

博士論文

屋外環境の三次元モデル化のための点群データからの
移動物体検出とデータ補間に関する研究

金谷 典武

2017 年 3 月 24 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
博士(工学)授与の要件として提出した博士論文である。

金谷 典武

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)

屋外環境の三次元モデル化のための点群データからの 移動物体検出とデータ補間に関する研究*

金谷 典武

内容梗概

屋外環境の三次元モデルは、景観シミュレーション、ナビゲーション、ウォークスルーや複合現実感などの様々な分野で利用されている。しかし、これらの分野において利用される三次元モデルは、モデリングソフトなどを利用して人手により作成されることが多く、広域な屋外環境のモデルを作成するには膨大な労力が必要になる。そのため、近年、複数の静止画像や動画から三次元形状を復元する研究や、レーザレンジファインダによる測定等によって、屋外環境の三次元モデルを自動生成する研究が盛んに行われている。

現実環境の測定に基づく三次元モデルの生成において、対象となる環境は、レーザレンジファインダ、カメラ、GPS、ジャイロスコープなど、いくつかのタイプのセンサを使用して測定される。これらの測定データを利用して三次元モデルは構築されるが、測定時に移動物体が存在した場合、測定データ中に移動物体上を測定した点が混在するとともに、移動物体によって隠蔽された静止物体上のデータが欠落するという問題がある。一般に、このような移動物体の存在と、移動物体によって引き起こされる未測定領域の問題を回避することは困難である。本研究では、この問題を解決するために、まず、フォトコンシステンシーと道路

* 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 博士論文，
NAIST-IS-DD1161020, 2017年3月24日

環境の事前の知識に基づいて、点群データから移動物体を測定した三次元点を検出する手法を提案する。この手法では、点群データの各点を全方位画像上に投影し、投影点の輝度変化に基づいて、移動物体上の三次元点を検出した後、道路環境の事前知識によって決定された特定の大きさの領域内部の点を移動物体上の三次元点として決定する。次に、移動物体上の三次元点を除去した後の処理として、隠蔽によって欠落した点群データを補間する手法を提案する。具体的には、距離画像を事例として利用するデータ修復によって欠落した点群データの補間を行うとともに、補間した点を全方位画像上に投影し、投影点の色情報を利用して補間した点の色情報を決定する。本論文では、実際の道路環境を利用した実験により一連の提案手法の有効性を検証する。

本論文の構成は、以下のとおりである。まず、第1章では屋外環境を対象とした三次元モデルを生成するための技術的な課題と従来技術を概観し、本研究の位置付けと方針を明確にする。第2章では、本研究で利用するモバイルマッピングシステムについて述べる。また、モバイルマッピングシステムに搭載された複合センサから得られる各種情報と、点群データと画像データの統合について述べる。第3章では、移動物体検出手法として、フォトコンシステンシーと事前知識を利用した手法を提案する。第4章では、移動物体の隠蔽によって生じた欠損領域の補間手法として、距離画像を利用する手法を提案するとともに、補間時に発生する色情報の問題とその解決方法を示す。最後に、第5章では、本研究について総括し、今後の展望と課題について述べる。

キーワード

画像処理, 道路環境, 三次元点群, 移動物体除去, データ補間

Moving Object Detection and Data Completion from Point Cloud Data for 3D Modeling of Outdoor Environments*

Tsunetake Kanatani

Abstract

Three-dimensional (3D) models of real road environments can be used in several applications such as landscape simulations, navigation systems, walk-through, and navigation using virtual and mixed reality techniques. To generate 3D models of road environments, the target scene is first measured using several types of sensors such as laser rangefinders, cameras, GPS, and gyroscopes.

In the construction of 3D models from measured data, 3D points measured on moving objects become artifacts on resultant 3D models. To solve this problem, this thesis proposes a method for detecting and removing 3D points on moving objects from point cloud data based on photometric consistency and prior knowledge of the road environments. In the proposed method, 3D points on moving objects are first detected based on luminance variations computed by projecting 3D points onto omnidirectional images. After detecting points on moving objects, points inside a certain size of region determined by prior knowledge of the road environments are removed. For

* Doctoral Dissertation, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DD1161020, March 24, 2017.

missing regions which appear after removing 3D points, this thesis then proposes 3D points completion using an exemplar-based data completion technique. In addition, this thesis proposes a method to interpolate color information. This thesis shows the effectiveness of the proposed method through experiments for real road environments.

The details of this thesis is organized as follows. First, Chapter 1 gives an overview and technical problems of research on 3D modeling of outdoor environments. Chapter 2 introduces an overview of a mobile mapping system which is used in this study. In addition, it shows the details of measurement data obtained from various sensors mounted on a mobile mapping system. Chapter 3 describes the details of the proposed method for detecting points on a moving object. Chapter 4 describes the interpolation of missing area caused by occlusions with a moving object. Finally, Chapter 5 summarizes the present study.

Keywords:

image processing, road environment, 3D point cloud, moving object removal, data completion

目次

1. 序論	1
1.1 現実環境の三次元モデル生成における技術的課題	1
1.2 屋外環境を対象とした三次元モデルの生成	2
1.2.1 レンジファインダを用いる手法	2
1.2.2 視覚センサを用いる手法	3
1.2.3 複合センサを用いる手法	4
1.3 移動物体検出に関連する研究	6
1.4 欠損領域の補間に関連する研究	7
1.5 本研究の位置付けと方針	9
1.6 本論文の構成	9
2. 複合センサによる屋外環境の測定	10
2.1 モバイルマッピングシステムの概要	10
2.2 レーザレンジファインダ	13
2.3 視覚センサ	18
2.4 GPS	23
2.5 ジャイロセンサとホイールエンコーダ	24
2.6 点群データと全方位画像の合成	26
2.7 測定に関する注意事項	30
3. フォトコンシステンシーと事前知識を用いた点群 データからの移動物体上の点の検出	31
3.1 序言	31
3.2 移動物体を対象とした三次元点の除去	31
3.2.1 フォトコンシステンシーを応用した移動物体上の候補 点の検出	32
3.2.2 事前知識を利用した移動物体の領域決定	33
3.3 実験結果	35
3.3.1 画像間の輝度の変化	35
3.3.2 フォトコンシステンシーにおけるスライディングウイ ンドウの効果	37

3.3.3	三次元点除去における事前知識利用の効果	39
3.3.4	移動物体上の点の検出結果	41
3.4	移動物体検出に関する検討	49
3.4.1	移動物体検出	49
3.4.2	自動二輪車の検出	53
3.5	結言	55
4.	欠損領域に対する点群データの補間	56
4.1	序言	56
4.2	欠落した点群データの修復	56
4.2.1	距離画像の生成	56
4.2.2	点群データの距離情報の補間	58
4.2.3	点群データの色情報の補間	59
4.2.4	三次元モデルの生成	60
4.3	実験結果	60
4.3.1	移動物体上の点の検出	60
4.3.2	距離画像の生成と点群データの補間	63
4.3.3	補間結果を利用した三次元モデルの生成	65
4.3.4	移動物体の検出と欠損領域の補間結果	66
4.4	結言	82
5.	結論	83
5.1	まとめ	83
5.2	今後の展望と課題	83
	謝辞	86
	参考文献	87

図目次

1	レンジファインダを利用して測定した三次元形状[29]	2
2	Sato らの手法により生成された三次元モデル[38]	3
3	Asai らの手法により生成された三次元モデル[15]	5
4	瀧口らが開発した計測システム[24]	5
5	モバイルマッピングシステム (車載型三次元計測システム)の外観	10
6	屋外環境の測定例	12
7	図6の点A付近で撮影された全方位画像	12
8	図6の点B付近で撮影された全方位画像	13
9	SICK 社製 LMS291	13
10	レンジファインダの測定範囲[98]	13
11	点群データの測定例 1	15
12	点群データの測定例 2	15
13	点群データの測定例 3	16
14	点群データの測定例 4	16
15	点群データの測定例 5	17
16	点群データの測定例 6	17
17	視覚センサ	18
18	視覚センサ(6台のカメラ)から得られる個々の画像	19
19	全方位画像(画像番号 820)	20
20	全方位画像(画像番号 821)	20
21	全方位画像(画像番号 822)	20
22	全方位画像(画像番号 823)	21
23	全方位画像(画像番号 824)	21
24	全方位画像(画像番号 825)	21
25	全方位画像(画像番号 826)	22
26	全方位画像(画像番号 827)	22
27	GPSを利用した位置の測定例	23
28	システムの姿勢の基準となる回転軸[98]	24

29	システムの姿勢の測定例	25
30	1ライン分の点群データと全方位画像の合成 (画像番号 822)	27
31	1ライン分の点群データと全方位画像の合成 (画像番号 823)	27
32	1ライン分の点群データと全方位画像の合成 (画像番号 824)	27
33	25000点の点群データと全方位画像の合成 (画像番号 822)	28
34	25000点の点群データと全方位画像の合成 (画像番号 823)	28
35	25000点の点群データと全方位画像の合成 (画像番号 824)	28
36	複合センサと道路面の位置関係	30
37	測定点と画像上の投影点の関係	32
38	モバイルマッピングシステムと移動物体の関係	34
39	画像間の輝度の変化 (赤色自動車)	36
40	画像間の輝度の変化 (白色自動車)	37
41	点群データと全方位画像から作成した合成画像	38
42	分散の結果 (左) とスライディング ウインドウ (右) を利用した結果 1	38
43	分散の結果 (左) とスライディング ウインドウ (右) を利用した結果 2	39
44	モバイルマッピングシステムと移動物体上の 候補点との間の水平距離	40
45	提案手法による移動物体上の点の検出結果	40
46	移動物体の検出結果 (赤色自動車)	42
47	移動物体の検出結果 (銀色自動車)	43
48	移動物体の検出結果 (黒色トラック)	44
49	移動物体の検出結果 (黄色バス)	45
50	移動物体検出の失敗例 (自動二輪車)	47

51	移動物体検出の失敗例（銀色自動車）	48
52	移動物体の検出結果（誤検出）	50
53	ヒストグラムの測定結果（誤検出）	50
54	移動物体の検出結果（銀色自動車）	51
55	ヒストグラムの測定結果（銀色自動車）	51
56	移動物体の検出結果（自動二輪車）	52
57	ヒストグラムの測定結果（自動二輪車）	52
58	自動二輪車専用の検出手法による移動物体の検出結果	54
59	ヒストグラムの測定結果（自動二輪車専用の検出手法）	54
60	三次元点とモバイルマッピングシステムとの関係	57
61	距離画像と各領域	57
62	距離画像上のデータ領域と欠損領域	59
63	全方位画像の例	61
64	屋外環境の測定結果	61
65	移動物体の検出結果	62
66	距離画像の生成と補間結果	63
67	カラー画像の処理範囲と色情報の補間結果	64
68	補間された点群データ	65
69	移動物体を除去した三次元モデルの生成（白色自動車）	66
70	移動物体を除去した三次元モデルの生成（桃色自動車）	67
71	移動物体を除去した三次元モデルの生成（灰色自動車）	68
72	移動物体を除去した三次元モデルの生成（銀色自動車）	69
73	移動物体を除去した三次元モデルの生成（路線バス）	70
74	移動物体の検出結果と欠損領域の補間結果（白色自動車）	71
75	移動物体の検出結果と欠損領域の補間結果（桃色自動車）	72
76	移動物体の検出結果と欠損領域の補間結果（灰色自動車）	73
77	移動物体の検出結果と欠損領域の補間結果（銀色自動車）	74
78	移動物体の検出結果と欠損領域の補間結果（路線バス）	75
79	提案手法による補間と線形補間の結果（白色自動車）	77
80	提案手法による補間と線形補間の結果（桃色自動車）	78
81	提案手法による補間と線形補間の結果（灰色自動車）	79

82	提案手法による補間と線形補間の結果（銀色自動車）	80
83	提案手法による補間と線形補間の結果（路線バス）	81

表目次

1	各種センサの仕様	11
2	検出率の比較	41

1. 序論

1.1 現実環境の三次元モデル生成における技術的課題

屋外環境の三次元モデルは、景観シミュレーション、ナビゲーション、ウォークスルーや複合現実感などの様々な分野で利用されている。しかし、これらの分野において利用される三次元モデルは、多くの場合、モデリングソフトなどを利用して人手により作成されており、広域な屋外環境のモデルを作成するには膨大な労力が必要になる。そのため、複数の静止画像や動画から三次元形状を復元する研究[1]-[8]や、レーザレンジファインダ（以下、レンジファインダと略す。）等による測定結果を利用し、屋外環境の三次元モデルを生成する研究[9]-[20]が盛んに行われている。

近年、車両走行環境の三次元モデル生成[21]に関する発展がめざましく、二次元デジタル地図と地上撮影画像を利用して環境の三次元モデルを作成するシステム[22]やレンジファインダと視覚センサを組み合わせて走行環境の三次元形状を自動で測定するシステム[23]-[25]などが開発されており、実用化が進んでいる。中でも、三次元モデルを自動生成するシステム[23]-[25]は、モデル生成のための人的コストが低く、このようなシステムが普及していくことが期待される。

これらの現実環境の測定に基づく三次元モデルの生成では、測定時に移動物体が存在した場合、測定データ中に移動物体上を測定した点が混在するとともに、移動物体によって隠蔽された静止物体のデータが欠落することになり、三次元モデル生成の際に妨げになる。一般に、このような移動物体の存在と、移動物体によって引き起こされる未測定領域の問題を回避することは困難である。測定データ取得後に人手によってこの影響を除去することは可能であるが、自動生成システムの技術を発展させるためには、この対策を実施する必要がある。本研究では、このような三次元モデルを生成する上で問題となる「屋外環境下に移動物体が含まれた場合」に焦点を当てて研究開発に取り組む。

本章では、まず、現実環境の測定に基づく屋外環境の三次元モデル化技術について概観する。広域な屋外環境の三次元モデル化のためには、複合センサの利用が有効であることを述べるとともに、技術的な課題を取り上げ、本研究の位置づけと方針を明らかにする。

1.2 屋外環境を対象とした三次元モデルの生成

屋外環境の三次元モデルを生成する手法として、レンジファインダを用いる手法、視覚センサを用いる手法、複合センサを用いる手法がある。それぞれの手法について、その概要を述べる。

1.2.1 レンジファインダを用いる手法

物体までの距離を正確に測定できるレンジファインダを利用して屋外環境の三次元モデルを生成する研究[26]-[33]が行われている。Zhaoら[26]は、水平方向と垂直方向に走査する2台のレンジファインダを移動車両に設置し、車両を走行させながら測定を行い、車両走行環境の点群データの取得を行っている。取得した点群データから三次元モデルを構成し、車両走行環境の三次元形状を復元している。Onoら[29]は、2軸の回転機構を有するレンジファインダを利用して、トンネル内の距離情報を取得し、そのデータから三次元モデル（図1）の生成を行っている。使用したレンジファインダは水平 360° 、垂直 310° の範囲の距離情報の取得が可能であり、約20m間隔で240回の測定を行った後、取得したデータを統合して三次元モデルの生成を行っている。これらの研究以外にも、移動車両に搭載したレンジファインダを利用して屋外環境の測定を行っている研究[30]-[33]が存在するが、これらの研究は運転支援システムや車両の自動運転のための障害物検知や屋外環境理解を目的としている。



(a) 測定車両



(b) 三次元モデル

図1 レンジファインダを利用して測定した三次元形状[29]

レンジファインダを利用すると高精度な距離測定を実現できるが、測定対象物の濃淡情報や色情報の取得ができないため、形状データのみでの復元になる。形状情報を人間が理解するためには濃淡情報や色情報も重要な要素であるため、この情報を付加した三次元モデルの生成が求められている。

1.2.2 視覚センサを用いる手法

静止画像や動画像から三次元形状を推定する技術は、コンピュータビジョンの分野において研究されており [1]-[8], [34]-[38], ステレオ法や因子分解法などを利用してモデルを復元する手法が多く存在する。例えば, Agarwal ら [1] は同一の建築物を複数の場所から撮影した写真を基に建築物の形状復元を行っており, Sato ら [38] は手持ちのビデオカメラから得られる動画像データを利用して三次元モデル (図 2) の生成を行っている。

これらの手法では、視覚センサ以外の特別な機器を必要としない利点がある反面、復元されたモデルの精度や信頼性には課題が残されている。そのため、広範囲の屋外環境を安定して三次元モデル化することは現時点では困難である。



図 2 Sato らの手法により生成された三次元モデル [38]

1.2.3 複合センサを用いる手法

レンジファインダは高精度な距離測定は可能であるが、測定対象物の濃淡情報や色情報の取得ができない。これを改善するため、レンジファインダと視覚センサを組み合わせることで、精度の高い距離測定と視覚センサから得られる濃淡情報や色情報により三次元モデルを生成する研究[9]-[20]が行われている。近年では、色情報が主に利用されており、レンジファインダ、視覚センサに加えて、GPSやジャイロセンサなどのセンサを組み合わせることにより、高精度な三次元モデルの生成を実現している。

Zhao ら[11]は、レンジセンサ、ラインカメラ、GPS を組み合わせることで、映像情報を含んだ車両走行環境の三次元モデルの生成を行った。Asai ら[14]は、水平方向 360°、垂直方向 90° の測定範囲を持つレンジファインダから得られる距離情報と 6 台のカメラで構成されたマルチカメラシステムから得られる全方位画像を統合し、建物の三次元モデルの生成を行った。また、この複合センサを利用して複数の地点で測定を行い、それらの情報を統合することによって、広範囲な屋外環境の三次元モデル(図 3)の生成[15][16]を行っている。Ishikawa ら[20]は、レンジファインダによって取得した複数の部分形状の点群データを繋ぎ合わせて、カンボジアのアンコールワット遺跡の三次元データの生成を行っている。三次元の点群データと衛星画像を利用することによって幾何学的に正確な都市の三次元モデルを生成する研究[39]も存在する。

近年、利用が進んでいる車両走行環境の三次元形状を自動測定するシステム[23]-[25]は、レンジファインダ、視覚センサ、GPS等を組み合わせることでシステムを構築している。そのシステム例を図 4 に示す。また、その他のシステムとして、ドローンに複合センサを搭載し屋外環境の測定を試みる研究[40][41]や、気球に複合センサを搭載したシステムの開発[42]も進められている。

レンジファインダを利用した三次元モデルの生成では、高精度な距離測定に基づく形状データの復元が期待できるが、測定対象物の濃淡情報や色情報を取得するという要望が実現できない。視覚センサを利用した三次元モデルの生成では、視覚センサ以外の特別な機器を必要としない利点がある反面、広範囲の屋外環境を安定して三次元モデル化すること困難である。これらの問題を解決する方法として、複合センサの利用が有力であり、このようなシステムの開発と普及により、色情報を含む高精度な三次元モデルの生成が進んでいくと考えられる。

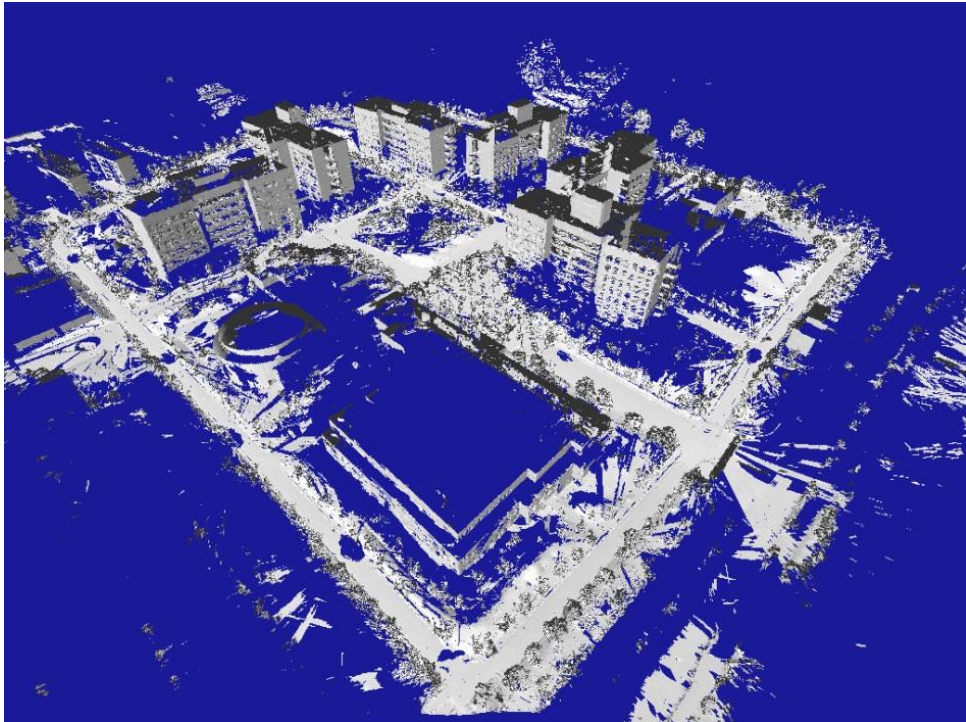


図3 Asai らの手法により生成された三次元モデル[15]

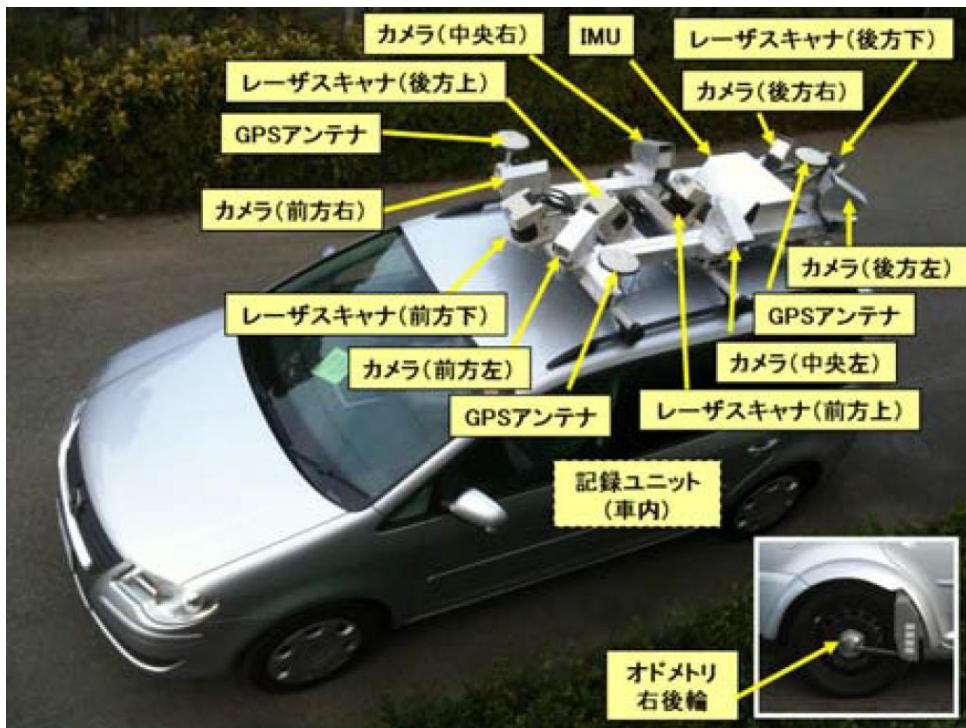


図4 瀧口らが開発した計測システム[24]

1.3 移動物体検出に関連する研究

屋外環境の測定に関する研究[9]-[20], [43]-[46]では, 多くの場合, 測定環境に移動物体が存在しない状況で研究が実施されている. 測定環境に移動物体が存在することにより, 不要な測定データが存在するという問題と, 移動物体によって隠蔽された静止物体のデータが欠落するという問題が発生する.

最近の研究では, 一部の研究ではあるが, 測定された三次元データ内に存在する移動物体の問題に取り組んでいる場合も存在する. これらの研究は, 複数のデータ配列を使用するものと, 単一のデータ配列を使用するものに分類することができる.

前者の例として, 内山らの研究[47]-[49]がある. この研究では, 複数の映像を使用して都市環境の画像内の移動物体を除去する方法を提案している. この方法は, まず, 同一経路を異なる時間に撮影することにより複数の映像を収集し, 移動物体が存在しない部分画像を選択し張り合わせるにより, 移動物体の映っていない映像を得ている. 部分画像の選択には, 移動物体が映っている頻度は少ないという仮定を利用し, ベクトルメディアンフィルタ[50]を利用している.

Kotsuka ら[51]は, この移動物体除去方法の性能を向上させるため, 適応参照画像の概念を提案し, 複数の画像シーケンスから移動物体の映像の除去を行っている. この他にも, 複数のデータ配列を利用して点群データから移動物体を検出する方法[52]-[60]は存在するが, これらの方法では, レンジファインダを使用して同じ場所を複数回測定する必要がある. 複数回の測定によって距離情報の変化を識別し, 移動物体の検出を行っている. これらの方法の問題は, 異なる時間に同一経路を測定するという時間と労力が必要になる点である.

一方で, 複数のデータ配列を使用しない手法も存在する. Matsushita ら[61]は, 欠落領域が自動で補間されたビデオを生成するためにオプティカルフローを利用する方法を提案している. Yamashita ら[62][63]は, 時空間画像処理を用いた画像シーケンスを利用してガラス面に付着する水滴を除去する方法を提案している. 栗林ら[64]は, 建物とカメラの間にあるモデリングの際の障害物を車載カメラから得られる映像に対して時空間画像解析を行うことで除去する手法を提案している. この手法では, 環境中の建物のモデリングを目的とし, 街路樹や電線・電柱などの静止物体を除去対象としているため, 本研究で対象とする移動物体上の点を除去することは難しい.

このような研究状況であるが，三次元点群データのための単一のデータ配列を使用して移動物体を除去する研究は存在しない．レンジファインダの測定周期や視覚センサの撮影間隔など，さまざまな問題もあるため，従来の画像ベースの方法を適用することも不可能である．そこで，本研究を実施することにより，移動物体検出の技術開発を行う．

1.4 欠損領域の補間に関連する研究

本研究では，移動物体を検出，除去後に欠損領域の補間を行う．三次元モデルの欠損を修復する研究は，三次元点群をそのまま扱う手法[65]-[76]と点群を投影し距離画像に変換して距離画像上で修復する手法[77]-[79]に大別できる．

三次元点群をそのまま扱う手法では，欠損領域の周囲の点群に直接，二次曲面関数を当てはめることで補間を行う手法[66]や欠損領域に対して大まかなポリゴンからなる初期形状を与え，八分木により分割の分割数を増やしながらポリゴンを細かくすることにより，滑らかな形状を欠損領域内に生成する手法[67]，複数のプリミティブ形状（平面，円筒，円錐，球，円環）を当てはめることにより形状復元を行う手法[71]などが提案されている．

点群を投影し距離画像に変換する手法では，主に静止画像を対象とした画像修復手法を応用することで三次元モデルの修復を行っている．以下では，まず静止画像を対象とした画像修復手法について概観し，次にこれらを応用し距離画像を修復する手法[77]-[79]について述べる．

静止画像を対象とした画像修復に関する研究は，輝度値の連続性を利用する方法[80]-[84]と事例に基づく手法[85]-[96]に大別される．

輝度値の連続性を利用する方法は，欠損領域周辺から欠損領域内の輝度値が連続している場合に違和感のない画像になると考え，欠損領域の周辺画素から欠損領域内の画素へ輝度値を滑らかに補間することで修復を行う．このような方法には，偏微分方程式を利用することにより欠損領域の補間を行う手法[80][81]や，重み付けをした近傍画素の加重平均を反復処理することにより補間する方法[82][83]，オプティカルフローを利用する方法[84]などがある．このような手法は引っかき傷やテロップのような小さな欠損領域には良好な修復画像が得られる．

事例に基づく手法は，欠損領域とデータ領域のパターン類似度に基づいてデータ領域のテクスチャを欠損領域に合成することによって修復を行う．違和感の少

ない画像を生成するために、決定済みの画素数、エッジの強さを利用する方法[85]やこの手法をベースにテクスチャ合成を行い、ブレンディングを行うことによりテクスチャの不連続性を軽減する方法[86]や、欠損領域と欠損領域以外のパターン類似度を利用して尤もらしさを表すエネルギー関数を定義し、これを欠損領域全体に対して最適になるよう各画素値を決定する方法[87]などがある。エネルギー関数を利用する方法[87]は、画像内の類似パターンの明度変化に対応可能な手法[88][89]や対称性を考慮した手法[90]、テクスチャの回転および拡大縮小を考慮した手法[91]などへ拡張され、違和感のない画像修復が可能になっている。画像修復において透視投影歪みを考慮する画像に対しては、消失点を利用した射影変換行列の推定に基づく画像修復手法[92]やテクセルの大きさを均一化する手法[93]、行列のランクを利用する手法[94]などが提案されており、規則的なテクスチャパターンを対象とした修復に利用されている。Sasaoら[95]は、シミュレーションと実際の画像を利用して複数の自動遠近補正方法に基づく画像修復実験を行い、画像修復手法の比較検討を行っている。Kawaiら[96]は、画像内に存在するテクスチャの透視歪みを検出し補正を行い、類似テクスチャパターンの探索による画像修復を行うことにより画像修復の質を向上させている。

点群を投影し距離画像に変換して距離画像上で修復する手法では、三次元形状を平面に投影し、平面と点群の距離に基づくデプスマップ (depth map) を作成し、奥行き値の類似度を利用することにより三次元形状の修復[77][78]を行っている。この手法は、三次元形状をデプスマップに変換することで類似領域の探索に係る計算量を低減し、欠損領域を効率的に修復できると考えられる。Doriaら[79]は、デプスマップの奥行き値をそのまま利用するのではなく、 x 軸方向、 y 軸方向に微分した奥行き値の勾配情報として利用している。この手法では、カラー画像も合わせて利用し、各画素のRGBの輝度値と奥行き値の勾配情報に基づく類似度指数を用いて欠損領域の補間を行っている。

本研究では、三次元モデルの欠損領域の補間を行うが、モバイルマッピングシステムと各測定点の水平距離に基づき距離画像を生成し、移動物体を除去した領域を欠損領域として補間する手法の提案を行う。欠損領域の補間には事例に基づく手法を利用する。

1.5 本研究の位置付けと方針

レンジファインダと視覚センサを組み合わせた車両走行環境の自動計測システムを利用すると、高精度な三次元モデルの生成が可能である。測定時の周囲環境がすべて静止物体であるならば問題なく三次元モデルの生成が可能であるが、現実環境では対向車両等の移動物体が存在する。この移動物体の存在により、測定データ中に不要な物体の存在と、移動物体によって引き起こされる未測定領域の存在が発生し、これが問題となる。人手によってこの影響を除去することは可能であるが、自動生成システムの技術を発展させるためには、この対策を実施する必要がある。

本研究では、このような三次元モデルを生成する上で問題となる「屋外環境下に移動物体が含まれた場合」に焦点を当てて研究開発に取り組む。具体的には、レンジファインダから得られた位置情報や視覚センサから得られた動画像データ等を利用して、移動物体領域を判定する技術の開発を行う。この技術を利用して、移動物体の情報を除去し、必要となる移動物体後方の測定データを得る手法の開発を行う。本研究では、少ない測定回数で三次元モデルを自動生成することを目標とし、効率的な三次元モデルの生成技術の開発を行う。

1.6 本論文の構成

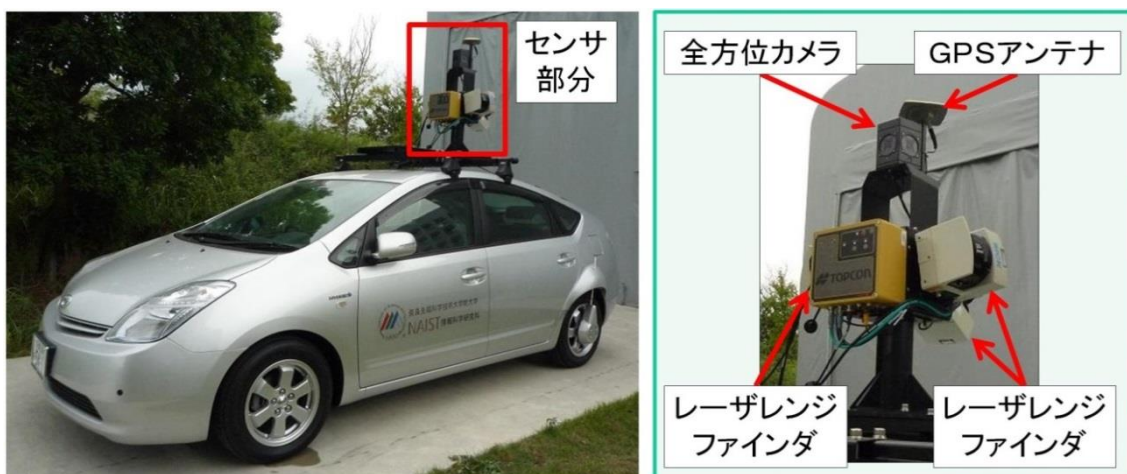
本論文の構成は以下のとおりである。第2章では本研究で利用したモバイルマッピングシステムについて述べる。複合センサから得られる各種情報の詳細を述べるとともに、点群データと画像データの統合について述べる。第3章では、移動物体検出手法として、フォトコンシステンシー (photo-consistency) と事前知識を利用した手法について提案する。第4章では、移動物体の隠蔽によって生じた欠損領域の補間手法として、距離情報を事例としてエネルギー関数を定義し、それを最小化することにより補間を行う手法を提案するとともに、色情報の補間時に発生する問題点とその解決方法を示す。第5章では、本論文のまとめを行うとともに今後の展望と課題について述べる。

2. 複合センサによる屋外環境の測定

2.1 モバイルマッピングシステムの概要

本研究で利用するモバイルマッピングシステムを図5に示す. このシステムは, TOPCON 社製の車載型三次元計測システム (IP-S2) であり, このシステムを利用して道路を走行しながら屋外環境の三次元形状とテクスチャ情報の取得を行う.

本システムには, 図5 (b)に示すように移動車両の上部に取り付けられた3台の一次元レーザレンジファインダ (SICK 社製 LMS291) と1台の視覚センサ (Point Grey Research 社製 Ladybug3) が設置されている. 2台のレンジファインダは移動車両の左右両側の距離情報を垂直方向に測定するように設置されており, 測定点の間隔は 1.0° に設定されている. 残りの1台のレンジファインダは車両の斜め下後方の距離情報を横方向に測定するよう設置されており, 測定点の間隔は 0.5° に設定されている. 車両が停止していると, 各レンジファインダの測定点は1ライン上のみであるが, 車両が走行することにより, 屋外環境の距離情報を測定することができ, ポイントクラウドと呼ばれる三次元点群を測定することができる. 本システムで利用されている視覚センサは, 6台のカメラで構成された全方位マルチカメラシステムであり, 水平方向の周囲 360° と上方の映像を一度に撮影することができる. 視覚センサから得られるデータは映像として記録されるので, 利用できる情報は動画データになる. 計測システムには, GPS, ジャイロセンサ, ホイールエンコーダも設置されており, これらのセンサから得られ



(a) システムの全体図

(b) 複合センサの拡大図

図5 モバイルマッピングシステム (車載型三次元計測システム) の外観

る情報で計測システムの位置と姿勢を知ることができる。これらの複合センサからの情報により，測定された三次元形状及びテクスチャ情報の位置合わせも可能である。各種センサの仕様を表1に示す。

表1 各種センサの仕様

レンジファインダ		GPS	
データ更新	75Hz	データ更新	10Hz
角度分解能（後方）	0.5°	測位精度	
角度分解能（側方）	1°	スタティック（H）	±3.0mm+0.5ppm
分解能	10mm	スタティック（V）	±5.0mm+0.5ppm
システム誤差	±35mm	キネマティック（H）	±10mm+1ppm
測定可能距離（黒色無光沢）	≤30m	キネマティック（V）	±15mm+1ppm
全方位カメラ		ジャイロセンサ	
CCDカメラ数	6個	バイアス安定度	25.2°/時
最大解像度（pixel）	1600×1200	ホイールエンコーダ	
最大撮影周期	5Hz	パルスレート	2500PPR

計測システムを利用した測定により得られた三次元点群の例を図6に示す。図6の点A付近，及び，点B付近で撮影された全方位画像を図7，図8に示す。図6の左上から右下に存在する帯状の点群が道路を表している。この図を見ると，道路上に2か所の点の密集部分と，密集部分の右側に穴が空いたような空間を確認することができる。これは測定時に移動物体が存在したために発生する現象であり，1回の測定で三次元モデルを構築しようとするとき，このような結果になる。図7，図8の右側に存在する白色自動車と黒色トラックが，このとき撮影された移動車両（移動物体）である。一般的には，屋外の三次元モデルを生成するとき，移動物体の存在と，移動物体によって引き起こされる未測定領域の問題を回避することは困難である。そのため，移動車両（移動物体）の少ない時間帯を選択して撮影を行ったり，複数回撮影を行うことでこの問題を回避しているのが現状である。

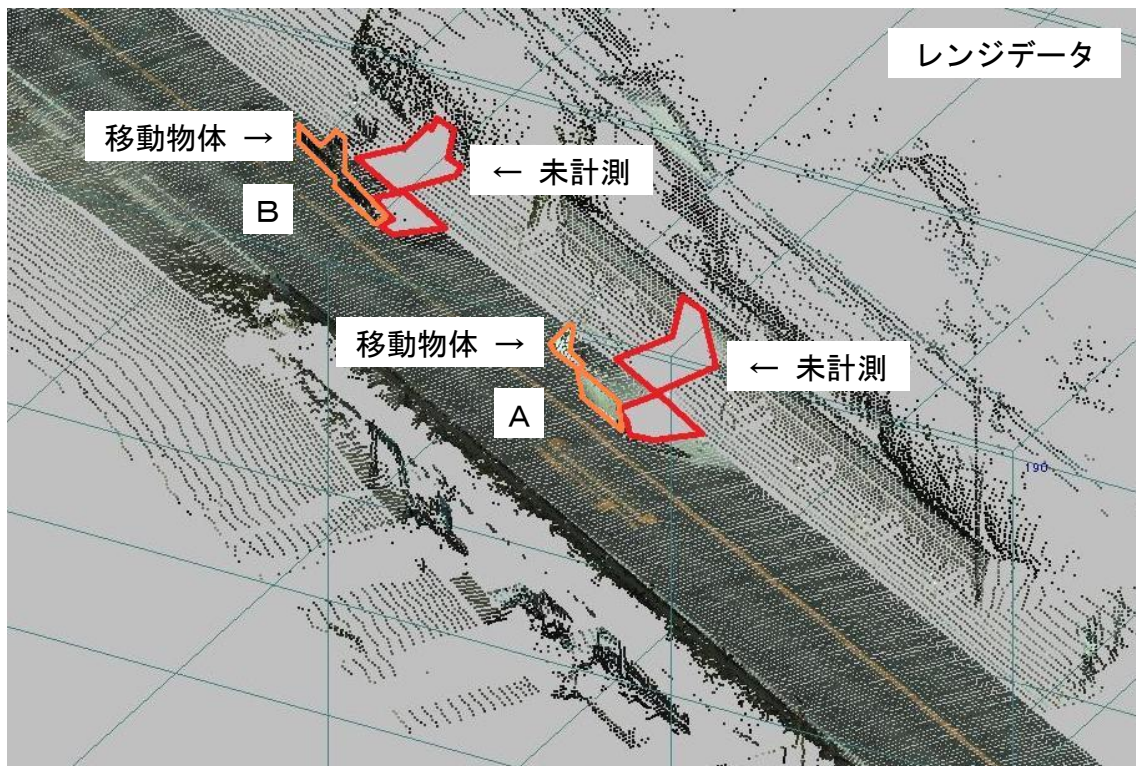


図6 屋外環境の測定例



図7 図6の点A付近で撮影された全方位画像



図8 図6の点B付近で撮影された全方位画像

2.2 レーザレンジファインダ

モバイルマッピングシステム（図5）の装置の一部として利用されているレーザレンジファインダを図9に示す。このレンジファインダ[97]は、SICK社製LMS291であり、一次元の距離情報を測定することができる。レンジファインダの設定可能な測定範囲[98]は図10に示すとおり0°から180°であるが、移動車両の左右両側の距離情報を垂直方向に測定する2台のレンジファインダは122°の範囲を1.0°間隔で測定するよう設定されており、残りの1台のレンジファイ



図9 SICK社製LMS291

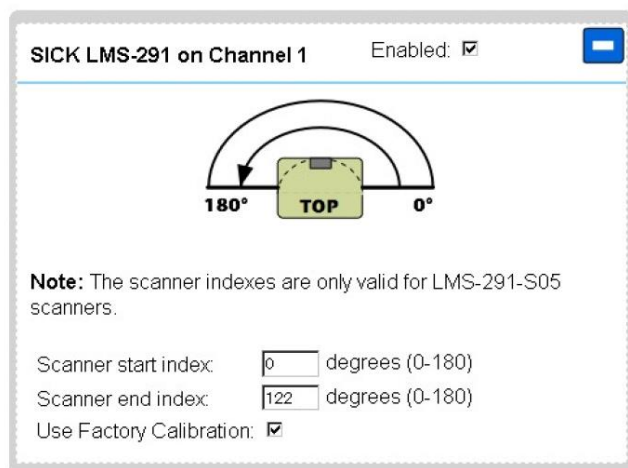


図10 レンジファインダの測定範囲[98]

ンダは、車両の斜め下後方の距離情報を 0.5° 間隔で測定するよう設定されている。これにより、測定範囲 360° の距離情報を得ることができる。なお、レンジファインダの測定周期は 75Hz である。

システムを走行させることによって得られる点群データの例を図 11 から図 16 に示す。これらの図は、取得したデータを確認するためのソフトウェア (Realtime Viewer) で表示した結果であり、黒色の背景に対して、取得した三次元点群は、白色の点で表示されている。対向車両 (移動物体) とすれ違った直後の点群データを表示しているため、図中に、移動物体を確認することができる。点群データの各点の明暗の差は、測定点の反射強度の差を表しており、点群の密度の違いは、測定点までの距離と測定したレンジファインダの測定間隔の違い (1.0° 間隔と 0.5° 間隔の違い) によるものである。なお、これらの図中の一部には、表示した点群データ取得時の最終時刻のタイヤと複合センサの位置も併せて示している。左右の側方を測定するレンジファインダと車両後方を測定するレンジファインダの設置角度が異なるので、測定ラインにズレが生じるが、測定点に隙間がないようレンジファインダの設置角度が調整されている。レンジファインダは 75Hz で動作しているため、システムが時速 40km で直進した場合、各レンジファインダの測定ライン間の間隔は 14.8cm になる。

本研究では、このような点群データと、後述する画像データの利用が研究開発の基本となっている。

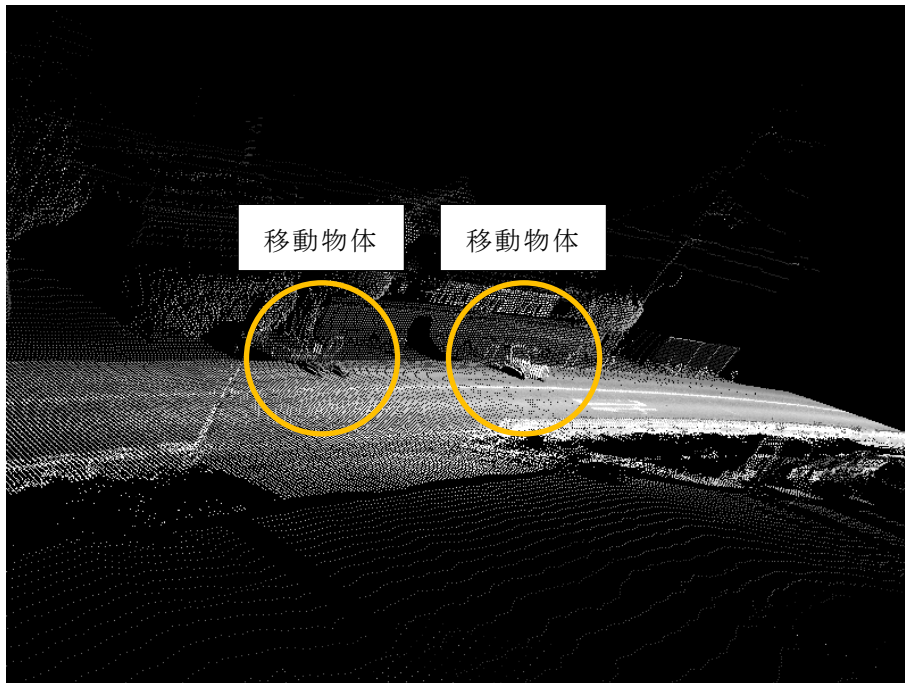


図 11 点群データの測定例 1

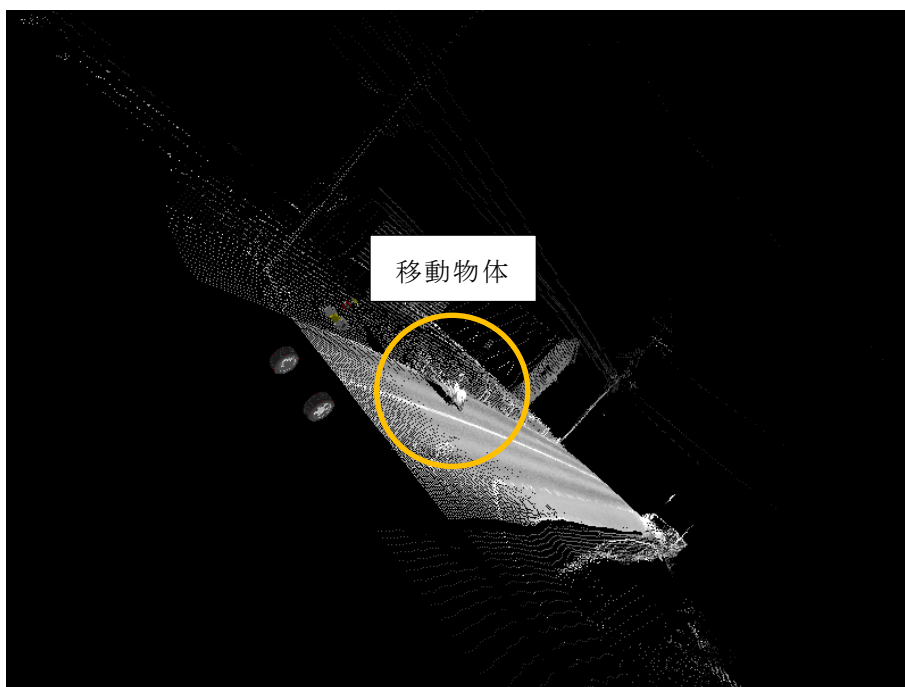


図 12 点群データの測定例 2

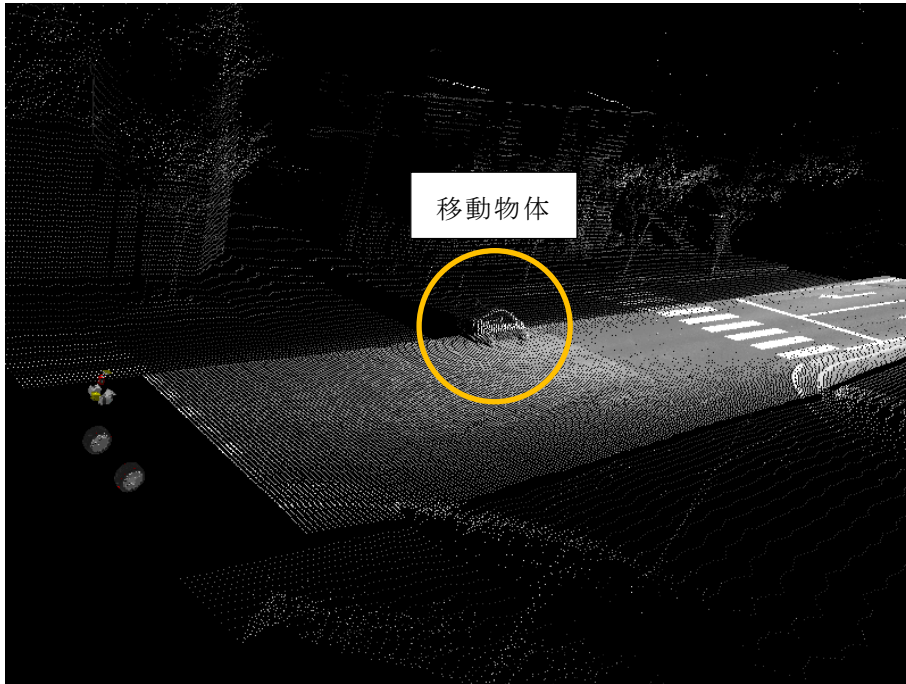


図 13 点群データの測定例 3

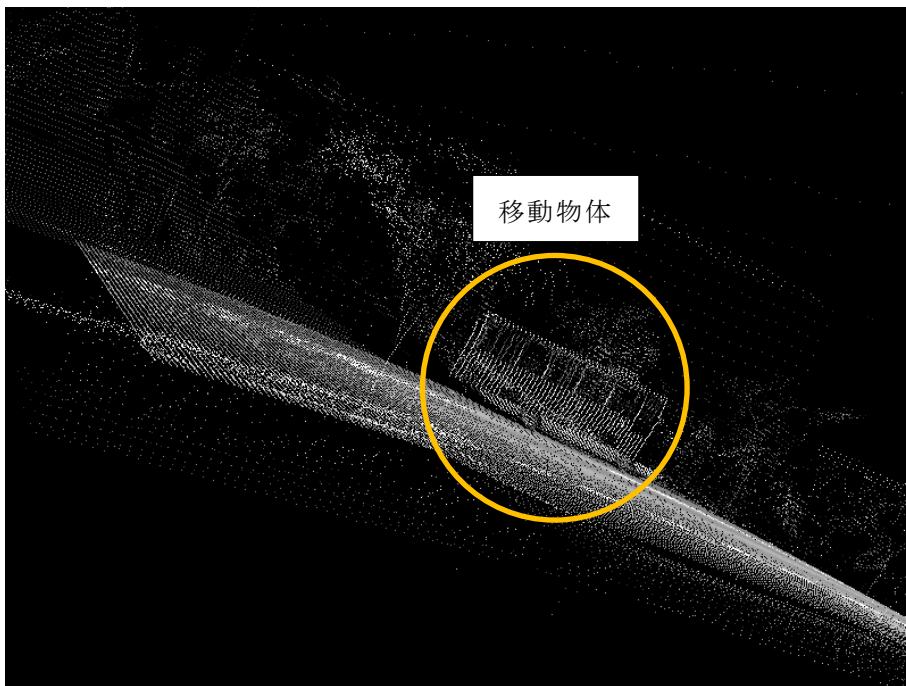


図 14 点群データの測定例 4



図 15 点群データの測定例 5



図 16 点群データの測定例 6

2.3 視覚センサ

モバイルマッピングシステム（図 5）の装置の一部として利用されている視覚センサの外観を図 17 に示す。この視覚センサは、Point Grey Research 社製 Ladybug3 [99] であり、6 台のカメラで構成された全方位マルチカメラシステムである。この視覚センサを利用することにより、水平方向の周囲 360° と上方の映像を一度に撮影することができる。視覚センサから得られるデータは映像として記録されるので、利用できる情報は動画データになる。映像撮影のタイミングは、時間による設定と外部トリガーによる設定が選択でき、時間による設定を選択した場合、最大撮影周期 5 Hz の映像撮影 [98]



図 17 視覚センサ

が可能である。外部トリガーによる撮影を選択した場合は、本システムの移動距離に応じた信号を受け取ることで、走行距離に対応した映像撮影も可能である。本研究では、4 m 間隔と 2 m 間隔で撮影した動画データを利用して実験を行っている。

この視覚センサで撮影した画像を図 18 に示す。この図は、同一時刻に 6 台のカメラで撮影された画像を並べて表示した結果である。図 18 上段左側の画像がシステムの正面の画像、上段中央と右側がシステムの右側の画像、下段左側と中央がシステムの左側の画像、下段右側がシステムの上方の画像を表している。この画像データを変換し、パノラマ画像として表示することにより、図 7 の全方位画像が得られる。



図 18 視覚センサ（6 台のカメラ）から得られる個々の画像

4 m 間隔で撮影した全方位画像の例を図 19 から図 26 に示す．図 22 は図 7 と同一の画像であり，図 25 は，図 8 と同一の画像である．画像番号は，撮影開始から連続して記録された画像の通し番号である．図 19 から図 26 の画像を注意深く見ることで，移動物体（対向車両）の動きを確認することができる．



图 19 全方位画像 (画像番号 820)



图 20 全方位画像 (画像番号 821)



图 21 全方位画像 (画像番号 822)



図 22 全方位画像 (画像番号 823)



図 23 全方位画像 (画像番号 824)



図 24 全方位画像 (画像番号 825)



図 25 全方位画像 (画像番号 826)



図 26 全方位画像 (画像番号 827)

2.4 G P S

G P S (Global Positioning System, 全球測位システム) [100]は, アメリカ合衆国によって運用される衛星測位システムであり, G P S衛星から発信される信号を受け取ることにより, 受信者の現在位置を測定するシステムである. 本論文で利用したモバイルマッピングシステム (図5) では, リアルタイムキネマティック測量 (Real Time Kinematic) を採用しており, 固定局の測位データと移動局の測位データを利用することによって, 表1の測定精度で移動局 (モバイルマッピングシステム) の位置測定が可能である. G P Sを利用した位置測定例を図27に示す. G P Sの測定周期は10Hzであるが, 測定データは視覚センサの撮影周期に併せて記録されているので, このデータを利用することにより動画データの各画像の撮影位置が確認できる.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
#"file_name"	sequence_id	GPS_time(s)	GPS_time(us)	lat(deg)	lon(deg)	alt(m)	attitude(x)	attitude(y)	attitude(z)	trigger_id	frame_id
image000000.jpg	4	997161847	250140	34.73196	135.73519	160.64978	179.22966	2.98560	-18.09084	225	436
image000001.jpg	5	997161848	183	34.73200	135.73517	160.69990	179.76607	3.12502	-18.08601	226	437
image000002.jpg	6	997161848	690225	34.73203	135.73516	160.75619	179.66736	2.87660	-18.24420	227	438
image000003.jpg	7	997161849	340215	34.73206	135.73514	160.80635	179.60693	2.77282	-18.25800	228	439
image000004.jpg	8	997161849	960229	34.73210	135.73513	160.85104	179.80600	2.91539	-18.16875	229	440
image000005.jpg	9	997161850	550272	34.73213	135.73511	160.89768	179.73504	2.96883	-18.10421	230	441
image000006.jpg	10	997161851	130260	34.73216	135.73510	160.96215	179.95452	2.93605	-17.97186	231	442
image000007.jpg	11	997161851	700365	34.73220	135.73509	161.02455	-179.90137	2.85634	-17.87907	232	443
image000008.jpg	12	997161852	260859	34.73223	135.73507	161.07713	-179.89149	2.62278	-17.71221	233	444
image000009.jpg	13	997161852	810342	34.73227	135.73506	161.12880	-179.79356	2.71858	-17.57397	234	445
image000010.jpg	14	997161853	350417	34.73230	135.73505	161.18768	-179.63481	2.86331	-17.39936	235	446
image000011.jpg	15	997161853	880401	34.73233	135.73503	161.24673	-179.44211	2.47366	-17.28295	236	447
image000012.jpg	16	997161854	420570	34.73237	135.73502	161.29608	-179.05763	2.34599	-18.52657	237	448
image000013.jpg	17	997161854	970460	34.73240	135.73500	161.35921	-179.17633	2.99132	-22.45629	238	449
image000014.jpg	18	997161855	540627	34.73243	135.73498	161.42389	-179.00735	2.80818	-30.02386	239	450
image000015.jpg	19	997161856	130478	34.73246	135.73496	161.48527	-178.76926	2.87427	-39.91229	240	451
image000016.jpg	20	997161856	740626	34.73249	135.73492	161.55516	-178.48807	2.72540	-51.23678	241	452
image000017.jpg	21	997161857	370574	34.73251	135.73488	161.62642	-178.72002	3.06542	-63.61717	242	453
image000018.jpg	22	997161858	633	34.73252	135.73484	161.70761	-179.00135	2.73908	-74.23795	243	454
image000019.jpg	23	997161858	610644	34.73252	135.73480	161.76553	-178.45199	2.54608	-81.49472	244	455
image000020.jpg	24	997161859	200593	34.73253	135.73476	161.79821	-178.80083	3.04221	-85.01531	245	456
image000021.jpg	25	997161859	770692	34.73253	135.73471	161.85441	179.96150	3.43121	-85.33739	246	457
image000022.jpg	26	997161860	320692	34.73253	135.73467	161.94258	179.87586	2.65959	-84.91180	247	458
image000023.jpg	27	997161860	860716	34.73254	135.73463	161.99151	179.98788	2.87614	-84.30276	248	459
image000024.jpg	28	997161861	390696	34.73254	135.73458	162.05116	-179.95449	2.91368	-83.71025	249	460
image000025.jpg	29	997161861	900721	34.73254	135.73454	162.11115	179.96513	2.87217	-83.17577	250	461
image000026.jpg	30	997161862	400786	34.73255	135.73450	162.17026	-179.93281	2.77839	-82.83698	251	462
image000027.jpg	31	997161862	890901	34.73255	135.73446	162.22557	-179.98112	2.57083	-82.65716	252	463
image000028.jpg	32	997161863	380793	34.73256	135.73441	162.27487	-179.74215	2.87629	-82.97756	253	464
image000029.jpg	33	997161863	860846	34.73256	135.73437	162.33666	-179.64338	3.09021	-83.53219	254	465
image000030.jpg	34	997161864	331260	34.73256	135.73433	162.40688	-179.22846	2.71665	-84.14590	255	466
image000031.jpg	35	997161864	790886	34.73257	135.73428	162.45901	-179.22577	2.15725	-84.75691	256	467
image000032.jpg	36	997161865	240885	34.73257	135.73424	162.50646	-179.54879	2.74854	-85.33697	257	468
image000033.jpg	37	997161865	691287	34.73257	135.73420	162.56198	-179.41592	2.71202	-85.59594	258	469
image000034.jpg	38	997161866	140945	34.73257	135.73416	162.61715	-179.32103	2.52889	-85.67482	259	470
image000035.jpg	39	997161866	591047	34.73258	135.73411	162.67337	-179.07299	2.77475	-85.45780	260	471

図27 G P Sを利用した位置の測定例

(C, D列: 時刻, E列: 緯度, F列: 経度, G列: 高さ)

2.5 ジャイロセンサとホイールエンコーダ

モバイルマッピングシステム（図 5）は、ジャイロセンサとホイールエンコーダを有しており、このセンサから得られる情報により、本システムの姿勢を知ることができる。図 28 に姿勢の基準となる回転軸[98]について示す。システムの姿勢はNED（North-East-Down）を基準に、図 28 における軸への回転行列として記録される。システムの姿勢の測定例を図 29 に示す。このデータを利用することによって、画像撮影時のシステムの姿勢が確認でき、前述のGPSの測定とともに利用することにより、システムの位置と姿勢が特定できる。

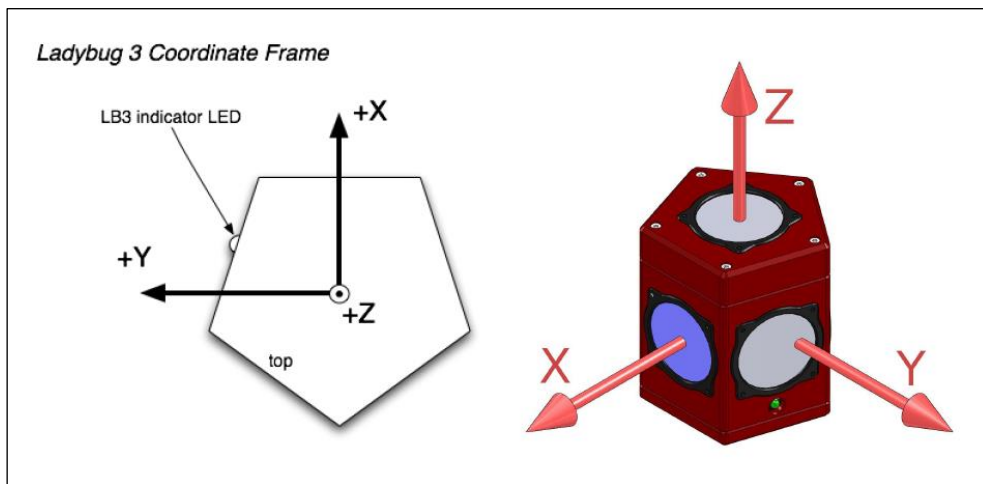


図 28 システムの姿勢の基準となる回転軸[98]

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	#"file_name"	sequence_id	GPS_time(s)	GPS_time(us)	lat(deg)	lon(deg)	alt(m)	attitude(x)	attitude(y)	attitude(z)	trigger_id	frame_id
1	image00000.jpg	4	997161847	250140	34.73196	135.73519	160.64978	179.22966	2.98560	-18.09084	225	436
2	image00001.jpg	5	997161848	183	34.73200	135.73517	160.69990	179.76607	3.12502	-18.08601	226	437
3	image00002.jpg	6	997161848	690225	34.73203	135.73516	160.75619	179.66736	2.87660	-18.24420	227	438
4	image00003.jpg	7	997161849	340215	34.73206	135.73514	160.80535	179.60693	2.77282	-18.25800	228	439
5	image00004.jpg	8	997161849	960229	34.73210	135.73513	160.85104	179.80600	2.91539	-18.16875	229	440
6	image00005.jpg	9	997161850	550272	34.73213	135.73511	160.89768	179.73504	2.96883	-18.10421	230	441
7	image00006.jpg	10	997161851	130260	34.73216	135.73510	160.96215	179.95452	2.93605	-17.97186	231	442
8	image00007.jpg	11	997161851	700365	34.73220	135.73509	161.02455	-179.90137	2.85634	-17.87907	232	443
9	image00008.jpg	12	997161852	260859	34.73223	135.73507	161.07713	-179.89149	2.62278	-17.71221	233	444
10	image00009.jpg	13	997161852	810342	34.73227	135.73506	161.12890	-179.79356	2.71858	-17.57397	234	445
11	image00010.jpg	14	997161853	350417	34.73230	135.73505	161.18768	-179.63481	2.86331	-17.39936	235	446
12	image00011.jpg	15	997161853	880401	34.73233	135.73503	161.24673	-179.44211	2.47366	-17.28295	236	447
13	image00012.jpg	16	997161854	420570	34.73237	135.73502	161.29608	-179.05763	2.34599	-18.52657	237	448
14	image00013.jpg	17	997161854	970460	34.73240	135.73500	161.35921	-179.17633	2.98132	-22.45629	238	449
15	image00014.jpg	18	997161855	540627	34.73243	135.73498	161.42389	-179.00735	2.80818	-30.02386	239	450
16	image00015.jpg	19	997161856	130478	34.73246	135.73496	161.48527	-179.76926	2.87427	-39.91229	240	451
17	image00016.jpg	20	997161856	740626	34.73249	135.73492	161.55516	-179.48807	2.72540	-51.23678	241	452
18	image00017.jpg	21	997161857	370574	34.73251	135.73488	161.62642	-179.72002	3.06542	-63.61717	242	453
19	image00018.jpg	22	997161858	833	34.73252	135.73484	161.70781	-179.00135	2.73908	-74.23795	243	454
20	image00019.jpg	23	997161858	610644	34.73252	135.73480	161.78553	-179.45199	2.54608	-81.49472	244	455
21	image00020.jpg	24	997161859	200593	34.73253	135.73476	161.79821	-179.80083	3.04221	-85.01531	245	456
22	image00021.jpg	25	997161859	770692	34.73253	135.73471	161.85441	179.96150	3.43121	-85.33739	246	457
23	image00022.jpg	26	997161860	320692	34.73253	135.73467	161.94258	179.87586	2.65858	-84.91180	247	458
24	image00023.jpg	27	997161860	860716	34.73254	135.73463	161.99151	179.98788	2.87614	-84.30276	248	459
25	image00024.jpg	28	997161861	390696	34.73254	135.73458	162.05116	-179.95449	2.91368	-83.71025	249	460
26	image00025.jpg	29	997161861	900721	34.73254	135.73454	162.11115	179.96513	2.87217	-83.17577	250	461
27	image00026.jpg	30	997161862	400786	34.73255	135.73450	162.17026	-179.93281	2.77839	-82.83698	251	462
28	image00027.jpg	31	997161862	890901	34.73255	135.73446	162.22557	-179.98112	2.57083	-82.65716	252	463
29	image00028.jpg	32	997161863	380793	34.73256	135.73441	162.27487	-179.74215	2.87629	-82.97756	253	464
30	image00029.jpg	33	997161863	860846	34.73256	135.73437	162.33666	-179.64338	3.09021	-83.53219	254	465
31	image00030.jpg	34	997161864	331260	34.73256	135.73433	162.40688	-179.22846	2.71665	-84.14590	255	466
32	image00031.jpg	35	997161864	790896	34.73257	135.73428	162.45901	-179.22577	2.15725	-84.75691	256	467
33	image00032.jpg	36	997161865	240885	34.73257	135.73424	162.50646	-179.54879	2.74854	-85.33697	257	468
34	image00033.jpg	37	997161865	691287	34.73257	135.73420	162.56198	-179.41592	2.71202	-85.59594	258	469
35	image00034.jpg	38	997161866	140945	34.73257	135.73416	162.61715	-179.32103	2.52889	-85.67482	259	470
36	image00035.jpg	39	997161866	581047	34.73258	135.73411	162.67337	-179.07299	2.77475	-85.45780	260	471

図 29 システムの姿勢の測定例

(H列：X軸の回転角度，I列：Y軸の回転角度，J列：Z軸の回転角度)

2.6 点群データと全方位画像の合成

点群データと映像データは、それぞれ異なるデータファイルとして記録されているが、GPSやジャイロセンサ、ホイールエンコーダの測定結果を利用することにより、2つのデータを統合することができる。点群データの中から、ほぼ同時刻に測定された3台のレンジファインダの1ライン分の測定結果を手作業で抜き出し、抜き出した三次元点群を全方位画像上に合成した結果を図30から図32に示す。三次元点群は、それぞれの全方位画像上において、道路・建物・対向車両等の形状に合わせたところに投影される。点群データの測定時刻と全方位画像の撮影時刻がほぼ同時刻である図31の場合では、左右に2本の直線上の点群と、道路面上に緩やかな1本の曲線上の点群として表示される。

連続する25000点の点群データを全方位画像上に投影した結果を図33、図34、図35に示す。図34を見ると、白色自動車の上に点群が投影されていることがわかるが、この点群の一部には、道路面や自動車後方の建物を測定した点群が白色自動車の上に投影されている部分も存在する。これは全方位画像の撮影時刻と点群データの測定時刻が異なることが原因であり、図33や図35と図34を比較することにより、この現象を確認することができる。図33と図35の全方位画像では、移動物体である白色自動車の存在する場所が異なるため、道路上の空間に密集して配置された点群や、移動物体で隠蔽されたことによって測定できなかった道路や建物の壁を確認することができる。

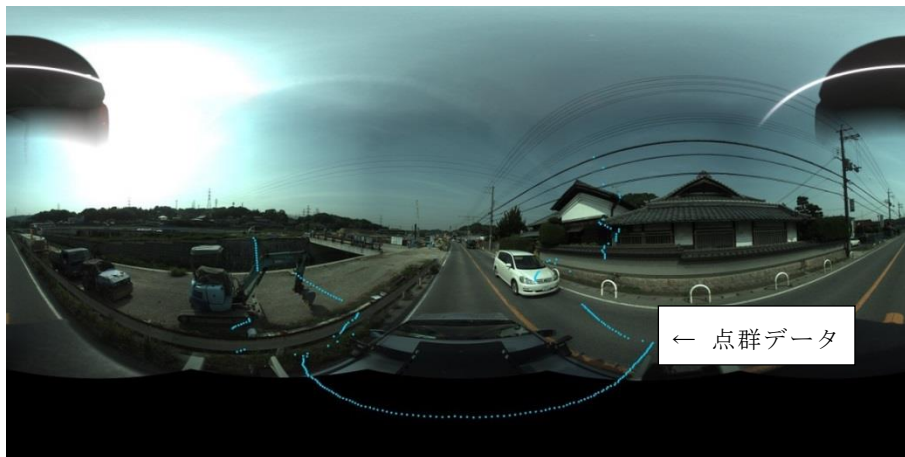


図 30 1 ライン分の点群データと全方位画像の合成 (画像番号 822)



図 31 1 ライン分の点群データと全方位画像の合成 (画像番号 823)



図 32 1 ライン分の点群データと全方位画像の合成 (画像番号 824)

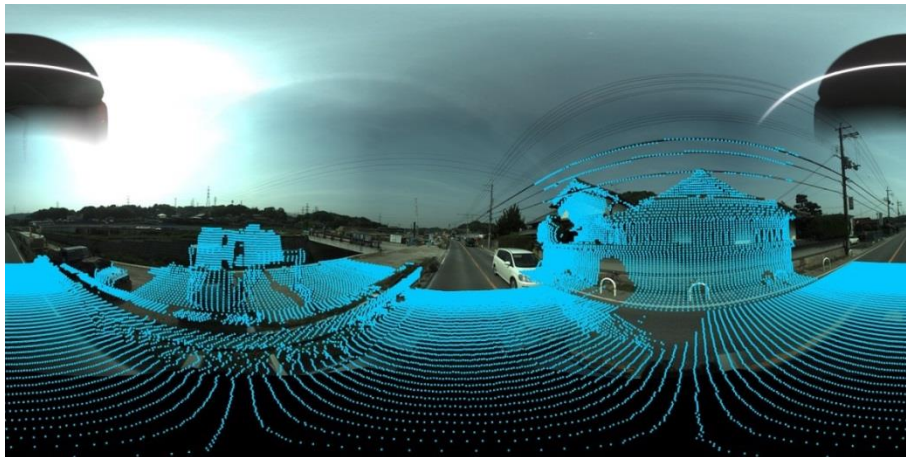


図 33 25000 点の点群データと全方位画像の合成 (画像番号 822)



図 34 25000 点の点群データと全方位画像の合成 (画像番号 823)



図 35 25000 点の点群データと全方位画像の合成 (画像番号 824)

以上のように，点群データと全方位画像の合成することにより，レンジファインダで測定された三次元点群に，移動物体上を測定した点と静止物体上を測定した点が混在することが確認できる．これらの三次元点群から，移動物体上の点と静止物体上の点の判定を行う手法を次章で述べる．

2.7 測定に関する注意事項

複合センサからの得られる情報は、イーサネットケーブルと IEEE1394b ケーブルを経由してパソコンに記録される。複合センサからの情報量が記録速度の上限を超えると記録漏れが発生する。このモバイルマッピングシステムの標準的な測定条件は、全方位カメラの映像を 4 m 間隔設定とし、時速 40km 以下で走行することである。走行速度が速くなると、全方位カメラの情報量が増え、記録漏れが発生する。走行速度が遅い場合は記録漏れの心配はなくなるが、効率よく屋外環境を測定するためには、速い速度の測定が望ましい。レンジファインダの測定周期 (75Hz) が一定であり、走行速度が遅くなれば進行方向に対する点群の密度が高くなるため、点群密度が必要なところでは、ゆっくり走行する必要がある。また、GPS 測定を行うため、測定を開始する場所は GPS 衛星が 5 個以上受信できる上空視界の良い場所を選ぶ必要がある。上空視界の良いコースが望ましく、位置精度は走行ルートに直線が多いほど向上する。

システムの仕様書[98]には、斜め下後ろ向きに設置されたレンジファインダの設置角度の記録がないため、複合センサから得られる測定データを利用して、その角度を求めた。その結果は、鉛直方向に対して 54.7 度であった。複合センサと道路面の位置関係を図 36 に示す。

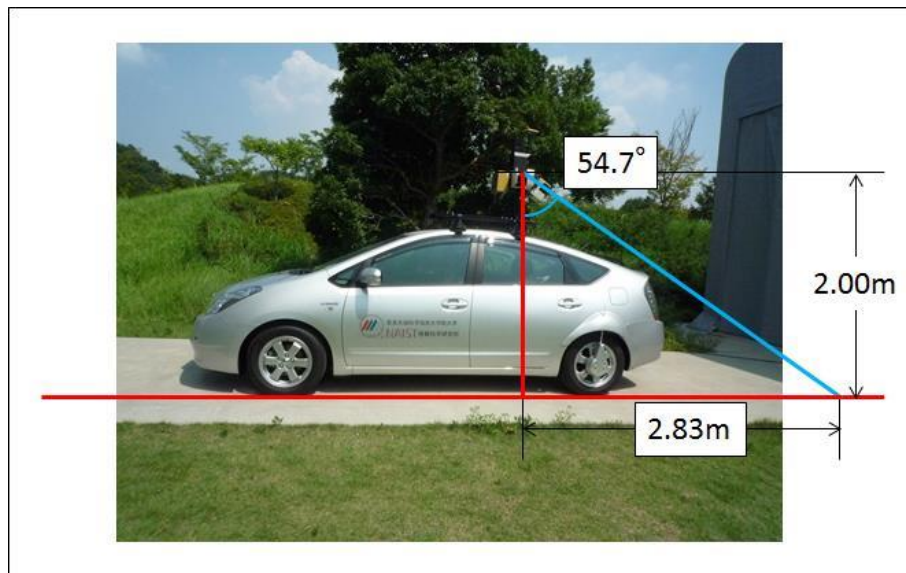


図 36 複合センサと道路面の位置関係

3. フォトコンシステンシーと事前知識を用いた点群データからの移動物体上の点の検出

3.1 序言

屋外環境の三次元モデルは、景観シミュレーション、ナビゲーション、ウォークスルーや複合現実感などの様々な分野で利用されている。広域屋外環境のモデルを作成するには膨大な労力が必要になるため、これを自動生成する技術の開発が要望されている。近年、レンジファインダと視覚センサを組み合わせる車両走行環境の三次元形状を自動測定するシステム[23]-[25]が開発されており、その実用化が進んでいる。現実環境の測定に基づく三次元モデルの生成では、測定時に移動物体が存在した場合、測定データ中に移動物体上を測定した点が混在するとともに、移動物体によって隠蔽された静止物体のデータが欠落することになり、三次元モデル生成の際に妨げになる。一般に、このような移動物体の存在と、移動物体によって引き起こされる未測定領域の問題を回避することは困難である。屋外環境を異なる時刻において複数回測定することにより、移動物体の影響を低減することができるが、移動物体の影響を除去し、少ない測定回数で三次元モデルを自動生成することができれば、効率的な三次元モデルの生成が可能になる。

本研究では、少ない測定回数で三次元モデルを自動生成することを目的とし、移動物体を考慮した三次元モデルの生成手法の開発を行う。本章では、移動物体が含まれる屋外環境を測定した点群データから移動物体上の点を判定する手法の提案を行うとともに、その方法を利用した実験結果について述べる。

3.2 移動物体を対象とした三次元点の除去

まず、レンジファインダによって得られた三次元点を全方位画像上に投影する。静止物体上の投影位置の画素の色が観察方向に対して不変であるという仮定の下で、フォトコンシステンシーを利用して移動物体上の点を検出する。フォトコンシステンシーは、投影点の強度の分散として計算され、コンピュータビジョンの分野での三次元モデリングの研究に多く利用されている。フォトコンシステンシーを応用して移動物体上の点の候補を検出した後に、道路環境の事前知識を利用して移動物体の三次元領域を決定し、最終的に、この三次元領域によって移動物体上の点が除去される。詳細は以下のとおりである。

3.2.1 フォトコンシステンシーを応用した移動物体上の候補点の検出

移動物体上の候補点を検出するためにフォトコンシステンシーを応用する。静止物体上の三次元点を全方位画像上に投影し、連続する全方位画像上の投影点の画素の分散を計算すると、分散は小さくなる。移動物体上の三次元点を全方位画像上に投影し、連続する全方位画像上の投影点の画素の分散を計算すると、分散は大きくなる。これにより、ある程度、移動物体上の点と静止物体上の点を分離することが可能であるが、ここで発生する問題は、静止物体上の点が他の物体によって隠蔽された場合、分散が大きくなることである。この問題を解決するために、スライディングウィンドウアプローチを利用したフォトコンシステンシーの手法を提案する。

三次元点 P と i 番目の画像平面に投影された点 p_i との関係を図 37 に示す。画像番号 n は、三次元点 P が測定された時刻に最も近い画像であり、この画像を基準画像とする。基準画像を含み、かつ、時間方向に隣接する $2M$ 個の画像を利用して分散の計算を行う。まず、各三次元点を画像上に投影し、投影画像における H S V モデルの S の値と V の値を求める。H S V モデルは、カラー画像を色相(H)、彩度(S)、明度(V)の値として表現する方法であり、S の値と V の値を利用する理由は、移動物体検出を行う上で、R G B 成分または H の値を利用するよりも効果的(3.3.1 参照)だからである。S の値と V の値を求めた後で、次のように変数 k を変化させることにより、これらの値の分散を計算する。

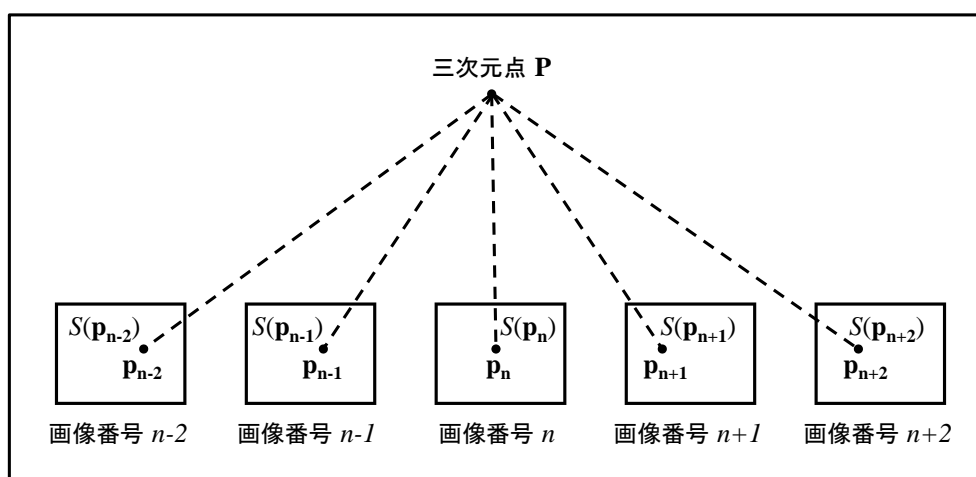


図 37 測定点と画像上の投影点の関係

$$\sigma_s(\mathbf{P}, n, k)^2 = \frac{1}{2M+1} \sum_{i=-M}^M \{S(\mathbf{p}_{n+k+i}) - S_{average}(\mathbf{P}, n, k)\}^2 \quad (3.1)$$

$$S_{average}(\mathbf{P}, n, k) = \frac{1}{2M+1} \sum_{i=-M}^M \{S(\mathbf{p}_{n+k+i})\} \quad (3.2)$$

$$\sigma_v(\mathbf{P}, n, k)^2 = \frac{1}{2M+1} \sum_{i=-M}^M \{V(\mathbf{p}_{n+k+i}) - V_{average}(\mathbf{P}, n, k)\}^2 \quad (3.3)$$

$$V_{average}(\mathbf{P}, n, k) = \frac{1}{2M+1} \sum_{i=-M}^M \{V(\mathbf{p}_{n+k+i})\} \quad (3.4)$$

$S_{average}(\mathbf{P}, n, k)$ と $V_{average}(\mathbf{P}, n, k)$ は k 番目の画像を中心とする $2M+1$ 個の画像に対するそれぞれの $S(\mathbf{p}_{n+k+i})$ 及び $V(\mathbf{p}_{n+k+i})$ の値の平均値である．変数 k を利用して計算された分散から，最小値である $\bar{\sigma}_s(\mathbf{P}, n)^2$ および $\bar{\sigma}_v(\mathbf{P}, n)^2$ を選択する．

$$\bar{\sigma}_s(\mathbf{P}, n)^2 = \min\{\sigma_s(\mathbf{P}, n, -M)^2, \sigma_s(\mathbf{P}, n, -M+1)^2, \dots, \sigma_s(\mathbf{P}, n, M)^2\} \quad (3.5)$$

$$\bar{\sigma}_v(\mathbf{P}, n)^2 = \min\{\sigma_v(\mathbf{P}, n, -M)^2, \sigma_v(\mathbf{P}, n, -M+1)^2, \dots, \sigma_v(\mathbf{P}, n, M)^2\} \quad (3.6)$$

同一の基準画像に属する三次元の点の評価値に対して，判別分析法[101]を利用して，しきい値 I_{sth} と I_{vth} を決定する．その後， $\bar{\sigma}_s(\mathbf{P}, n)^2 \geq I_{sth}$ または $\bar{\sigma}_v(\mathbf{P}, n)^2 \geq I_{vth}$ のどちらかを満たす三次元点を移動物体上の点の候補として分類する．

3.2.2 事前知識を利用した移動物体の領域決定

フォトコンシステンシーを応用することにより，すべての移動物体上の点が検出できることが望ましいが，不完全な結果になる場合もある．検出精度を向上させるため，移動物体上の候補点と道路環境の事前知識を利用して，移動物体の領域を決定する．モバイルマッピングシステムと対向車線に存在する移動物体の関係を図 38 に示す．モバイルマッピングシステムの中心から移動物体の候補点までの水平距離を求め，ヒストグラムを作成しピークを選択することにより，走行中の車両の側面の位置を推定する．ヒストグラムは，固定された時間間隔で測定された各三次元点を利用して求める．このとき，レンジファインダの垂直方向の位置情報の事前知識を利用して，道路面上の三次元点は除外する．

モバイルマッピングシステムの左側と右側のヒストグラムを計算し、ヒストグラムの値が所定のしきい値 T よりも大きいピークが存在する場合、以下の処理で決定される直方体を設定し、その内部の点を移動物体上の点として選択することにより、点群データから除去する。ヒストグラムのピークは、モバイルマッピングシステムから見て近い方の移動物体の側面を測定した点の集合と考えられる。そこで、ヒストグラムのピークの位置に該当する三次元点群を抽出し、モバイルマッピングシステムの進行方向に対して平行な方向の三次元点群の両端の距離を検出し、その距離を検出に利用する直方体の長さとする。直方体の幅は、直方体の長さが4.7m以下の場合に2.0mに設定し、それ以外の場合に2.5mに設定する。これは、ダンプカーやトラック等の大型車を考慮するためである。また、日本では、国土交通省の条例「道路運送車両の保安基準」[102]によって、車の長さは12m未満に制限されているので、直方体の長さが12m以上の場合は、移動物体の判定の対象外とする。直方体の高さは、直方体の長さと同幅で指定される領域内で、道路面以上、かつ、最も高い位置に存在する測定点で自動決定される。ただし、国土交通省の条例「道路運送車両の保安基準」[102]によって、車の高さは3.8m未満に制限されているので、3.8m以上のところに存在する測定点は除外する。道路に設置された信号機の一部や道路を横断する電線等がこの測定点に該当する。

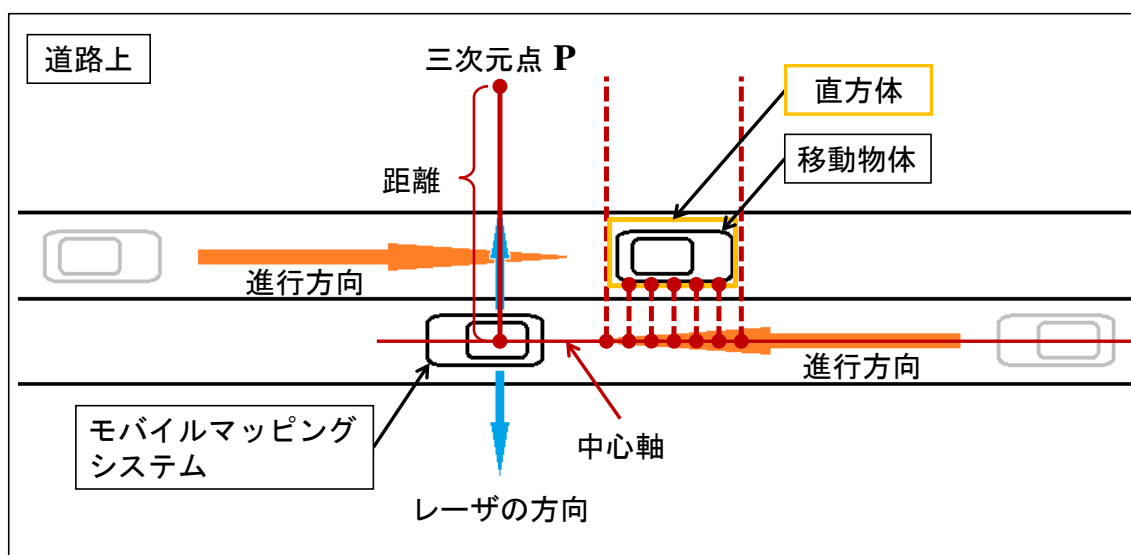


図 38 モバイルマッピングシステムと移動物体の関係

3.3 実験結果

提案手法の有効性を検証するために、第2章で述べたモバイルマッピングシステムを利用して、屋外の環境の測定を行い、取得したデータに提案手法を適用した。この実験では、全方位画像を4 m毎に撮影した。レンジファインダの測定周期は75Hzである。

3.3.1 画像間の輝度の変化

レンジファインダから得られた三次元点群の判定を行うために、移動物体と静止物体上の点を数点選び出し、その各点が投影される全方位画像上の画素値の変化を測定した。実験に利用した画像と三次元点の例、各点の輝度変化の様子を図39、図40に示す。移動物体上の点として、赤色自動車と白色自動車の車体を測定した三次元点を選択した。静止物体上の点として、移動物体後方の建物を測定した三次元点を選択した。各画像に投影される点の画素値を測定し、HSV変換後の値と各画像の関係を図示した。横軸は画像番号、縦軸は色相(H)、彩度(S)、明度(V)の値を示している。各グラフには基準画像も図示している。

図39より、移動物体上の点の場合、基準画像の前後において、色相(H)、彩度(S)の値が大きく変化していることが確認でき、静止物体上の点の場合、基準画像の前後において、HSVの値がほとんど変化しないことが確認できる。また、図40より、移動物体上の点の場合、基準画像の前後において、明度(V)の値が大きく変化していることが確認でき、静止物体上の点の場合、基準画像の前後において、HSVの値がほとんど変化しないことが確認できる。RGB各色の値についても同様の変化を調べたが、HSVの値を利用した方が値の変化が顕著に現れた。

以上の結果より、明度(V)、彩度(S)については移動物体が観測された画像とその前後の画像において、値が大きく変化することが確認できた。この結果に基づき、以降の移動物体検出実験では、HSV変換を行った明度(V)、及び、彩度(S)の値を採用した。

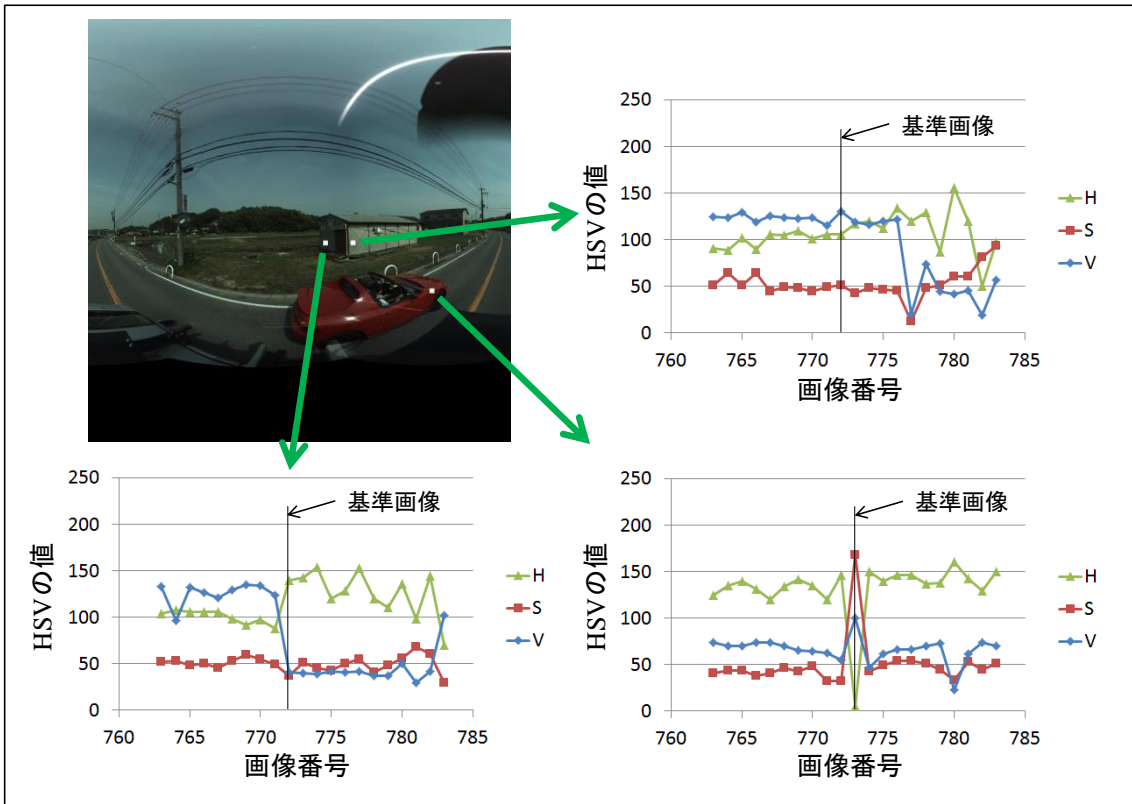


図 39 画像間の輝度の変化 (赤色自動車)

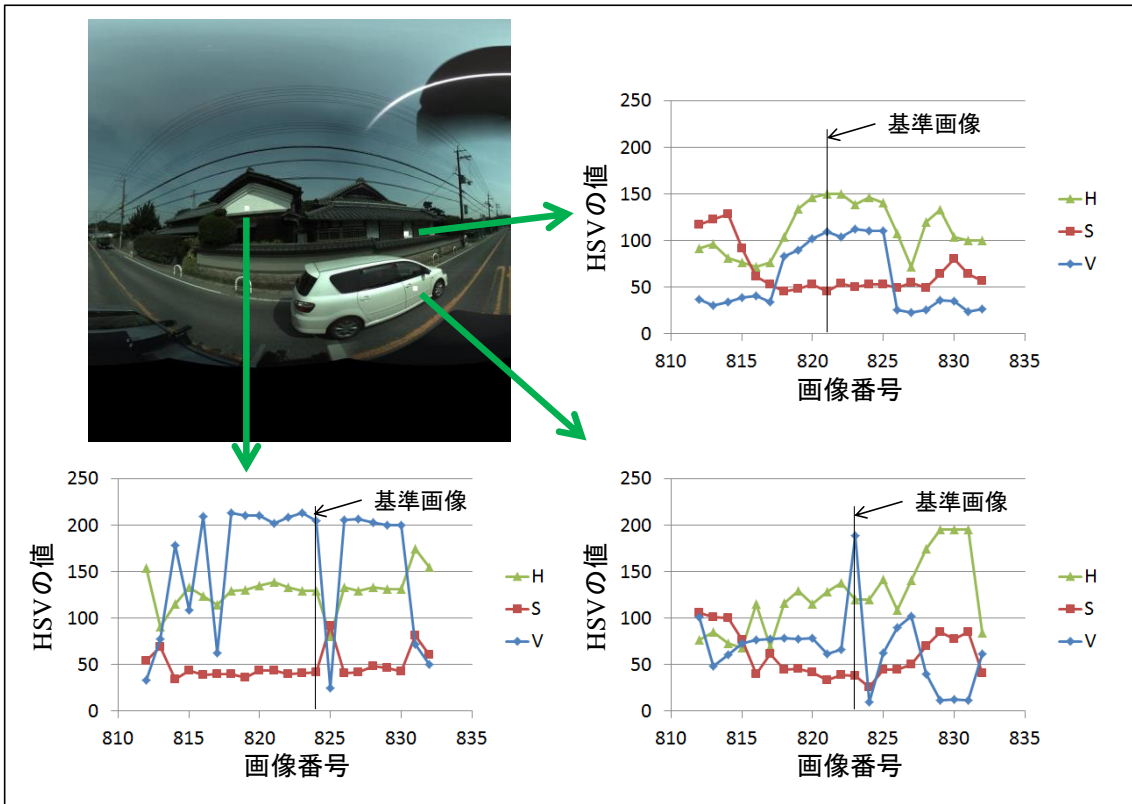


図 40 画像間の輝度の変化（白色自動車）

3.3.2 フォトコンシステンシーにおけるスライディングウィンドウの効果

図 41 は、レンジファインダで測定した三次元点を、図 7 の全方位画像に投影し重ねて表示している。この図では、モバイルマッピングシステムから得られたカメラの位置姿勢を利用して、全方位画像上に 25,000 点の三次元点が投影されている。青色の点は静止物体上にあると判定された点を示し、赤色の点は移動物体上にあると判定された点を示している。ただし、この実験では、 $M = 2$ を利用している。

フォトコンシステンシーの計算にスライディングウィンドウを適用した効果を確認するために、スライディングウィンドウを使用した結果と、変数 k を固定した結果について比較した。

図 42 および図 43 は、異なるシーンにおける候補点を、 $k = 0$ の固定の場合（左）と変数 k を利用した場合（右）について判定した結果を示している。これらの図に描かれた円の内側を確認すると、左図の移動物体上の点（赤色）と間違っ

定されている建物の壁上の点群は，本手法を利用することにより，右図の静止物体上の点（青色）と正しく判定されていることがわかる．少し不完全なところは存在するが，それらの点については，事前知識を利用した次の処理によって分類することができる．

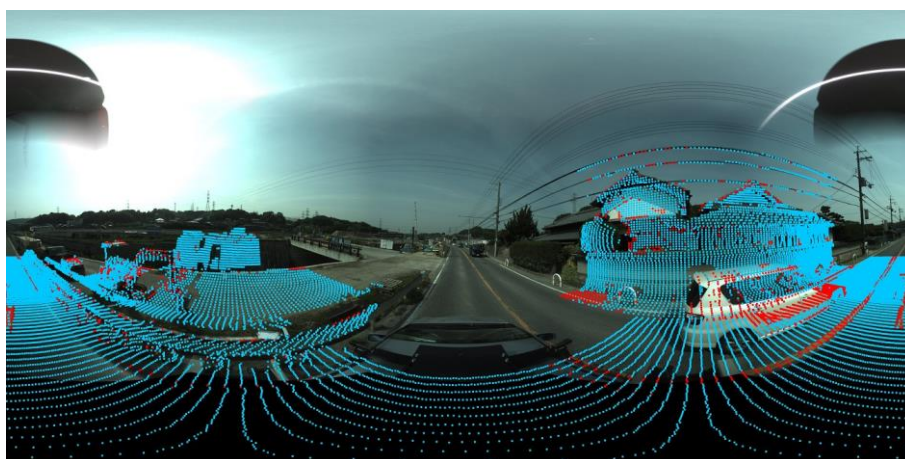


図 41 点群データと全方位画像から作成した合成画像

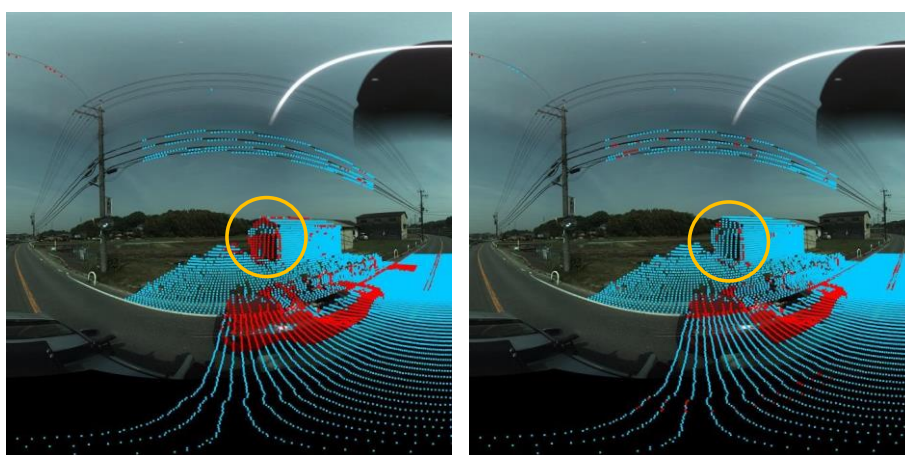


図 42 分散の結果（左）とスライディングウィンドウ（右）を利用した結果 1

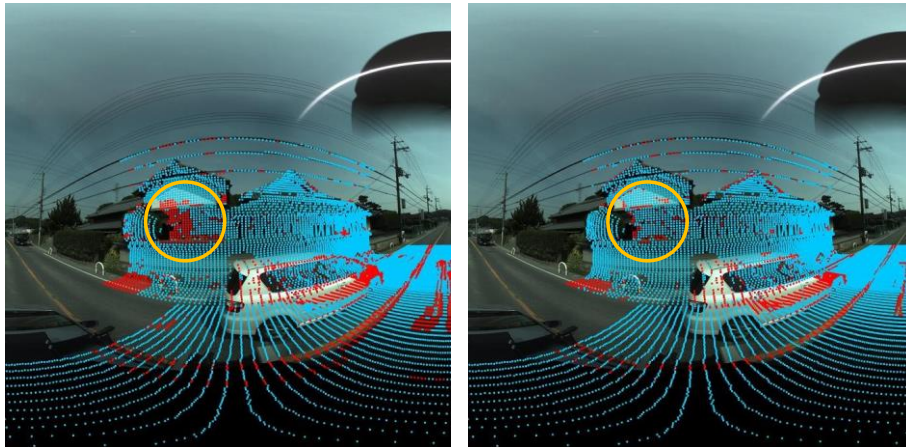


図 43 分散の結果（左）とスライディングウィンドウ（右）を利用した結果 2

3.3.3 三次元点除去における事前知識利用の効果

図 44 は、図 41 に示された移動物体上の候補点とモバイルマッピングシステムとの間の水平距離の分布を表すヒストグラムである。ヒストグラムのビン幅は 10cm に設定しており、正の距離は本システムの右側（実験における対向車線側）を示している。このヒストグラムでは、道路面上に存在する移動物体上の候補点は除外されている。このヒストグラムを見ると、中心軸からの距離 2.2m のところに頻度のピークがあることがわかる。この実験では、 $T = 20$ を使用しており、この値は経験的に設定した値である。

図 45 は、ヒストグラムに基づいて設定された直方体と直方体の内部に存在する点を示している。白色の点が直方体内部の点を示している。本手法において、直方体内部の点は移動物体上の点として決定される。事前知識を利用する前の結果と事前知識を利用して検出した後の結果について、手作業によって確認した検出率を表 2 に示す。この結果から、事前知識の利用によって移動物体上の点の検出率の向上が確認できる。

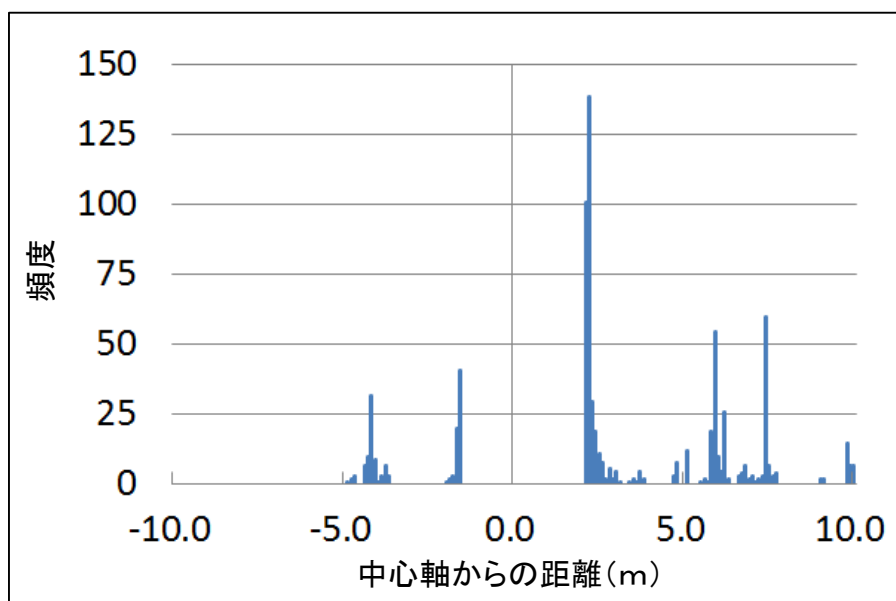


図 44 モバイルマッピングシステムと移動物体上の候補点との間の水平距離（道路面上の点は除く）

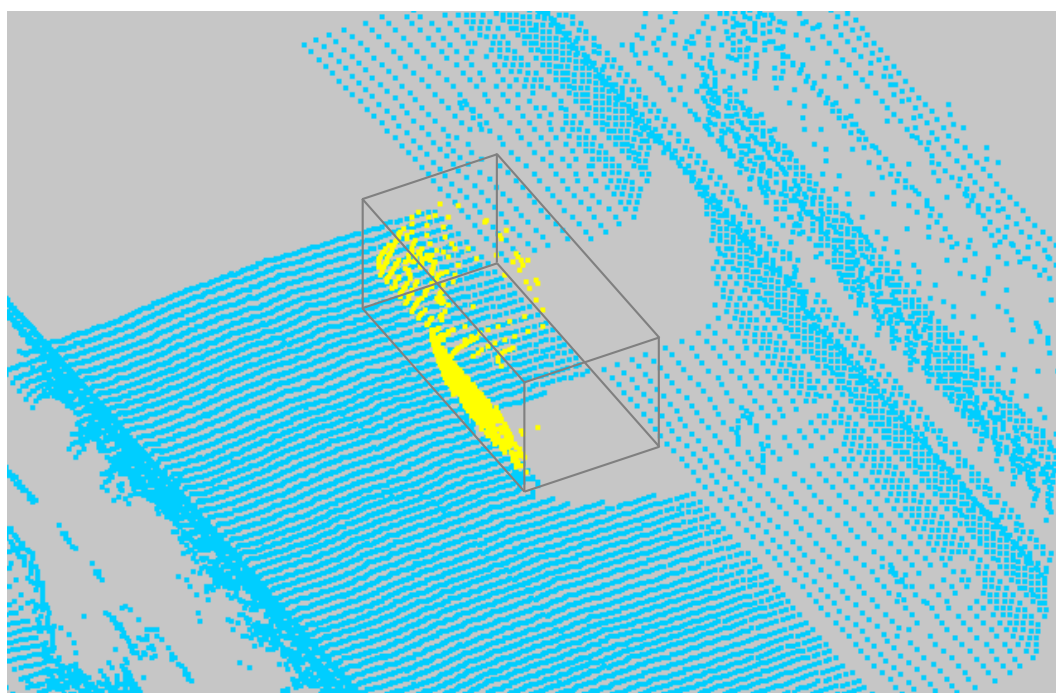


図 45 提案手法による移動物体上の点の検出結果（黄色：移動物体上の点，青色：静止物体上の点）

表 2 検出率の比較

	事前知識なし	最終結果
正答率 (%)	62.5	94.8
誤検出率 (%)	7.1	0.0

3.3.4 移動物体上の点の検出結果

異なるサイズや色の移動物体に対して、移動物体検出実験を行った。赤色自動車に対する検出結果を図 46 に、銀色自動車に対する検出結果を図 47 に、黒色トラックに対する検出結果を図 48 に、黄色バスに対する検出結果を図 49 に示す。各図とも、上段左図は全方位画像の右側（対向車線側）を示しており、上段右図は事前知識を用いることなしに検出された候補点の結果を示している。下段の図は事前知識を利用することによって検出された直方体内側の点を示している。青色の点が静止物体上の点、赤色の点が移動物体上の候補点として検出された結果を表しており、黄色の点は、最終的に移動物体上の点として判定された点、すなわち、事前知識を利用することによって検出された移動物体上の点である。

これらの結果から、提案された方法を利用して様々なサイズや色の移動物体に対して、移動物体上の点を検出することが可能であることがわかる。

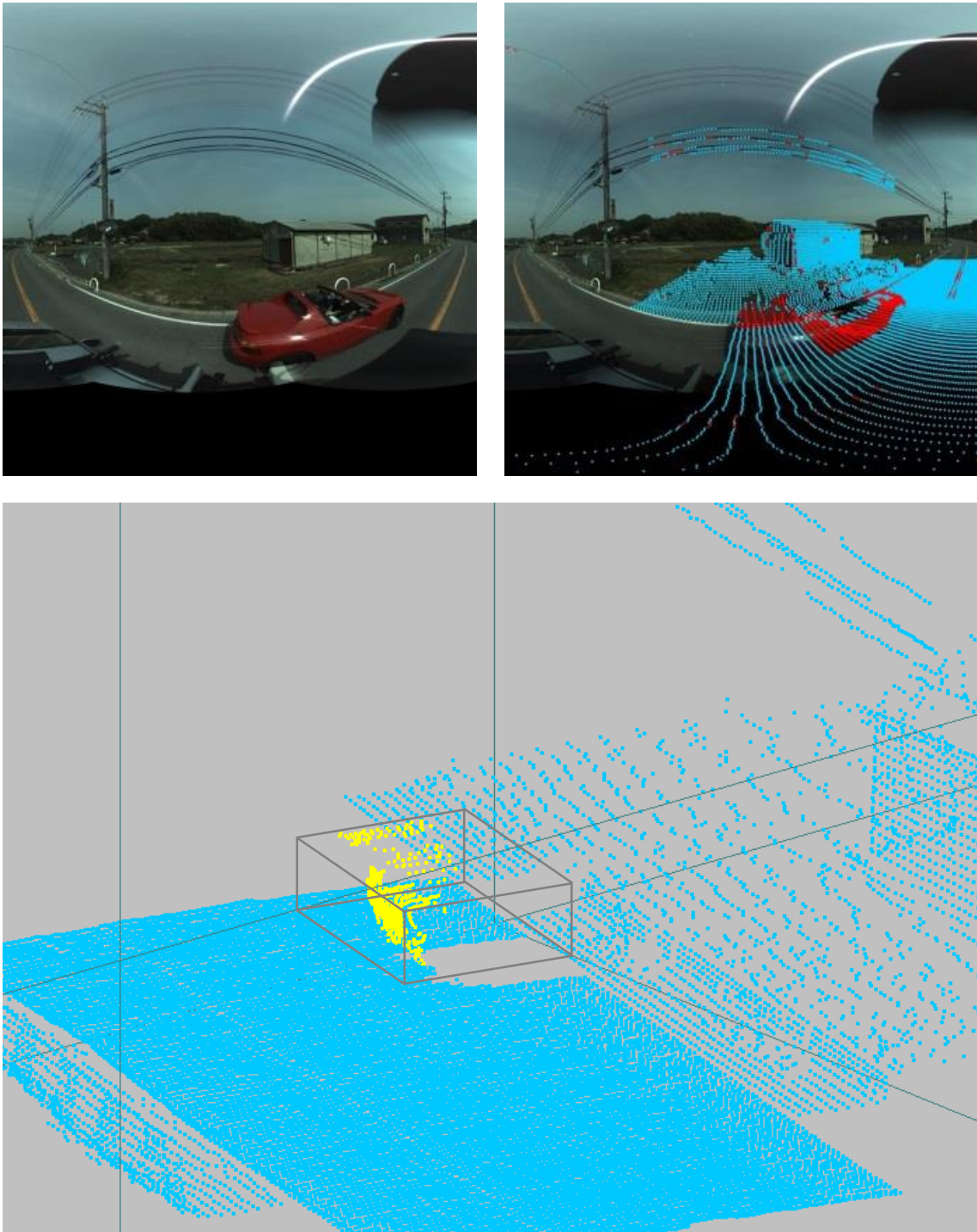


図 46 移動物体の検出結果（赤色自動車）
（左上：全方位画像の右側，右上：フォトコンシステンシーを応用した
移動物体検出結果，下：提案手法による移動物体検出結果）

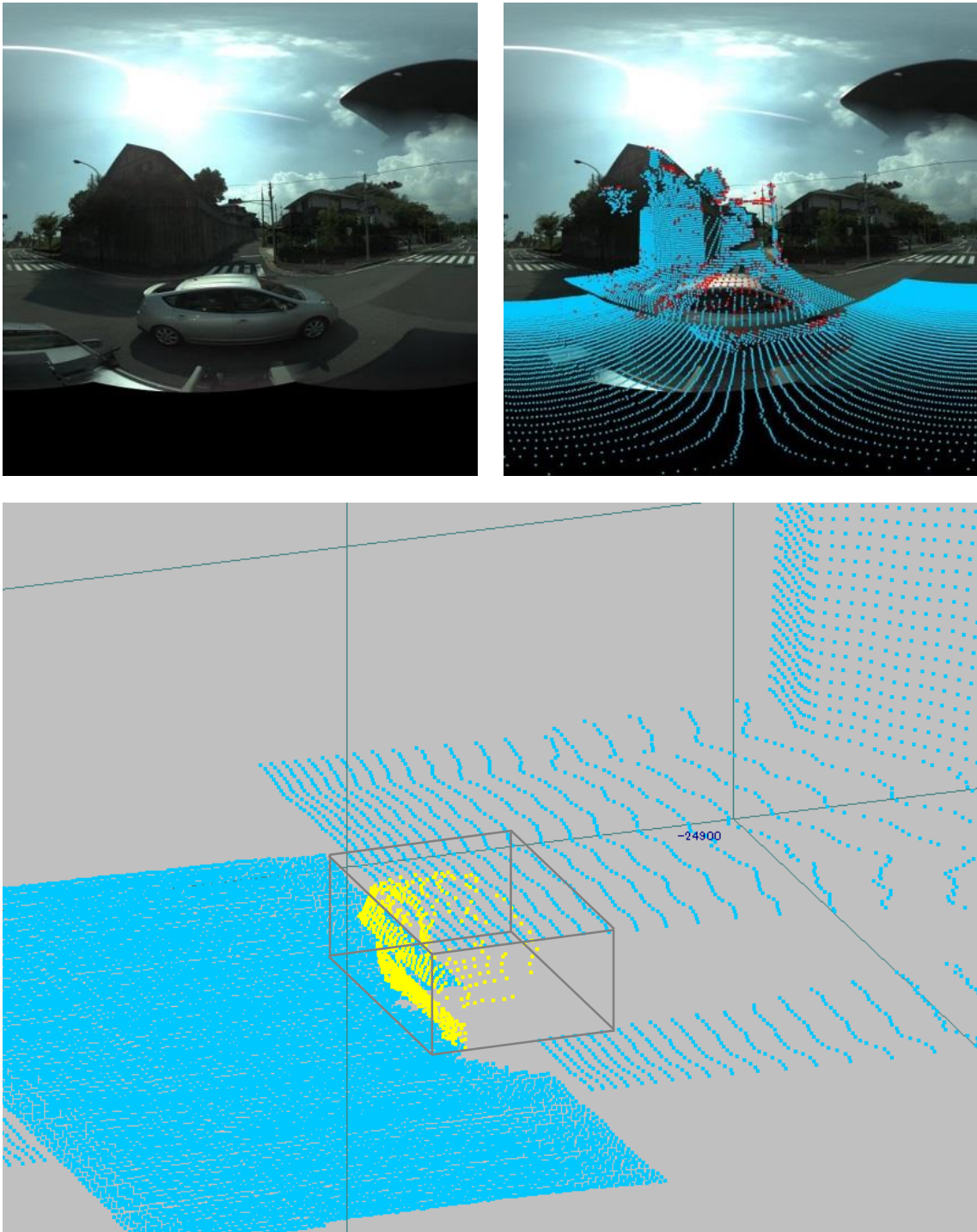


図 47 移動物体の検出結果（銀色自動車）
（左上：全方位画像の右側，右上：フォトコンシステンシーを応用した
移動物体検出結果，下：提案手法による移動物体検出結果）

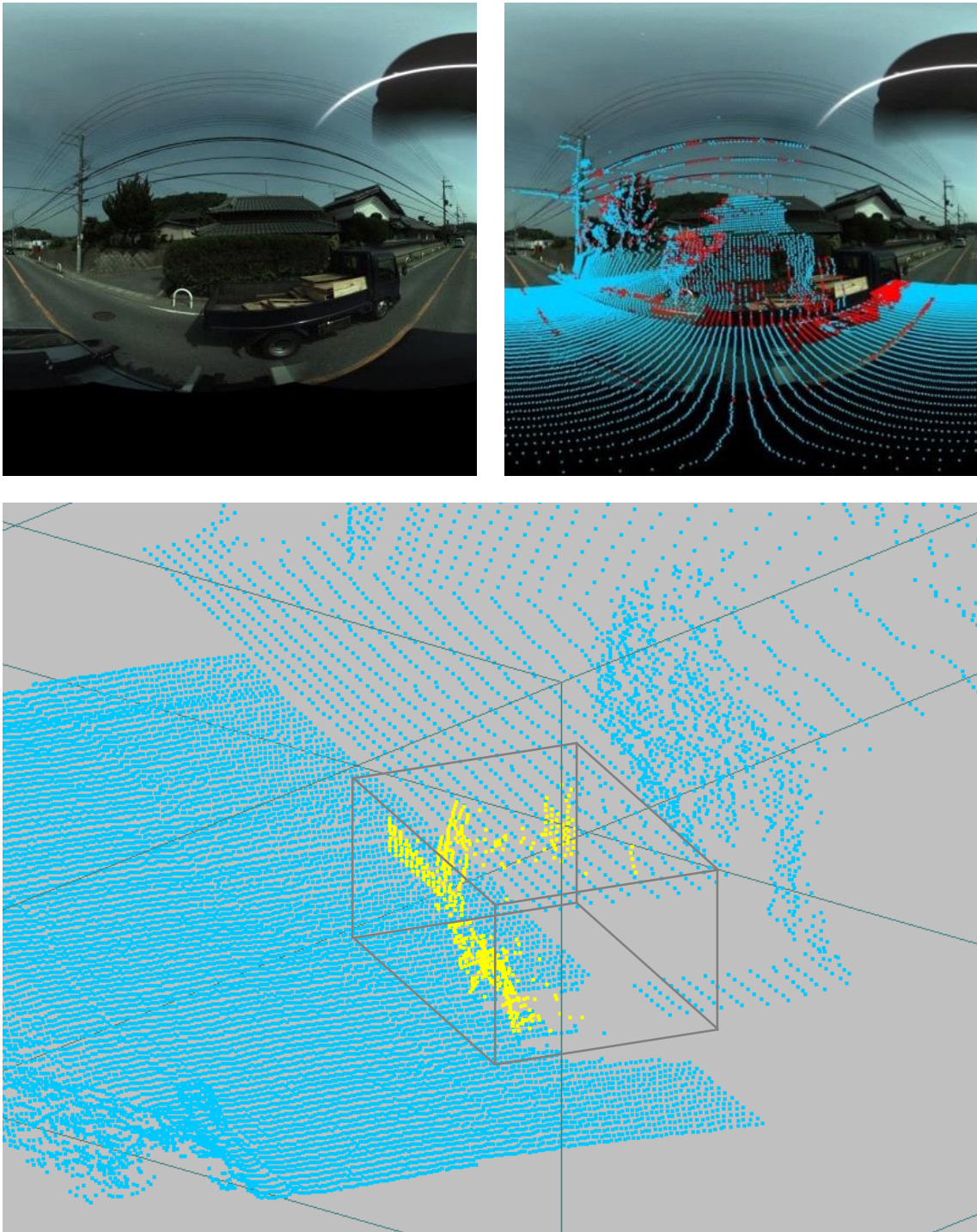


図 48 移動物体の検出結果（黒色トラック）
（左上：全方位画像の右側，右上：フォトコンシステンシーを応用した
移動物体検出結果，下：提案手法による移動物体検出結果）

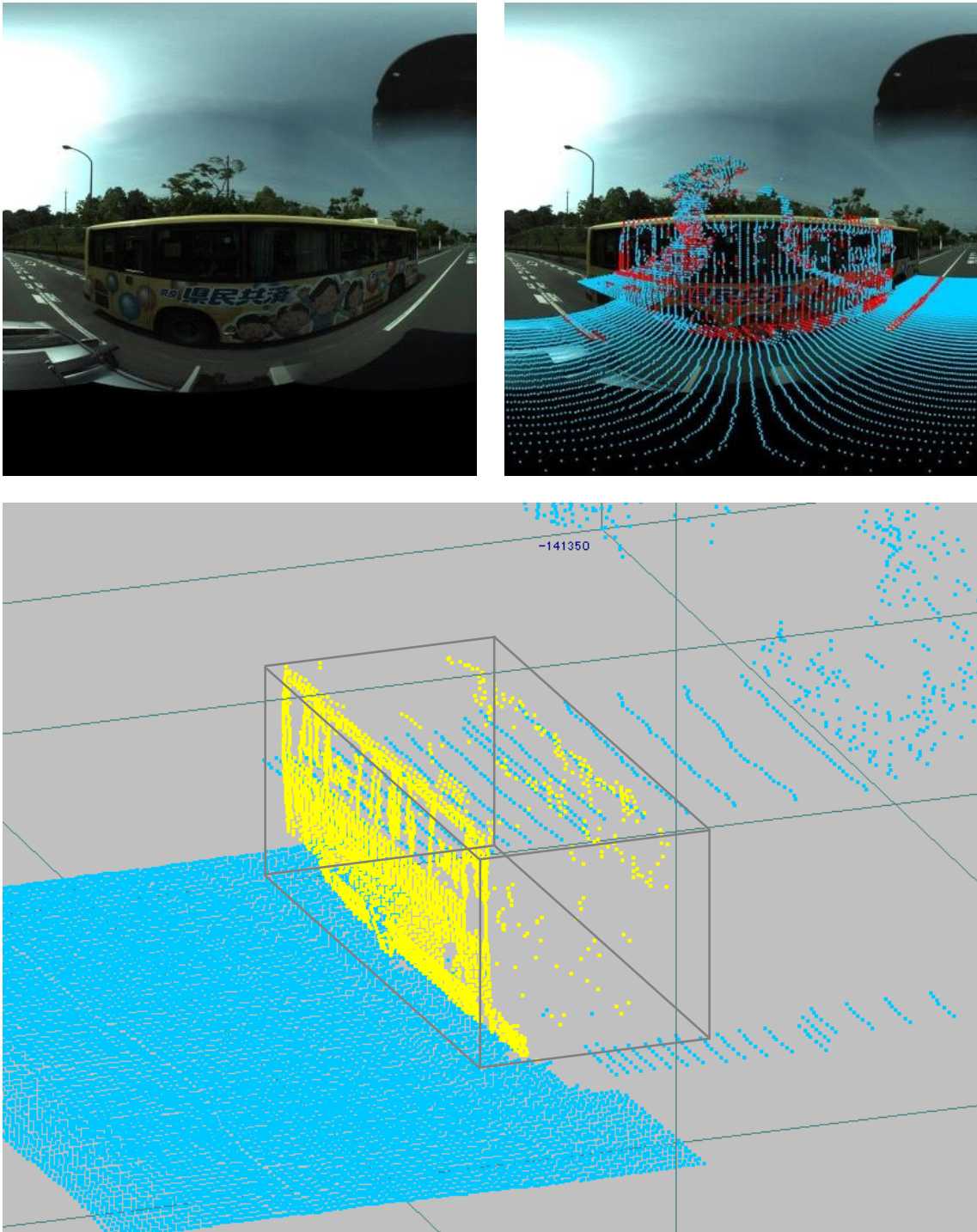


図 49 移動物体の検出結果（黄色バス）
（左上：全方位画像の右側，右上：フォトコンシステンシーを応用した
移動物体検出結果，下：提案手法による移動物体検出結果）

本提案手法によって、全ての移動物体上の点が検出できれば問題はないが、実験を進めるに従って、移動物体上の点が検出できない2つのケースを確認した。移動物体上の点が検出できない2つのケースとして、自動二輪車の検出結果を図 50 に、銀色自動車の検出結果を図 51 に示す。図 50 の自動二輪車の場合、サイズが小さいためにヒストグラムのピークが検出できなかった。図 51 の銀色自動車の場合、移動物体の色と背景の色が類似しているため、移動物体を検出できなかった。これらの検出については、次節において検討を行う。

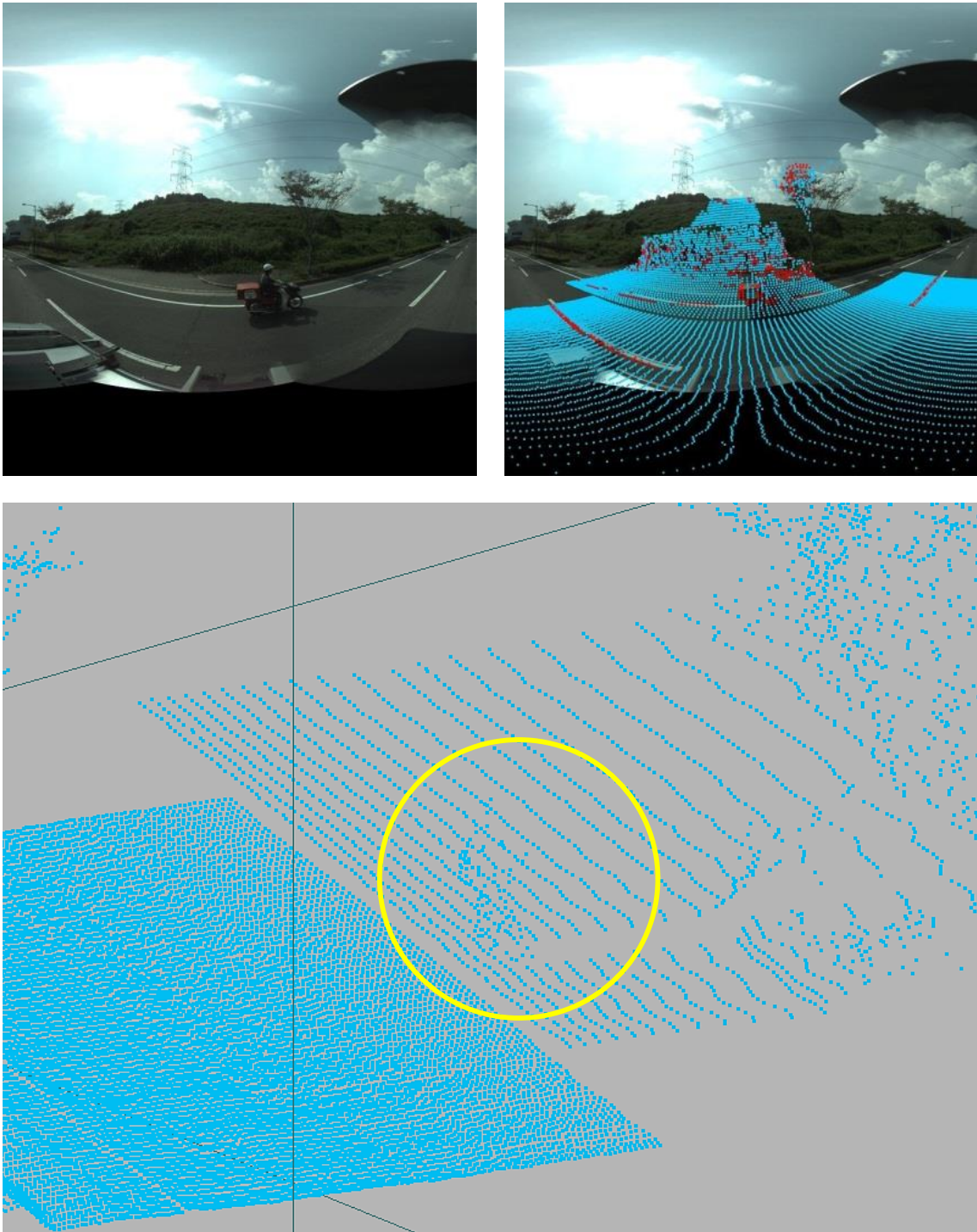


図 50 移動物体検出の失敗例（自動二輪車）
（左上：全方位画像の右側，右上：フォトコンシステンシーを応用した
移動物体検出結果，下：提案手法による移動物体検出結果）

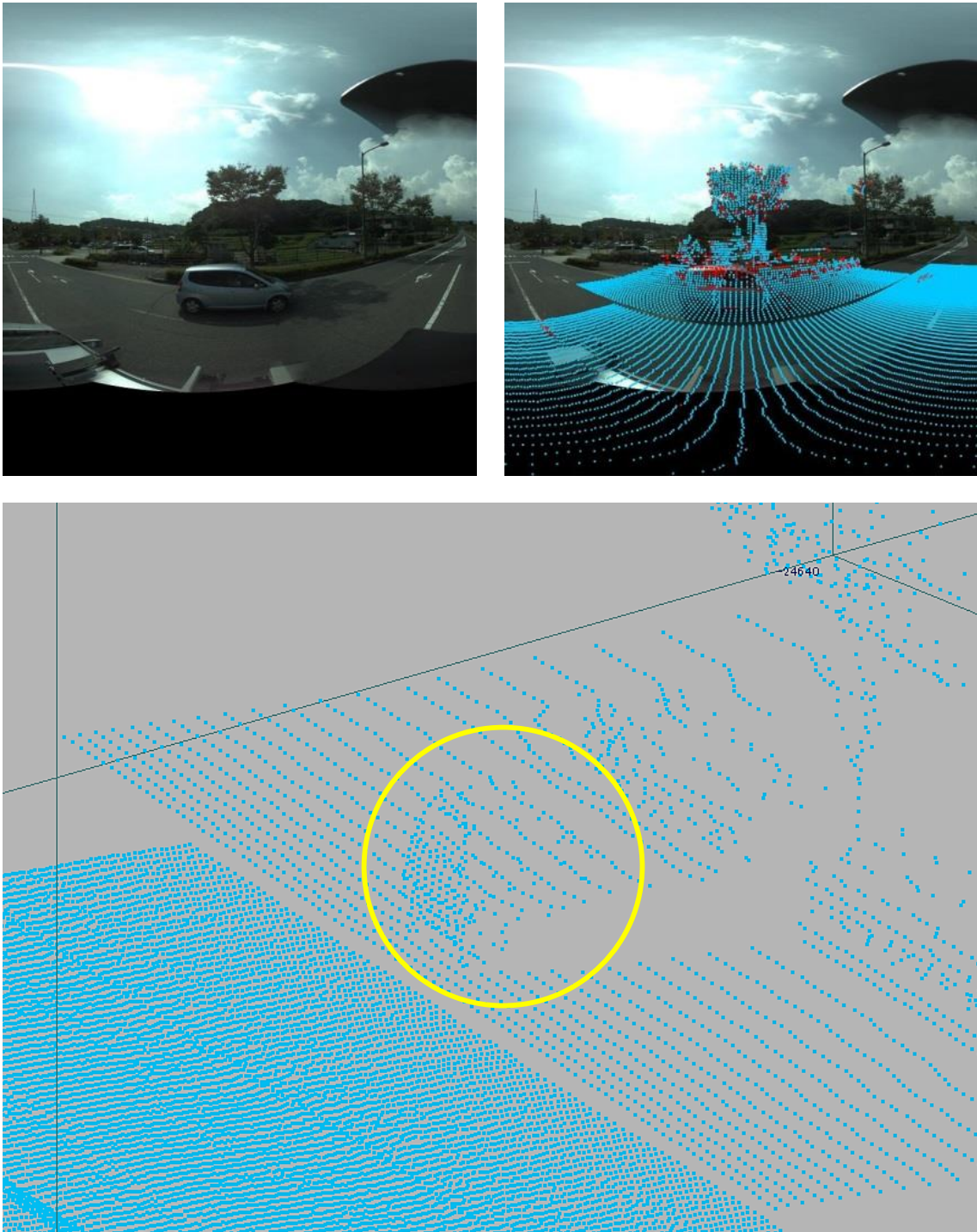


図 51 移動物体検出の失敗例（銀色自動車）
 （左上：全方位画像の右側，右上：フォトコンシステンシーを応用した
 移動物体検出結果，下：提案手法による移動物体検出結果）

3.4 移動物体検出に関する検討

移動物体上の点が検出できない2つのケースは、自動二輪車と銀色自動車の検出である。自動二輪車はサイズが小さいため、提案手法で利用したヒストグラムの頻度の値が小さく、ピーク検出が困難であった。銀色自動車の場合は、移動物体の色と背景の色が類似しているため、移動物体を検出できなかった。移動物体の検出手法として、フォトコンシステンシーを応用しており、移動物体の色と背景の色が同一であれば原理的に検出困難である。ただし、実際の検出例では、太陽光等の光源の位置により陰影や表面反射が発生するため、色の変化が発生し、銀色自動車であっても検出できる場合がある。検出できなかった例について調査すると、サイズが原因の例と同様に、ヒストグラムのピーク検出ができていなかった。そこで、ピーク検出のしきい値を小さくして移動物体検出実験を行った。

なお、本論文の提案手法において、停止している車両は検出の対象外である。また、移動速度の遅い人物や軽車両も検出の対象外である。

3.4.1 移動物体検出

移動物体の検出手法において、ヒストグラムを利用して走行車両の側面の位置の推定を行っている。ヒストグラムの小さなピークも検出できるように、しきい値 $T = 20$ を、 $T = 0$ に変更して移動物体検出実験を行った。

自動二輪車の検出結果を図 52 に、その時のヒストグラムを図 53 に示す。また、銀色自動車の検出結果を図 54 に、その時のヒストグラムを図 55 に示す。図 52、図 54 において、移動物体上の点の検出結果は黄色で表している。銀色自動車の検出はできているが、自動二輪車の場合は誤検出が発生している。図 52 の誤検出は、車道と歩道間に存在する街路樹を検出しており、道路に沿って続く街路樹の一部分のみが測定範囲に存在したため自動で除外することができなかった。しきい値を小さくすることによって、このような誤検出が発生する。この誤検出の場合は測定対象となる点群数を増加させることによって改善できる。図 52 で利用した点群データを 40000 点に変更して実施した自動二輪車の検出結果を図 56 に示す。また、その時のヒストグラムを図 57 に示す。移動物体上の点の検出結果は黄色で表している。図 56 から自動二輪車の検出が可能であることが確認できる。

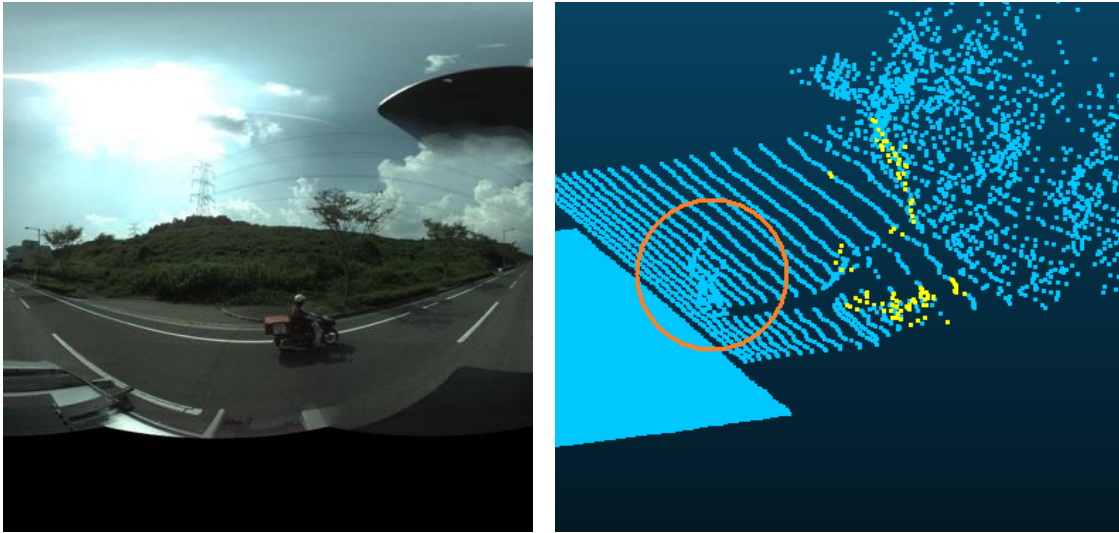


図 52 移動物体の検出結果（誤検出）
 （左：全方位画像の右側，右：移動物体検出結果）

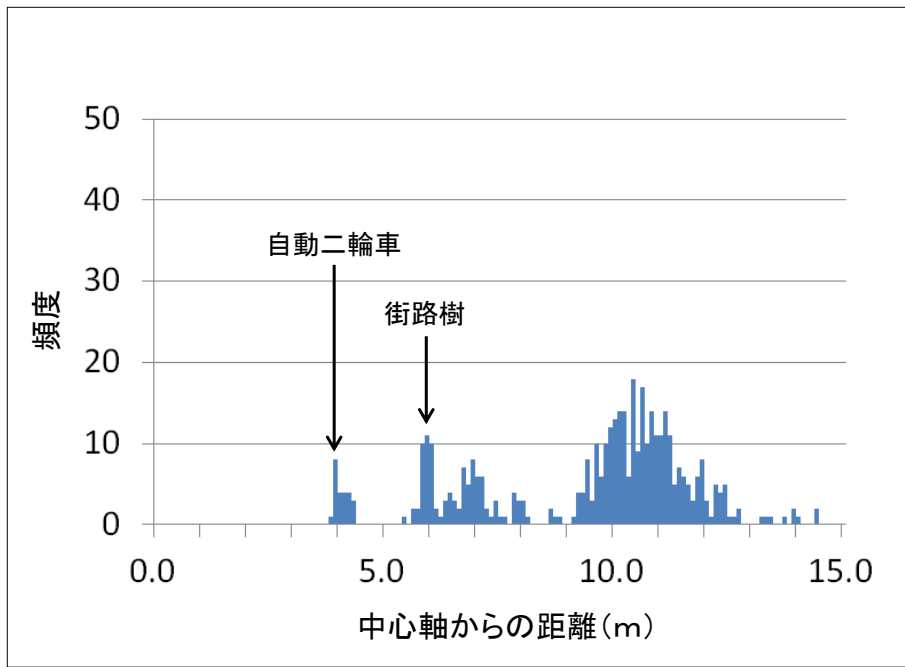


図 53 ヒストグラムの測定結果（誤検出）

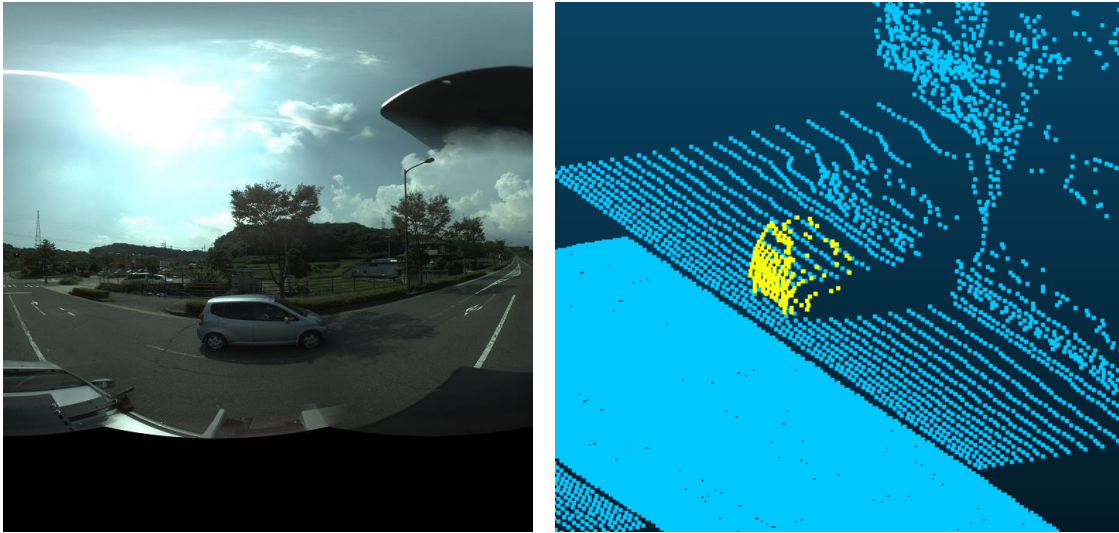


図 54 移動物体の検出結果（銀色自動車）
 (左：全方位画像の右側，右：移動物体検出結果)

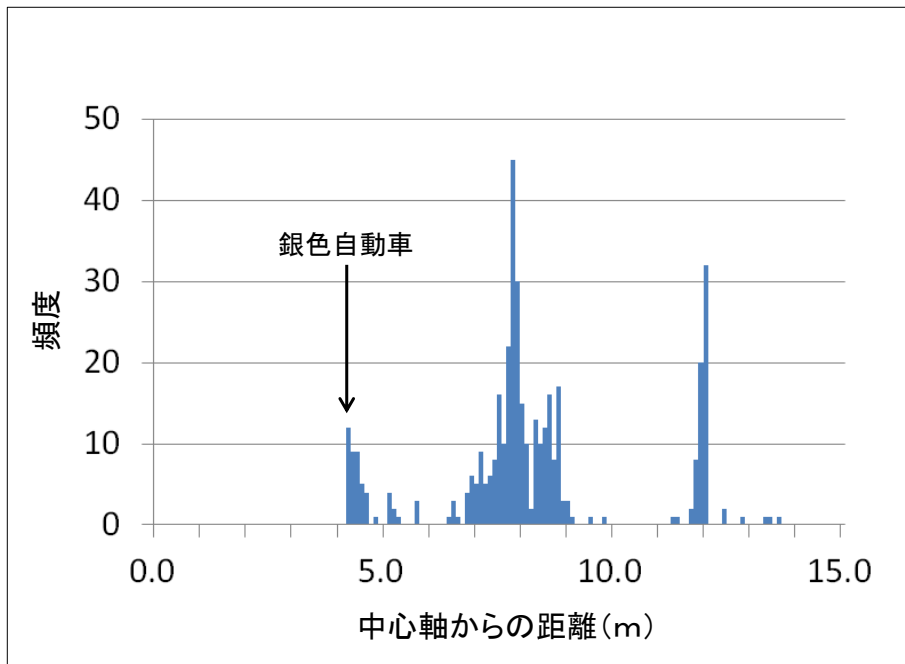


図 55 ヒストグラムの測定結果（銀色自動車）

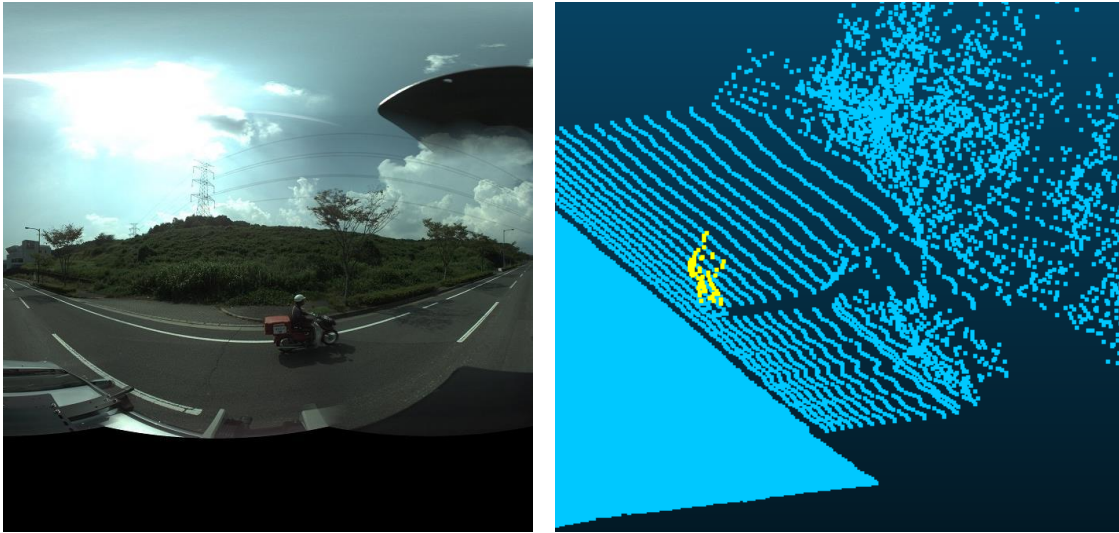


図 56 移動物体の検出結果（自動二輪車）
 (左：全方位画像の右側，右：移動物体検出結果)

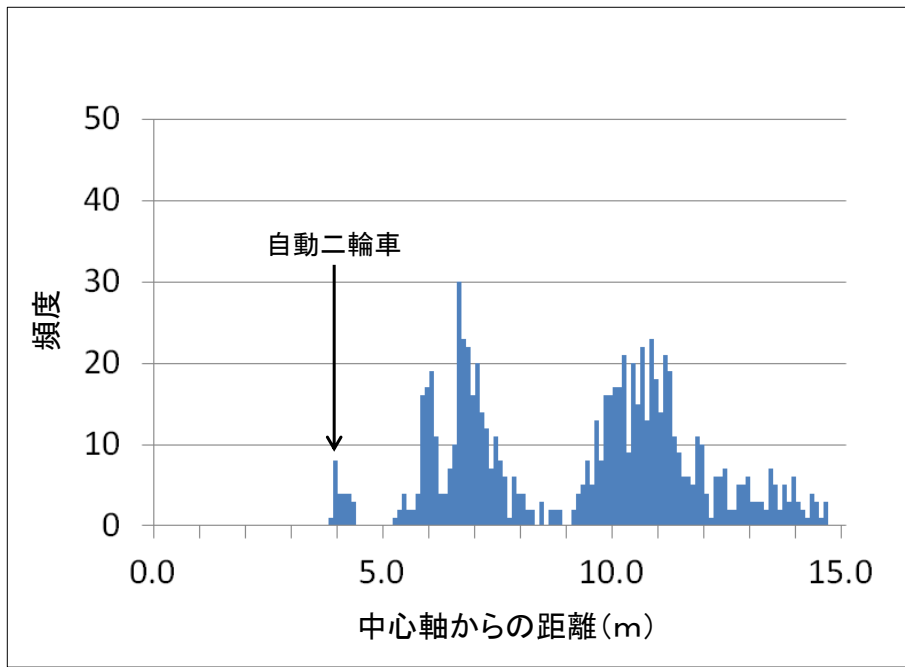


図 57 ヒストグラムの測定結果（自動二輪車）

3.4.2 自動二輪車の検出

3.2.2 で述べた手法は、自動車を対象として移動物体の検出領域である直方体を設定している。自動二輪車（原動機付き自転車を含む）の場合、車幅が短くなるうへ、路側帯付近を走行することが多い。車道と歩道の境界に街路樹やガードレールが存在する場合、自動二輪車と街路樹等を同一の物体と誤り、自動二輪車の見落としや街路樹等の誤検出が発生する場合が考えられる。そのため、検出領域である直方体の幅を短く設定する必要がある。図 38 に示す直方体の幅を 1.0m に、高さを 2.5m に設定変更し、自動二輪車専用の移動物体検出実験を行った。高さの制限は、不要な障害物を除外するための設定である。また、ヒストグラムのピークの検出位置から 60cm 内側の領域も移動物体領域とした。自動車の場合、側面の位置に相当する点群の位置を集計することにより、ヒストグラムのピークを検出することができるが、自動二輪車の場合、明確な側面の位置を検出することは困難である。そのため、十分な余裕を持って領域設定を行っている。

自動二輪車の検出実験を行った結果を図 58 に、その時のヒストグラムを図 59 に示す。移動物体上の点の検出結果は黄色で表している。実験に利用した点群数は 40000 点である。全方位画像は 2 m 毎に撮影しており、移動物体検出時のパラメータは、 $M = 3$ 、 $T = 0$ を利用している。図 58 から自動二輪車の検出が可能であることが確認できる。図 59 のヒストグラムでは、3 つのピークを確認することができる。中心軸からの距離 7.1m の位置に存在する頻度のピークが自動二輪車の位置を示しているが、その位置より中心軸に近い位置も同じような頻度を示していることがわかる。この部分も自動二輪車を測定した点群であり、ピーク的位置から遠い部分のみを移動物体上の点として判定すると、これらの点群が未検出となる。図 59 の中心軸からの距離 8.3m と 12.4m の位置のピークは、街路樹とフェンスが存在する場所である。移動物体検出の直方体によって領域検出を行うと、12m 以上の長さがあるため移動物体上の点から除外されている。

自動二輪車専用の検出手法に変更することにより、移動物体上の点の検出が可能であることが確認できた。今後の課題として、検出事例を増やすことにより、自動二輪車専用の検出手法の有効性を確認する必要がある。また、自動二輪車専用の検出手法は自動車の検出手法と併用して利用する必要があるため、これらの手法を組み合わせた移動物体検出実験を実施する必要がある。この点についても今後の課題である。

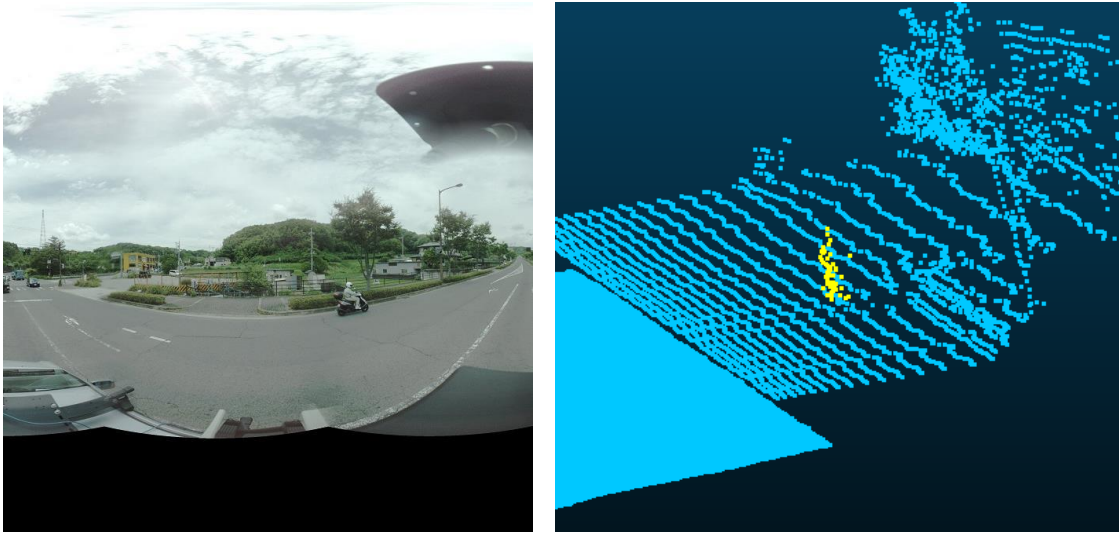


図 58 自動二輪車専用の検出手法による移動物体の検出結果
 (左：全方位画像の右側，右：移動物体検出結果)

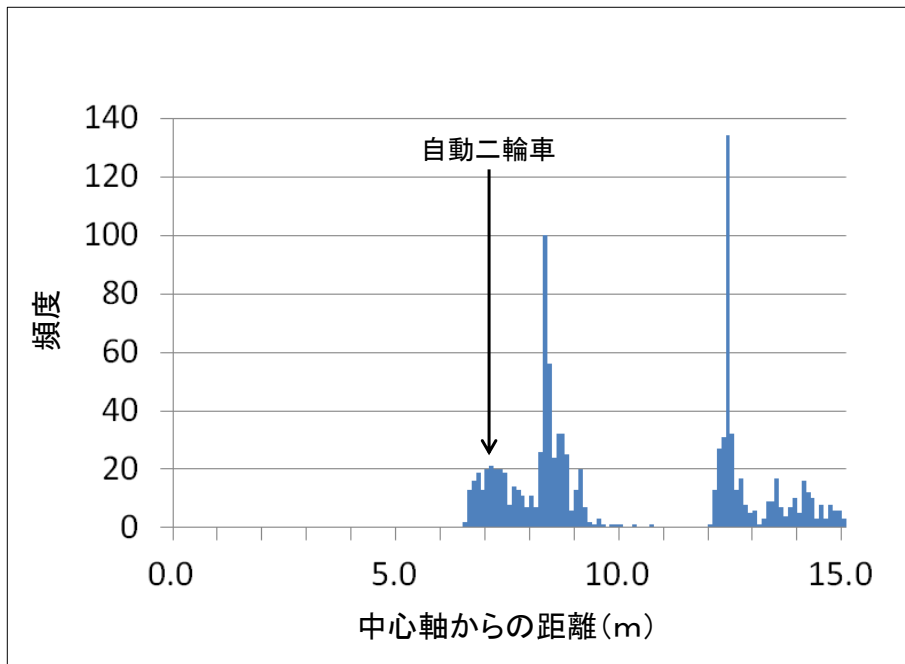


図 59 ヒストグラムの測定結果（自動二輪車専用の検出手法）

3.5 結言

本章では、フォトコンシステンシーと道路環境の事前知識に基づいて、三次元点群データから移動物体上の三次元点を検出する手法の提案を行った。静止物体上の点が他の物体によって隠蔽される問題（オクルージョンの問題）を回避するために、スライディングウィンドウの手法を採用した。実験により、スライディングウィンドウの手法の有効性を検証するとともに、道路環境の事前知識を利用して移動物体上の点を検出した。異なるサイズや色の移動物体に対して検出実験を行い、提案手法の有効性を確認した。また、移動物体が検出できない2つのケースについて確認を行うとともに、検出条件を変更することにより、移動物体検出が可能であることを確認した。

移動物体上の点を除去した後の欠損領域の補間方法については第4章で述べる。なお、第4章の欠損領域の補間では、自動車を対象とする補間を実施しているので、3.2.2で述べた手法により移動物体検出を行う。

4. 欠損領域に対する点群データの補間

4.1 序言

本章では，広域屋外環境の三次元モデルの自動生成において，第3章で述べた移動物体上の点を検出した後に必要になる，移動物体の隠蔽により測定できなかった欠損領域を補間する手法について提案を行う．この方法は，静止物体上の点群データを距離情報に置き換え，欠落した点群データの周囲に存在する点群データの距離情報を事例とすることにより欠損領域を補間する．その後，補間された距離情報を基に欠損領域内の各点の三次元モデル上の位置を計算し，動画データである複数の全方位画像上にその点を投影する．複数の画像に投影された点の色情報から補間された点の色情報を決定する．この方法により，欠損領域に存在する点の距離情報と色情報を決定し，欠落した領域を補間した三次元モデルを生成する．

4.2 欠落した点群データの修復

移動物体の隠蔽により欠落した点群データを補間するため，まず点群を距離画像に変換し，距離情報を利用することにより補間を行い，補間した距離情報を利用して色情報を補間する手法を提案する．具体的な方法は以下のとおりである．

4.2.1 距離画像の生成

測定された三次元点とシステムの関係を図 60 に示す．システムの中心から各測定点までの水平方向の距離を測定し，レンジファインダの測定ラインごとに整理させる．これにより，図 61 のような距離画像を生成する．

図 61 において，各ラインの測定時刻は右から左へ進行しており，図 61 上部がシステムの右側，下部がシステムの左側，中央部がシステムの斜め後方の距離情報を表している．図 61 中央部の位置が右方向に平行移動しているのは後方レーザが斜め下後方を測定している影響を考慮しており，上部，中央部，下部の高さの違いは1ライン分を測定した点群数の違いによるものである．

レンジファインダの測定結果には，空や測定対象が遠方に存在する等の理由で距離情報が得られなかった領域がある．ここでは，距離情報が得られた部分はデータ領域 Φ とし，距離情報が得られなかった部分はデータ領域外 Ψ とする．また，点群データを利用して距離画像を生成するとき，距離画像の左右両端には点

群データが存在しない領域が生じる。この領域もデータ領域外 Ψ として区別する。

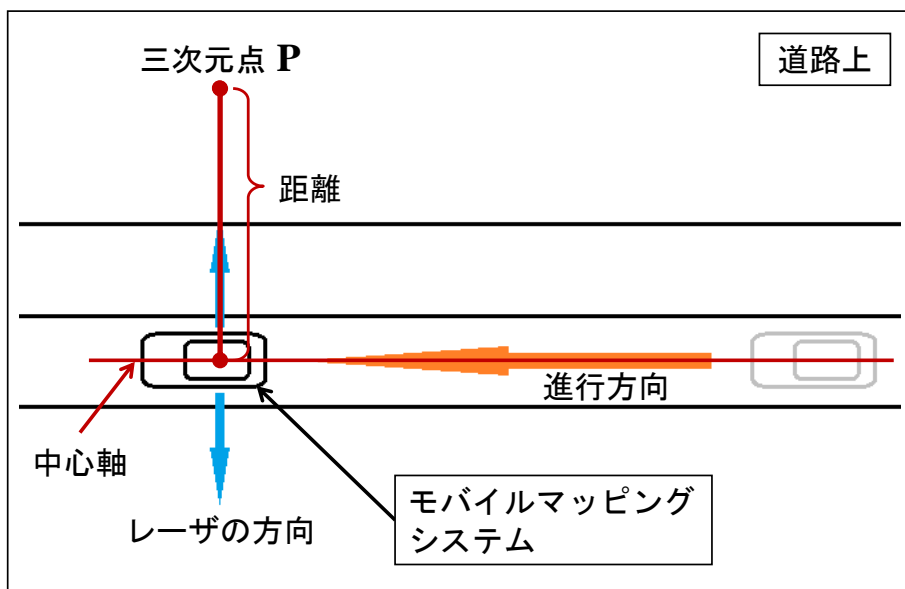


図 60 三次元点とモバイルマッピングシステムとの関係

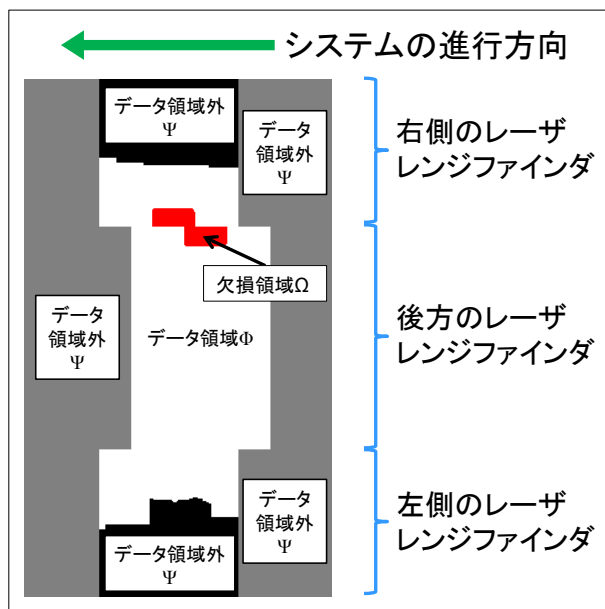


図 61 距離画像と各領域

4.2.2 点群データの距離情報の補間

図 61 のデータ領域 Φ において、移動物体上の点を補間すべき点として区別すると、生成された距離画像の内部に、移動物体により隠蔽された領域が表れる。この領域について、Kawai ら[90]が提案した対称性と明度変化および局所性を考慮したエネルギー関数を最小化する手法を用いて、周辺の情報を事例として用いることにより点群データを補間する。

図 62 に示すように、データ領域 Φ をさらに細かく分類し、欠損領域 Ω を含む領域 Ω' と、領域 Ω' 以外のデータ領域 Φ' に分ける。領域 Ω' 内の画像の尤もらしさをデータ領域 Φ' 内の画像パターンを用いてエネルギー関数として定義する。ただし、データ領域外 Ψ については、データが存在しないので、この計算から除外する。距離画像内において一定サイズの正方ウィンドウ W 内に一部でも Ω が含まれるウィンドウの中心画素の集合を Ω' とする。エネルギー E を、領域 Ω' 内の画素 x_i とデータ領域 Φ' 内の画素 x_j 周辺のパターン類似度を用いて以下のように定義する。

$$E = \sum_{x_i \in \Omega'} w_{x_i} \{ \text{SSD}(x_i, x_j, T_{x_i x_j}) + \kappa \text{SD}(x_i, x_j) \} \quad (4.1)$$

ここで、 $\text{SSD}(x_i, x_j, T_{x_i x_j})$ は画素位置 x_i と x_j との間の明るさと対称性を考慮したパターン類似度を表し、 $\text{SD}(x_i, x_j)$ はテクスチャの局所性を考慮したコスト関数を、 w_{x_i} は重みを表す。領域 $\Omega' \cap \bar{\Omega}$ では各画素の真値が既知であるため $w_{x_i} = 1$ を、領域 Ω では境界に近いほど画素値の信頼度が高くなるため $w_{x_i} = c^{-d}$ (d は Ω の境界から画素 x_i までの距離、 c は定数) を用いる。 κ は SSD 項と SD 項との相対的な重み計数を表す。

$\text{SSD}(x_i, x_j, T_{x_i x_j})$ を以下のように定義する。

$$\text{SSD}(x_i, x_j, T_{x_i x_j}) = \sum_{p \in W} \{ I(x_i + p) - \alpha_{x_i x_j} I(x_j + T_{x_i x_j} p) \}^2 \quad (4.2)$$

ここで、 $I(x_i)$ は画素 x_i の画素値を表し、 p はウィンドウ W 内の変位ベクトルを表す。さらに $\alpha_{x_i x_j}$ は x_i 周辺と x_j 周辺のそれぞれの平均輝度値の比によって定義される明度補正係数[89]を表し、 $T_{x_i x_j}$ はデータ領域のテクスチャの幾何学的変換を許容するための座標変換行列を表す。 $T_{x_i x_j}$ は

$$T_{x_i x_j} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

の値を利用することによって、4パターンの対称的なテクスチャの比較を行う。

式(4.1)で定義したエネルギーEを最小化することにより、各画素の距離情報の補間を行う。具体的なエネルギー最小化の方法として、本研究では Kawai ら [90]の手法を利用する。

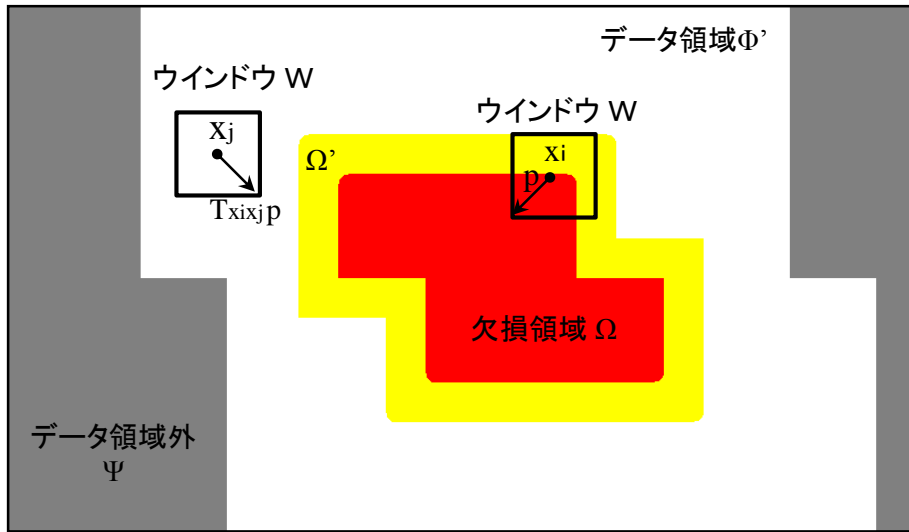


図 62 距離画像上のデータ領域と欠損領域

4.2.3 点群データの色情報の補間

補間した距離画像を基に色情報の補間を行う。まず、点群データの各点が測定された直近の画像を基準フレームとすると、移動物体の遮蔽領域に補間された点群を基準フレームに投影した場合、移動物体上に投影される可能性が高い。このため、基準フレームを含まない基準フレーム前後それぞれM枚の画像に各点を投影し、それらの画素値にベクトルメディアンフィルタ [50]を適用することで中央値を計算し、これを補間された点の画素値 v_{out} として利用する。つまり、以下の式により中央値が算出される。

$$v_{out} = \underset{v \in \{v_{-M}, \dots, v_{-1}, v_1, \dots, v_M\}}{\operatorname{argmin}} \left\{ \sum_{i=-M}^{-1} \|v - v_i\|_2 + \sum_{i=1}^M \|v - v_i\|_2 \right\} \quad (4.4)$$

次に、静止物体上の点に関しては、基本的には、基準フレームに投影し、その画素値 v_0 を用いることで、三次元モデルの色情報を決定する。しかし、周辺に存在する移動物体の影の映り込みや、点群データの取得周期と動画データの撮影タイミングが異なるために生じる影響で、静止物体上の点群に移動物体の映像が残る場合 [103] がある。これらの影響を除去する必要があるため、移動物体が含まれる基準フレームに属する静止物体上の点に対しては、 $2M + 1$ 個の画素値のベクトルメディアンフィルタの出力を利用する。すなわち、以下の式により各点の画素値を決定する。

$$v_{out} = \underset{v \in \{v_{-M}, \dots, v_M\}}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=-M}^M \|v - v_i\|_2 \quad (4.5)$$

4.2.4 三次元モデルの生成

距離情報と色情報を補間した点群データを基に移動物体を取り除いた後の三次元モデルを生成する。距離画像の各点とシステムの位置関係は既知であるので、その情報から三次元点群を復元し、各点の色については 4.2.3 の色情報の補間で決定した値を利用する。

4.3 実験結果

提案手法の有効性を検証するために、第 2 章で述べたモバイルマッピングシステムを利用して、屋外の環境の測定を行い、取得したデータに対して、第 3 章で述べた移動物体上の点群の検出手法を適用し、その後、本章で提案した補間手法を適用した。この実験では、全方位画像を 2 m 毎に撮影した。レンジファインダの測定周期は 75Hz である。

4.3.1 移動物体上の点の検出

モバイルマッピングシステムで撮影した全方位画像の例を図 63 に示す。図 63 右側の白い自動車が対向車両であり、移動物体である。この画像を撮影した時刻とほぼ同時刻に取得された点群データを図 64 に示す。ここで表示した点群の数は 30000 点である。中央部分の点群が道路を測定した結果であり、道路上に存在する密集した点群が移動物体である。図 64 の点群に対して移動物体上の点を判定した結果を図 65 に示す。黄色の点が移動物体上の点を表しており、青色の点

が静止物体上の点を表している.



図 63 全方位画像の例

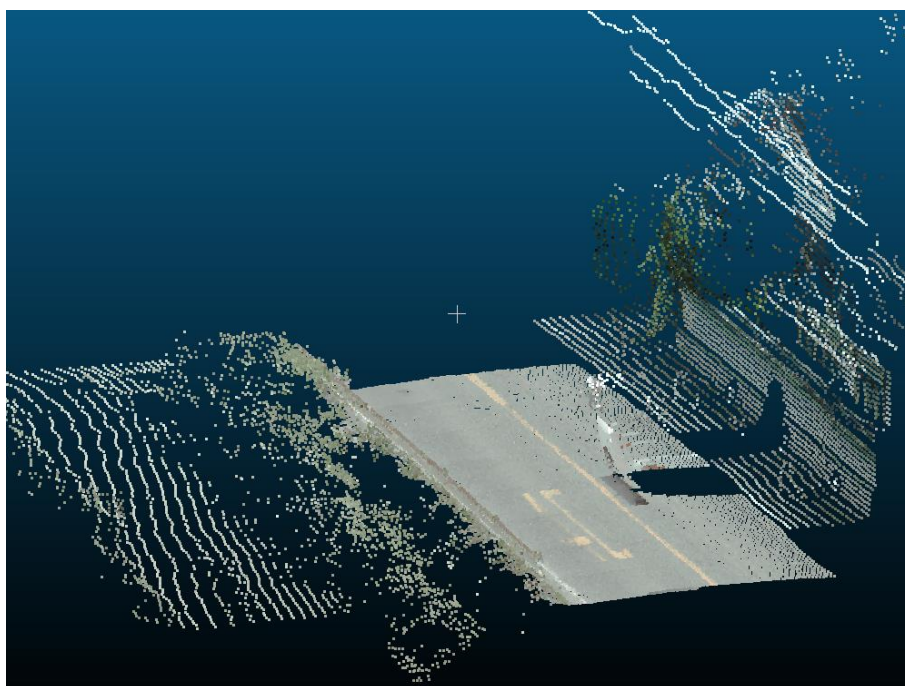


図 64 屋外環境の測定結果

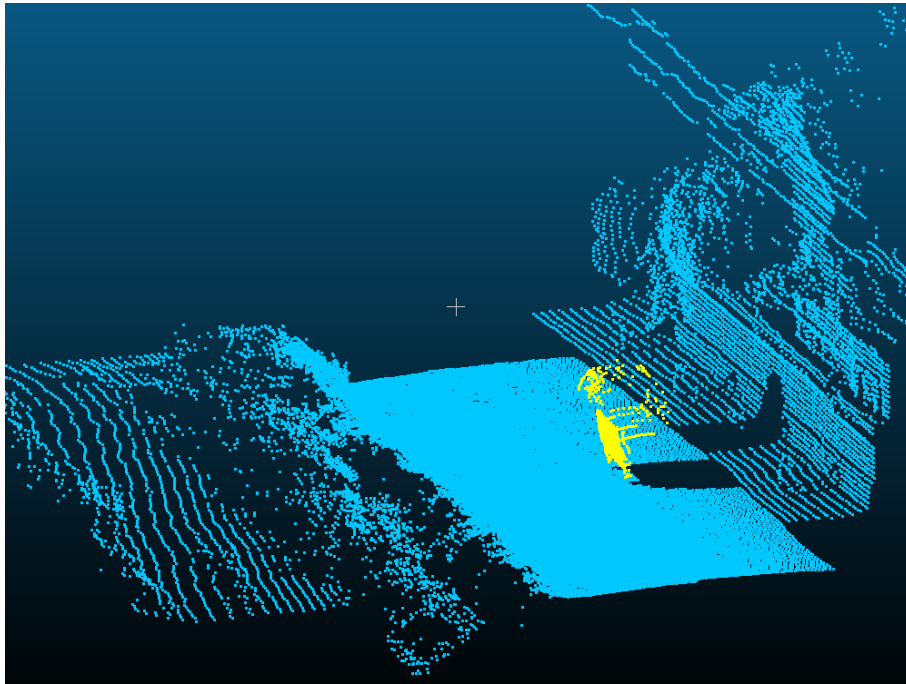


図 65 移動物体の検出結果
(黄色：移動物体上の点，青色：静止物体上の点)

4.3.2 距離画像の生成と点群データの補間

図 65 で得られた判定結果に基づき移動物体上の点を取り除き，残りの点群から距離画像を生成する．システムから各測定点までの水平方向の距離を計算し，点群データの取得順に整列させた結果を図 66(a)に示す．図 66(a)は，システムの位置 (0m) から 25m まで距離を 0.5m 間隔で，16bit の距離画像として記録しており，近い点を明るく，遠い点を暗く表示している．なお，図中の赤色部分が移動物体上の点として判定された点であり，この部分が欠損領域である．

次に，図 66(a)の距離情報を，基準フレームの投影点の画素値に置き換えてカラー画像として表示した結果を図 66(b)に示す．図中の赤色部分が欠損領域である．この図をよく見ると，欠損領域の左側の一部に移動物体の映像を，欠損領域の右下に移動物体の影を確認することができる．

最後に，式(4.1)を利用して距離画像の欠損領域を補間した結果を図 66(c)に示す．図 66 の(a)と(c)を比較することにより，図 66(a)で示された欠損領域がなくなり，違和感なく補間されていることが確認できる．

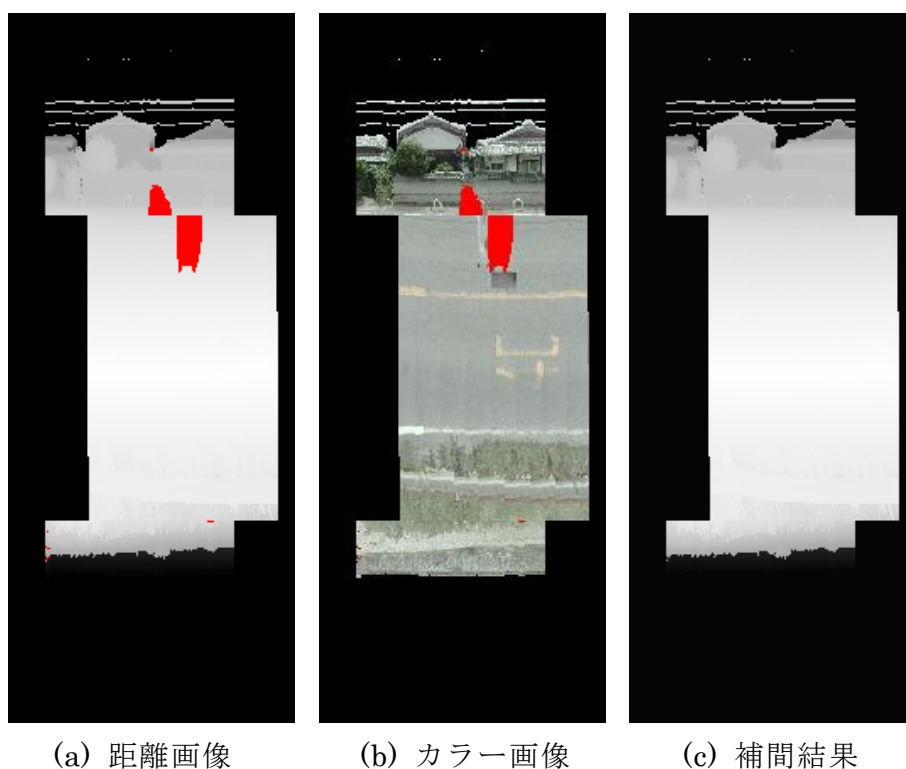
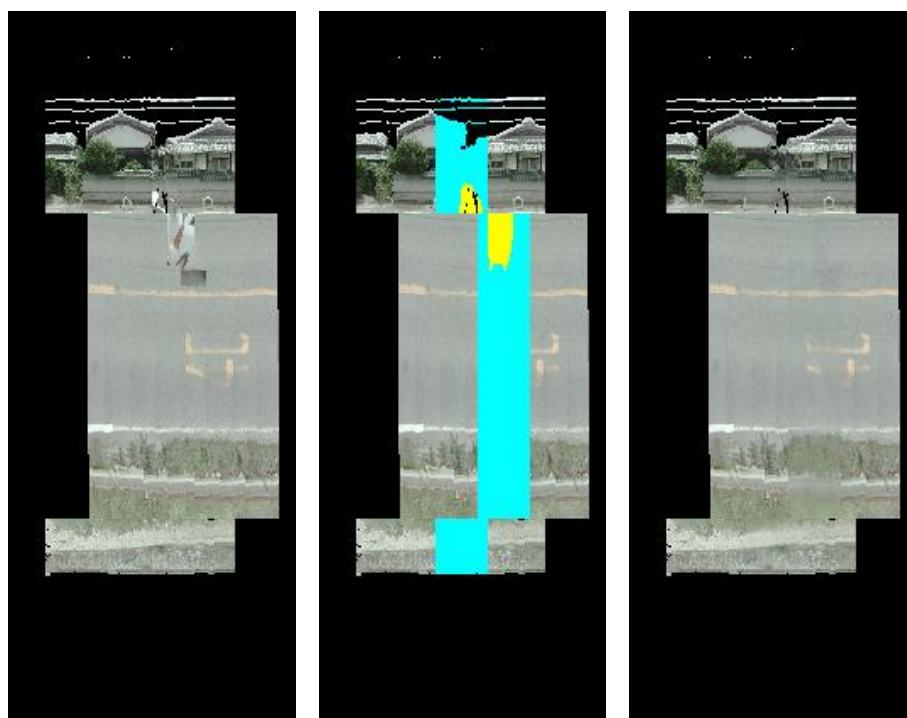


図 66 距離画像の生成と補間結果

図 66(c)で得られた補間結果を動画像データの基準フレームに投影し、カラー画像を生成した結果を図 67(a)に示す. この図と図 66(b)を比較することにより、欠損領域の部分に移動物体の映像が存在することがわかる.

次に、移動物体上の点、及び、移動物体が含まれる基準フレームに属する静止物体上の点をカラー画像として表示した結果を図 67(b)に示す. この図において、移動物体上の点は黄色で表示されており、移動物体が含まれる基準フレームに属する静止物体上の点は青色で表示されている.

最後に、式(4.4)、(4.5)を利用して色情報を補間した結果を図 67(c)に示す. このとき、 $M = 3$ として計算を行っている. 図 66 の(b)、図 67 の(a)と(c)を比較することにより、移動物体を除去した色情報の補間が可能であることがわかる.



(a) カラー画像
の生成

(b) カラー画像
の処理範囲

(c) 色情報の
補間結果

図 67 カラー画像の処理範囲と色情報の補間結果

4.3.3 補間結果を利用した三次元モデルの生成

図 66(c)の補間結果と図 66(b)のカラー画像を利用して、補間した点群データの結果を図 68 に示す。ここでは補間された点群データは赤紫色の点で示している。次に、図 66(c)の補間結果と図 67(c)の補間結果を利用して三次元モデルを生成した結果を図 69 に示す。図 69 より違和感のない三次元モデルが生成できていることが確認できる。

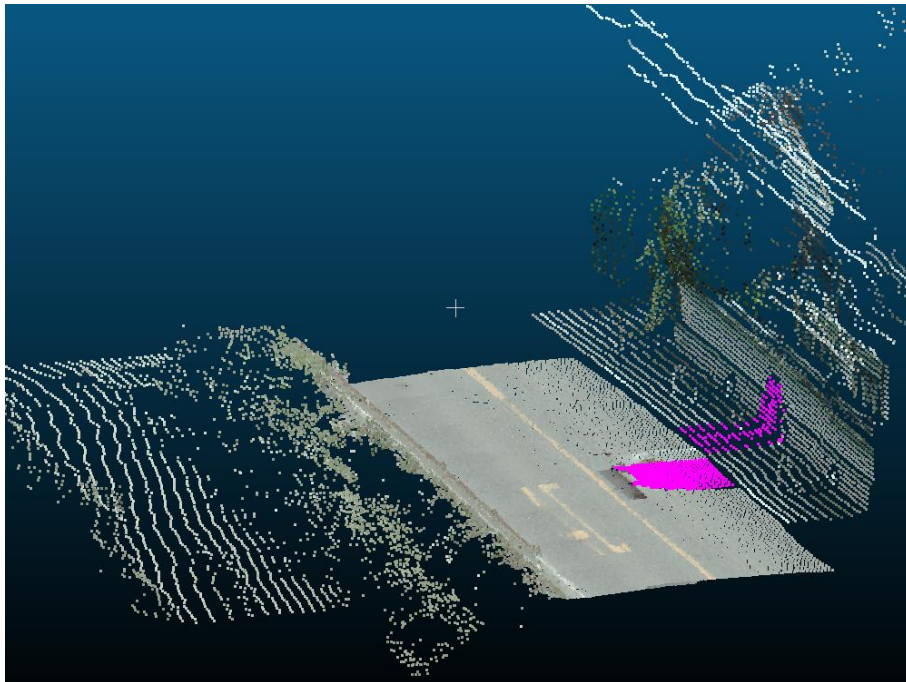


図 68 補間された点群データ（赤紫色）

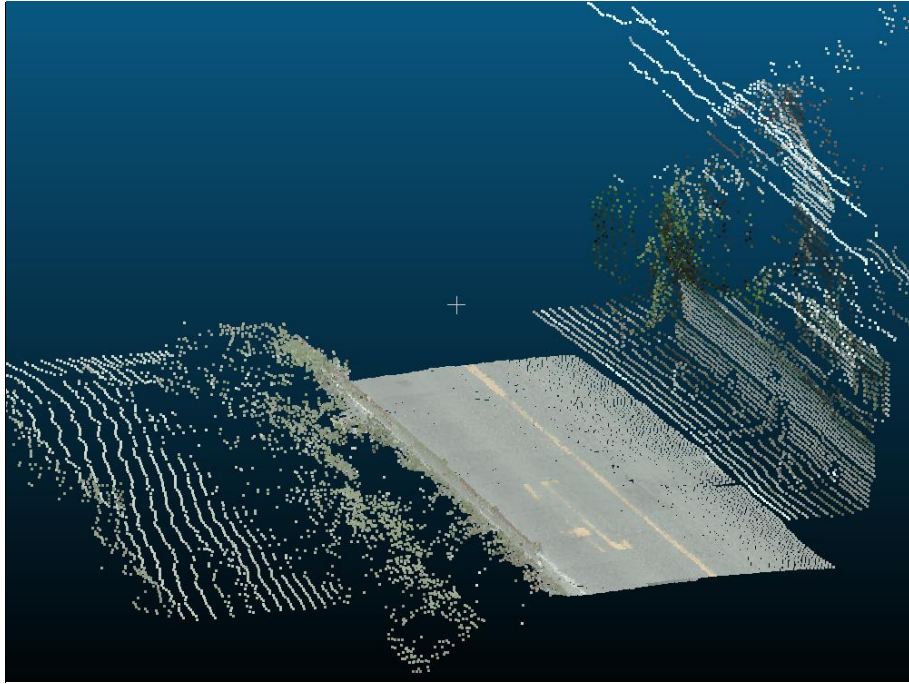


図 69 移動物体を除去した三次元モデルの生成（白色自動車）

4.3.4 移動物体の検出と欠損領域の補間

異なる大きさや色の移動物体に対して，移動物体検出実験と欠損領域の補間実験を行った．桃色自動車，灰色自動車，銀色自動車に対する実験結果を図 70，図 71，図 72 に示す．また，路線バスに対する実験結果を図 73 に示す．各図とも，上段左図は全方位画像の右側（対向車線側）を示しており，上段右図は移動物体の検出結果を示している．下段の図は，移動物体の除去と欠損領域の補間を行い，三次元モデルを生成した結果を表している．実験に利用した条件等は，白色自動車の場合と同じであるが，路線バスのベクトルメディアアンフィルタを応用した色情報の補間において， $M = 5$ の値を利用している．

次に，移動物体の検出結果と欠損領域の補間結果を確認するため，移動物体の進行方向から見た実験結果を図 74 から図 78 に示す．各図は，白色自動車，桃色自動車，灰色自動車，銀色自動車，路線バスに対する実験結果を示しており，各図とも，上段左図は点群データを，上段右図は移動物体の検出結果を，下段左図は補間した点群を，下段右図は補間した三次元モデルを示している．

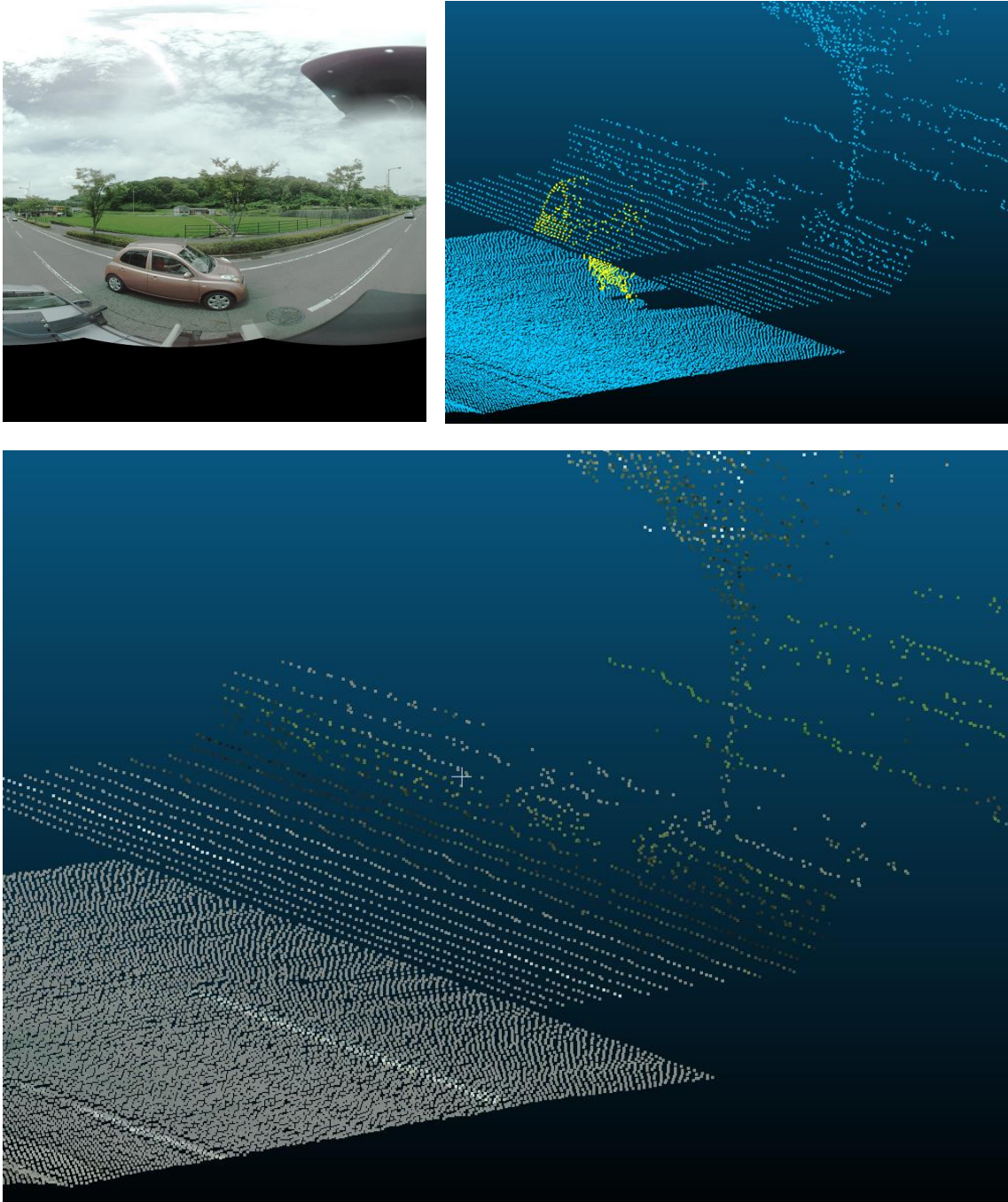


図 70 移動物体を除去した三次元モデルの生成（桃色自動車）
（左上：全方位画像の右側，右上：移動物体の検出結果（黄色：移動物体上の点），
下：提案手法による欠損領域の補間結果）

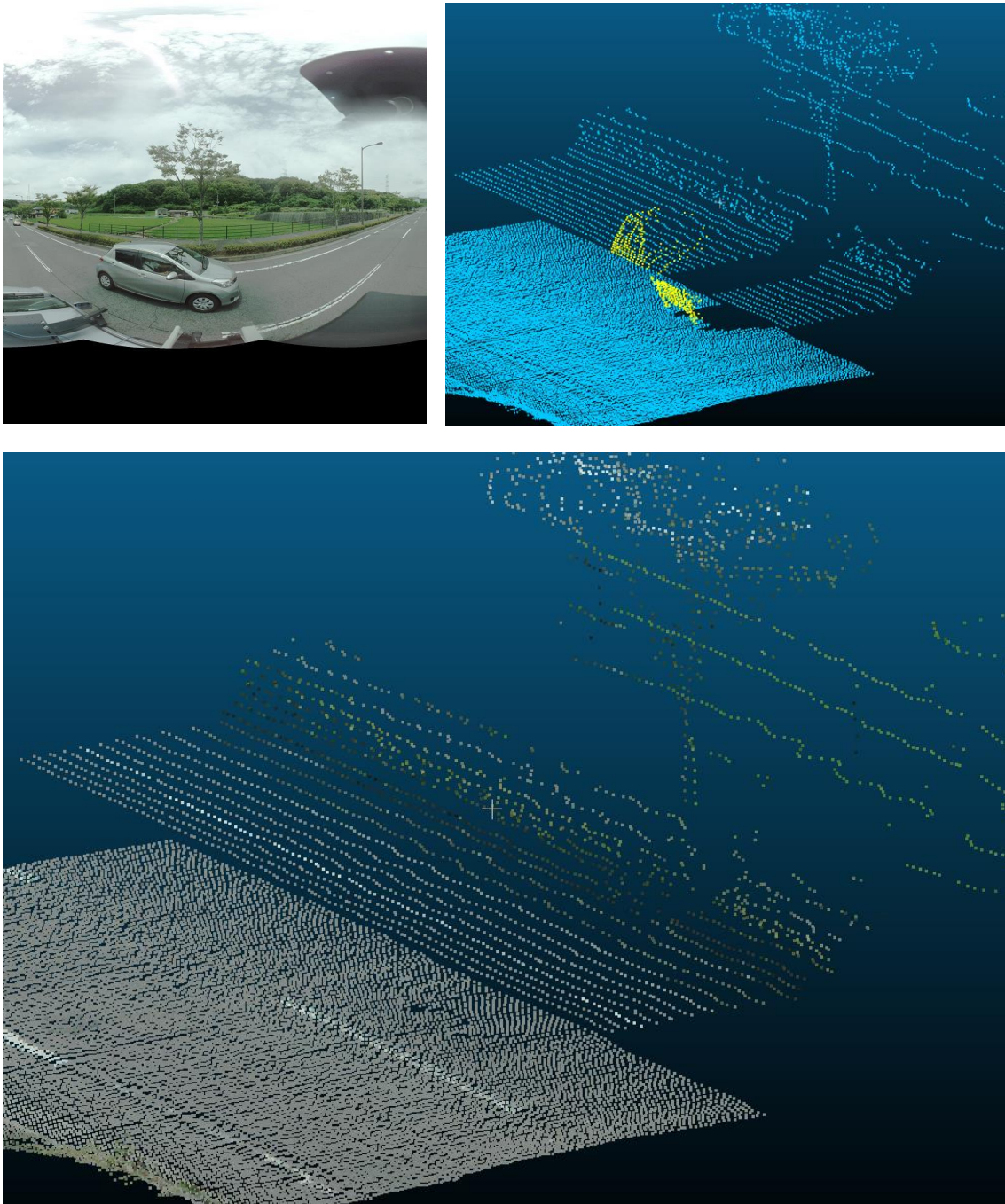


図 71 移動物体を除去した三次元モデルの生成（灰色自動車）
（左上：全方位画像の右側，右上：移動物体の検出結果（黄色：移動物体上の点），
下：提案手法による欠損領域の補間結果）

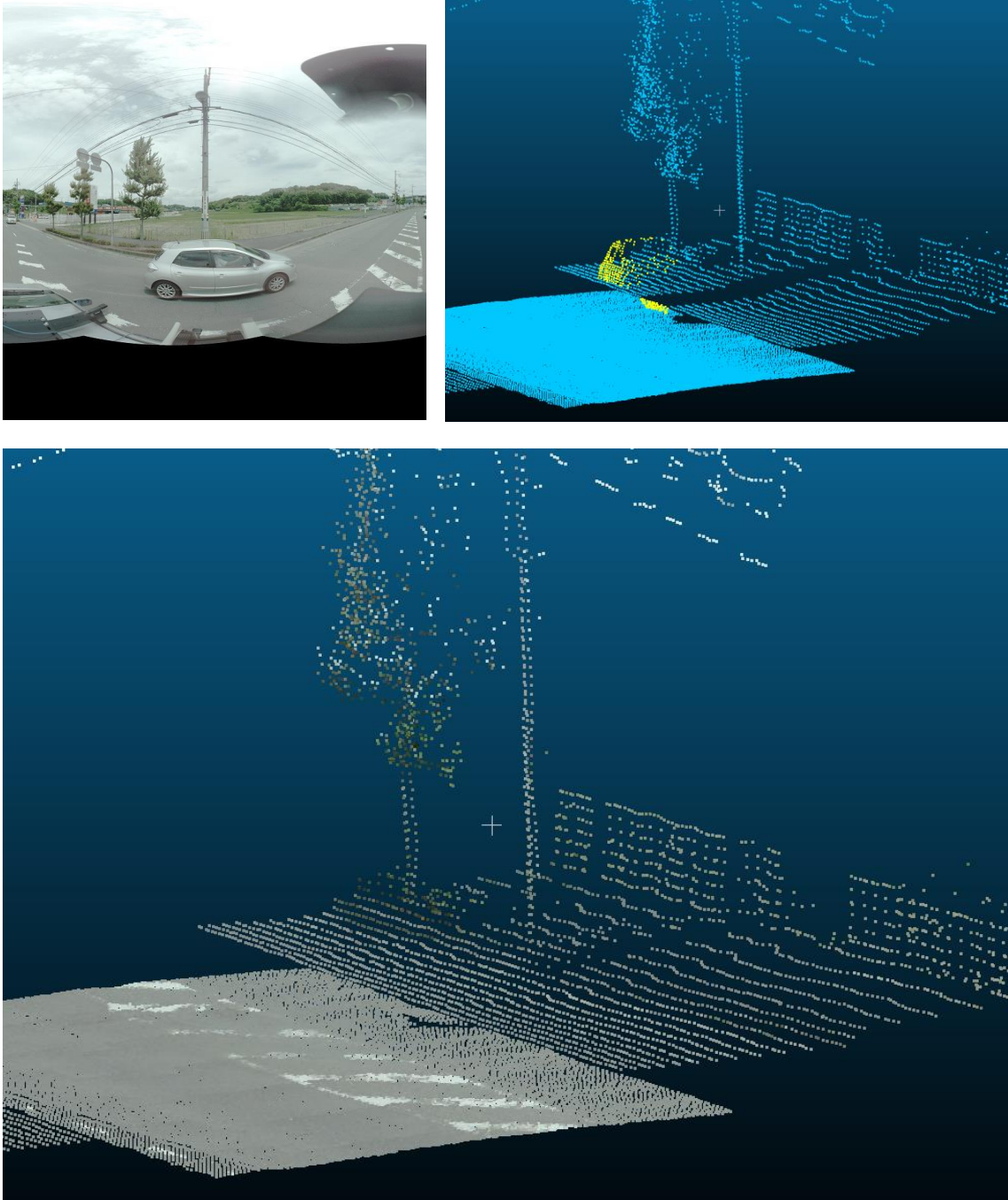


図 72 移動物体を除去した三次元モデルの生成（銀色自動車）
（左上：全方位画像の右側，右上：移動物体の検出結果（黄色：移動物体上の点），
下：提案手法による欠損領域の補間結果）

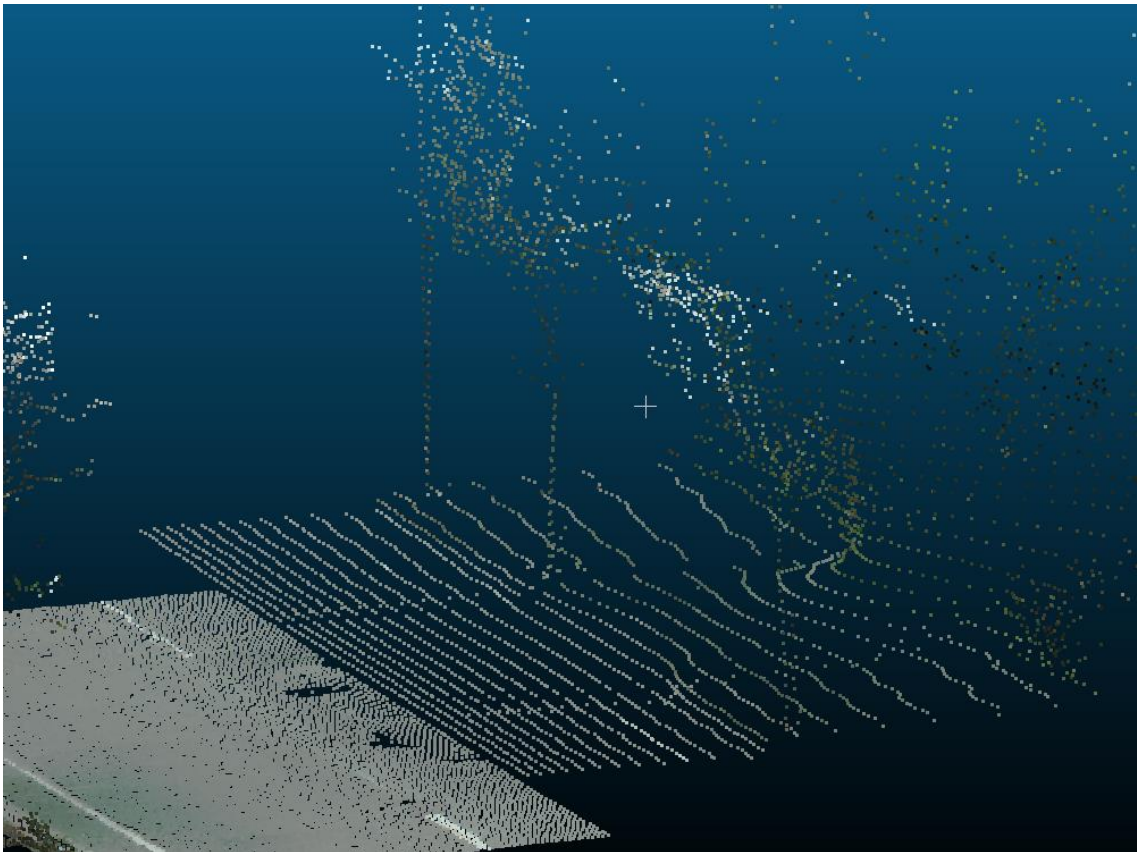
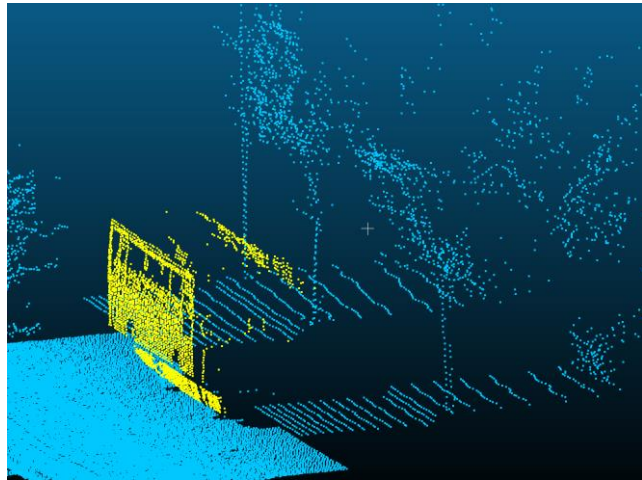


図 73 移動物体を除去した三次元モデルの生成（路線バス）
（左上：全方位画像の右側，右上：移動物体の検出結果（黄色：移動物体上の点），
下：提案手法による欠損領域の補間結果）

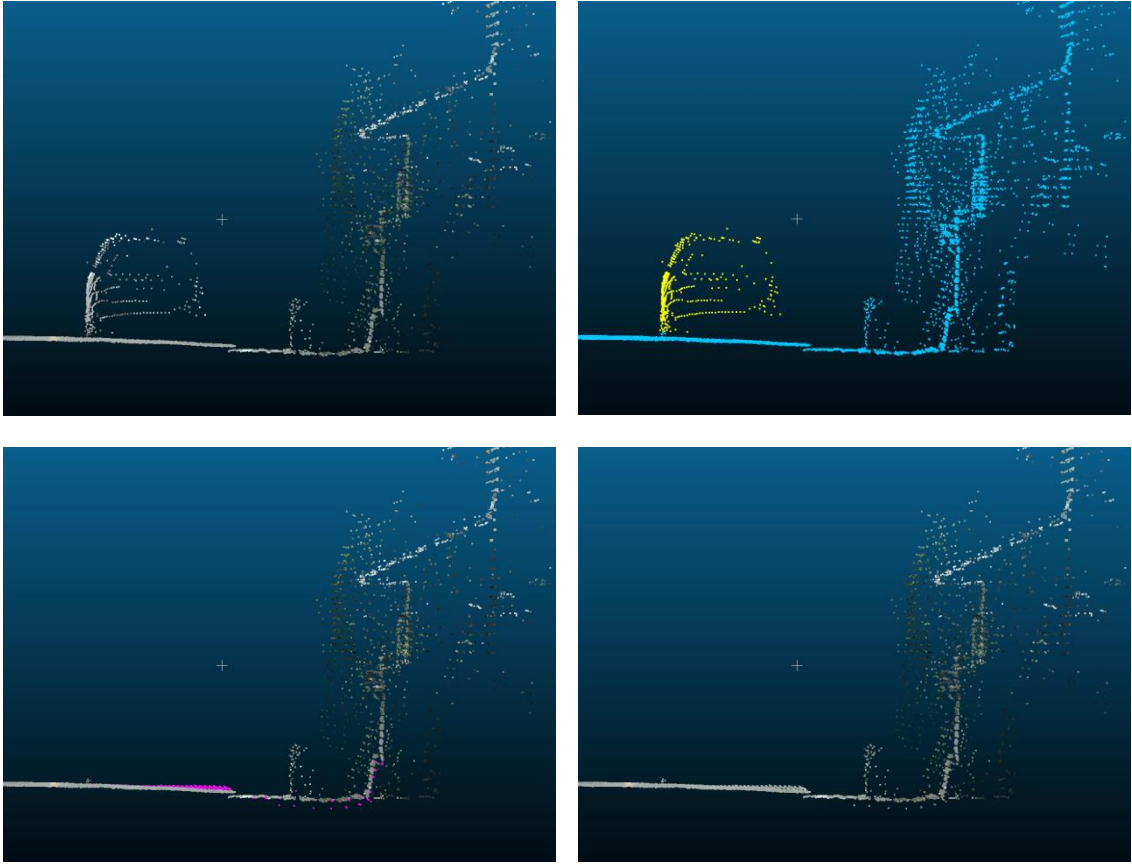


図 74 移動物体の検出結果と欠損領域の補間結果（白色自動車）
（左上：点群データ，右上：移動物体の検出結果（黄色：移動物体上の点），
左下：補間した点群（赤紫色），右下：補間した三次元モデル）

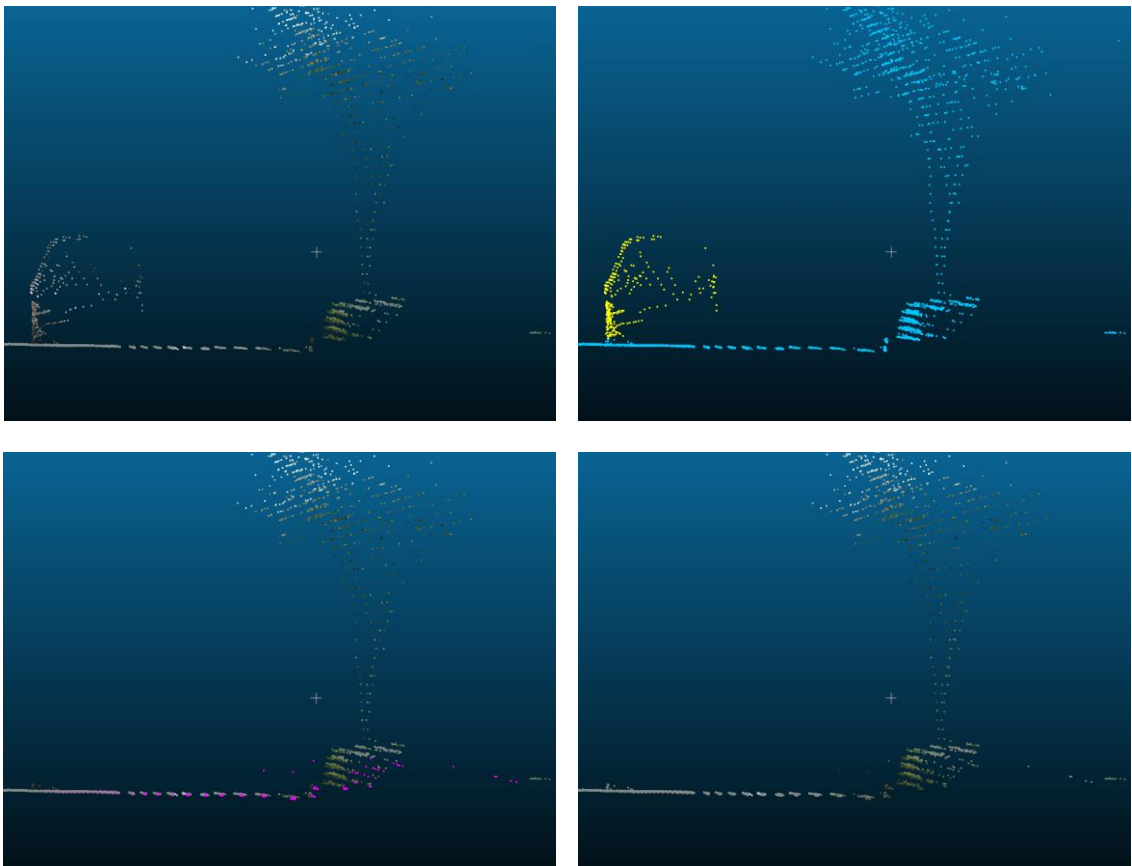


図 75 移動物体の検出結果と欠損領域の補間結果（桃色自動車）
（左上：点群データ，右上：移動物体の検出結果（黄色：移動物体上の点），
左下：補間した点群（赤紫色），右下：補間した三次元モデル）

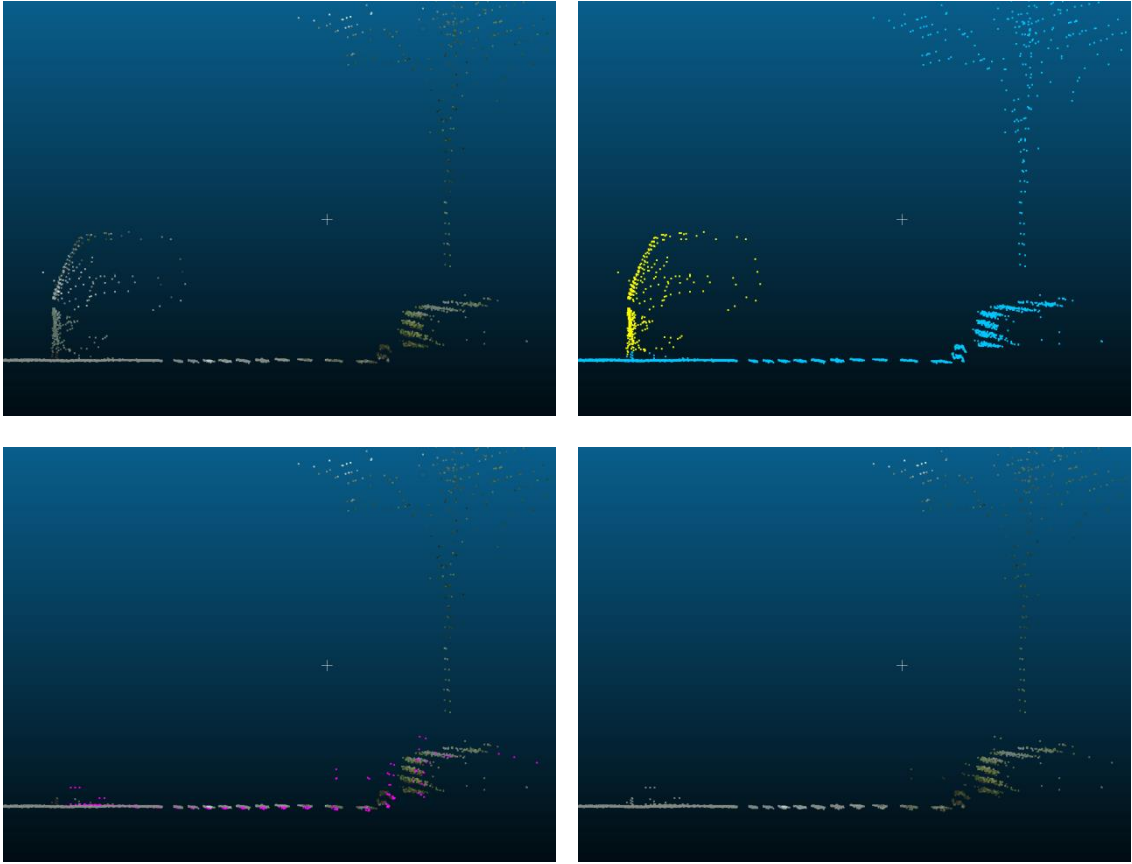


図 76 移動物体の検出結果と欠損領域の補間結果（灰色自動車）
（左上：点群データ，右上：移動物体の検出結果（黄色：移動物体上の点），
左下：補間した点群（赤紫色），右下：補間した三次元モデル）

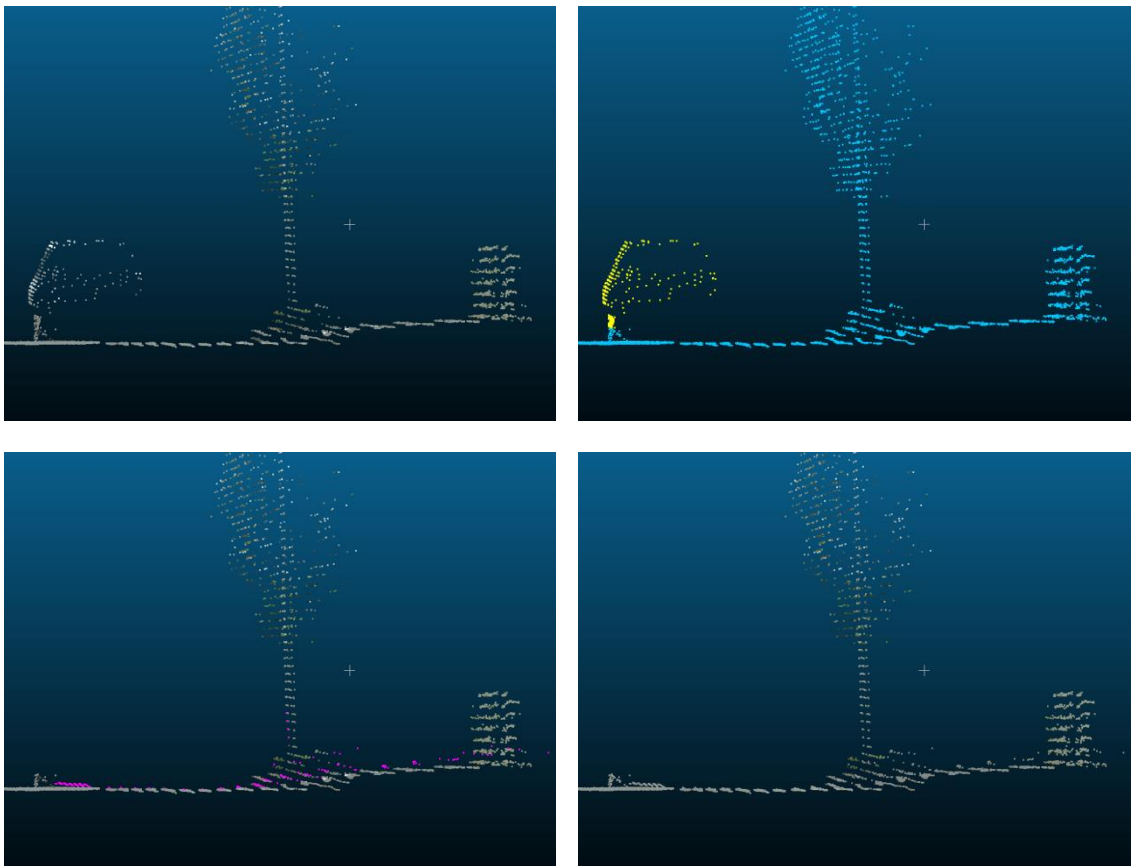


図 77 移動物体の検出結果と欠損領域の補間結果（銀色自動車）
 (左上：点群データ，右上：移動物体の検出結果（黄色：移動物体上の点），
 左下：補間した点群（赤紫色），右下：補間した三次元モデル）

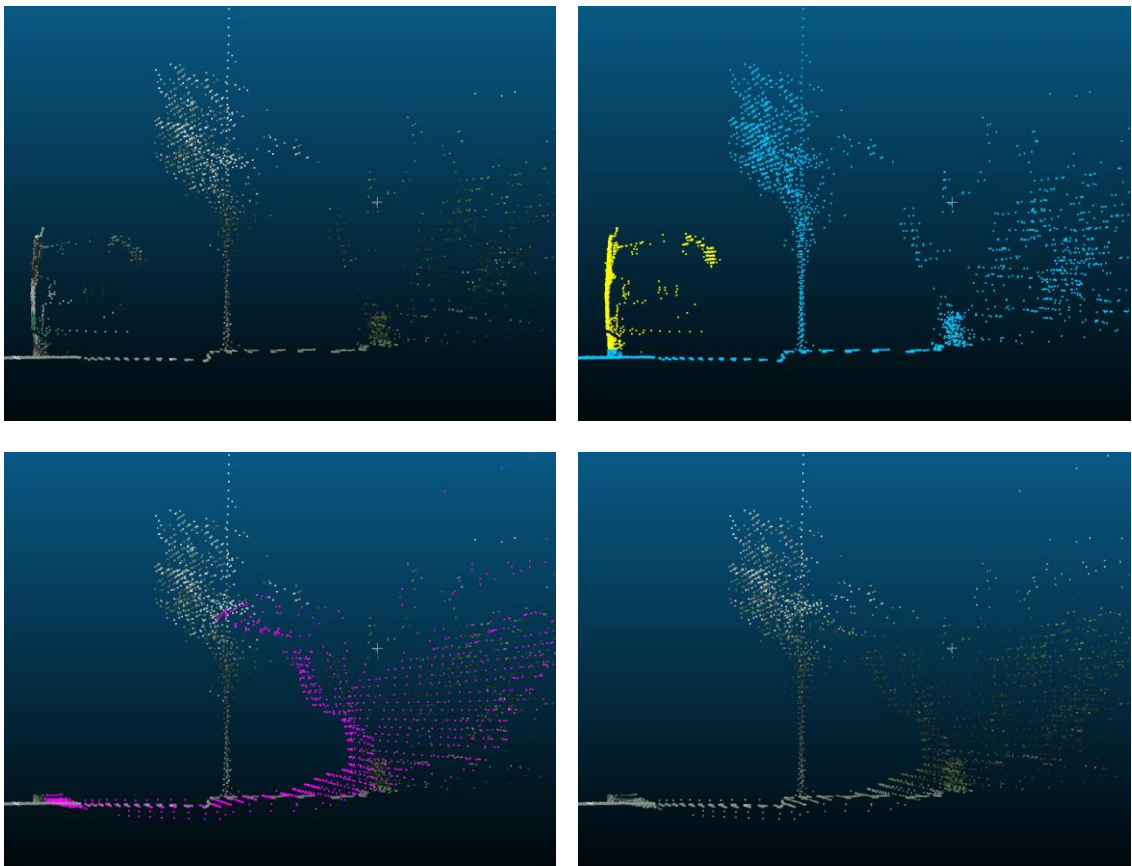


図 78 移動物体の検出結果と欠損領域の補間結果（路線バス）
（左上：点群データ，右上：移動物体の検出結果（黄色：移動物体上の点），
左下：補間した点群（赤紫色），右下：補間した三次元モデル）

図 70 から図 73 の結果から、道路面の補間領域の周辺部分に多少の位置ずれを確認することができるが、提案手法によって違和感なく欠損領域を補間できていることがわかる。

図 74 から図 78 の結果を詳しく観察すると、次の問題点が確認できる。まず、移動物体の検出について、移動物体と道路面の境界部分の分離に不十分なところがあり、移動物体上の点が静止物体上の点（青色の点）として判定されている点である。この原因は、移動物体の検出処理において道路面の凹凸に対応するため、道路面より 5cm 程度高い水平面をしきい値として利用しているためである。従って、この問題点については、道路面の検出精度を向上させることにより改善されると考えられる。具体的には、道路面の傾きを検出して、その結果をしきい値として利用する、あるいは、道路面を曲面として推定し、その結果をしきい値として利用する等の対策が考えられる。次の問題点として、補間した点群（赤紫色）の道路面の補間において、本来の道路面から少し離れたところに補間結果が表示されている点である。これについては、点群で構成される平面の法線ベクトルを考慮せずに、距離情報を事例として補間処理を行っているためと考えられる。法線ベクトルを考慮した補間により良好な結果を得ている研究例[78][96]が存在するので、この点を考慮すれば、実験結果が改善されると考えられる。

最後に、提案手法の有効性を確認するため、提案手法と線形補間により欠損領域を補間した結果について比較を行った。白色自動車、桃色自動車、灰色自動車、銀色自動車、路線バスに対する実験結果を図 79 から図 83 に示す。各図とも、上段左図は提案手法による補間結果を、上段右図は線形補間による補間結果を、下段の左右図はそれぞれの拡大図を示している。提案手法の補間領域は赤紫色で、線形補間の補間領域は緑色で示している。これらの図では、色情報の補間は実施していない。

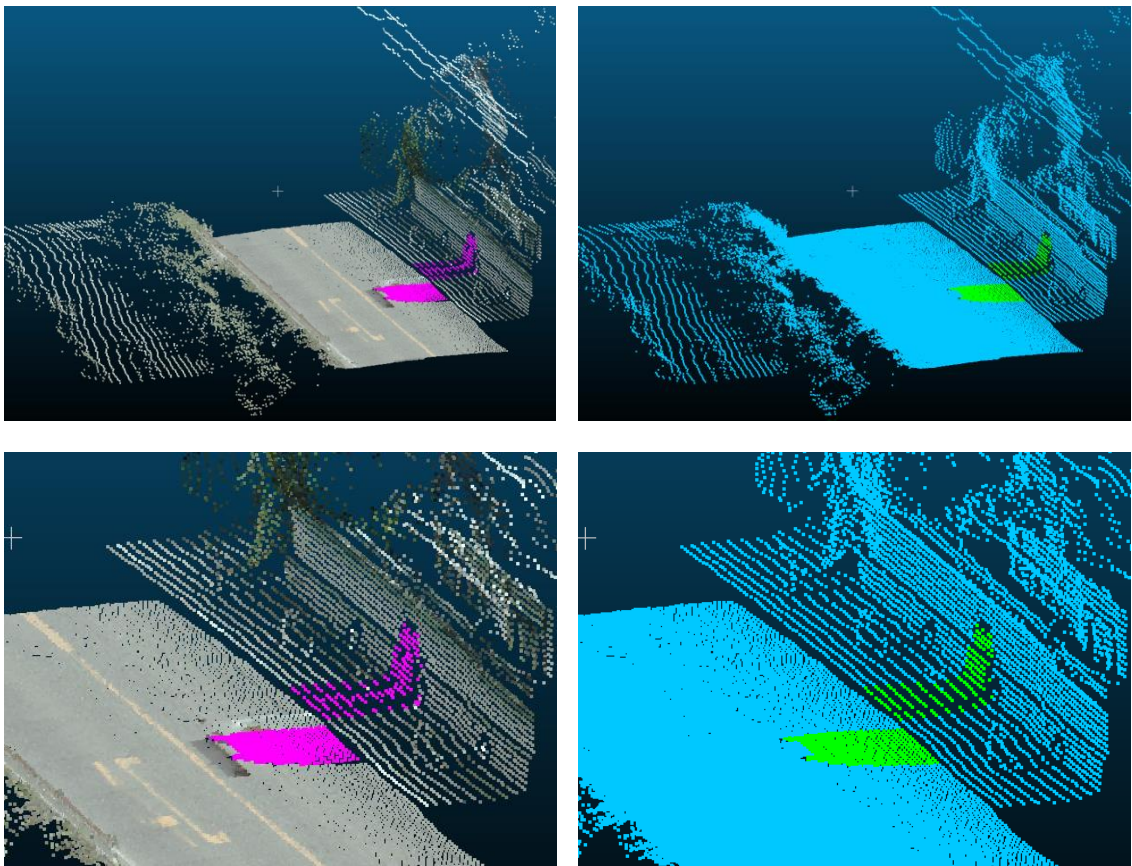


図 79 提案手法による補間と線形補間の結果（白色自動車）
 （左上：提案手法による補間，右上：線形補間，
 左下：提案手法による補間（拡大図），右下：線形補間（拡大図），
 赤紫色：提案手法による補間領域，緑色：線形補間による補間領域）

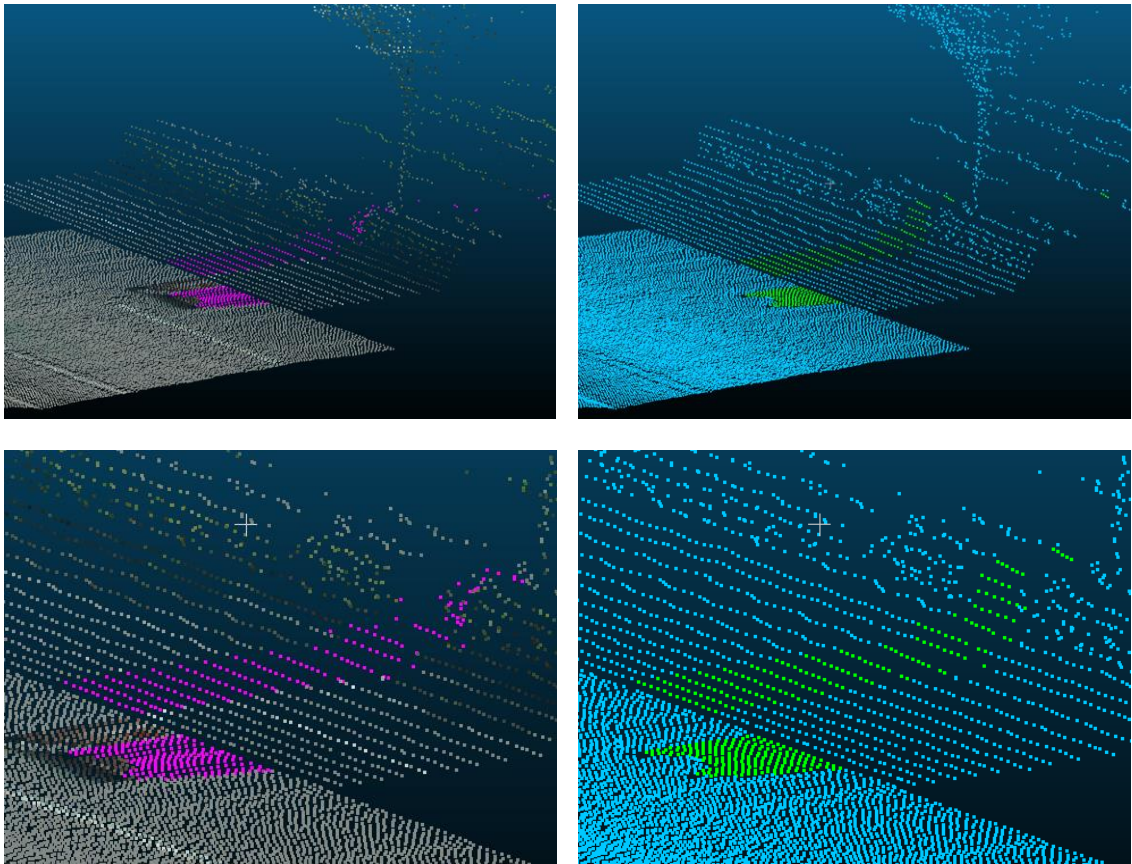


図 80 提案手法による補間と線形補間の結果（桃色自動車）
 （左上：提案手法による補間，右上：線形補間，
 左下：提案手法による補間（拡大図），右下：線形補間（拡大図），
 赤紫色：提案手法による補間領域，緑色：線形補間による補間領域）

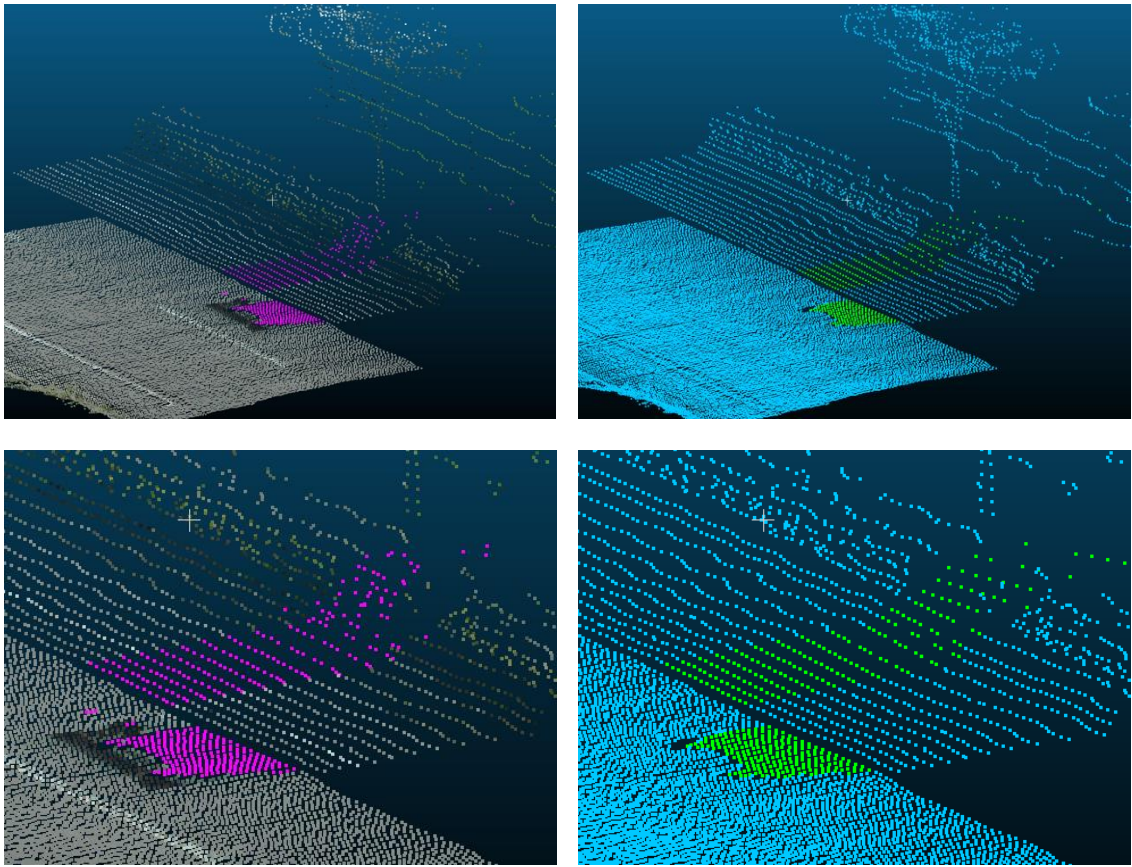


図 81 提案手法による補間と線形補間の結果（灰色自動車）
（左上：提案手法による補間，右上：線形補間，
左下：提案手法による補間（拡大図），右下：線形補間（拡大図），
赤紫色：提案手法による補間領域，緑色：線形補間による補間領域）

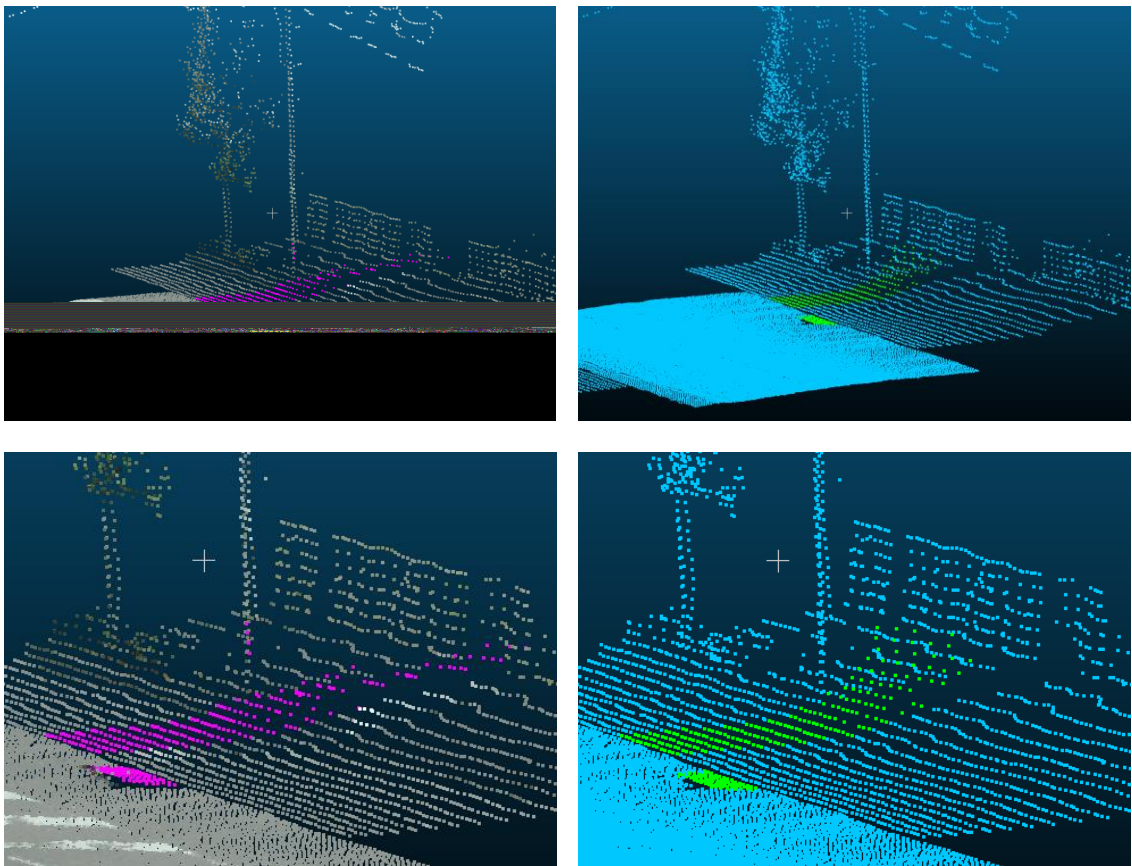


図 82 提案手法による補間と線形補間の結果（銀色自動車）
（左上：提案手法による補間，右上：線形補間，
左下：提案手法による補間（拡大図），右下：線形補間（拡大図），
赤紫色：提案手法による補間領域，緑色：線形補間による補間領域）

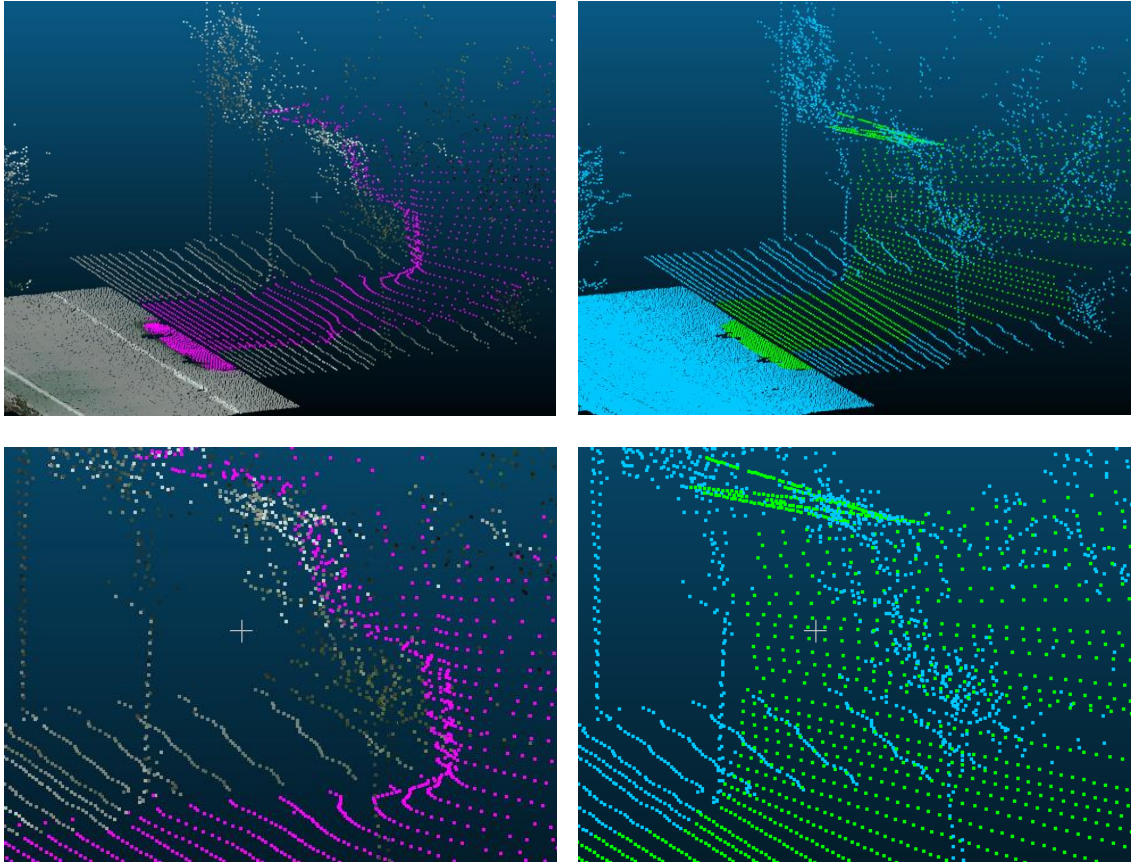


図 83 提案手法による補間と線形補間の結果（路線バス）

（左上：提案手法による補間，右上：線形補間，

左下：提案手法による補間（拡大図），右下：線形補間（拡大図），

赤紫色：提案手法による補間領域，緑色：線形補間による補間領域）

図 79 の場合，欠損領域が道路面と家屋のブロック塀であり，どちらの手法も違和感のない補間結果が得られている．図 80，図 81 の場合，道路沿いの樹木が欠損領域になっており，図 80 の場合は線形補間の実験結果が，図 81 の場合は提案手法の実験結果が実際の屋外環境に近い補間結果になっている．図 82，図 83 の場合，欠損領域の境界の一方に樹木が存在する．線形補間を利用した場合，この影響を受けて補間領域が現実環境と異なる結果になっているが，提案手法の場合はこの影響が少なく，現実環境に近い補間結果が得られている．

4.4 結言

移動物体を考慮した屋外環境の三次元モデルを生成するために，距離画像を利用して，移動物体除去後の領域内パターンとその周辺パターンの類似度に基づくエネルギー関数を定義し，エネルギー最小化によって欠落した点群データを補間する手法を提案するとともに，補間した距離情報から計算される三次元モデル上の点を動画データに投影し，ベクトルメディアンフィルタを応用することにより色情報を補間する手法を提案した．提案手法によって欠損領域の自然な補間が可能であることを確認した．欠損領域の一方に樹木等が存在することにより，線形補間では現実環境と異なる結果が得られるが，提案手法による補間では，その影響が少なく，現実環境に近い結果が得られることが確認できた．これらの結果から，本手法によって移動物体を考慮した三次元モデルの生成が可能であることがわかった．道路面の補間について改善すべき点が見つかったが，この点については今後の課題である．

5. 結論

5.1 まとめ

現実環境の測定に基づく三次元モデルの生成は，広域屋外環境の三次元モデルを自動生成する手法として有力であるが，測定時に移動物体が存在した場合，測定データに移動物体を測定した点が混在するとともに，移動物体によって隠蔽された静止物体上のデータが欠落することになり，三次元モデル生成の際の妨げになる．

本論文では，この問題を解決するために，移動物体が含まれる屋外環境の測定データから移動物体を検出する手法の提案と移動物体除去後の欠損領域について位置情報，色情報を補間する手法の提案を行った．

移動物体の検出では，フォトコンシステンシーと道路環境の事前知識に基づいて移動物体上の点を検出する手法を提案した．静止物体上の点が他の物体によって隠蔽される問題（オクルージョンの問題）を回避するために，スライディングウィンドウの手法を採用した．実験により，スライディングウィンドウの手法の有効性を検証するとともに，フォトコンシステンシーと道路環境の事前知識を利用して移動物体上の点の検出が可能であることを確認した．また，移動物体検出において，移動物体が検出できない2つのケースについて検討を行った．検出条件を変更することにより，移動物体検出が可能であることを確認した．

欠損領域の補間では，距離画像を利用して，移動物体除去後の領域内パターンとその周辺パターンの類似度に基づくエネルギー関数を定義し，エネルギー最小化によって欠落した点群データを補間する手法を提案するとともに，補間した距離情報から計算される点を動画データに投影し，ベクトルメディアンフィルタを応用することにより色情報を補間する手法を提案した．実験により，本手法を利用することによって欠損領域の自然な補間が可能であることを確認した．

以上の結果から，移動物体の検出，及び，欠損領域の補間において，本手法を利用することにより，移動物体を考慮した三次元モデルの生成が可能であることがわかった．

5.2 今後の展望と課題

本論文では，提案手法の有効性を確認するため，TOPCON 社製のモバイルマッピングシステム（IP-S2）を利用して実験を行った．実施した実験において，

改善すべき点がわかっている。まず、移動物体の検出について、対象物が小さい場合と背景の色と近い場合に検出漏れが生じる場合がある。第3章第4節において検討を行っているが、追加実験等が必要である。次に、道路面の検出において、水平面をしきい値として利用しているが、道路面上に存在する移動物体の検出精度を向上させるためには、実際の道路面に適した平面または曲面を検出し設定する必要がある。最後に、道路面の補間において、本来の道路面から少し離れたところに補間結果が表示されている場合があり、この対策を実施する必要がある。これらの点については今後の課題である。点群データと映像データを合成することにより、より現実的な三次元モデルを生成することも必要であると考えられるが、この点については、Asai らの手法[14][15]を適用することにより実現可能と考えられる。

本提案手法は、舗装され、走行車線の整備された道路上を走行しながら取得された複合センサからの情報を利用している。4 m間隔で全方位カメラの映像を取得した場合、後続車両と6.83m以上の距離を空ける必要がある。後続車両がこの距離より近い位置に存在する場合、点群データに後続車両の映像の一部が投影される場合がある。また、片側2車線以上の道路において、レンジファインダの測定領域内を別の車両が同一進行方向に12m以上並走した場合、移動物体上の点の検出は困難である。本提案手法を利用する場合には、このような屋外環境データの取得は避ける必要がある。

本研究は景観シミュレーション、ナビゲーションなどで利用される三次元モデルの自動生成を対象として実施しており、実験結果を視覚的に確認することにより判定している。移動物体検出では、一部の例を除いて検出が確認できており、欠損領域の補間では、多少の位置ずれを確認できるが違和感のない補間が実現できている。したがって、景観シミュレーション、ナビゲーションなどで利用される三次元モデルとして良好な結果が得られていると考えられる。

本実験に利用したシステムは、現在、開発した企業により改良が加えられている。現在では、全方位カメラと5台のレンジファインダを搭載したシステム（IP-S2 Standard+）や、高解像度の全方位カメラと高密度な測定が可能なレンジファインダを搭載したシステム（IP-S3）が開発[104][105]されている。これらのシステムを利用すると、1回の走行であっても周囲環境を複数回測定することが可能になるので、密度の高い三次元点群の測定が可能になる。本論文で提案

した手法は，これらのシステムを利用して取得した測定データに対しても適用可能であると考えられ，より高精細な三次元モデルの自動生成に役立つと考えられる．これらの新しいシステムへの適用が今後の課題である．

近年，自動車の自動運転に関する研究の発展も著しく，2020年を目標に超スマート社会の実現が掲げられている．これを実現するため，科学技術イノベーション総合戦略[106]が政府から発表され，自動運転のための立体地図の整備が進められようとしている．立体地図の利用は，自動車の自動運転を支援するだけでなく，道路やトンネルの維持管理の効率化，迅速な対応に役立つと考えられる．屋外環境の三次元モデルの生成は，このような立体地図の生成に役立つと考えられ，広域屋外環境の三次元モデルを自動生成するシステムの改良は，更に進んでいくと考えられる．本論文で提案した手法が新たなシステムにおいても活用できるよう，今後も研究開発を進めたいと考える．

謝辞

本研究を行う機会を与えていただくとともに，親切なご指導，ご鞭撻を賜った視覚情報メディア研究室 横矢直和 教授に心より感謝の意を表します．研究の全過程を温かく見守っていただくとともに，博士後期課程を通して国内外での発表の機会を与えていただき，親切丁寧なご指導をしていただきました．

また，副指導教員としてご助言いただいたロボティクス研究室 小笠原司 教授，並びに，視覚情報メディア研究室 佐藤智和 准教授，同研究室 河合紀彦 助教に深く感謝いたします．

本研究の立ち上げ時において，的確なご助言，ご鞭撻をいただいた環境知能学研究室 神原誠之 准教授に深く御礼申し上げます．また，本研究を実施するにあたり，多大なご協力をいただきました視覚情報メディア研究室 武富貴史氏，同研究室 糸秀行氏に深く感謝いたします．この2名の協力により，本研究を無事に遂行することができました．厚く御礼申し上げます．

本研究の実験データ収集にあたり，ご協力をいただきました視覚情報メディア研究室 中島悠太 助教，同研究室 牧田孝嗣氏に感謝いたします．

研究室での活動に関連する事務処理を行っていただきました視覚情報メディア研究室 中村美奈 女史，石谷由美 女史，南あずさ 女史に心より感謝いたします．また，研究室での研究活動において温かいご支援，ご助言をいただいた視覚情報メディア研究室の諸氏に感謝いたします．

最後に，本研究活動の全般に渡り，ご支援とご協力を賜った兵庫県立工業技術センターの諸氏に厚く御礼申し上げます．特に，研究立ち上げ時にご支援とご協力を賜った北村新三氏（当時の工業技術センター所長），福地雄介氏（当時の技術支援部長），北川洋一氏（当時の技術支援部長）に深く感謝いたします．

参考文献

- [1] S. Agarwal, N. Snavely, I. Simon, S. M. Seitz, R. Szeliski, "Building Rome in a Day", Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision, pp. 72-79, 2009.
- [2] Y. Furukawa, B. Curless, S. M. Seitz, R. Szeliski, "Towards Internet-scale Multi-view Stereo", Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1434-1441, 2010.
- [3] T. Sato, H. Koshizawa, N. Yokoya, "Omnidirectional Free-viewpoint Rendering Using a Deformable 3D Mesh Model", Int. Journal of Virtual Reality, Vol. 9, No. 1, pp. 37-44, 2010.
- [4] Y. Uh, Y. Matsushita, H. Byun, "Efficient Multiview Stereo by Random-search and Propagation", Proc. Int. Conf. on 3D Vision, pp. 393-400, 2014.
- [5] J. Liu, J. Wang, T. Fang, C. Tai, L. Quan, "Higher-order CRF Structural Segmentation of 3D Reconstructed Surfaces", Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision, pp. 2093-2101, 2015.
- [6] A. Kendall, M. Grimes, R. Cipolla, "PoseNet: A Convolutional Network for Real-time 6-DOF Camera Relocalization", Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision, pp. 2938-2946, 2015.
- [7] E. Vidal, N. Piatto, G. Cordara, F. M. Burgos, "Automatic Video to Point Cloud Registration in a Structure-from-motion Framework", Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing, pp. 2646-2650, 2015.
- [8] R. Díaz, M. Lee, J. Schubert, C. C. Fowlkes, "Lifting GIS Maps into Strong Geometric Context for Scene Understanding", Proc. IEEE Winter Conf. on Applications of Computer Vision, pp. 1-9, 2016.
- [9] S. F. El-Hakim, C. Brenner, G. Roth, "A Multi-sensor Approach to Creating Accurate Virtual Environments", Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 53, pp. 379-391, 1998.
- [10] H. Zhao, R. Shibasaki, "Reconstruction of Textured Urban 3D Model by Fusing Ground-based Laser Range and CCD Images", IEICE Trans. on Information and Systems, Vol. E-83-D, No. 7, pp. 1429-1440, 2000.
- [11] H. Zhao, R. Shibasaki, "Reconstructing a Textured CAD Model of an

- Urban Environment Using Vehicle-borne Laser Range Scanners and Line Cameras", *Machine Vision and Applications*, Vol. 14, pp. 35-41, 2003.
- [12] C. Früh, A. Zakhor, "An Automated Method for Large-scale, Ground-based City Model Acquisition", *Int. Journal of Computer Vision*, Vol. 60, No. 1, pp. 5-24, 2004.
- [13] A. Banno, K. Ikeuchi, "Shape Recovery of 3D Data Obtained from a Moving Range Sensor by Using Image Sequence", *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision*, Vol. 1, pp. 792-799, 2005.
- [14] T. Asai, M. Kanbara, N. Yokoya, "3D Modeling of Outdoor Environments by Integrating Omnidirectional Range and Color Images", *Proc. Int. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling*, pp. 447-454, 2005.
- [15] T. Asai, M. Kanbara, N. Yokoya, "Data Acquiring Support System Using Recommendation Degree Map for 3D Outdoor Modeling", *Proc. SPIE Electronic Imaging*, Vol. 6491, pp. 64910H-1-64910H-8, 2007.
- [16] 浅井俊弘, 神原誠之, 横矢直和, "屋外環境の三次元モデル化のための推奨度マップを用いたレンジデータ取得支援システム", *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol. J92-D, No. 4, pp. 531-541, 2009.
- [17] J. F. Lalonde, N. Vandapel, D. F. Huber, M. Hebert, "Natural Terrain Classification Using Three-dimensional Ladar Data for Ground Robot Mobility", *Journal of Field Robotics*, Vol. 23, No. 10, pp. 839-861, 2006.
- [18] Y. Verdìe, F. Lafarge, J. Zerubia, "Generating Compact Meshes under Planar Constraints: An Automatic Approach for Modeling Buildings from Aerial LiDAR", *Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing*, pp. 877-880, 2011.
- [19] A. Velizhev, R. Shapovalov, K. Schindler, "Implicit Shape Models for Object Detection in 3D Point Clouds", *Proc. 22nd Congress Int. Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, pp. 179-184, 2012.
- [20] R. Ishikawa, B. Zheng, T. Oishi, K. Ikeuchi, "Rectification of Aerial 3D Laser Scans via Line-based Registration to Ground Model," *IPSJ Trans. on Computer Vision and Applications*, Vol. 7, pp. 89-93, 2015.

- [21] G. Petrie, "Mobile Mapping Systems: An Introduction to the Technology", *GEOInformatics*, Vol. 13, pp. 32-43, 2010.
- [22] 首藤真, "ジオ技術研究所の三次元デジタル地図と産業分野における実用例", *情報処理学会研究報告*, CVIM-176, No. 11, pp. 1-2, 2011.
- [23] 石川貴一郎, 天野嘉春, 橋詰匠, 瀧口純一, 清水聡, "モバイルマッピングシステムによる都市空間モデリング", *計測自動制御学会産業論文集*, Vol. 8, No. 17, pp. 132-139, 2009.
- [24] 瀧口純一, "高精度GPS移動計測装置三菱モバイルマッピングシステム", *情報処理学会研究報告*, CVIM-176, No. 20, pp. 1-5, 2011.
- [25] 穴井哲治, 中島力也, "三次元GIS構築に向けたモバイルマッピングシステム", *写真測量とリモートセンシング*, Vol. 49, No. 2, pp. 56-57, 2010.
- [26] H. Zhao, R. Shibasaki, "A Vehicle-Borne Urban 3-D Acquisition System Using Single-row Laser Range Scanners", *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics*, Vol. 33, No. 4, pp. 658-666, 2003.
- [27] H. Zhao, M. Chiba, R. Shibasaki, X. Shao, J. Cui, H. Zha, "SLAM in a Dynamic Large Outdoor Environment Using a Laser Scanner", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1455-1462, 2008.
- [28] J. Becker, C. Stewart, R. J. Radke, "LiDAR Inpainting from a Single Image", *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision Workshops on 3D Digital Imaging and Modeling*, pp. 1441-1448, 2009.
- [29] S. Ono, L. Xue, A. Banno, T. Oishi, Y. Sato, K. Ikeuchi, "Global 3D Modeling and its Evaluation for Large-scale Highway Tunnel Using Laser Range Sensor," *Proc. 19th ITS World Congress Vienna*, 2012.
- [30] A. Azim, O. Aycard, "Detection, Classification and Tracking of Moving Objects in a 3D Environment", *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 802-807, 2012.
- [31] A. Azim, O. Aycard, "Layer-based Supervised Classification of Moving Objects in Outdoor Dynamic Environment Using 3D Laser Scanner", *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 1408-1414, 2014.
- [32] K. Yoneda, H. Tehrani, T. Ogawa, N. Hukuyama, and S. Mita, "Lidar Scan Feature for Localization with Highly Precise 3-D Map", *Proc. IEEE*

- Intelligent Vehicles Symposium, pp. 1345-1350, 2014.
- [33] Y. Yi, Y. Guang, Z. Hao, F. Meng-yin, W. Mei-ling, "Moving Object Detection under Dynamic Background in 3D Range Data", Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 394-399, 2014.
 - [34] C. Tomasi, T. Kanade, "Shape and Motion from Image Streams under Orthography: a Factorization Method", Int. Journal of Computer Vision, Vol. 9:2, pp. 137-154, 1992.
 - [35] M. Okutomi, T. Kanade, "A Multiple-baseline Stereo", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 15, No. 4, pp. 353-363, 1993.
 - [36] 納富幹人, 小澤史朗, 全炳東, "移動体観測による都市モデル構築", 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J81-D-II, No. 5, pp. 872-879, 1998.
 - [37] M. Pollefeys, R. Koch, M. Vergauwen, B. DeKnuydt, L. V. Gool, "Three-dimensional Scene Reconstruction from Images", Proc. SPIE Three-Dimensional Image Capture and Applications III, Vol. 3958, pp. 215-226, 2000.
 - [38] T. Sato, M. Kanbara, N. Yokoya, H. Takemura, "3-D Modeling of an Outdoor Scene by Multi-baseline Stereo Using a Long Sequence of Images", Proc. IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition, Vol.III, pp. 581-584, 2002.
 - [39] L. Duan, F. Lafarge, "Towards Large-scale City Reconstruction from Satellites", Proc. European Conf. on Computer Vision, pp. 89-104, 2016.
 - [40] S. Daftry, C. Hoppe, H. Bischof, "Building with Drones: Accurate 3D Facade Reconstruction Using MAVs", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3487-3494, 2015.
 - [41] S. Daftry, S. Zeng, A. Khan, J. A. Bagnell, M. Hebert, "Introspective Perception: Learning to Predict Failures in Vision Systems", Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 165-171, 2016.
 - [42] B. Zheng, X. Huang, R. Ishikawa, T. Oishi, K. Ikeuchi, "A New Flying Range Sensor: Aerial Scan in Omini-directions," Proc. Int. Conf. on 3D

- Vision, pp. 623-631, 2015.
- [43] M. Ding, K. Lyngbaek, A. Zakhor, "Automatic Registration of Aerial Imagery with Untextured 3D LiDAR Models", Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1-8, 2008.
 - [44] F. Yu, J. Xiao, T. Funkhouser, "Semantic Alignment of LiDAR Data at City Scale", Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1722-1731, 2015.
 - [45] R. Ishikawa, B. Zheng, T. Oishi, K. Ikeuchi, "Rectification of Aerial 3D Laser Scans via Line-based Registration to Ground Model," IPSJ Trans. on Computer Vision and Applications, Vol. 7, pp. 89-93, 2015.
 - [46] M. Li, P. Wonka, L. Nan, "Manhattan-world Urban Reconstruction from Point Clouds", Proc. European Conf. on Computer Vision, Part IV, pp. 54-69, 2016.
 - [47] 内山寛之, 出口大輔, 高橋友和, 井手一郎, 村瀬洋, "複数映像統合による車載カメラ映像からの移動物体除去", 電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会, PRMU2009-102, pp. 57-62, 2009.
 - [48] 内山寛之, 出口大輔, 高橋友和, 井手一郎, 村瀬洋, "複数車載カメラ映像の部分画像選択に基づく移動物体のない映像の生成", 画像の認識・理解シンポジウム, IS3-62, pp. 1991-1998, 2010.
 - [49] H. Uchiyama, D. Deguchi, T. Takahashi, I. Ide, H. Murase, "Removal of Moving Objects from a Street-view Image by Fusing Multiple Image Sequences", Proc. IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition, pp. 3456-3459, 2010.
 - [50] J. Astola, P. Haavisto, Y. Neuvo, "Vector Median Filters", Proc. the IEEE, Vol. 78, No. 4, pp. 678-689, 1990.
 - [51] T. Kotsuka, D. Deguchi, I. Ide, H. Murase, "Adaptive Reference Image Selection for Temporal Object Removal from Frontal In-vehicle Camera Image Sequences", Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision Theory and Applications, pp. 233-239, 2015.
 - [52] B. Jung, G. S. Sukhatme, "Detecting Moving Objects Using a Single Camera on a Mobile Robot in an Outdoor Environment", Proc. Int. Conf.

- on Intelligent Autonomous Systems, pp. 980-987, 2004.
- [53] B. Jung, G. S. Sukhatme, "Real-time Motion Tracking from a Mobile Robot", *Int. Journal of Social Robotics*, Vol. 2, No. 1, pp. 63-78, 2010.
- [54] D. Munoz, N. Vandapel, M. Hebert, "Directional Associative Markov Network for 3D Point Cloud Classification", *Proc. Int. Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission*, 2008.
- [55] C. Mertz, et al, "Moving Object Detection with Laser Scanners", *Journal of Field Robotics*, Vol. 30, No. 1, pp. 1-27, 2013.
- [56] F. Neuhaus, D. Dillenberger, J. Pellenz, D. Paulus, "Terrain Drivability Analysis in 3D Laser Range Data for Autonomous Robot Navigation in Unstructured Environments", *Proc. IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation*, pp. 1-4, 2009.
- [57] X. Xiong, D. Munoz, J. A. Bagnell, M. Hebert, "3D Scene Analysis via Sequenced Predictions over Points and Regions", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2609-2616, 2011.
- [58] F. Moosmann, C. Stiller, "Joint Self-localization and Tracking of Generic Objects in 3D Range Data", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1138-1144, 2013.
- [59] R. O. Chavez-Garcia, T. Vu, O. Aycard, "Fusion at Detection Level for Frontal Object Perception", *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 1225-1230, 2014.
- [60] R. O. Chavez-Garcia, O. Aycard, "Multiple Sensor Fusion and Classification for Moving Object Detection and Tracking", *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, Vo. 17, pp. 525-534, 2016.
- [61] Y. Matsushita, E. Ofek, W. Ge, X. Tang, H. Y. Shum, "Full-frame Video Stabilization with Motion Inpainting", *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 28, No. 7, pp. 1150-1163, 2006.
- [62] A. Yamashita, I. Fukuchi, T. Kaneko, K. T. Miura, "Removal of Adherent Noises from Image Sequences by Spatio-temporal Image Processing", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2386-2391, 2008.
- [63] 福地功, 山下淳, 金子透, 三浦憲二郎, "時空間画像処理による雨天時画像か

- らの視野妨害ノイズ除去", 映像情報メディア学会誌, Vol. 62, No. 5, pp. 771-777, 2008.
- [64] 栗林宏輔, 川崎洋, 小野晋太郎, 池内克史, "移動カメラ映像の障害物除去のための時空間画像フィルタの提案", 画像の認識・理解シンポジウム, IS2-32, pp. 1066-1072, 2009.
- [65] J. Davis, S. R. Marschner, M. Garr, M. Levoy, "Filling Holes in Complex Surfaces Using Volumetric Diffusion", Proc. Int. Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, pp. 428-438, 2002.
- [66] J. Wang, M. M. Oliveira, "Filling Holes on Locally Smooth Surfaces Reconstructed from Point Clouds", Image and Vision Computing, Vol. 25, No. 1, pp. 103-113, 2007.
- [67] T. Ju, "Robust Repair of Polygonal Models", ACM Trans. on Graphics, Vol. 23, No. 3, pp. 888-895, 2004.
- [68] A. Sharf, M. Alexa, D. Cohen-Or, "Context-based Surface Completion", ACM Trans. on Graphics, Vol. 23, No. 3, pp. 878-887, 2004.
- [69] S. Xu, A. Georghiadis, H. Rushmeier, J. Dorsey, L. McMillan, "Image Guided Geometry Inference", Proc. Int. Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, pp. 310-317, 2006.
- [70] F. Stulp, F. Dell'Acqua, R. B. Fisher, "Reconstruction of Surfaces Behind Occlusions in Range Images", Proc. Int. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling, pp. 232-239, 2001.
- [71] R. Schnabel, P. Degener, R. Klein, "Completion and Reconstruction with Primitive Shapes", Computer Graphics Forum, Vol. 28, No. 2, pp. 503-512, 2009.
- [72] T. P. Breckon, R. B. Fisher, "Three-dimensional Surface Relief Completion via Nonparametric Techniques", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 30, No. 12, pp. 2249-2255, 2008.
- [73] M. Pauly, N. J. Mitra, J. Giesen, L. Guibas, M. Gross, "Example-based 3D Scan Completion", Proc. ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Geometry Processing, pp. 23-32, 2005.
- [74] V. Kraevoy, A. Sheffer, "Template-based Mesh Completion", Proc. ACM

- SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Geometry Processing, pp. 13-22, 2005.
- [75] S. Park, X. Guo, H. Shin, H. Qin, "Shape and Appearance Repair for In-complete Point Surfaces", Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision, Vol. 2, pp. 1260-1267, 2005.
- [76] N. Kawai, A. Zakhor, T. Sato, N. Yokoya, "Surface Completion of Shape and Texture Based on Energy Minimization", Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing, pp. 913-916, 2011.
- [77] P. Stavrou, P. Mavridis, G. Papaioannou, G. Passalis, T. Theoharis, "3D Object Repair Using 2D Algorithms", Proc. Int. Conf. on Computational Science, Vol. 2, pp. 271-278, 2006.
- [78] E. Pérez, S. Salamanca, P. Merchán, A. Adán, C. Cerrada, I. Cambero, "A Robust Method for Filling Holes in 3D Meshes Based on Image Restoration", Proc. Int. Conf. on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems, pp. 742-751, 2008.
- [79] D. Doria, R. J. Radke, "Filling Large Holes in LiDAR Data by Inpainting Depth Gradients", Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, pp. 65-72, 2012.
- [80] M. Bertalmio, G. Sapiro, V. Caselles, C. Ballester, "Image Inpainting", Proc. ACM SIGGRAPH, pp. 417-424, 2000.
- [81] M. Bertalmio, A. L. Bertozzi, G. Sapiro, "Navier-stokes, Fluid Dynamics, and Image and Video Inpainting", Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 355-362, 2001.
- [82] M. Oliveira, B. Bowen, R. McKenna, Y. Chang, "Fast Digital Image Inpainting", Proc. Int. Conf. on Visualization, Imaging and Image Processing, pp. 261-266, 2001.
- [83] M. M. Hadhoud, K. A. Moustafa, S. Z. Shenoda, "Digital Images Inpainting Using Modied Convolution Based Method", Int. Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, Vol. 1, No. 1, pp. 1-10, 2008.
- [84] Y. Matsushita, E. Ofek, X. Tang, H. Y. Shun, "Full-Frame Video

- Stabilization", Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 50-57, 2005.
- [85] A. Criminisi, P. Pérez, K. Toyama, "Region Filling and Object Removal by Exemplar-based Image Inpainting", IEEE Trans. on Image Processing, Vol. 13, No. 9, pp. 1200-1212, 2004.
- [86] M. Daisy, D. Tschumperlé, O. Lézoray, "A Fast Spatial Patch Blending Algorithm for Artefact Reduction in Pattern-based Image Inpainting", Proc. ACM SIGGRAPH Asia Technical Briefs, pp. 8:1-8:4, 2013.
- [87] Y. Wexler, E. Shechtman, M. Irani, "Space-time Completion of Video", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 29, No. 3, pp. 463-476, 2007.
- [88] 河合紀彦, 佐藤智和, 横矢直和, "テクスチャの明度変化と局所性を考慮したパターン類似度を用いたエネルギー最小化による画像修復", 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J91-D, No. 9, pp. 2293-2304, 2008.
- [89] N. Kawai, T. Sato, N. Yokoya, "Image Inpainting Considering Brightness Change and Spatial Locality of Textures and Its Evaluation", Proc. Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology, pp. 271-282, 2009.
- [90] N. Kawai, N. Yokoya, "Image Inpainting Considering Symmetric Patterns", Proc. IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition, pp. 2744-2747, 2012.
- [91] S. Darabi, E. Shechtman, C. Barnes, D. B. Goldman, P. Sen, "Image Melding: Combining Inconsistent Images Using Patch-based Synthesis", ACM Trans. on Graphics, Vol. 31, No. 4, pp. 82:1-82:10, 2012.
- [92] J. Huang, S. B. Kang, N. Ahuja, J. Kopf, "Image Completion Using Planar Structure Guidance", ACM Trans. on Graphics, Vol. 33, No. 4, 2014.
- [93] D. Aiger, D. Cohen-Or, N. J. Mitra, "Repetition Maximization Based Texture Rectification", Computer Graphics Forum, Vol. 31, No. 2, pp. 439-448, 2012.
- [94] Z. Zhang, A. Ganesh, X. Liang, Y. Ma, "TILT: Transform Invariant Low-rank Textures", Int. Journal of Computer Vision, Vol. 99, No. 1,

- pp. 1-24, 2012.
- [95] H. Sasao, N. Kawai, T. Sato, N. Yokoya, "A Study on Effect of Automatic Perspective Correction on Exemplar-based Image Inpainting", *ITE Trans. on Media Technology and Applications*, Vol. 4, No. 1, pp. 21-32, 2016.
- [96] N. Kawai, T. Sato, N. Yokoya, "Diminished Reality Based on Image Inpainting Considering Background Geometry", *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 22, No. 3, pp. 1236-1247, 2016.
- [97] <https://www.sick.jp/product/automatic/laser/>
- [98] TOPCON IP-S2 取扱説明書
- [99] <http://www.ptgrey.com/Cameras>
- [100] P. Misra, P. Enge 原著, 測位航法学会 訳: 精説 G P S 基本概念・測位原理・信号と受信機 (改訂第2版), 2010.
- [101] N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray Level Histograms", *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 9, pp. 62-66, 1979.
- [102] Japanese Ministry of Transportation: The Safety Standards for Road Trucking Vehicles, Ordinance of the Ministry of Transportation No. 67 of July 28, 1951. (Latest revision: Ordinance of the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism No. 63 of Aug. 31, 2016.)
- [103] 金谷典武, 河合紀彦, 佐藤智和, 横矢直和, "屋外環境の三次元モデル化のための欠落した点群データの補間", *画像の認識・理解シンポジウム*, PS2-59, pp. 1-4, 2016.
- [104] http://www.topcon.co.jp/positioning/products/product/3dscanner/IP-S2_Standard-plus_J.html
- [105] http://www.topcon.co.jp/positioning/products/product/3dscanner/IP-S3_HD1_J.html
- [106] 科学技術イノベーション総合戦略2016, 平成28年5月24日閣議決定, 2016.

研究業績

学術論文誌

1. T. Kanatani, H. Kume, T. Taketomi, T. Sato, N. Yokoya, “Removal of Moving Objects from Point Cloud Data for 3D Modeling of Outdoor Environments”, IIEEJ (The Institute of Image Electronics Engineers of Japan) Transactions on Image Electronics and Visual Computing, Vol. 3, No. 1, pp. 54-62, June 2015. (第3章に関連)
2. 才木常正, 北川洋一, 金谷典武, 熊澤由佳子, 林昭博, “日本語文章における文字重心間隔の揺らぎ”, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J80-A, No. 9, pp. 1572-1573, Sep. 1997.
3. 金谷典武, 白井良明, “エネルギー最小化原理を利用した角膜内皮細胞の抽出”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J80-D-II, No. 7, pp. 1705-1711, July 1997.
4. 金谷典武, 坂上勝彦, 山本和彦, “動き情報を利用した角膜内皮細胞画像の評価と平滑化”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J76-D-II, No. 2, pp. 391-396, Feb. 1993.
5. 北川洋一, 金谷典武, 林昭博, 南茂夫, “2波長照射法を用いたレーザー散乱光ファイバ粒子径モニタにおける粒子径分布の影響”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 27, No. 4, pp. 474-476, April 1991.
6. 北川洋一, 金谷典武, 林昭博, 南茂夫, “2波長照射法を用いたレーザー散乱光ファイバ粒子径モニタ”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 26, No. 12, pp. 1349-1355, Dec. 1990.

査読付き国際会議

1. T. Kanatani, H. Kume, T. Taketomi, T. Sato, N. Yokoya, “Detection of Moving Objects from Point Cloud Data Using Photometric Consistency and Prior Knowledge of Road Environment”, Proc. The Society of Instrument and Control Engineers Annual Conference 2014 (SICE2014), pp. 341-346, Sep. 2014. (第3章に関連)

2. T. Kanatani, H. Kume, T. Taketomi, T. Sato, N. Yokoya, “Detection of 3D Points on Moving Objects from Point Cloud Data for 3D Modeling of Outdoor Environments”, Proc. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP2013), pp. 2163-2167, Sep. 2013. (第3章に関連)
3. I. Nakahori, T. Ato, K. Murakami, D. Araki, T. Kanatani, A. Vardy, “The Use of Inverter-driven Jet-fans to Reduce Tunnel Ventilation Costs”, Proc. 13th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels (13th ISAVVT), pp. 69-80, May 2009. (Best Paper Award)

研究会・シンポジウム

1. 金谷典武, 河合紀彦, 佐藤智和, 横矢直和, “屋外環境の三次元モデル化のための欠落した点群データの補間”, 第19回画像の認識・理解シンポジウム, PS2-59, pp. 1-4, Aug. 2016. (第4章に関連)
2. 金谷典武, 糸秀行, 武富貴史, 佐藤智和, 横矢直和, “屋外環境三次元モデル化のための三次元点群からの輝度変化に基づく移動物体上の点の検出”, 電子情報通信学会ITS研究会, ITS2011-42, pp. 153-158, Feb. 2012. (第3章に関連)
3. 金谷典武, 白井良明, “全方位視覚センサを利用したステレオ視”, 電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会, PRMU2000-09, pp. 57-63, Sep. 2000.
4. 金谷典武, 白井良明, “画像処理を利用した角膜内皮細胞の抽出”, 計測自動制御学会第39回パターン計測部会研究会, PG0006/97, pp. 1-7, April 1997.
5. 瀧澤由佳子, 金谷典武, 松本哲也, 北川洋一, “視覚センサを用いたロータリーDIPスイッチの自動切替システム”, 電気学会計測研究会, Vol. IM-95, No. 43-47, pp. 23-29, July 1995.
6. 金谷典武, 古澤春樹, 白井良明, “角膜内皮細胞の検出と細胞形状の決定”, 電子情報通信学会パターン認識・理解研究会, PRU93-118, pp. 17-22, Jan. 1994.

7. 金谷典武, 坂上勝彦, 山本和彦, “動き情報を利用した画像評価と平滑化—角膜内皮細胞画像への応用—”, 第7回産業における画像センシング技術シンポジウム, pp. 61-66, July 1992.
8. 金谷典武, 坂上勝彦, 山本和彦, “動き情報を利用した角膜内皮細胞画像の評価と平滑化”, 非破壊検査画像処理特別研究委員会, 005-163, pp. 9-16, June 1992.

全国大会・支部大会

1. 金谷典武, 河合紀彦, 佐藤智和, 横矢直和, “屋外環境の三次元モデル化のための移動物体の自動検出”, 2016年電子情報通信学会総合大会講演論文集, D-12-54, March 2016. (第4章に関連)
2. 金谷典武, “交通事故現場見取図作成のための三次元計測システムの開発”, 電気関係学会関西支部連合大会, 30A3-29, Oct. 2011.
3. 金谷典武, 糸秀行, 武富貴史, 神原誠之, 横矢直和, “屋外環境の三次元モデル化のための動物体の判定”, 2011年電子情報通信学会総合大会講演論文集, D-12-31, March 2011.
4. 金谷典武, 森下順治, “交通事故現場見取図作成のための三次元計測システムの検討”, 電子情報通信学会 2008年総合大会, D-12-92, p. 223, March 2008.
5. 森下順治, 金谷典武, “視覚センサを利用した三次元計測システムの検討”, 日本法科学技術学会第13回学術集会, E-7, p. 157, Nov. 2007.
6. 金谷典武, 佐伯光哉, “色柄周期を利用した織物の欠点抽出”, 電気関係学会関西支部連合大会, G14-3, Nov. 2005.
7. 金谷典武, 北川洋一, 熊澤由佳子, 白井良明, “救助用探索システムの開発”, 電気関係学会関西支部連合大会, G2-8, Nov. 1998.
8. 熊澤由佳子, 金谷典武, 北川洋一, 上浦尚武, 畑豊, 大和一晴, “伸展指による指文字の分類とその認識”, 1997年電子情報通信学会総合大会, A-14-24, p. 334, March 1997.
9. 才木常正, 北川洋一, 金谷典武, 熊澤由佳子, 林昭博, “文章における文字間隔のゆらぎ”, 電気関係学会関西支部連合大会, G12-15, Nov. 1996.

10. 金谷典武, 白井良明, “エネルギー最小化原理を利用した角膜内皮細胞の抽出”, 電気関係学会関西支部連合大会, G12-67, Nov. 1995.
11. 金谷典武, 古澤春樹, “反復演算を利用した角膜内皮細胞の抽出”, 1993年電子情報通信学会春季大会, D-503, p. 7-264, March 1993.
12. 金谷典武, 坂上勝彦, 山本和彦, “動き情報を利用した画像評価と平滑化—角膜内皮細胞画像への応用—”, 1992年電子情報通信学会春季大会, D-593, p. 7-335, March 1992.
13. 金谷典武, 松本哲也, 北川洋一, “半導体レーザーの周波数変調を利用した屈折率測定”, 第38回応用物理学関係連合講演会, 30p-B-12, March 1991.
14. 金谷典武, 松本哲也, 北川洋一, 古澤春樹, “一般化ハフ変換を用いた酵母菌画像の計測”, 1990年電子情報通信学会秋季全国大会, D-303, p. 6-305, Oct. 1990.

特許

1. 今井達也, 尾野英夫, 中村洋一, 金谷典武, 富田厚志, 小西達也, “金属の結晶粒界解析方法”, 特許 4403271 号, Nov. 2009.

解説

1. 石黒浩, 西原修, 金谷典武, 新田宏基, 西村拓一, “全方位視覚センサー”, O plus E, Vol. 21, No. 11, pp. 1400-1405, Nov. 1999.
2. 金谷典武, “画像処理を利用した角膜内皮細胞の抽出”, 画像ラボ, Vol. 9, No. 3, pp. 47-50, March 1998.

表彰

1. The HBI Haerter AG Best Paper Award, 13th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels (13th ISAVVT), May 2009.