

高度運転支援システム仮想評価技術

町田貴史^{†1} 中西悟^{†1} 佐藤智和^{†2}

概要：高度運転支援システム(ADAS : Advanced Driving Assistance System)を評価するためには、現状では実走行により様々な交通状況に対するテストが行われており、その効率化が課題となっている。本研究では、今後益々複雑化する車載システムのテスト効率を向上させることを目的として、仮想環境を活用した仮想評価技術について研究開発を行っている。具体的には、高品質な画像が生成できるよう実環境で計測された3次元点群と全方位映像から任意の視点における画像を生成する自由視点画像生成法を提案する。従来手法では無限遠や任意の視点に応じた物体の隠蔽関係の表現が困難なことや膨大な計算時間を要するという問題があり、適用可能なシーンに制約があった。そこで、計測時の全方位画像に対応するデプス情報と画像生成時の視点に応じたデプス情報の高速比較や適切な画素領域の選択により高品質な画像生成を可能とする。実験では、車線検出アルゴリズムへ生成画像と実画像を入力し、従来手法と比較して生成画像の精度を維持したまま高速に処理できることが示された。

キーワード：自由視点画像生成、コンピュータグラフィックス、高度運転支援システム、仮想評価

1. はじめに

自動運転システムに代表される高度運転支援システム(ADAS: Advanced Driving Assistance System)は危険な走行場面において事故のリスクを低減させる機能を有した車載システムである。この装置の開発では、様々な交通状況のリスクに対して適切な支援ができるかを検査する実走行テスト(FOT: Field Operational Test)が行われている。FOTの課題は、多様な実交通状況に対するテストを行うため、その効率を向上させることである[1]。そこで、FOTを仮想環境で実施しテスト効率を向上させるといった「仮想評価」に関する方法論が期待されている。特に、カメラをベースにした車載システムにおいては、わずかなシーンの変化でも画像上では大きな変化を引き起こすため、膨大な画像パターンに対するテストが必要になると予想され、仮想評価に対する需要が年々増加している。

このような状況に対して、コンピュータグラフィックス(CG)の分野に目を向けると、仮想環境を構築することによってカメラで計測される画像を生成する手法が提案されている[2, 3]。これらの画像生成手法はカメラベースの車載システムにおける画像処理アルゴリズムへの入力データとして利用することが可能である。すなわち、車両・歩行者・白線等を検出するアルゴリズムに入力する画像を生成することによって、これらの検出アルゴリズムを容易にテストすることが可能となる。ただし、従来の画像生成手法では多くの場合、アルゴリズムを正しくテストできないことが問題となる。具体的には、実画像と生成画像を検出アルゴリズムに入力して検出結果を比較した場合、両者の結果に大きな差が生じる。これは生成した画像の質が低いために

起こる[4]。この問題を解決するために、我々は実画像を利用して高品質な画像の生成を可能にする自由視点画像生成技術を構築してきた[5, 6]。しかし、これらの技術では3次元情報の誤差や欠損等により生成される画像上に歪みが生じることや、物体の隠蔽関係を正しく表現するには膨大な計算時間を要することが問題である。

本研究では、図1に示すような任意の視点位置に対して精度よく高速・高品質に自由視点画像を生成する、より実用的な手法を提案する。まず、カメラの位置・姿勢が既知である3次元計測車両を利用して実環境の3次元点群と全方位画像を計測する。次に、3次元点群を基に3次元形状復元を行い、任意の視点位置に依存したデプスマップを高速に生成する。この際、物体の隠蔽関係等を詳細に再現するために、計測された全方位画像に対する全方位デプスマップと視点依存のデプスマップの2つを比較することによって、物体の隠蔽関係を正しく把握する。最後に、複数の全方位画像からデプスマップに対して適切に画素を選択して貼り付けることによって、高品質な自由視点画像を生成する。

我々の研究における主な貢献は次の2つである。(1) ADASに対する仮想評価を可能とする高品質な自由視点画像を生成すること、(2)実画像の代替として生成画像を利用してADASの画像処理アルゴリズムの評価が可能であるかを検証すること。以降では、まず2章でADASに対する仮想評価や自由視点画像生成の従来研究について述べ、3章で我々が提案した手法について詳細を述べる。4章では手法の検証結果について述べ、5章でまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

2.1 3次元CGに基づく仮想環境表現

ADAS仮想評価を実現するため、よく知られた手法とし

^{†1} 株式会社 豊田中央研究所
Toyota Central R&D Labs., Inc.

^{†2} 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology



図 1. 左車線を走行して収集した計測データから生成された画像。

て、3次元CGを利用することであらゆる交通状況を仮想環境で表現することが挙げられる[2, 3]. ただし、これらの手法では生成画像と実画像の「見え」に乖離があるため、画像処理アルゴリズムのテストに利用するには不十分である[4]. そこで、3次元CGの品質を向上させる方法として、3次元形状や全方位画像を収集するGeoMaster NEO[7]等のモバイル・マッピング・システムが注目されている。ただし、新たな問題として、収集したデータからの3次元形状の復元や各種センサ間の位置合わせ等に対して多大なコストがかかることが挙げられる。以上をまとめると3次元CGに基づく仮想環境表現には次の2つの問題が挙げられる。

(1) 3次元CGのみで高品質な仮想環境表現を行うことは非常に困難であること

(2) 高精度な3次元形状や写実的な画像生成には膨大なコストを要すること

これらの問題に対して、小野ら[8]は高品質な画像生成を行うために、生成画像を遠景と近景の2つのレイヤに分け、遠景は計測された3次元形状に実画像をテクスチャとして貼り付け、近景は3次元CGとして表現する。この方法では、道路、ポール、ガードレール等が人手を介して作成された3次元CGであるためADAS評価には品質という点で不十分である。一方、収集された3次元点群から3次元形状を高精度に復元する手法も提案されている[9-11]. Schnabelら[9]は、3次元のプリミティブ形状を3次元点群にフィッティングさせる手法を提案している。この方法では、比較的単純な形状を有する3次元点群に対しては効果的に機能するが、複雑な形状を有する場合には復元した形状が破綻するという問題がある。別の3次元形状復元の方法としては、大量に生成された微小面を3次元点群に沿って配置していく方法である[10]. Liangらはこの方法を拡張して、画像データを利用して画像のセグメンテーション結果に基づき3次元点群がどの領域に属するかを詳細に推定することにより複雑な形状に対しても適切な形状復元を実現している[11]. この方法では、センサ間のキャリブレーション誤差や解像度の制限により2つの重大な問題が発生する。一つは物体が実際の形状よりも歪んでいるように見えること、もう一つは存在しないはずの物体が、3次元点群を計測できなかった部分に対応する画像上に現れてしまうことである。

2.2 視点依存型の高品質仮想環境表現

前節で述べた従来法は「視点非依存」の3次元形状やテ

クスチャ画像に基づき仮想環境を表現する点で共通している。視点に依存しないため、任意のカメラ位置における仮想環境を容易に表現できることが利点である。しかし、この方法では、3次元形状の復元誤差が原因となり高い確率で生成画像に歪みが生じるため、ADAS仮想評価に適用するには不十分となる問題がある。

この問題を解決するため、我々は「視点依存」のアプローチが妥当であると判断し、視点依存テクスチャマッピング(VDTM: View-dependent Texture Mapping)[12]と視点依存デプステスト(VDDT: View-dependent Depth Testing)[13]の2つの「視点依存」手法を統合した自由視点画像生成法を構築した[5, 6]. この方法では、視点非依存で問題となっていた物体の歪みや物体の隠蔽関係等に対応することが可能となっているが、以下の2つの問題が挙げられる。

(1) VDDTの処理に膨大な計算時間がかかる

(2) 画像生成の際にエイリアシングが発生する

(1)は3次元点群をデプスマップに変換する際に点群同士の隠蔽関係を空間探索問題としてソフトウェアで記述しているため3次元点群の数に比例して膨大な処理時間を要する[5]. 一方、計算時間を短縮するためVDDTを無限遠の判定のみに限定したが、やはり物体間の隠蔽関係が表現できず生成画像が破綻するという問題があった[6].

(2)はVDTMにおいて適切な画素を選択する際、点として選択することが問題となる。つまり、ある1画素を表す物体面上の点は、その物体が写っている距離に応じて、「点」ではなく「領域」である。そのため、1画素のみをマッピングした場合は写っている物体によっては不整合が生じる。

以上を踏まえ本研究では、ADAS仮想評価を可能にする実用的な画像を生成するために、上記の2つの問題を解決した自由視点画像生成技術を構築する。

3. 3次元点群と全方位画像からの自由視点画像生成

3.1 概要

図2は提案手法のフローを表しており、(a)データ準備プロセスと、(b)画像生成プロセスの2つのプロセスから成る。

(a)データ準備プロセスでは、2.1節で述べたとおり主に生成画像の質の向上に寄与する。このプロセスではまず、GeoMaster NEO[7]を利用して実環境における3次元点群と全方位画像を収集する。次に、3次元点群から3次元形状復元を行う。この形状情報は、後段のプロセスにおいて全方位デプスマップと「視点依存」のデプスマップ(VDDM:

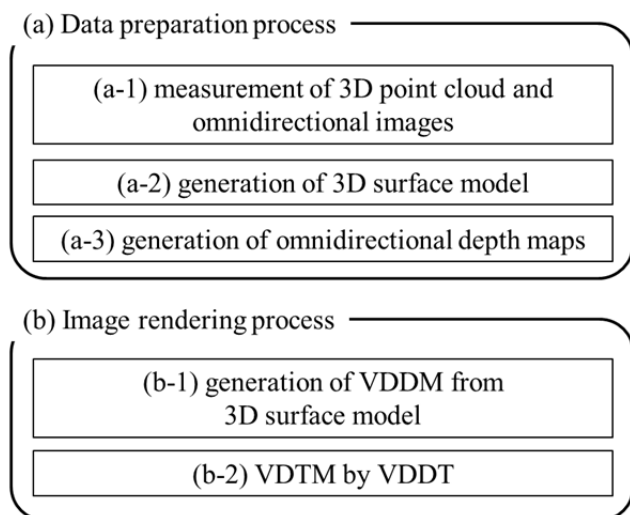


図 2. 処理フローの概要

View-dependent Depth Map)を密に生成する際に利用する。

一方、(b)画像生成プロセスでは、2.2 節で述べたとおり主に生成画像の歪みを解消することに寄与する。具体的には、任意の視点に応じた VDDM を生成する際に、全方位デプスマップと比較することにより正しい隠蔽関係を判定することで画像上の歪みを低減させる。最後に、VDTMにより自由視点画像が生成される。それぞれのプロセスについて以降で詳細を述べる。

3.2 データ準備プロセス

(a-1) 3次元点群と全方位画像の計測

提案手法では、図3のように3次元点群と全方位画像をGeoMaster NEO[7]で計測する。計測時のセンサの位置・姿勢は既知であり、RIEGL レーザスキャナ、Point Grey Ladybug 3, RTK-GPS, オドメトリが搭載されており、それぞれのデータが走行時に取得できる。

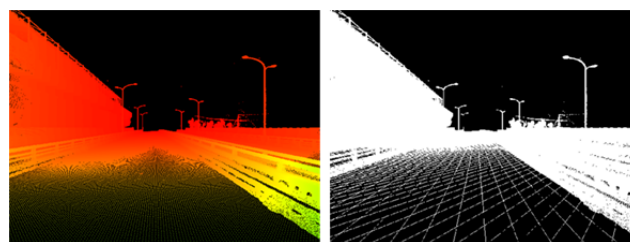
(a-2) 3次元形状の生成

VDDM の生成に利用するため、3次元点群から3次元形状を生成する。ここで、従来法[6]と異なる点は RANSAC による3次元点群への平面当てはめを行うことである[14]。最初に、3次元点群からランダムにいくつかの3次元点を選択する。次に、選択された点群に対して法線を計算し、その法線で定義される平面にフィットする点群をグループ化していく。ほぼすべての点群がいずれかの平面に当てはまるまで繰り返し点群の選択を行う。この処理により3次元点群の大部分に平面を当てはめることが可能となり、より精度の高い3次元形状の復元が可能となる。



(a) 3次元点群 (b) 全方位画像

図 3. GeoMaster NEO[7]によるデータ収集



(a) 3次元点群 (b) 3次元形状

図 4. 生成された3次元形状

図4は計測された道路環境の3次元点群と生成された3次元形状を表している。この3次元形状を利用することで、自由視点画像生成に必要な密なVDDMが生成される。

(a-3) 全方位デプスマップの生成

生成画像の歪みを低減するためには、(a-2)で生成された3次元形状上の任意の点の可視性が正しいかを判定する必要がある。そこで、計測時のカメラ位置から得られるデプス情報と仮想視点に対して得られるデプス情報の整合性を判定する。ここで、従来法[5]と異なる点は、3次元空間内での点群探索問題ではなく、点群の奥行比較による2次元投影のみを処理することで劇的に高速化したことである。図5は3次元点群から全方位デプスマップを生成した結果である。最終的なデプスマップはデプス情報を補間することで生成している。なお、デプス情報が無限遠となっている領域は空を表す。

3.3 画像生成プロセス

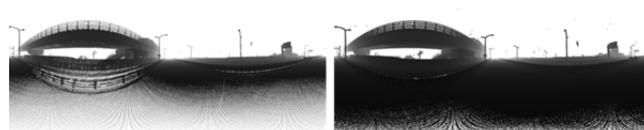
(b-1) 3次元形状からのVDDMの生成

画像生成プロセスでは(a-2)で生成された3次元形状から密なVDDMが生成される。具体的には、まず(a-2)で生成された3次元形状に基づき初期のデプスマップを生成する(図6(a))。この3次元形状は「視点非依存」であるため、仮想環境内での一般的な視点移動が可能であり、仮想視点に対するデプスマップをOpenGL等の標準的な機能によって生成できる。ただし、3次元点群が計測できなかった領域のデプス情報が欠損するため、周囲のデプス情報を基に補間することで欠損の少ない密なデプスマップを生成する(図6(b))。

(b-2) VDDTによるVDTM

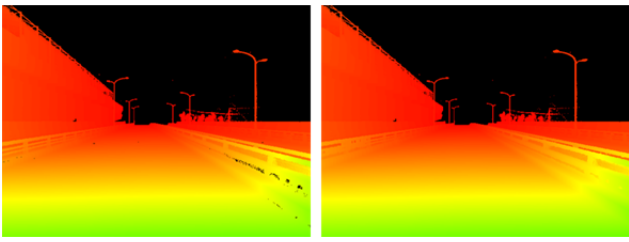
最後のプロセスでは生成画像の各画素の色を決定する。ここでは仮想視点に対するVDTMによって(a-1)で収集された全方位画像の中から適切な画素が選択される[12]。

図7は以下の式に従ってある画素が n 番目の全方位画像



(a) 3次元点群 (b) デプスマップ

図 5. 全方位デプスマップ



(a) 初期デプスマップ (b) 密なデプスマップ
 図 6. 3次元形状からの密なデプス情報の推定

から選択されることによって自由視点画像が生成されることを表している。

$$n = \arg \min_i \alpha \theta_i + d_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

ここで、 θ_i は i 番目の全方位画像が計測された際のカメラ位置 p_i に対する $\overline{p_i p_s}$ と $\overline{p_v p_s}$ との間の角度を表し、 d_i は同じく計測時のカメラ位置 p_i に対する距離 $\overline{p_i p_s}$ を表す。 p_v, p_s はそれぞれ仮想視点とデプスマップに対応する3次元形状上の点を表す。精密な画像生成のためには式(1)における θ_i と d_i が最小となる全方位画像が選択されることが望ましい。なぜなら、これらの値が最小のとき3次元形状上の点 p_s の「見え」はカメラ位置 p_i で計測された全方位画像からの「見え」が一番近くなると判断されるためである。このように、式(1)によって選択される全方位画像が、生成画像の正確さを左右する。なお、重み α は経験的に決定される。

ここまでは、全方位画像計測時と画像生成時の角度や距離のずれを式(1)で最小にする方法について述べた。ここでは、VDDTによる全方位画像選択について述べる。式(1)に基づく従来手法[5, 6]では、隠蔽関係を空間探索問題として解くことや、空等の無限遠の領域に対する判定のみに留めていた。そのため、正しく物体の隠蔽関係を判定すると膨大な計算時間を要し、隠蔽関係を無視すると計測時と画像生成時の「見え」が整合しないことが問題であった。

提案手法におけるVDDTは、計測時の全方位画像に対するデプス情報は2次元投影によって、画像生成時のVDDMはGPUによって計算時間を短縮し、それぞれのデプス情報を比較することによって、精度よく高速に3次元形状上の点の可視性を判定する。例えば図7において、式(1)で選択

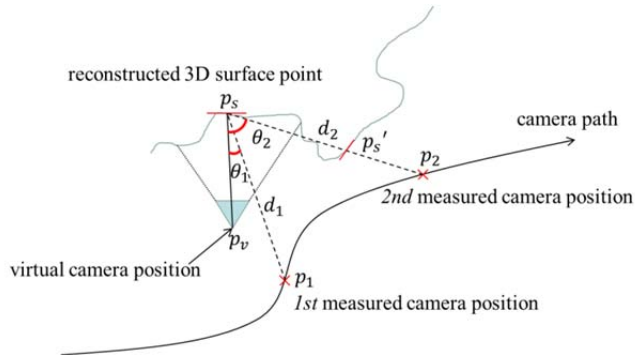


図 7. VDDT のパラメータ

された全方位画像が位置 p_2 で計測されたものとする。ここで、 p_s' は位置 p_2 から3次元形状上の点 p_s を見たときに p_s を隠蔽する点を表す。図7のような状況では、仮想視点 p_v から p_s を見たときに、隠蔽関係も考慮して全方位画像を選択する必要がある。そこで、デプス情報 $\overline{p_v p_s}$ と $\overline{p_2 p_s'}$ を比較することで p_1 で計測された全方位画像が選択される。

最後に、生成画像の品質を向上させるためエイリアシングを抑制する方法としてVDDT時の投影領域の形に着目する。図8は全方位画像上の投影領域の形は場所によって異なることを表している。つまり、全方位画像から選択すべき画素は「点」として選択した場合、写っている物体によっては生成画像上にエイリアシングが発生する。そのため「領域」として選択することで、生成画像上でのエイリアシングを抑制する。

4. 実験

提案手法の有効性を確認するため、物体検出アルゴリズムに対して生成画像を入力し、実画像との検出結果の比較実験を行った。ここで物体検出アルゴリズムは白線検出アルゴリズム[15]とし、生成画像と実画像の双方の画像における白線検出結果を比較する。3次元点群や全方位画像は図3のようにGeoMaster NEO[7]により収集されたデータ

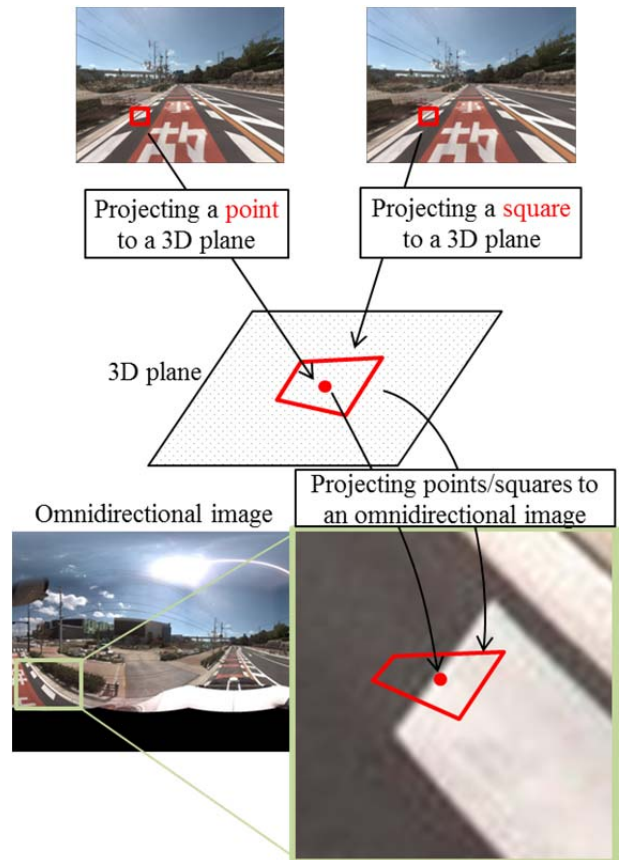


図 8. 画素領域の適切な設定

用いる。実験における設定は表1のとおりである。

白線検出アルゴリズムへの入力画像としては、計測時の全方位画像から透視投影変換により切り出したものを実画像とし、それと同一視点での生成画像のそれぞれの検出結果を比較する。図9はいくつかのフレームにおける(a)生成画像と(b)実画像である。これらの結果から、まず目視において両画像の「見え」はほぼ差がないことが確認できる。さらに図9では、(c)生成画像と(d)実画像のそれぞれにおける白線検出アルゴリズム[15]による検出結果を表している。これらの結果からも生成画像と実画像ではほぼ差がないことが確認できる。

表2は提案手法と従来手法[5]それぞれについて、生成画像と実画像での白線検出位置の差と、1枚の画像生成にかかる図2(a), (b)の2つのプロセスの計算時間の合計を比較したものである。提案手法と比較して従来手法における誤差が小さいが、白線検出アルゴリズムの位置検出には最大でも100mm程度の誤差があることから、両手法とも検出結果の差は小さいと判断できる。さらに、画像生成にかかる計算時間が大幅に高速化されていることも確認した。ここで、図2(a)は事前に計算することが可能であるため、画像生成プロセスのみでは最大1920×1080の解像度の画像を10fpsで生成できることを確認している。以上の結果から、提案手法は従来手法と比較して精度を維持しつつ高速な処理を可能としておりADAS仮想評価に対してより実用性を高めたことが確認できる。

図9の白線検出結果の比較においては十分に高品質な画像生成ができていたことを確認したが、他のアルゴリズムとして、歩行者や車両検出等では画像上の広範囲を走査するため、さらなる高品質化が必要である。例えば、電柱、街灯、樹木等の路側物は、誤検出の評価に重要となるため正しく再現できている必要がある。その際、計測時に写り込んでいる歩行者や車両が生成される画像に悪影響を及ぼすこともあるため、事前に消去する必要もある。日照条件や天候等の表現も交通状況の多様性の再現には必要であるため、生成された画像をさらに加工する技術に関する研究開発も考えられる。また、現状では狭い範囲での画像生成にとどまっているが、より広い環境における画像生成を実施していく必要がある。特に、ADAS仮想評価を目的とした場合、様々な環境を表現する必要があることから、大規模な環境再現に関するデータ管理や処理法に拡張していく

表 1. 実験環境

| | |
|-----------|------------------------|
| 生成画像の走行距離 | 35m |
| 生成画像枚数 | 34 枚 |
| 生成画像の解像度 | 640×480 |
| CPU | Intel Core i7-3970X |
| GPU | nVidia Geforce GTX1080 |

表 2. 従来手法[5]との精度・計算時間比較

| | 左車線の 検出位置誤差 | 右車線の 検出位置誤差 | 全計算時間 |
|---------|----------------|----------------|-------|
| 提案手法 | 38mm | 65mm | 72h |
| 従来手法[5] | 24mm | 37mm | 1h |

ことが考えられる。さらに、データ準備プロセスにおいて処理時間がかかることも課題として挙げられる。例えば、現状では60m×80mのエリアを1単位としてデータ管理を行っており、エリア内の3次元形状データの生成に10分ほどを要している。今後、より大規模な環境に対する処理を行う必要があることから、さらに高速な処理を検討する必要がある。

5. おわりに

本研究では、ADAS仮想評価を実現するための高速・高品質な自由視点画像生成技術を提案した。実験において生成画像と実画像の差を白線検出アルゴリズムの検出結果の差として従来手法と比較した。結果として、従来手法と同等の精度を維持しつつ、大幅な高速処理を実現したことを示した。このことからADAS仮想評価に対して、自由視点画像生成技術が貢献できる可能性があることが確認できた。今後はより高精度に画像を生成することや大規模な環境においても適用できるようデータ管理・処理について拡張していく予定である。これにより膨大な工数を要するFOTを仮想評価で置き換えていくことが可能になると考えられる。

参考文献

- [1] D. Zhao: Accelerated Evaluation of Automated Vehicles, University of Michigan, AnnArbor, 2016.
- [2] TASS International: prescan, <https://www.tassininternational.com/prescan-overview> (最終アクセス: 2018/02/01)
- [3] G. Weinberg and B. Harsham: Developing a Low-Cost Driving Simulator for the Evaluation of In-Vehicle Technologies, Proc. Int. Conf. Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, pp.51-54, 2009.
- [4] 安田浩志, 山田直之, 寺本英二: 歩行者検出システム開発のための模擬カメラ画像評価尺度の検討, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, D-11-80, p.80, 2011.
- [5] A. Oko, T. Sato, H. Kume, T. Machida, and N. Yokoya: Evaluation of Image Processing Algorithms on Vehicle Safety System based on Free-viewpoint Image Rendering, Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2014), pp. 706-711, 2014.
- [6] 松元裕哉, 河合紀彦, 佐藤智和, 町田貴史, 横矢直和: 実時間自由視点画像生成を用いた実画像に基づくドラ



(a) 生成画像



(b) 実画像



(c) 生成画像に対する白線検出結果



(d) 実画像に対する白線検出結果

図9. 生成画像と実画像による白線検出結果の比較

イブシミュレータシステム, 電子情報通信学会 技術研究報告, PRMU2014-174, 2015.

- [7] Asia Air Survey: GeoMaster NEO,
<http://www.ajiko.co.jp/product/detail/ID4T0WD5Z0D>
(最終アクセス : 2018/02/01)
- [8] S. Ono, R. Sato, H. Kawasaki and K. Ikeuchi: Image Based Rendering of Urban Road Scene for Real-time Driving Simulation, Proc. ASIAGRAPH, p.1, 2008.
- [9] R. Schnabel, P. Degener and K. Reinhard: Completion and Reconstruction with Primitive Shapes, Proc. Eurographics, Vol.28, No.2, pp.503-512, 2009.
- [10] R. Yang, D. Guinnip and L. Wang: View-dependent Textured Splatting, The Visual Computer, Vol.22, No.7, pp.456-467, 2006.
- [11] J. Liang, F. Park and H. Zhao: Robust and Efficient Implicit Surface Reconstruction for Point Clouds Based on

Convexified Image Segmentation, Journal of Scientific Computing, Vol.54, No.2-3, pp.577-602, 2013.

- [12] P. Debevec, Y. Yu and G. Borshkov: Efficient View-dependent Image based Rendering with Projective Texture-mapping, Proc. Eurographics Rendering Workshop, pp.105-116, 1998.
- [13] T. Sato, H. Koshizawa and N. Yokoya: Omnidirectional Free-viewpoint Rendering Using a Deformable 3-D Mesh Model, Int. Journal of Virtual Reality, Vol.9, No.1, pp.37-44, 2010.
- [14] Plane model segmentation:
http://pointclouds.org/documentation/tutorials/planar_segmentation.php (最終アクセス : 2018/02/01)
- [15] A. Watanabe and M. Nishida: Lane Detection for a Steering Assistance System, Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp., pp.159-164, 2005.