

NAIST-IS-MT1351099

修士論文

実画像群からの実時間自由視点画像生成を用いた ドライブシミュレータシステム

松元 裕哉

2015年3月12日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

松元 裕哉

審査委員：

横矢 直和 教授 (主指導教員)

小笠原 司 教授 (副指導教員)

佐藤 智和 准教授 (副指導教員)

河合 紀彦 助教 (副指導教員)

中島 悠太 助教 (副指導教員)

実画像群からの実時間自由視点画像生成を用いた ドライブシミュレータシステム*

松元 裕哉

内容梗概

現在、運転初心者の教育を目的としたドライブシミュレータシステムが利用されている。これらのシステムでは三次元モデルを用いて道路環境を再現しているが、モデルに人工的なテクスチャが使用されるため写実性に乏しく、実際の運転で得られる臨場感をユーザに与えることは難しい。このような問題に対して、写実性の高い走行シーン映像を描画するために、実シーンの情報を仮想空間内に取り込み、様々な視点位置からの現実環境の見えるを仮想空間内に再現する自由視点画像生成を用いる手法が研究されている。従来手法では複数地点で撮影された実写画像とシーンの三次元点群を入力とし、仮想視点における奥行画像(視点依存ジオメトリ)を三次元点群から作成し、視点位置に応じた適切な実写画像を貼り付ける(視点依存テクスチャマッピング)ことで高品質な画像を生成している。しかし、これらの手法はオフライン処理を前提としており、視点毎の奥行画像の生成コストが高いため、リアルタイムでの画像提示が要求されるドライブシミュレータシステムへの利用は困難であった。

本研究では、(1)点群に対する事前の局所平面当てはめ、(2)粗密法による奥行画像生成、により視点依存ジオメトリの生成にかかる計算コストを大幅に削減し、自由視点画像を実時間生成する手法を提案する。また、車載型のラインスキャナ(LiDAR)と全方位カメラにより計測した道路環境の三次元点群と全方位画像を入力とした、提案手法に基づくドライブシミュレータシステムを構築する。実験で

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT1351099, 2015年3月12日.

は、構築したシステムの生成した画像を車載型の安全運転支援システムに用いられるアルゴリズムが実写映像と同様に白線を検出可能であるか確認する。また、ユーザに対してリアルタイムに物理的なフィードバックを与えるシステムを試作し、ドライブシミュレータとして教習効果の向上を図る。これらの実験結果を用いて自由視点画像生成によるドライブシミュレータシステムの有用性を検証する。

キーワード

自由視点画像生成, 三次元点群, 全方位画像, ドライブシミュレータシステム, 安全運転支援システム

A Driving Simulation System Using Real-time Novel View Synthesis from Real Images*

Hiroya Matsumoto

Abstract

Driving-simulation systems have been commonly used for training beginners of driving. In common driving-simulation systems, driver's view images are rendered by 3D CG models. One problem here is that rendered images are not photorealistic and thus they cannot give real sensation to users. For this problem, a novel view synthesis method, which creates a photorealistic image of virtual viewpoint from real images, is expected to be a promising solution. The state-of-the-art methods of novel view synthesis use view dependent geometry, which creates a depth-map of a virtual position from a rough 3D point cloud, and view dependent texture mapping, which maps images photographed at some positions to a depth-map to render images. One critical problem in the conventional approaches is that it takes large computational time to create one image. Thus, it is difficult to simply employ them for developing a photorealistic driving simulator.

This thesis proposes a method to create a novel view image in real-time by drastically reducing the computational cost using (1) off-line local plane fitting to a point cloud and (2) a coarse-to-fine approach to create view-dependent geometry. We also construct a driving-simulation system based on the proposed method using a rough 3D point cloud and omni-directional images in a traffic environment

*Master's Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1351099, March 12, 2015.

captured by an in-vehicle LiDAR and an omni-directional camera. In experiments, we confirm whether a white line detection systems can distinguish white lines from generated images. To enhance the effect of driving training, we also construct a system for giving driving feedback to a user. From experimental results, we investigate the practical effectiveness of the proposed driving-simulation system using novel view synthesis.

Keywords:

Novel View Synthesis, 3D Point Cloud, Omni-Directional Image, Driving-Simulation System, Vehicle Safety System

目次

1. はじめに	1
2. 関連研究	3
2.1 ドライブシミュレータシステムに関する研究	3
2.1.1 ドライブシミュレータの効果に関する研究	3
2.1.2 運転者の技能向上を目的としたドライブシミュレータの構築に関する研究	4
2.1.3 車両開発支援等を目的としたドライブシミュレータの構築に関する研究	5
2.2 自由視点画像生成に関する研究	8
2.2.1 モデルベースドレンダリング	8
2.2.2 イメージベースドレンダリング	10
2.2.3 視点依存ジオメトリ・テクスチャマッピング	11
2.3 本研究の位置づけと方針	13
3. 道路環境を対象とした自由視点画像生成	15
3.1 提案手法の概要	15
3.2 入力情報の取得	16
3.3 全方位奥行画像の生成	16
3.4 局所平面当てはめによる簡易形状モデルの生成	19
3.5 視点依存奥行画像の生成	20
3.6 視点依存テクスチャマッピング	22
4. 実験	25
4.1 実験の目的及び方法	25
4.2 入力情報	25
4.3 試作ドライブシミュレータシステムによる自由視点画像の生成結果	29
4.4 白線検出結果	33
4.5 考察	35

5. まとめ	38
謝辞	39
参考文献	40

目 次

1	実写映像をもとにした列車用運転シミュレータ [4]	5
2	画像処理による環境再現 [9]	6
3	Oko らの手法 [6] による自由視点画像生成結果	7
4	MBR 法によって生成した自由視点画像 [13]	9
5	モーフィング [23] による自由視点画像	11
6	Buehler らの手法 [26] による画像 (左) と Davis らの手法 [27] による 画像 (右)	11
7	単純なテクスチャブレンドに生成結果 (左) と Takai らのテ クスチャマッピング法 [31] による生成結果 (右)	12
8	Okura らの手法 [33] による自由視点画像生成結果	12
9	提案手法の流れ	15
10	IP-S2 を搭載した実験車両	17
11	IP-S2 を用いて取得した三次元点群 (左) と全方位画像 (右)	17
12	実験に用いたステアリングコントローラ	17
13	生成した疎な全方位奥行画像	18
14	生成した全方位奥行画像	18
15	空間の分割	19
16	三次元点群への局所平面当てはめ結果	20
17	画像ピラミッドを用いたデプスマップの更新	21
18	生成された疎なデプスマップ (左) と密なデプスマップ (右)	21
19	全方位画像の選択基準	22
20	画像に映り込む観測機器の例	23
21	不適切なテクスチャの選択例	24
22	外部カメラの設置位置	27
23	実験データ (A) の走行経路	27
24	実験データ (B) の走行経路	28
25	試作したドライブシミュレータシステムの外観	30
26	白線検出結果を応用したドライバーへのフィードバック例	30

27	データセット A を用いた生成画像の例	31
28	データセット B を用いた生成画像の例	32
29	外部カメラで撮影した実画像 (左) と提案手法で生成した自由視点 画像 (右)	33
30	Oko らの手法 [6] との生成結果比較	34
31	実画像と自由視点画像を用いた白線検出結果	36
32	三次元点群を計測できない領域の平面当てはめ結果 (左) と VDTM 結果 (右)	36
33	動物体の映り込みによる画像の歪み	37

表 目 次

1	画像生成手法の比較	13
2	外部カメラの仕様と全方位カメラからの移動量および回転量	26
3	実験に使用した計算機	26
4	IP-S2 で取得できる全方位画像の位置姿勢情報および三次元点の精度	26
5	データセット A について IP-S2 で収集した情報	26
6	データセット B について IP-S2 で収集した情報	26

1. はじめに

近年、運転初心者の教育を目的としたドライブシミュレータシステムの開発が盛んに行われている。FORUM8社のシステム [1] は多種多様な三次元CGモデルを提供し、様々なシナリオに対応して仮想的な道路環境を構築できる。また、ドライブシミュレータは自動車の製造プロセスにおいて、車載カメラによる安全運転支援システムを試験する際にも試験的に用いられ始めている。TASS社のシステム [2] は衝突検知アルゴリズムや白線検出アルゴリズムの試験を対象とした機能を提供しており、自動車製造の時間コストを削減するために活用されている。これらのシステムでは三次元CGモデルを用いて道路環境を再現しているが、CGモデルに人工的なテクスチャが使用されるため写実性に乏しく、実際の運転で得られる臨場感をユーザに与えることは難しい。また、このような手法は安全運転支援システムの評価においても不十分であることが指摘されている [3]。

一方、鉄道での利用を想定した実写画像に基づく運転シミュレータが開発されている [4]。このシステムでは事前に撮影した走行映像を、フレームレートを固定しつつ再生速度を変更することで、運転手への走行映像の提示を実現している。しかし、列車の移動範囲が線路上に限定されていることを利用しているため、位置姿勢の自由度が高い自動車を対象としたドライブシミュレータへ応用することは難しい。

このような問題に対して、写実性の高い走行シーン映像を描画するために、実シーンの情報を仮想空間内に取り込み、様々な視点位置からの現実環境の見える仮想空間内に再現する自由視点画像生成を用いる手法が研究されている。Onoらの手法 [5] では遠景領域には実写画像を、道路や標識といった近景についてはCGモデルを用いることで、実際の道路環境に則した映像を生成している。しかし、視野の大半にあたる道路部分の描画に三次元CGモデルを用いているため、写実性に乏しいという問題が残っている。Okoらの手法 [6] では複数地点で撮影された実写画像とシーンの三次元点群を入力とし、仮想視点における奥行画像(視点依存ジオメトリ)を三次元点群から作成し、視点位置に応じた適切な実写画像を貼り付ける(視点依存テクスチャマッピング)ことで高品質な画像を生成している。この手法はオフライン処理を前提としており、視点ごとの奥行画像の生成コスト

が高いため、リアルタイムでの画像提示が要求されるドライブシミュレータシステムへの利用は困難である。

このような問題に対して、本論文ではドライブシミュレータへの応用が可能な、実画像群からの高速な自由視点画像生成手法を提案する。具体的には、(1) 点群に対する事前の局所平面当てはめ、(2) 粗密法による奥行画像生成、により視点依存ジオメトリの生成にかかる計算コストを大幅に削減し、実時間での自由視点画像生成を実現する。なお、提案手法では入力として、車載型のラインスキャナ (LiDAR) と全方位カメラにより計測した形状およびテクスチャを用いる。実験では、構築したシステムの生成した画像を車載型の安全運転支援システムに用いられるアルゴリズムが実写映像と同様に白線を検出可能であるか確認する。また、ユーザに対してリアルタイムに物理的なフィードバックを与えるシステムを試作し、ドライブシミュレータとして教習効果の向上を図る。これらの実験結果から、自由視点画像生成を応用したドライブシミュレータの有効性について検証する。

本論文では、第2章でドライブシミュレータおよび自由視点画像生成に関する従来研究と本研究の位置づけについて述べる。第3章では道路環境を対象とした自由視点画像生成について、その手法を述べる。第4章では、提案手法に基づいて構築したドライブシミュレータについて、その機能とアプリケーションについて述べる。最後に、第5章で本論文のまとめと今後の展望について述べる。

2. 関連研究

本研究の目的は実写同様の見え方を再現可能な自由視点画像生成手法を用いて、実際の交通環境に則したドライブシミュレータを構築することである。本章では、まずドライブシミュレータに関する従来研究について、次に自由視点画像生成に関する従来研究について概観したのち、本研究の位置づけについて述べる。

2.1 ドライブシミュレータシステムに関する研究

本節ではドライブシミュレータシステムに関する研究を、ドライブシミュレータの効果の検証に関する研究、運転者の技能向上を目的としたドライブシミュレータの構築に関する研究、車両開発支援等を目的としたドライブシミュレータの構築に関する研究に分け、従来研究を概観する。

2.1.1 ドライブシミュレータの効果に関する研究

運転技能の向上を目指したドライブシミュレータの有効性を検証した研究として、Kermeny らの調査 [7] では、ドライブシミュレータを用いた際にドライバーが得る知覚を、視覚と動きに分類し検証している。視覚に関わる知覚は、画面を通してユーザへ提示される情報を指し、ドライバーが仮想空間のオブジェクトの位置情報や、自車の位置姿勢情報等を判断する際に用いられる。動きに関わる知覚は、機械的な手法でユーザへ提示される振動や傾きを指し、自車の加速度や移動による遠心力等を判断する際に用いられる。この調査ではこれらの情報量が増えることで、自車の状態を認識する精度が向上することを示している。Jamson らによるドライブシミュレータの提示映像に関する調査 [8] では、シミュレータの提示映像は解像度と視野角が計算機の性能限界によってトレードオフの関係になっていると述べている。この調査では、解像度は高いが視野の狭い画像と解像度は低い視野の広い画像の2つをユーザへ提示し、自車の速度と車線位置を正しく認識できるか実験を行っている。実験結果から、高解像度な画像を用いた場合にスピードの認識精度が高くなり、視野の広い画像を用いた場合には車線位置

の認識精度が高くなることが示されている。これらの研究では、三次元 CG モデルを用いて構築されたシミュレータを対象としているが、ユーザに提示される画像の解像度が向上することで、自車の運動状態の認識精度が向上することが確認できる。また、機械式の椅子やハンドルを用いて、ユーザに与えるフィードバックの種類を増加させることで、さらに認識精度が向上することが示されている。

本研究ではこれらの知見を踏まえ、ドライブシミュレータを構築するにあたって複数の知覚を与えるよう設計を行う。視覚に関してはヘッドアップディスプレイ表示を用いて、走行車線を示す情報を提示し、動きに関してはハンドルへのフォースフィードバックを行うことで自車の運動状態の認識精度の向上を行う。

2.1.2 運転者の技能向上を目的としたドライブシミュレータの構築に関する研究

従来から、車両の運転シミュレータとして、鉄道を想定したものと自動車を想定したものが研究・開発されている。鉄道事業者においては、路線の CG 映像を利用したシミュレータが主に用いられてきたが、実際の運転では周辺の建物や看板等を目印にすることが多く、より現実環境に近い運転シミュレータが求められてきた。これに対して、富士通株式会社の開発した列車用運転シミュレータ [4] では、実際に運転士の視点から撮影した映像をもとに、ユーザに提示する映像を生成している (図 1)。列車用シミュレータでは列車の移動範囲は線路上に限定されるため、映像の再生速度を調整することで実際の運転映像を再現できる。このシステムでは、映像の再生速度に依らずにフレームレートを固定する技術を用いることで、車両の速度に依らず実際の見えに近い映像を提示している。しかし、自動車を対象としたシミュレータを構成する場合には、道路上の様々な場所への視点移動が発生するため、この手法を用いて自動車用のシミュレータを構築することは困難である。

一方、自動車のドライブシミュレータに関しては、ほとんどのシステムでは三次元 CG モデルを利用した映像が用いられているが、三次元 CG モデルによる映像再現では臨場感が低いという問題がある。安田ら [3] は、三次元 CG モデルを用いて生成した画像を実写画像の代替として使用することは適切でないことを指摘しており、実写映像を用いて現実環境を再現する手法が求められている。これ

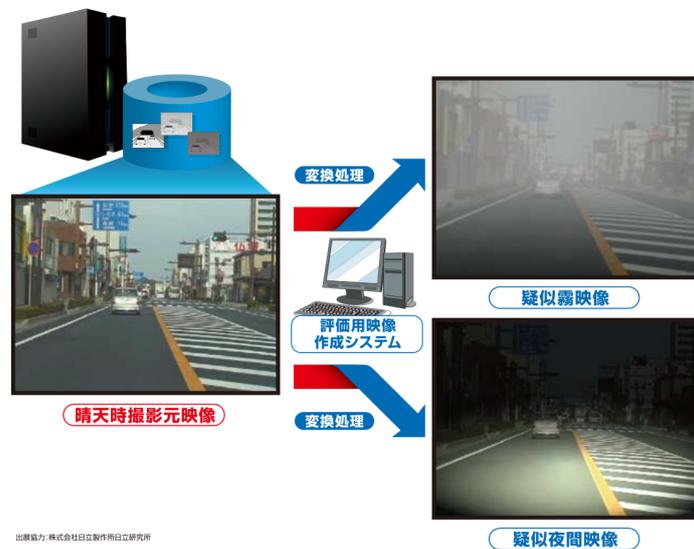


図 1 実写映像をもとにした列車用運転シミュレータ [4]

に対して Ono ら [5] は、三次元 CG モデルで作成した道路モデルと、車載カメラを用いて撮影した全方位画像を用いて空や建物といった遠景領域を描画することで、実環境の見えを再現している。この手法では、実環境に沿った遠景領域を再現可能であるものの、視野の大半にあたる道路部分が三次元 CG モデルによって構築されており、近景については写実性が低いという問題がある。

2.1.3 車両開発支援等を目的としたドライブシミュレータの構築に関する研究

近年、前項で述べた運転技術向上のためのドライブシミュレータとは異なる目的で、ドライバー視点、あるいは車載カメラ視点のシミュレーション映像を生成する研究が行われている。この背景として、車載カメラで撮影した映像をもとに、運転者をサポートする安全運転支援システムの開発が盛んになっていることが挙げられる。このシステムでは周囲に存在する自動車や歩行者を車載カメラの映像から検出して、衝突を事前に予測してブレーキ動作を行ったり、自車の走行するレーン両端の白線を検出してレーン外を走行しないようにステアリング操作の補助を行ったりしている。これらのシステムは、安全運転の支援に一定の効果が認められている一方で、誤動作が生じた場合には人命や財産への被害が大きくなることが考えられるため、現在のところ大きなコストをかけてシステムの評価が行



出典協力:株式会社日立製作所日立研究所

図 2 画像処理による環境再現 [9]

われている。具体的には、車載カメラ等を用いた映像ベースの安全運転支援システムの評価は、実際に道路上を走行して撮影した映像をシステムへ入力し、その動作を検証することにより行われているが、様々なテストシナリオに対し、逐一走行映像を撮影する必要があるため、評価にかかる時間的コストは膨大なものになってしまうという問題がある。これに対して、安全運転支援システムの評価にかかる時間的コストを削減するために、車載カメラ視点の映像を仮想的に合成する研究が行われている。これらの研究では、運転者の技能向上を目的としたドライブシミュレータと異なり、映像をリアルタイムに提示する必要はなく、映像の生成速度については考慮されていないものが多い。

具体的な研究事例として、実写映像に対して画像処理を施すことで安全運転支援システムを評価する手法が提案されている [9, 10, 11]。文献 [9, 10] の研究では、あらかじめ車載カメラで撮影した実走行の映像に対して画像処理を施すことで、霧や夜間といった環境を擬似的に再現する手法を開発している (図 2)。ただし、三次元 CG モデルを用いたシミュレータと異なり、道路の幅員や車線数を変えてのシミュレーションや、視点移動を伴う映像の生成は行えず、評価可能なシナリオ



図 3 Oko らの手法 [6] による自由視点画像生成結果

は限定されている。一方, Zofka ら [11] は, 車載カメラを用いた安全運転支援システムを評価するために, 予め撮影した走行映像に自動車や歩行者といった動物体を重畳表示する手法を提案している。この手法では, 走行映像と GPS からの情報に基づき路面の形状を算出し, その上に三次元 CG モデルで作成した自動車等の物体を配置している。実験では, 重畳表示した自動車を実際の自動車を用いた試験映像と同様に検出できることが示されている。しかし, この手法でも視点の自由な移動はできず, 評価のシナリオに沿った走行映像を事前に撮影する必要がある。Oko ら [6] は, 車載カメラに実装されるアルゴリズムのための評価を目的として, 実写画像のみを用いて自由な視点位置での車載カメラ映像を再現している。疎な三次元点群から奥行画像を生成する際に出現する, ファットエンドシルエットやカットシルエットと呼ばれる誤った奥行値に対して, デプステストやエネルギー関数を用いて補償を行い, 物体の位置関係を正確に復元している。生成された結果画像を図 3 に示す。電線の一部や建物の壁面にわずかに歪みが発生しているものの, 写実性の高い自由視点画像を生成している。ただし, この手法では 1 枚の画像を生成するために 60 分程度の時間を要しており, リアルタイムでの描画を実現するためには劇的な高速化が必要となる。

2.2 自由視点画像生成に関する研究

前節で挙げたドライブシミュレータへの応用を目的としたものに限らず，多くの自由視点画像生成手法が研究されてきており，これらは，(1) 三次元形状に対してテクスチャがマッピングされた三次元モデルを用いるモデルベースレンダリング (Model-Based Rendering: MBR) 法，(2) 三次元形状を用いず対象環境を撮影した画像群を変形・合成するイメージベースレンダリング (Image-Based Rendering: IBR) 法，(3) 三次元形状と画像群を用意し視点に応じて三次元形状とテクスチャを適応的に選択・変形を行う視点依存ジオメトリ・テクスチャ法，に分類できる．以下では，これらの手法について述べ，ドライブシミュレータに応用可能な自由視点画像生成について論じる．

2.2.1 モデルベースレンダリング

モデルベースレンダリング (Model-Based Rendering : MBR) 法は，対象となる空間のテクスチャ付き三次元モデルを作成しておき，設定した視点の画像に対して三次元モデルをレンダリングすることで自由視点画像を生成する手法である．この手法では，自由視点画像の品質が三次元形状の精度に大きく依存するため，三次元復元を高精度に行うための研究が行われている．これらの研究は，画像のみから復元を行う受動的な手法と，レーザなどを照射することにより形状を計測する能動的な手法に大別される．

受動的な手法では，まず Structure from Motion (SfM) 法 [12] により複数の入力画像間の特徴点の対応を求め，それぞれのカメラの位置姿勢情報や特徴点の三次元位置を推定する．ただし，SfM 法は特徴点に対する疎な三次元座標しか得られない．そのため，多視点ステレオ (Multi View Stereo: MVS) 法を併用することで密な三次元形状を復元する [13, 14, 15, 16, 17]．MVS 法では，SfM 法などで求めたカメラ位置姿勢情報と画像群を入力し，ステレオ法によってそれぞれの画像の奥行画像を推定する．MVS 法の一例として Agarwal ら [13] の手法では，400 万枚の画像をもとに SfM 法と MVS 法を用いてローマ市街の三次元モデルを作成し，自由視点画像を生成している．これらの手法では道路や空のようなテクスチャが



図 4 MBR 法によって生成した自由視点画像 [13]

少なく画像間の対応が付きにくい箇所では、完全な三次元モデルを作成することは難しく、図 4 のように欠損が発生してしまう。

一方、能動的な三次元復元手法として、レーザを照射して、光が反射し計測されるまでの時間を計測するタイムオブフライト (Time of Flight:ToF) 法や、プロジェクタで特殊なパターンを対象へ投影し、それをカメラで撮影した結果を用いるアクティブステレオ法がある。これらの方法を利用する具体的なシステムとして、アクティブステレオ法を用いた Microsoft Kinect[18]、ToF 法を用いた Velodyne HDL-64E[19] や Topcon IP-S2[20] などが存在し、容易に対象環境の三次元点群を計測できる [21]。Microsoft Kinect は撮影可能な範囲が 0.5m~4m 程度と広範囲に渡る測定には不適であり、道路環境のような広い環境を測定する際には ToF 法を用いた Velodyne HDL-64E、Topcon IP-S2 が適切だと考えられる。

受動的な計測、能動的な計測に共通して発生する問題として、生成された三次元モデル中に欠損が生じてしまう点がある。欠損のない形状を得るためには、他の手法を併用して形状の補間を行う必要がある。これに対して Schnabel らは計測した三次元点群に対して、プリミティブと呼ばれる球や直方体といった三次元モデルを当てはめることで、対象環境の三次元モデルを復元する手法を提案した [22]。対象となる環境がプリミティブで近似可能な単純なものであれば、欠損を含んだ入力情報に対しても良好な復元結果を得られることが知られている。

2.2.2 イメージベースレンダリング

モデルベースレンダリングが三次元形状を用いるのに対して、対象となる環境の三次元形状を明示的に復元せず、画像群や光線情報を用いて自由視点画像を生成するイメージベースレンダリング法が存在する。モデルベースレンダリング法では樹木や毛髪といった複雑な形状を再現することが難しいという問題があるが、イメージベースレンダリング法ではこれらを含む対象に対して、視覚的に違和感のない画像を生成可能である。以下では、イメージベースレンダリング法を変形による手法とライトフィールドによる手法に分類し解説する。

[変形による手法]

対象環境を撮影した画像群をもとに、テクスチャの変形を行うことで任意視点の画像を生成するモーフィングと呼ばれる手法が提案されている。Seitz らの手法 [23] では、2つの入力画像間に対応点を与え、仮想視点の位置に応じて対応点がどのように投影されるかを計算し、入力画像を部分的に変形・ブレンディングすることで自由視点画像を生成する (図5)。この手法では幾何情報を用いないため、2つの画像の中間に位置する画像のみ生成することができる。また、視点移動によって画像内で左右の位置関係が入れ替わるようなシーンには対応できず、テクスチャの幾何的な歪みが発生しやすい問題がある。

[ライトフィールド]

ライトフィールドは対象となる空間を通る光線の情報を記録することで、任意の視点における画像を生成する手法である [24, 25, 26, 27, 28]。一般に、このような光線の情報を全て記録することは困難であり、不完全な光線情報から画像を生成する際には欠損が生じてしまう。このため Davis らの手法 [27] では、重み係数を用いた近傍の光線情報をブレンディングすることで、欠損の補償を行っている。Gortler らの手法 [28] では、ライトフィールドを記録する際に用いる、座標 (x, y, z) を通る方向 (θ_x, θ_y) の光線という5次元の情報を、2つの平行な平面上の座標 (u, v) , (s, t) を通過する光線として表現することで、光線情報の次元を削減し効率的なレンダリングを可能としている。光線情報をもとに描画した自由視点

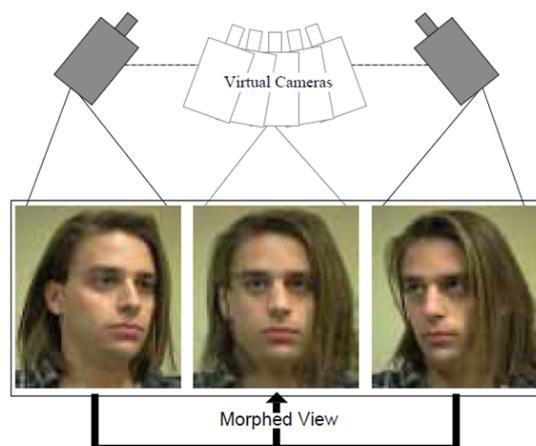


図 5 モーフィング [23] による自由視点画像

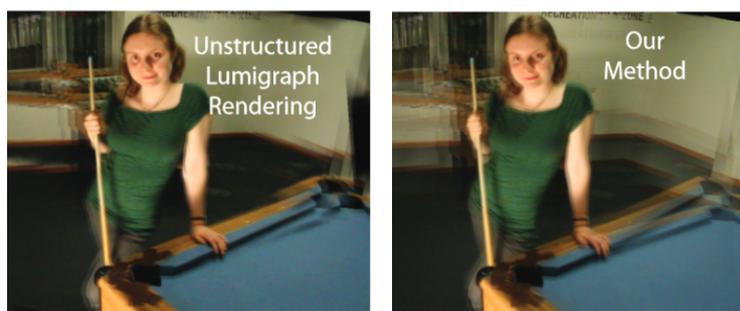


図 6 Buehler らの手法 [26] による画像 (左) と Davis らの手法 [27] による画像 (右)

画像の例を図 6 に示す. ライトフィールドを用いて広大な環境の自由視点画像を生成しようとする時、膨大な光線情報を記録する必要があり、また撮影位置から距離が離れるほど画像中に発生する歪みが大きくなってしまふ. そのため、本研究で対象とするような道路環境を対象とする場合にライトフィールドを用いることは適切で無い.

2.2.3 視点依存ジオメトリ・テクスチャマッピング

MBR 法では完全な三次元モデルを作成することが困難な点に起因して、歪みや欠損のある自由視点画像が生成される問題がある. 自由視点画像におけるテクスチ



図 7 単純なテクスチャレンディングに生成結果 (左) と Takai らのテクスチャマッピング法 [31] による生成結果 (右)

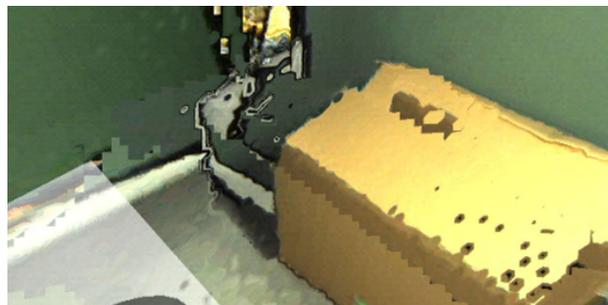


図 8 Okura らの手法 [33] による自由視点画像生成結果

ャの歪みを軽減し、欠損を補間する手法として、視点位置に応じてマッピングする画像を適応的に選択する視点依存テクスチャマッピング (View-Dependent Texture Mapping:VDTM) および視点に応じて適応的に三次元形状を変形する視点依存ジオメトリ (View-Dependent Geometry:VDG) が提案されている [29, 30, 31, 32, 33]. 例えば, Takai らの手法 [31] では, 復元された三次元形状とそれに基づきマッピングされたテクスチャは不正確であると考え, 視点位置に応じてテクスチャの画像特徴が一致するようにテクスチャを変形させることによって, ボケや二重写りを低減しつつ撮影画像と同等の画質の任意視点画像を生成している (図 7).

Okura ら [33] の提案システムでは, ロボットの遠隔操作を目的として, リアルタイムに自由視点画像生成を行っている. 入力に Kinect を用いていることで奥行画像の生成にかかる計算コストを低減しているものの, 生成される画像上に多くのアーチファクトが生じている (図 8).

表 1 画像生成手法の比較

	写実性	動きの自由度	生成時間
実写画像をそのまま用いる手法 [4]	高	低	実時間
三次元 CG モデルを用いる手法 [1, 2]	低	高	実時間
実写画像と三次元 CG を併用する手法 [5]	低	高	実時間
自由視点画像生成 [6, 33]	中	中	手法による

2.3 本研究の位置づけと方針

本研究ではドライブシミュレータに求められる要件を以下の通り定めた。

- (1) 実際の環境に則った見え方であること
- (2) 仮想環境の中を移動できること
- (3) ユーザの操作を即時反映できること

これまで述べたように、ドライバー視点あるいは車載カメラ視点の画像を生成する手法として、実走行で撮影した画像をそのまま用いる手法、三次元 CG を用いた手法、実写画像と三次元 CG を併用する手法、自由視点画像を用いる手法が存在する。それぞれの手法について、その特徴をまとめたものを表 1 に示す。

同表に示したように、最も写実性が高いものは実走行で撮影した画像をそのまま用いる手法であるが、これは視点の移動に対応できずドライブシミュレータへの利用は困難である。また、三次元 CG モデルを使用した手法は、写実性に乏しいという問題がある。これらの中では、実写画像を用いることで実際の見えを再現しながら、道路上等ある程度限定される範囲において視点変更の自由度が高い自由視点画像生成は最も効果的であると考えられる。前節においては自由視点画像生成手法を 3 種類に大別した。それぞれの手法について、ドライブシミュレータの用途に適しているかを考えると、MBR 法は、視点位置の自由度が高い反面、環境の欠損のない三次元モデルを再現することが困難な問題がある。IBR 法は、実写画像を用いて実環境の見え方を再現可能であるが、視点の移動量が大きくなると画像中の歪みが発生しやすくなる問題がある。VDG・VDTM を用いた手法

は、視点位置の自由度が比較的高く、実画像を用いて見え方を再現するため、広大な道路環境を対象とするドライブシミュレータの用途に適していると考えられる。しかし、これまでに述べたように実用に耐えうる品質の自由視点画像を高速に生成する手法は提案されていない。

本研究ではドライブシミュレータでの利用を前提に、三次元CGモデルを用いた手法の代替として実写画像のみを用いて高速に自由視点画像を生成する手法を開発し、実際にドライブシミュレータへの応用が可能であることを示す。3つの要件を考えるにあたり、VDG・VDTMを用いた自由視点画像生成を用いることで要件(1)、(2)を満たすことができる。要件(3)を満たすためには、画像の生成に要する時間を一定以下にする必要があるが、現行の自由視点画像生成手法では十分な品質の画像を高速に生成することは困難である。そこで、本研究では奥行画像生成にかかる時間を局所平面当てはめと粗密法によって短縮し、実時間で画像を生成可能な自由視点画像生成手法を提案する。

3. 道路環境を対象とした自由視点画像生成

本章では，ドライブシミュレータを対象としてドライバー視点の映像を生成する実時間自由視点画像生成の手法について詳細を述べる．以下では，提案手法の処理の流れを概説した後，それぞれの詳細について述べる．

3.1 提案手法の概要

図9に提案手法による自由視点画像生成の処理の流れを示す．提案手法は，入力情報の取得と前処理を行うオフライン処理 (a) と，実際に自由視点画像を生成するオンライン処理 (b) に分かれる．オフライン処理ではまず，Topcon IP-S2(以下 IP-S2 と略記)[20] を用いて道路環境の三次元点群・全方位画像・全方位画像のカメラ位置姿勢情報を取得する (a-1)．次に，各全方位画像に対する全方位奥行画像を，三次元点群と全方位画像のカメラ位置姿勢情報をもとに生成する (a-2)．最後に，道路環境の三次元点群に対して主成分分析を行い，局所平面当てはめを行うことで道路や建物の平面を検出しながら点群の情報量を削減する (a-3)．オンライン処理ではまず，ドライバーからの操作によって視点位置を決定し (b-1)，三次元点群の情報をもとに疎な奥行画像を生成する．生成される奥行画像は疎になる

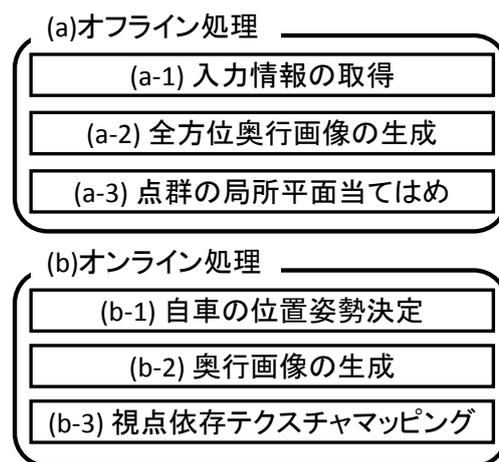


図9 提案手法の流れ

ので，粗密法と画像処理によって密な奥行画像を生成する (b-2)．最後に VDTM を行うことで自由視点画像を生成する (b-3)．オフライン処理において，全方位奥行画像の生成および三次元点群への局所平面当てはめを実行しておくことで，オンライン処理での奥行画像生成にかかる計算コストを削減し，高速な画像生成を実現する．以下に各処理について詳述する．

3.2 入力情報の取得

提案手法では，オンライン処理での運転者視点の自由視点画像生成に利用するために，車載型のラインレンジスキャナと全方位カメラを統合した IP-S2[20] を用いることで，あらかじめ三次元点群と全方位画像，及び全方位画像のカメラ位置姿勢情報を取得しておく．IP-S2 を搭載した実験車両を図 10 に示す．IP-S2 には 3 つのラインレンジスキャナ，全方位カメラシステム，RTK-GPS，オドメトリセンサが搭載されており，走行経路上の三次元点群・全方位画像・全方位画像の位置姿勢情報を取得することができる．IP-S2 を用いて取得した三次元点群と全方位画像の例を図 11 に示す．

また，オンライン処理では，ドライブシミュレータにおける運転者視点の画像を生成するにあたって，ドライバーのハンドルやペダルの操作情報により視点位置を決定する．これにあたって，本研究では図 12 に示す Thrustmaster 社製のステアリングコントローラを用いてそれらの情報を取得する．このコントローラでは，ハンドルの回転を 1080°，ペダルの踏み込み量を 2000 段階の分解能で取得可能で，3 つのペダルを備えている．また，コントローラはフォースフィードバック機能を備えており，ハンドルへのフィードバックが可能となっている．

3.3 全方位奥行画像の生成

オンライン処理において VDTM を行う際に用いるテクスチャの可視判定を，仮想視点での奥行画像と全方位画像上の奥行画像を用いて行う．ここでは，この可視判定に用いられる各地点の全方位画像に対応する全方位奥行画像を，オフライン処理において生成しておく．具体的には，まず各全方位画像の撮影地点に設定



図 10 IP-S2 を搭載した実験車両



図 11 IP-S2 を用いて取得した三次元点群 (左) と全方位画像 (右)



図 12 実験に用いたステアリングコントローラ

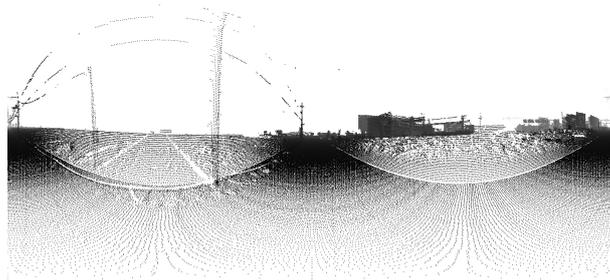


図 13 生成した疎な全方位奥行画像

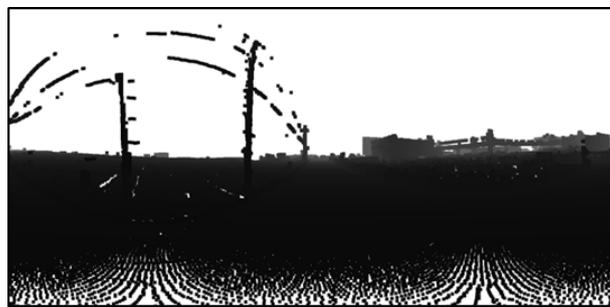


図 14 生成した全方位奥行画像

した球状の全方位画像面に対して、三次元点群を投影する。これにより図 13 に示すような疎な全方位奥行画像を取得する。この疎な全方位奥行画像に対して近傍画素の探索を用いて画素値を更新していく。ある画素を中心としてウィンドウを当てはめ、領域内で最も奥行値の小さい画素を探し、この画素値を用いて画素を更新する。空の領域等、三次元点群を取得できない領域はウィンドウ内に奥行値が現れないため画素の更新は行われないが、このような領域は無限遠の奥行値を持つとして更新を行う。結果として、本来の奥行画像と比べると輪郭がより太く現れるが、後述の VDTM 処理によって適切な色情報を取得するよう調整する。生成した密な全方位奥行画像を図 14 に示す。

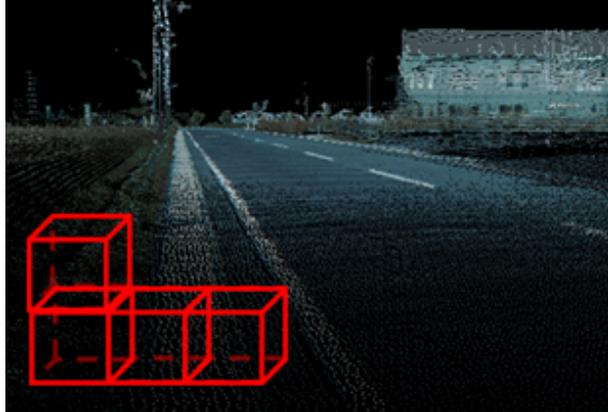


図 15 空間の分割

3.4 局所平面当てはめによる簡易形状モデルの生成

取得した三次元点群に対して、主成分分析による局所平面当てはめを行う。具体的には、取得した三次元点群の分布する空間を図 15 に示すように立方体から成る部分領域に分割し、各領域内に存在する三次元点群に対して三次元の主成分分析を行い、第 1 主成分、第 2 主成分、第 3 主成分および寄与率を求める。領域内の三次元点群が平面状に分布している場合には、第 1 主成分と第 2 主成分の固有値が大きくなり、第 3 主成分の固有値は小さくなる。また、このとき第 3 主成分は平面の法線ベクトルとなるため、部分空間内の三次元点群を第 3 主成分を法線ベクトルとするような平面に置き換える。法線ベクトルが定まると、置き換える平面が立方体状の部分空間の枠のどの 4 辺と交差するかが求められる。法線ベクトルの要素の最大値から、どの面の 4 辺が対象となるかを判断し、平面の方程式を用いて平面の頂点座標を決定する。以上の処理によって、情報量の削減を行いながら物体の形状を疎な点群から密な平面へ変更することができる。また、部分領域内に三次元点群が少ない場合は平面への置き換えは適切で無いと考えられる。そこで、部分領域内の三次元点数に閾値を定め、これを下回る場合には平面への置き換えを行わない。実際に三次元点群へ主成分分析を行い、平面へ置き換えた例を図 16 に示す。道路面や建物の壁について、平面当てはめが行われていることを確認できる。

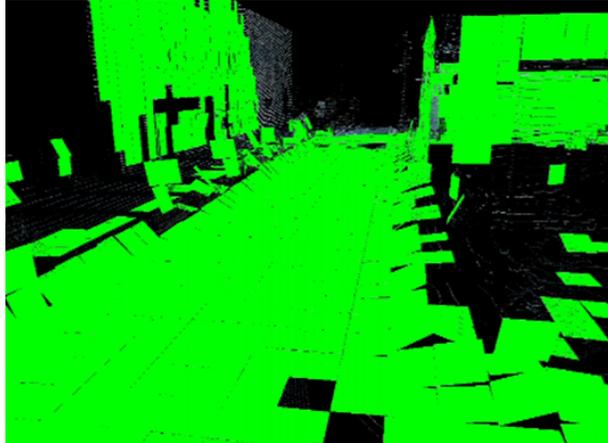


図 16 三次元点群への局所平面当てはめ結果

3.5 視点依存奥行画像の生成

ドライバーからのハンドル・ペダル操作によって仮想空間中での自車の位置姿勢が決定すると、その視点に応じた奥行画像を生成する。具体的には、まず自車の位置姿勢情報をもとに、画像平面を決定し、その画像平面に対して、周囲の三次元点群を投影し疎な奥行画像を生成する。次に、密な奥行画像を生成するために粗密法を用いる。オリジナルの奥行画像に対して、画像サイズを $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{4}$ とした画像平面を設定し、これらに対して三次元点群を投影することで、サイズの異なる奥行画像を階層的に生成する(図 17)。疎な奥行画像中に奥行値が格納されていない画素があるとき、1つ上の階層の画像の同じ位置に当たる画素を参照し、奥行値が格納されている場合はその値をコピーし、格納されていない場合は更に上の階層の画像を参照する。粗密法を用いることで、計算コストを抑えながら密な奥行画像を生成できる。本来は無限遠点である部分に誤った奥行値が設定されるなどジオメトリの不整合が発生するが、テクスチャマッピングの際には後述の Visibility Test によってこの影響を軽減する。生成された疎な奥行画像と密な奥行画像を図 18 に示す。

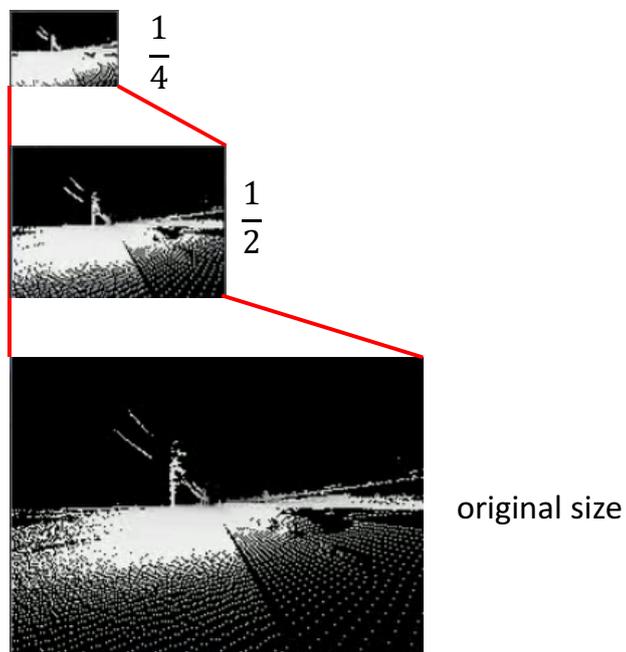


図 17 画像ピラミッドを用いたデプスマップの更新

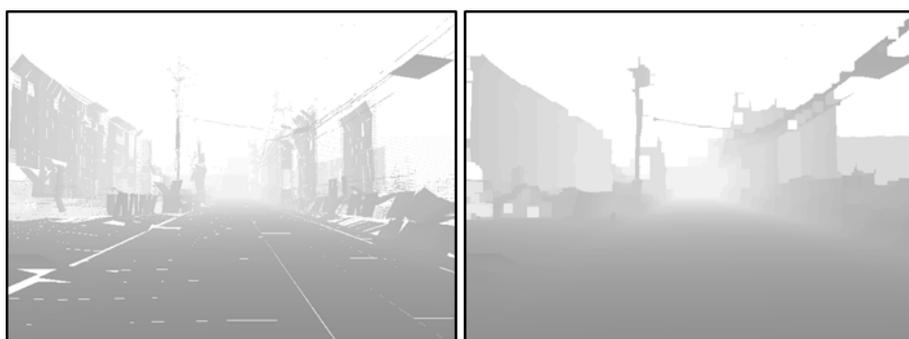


図 18 生成された疎なデプスマップ (左) と密なデプスマップ (右)

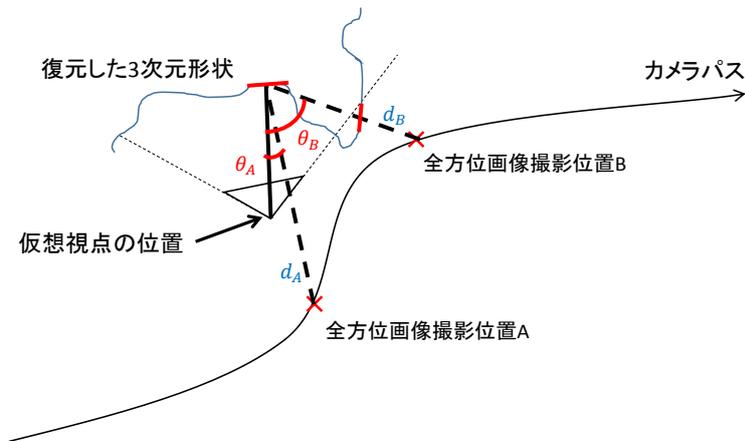


図 19 全方位画像の選択基準

3.6 視点依存テクスチャマッピング

上記の手順で生成した奥行画像を用いて，文献 [34] の基準により全方位画像群からテクスチャを選択する．具体的には図 19 に示すように，奥行画像をもとに復元された三次元形状，仮想視点，全方位画像の撮影位置があるとき，以下の評価関数を用いて適切な全方位画像 n を各画素で選択する．

$$n = \arg \min_i \alpha \theta_i + d_i \quad (1)$$

全方位画像 i に対して， θ_i は全方位画像 i の撮影位置，対象画素の奥行値をもとに復元された三次元位置，仮想視点の位置を繋ぐ線分の成す角度を示している． d_i は対象画素に対応する三次元位置と全方位画像の撮影位置間の距離を示している． θ_i が小さくなるほど，全方位画像 i は仮想視点に近い方向から撮影されているため，対象物体の見え方が近くなる．また， d_i が小さいほど，三次元形状の位置と全方位画像間の距離が近くなり，対象物を近くから撮影しているため，結果としてテクスチャの解像度向上の効果を期待できる．重み α は，実験的に得られた値を用いる．また，全方位画像上には図 20 のように観測機器が写り込む領域が存在するが，この領域を区別するマスク画像をあらかじめ作成しておくことで，テクスチャマッピングの際に参照されないよう制御する．



図 20 画像に映り込む観測機器の例

上記の手順で得られた奥行画像とテクスチャをもとにテクスチャマッピングを行うと、図 21 のように無限遠である空の領域に電柱のようなオブジェクトが映り込んでしまうことがある。これは奥行画像上では無限遠の領域に、全方位画像中の無限遠でない領域がテクスチャとして選択されるために発生する現象である。本研究では、Okoro [6] の提案する視点依存デプステスト (View-Dependent Depth Test:VDDT) を応用し、Visibility Test を行うことで、視点依存テクスチャマッピングに用いるテクスチャを最終的に決定する。VDDT は Yang ら [35] の提案するデプステスト (Depth Test:DT) が元のアイデアとなっており、あらかじめ作成した全方位奥行画像を用いることで視点依存ジオメトリ上の誤った奥行値を補償することを目的としている。

本研究で用いる Visibility Test では、視点依存ジオメトリに対して、全方位画像群からテクスチャマッピングを行う際に、ドライバー視点での奥行画像上の奥行値と、全方位奥行画像上の奥行値の比較を行う。具体的には、対象となるテクスチャの全方位奥行画像上の三次元位置をドライバー視点の座標系へ再投影し、奥行値の比較を行う。奥行値が大きく異なる場合は、この全方位画像を候補から外した上で、式 (1) により新たに全方位画像を再設定し同様に Visibility Test を行う。



図 21 不適切なテクスチャの選択例

4. 実験

4.1 実験の目的及び方法

ドライブシミュレータへの応用において、自由視点画像が三次元 CG モデルおよび実写映像の代替となるかを検証するために、本実験では、提案手法を用いたドライブシミュレータシステムを試作し、実際に運転のシミュレーションを行った際に生成された画像の有効性を検証した。また、車載カメラを用いた車載安全運転システムの評価への本システムの利用可能性を検証するために、生成された映像を白線検出アルゴリズム [36] へ入力し、Okora のデータセット [6] を用いた定量評価を行った。本実験では、実験車両に取り付けた外部カメラ (Point Grey Research:Frea3) を用いて撮影した走行映像と生成した自由視点画像の比較を行う (図 22)。取り付けた外部カメラのパラメータ及び全方位カメラから外部カメラへの水平・垂直移動量および回転量を表 2 に示す。表 3 に実験に用いた計算機の詳細を示す。

4.2 入力情報

提案する自由視点画像生成手法は、入力情報として対象環境の三次元点群、全方位画像、全方位画像のカメラ位置姿勢情報を用いる。本実験では、Okora が収集したデータセット [6] を入力として用いる。本データセットは、IP-S2 を搭載した計測車両を用いて、京都府相楽郡精華町光台において測定された 2 種類の道路環境データで構成される。IP-S2 で取得できる全方位画像の位置姿勢情報及び三次元点の精度を表 4 に示す。データセット A は道路脇に建物の少ない環境を対象とし、図 23 に示す走行経路で、表 5 に示す条件の三次元点群、全方位画像、全方位画像のカメラ位置姿勢情報を取得している。データセット B は道路脇に住宅が広がっている市街地を対象とし、図 24 に示す走行経路で、表 6 に示す条件の三次元点群、全方位画像、全方位画像のカメラ位置姿勢情報を取得している。データセット A については、環境の測定と同時に外部カメラを用いて比較用の走行映像の撮影を行っている。

表 2 外部カメラの仕様と全方位カメラからの移動量および回転量

解像度	640 × 512 px
画角	67 × 56 deg.
垂直方向移動量	-70.8 cm
水平方向移動量	1.4 cm
ヨー角回転量	0.0 deg.

表 3 実験に使用した計算機

CPU	Intel Core i7-4770 3.4 GHz
Memory	16 GB
Graphics	nVidia GeForce GTX Titan Black

表 4 IP-S2 で取得できる全方位画像の位置姿勢情報および三次元点の精度

位置姿勢 (水平方向)	± 10.0 mm + 0.5 ppm
位置姿勢 (垂直方向)	± 15.0 mm + 0.5 ppm
三次元点	± 35mm

表 5 データセット A について IP-S2 で収集した情報

収集日時	2013/12/20 16時36分
走行距離	520 m
全方位画像枚数	267 枚
三次元点数	3,000,000 点

表 6 データセット B について IP-S2 で収集した情報

収集日時	2013/6/11 6時00分
走行距離	600 m
全方位画像枚数	300 枚
三次元点数	4,000,000 点

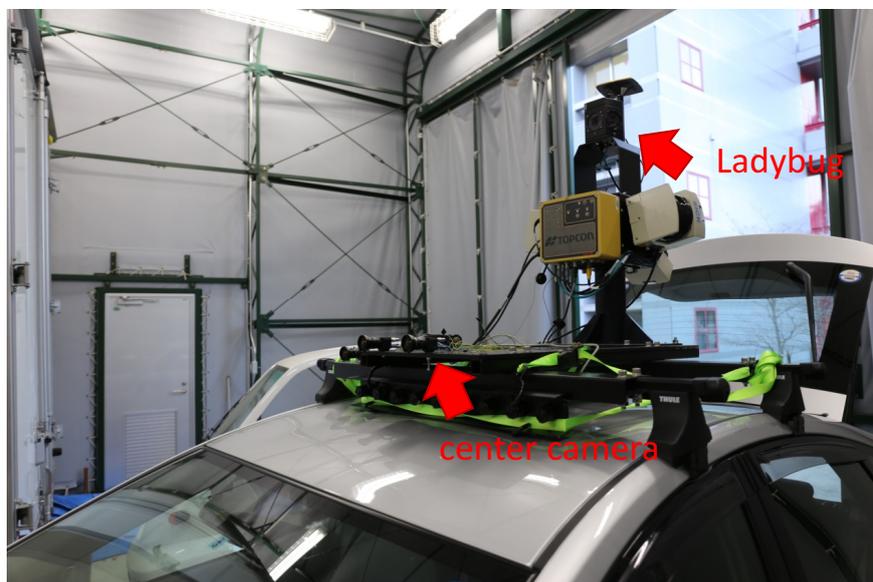
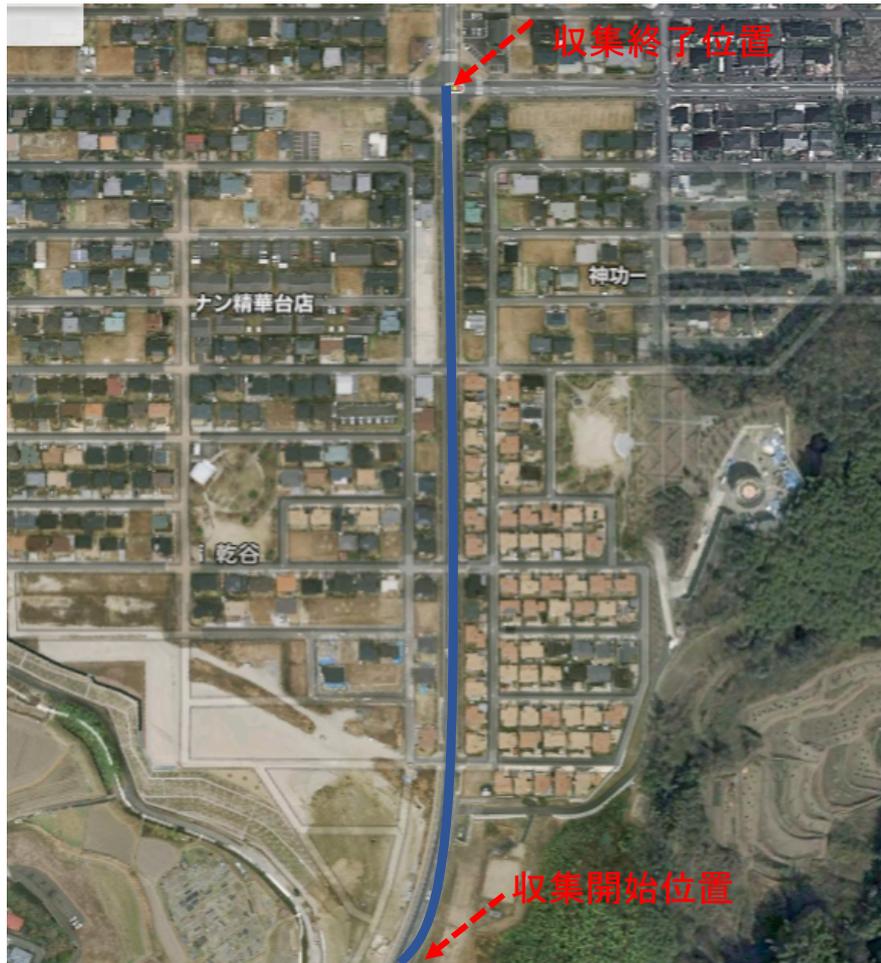


図 22 外部カメラの設置位置



©2015 Google, DigitalGlobe

図 23 実験データ (A) の走行経路



©2015 Google, DigitalGlobe

図 24 実験データ (B) の走行経路

4.3 試作ドライブシミュレータシステムによる自由視点画像の生成結果

試作したドライブシミュレータシステムの外観を図 25 に示す。システムは映像提示用のディスプレイ 1 台と、操作用のステアリングコントローラ、画像生成用の計算機で構成される。ドライバーのハンドル・ペダル操作によって視点が移動し、対応した画像がリアルタイム提示されるように構成されている。白線検出結果を用いた、ドライバーへのフィードバック提示の例を図 26 に示す。白線検出アルゴリズムは正常に動作し、提示映像上に検出結果が重畳表示されている。同図では中央白線への距離が近くなったため、ハンドルを左へ切るようヘッドアップディスプレイへの提示を行い、これに加えてハンドルによる左方向のフォースフィードバックを与えている。提示映像のフレームレートは白線検出を無効にした場合において約 15FPS、白線検出を有効にした場合で約 10FPS となっている。

データセット A について、提案手法を用いて生成した自由視点画像列を図 27 に示す。同図は走行中に左車線を走行していた状態からの U ターンを行った際に生成されたものである。データセット B について、提案手法を用いて生成した自由視点画像列を図 28 に示す。同図は左車線を走行していた状態から右車線へ車線変更し、中央白線上へ戻った際に生成されたものである。図 28 より、道路脇にある建物についてジオメトリを再現出来ていない部分が存在するものの、道路上の白線等を再現出来ていることを確認できる。図 29 にカメラで撮影した画像と、それに対応する提案手法を用いて生成した自由視点画像を示す。同図より、建物壁面に不連続な部分が発生したり、電線の付近にテクスチャの不連続が起きたりしているものの、白線や建物の位置など幾何形状を再現出来ていることがわかる。



図 25 試作したドライブシミュレータシステムの外観

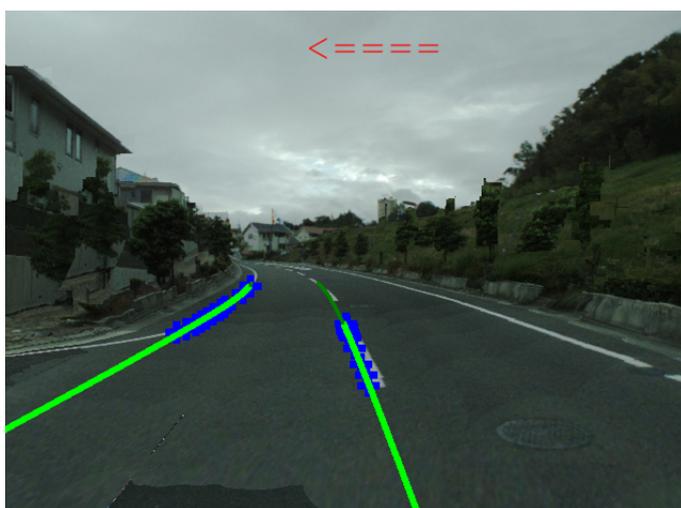


図 26 白線検出結果を応用したドライバーへのフィードバック例



Frame #1



Frame #5



Frame #2



Frame #6



Frame #3



Frame #7



Frame #4



Frame #8

図 27 データセット A を用いた生成画像の例



Frame #1



Frame #5



Frame #2



Frame #6



Frame #3



Frame #7



Frame #4



Frame #8

図 28 データセット B を用いた生成画像の例



図 29 外部カメラで撮影した実画像 (左) と提案手法で生成した自由視点画像 (右)

4.4 白線検出結果

前節で示したデータセット A の自由視点画像と実走行映像について、白線検出アルゴリズム [36] を用いて白線検出結果の比較を行う。また、Okō らの手法 [6] で生成された自由視点画像と白線検出結果の比較を行い、提案手法で生成した画像が安全運転支援システムの評価に有効であるか検証を行う。白線検出に用いる実走行映像と自由視点画像は、それぞれ 40 フレームの画像による 4 秒間の映像で、1 フレーム間のカメラの視点位置は約 1.0m 離れている。これは、実験車両が 36km/h で走行中に 10fps で白線検出を行ったことに相当する。図 30 に実験に使用した実走行映像、Okō らの手法 [6] で生成された自由視点画像および提案手法で生成した自由視点画像の例を示す。提案手法で生成した自由視点画像と、実走行映像に対して白線検出を行った結果得られた視点位置から左右の白線までのオフセット位置の比較を図 31 に示す。白線検出結果より、左右の白線までのオフセット位置の実画像との絶対誤差の平均はそれぞれ 70mm, 32mm となった。Okō らの手法 [6] においては、左右の白線までのオフセット位置の絶対誤差の平均はそれぞれ 37mm, 24mm であった。提案手法による自由視点画像生成手法は、安全運転支援システムの評価において精度が劣る結果となったが、道路上の白線の幅が 150mm であることを考えれば、ドライブシミュレータとして利用できる範囲内である考えられる。また自由視点画像の生成速度について、Okō らの手法 [6] では 1 フレームあたりの画像生成に 60 分程度の時間を要するのに対し、本手法

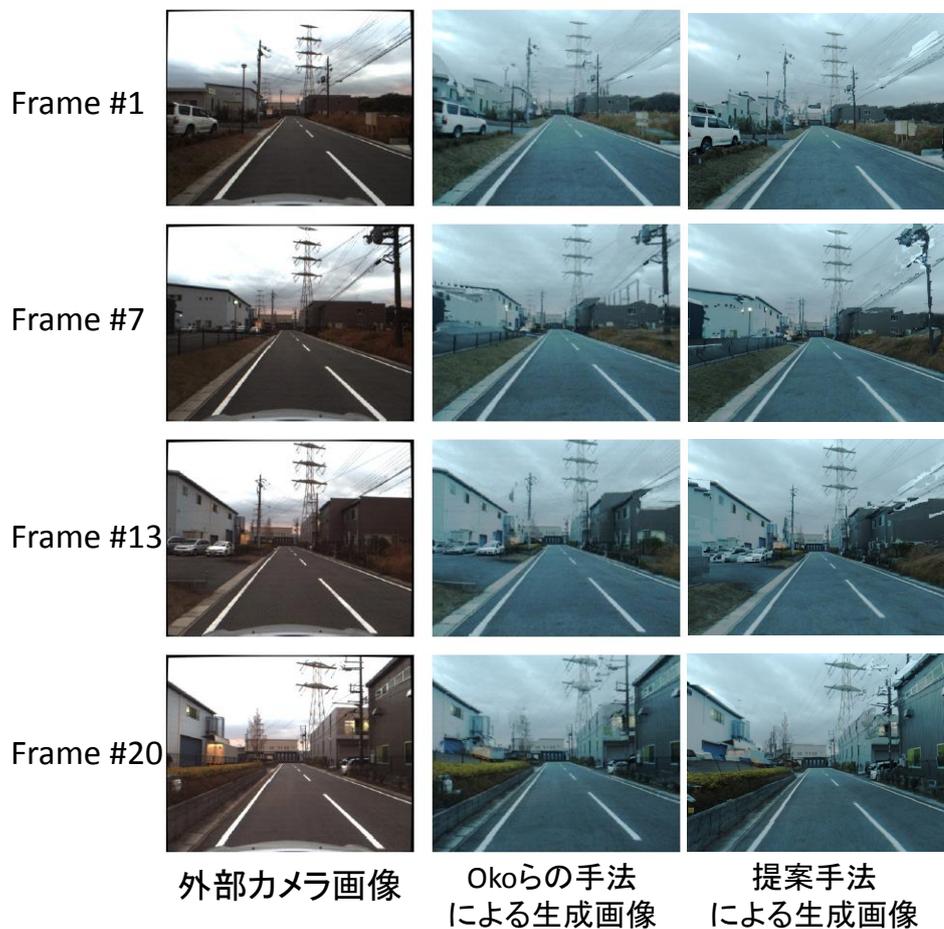


図 30 Oko らの手法 [6] との生成結果比較

では1フレームあたり約0.1秒と、数万倍の速度向上を実現している。

4.5 考察

提案手法によって生成した自由視点画像は，実画像と比較して白線位置の検出誤差が70mm程度と，ドライブシミュレータへ応用可能な一定の品質を有していると考えられる．また，従来の自由視点画像生成手法では1フレームあたり約60分の時間を要していたのに対し，提案手法では約36000倍の高速化によってリアルタイムでの自由視点画像生成を実現した．一方で，現状のシステムにおいては従来手法 [6] に対して精度の低下が見られる．特に入力情報の取得の際に三次元点群を取得できない領域について，白線位置が100mm以上ずれたり，建物壁面が不連続になったりするなど，品質向上の余地がある．検出位置の差が大きくなったシーンを図32に示す．同図より，左白線の位置について計測が正常に行われず，三次元点群が少ないことを確認できる．この領域については，路面への平面当てはめが行えず，ジオメトリが正しく再現されていないことがわかる．また，道路環境の測定を行う際に，実験車両以外の自動車が写り込むと，生成される画像に歪みが生じることが確認された(図33)．同図においては，動物体の三次元点群がデータ内に存在していたこと，および全方位画像上に動物体が写り込んでしまったことが原因であると考えられる．入力となる三次元点群および全方位画像中に存在する動物体への対応を考える必要がある．

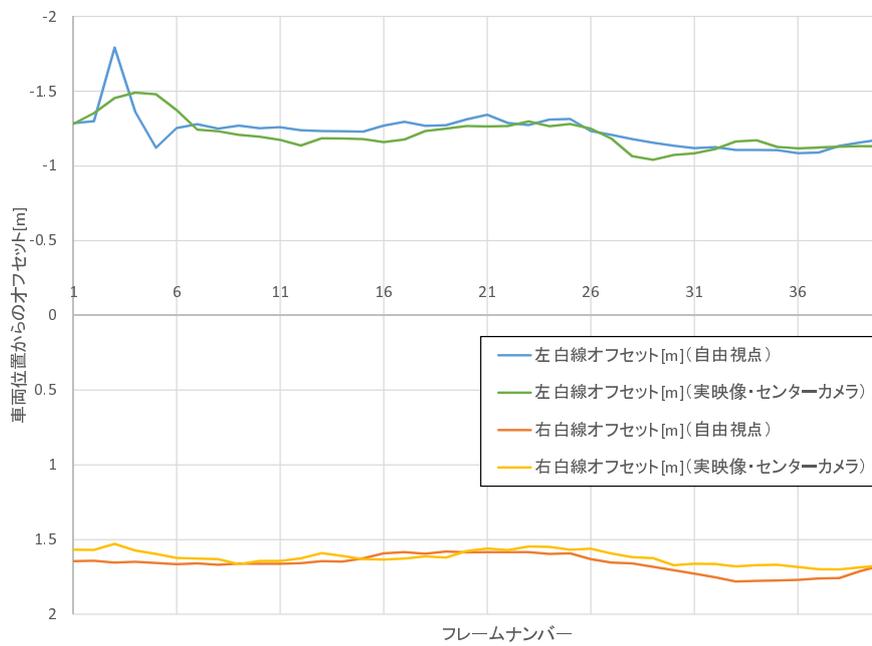


図 31 実画像と自由視点画像を用いた白線検出結果

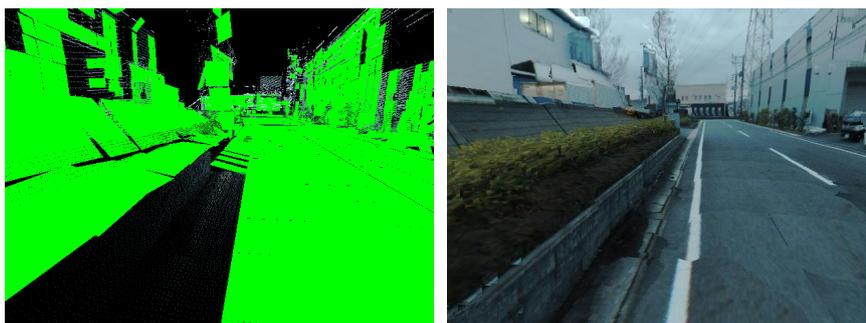


図 32 三次元点群を計測できない領域の平面当てはめ結果(左)とVDTM結果(右)



図 33 動物体の映り込みによる画像の歪み

5. まとめ

本研究では、実環境映像に基づくドライブシミュレータシステムの実現を目的として、自由視点画像を高速に生成するための手法を提案した。提案手法は、従来手法で問題となっていた生成時間の問題を、局所平面当てはめ、および粗密法による奥行画像生成によって改善し、15FPS程度での自由視点画像生成を実現した。実験においては、建物の壁面等にジオメトリを再現出来ていない部分が存在することを確認したものの、ドライブシミュレータへ応用可能な品質の画像を生成できることを確認した。実走行映像と提案手法により生成した映像を白線検出アルゴリズムへ入力した結果から、それぞれの映像の白線検出位置の差は小さく、実走行映像と同様に自由視点画像をアルゴリズムが認識可能であることを示した。今後はGPU等を用いた手法の更なる高速化を行うとともに、形状を再現できないシーンについて局所平面当てはめの最適化を行うことや、オフライン処理の段階で入力データ中の動物体の消去を行うことが必要であると考えられる。また、ドライブシミュレータシステムとして不足している機能についての拡充が必要である。試作したシステムでは自動車の加減速やステアリング操作において、自動車の特性を考慮した挙動を再現していない。また、仮想環境中には他の自動車や歩行者が存在しないため、これらの動物体を再現する必要がある。

謝辞

本研究を進めるに当たり，終始暖かくご指導，ご鞭撻頂いた視覚情報メディア研究室 横矢直和 教授に心より感謝申し上げます。また，本学での研究におけるあらゆる面で，多大なご助言，ご協力を賜りましたことを深く感謝致します。副指導教員として有益な御助言を頂きましたロボティクス研究室 小笠原司 教授ならびに，本研究を進めるに当たり終始細やかなご指導，ご助言頂いた視覚情報メディア研究室 佐藤智和 准教授に厚く御礼申し上げます。

本研究へのご助言，ご協力を頂いた視覚情報メディア研究室 河合紀彦 助教，中島悠太 助教に深く感謝致します。研究について多大な御助言，ご指導，ご協力を賜った株式会社豊田中央研究所 町田貴史 氏に心より深く感謝致します。また，研究室での生活を支えて頂いた視覚情報メディア研究室 石谷由美 女史に心より感謝いたします。本研究の遂行にご助言をくださり，実験等にご協力して頂きました，小甲啓隆 氏に心より感謝申し上げます。実験，撮影に協力していただいた笹尾海斗 氏をはじめ，研究室の皆様感謝の意を表します。

最後に，暖かく見守って下さいました両親に心より感謝の意を表します。

参考文献

- [1] FORUM8: “UC-win/Road,”, <http://www.forum8.co.jp/product/products.htm>.
- [2] TASS international: “prescan,”, <http://www.tass-safe.jp/prescan/index.html>.
- [3] 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, p. 80, 2011.
- [4] 富士通株式会社: “フルハイビジョン実写映像可変速再生技術を活用した世界初の鉄道運転シミュレータシステム”,, <http://pr.fujitsu.com/jp/news/2008/05/8.html>.
- [5] S. Ono, R. Sato, H. Kawasaki and I. K: “Image-Based Rendering of Urban Road Scene for Real-time Driving Simulation,” Proc. ASIAGRAPH, p. 1, 2008.
- [6] 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 Computer Society Conf. Intelligent Vehicles Symposium, pp. 706–711, 2014.
- [7] A. Kemeny and F. Panerai: “Evaluating perception in driving simulation experiments,” Trends in Cognitive Sciences, Vol.7, No.1, pp. 31 – 37, 2003.
- [8] H. Jamson: “Driving simulator validity issues of field of view and resolution,” Proc. Driving Simulation Conference, pp. 57–64, 2000.
- [9] 株式会社日立アドバンスデジタル: “画像認識アルゴリズム評価用映像作成システム”,, <http://www.hitachi-ics.co.jp/product/tec2013/tech03.html>.
- [10] 三菱重工業株式会社: “コンピュータグラフィックスによる模擬環境外乱を用いた画像処理アルゴリズムのロバスト性検証”,, <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/453/453036.pdf>.

- [11] M. Zofka, R. Kohlhaas, T. Schamm and J. Zollner: “Semivirtual simulations for the evaluation of vision-based adas,” Proc. IEEE Computer Society Conf. Intelligent Vehicles Symposium, pp. 121–126, 2014.
- [12] J. J. Koenderink, A. J. Van Doorn, et al.: “Affine structure from motion,” The Journal of the Optical Society of America A, Vol.8, No.2, pp. 377–385, 1991.
- [13] S. Agarwal, Y. Furukawa, N. Snavely, I. Simon, B. Curless, S. M. Seitz and R. Szeliski: “Building rome in a day,” Communications of the ACM, Vol.54, No.10, pp. 105–112, 2011.
- [14] C. Hernandez, G. Vogiatzis and R. Cipolla: “Probabilistic visibility for multi-view stereo,” Proc. IEEE Computer Society Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, 2007, pp. 1–8, 2007.
- [15] G. Vogiatzis, C. Hernandez, P. Torr and R. Cipolla: “Multiview stereo via volumetric graph-cuts and occlusion robust photo-consistency,” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.29, No.12, pp. 2241–2246, 2007.
- [16] Y. Furukawa and J. Ponce: “Accurate, dense, and robust multiview stereopsis,” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.32, No.8, pp. 1362–1376, 2010.
- [17] M. Goesele, B. Curless and S. Seitz: “Multi-view stereo revisited,” Proc. IEEE Computer Society Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, Vol.2, pp. 2402–2409, 2006.
- [18] Microsoft: “Kinect,” <http://www.xbox.com/ja-JP/kinect>.
- [19] Velodyne: “HDL-64E,” <http://www.velodynelidar.com/>.
- [20] Topcon: “IP-S2,” <http://http://www.topcon.co.jp/>.

- [21] 浅井俊弘, 神原誠之, 横矢直和: “全方位距離画像と全方位カラー画像の統合による屋外環境の三次元モデル化”, 画像電子学会誌, Vol.34, pp. 529–538, 2005.
- [22] R. Schnabel, P. Degener and R. Klein: “Completion and reconstruction with primitive shapes,” Computer Graphics Forum, Vol.28, No.2, pp. 503–512, 2009.
- [23] S. M. Seitz and C. R. Dyer: “View morphing,” Proc. ACM 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques(SIGGRAPH’96), pp. 21–30, 1996.
- [24] C. Lipski, C. Linz, K. Berger, A. Sellent and M. Magnor: “Virtual video camera: Image-based viewpoint navigation through space and time,” Computer Graphics Forum, Vol.29, No.8, pp. 2555–2568, 2010.
- [25] M. Levoy and P. Hanrahan: “Light field rendering,” Proc. ACM 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques(SIGGRAPH’96), pp. 31–42, 1996.
- [26] C. Buehler, M. Bosse, L. McMillan, S. Gortler and M. Cohen: “Unstructured lumigraph rendering,” Proc. ACM 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques(SIGGRAPH’01), pp. 425–432, 2001.
- [27] A. Davis, M. Levoy and F. Durand: “Unstructured light fields,” Computer Graphics Forum, Vol.31, pp. 305–314, 2012.
- [28] S. J. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski and M. F. Cohen: “The lumigraph,” Proc. ACM 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques(SIGGRAPH’96), pp. 43–54, 1996.
- [29] 伊吹拓也, 佐藤智和, 松下康之, 横矢直和: “視点位置に依存して変形する三次元メッシュモデルを利用した自由視点画像生成における違和感の低減”, 電

子情報通信学会 技術研究報告 パターン認識・メディア理解研究会 (PRMU),
Vol.109, pp. 437–442, 2010.

- [30] P. Debevec, Y. Yu and G. Borshukov: “Efficient view-dependent image-based rendering with projective texture-mapping,” *Rendering Techniques* ’98, 1998.
- [31] 高井勇志, 松山隆司: “Harmonized texture mapping,” *映像情報メディア学会誌*, Vol.43, No.4, pp. 488–499, 2009.
- [32] M. Irani, T. Hassner and P. Anandan: “What does the scene look like from a scene point?,” *Computer Vision-ECCV 2002*, pp. 883–897, 2002.
- [33] F. Okura, Y. Ueda, T. Sato and N. Yokoya: “Teleoperation of mobile robots by generating augmented free-viewpoint images,” *Proc. IEEE/RSJ International Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 665–671, 2013.
- [34] T. Sato, H. Koshizawa and N. Yokoya: “Omnidirectional free-viewpoint rendering using a deformable 3-d mesh model,” *International Journal of Virtual Reality (IJVR)*, Vol.9, No.1, pp. 37–44, 2010.
- [35] R. Yang, D. Guinnip and L. Wang: “View-dependent textured splatting,” *The Visual Computer*, Vol.22, No.7, pp. 456–467, 2006.
- [36] A. Watanabe and M. Nishida: “Lane detection for a steering assistance system,” *Proc. IEEE Computer Society Conf. Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 159–164, 2005.