援モジュール

拡張したシステム（図 2）においても、従来と同様にデバイスには LiDAR と RGB カメラを車両に搭載する。モジュールには Autoware[5]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追加した。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、可視化表現を適用する可視化表現モジュールを追加した。また、3 次元地図を管理する共有データベースを構築した。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。

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

- (1) 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。
- (2) 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。
- (3) (2)の投影点を自車両カメラ画像にも投影する。
- (4) 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。
- (5) 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。
- (6) (2)~(5)を繰り返す。

2.4. 可視化表現モジュール

本システムでは、死角領域を可視化する際の表現方法として、除去対象に対する半隠消表示と移動物体に対するアイコン投影を行った。

半隠消表示は対象を半透過する表現方法のことである。これによりユーザは除去対象と死角領域を同時に視認でき、除去対象の見落としによる衝突事故の危険性を低減することができる。

また従来は移動物体である人に対し、カメラ画像を入力として作成した 3D モデル投影した。この手法は移動物体の色を正確に反映することができるが、それ故に背景色との同化や照明環境による移動物体の認識困難さが問題になる。そこで、このような問題に影響されず移動物体の存在を認知できるよう、事前に作成した人型のアイコンを提示する手法を実装した（図 3）。

3. 実験

3.1. 実験概要

先行研究で開発してきたシステムや提案する可視化表現モジュールを導入したシステムの有効性を確認するため評価実験を実施した。本実験では運転者の SA に着目し、システムの適用によって SA が向上するか確認することを目的とした。SA 評価を行う手法として、Situation Awareness Global Assessment Technique (SAGAT) [6]を利用した。

提案した可視化表現の有効性を確認するため本実験では提案手法を含めた以下の 5 種類の可視化表現（図 4）を使用しシステム間で比較した。

システム A：青枠の点滅表示

システム B：青枠の点滅表示，除去対象の全透過

システム C：青枠の点滅表示，除去対象の半透過

システム D：青枠の点滅表示，歩行者のアイコン投影

システム E：青枠の点滅表示，除去対象の半透過，歩行者のアイコン投影（提案手法）

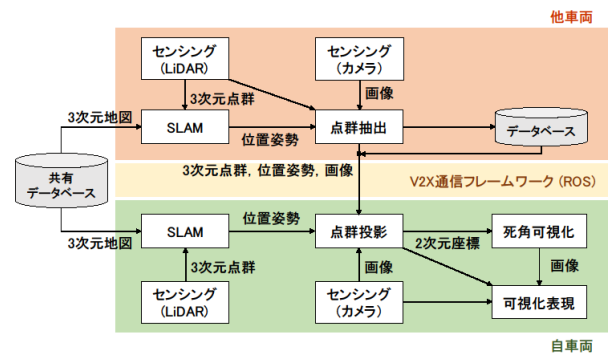


図 2 モジュールの接続関係



(a) 3D モデル投影

(b) アイコン投影

図 3 移動物体の強調表示

ここで、青枠の点滅表示は運転者にシステムの適用を直前に明示的に提示するための処理である。また、本実験で確認する半隠消表示法はアルファブレンドのみのため、簡易的に半透過と呼ぶこととする。

本実験はこれらのシステムを用いて、除去対象の透過度の違いや歩行者のアイコン投影の組み合わせがSAに与える影響を分析した。

3.2. 実験準備

本実験では、安全の確保と実験条件の統一のためにシミュレータ[7]を用いて運転シナリオを作成し、これを運転者視点の映像として実験参加者に提示しデータを収集する。また、運転シナリオは2種類作成し、それぞれ独立した経路を走行させる。

今回の実験では、運転中の様々なシーンのうち追い越しや追い抜きのシーンに注目し、それぞれ2分程度の運転シナリオに3カ所ずつSAテストポイントを設けた。このテストポイントで参加者にSAを計測するために事前に作成した設問に回答させる。ただし、実験中に実験参加者がテストポイントや運転シナリオを予測すること防ぐため、テストポイントのうち1つずつは追い越しや追い抜きではないシーンでSAテストを行うようにした。また、ダミーポイントとしてテストポイント以外にも追い越しのシーンを含めるようにシナリオを設計した。

3.3. 実験手順

本実験はSAGATによるSA評価の実験[6]に基づき、以下の手順で行う。

- (1) 事前アンケートに回答させる
- (2) 運転シナリオの映像を見せる

- (3) チェックポイントで映像を一時停止させ、画面をブラックアウトさせる
- (4) 設問に回答させる
- (5) 回答後、映像の続きを見せる
- (6) (2)~(5)を3回繰り返す
- (7) 1分間の休憩後、シナリオを変更し(2)~(6)を行う

事前アンケートでは、実験参加者の基本情報となる年齢や性別、運転頻度などを回答させた。その後、実験説明文を読ませ、十分にトレーニングをさせてから実験を行った。このとき、各参加者が評価するシステムは5つの内1つをランダムに割り当てることとし、2つのシナリオに適用されているシステムは同一のものとした。SAテストでの設問(表1)は、EndsleyのSAモデルにおける3つのレベルを包含するように設計した。ただし、参加者には各設問がどのSAレベルに相当するかは示していない。回答方法の例として、設問2では、車両は「正面」「左」「右」、歩行者は「左」「右」の各方向に存在する台数や人数を回答させた。

また、設問1, 5は実験参加者に普段運転している自然な状態で運転ができていないかを調べるための設問であり、SA評価に使用しない。SAテストに正解しようとする必要以上の注意が見られた場合、そのデータは正確でないとして除外した。

3.4. 実験参加者

実験参加者は、Yahoo!クラウドソーシングで募集し、21~76歳の男女315件のデータを収集した。ただし、以下に示すようなデータは分析の対象外とした。

- 運転頻度が週1回を下回っている
- 同一人物が複数回、実験に参加している
- 実験説明文を十分に読んでいない



(A) 無透過/アイコン無 (B) 全透過/アイコン無 (C) 半透過/アイコン無 (D) 無透過/アイコン有 (E) 半透過/アイコン有

図4 比較するシステム (A~E)

表1 SAテストに使用した設問

設問番号	SA レベル	設問内容
1	-	目の前の信号機は何色ですか。
2	1	自車両から半径 30m 以内に車両/歩行者は存在しますか。
3	2	自車両と最も近い車両までの距離は何 m ですか。
4	2	最も注意すべき対象は何ですか。またその理由は何ですか。
5	-	現在の周辺状況を説明してください。
6	3	この後あなたはどのような行動を取りますか。またその理由は何ですか。
7	3	この後、3秒以内に事故が起こる可能性はありますか。 「起こる」を選択した場合、どのような事故が起こるかについて回答してください。

- ・ 不自然な注意の仕方をしている

分析の対象としたデータは 131 件で、システム A : 35 件 (棄却 60 件), システム B : 26 件 (棄却 44 件), システム C : 22 件 (棄却 25 件), システム D : 23 件 (棄却 26 件), システム E : 25 件 (棄却 29 件) である。また、有効データにおける年齢、性別、運転頻度、実験にかかった時間の分布はいずれのシステム間でも大きな差は見られず、参加者の特性が実験結果に影響を与えることはないとした。

3.5. 実験結果

各 SA テストで回答させた 7 つの設問のうち、設問 1 と 5 を除く 5 つの設問で SA 評価を行った。これらは 6 つのチェックポイントで出題するため、合計 30 個の設問がある。ただしこのうち 4 つの設問は、各システムを適用した際の SA を比較するという本実験の目的を考えた場合、不適切な設問であったため評価の対象から除外した。そのため、合計 26 個の設問で各参加者の SA を評価した。SA スコアは各設問において、正解であれば 1 点、不正解であれば 0 点、部分的に正しければ 0.5 点とした。また、設問 3 は距離の真値と回答した距離の値の差が ±5m 以内ならば正解とした。

3.5.1. 透過要因

まず、除去対象の透過度の違いが SA に与える影響の分析を行うため、システム A, B, C の比較を行った。各 SA レベルのスコアと全 SA レベルの平均 (以下、SA レベル全体) のスコアを図 5 に示す。棒グラフは各システムにおける参加者の平均値、エラーバーは標準誤差を表す。得られた結果について参加者間分散分析を行ったところ、SA レベル 1, 2 において、透過要因の主効果は有意でなかった ($F_s(2,80) < 1.076, p_s > .346$)。一方で、SA レベル 3 と SA レベル全体では主効果が有意であった ($F_s(2,80) > 3.680, p_s < .030$)。下位検定として Ryan 法による多重比較を行ったところ、SA レベル 3 では、システム B, C においてシステム A より有意に高いスコアを得られた ($p_s < .005$)。また、SA レベル全体では、システム C においてシステム A より有

意に高いスコアを得られた ($p = .016$)。

次に、参加者が認識した物体について着目し、分析を行った結果を図 6 に示す。それぞれ、死角領域内に存在する車両や歩行者、除去対象、処理領域以外の車両と歩行者に対するスコアを示す。ここで処理領域とは、透過処理やアイコン投影の処理を行っている領域のことである。得られた結果について参加者間分散分析を行ったところ、死角領域内の車両、死角領域内の歩行者、除去対象のスコアで主効果は有意であった (車両 : $F(2,80) = 41.198, p < .001$, 歩行者 : $F(2,80) = 76.691, p < .001$, 除去対象 : $F(2,80) = 34.120, p < .001$)。多重比較を行ったところ、死角領域内の車両の認識では、システム B, C においてシステム A より有意に高いスコアを得られた ($p_s < .001$)。また、歩行者の認識では、除去対象の透過度が上がるにつれスコアが有意に向上する結果が示された ($p_s < .001$)。除去対象の認識では、除去対象の透過度が上がるにつれスコアが有意に低下する結果が示された ($p_s < .002$)。一方で、処理領域以外の車両と歩行者の認識では、主効果は有意でなかった ($F(2,80) = 0.457, p = .635$)。

また、透過度が除去対象との距離知覚に及ぼす影響について着目し分析を行った結果を図 7 に示す。得られた結果について参加者間分散分析を行ったところ、主効果は有意でなかった ($F(2,80) = 0.630, p = .535$)。

以上より、SA 向上していることや死角領域の車両や歩行者、除去対象の視認性が保たれていることが確認されたシステム C が最も有効であるといえる。

3.5.2. 透過要因とアイコン要因の組み合わせ

上記の結果により、透過要因において半透過が有効であることが確認できた。そこで透過要因を無透過と半透過、アイコン要因をありとなしとして、これらを組み合わせる条件を比較し、半透過とアイコン投影を行う可視化表現の有効性を確認する。この組み合わせに該当するシステム A, C, D, E を比較した。

SA レベルごとに各システムの SA スコアを比較した結果を図 8 に示す。参加者間分散分析を行ったところ

*: $p < .05$, ***: $p < .005$, ****: $p < .001$

■ A (無透過) ■ B (全透過) ■ C (半透過)

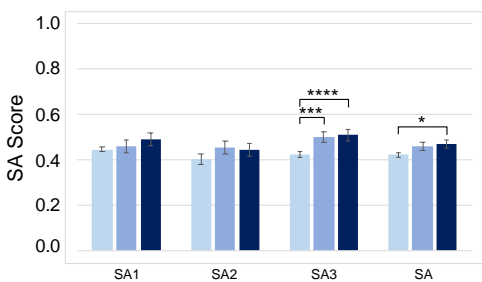


図 5 SA レベルごとの SA スコアの比較

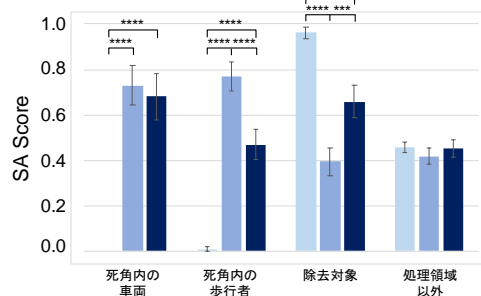


図 6 各物体に対する SA スコアの比較

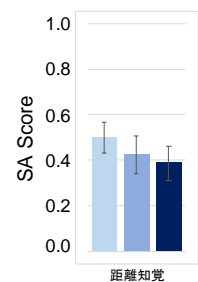


図 7 距離知覚に対する SA スコアの比較

る全ての SA レベルで交互作用は有意でなかった ($F_s(1,101) < 0.034, ps > .854$).

SA レベル 1 では、透過要因の主効果が有意であり ($F(1,101) = 5.193, p = .025$), アイコン要因の主効果も有意であった ($F(1,101) = 6.654, p = .011$). SA レベル 2 では、透過要因の主効果は有意でなく ($F(1,101) = 1.078, p = .302$), アイコン要因の主効果が有意であった ($F(1,101) = 4.704, p = .032$). SA レベル 3 では、透過要因の主効果が有意であり ($F(1,101) = 9.503, p = .003$), アイコン要因の主効果も有意であった ($F(1,101) = 13.273, p < .001$). SA レベル全体では、透過要因の主効果が有意であり ($F(1,101) = 7.986, p = .006$), アイコン要因の主効果も有意であった ($F(1,101) = 16.739, p < .001$). いずれの主効果においても、透過要因では半透過、アイコン要因ではアイコンありのシステムの方が高いスコアを得られた。

次に、参加者が認識した物体について着目し、分析を行った結果を図 9 に示す。それぞれ、死角領域内に存在する車両と歩行者、除去対象、処理領域以外の物体に対するスコアを示す。参加者間分散分析を行ったところ、死角領域内の歩行者に対するスコアで交互作用が有意であり ($F(1,101) = 36.477, p < .001$), 透過要因とアイコン要因の主効果が有意であった ($F_s(1,101) > 60.539, ps < .001$). 下位検定の結果、アイコンなしにおける透過要因、全透過におけるアイコン要因、半透過におけるアイコン要因の単純主効果が有意であった ($F_s(1,101) > 60.539, ps < .001$). ここから、アイコン投影により死角領域の歩行者に対する視認性が向上し、アイコン投影を適用しない場合は半透過により視認性が向上することを示す結果が確認された。

一方、死角領域内の車両、除去対象、処理領域以外の物体では交互作用は有意でなかった ($F_s(1,101) < 2.024, ps > .158$). 死角領域内の車両については、透過要因の主効果が有意であり、半透過の方が高いスコアを得られた ($F(1,101) = 116.446, p < .001$). アイコン要因の主効果は有意でなかった ($F(1,101) = 0.000, p < .989$). 除去対象については、透過要因の主効果が有意であり、無透過の方が高いスコアを得られた ($F(1,101) = 14.316, p < .001$). アイコン要因の主効果は有意でなかった ($F(1,101) = 1.193, p = .277$). 処理領域以外の車両や歩行者については、透過要因の主効果は有意でなく ($F(1,101) = 0.033, p = .856$), アイコン要因の主効果も有意でなかった ($F(1,101) = 0.136, p = .713$).

また、除去対象との距離知覚に及ぼす影響について着目し分析を行った結果を図 10 に示す。参加者間分散分析を行ったところ、交互作用は有意でなかった ($F(1,101) = 0.141, p = .708$). 透過要因の主効果は有意でなく ($F(1,101) = 0.360, p = .550$), アイコン要因の主効果も有意でなかった ($F(1,101) = 0.019, p = .889$).

以上をまとめると、半透過とアイコンの表示により、SA レベル 2 の透過要因を除く全ての SA レベルのスコア、および死角領域内の車両や歩行者の視認性が向上したことから、この 2 つを組み合わせたシステム E が最も有効であるといえる。

3.6. 考察

3.6.1. 透過要因

全透過または半透過を適用することで SA レベル 3 または SA レベル全体のスコア向上が確認された。

さらに、参加者が認識した物体に対して分析を行う

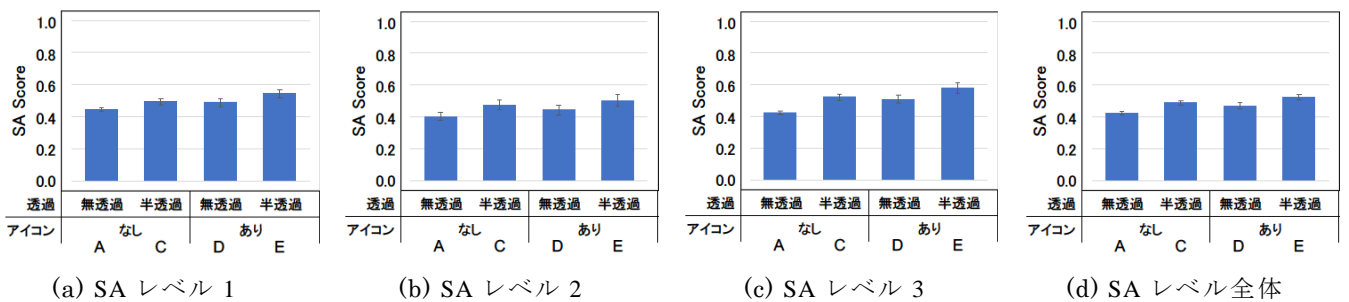


図 8 SA レベルごとの SA スコアの比較

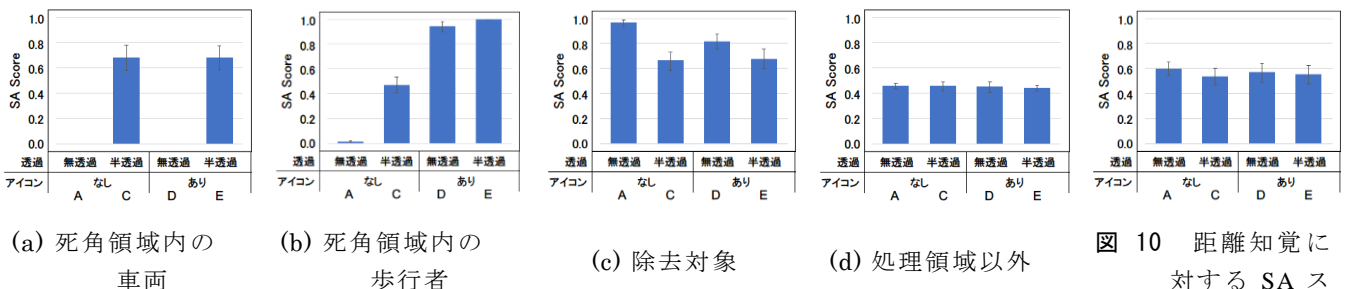


図 9 各物体に対する SA スコアの比較

図 10 距離知覚に対する SA スコアの比較

と、死角領域内の車両に対するスコアは、全透過または半透過を適用することで同程度向上し、視認性が高まったことを示す結果が得られた。また、死角領域内の歩行者の視認性については、透過度が上がるにつれてスコアの向上が確認され、全透過が最も有効であることを示している。これは、除去対象が半透過されることで、全透過と比較して歩行者のような細かな物体の視認性が低下することが原因と考えられる。

一方、除去対象のスコアは、透過度が上がるにつれて低下していることが確認された。このスコアの低下は除去対象の見落としを意味しており、衝突事故の原因となるため対策が必要である。半透過では、無透過と比較するとスコアは低下しているものの、全透過と比較すると高いスコアを保っていることが確認できた。

システム適用によるデメリットとして考えられていた処理領域以外の物体に対するスコアの低下についてはシステム間で有意な差は見られなかった。つまり、システム適用が処理領域以外の車両や歩行者の視認性に影響を及ぼすことは確認されなかった。

また、各システムを適用した際の除去対象との距離知覚に対するスコアに有意な差は確認できなかった。除去対象の視認性と同様の傾向を示すと予測したが、そのような結果は得られなかった。これについては、シミュレータで作成した映像を見た場合の距離知覚は、現実世界で知覚と比べて難しく、システムに関係なく個々の参加者の視聴環境や推定能力に依存した回答となってしまったことが原因であると考えられる。

以上のことから、詳細な表現に検討の余地はあるが、透過要因を変更したシステム A, B, C を比較した場合、半透過を行うシステム C が最も有効であったといえる。

3.6.2. 透過要因とアイコン要因の組み合わせ

上記より、透過要因では半透過が最も有効であることが確認できたため、半透過とアイコンの組み合わせによる可視化表現の有効性を確認した。

まず、半透過により、レベル 1, 3 と SA レベル全体のスコアの向上が確認された。また、アイコン投影により、各 SA レベルと SA レベル全体の全てでスコアの向上が確認された。SA レベル 1 について詳細に分析すると、半透過やアイコン投影により死角領域内の車両や歩行者に対する視認性が向上することを示す結果が得られた。特に歩行者については、アイコン投影により透過要因に依らずスコアがおおよそ上限まで向上した。これは 3.6.1 項で述べたような全透過と比べて半透過は死角領域内の歩行者の視認性が低いという欠点を解決できていることがわかる。一方で、透過要因でのみ、除去対象に対するスコアに有意な差が確認され、半透過により除去対象に対する視認性が低下することを示す結果が得られた。これは、透過度のみを変

更して比較した場合と同様に、除去対象の半透過により、除去対象の見落としが発生していると考えられる。

さらに、いずれのシステム間においても、システム適用による処理領域以外の車両や歩行者の視認性への影響は確認されなかった。また、距離知覚についてもシステム間で有意な差が見られず、これは透過度のみを変更して比較した場合と同様の理由であると考えられる。

以上のことから、本実験では、提案手法である半透過とアイコン投影を組み合わせた可視化表現が有効であることが示唆された。

4. むすび

本研究では、道路環境における死角領域を可視化するシステムにおいて視認性を向上させるための可視化表現モジュールを導入した。また運転者の SA に着目した実験を行い、その有効性を確認した。実験結果より、半透過とアイコン投影を適用することで SA スコアの向上や死角領域の車両や歩行者の視認性向上が確認された。しかしシステム適用により、除去対象の視認性が低下することが確認された。

今後の展望として、除去対象の視認性を向上させる表現を導入し評価を進めていきたい。また、実験環境の改善も行いたい。今回は、車両前方の映像を PC ディスプレイに表示したが、運転シミュレータや HMD などを用いた MR 空間で実施することで、より実際の運転に近い状況を再現できると考える。また、アイトラッキングにより実験参加者の注視位置を分析することで、新たな知見が得られると考えている。

文 献

- [1] 竹村, 他, “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 VR 学会大会論文集, 14D-1, Sept.2018.
- [2] S. Mori, *et al.* “A survey of diminished reality: Techniques for visually concealing, eliminating, and seeing through real objects,” *IPSJ Trans. CVA*, vol.9, no.17, Sept.2017.
- [3] 若林, 他, “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 -,” 第 25 回日本 VR 学会大会論文集, 3B1-4, Sept.2020.
- [4] M. R. Endsley, “Situation awareness global assessment technique (SAGAT),” *Proc. IEEE NAECON*, vol. 3, pp. 789-795, Dayton, OH, USA, Aug.1988.
- [5] S. Kato, *et al.* : “An open approach to autonomous vehicles,” in *IEEE Micro*, vol. 35, no. 6, pp. 60-68, Nov.-Dec. 2015.
- [6] M. R. Endsley, *et al.*, “Direct measurement of situation awareness: Validity and use of SAGAT,” in *Situation Awareness Analysis and Measurement*, ed. M. R. Endsley, pp. 147-173, Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, 2000.
- [7] G. Rong, *et al.*, “Lgsvl simulator: A high fidelity simulator for autonomous driving,” *IEEE 23rd International Conf. on ITSC*, pp. 1-6, Rhodes, Greece, Sept.2020.