



Title	高精度道路地図整備と舗装面維持管理のためのMMS点群からの道路情報ベクトルデータ抽出
Author(s)	本間, 亮平
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第15669号
Issue Date	2023-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k15669
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/90895
Type	doctoral thesis
File Information	Ryohei_Honma.pdf



高精度道路地図整備と舗装面維持管理
のための MMS 点群からの
道路情報ベクトルデータ抽出

本間 亮平

2023 年 8 月

北海道大学 大学院情報科学研究科
システム情報科学専攻

本論文は北海道大学大学院情報科学研究科の
博士（情報科学）授与の要件として提出した博士論文である。

本間 亮平

審査委員：	主査	伊達 宏昭	准教授
	副査	金井 理	特任教授
		小野里 雅彦	教授

高精度道路地図整備と舗装面維持管理のための MMS 点群からの道路情報ベクトルデータ抽出*

本間 亮平

概要

近年、交通事故の削減、交通渋滞の緩和、道路の維持管理の自動化などを目的として、自動運転技術の開発が進められており、あらゆる環境や状況下において安全に自動運転を実現するためには、高精度道路地図が必要とされている。日本における道路の総延長は約 128 万 km と長大であり、一般道路が大きな割合を占めることから、特に一般道路において効率良く高精度道路地図を作成していくことが自動運転の実現に向けた課題となっている。また、近年、道路の維持管理に関わる技術者不足が顕在化しており、道路舗装の維持修繕に関する予算も減少する傾向にある。そのため、限られた技術者と予算によって効率的に道路舗装を点検し、予防保全型の維持管理に転換することで、道路舗装の長寿命化とライフサイクルコストの縮減を実現することが求められている。一方で、レーザスキャナ等を搭載した MMS (Mobile Mapping System) によって取得した点群から、高精度道路地図を作成したり、道路舗装面の損傷を抽出する技術開発が進んでおり、複雑な構造を持つ一般道路においても正確かつ効率的に高精度道路地図を作成し、様々な種類や大きさを持つ道路舗装面の損傷を高精度に抽出する技術が求められている。

高精度道路地図のうち、車道と歩道の境界線である車道境界線は自動運転の安全性にかかわる重要な取得項目であるが、MMS 点群からの自動抽出においては、雑草などによる縁石の遮蔽の影響によって抽出精度が低下することや、一般道路における縁石の切り下げ部や交差点において抽出できないことや抽出精度が低下することが課題となっている。また、MMS 点群からの道路舗装面の損傷抽出では、わだち掘れやポットホール等の領域型損傷とひび割れ等の線状型損傷の抽出を包括的に取り扱える手法が存在せず、スケールの異なる領域型損傷や複雑な線状型損傷の抽出が困難であり、損傷抽出精度が低いことが課題となっている。

本研究では、これらの課題を解決するために、MMS 点群から一般道路における車道境界線を抽出する技術と、道路舗装面の領域・線状型損傷をベクトルデータとして抽

出する技術を開発した。車道境界線の自動抽出においては、平滑化したスキャンラインを使用し、スキャンラインの湾曲度と車道境界線の滑らかさを用いて車道境界線を追跡することにより、局所的な遮蔽や段差の規模に依存しにくい手法を提案した。領域・線状型損傷の抽出においては、各点の損傷の影響の低さを表す指標である非損傷度から損傷のない舗装面である正常舗装面を推定した。さらに、正常舗装面から算出した各点の変状変位量に基づき、領域型損傷ポリゴンと線状型損傷ポリラインを抽出し、領域型損傷においては損傷部の幾何学的特徴に基づいて種別を判定する手法を提案した。

交差点や、縁石、雑草などの遮蔽を含む一般道路において取得した MMS 点群に対して提案した車道境界線の抽出方法を適用した結果、完全性、正確性、および品質で 92.9%~99.5%、合計で 10.5mm~19.6mm の精度を達成した。また、MMS 点群に対して提案した道路舗装面の損傷抽出手法を適用した結果、領域型損傷の IoU は 80.2% を達成し、線状型損傷においては、90.7% の Recall, 97.0% の Precision, 10.0mm の RMS を達成し、様々なスケールと複雑な形状を持つ損傷を抽出できることを確認した。

キーワード: MMS, 点群, スキャンライン, 車道境界線, 縁石, 道路舗装, 損傷抽出, ベクトルデータ

*北海道大学 大学院情報科学研究科システム情報科学専攻, 博士論文, SSI-DT79185212, 2023 年 8 月 28 日

Vector data extraction of road information for maintenance of high-definition map and pavement asset management using MMS point clouds[†]

Ryohei Honma

Abstract

In recent years, autonomous driving technologies have been developed to reduce traffic accidents, improve traffic congestion, and automate pavement maintenance. For the realization of safety autonomous driving in several environments and situations, it is necessary to generate high-definition maps. The total length of roads in Japan is about 1.28 million km, and most of them are local roads. Thus, efficient generation of high-definition maps for local roads is crucial for widespread adoption of autonomous driving. Furthermore, the shortage of engineers involved in pavement asset management has become apparent, and the budget for maintain and repair of road pavement tends to decrease. Thus, it is necessary to reduce life cycle costs and pronged life of road pavement by efficiently inspecting with limited engineers and budgets and shifting to preventive maintenance. On the other hand, technologies of automatic generation of high-definition maps and extraction of defects on road pavement using point cloud acquired by MMS (Mobile Mapping System) mounted laser scanners have recently been developed. Then, there is a demand for technologies to generate high-definition maps for local roads with complex structures, and extract defects on road pavement of various types and sizes with high accuracy.

Road edges are the boundaries between roads and sidewalks and one of the main elements of high-definition maps. In the automatic extraction of road edges from MMS point clouds, there are some problems that the extraction accuracy becomes low at curb cuts, intersections, and small occlusion parts from weeds and fallen leaves. Also, there is no method which extracts region-type defects such as rutting and potholes and line-type defects such as cracks using a single framework from MMS point clouds. In addition, it is difficult to extract region-type defects with different scales and line-type defects with complex geometries, and there is a problem which the defects extraction accuracy is low.

In this study, in order to resolve these problems, we developed an extraction method of road edges on local roads and region and line-type defects on road pavement as vector data from

MMS point clouds. In the automatic extraction of road edges, we proposed a tracking method of the road edges based on the bend angle of scanlines and smoothness of road edges by using smoothed scanlines. In the extraction of region and line-type defects on road pavement, we proposed an estimation method of ideal pavement surface based on smooth curve fitting to scanlines using an index that represents the impact level of defects at each point. Then, vector data of region and line-type defects are extracted using displacements from the ideal pavement surface at each point, and region-type defects are classified into details defects type using their geometric features in our proposed method.

We applied the proposed extraction method of road edges to MMS point clouds acquired on local roads, including intersections, curbs, and weeds, and verified the effectiveness of the proposed method. Moreover, we also applied the proposed extraction method of pavement defects to MMS point clouds and confirmed that the proposed method accurately extracts region-type defects with different scale and line-type defects with complex geometry.

Key Word: Mobile Mapping System, Scanline, Road Edge, Curb, Road Pavement, Defect Extraction, Vector Data

† Doctoral Thesis, Division of Systems Science and Informatics, Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University, SSI-DT79185212, August 28, 2023

目次

高精度道路地図整備と舗装面維持管理のための MMS 点群からの道路情報ベクトルデータ抽出*	i
Vector data extraction of road information for maintenance of high-definition map and pavement asset management using MMS point clouds†	iii
目次	v
図目次	vii
表目次	xi
第 1 章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 関連研究	12
1.2.1 高精度道路地図構成地物の抽出についての関連研究	12
1.2.2 道路舗装面の損傷抽出についての関連研究	22
1.3 本研究の目的と特徴	28
1.3.1 本研究の目的	28
1.3.2 本研究の特徴	28
1.4 本論文の構成	29
第 2 章 スキャンラインの湾曲度評価に基づく MMS 点群からの車道境界線抽出	31
2.1 提案する車道境界線抽出手法	31
2.1.1 提案手法の概要	31
2.1.2 MMS 点群の車両進行方向への投影	33
2.1.3 湾曲度の算出	34
2.1.4 不均一点群の除外	36
2.1.5 スキャンラインの平滑化	37
2.1.6 車道境界線シード点の抽出	40
2.1.7 車道境界線の生成	41
2.2 車道境界線の抽出結果	44
2.2.1 実験用データ	44

2.2.2	評価方法	46
2.2.3	抽出結果と評価	48
2.3	まとめ	59
第3章	MMS点群からの道路面における領域・線状型損傷のベクトルデータ抽出	61
3.1	提案する領域・線状型損傷抽出手法	61
3.1.1	提案手法の概要	61
3.1.2	正常舗装面推定と変状変位量算出	62
3.1.2.1	概要	62
3.1.2.2	平滑化フィルタ	63
3.1.2.3	非損傷度の算出	64
3.1.2.4	正常舗装面推定と変状変位量算出	66
3.1.3	領域型損傷の抽出	69
3.1.3.1	概要	69
3.1.3.2	領域型損傷の領域抽出とポリゴン表現	70
3.1.3.3	領域型損傷種別の判定	71
3.1.4	線状型損傷の抽出	72
3.1.4.1	概要	72
3.1.4.2	線状型損傷候補点の抽出	73
3.1.4.3	線状型損傷クラスタの検出	74
3.1.4.4	線状型損傷のポリライン表現	77
3.2	領域・線状型損傷の抽出結果	81
3.2.1	実験用データ	81
3.2.2	正常舗装面推定と変状変位量算出の評価	82
3.2.3	領域型損傷の抽出結果とその評価	85
3.2.4	線状型損傷の抽出結果とその評価	88
3.3	まとめ	92
第4章	結論と今後の課題	93
4.1	結論	93
4.2	今後の課題	94
参考文献		96
謝辞		103
発表実績		104

図目次

図 1.1	高精度道路地図[5]	2
図 1.2	高速道路と一般道路の構造	3
図 1.3	自家用車の自動運転に係わるロードマップ[9].....	4
図 1.4	道路種別ごとの舗装方法[7]	5
図 1.5	道路舗装面の損傷種別	6
図 1.6	日本国内における道路実延長の推移[7].....	7
図 1.7	建設業就業者数の推移[14]	7
図 1.8	舗装のストックと舗装維持修繕費の推移[15].....	8
図 1.9	わだち掘れ量の測定方法	9
図 1.10	ひび割れ率の測定方法	9
図 1.11	既存の点検結果管理方式と理想形	9
図 1.12	Guan ら[25]による路面標示点群の抽出.....	13
図 1.13	Cheng ら[27]による路面標示の抽出・分類.....	14
図 1.14	Wen ら[32]による路面標示の抽出	14
図 1.15	Ma ら[33]による車線中心線の抽出	15
図 1.16	Soilán ら[33]による交通標識の検出	16
図 1.17	Guan ら[36]による交通標識の検出.....	16
図 1.18	Hervieu ら[39]による車道境界点の抽出.....	17
図 1.19	Hernández ら[40]による車道境界線の抽出	17
図 1.20	Rodriguez-Cuenca ら[41]による車道境界線の抽出.....	17
図 1.21	Zai ら[42]による車道境界線の抽出	18
図 1.22	Sha ら[43]による車道境界線の抽出	19
図 1.23	Yang ら[44]による車道境界線の抽出	19
図 1.24	Miyazaki ら[45]による道路平面構造の抽出	20
図 1.25	Ishikawa ら[47]による車道境界点の抽出.....	20
図 1.26	Gézero ら[48]による車道境界線の抽出.....	21
図 1.27	車道境界線の手動・自動作成手順	22
図 1.28	Oliveira ら[49]によるひび割れ抽出	23
図 1.29	Maeda ら[52]による路面損傷抽出.....	23

図 1.30	路面性状調査車両[53].....	24
図 1.31	Zhang ら[54]による領域・線状型損傷抽出.....	24
図 1.32	De Blasiis ら[55]による領域型損傷抽出.....	25
図 1.33	Van Der Horst ら[56]による損傷抽出.....	26
図 1.34	Zhong ら[58]による線状型損傷抽出.....	26
図 1.35	Río-Barral ら[59]による線状型損傷抽出.....	27
図 1.36	Ma ら[60]による線状型損傷抽出.....	27
図 2.1	レーザスキャナの設置角度と点群及び走行軌跡.....	31
図 2.2	スキャンライン.....	32
図 2.3	車道境界線の抽出手法.....	33
図 2.4	車両進行方向への点群の投影.....	34
図 2.5	縁石部及び歩道の切り下げ部の点分布.....	34
図 2.6	湾曲度の定義.....	35
図 2.7	最遠点の選択による湾曲度算出の効果.....	36
図 2.8	湾曲度の絶対値による不均一点の除外.....	36
図 2.9	平滑化フィルタの実験に使用するスキャンライン.....	38
図 2.10	区間 1 への平滑化フィルタ適用結果.....	39
図 2.11	区間 2 への平滑化フィルタ適用結果.....	39
図 2.12	湾曲度ピーク点の抽出.....	40
図 2.13	シード候補点の抽出.....	40
図 2.14	車道境界線シード点の抽出.....	41
図 2.15	車道境界線の生成.....	42
図 2.16	接続候補点の探索.....	42
図 2.17	水平方向および鉛直方向の角度変化.....	44
図 2.18	車道上の地物に対応する車道境界候補線の削除.....	44
図 2.19	歩道側の車道境界候補線の削除.....	44
図 2.20	Street Mapper 360 の外観と取得点群.....	45
図 2.21	MMS-X500ZL の外観と取得点群.....	45
図 2.22	定量評価方法.....	47
図 2.23	データ A の車道境界線抽出結果.....	49
図 2.24	データ A の車道境界線抽出結果の拡大図.....	50
図 2.25	データ A の車道境界線抽出誤差.....	50
図 2.26	データ B の車道境界線抽出結果.....	51
図 2.27	データ B の車道境界線抽出結果の拡大図.....	52
図 2.28	データ B の車道境界線抽出誤差.....	52
図 2.29	データ C の車道境界線抽出結果.....	53

図 2.30	データ C の車道境界線抽出結果の拡大図.....	54
図 2.31	データ C の車道境界線抽出誤差	54
図 2.32	複数バッファ幅による完全性と合計ギャップ長	57
図 2.33	ギャップ箇所の例	58
図 2.34	既存手法との比較	58
図 3.1	道路面損傷抽出手法の概要	62
図 3.2	スキャンラインの平滑化	63
図 3.3	損傷近傍箇所の湾曲度分布	65
図 3.4	損傷近傍箇所の非損傷度	65
図 3.5	正常舗装面	67
図 3.6	領域型損傷の正常舗装面推定結果	67
図 3.7	線状型損傷の正常舗装面推定結果	68
図 3.8	領域型損傷の抽出方法	69
図 3.9	領域型損傷の点群分布	70
図 3.10	モルフォロジーによる孤立点の削除と穴の補填	70
図 3.11	TimeGrid 空間.....	71
図 3.12	線状型損傷の抽出	73
図 3.13	孤立した損傷候補点の除去	74
図 3.14	線状型損傷クラスタの検出	74
図 3.15	アスペクト比	76
図 3.16	損傷候補点占有率	76
図 3.17	非損傷度の分布割合	77
図 3.18	線状型損傷ポリラインの生成	77
図 3.19	Farthest Point Sampling による初期代表点集合の抽出.....	78
図 3.20	鋭角判定による損傷端部における初期代表点の保存	79
図 3.21	MST の構築によるポリラインの生成	80
図 3.22	損傷代表値の比較	80
図 3.23	元の MMS 点群と車道部舗装面のみの MMS 点群.....	81
図 3.24	正常舗装面の推定結果	82
図 3.25	区間 1 における点群の反射強度表示	83
図 3.26	領域型損傷の正常舗装面からの変位 (区間 1)	83
図 3.27	区間 2 における点群の反射強度表示	83
図 3.28	領域型損傷の正常舗装面からの変位 (区間 2)	84
図 3.29	線状型損傷の正常舗装面からの変位 (区間 2)	84
図 3.30	区間 3 における点群の反射強度表示	84
図 3.31	線状型損傷の正常舗装面からの変位 (区間 3)	85

図 3.32	領域型損傷の抽出及び分類結果（区間 1）	86
図 3.33	領域型損傷の抽出及び分類結果（区間 2）	86
図 3.34	抽出データと正解データの比較（区間 1）	87
図 3.35	領域型損傷の変状変異量によるポリゴン表現.....	87
図 3.36	線状型損傷候補点の抽出結果（区間 3）	89
図 3.37	フィルタリング及びクラスタリング結果（区間 3）	89
図 3.38	OBB の長辺による損傷候補クラスタの抽出結果（区間 3）	89
図 3.39	Random Forest による線状型損傷クラスタの抽出結果（区間 3） ...	90
図 3.40	線状型損傷ポリラインの生成結果（区間 3）	90
図 3.41	線状型損傷の正解データ（区間 3）	90
図 3.42	線状型損傷ポリラインの生成結果（区間 2）	91
図 3.43	線状型損傷の正解データ（区間 2）	91

表目次

表 1.1	自動運転レベル.....	1
表 1.2	主な道路地図.....	3
表 1.3	道路計測技術・方法.....	12
表 2.1	MMS の仕様と取得点群の概要.....	46
表 2.2	各検証サイトの道路構造.....	46
表 2.3	データ A の定量評価結果.....	56
表 2.4	データ B の定量評価結果.....	56
表 2.5	データ C の定量評価結果.....	56
表 2.6	計算機の仕様.....	59
表 2.7	実証実験における処理時間.....	59
表 3.1	領域型損傷種別の判定基準.....	72
表 3.2	Random Forest における説明変数.....	76
表 3.3	線状型損傷の定量評価結果.....	91

第1章 緒論

1.1 研究背景

自動運転の実現により、交通事故の削減、交通渋滞の緩和、道路の維持管理の自動化などが期待されるため、近年、あらゆる環境や状況下において安全に自動運転する技術開発が進められている。自動運転では、車両に搭載した GNSS (Global Navigation Satellite System: 全地球航法衛星システム) によって車両の現在位置を特定すると共に、カメラや LiDAR (Light Detection And Ranging) などのセンサーから周囲の状況を把握することで車両の制御を行う。さらに、高精度道路地図と呼ばれる正確な道路地図を使用して、車両の現在位置の把握の高精度化や、交差点での右左折を想定した車線変更やカーブ箇所、急傾斜箇所などにおける滑らかな加減速といった運転計画を立案する。SAE International の定義する自動運転レベル[1]では、運転者がすべてのタスクを実行するレベル 0 から全てのタスクをシステムが実行するレベル 5 まで 6 段階を定義しており (表 1.1), 操縦の主体がシステムとなるレベル 3 以上では高精度道路地図を使用することになる。

表 1.1 自動運転レベル

レベル	概要	操縦※の主体
運転者が一部又は全ての動的運転タスクを実行		
レベル0	<ul style="list-style-type: none"> 運転者が全ての動的運転タスクを実行 	運転者
レベル1	<ul style="list-style-type: none"> システムが縦方向又は横方向のいずれかの車両運動制御のサブタスクを限定領域において実行 	運転者
レベル2	<ul style="list-style-type: none"> システムが縦方向及び横方向両方の車両運動制御のサブタスクを限定領域において実行 	運転者
自動運転システムが(作動時は)全ての動的運転タスクを実行		
レベル3	<ul style="list-style-type: none"> システムが全ての動的運転タスクを限定領域において実行 作動継続が困難な場合は、システムの介入要求等に適切に応答 	システム (作動継続が困難な場合は運転者)
レベル4	<ul style="list-style-type: none"> システムが全ての動的運転タスク及び作動継続が困難な場合への応答を限定領域において実行 	システム
レベル5	<ul style="list-style-type: none"> システムが全ての動的運転タスク及び作動継続が困難な場合への応答を無制限に(すなわち、限定領域内ではない)実行 	システム

※ 認知、予測、判断及び操作の行為を行うこと

高精度道路地図は、従来から整備されてきた2次元の地図である基盤地図情報[2]や道路台帳[3]などと異なり、3次元地図であり相対的な位置精度が高い。高精度道路地図と基盤地図情報と道路台帳との比較を表1.2に示す。高精度道路地図は、図1.1に示すように道路の境界線や、交通標識、信号などの実在地物の他に、有向のポリラインである車線中心線などの仮想地物が含まれているといった特徴がある[4]。また、これらの情報の他に、交通規制情報など動的に変化する情報も自動運転用の地図に含まれる。

日本における道路の総延長は約128万km[7]と長大であることから、効率良く自動運転用の地図を作成し更新していくことが自動運転の実現に向けた課題となっている。そのため、大学や企業、研究機関等において3次元地図の自動作成技術の開発が進められている。自動運転用地図データの整備を目的として国内の自動車メーカーなどが共同出資して設立した会社においては、2020年度時点で高速自動車国道を中心に約31,000km（上下線を合計した延長距離）のデータを整備しており、今後は主に一般道路がデータ整備の対象となる[8]。

高速自動車国道は、維持管理に厳格な基準が設けられており、適切な維持管理がなされることから、雑草の繁茂や白線のかすれなども少なく、地図作成においても自動化が容易である。一方、一般道路は、管理する各自治体が財源や人手不足などの問題を抱えており、維持管理が不十分となっている場合もある。また、交差点や敷地への接道など複雑な構造を有するため、地図作成の自動化は高速自動車国道を対象とする場合よりも困難である（図1.2）。

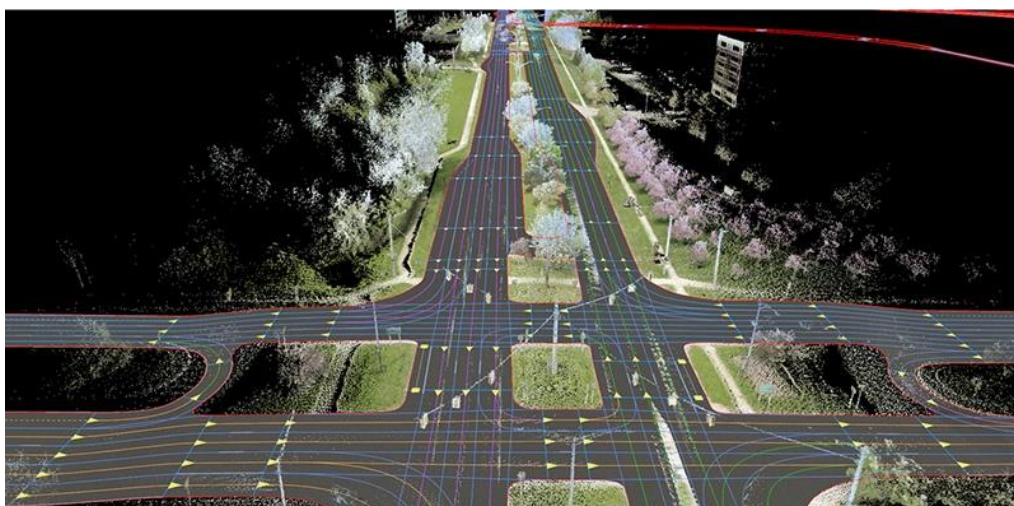


図 1.1 高精度道路地図[5]

表 1.2 主な道路地図

地図名称	基盤地図情報	道路台帳	高精度道路地図
整備主体	国土交通省 国土地理院	道路管理者（国・都道府県・市町村）	民間企業
2次元/3次元	2次元	2次元	3次元
位置精度	都市計画区域内は水平方向の誤差が2.5m以内 都市計画区域外は水平方向の誤差が25.0m以内	水平位置の標準偏差が0.70m以内（地図情報レベル1000）	整備主体により異なる（例えば相対位置精度は0.15m程度[6]）
主な内容	<ul style="list-style-type: none"> ・海岸線 ・河川区域界 ・行政区画境界線 ・道路縁 ・軌道の中心線 ・標高点 ・建築物の外周線 ・市町村の町・字の境界線 ・街区の境界線 	<ul style="list-style-type: none"> ・道路区域線 ・歩道 ・側溝 ・マンホール ・信号機 ・交通標識 ・街路灯 ・建物外形線 ・電柱 ・植栽 	<ul style="list-style-type: none"> ・路肩縁(車道境界線) ・道路標示(路面表示) ・区画線 ・照明灯(街路灯) ・信号機 ・交通標識 ・車線リンク(車線中心線) ・交通規制情報 ・事故情報
主な活用用途	都市計画・公共施設管理	道路占有物，道路境界管理等の道路管理	自動運転，運転支援システム



(a) 高速道路の構造



(b) 一般道路の構造

図 1.2 高速道路と一般道路の構造

首相官邸の高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部（IT 総合戦略本部）が発表した「官民 ITS 構想・ロードマップ 2020」[9]によれば、図 1.3 に示す通り高速道路における自家用車の自動運転は 2025 年にレベル 4 の実現を期待されているが、一般道路における自動運転については記載がなく、実現は未定となっている状況である。この理由として、自動車の制御に関する課題もあるが、一般道路の地図作成の自動化が実現しておらず、地図作成に多くの期間がかかり、作業コストが大きいために実用的な価格でデータを提供できないことが挙げられる。

一方、道路における車道の舗装面は、通行する車両の影響などにより損傷が発生するため、定期的な点検と補修や修繕によって道路利用者の安全性や快適性を確保することが重要である。道路の舗装状態が悪い場合、車両の走行が不安定になり安全性が低下する他、乗り心地が悪くなるといった快適性の低下、騒音や振動の発生による近隣住民の生活環境への影響、降雨時に水たまりが発生し、車両がスリップする危険性や、車両通行時に歩行者に水がかかる危険性などの問題が生じる。

日本における道路種別ごとの舗装方法は図 1.4 に示すとおり、アスファルトを使用した道路舗装面が大きな割合を占める。簡易舗装は舗装の基礎部分を造らずに表面にアスファルト混合物を敷き詰めた舗装である。高速道路では 9 割以上がアスファルト舗装となっており、一般国道や都道府県道では 9 割以上、市町村道では約 7 割がアスファルト舗装と簡易舗装となっている。

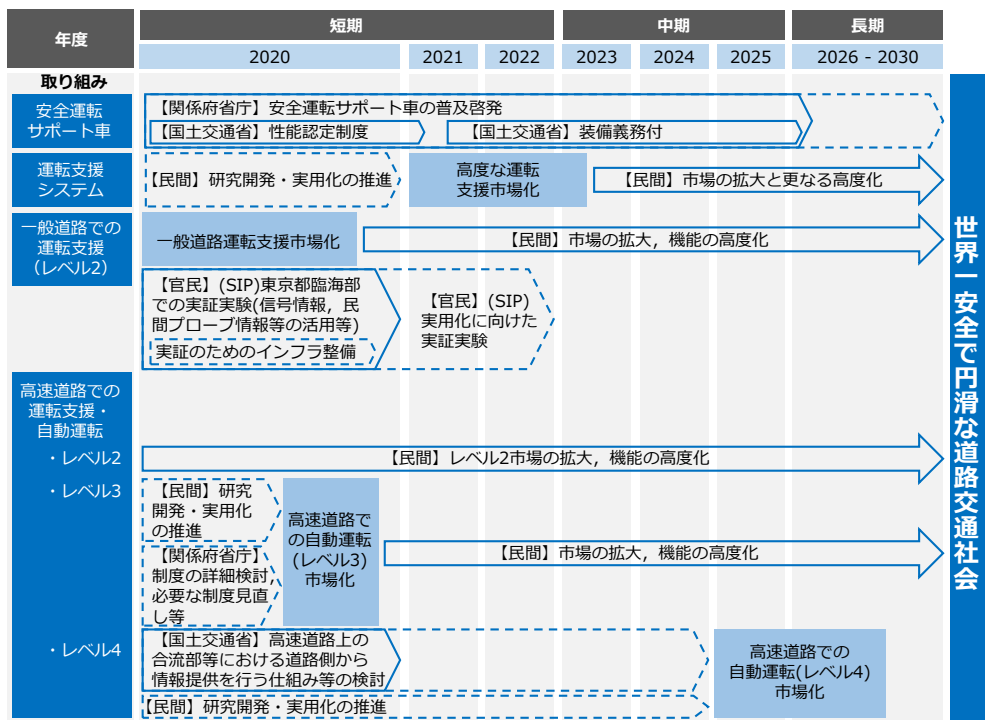


図 1.3 自家用車の自動運転に係わるロードマップ[9]

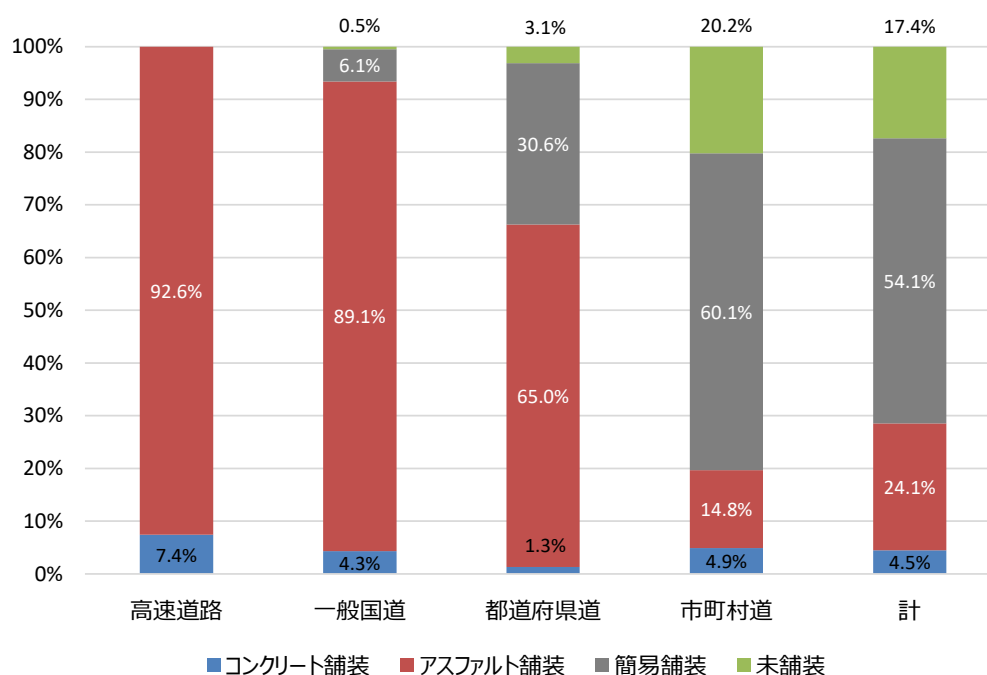


図 1.4 道路種別ごとの舗装方法[7]

アスファルト混合物による舗装面では、通行車両により繰り返し荷重がかかることによりひび割れ（図 1.5 (a)）が発生し、ひび割れが進行すると雨水などの水分がひび割れを介して路床や路盤に浸透し、大きいひび割れとなり、路床や路盤の変形と舗装面の不同沈下を引き起こす。さらに、表層部が破損してポットホール（穴）（図 1.5 (b)）が発生することもある。また、支持力の低下した路床や路盤に大きい荷重がかかったり、夏季に舗装が高温となっている状態で繰り返し荷重がかかることにより、表層部が塑性変形を起こし、わだち掘れが発生する（図 1.5 (c)）。その他にもアスファルト舗装では寄りやくぼみ、表層剥離などの損傷も発生する（図 1.5 (d, e, f)）。

損傷の発生は、地域や交通量、舗装面の施工方法などに依存する。例えば、積雪寒冷地では、積雪時に路面の水分量が多くなり、除雪やタイヤチェーンの使用により路面が損傷することから、ひび割れやポットホールが発生しやすい。また、重量の重い大型車両の通行する幹線道路ではわだち掘れなどの損傷が早く進行する。

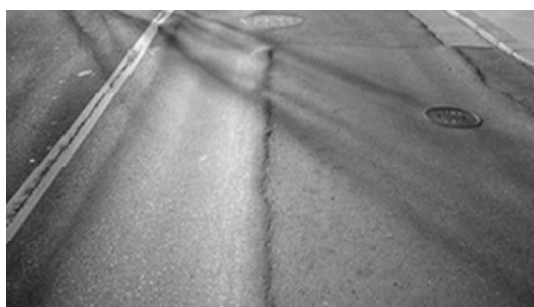
日本国内における道路実延長は前述のとおり約 128 万 km であり、現在も新規道路が整備されている状況にある（図 1.6）。一方で、道路の維持管理を含む地方公共団体の土木関係職員数や建設業の就業者数は 2000 年代以降継続的に減少しており（図 1.7）、今後もこの傾向は継続すると予測されている。そのため、今後は限られた技術者によって効率的に維持管理することが求められる。



(a) ひび割れ



(b) ポットホール[10]



(c) わだち掘れ[11]



(d) 寄り[11]



(e) くぼみ[12]



(f) 表層剥離[12]

図 1.5 道路舗装面の損傷種別

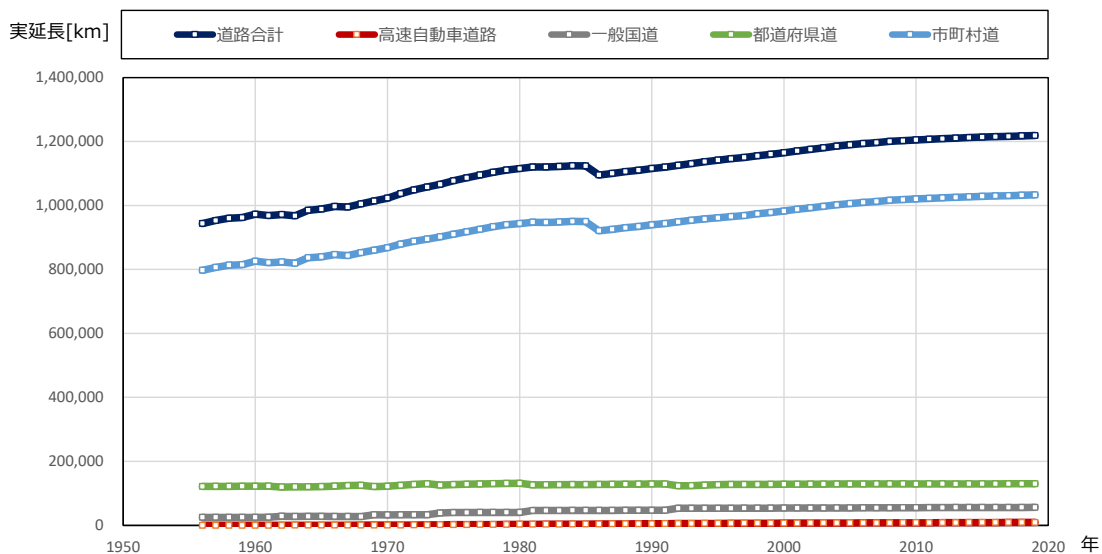


図 1.6 日本国内における道路実延長の推移[7]

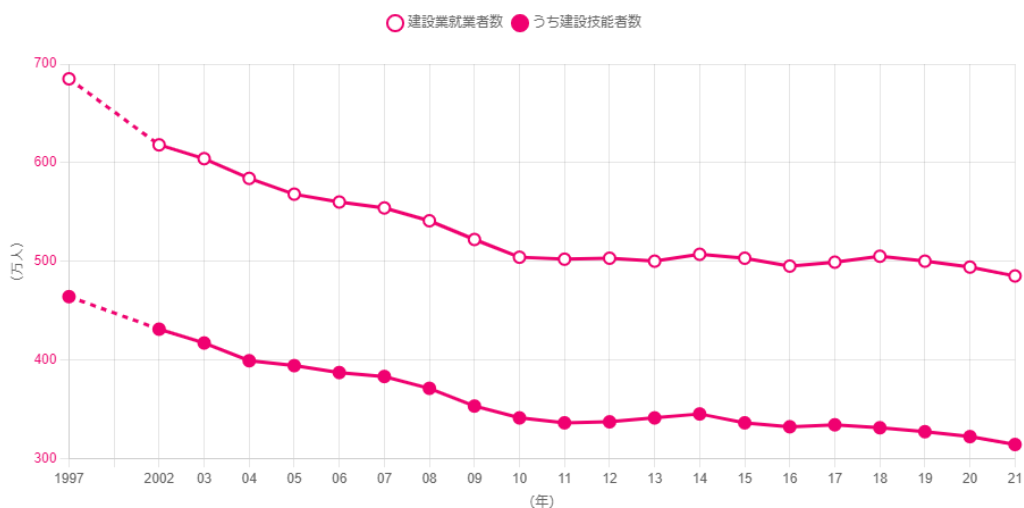


図 1.7 建設業就業者数の推移[13]

また、舗装維持修繕費に関しては図 1.8 に示す通り 1990 年代以降減少する傾向にある。損傷が進行した場合は路盤を修繕する必要となり、修繕費用は表層等だけの場合よりも 3 倍以上必要となることが指摘されている[14]。そのため、損傷の進行後に修繕する事後保全型の維持管理から、損傷が進行する前に適切なタイミングにおいて表層等のみを補修する予防保全型の維持管理に転換し、舗装面の長寿命化とライフサイクルコストの縮減を実現することが望まれている。

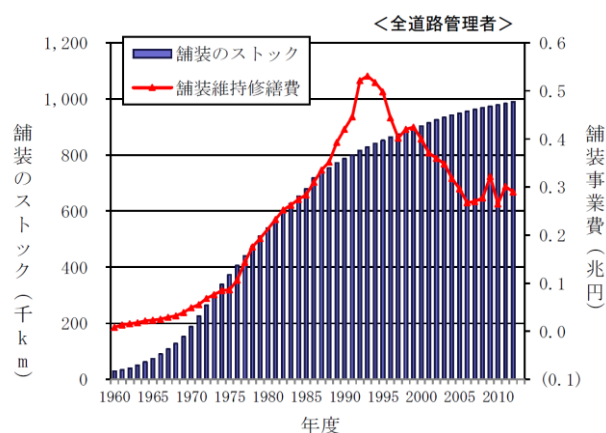


図 1.8 舗装のストックと舗装維持修繕費の推移[14]

現状の道路維持管理に関しては、道路法施行令第35条の2第1項において、「適切な時期に道路の巡視を行い、道路の効率的な維持及び修繕を図ること」と定められている。この法律に基づき、道路管理者は車両からの目視点検を日常的に実施している他、定期点検として専用車両を使用した路面性状調査などを実施している[15]。

国土交通省は、定期点検における舗装の点検方法、健全性の診断、措置、記録方法について示した舗装点検要領[16]を策定しており、多くの道路においてこの点検要領に従った調査が行われている。舗装点検要領では、5年に1回程度の頻度を目安として、わだち掘れ量、ひび割れ率、IRI (International Roughness Index : 国際ラフネス指標) の3指標を測定することを点検の基本方針としている。3指標の測定方法は日本道路協会の舗装調査・試験法便覧[17]による方法に準拠している。

わだち掘れ量の測定方法は、プロフィールメーター等によって車線ごとの横断プロフィールを取得し、車線中央の凸部と車線両端部を結んだ線分からの深さをわだち掘れ量とする(図 1.9)。横断プロフィールは20mごとに取得し、100m区間における代表値を最終的な評価値とすることが一般的である。

ひび割れ率は現地でのスケッチやラインスキャンカメラによって取得した画像の判読によって算出する。現地調査においては、路面上のひび割れにチョークでマーキングし、路面上に0.5mごとのます枠を設置し、センターライン側レーンマークの内側から路肩側レーンマークの内側まで、各ます目のひび割れ状況を記録する(図 1.10)。そして、ひび割れの本数やパッチングの有無に基づき、ます目ごとにひび割れ率を算出する。深層学習によって画像からひび割れを抽出する場合もある。

IRIは走行時における車両の乗り心地に影響する道路進行方向の凹凸量を表す指標である。IRIの測定方法には、水準測量による方法、レーザ変位計により取得した路面プロフィールからQC (Quarter Car) シミュレーションによって算出する方法、車両のレスポンスから算出する方法などがある[17][18]。

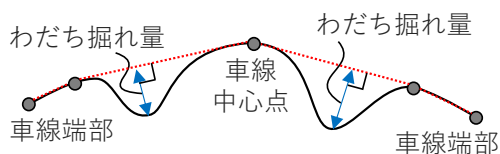


図 1.9 わだち掘れ量の測定方法

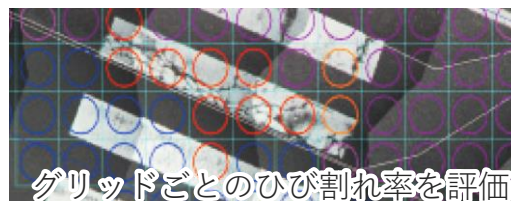
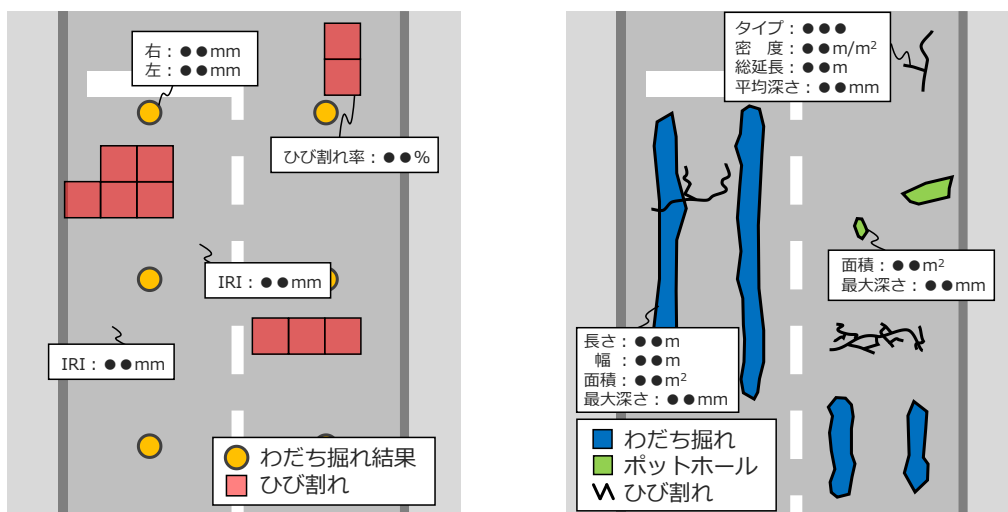


図 1.10 ひび割れ率の測定方法



(a) 既存の点検結果の管理方式

(b) 理想とする点検結果の管理方式

図 1.11 既存の点検結果管理方式と理想形

これらの測定方法は地点ごとの調査であり，点検結果の管理方式は図 1.11 (a)に示すように，ポイントやグリッドによる管理となっていることから，わだち掘れの分布範囲や，ひび割れの分布の詳細な情報を管理できていない．空間分解能が不足しているために，維持修繕工事における積算では適切な算定が困難であることが指摘されている他，道路の損傷などのインフラ関連データに加えて地形分類情報，標高データ等を搭載したプラットフォーム構築し，社会資本の整備・管理に役立てることが望まれている[19][20]．よって，予防保全型の維持管理の実現には，図 1.11 (b)に示すように，損傷程度を表す指標を付与したわだち掘れ領域のベクトルデータやひび割れの詳細形状を表すベクトルデータを作成することが望ましいと考えられる．

なお，舗装点検要領では，全ての損傷を点検対象としておらず，ポットホールなどの損傷は突発的に発生するために日常点検によって発見すべき事象としている．しかし，日常点検における点検要領は策定されておらず，発見した損傷の管理方法は道路管理者によって異なる．また，目視点検が基本となるため，損傷の見落としも発生す

ると考えられる。このことから、舗装点検要領で取り扱わないわだち掘れとひび割れ以外の損傷についても、ベクトルデータとして取り扱うことで、地域特性を考慮した管理や、その他 ICT 技術の活用も可能になり、正確性をもった予防保全型の維持管理や将来的な道路維持管理・修繕工事の自動化につながると考えられる。

道路地図の作成や舗装点検においては、カメラやレーザスキャナなど様々なセンサーが使用される。カメラは、車両に据え付けたり、手持ちによって画像を取得する。レーザスキャナを用いた計測方法と比較して低コストで使用できるため、車両や標識、ひび割れなどの認識といった様々な場面において活用されるが、画像はスケールを持たず、距離や深さを直接計測できないため、計測精度を求める場合の利用は不向きである。

レーザスキャナは、高速回転しながらレーザ光を照射する機器であり、計測対象にレーザ光を照射し、返ってきたレーザ光との時間差もしくは位相差から対象物までの距離を算出する。さらに、回転によるレーザ光の照射方向と対象物までの距離から、レーザ照射位置を基準とした照射点の座標値を得る。また、多くの機器では、レーザ光が対象物から反射した際の信号強度である反射強度を取得でき、反射強度によって舗装面と白線などの地物の色や素材の差異を認識できる。レーザスキャナによって一定時間計測することで、周辺の地物を点群として取得できる。取得される点群の密度はレーザスキャナからの距離によって大きく異なり、点群のデータ量は、高いパルスレートのレーザスキャナを使用する場合は、画像と比較してデータ量が膨大となる。表 1.3 に示すように、近年はレーザスキャナを搭載した計測機材が複数存在しており、その計測精度やコストは様々である。

地上レーザ (TLS : Terrestrial Laser Scanning) は、三脚等にレーザスキャナを据え付けて、固定位置から点群を取得する計測方法である。レーザスキャナとともにカメラを搭載し、画像も取得できるモデルも普及している。高精度かつ高密度の点群を取得できるが、固定位置からの計測となるため、広範囲の点群は取得できない。そのため橋梁などの構造物やプラントや工場内の計測に活用される。

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) はレーザスキャナを使用して自己位置推定と地図作成を同時に行う技術である。レーザスキャナはバックパック型として背負ったり、UAV に搭載して使用する。計測システムのコストは使用するレーザスキャナの性能に依存するが、後述する MMS や航空レーザよりは低い傾向にある。地上レーザより広範囲の点群を取得する場合や、MMS や航空レーザで計測が困難な歩行空間や山間部などで活用される。

MMS (Mobile Mapping System) は、車両にレーザスキャナや GNSS や IMU (Inertial Measurement Unit : 慣性計測装置) を搭載して点群を計測する機器である。車両が走行することで、その周辺の地物形状を点群として取得する。走行速度に制約がないため、

計測時に交通規制は不要である。MMS はレーザスキャナによって点群を取得すると同時に、GNSS と IMU によって地理座標及び車両の姿勢を一定間隔で取得し、計測後の後処理によって地理座標付きの点群と、車両走行位置と姿勢を一定時間ごとに記録した走行軌跡を得る。GNSS と IMU の誤差を補正するために、オドメータを使用する場合もある。カメラも車両に搭載し、点群と共に画像を取得することも多い。道路地図の作成や舗装点検の他、トンネルや法面の点検、電柱や電線などの道路周辺設備の調査、街路樹の調査、大型車両の交差点通行可否判定、河川堤防管理等に活用される。

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) レーザは、UAV にレーザスキャナを搭載して、上空から地上に向かってレーザ光を照射することにより、地形等の点群を取得する方法である。後述する航空レーザと比較して、計測距離は限定的となるものの、飛行高度や飛行ルートに自由度がある。日本国内においては UAV を飛行させるための許可が必要となるため、主な利用場面は山間部や河川上空であり、森林管理や斜面防災、河川管理等に使用される。

航空レーザ (ALS : Airborne Laser Scanning) は、セスナやヘリコプターにレーザスキャナや GNSS や IMU を搭載して、上空から地上に向かってレーザ光を照射することにより、地形や建物、樹木等の点群を取得する方法である。広域の点群を取得できる一方、点群の密度は他の点群取得方法と比較して低い傾向にある。地形測量や斜面防災、森林管理、建物形状調査、遺跡調査などに活用される。

自動運転用の高精度道路地図の作成と舗装点検においては、長距離を計測し、詳細な道路形状や路面の損傷状態を認識できる点群の密度と相対精度が要求される。カメラはスケールを持たず、地上レーザやバックパックは長距離の計測に不向きである。また、航空レーザは点群の密度が低く、トンネルや街路樹によって遮蔽されることから使用に適していない。一方で、高密度な点群を取得でき、走行車線の点群を確実に取得可能な MMS は使用に適している。道路の維持管理においては、カメラやプロファイルメータを搭載した専用の路面性状調査車両が使用される場合もあるが、取得データを道路維持管理以外に使用できる MMS の活用が進んでいる。

表 1.3 道路計測技術・方法

計測技術・方法	地上レーザ	バックパック型 LiDAR	MMS	UAV レーザ	航空レーザ
機材外観	 [21]	 [22]	 [23]	 [23]	 [23]
概要	三脚にレーザスキャナを据え付けて固定の位置から点群を取得	レーザスキャナ等の機材を背負って歩行することで点群を取得	車両にレーザスキャナやカメラ, GNSS 等を搭載して計測	UAV にレーザスキャナ等を搭載して計測	セスナ等にレーザスキャナやカメラ, GNSS 等を搭載して計測
計測システムのコスト	低～中	低～中	中～大	中	大
計測範囲	狭い	移動距離に依存	走行距離に依存し広範囲を計測可能	移動距離に依存	広い
測距精度	数 mm	数 mm- 数 10mm	数 mm- 数 10mm	数 mm- 数 10mm	数 mm- 数 10mm
点密度	高	高	低～中	低～高	低
主な活用用途	構造物点検, プラント・工場内等屋内計測	プラント・工場内等屋内計測	道路地図作成, トンネル点検, 電柱等の調査	森林管理, 斜面防災, 河川管理	地形測量, 森林管理

1.2 関連研究

1.2.1 高精度道路地図構成地物の抽出についての関連研究

高精度道路地図の内、車線を構成する白線、停止線、横断歩道、矢印などの路面標示は、運転のための走行位置や交通規制情報を提供するため、自動運転システムにとって重要な地物である。路面標示は反射性能の高い素材を道路舗装面に塗布して作成されているため、これらの地物は MMS によって取得した点群では反射強度の差異に

よって識別可能である。路面標示の自動抽出に関する既往研究では、車道部の点群を抽出し、点群の反射強度を使用して路面標示を抽出する。

Guan ら[24]は、路面標示を抽出するために縁石の高さの差に着目し、MMS 点群から車道部の点群を抽出した。次に、点群の反射強度によって画像を作成し、点群の密度差に対応するために IDW (Inverse Distance Weighted : 逆距離加重) 法[25]によって画像を補間した。そして、図 1.12 に示すように複数のしきい値処理とモルフォロジーのクロージング処理を実施することで、路面標示画素を抽出した。

Cheng ら[26]は、図 1.13 に示すように MMS 点群から反射強度によって画像を作成し、路面標示を抽出し、分類する手法を提案した。反射強度はレーザ照射位置から対象物までの距離や、レーザ光の入射角、対象物の材料や表面の素材等によって不均一となるため、レーザ光の入射角による強度補正モデルとハイパスフィルタによって、反射強度画像の路面表示部とその他の領域のコントラストを強調する補正処理を実施した。次に反射強度画像に対して大津の 2 値化[27]、近傍点処理によるフィルタリング、領域成長法[28]の適用によって路面標示を抽出した。さらに、面積や縦横比、存在位置などの幾何学的特徴を使用したデシジョンツリーによって横断歩道、破線と実線、矢印、ひし形、文字などの様々な路面標示を分類した。実証実験の結果として、92%の Completeness, 95%の Correctness, 94%の F1-score を達成した。

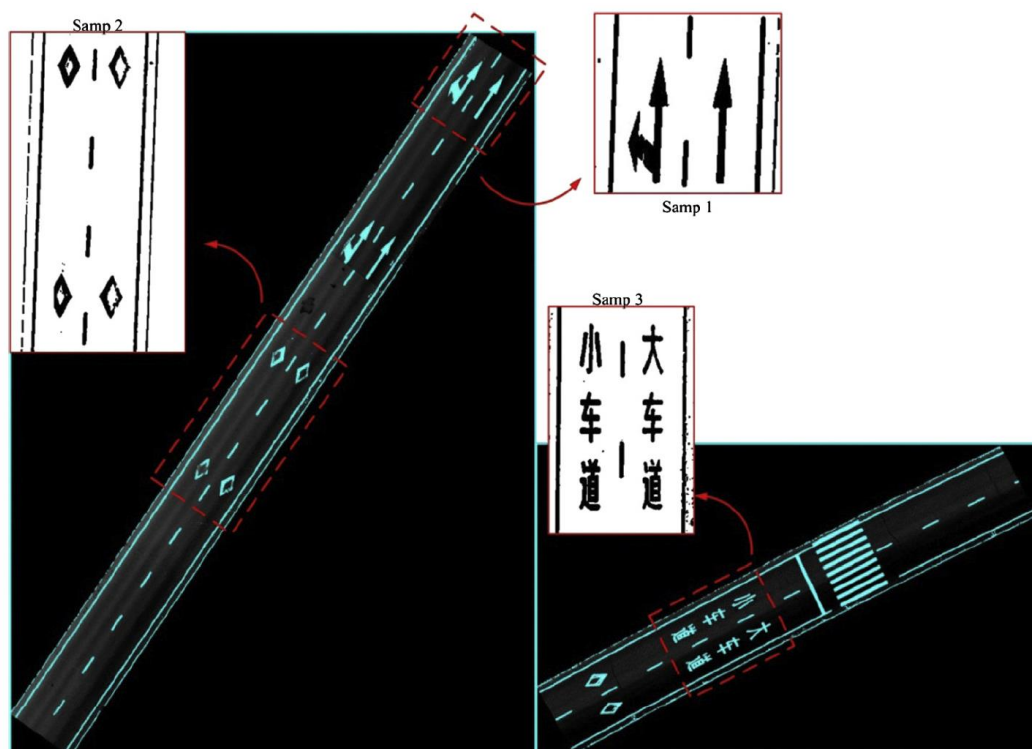


図 1.12 Guan ら[24]による路面標示点群の抽出

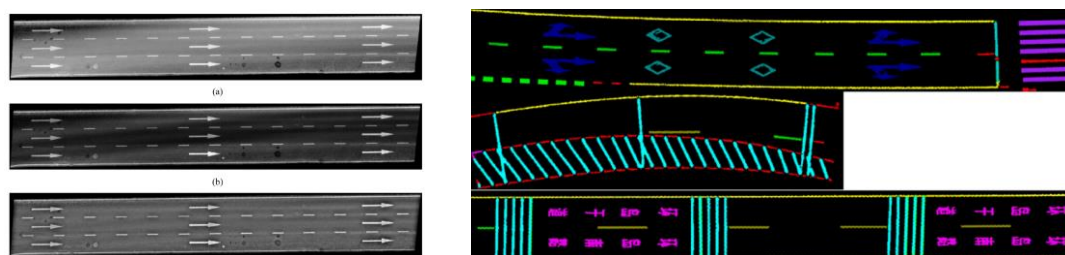


図 1.13 Cheng ら[26]による路面標示の抽出・分類

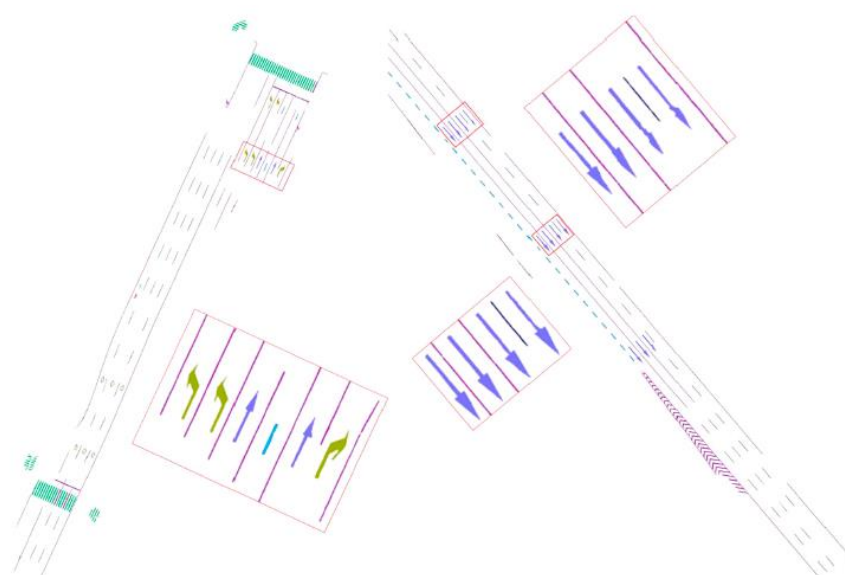


図 1.14 Wen ら[31]による路面標示の抽出

Guo ら[29]は反射強度画像に対してテンプレートマッチングを適用して、車線境界線や導流帯（ゼブラゾーン）、進行方向別通行区分（矢印）を抽出する方法を提案しており、抽出性能は 80%から 100%の Completeness, Correctness, Quality を達成した。Wen ら[31]は、図 1.14 に示すように、U-net モデル[30]を使用して路面舗装点群を抽出し、CNN（Convolutional Neural Networks：畳み込みニューラルネット）により路面標示種別を階層的に分類した。路面標示は車両の通行等により経年的に劣化してかすれが生じるが、この提案手法においては 91%を超える F1-score を達成している。以上より、既存の路面舗装の抽出手法は、高い抽出性能を達成しているといえる。

車線中心線は車線境界を示す 2 本の白線の中心線として抽出できる。Ma ら[32]は、図 1.15 に示すように車線中心線を半自動で抽出する手法を提案した。まず、MMS 点群から車道部の点群を抽出した後に反射強度によって画像を作成した。次に、複数のしきい値処理と SOR（Statistical Outlier Removal）フィルタ[33]によって路面表示部の

点群を抽出した。そして、条件付きユークリッドクラスタリングによって路面標示部の点群をクラスタ化し、しきい値処理により車線境界線のクラスタを抽出した。さらに、車線境界線のクラスタに対して3次スプライン曲線フィッティングを行い、生成した複数の車線境界線から車線中心線を生成した。車線中心線の精度は0.15mを達成した。

交通標識は道路利用者に規制や警告、案内情報を提供するものであり、車道脇や上空に設置される。交通標識の3次元位置を特定し、その種別を分類するために、MMSによって取得した点群と画像が使用される。交通標識は夜間における視認性向上を目的として、その表面に再帰反射性の高い素材が使用されているため、点群の反射強度が高くなる。既存研究では、この特性や形状やサイズといった交通標識の仕様、道路面からの高さなどの設置基準を使用して位置を特定する。Soilánら[34]は、はじめに図1.16に示すように点群から標識の3次元位置を特定し、その後を検出した交通標識部の点群を画像に投影することで画像から交通標識部をセグメント化し、サポートベクターマシン等によって画像を分類した。交通標識の検出性能として98%のRecallを達成した。Guanら[35]は、交通標識部の点群を反射強度と幾何学的特性によってセグメント化した後に、点群を画像に対して投影して画像をセグメント化した。さらに、画像に対して教師あり学習のガウシアン・ベルヌーイ型深層ボルツマンマシン(GBDBM)を使用することで、87%の検出性能と、93%の分類性能を達成した(図1.17)。

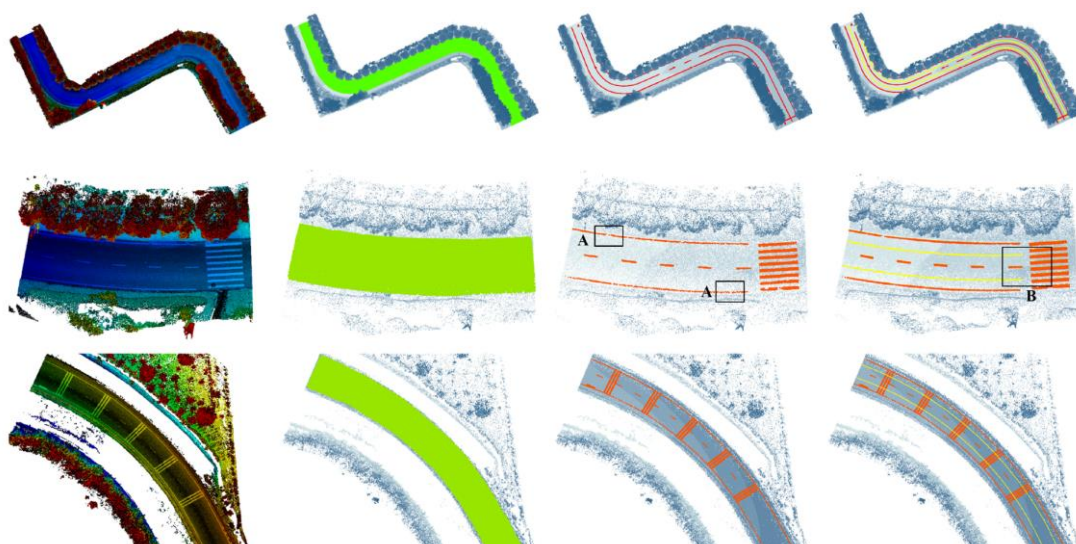


図 1.15 Maら[32]による車線中心線の抽出

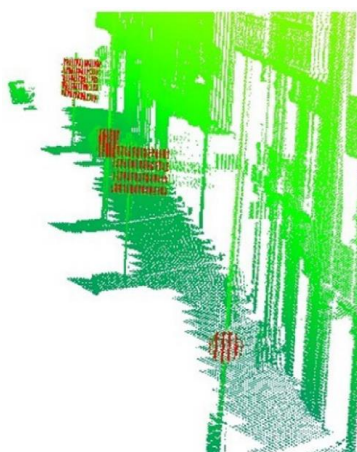


図 1.16 Soilán ら[32]による交通標識の検出

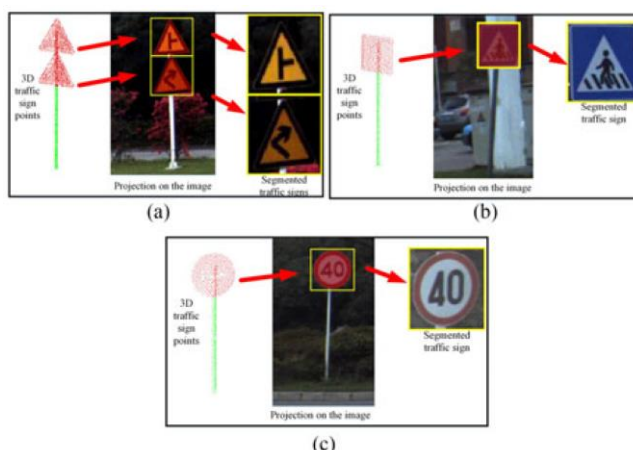


図 1.17 Guan ら[35]による交通標識の検出

車道境界線は、車道部と歩道部の境界線であり、自動運転においては進入可能領域を判定するために使用される。また、路面標示の抽出のために車道部の点群を抽出する場合や交通標識の存在位置に当たりをつけるためにも使用することが可能であり、高精度道路地図における重要な地物である。既存手法の多くは、局所的な点分布の評価によって縁石を抽出し、車道境界線を取得する。既存手法は、不規則点群に基づく手法と、スキャンラインに基づく手法に大別される。

不規則点群に基づく手法として、Qiu ら[36]は、RANSAC[37]によって抽出した複数の平面から車道境界線の候補点を抽出し、道路幅員が急激に変化せず連続的であるという性質に基づいて候補点から車道境界点を抽出する手法を提案した。舗装状態の悪い道路面においても安定的に抽出するために、空間をグリッドに分割し、グリッド内の各点のZ値からグリッド内点集合の最小高さを除算した。この手法では、高さの差の小さい車道境界部において抽出性能が低下することを課題として挙げている。

Hervieu ら[38]は、まず RANSAC によって推定した平面の向きと各点の法線ベクトルの方向差に基づいて縁石の候補点を検出した。次に縁石シード点を手動で選択し、車道境界線の滑らかさに基づく追跡処理によって縁石点を一定間隔ごとに抽出した。さらに、抽出した縁石点から車道部と歩道部をモデリングした。実証実験の結果として、カーブした縁石部において遮蔽が発生した場合に追跡できなくなることを課題としている (図 1.18)。

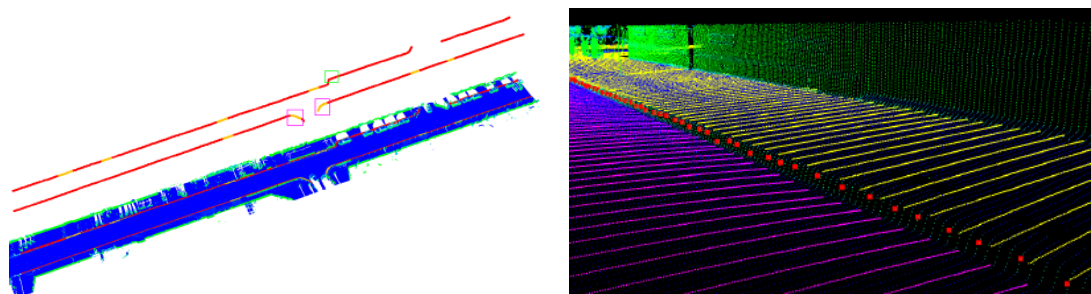


図 1.18 Hervieu ら[38]による車道境界点の抽出

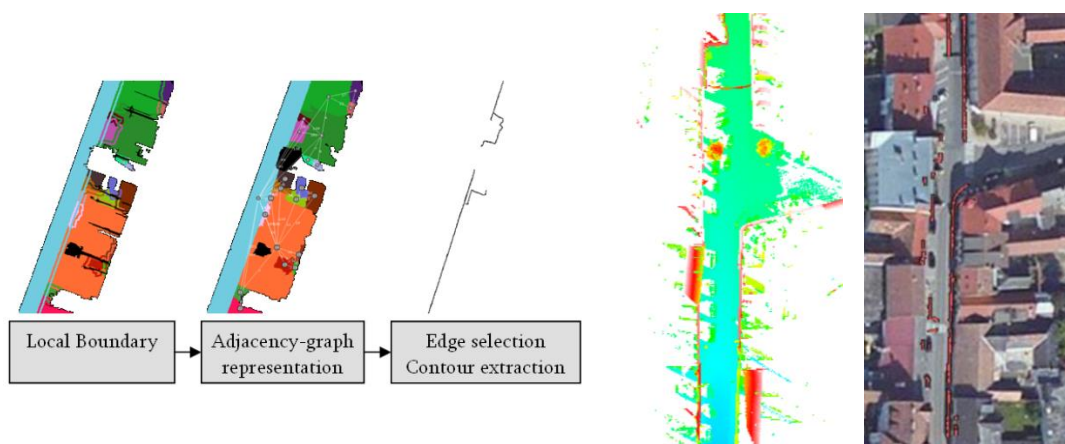


図 1.19 Hernández ら[39]による車道境界線の抽出

図 1.20 Rodríguez-Cuenca ら[40]による車道境界線の抽出

各点の高さや局所点群の高さの差を記録した画像を作成して、画像処理により縁石部を抽出する手法も提案されている。Hernández ら[39]は、まず、各点の高さによって画像を作成し、Hole Filling アルゴリズムによって地面以外の構成点をフィルタリングした。次に、近傍画素値の差によってセグメント化し、セグメントの境界部を車道境界線として抽出した(図 1.19)。Rodríguez-Cuenca ら[40]は、局所点群の高さの差を記録した画像を作成して、高低差の大きい画素を縁石候補とした。次に、縁石候補画素に対してモルフォロジーのオープニング処理を適用して縁石画素を抽出した後、縁石画素に対応する縁石候補点群を抽出した。最後に抽出点群に対する平面の最小二乗フィッティングにより縁石部の点群を抽出した(図 1.20)。点群を画像化する手法では、抽出結果が画像の解像度に影響し、縁石の切り下げ部などの高低差の小さい箇所では抽出できないという課題が存在する。

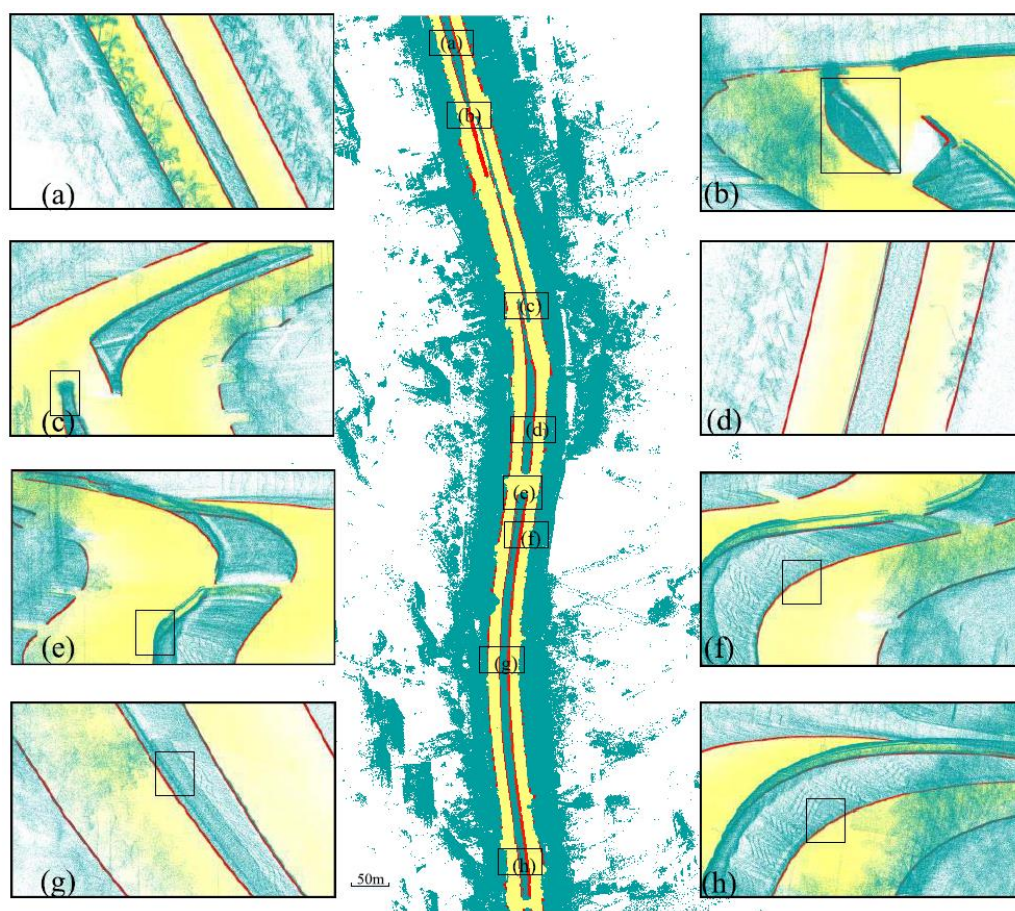


図 1.21 Zai ら[41]による車道境界線の抽出

Zai ら[41]は、MMS 点群からスーパーボクセルを作成し、グラフカットのエネルギー最小化アルゴリズムをスーパーボクセルに適用することで車道境界線を抽出する方法を提案した (図 1.21). スーパーボクセルの作成においては、平面上の滑らかな点をシード点として選択し、法線ベクトルや反射強度、幾何学的情報などの指標を使用した. グラフカットのエネルギーは、車道境界線の滑らかさと点間距離に基づいて設計されており、スーパーボクセルに対してグラフカットのエネルギー最小化アルゴリズムを適用して車道境界点を抽出した. 誤検出された道路境界点は局所的な点分布によって除去し、最終的にカーブフィッティングにより道路境界線を生成した. 実証実験の結果、95%以上の Completeness, 98%以上の Correctness, 94%以上の Quality を達成した. また、Sha ら[42]は、スーパーボクセルの境界点の処理に基づく車道境界の抽出法を提案した (図 1.22). スーパーボクセルの作成においては、大局的な空間構造を考慮するために 2 つのスケールによって算出した法線ベクトルを幾何学的情報と共に使用した.

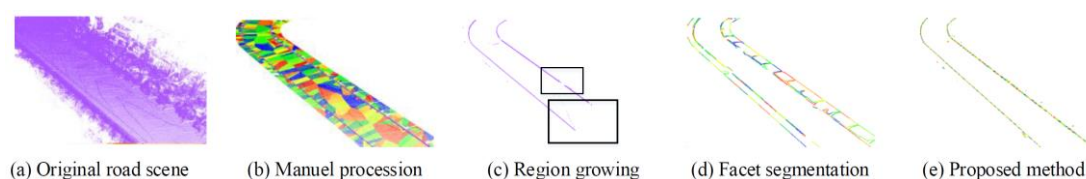


図 1.22 Sha ら[42]による車道境界線の抽出

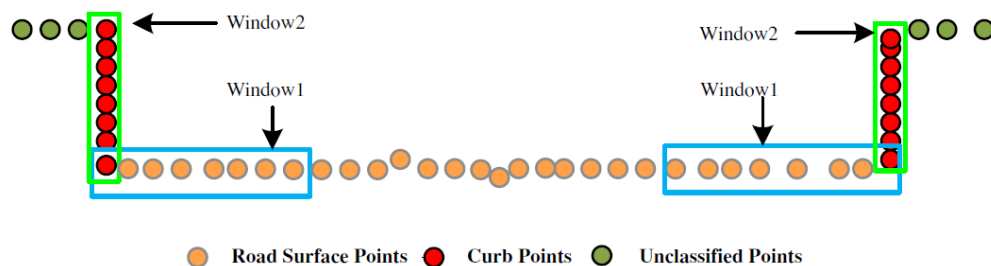


図 1.23 Yang ら[43]による車道境界線の抽出

スーパーボクセルを使用した手法の利点は、どのような手段で取得した点群にも適用できることである。一方で、欠点として、点群の近傍処理や画像・ボクセル化を行うため、MMS の仕様と走行速度に依存する点密度や点分布の状態（スキャンライン間の間隔）の影響を受けやすいことや、近傍処理を繰り返すために計算コストが高くなることが挙げられる。

対照的に、スキャンラインに基づく方法は、不規則点群に基づく手法よりも計算コストが低いという利点を持ち、MMS の走行速度に依存せずに車道境界線を抽出できる。スキャンラインに基づく手法として、Yang ら[43]は、スキャンライン上の局所点列の高さの差や勾配、点群密度を用いて縁石鉛直部の点集合を抽出した。さらに、 k 最近傍 (k -NN) 法によるセグメント化と、点数の少ないセグメントの除去、同一線上にあるセグメントの接続を行い、最後に B スプライン曲線によって車道境界線を生成した。実証実験では 94%以上の Completeness, 95%以上の Accuracy, 91%以上の Quality

を達成した。

Miyazaki ら[44]は、図 1.24 に示すように、スキャンラインを使用した道路における車道や縁石、歩道などの平面構造の抽出手法を提案した。この方法では、Douglas-Peucker 法[45]によってスキャンライン上の点列が線分に近似され、各線分の幾何学的距離と法線ベクトルの評価に基づいて線分を統合することにより、道路領域や縁石部などを抽出した。

Ishikawa ら[46]は、図 1.25 に示すように、低密度の MMS 点群を対象としてスキャンライン上の隣接点の角度評価によって、車道境界点を抽出すると共に、抽出した点を縁石および 2 種類の切り下げのいずれかに分類した。角度評価の結果には誤分類した点を含むため近傍点を使用した再分類を行い、抽出した点の上部領域における点分布に基づいて駐車車両を縁石と誤分類した点を除去した。さらに、孤立点を SOR (Statistical Outlier Removal) フィルタによって削除した。実証実験の結果、94%以上の F-measure と 99%以上の Accuracy を達成した。

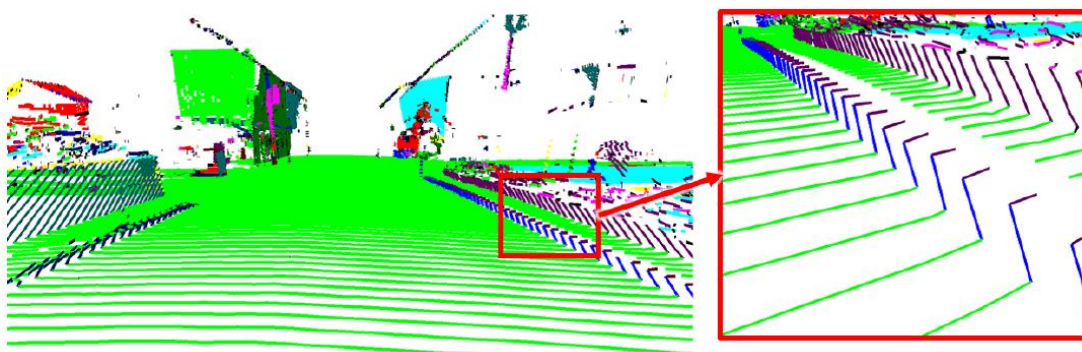


図 1.24 Miyazaki ら[44]による道路平面構造の抽出

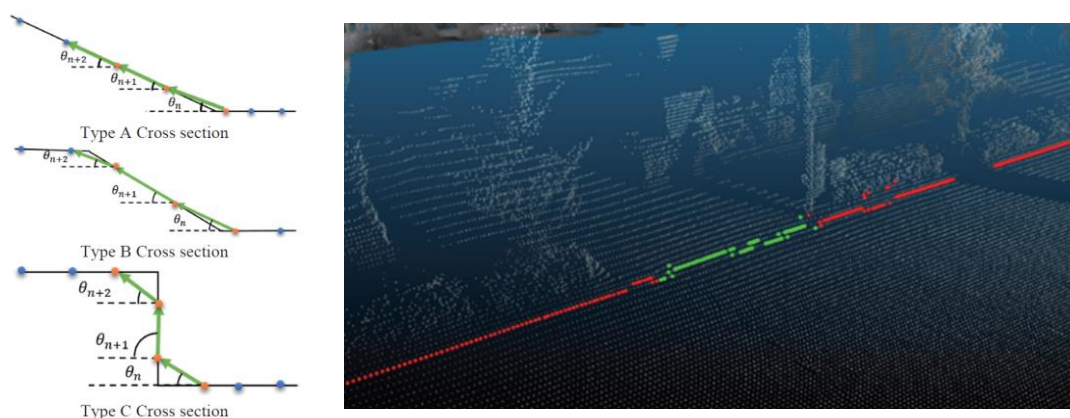


図 1.25 Ishikawa ら[46]による車道境界点の抽出



図 1.26 Gézero ら[47]による車道境界線の抽出

Gézero ら[47]は、車道境界線を抽出するために、Douglas-Peucker 法によりスキャンラインをポリライン化した。次に、ポリライン構成点において、走行軌跡からの距離を隣接点と比較して削除する処理を繰り返すことにより地面と縁石部以外の点を除外した。そして、単調な線分集合へ分割し、分割した線分集合両端点の高さの差や勾配の評価によって、図 1.26 に示すように縁石部の端点を抽出した。実証実験では 95%以上の Completeness, 97%以上の Correctness, 93%以上の Quality を達成した。

スキャンラインに基づく手法は、不規則点群に基づく手法と比較して計算コストが低く、点群密度（スキャンラインの間隔）に依存せずに車道境界線を抽出できる利点を持つため、MMS 取得点群から効率良く抽出することが可能である。一方で、以下に示す課題が残されている。

- (1) 歩道の切り下げ部や交差点部は、わずかな高低差しかないため、抽出が困難であったり、点群と環境に応じたパラメータ調整が必要となる。特に交差点部において車道境界線は大きく湾曲するために安定的な抽出が困難である。
- (2) 車道部では排水のために水路勾配を設けているため、縁石周辺に落ち葉やゴミなどが溜まりやすい構造となっている。また、雑草が繁殖していたり、植栽が縁石を遮蔽している場合もある。既往研究における提案手法は、これらの遮蔽による影響を受ける。
- (3) 既往研究では 1 台のレーザスキャナを搭載し、スキャンライン方向が道路の横断方向になるように設置された MMS を使用している。しかし、レーザスキャナを 2 台搭載し、スキャンライン方向が道路の横断方向と一致しない MMS も存在し、既往研究における提案手法では、レーザスキャナの設置角度が道路の横断方向と一致しない場合に適用できない。

- (4) 既往研究では、異なる性能を持つ MMS によって取得した点群に対する抽出性能を示していない。また、市街地や幹線道路など異なる道路構造も対する抽出性能を示せていない。

車道境界線を手動作成する場合、MMS 計測後に点群から多くの労力をかけて手動作成し、その後に検査し、必要に応じて手動修正することとなる。自動抽出の場合は手動作成の工程を置き換えられるためコストを小さくできるが、抽出精度が不足している場合は、その後の検査と手動修正に多くのコストがかかり、コスト面でのメリットが少なくなる (図 1.27)。既存手法は実用に供する抽出性能に至っていないため、実際の地図作成の場面ではほとんど手動作成している状況である。

1.2.2 道路舗装面の損傷抽出についての関連研究

次に、道路舗装面の損傷を抽出する場合は、様々な損傷の位置や領域を正確に捉え、損傷の種別や損傷程度を指標化することが重要となる。道路舗装面の抽出に関する既往研究には、大きく分けて、画像を使用した手法、路面性状調査車両などに搭載されたプロフィルメーターを使用した手法、MMS 点群を使用した方法がある。

画像を使用した手法は、カメラによって取得した画像から損傷を抽出する手法であり、特にひび割れを抽出対象とした手法が多い。古典的な手法としては、画素値に対するしきい値によるセグメンテーションが挙げられる。Oliveira ら[48]は、車両に搭載したラインスキャンカメラによって取得した道路面の画像を対象として、モルフォロジー演算によりノイズとなる画素を削減した後に、動的なしきい値処理によってひび割れを抽出した (図 1.28)。Sobel フィルタや Canny フィルタなどのエッジ検出法や、それらを改良した手法によってひび割れを抽出する手法も提案されている[49][50]。



図 1.27 車道境界線の手動・自動作成手順

近年は機械学習や深層学習を用いた手法が提案されており, Maeda ら[51]は, 図 1.29 に示すように, 自動車に搭載したスマートフォンによって撮影した画像を学習データとして, 畳み込みニューラルネットを使用して複数種類のひび割れの他に, わだち掘れやポットホールなどの 8 種類の損傷を抽出する方法を提案した. 画像を使用した手法は, ひび割れなどの線状型損傷の抽出においては正確にその形状を抽出できる一方で, わだち掘れなどの領域の抽出は困難である. また, 日照条件や影に影響を受けやすく, 深さに関する情報を抽出できないという欠点がある.

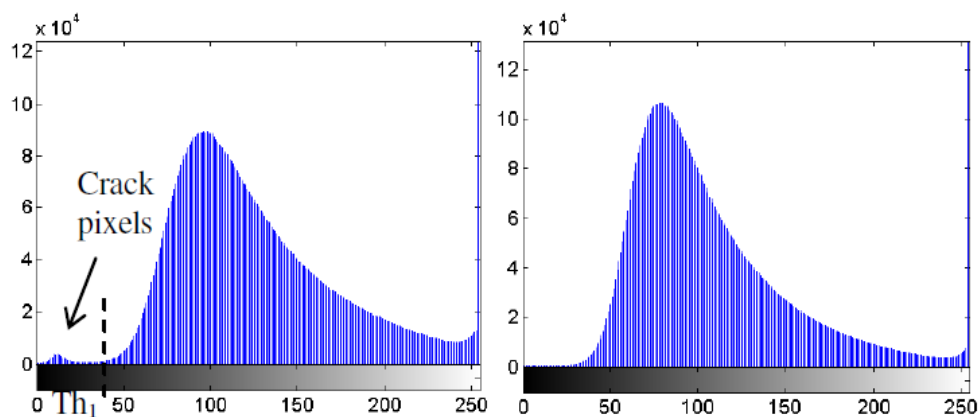


図 1.28 Oliveira ら[48]によるひび割れ抽出

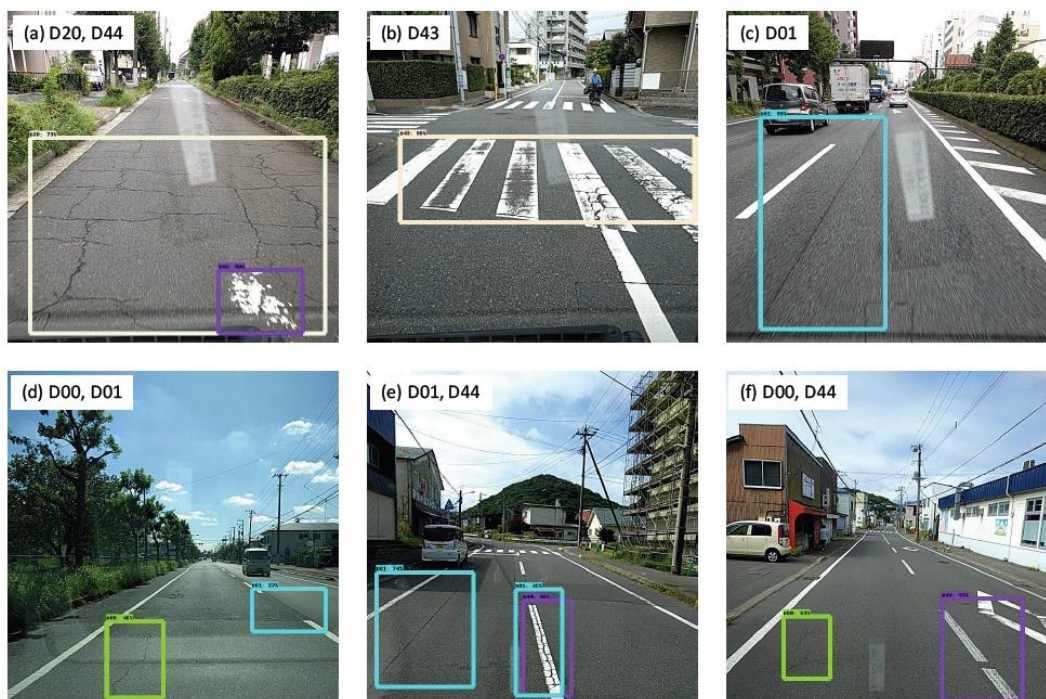


図 1.29 Maeda ら[51]による路面損傷抽出



図 1.30 路面性状調査車両[52]

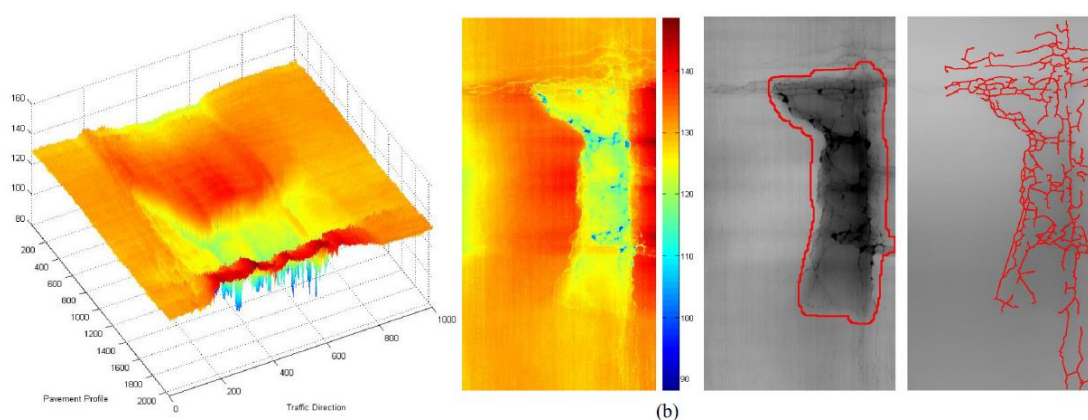


図 1.31 Zhang ら[53]による領域・線状型損傷抽出

図 1.30 に示すような、道路の舗装点検用に開発され、走行車線の横断方向に高密度な横断プロファイルを取得できるプロフィールメーターやラインセンシングカメラなどを搭載した路面性状調査車両によって取得したデータを活用した手法も提案されている。Zhang ら[53]は、図 1.31 に示すように、プロフィールメーターによって取得した横断プロファイルから変状点を検出し、線状型損傷であるひび割れと、領域型損傷であるわだち掘れやポットホールなどを抽出する方法を提案した。この方法では、まず、横断プロファイルに対して主成分分析を行い、変状を含まない理想的な舗装面を推定した。さらに理想的な舗装面からの高さの差の大きい点を亀裂候補点とした。ひび割れは亀裂候補点に対して最小スパニングツリーを改良した方法を適用することでポリラインデータを抽出し、わだち掘れなどの領域型損傷に対しては、亀裂候補点に対してモルフォロジー演算を実施した後に損傷の領域を決定した。さらにデシジョンツリーによって損傷種別を判定した。プロフィールメーターを使用した手法は、取得される

点の間隔が狭いことから、幅の狭いひび割れを抽出しやすく、深さに基づいて領域型損傷を抽出できる利点がある。一方で、車両の走行した車線のみでしか損傷を抽出できないことが欠点として挙げられる。また、路面性状調査車両は高価であり、普及していないことから、MMS など他の3次元計測手段を使用することが望ましい。

プロファイルメーターによって取得した横断プロファイルと比較して、MMS 点群は密度変化が大きく、走行車線以外においても点群を取得できる。また、MMS は路面性状調査車両よりも広く普及しており、道路舗装面の調査に活用することが期待されている。

MMS 点群を使用した方法として、De Blasiis ら[54]は、図 1.32 に示すように、ポットホールなどの領域型損傷を抽出し、損傷程度を評価した。まず、道路面の点群を抽出し、RANSAC による局所的な平面フィッティングにより取得した正常舗装面からの深さに基づいて損傷点を抽出した。さらに、損傷点をセグメンテーションし、セグメントの幾何情報によって損傷種別の判定とその深刻度を評価した。しかし、損傷領域の大きさに応じた適切な正常舗装面推定のパラメータ設定が必要という課題がある。

Van Der Horst ら[55]は近傍点との高低差によって損傷候補点を抽出し、k-means 法により損傷候補点をクラスタリングした後、マルチスケールの局所特徴量などを用いた Random Forest[56]によって非損傷部と損傷部を分類するとともに損傷種別を判定した(図 1.33)。しかし、反射強度の高い路面標示を損傷として誤抽出するという課題があり、点単位での種別判定のみに留まっている。また、これらの手法は共に主要な領域型損傷であるわだち掘れを抽出対象としていない。

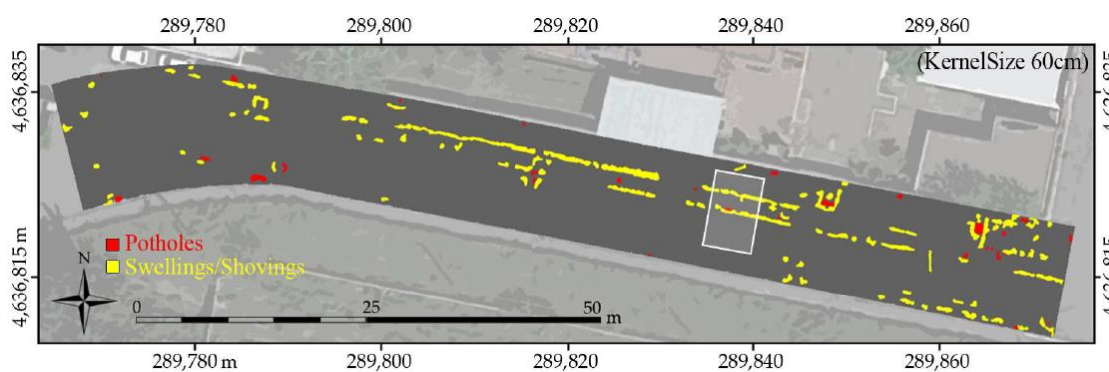


図 1.32 De Blasiis ら[54]による領域型損傷抽出

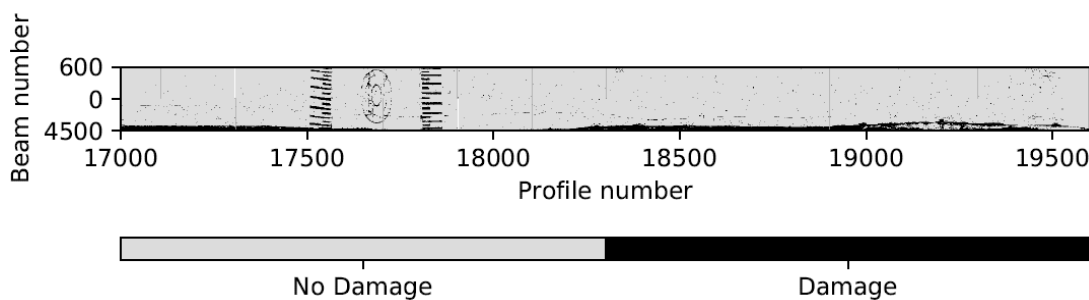


図 1.33 Van Der Horst ら[55]による損傷抽出

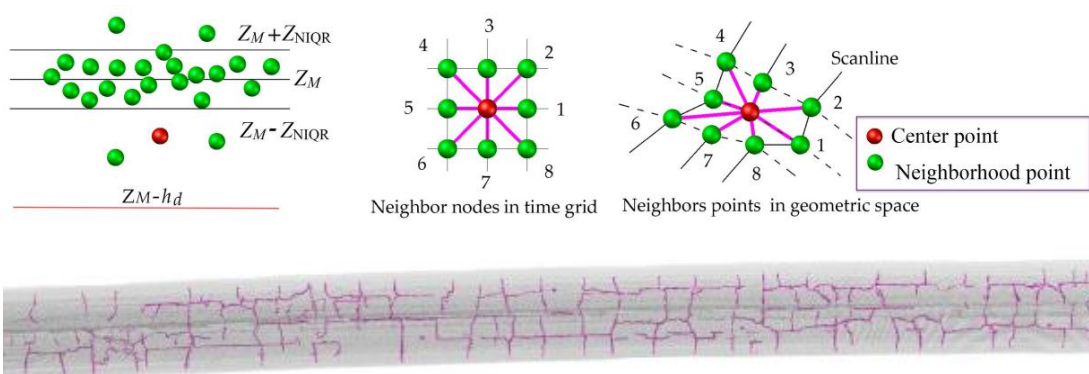


図 1.34 Zhong ら[57]による線状型損傷抽出

線状型損傷を抽出する手法として Zhong ら[57]は、図 1.34 に示すように、スキャンライン番号とスキャン角度によって点群を構造化し、隣接点群の勾配や反射強度に基づきひび割れを抽出した。結果はスキャンラインの間隔（MMS の走行速度）に依存して変化し、ひび割れの存在割合を事前知識として与える必要があるという課題がある。

Rio-Barral ら[58]は、スキャンラインに対するローパスフィルタリングによって推定した正常舗装面からの深さの閾値処理に基づいてひび割れ点を抽出した。さらに、主成分分析によって推定したひび割れ点の分布方向に基づいて、ひび割れ点をクラスタ化し、クラスタのグループ化によりひび割れ点集合を抽出した（図 1.35）。しかし、ひび割れ点の分布方向を用いて損傷点を認識するため、複雑形状のひび割れを抽出できず、また、道路舗装面の状態に応じて閾値の設定が必要である。

Ma ら[59]は、図 1.36 に示すように、点群の高さや反射強度、局所特徴量等を使用した、点群に対するグラフ畳み込みニューラルネットワークである SD-GCN によりひび割れを抽出した。この手法による適合率、再現率は共に 80%以下となっており、抽出精度向上に課題が残されている。また、以上で述べた関連研究は抽出対象とする損傷の種類が限定的であり、多様な損傷を包括的に取り扱えない。

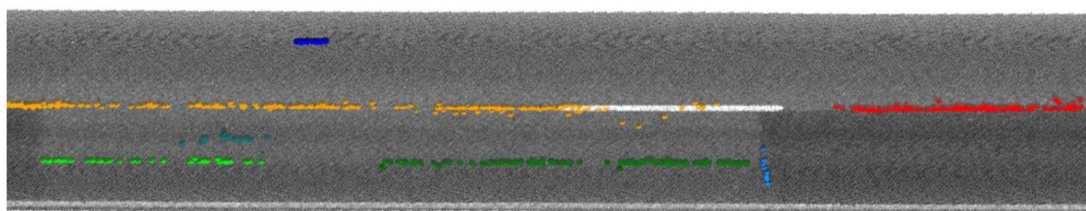
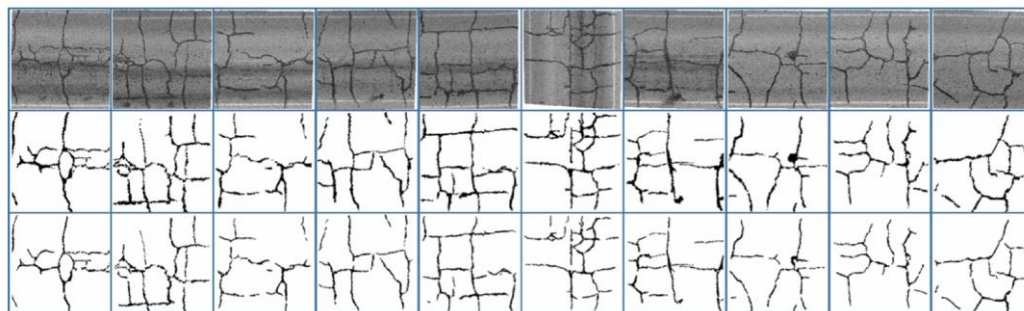


図 1.35 Río-Barral ら[58]による線状型損傷抽出



Pavement crack extraction results using the proposed SD-GCN model. Top: Original input point cloud samples with intensity information. Middle: Ground truth data. Bottom: Pavement crack extraction results. The black parts are crack points and the white ones are pavement points.

図 1.36 Ma ら[59]による線状型損傷抽出

MMS 点群からの道路舗装面の損傷抽出に関する既存研究の問題点は以下のように整理できる。

- (1) 複数の領域型損傷を抽出対象とした手法や、線状型損傷であるひび割れを抽出対象とした手法が提案されているが、領域型損傷と線状型損傷を単一のフレームワークで包括的に取り扱う手法は存在しない。
- (2) 単一スケールの領域における点群分布や特定のパラメータによるローパスフィルタリングに基づいて正常舗装面を推定して損傷点を抽出しているため、スケールの異なる領域型損傷の抽出が困難である。また、線状型損傷の抽出においては、抽出した損傷候補点の局所的な分布方向に基づいて損傷点を抽出しているため、複雑な線状型損傷の抽出が困難である。
- (3) 領域型損傷の抽出領域の定量評価を実施している既往研究はなく、上記に述べた理由からスケールの異なる領域型損傷の抽出精度は低いと考えられる。線状型損傷の抽出において、深層学習を用いた手法は適合率と再現率が 80%以下と低い。ルールベースの手法においては、複雑な線状型損傷の抽出が困難であることを課題としており、抽出精度は低いと考えられる。

1.3 本研究の目的と特徴

1.3.1 本研究の目的

そこで本研究では、前節で述べた課題の解決のために、MMS 点群を使用した車道境界線の自動抽出手法と道路舗装面の損傷抽出手法の開発を目的とする。具体的には次の2つに関して研究を行う。

- (1) 高精度道路地図の基本構成要素である車道境界線を抽出する技術を開発する。車道境界線は、高精度道路地図の仕様と同様に、縁石や切り下げ部の下端を通過する3次元ポリラインとする。
- (2) わだち掘れやポットホール等の領域型損傷とひび割れ等の線状型損傷をベクトルデータとして抽出する技術を開発する。領域型損傷は、損傷の種別と損傷の程度を表す指標を付与したポリゴンとし、線状型損傷は、損傷の深さを表す指標を付与したポリラインとすることで、損傷情報の詳細な管理や可視化、既存の損傷記録データへの変換を可能とする。

1.3.2 本研究の特徴

本研究の特徴として、下記の2点が挙げられる。

- (1) 車道境界線の抽出において、計測ノイズや車道境界周辺の植栽や雑草の影響を受けにくくするため、MMS 点群に対して不均一点群の除外とスキャンラインの平滑化を行い、さらに、スキャンラインから算出した各点の湾曲度に基づいて、縁石部の点と考えられるシード点を抽出し、シード点から車道境界線の構成点を追跡することにより車道境界線を抽出する手法を開発した。これにより、縁石の切り下げ部や交差点の抽出精度低下と、レーザスキャナの設置角度や雑草などによる縁石の遮蔽に影響を受けやすいという既往研究における課題を解決した車道境界線の自動抽出手法を実現した。
- (2) 路舗装面の損傷抽出において、MMS 点群の各点における損傷の影響度を表す指標を用いた3次曲線フィッティングにより、損傷部の影響を受けにくい正常舗装面の推定を行い、正常舗装面と各点の高さの差に基づき、領域型損傷と線状型損傷を単一のフレームワークによって抽出する手法を開発した。領域型損傷は、損傷の種別と程度を表す指標を付与したポリゴンとして出力することで、点群と比較してコンパクトなデータサイズで損傷の存在箇所や広がり、分布の

把握が可能である。線状型損傷は、損傷の深さを表す指標を付与したポリラインとして出力することで、点群と比較してコンパクトなデータサイズで損傷の存在箇所や形状の把握が可能である。

1.4 本論文の構成

本論文は4つの章で構成される、2章以降の概要を以下に示す。

第2章 スキャンラインの湾曲度評価に基づく MMS 取得からの車道境界線抽出

2章では、MMSによって取得した点群と走行軌跡とを入力として、車道境界線を抽出する手法について述べる。まず、車両の進行方向に垂直な平面に投影したスキャンラインの座標を算出し、スキャンラインの勾配変化を評価するための指標として湾曲度を算出する方法について述べる。次に、車道境界線の抽出処理を安定させる前処理として、植栽などの不均一部の点群を除外した後に、雑草等による縁石の遮蔽や計測ノイズの影響を低減するためにスキャンラインを構成する各点を平滑化する方法について述べる。続いて、平滑化したスキャンラインに対して湾曲度を再計算し、湾曲度と走行軌跡との相対位置関係を使用して縁石上の点を車道境界線のシード点として抽出し、シード点からの車道境界部の追跡により車道境界線を生成する方法について述べる。最後に、開発した手法の実証実験を行い、異なる仕様からなる MMS による抽出性能と、道路構造の差異による抽出性能について評価した結果を述べる。

第3章 MMS 取得からの道路面における領域・線状型損傷のベクトルデータ抽出

3章では、MMSによって取得した点群と走行軌跡とを入力として、道路舗装面の損傷であるわだち掘れやポットホール、寄り等の領域型損傷をポリゴンとして、ひび割れや舗装の継ぎ目等の線状型損傷をポリラインとして出力する手法について述べる。まず、計測ノイズを除去するため、スキャンラインに対して平滑化フィルタを適用し、スキャンラインの湾曲度に基づき各点の非損傷度を求め、非損傷度を重みとした区分的3次曲線のフィッティングにより正常舗装面を推定する方法について述べる。次に、領域型損傷の正常舗装面から算出した変状変位量を用いて領域型損傷のポリゴン生成と種別判定を行い、線状型損傷の正常舗装面から算出した変状変位量を用いて線状型損傷のポリラインを生成する方法について述べる。最後に、開発した手法を実際に MMS によって取得したデータに対して適用し、抽出性能について手動作成した正解

データとの比較により評価した結果を述べる.

第4章 結論と今後の課題

4章では, 本研究の結論と今後の課題を述べる.

第2章 スキャンラインの湾曲度評価に基づく MMS 点群からの車道境界線抽出

2.1 提案する車道境界線抽出手法

2.1.1 提案手法の概要

本研究では, MMS 点群を入力として, 縁石や切り下げ部の下端を通過する車道境界線を表す 3 次元ポリラインを出力することを目的とする. 本研究で取り扱う MMS 点群は, 位相差方式または Time of Flight 方式のレーザスキャナによって取得した点群とし, マルチエコーによる同一時刻の点が存在することとする. また, レーザスキャナは, 図 2.1 に示すように, 車両の進行方向に対して一定角度で傾いた方向に設置されているものとする.

本手法では, MMS 点群 P と走行軌跡 Q を使用する. MMS 点群は $P = \{P_i = (\mathbf{p}_i, t_i) | \mathbf{p}_i = (x_i^p, y_i^p, z_i^p), i = 1, \dots, n, t_i < t_{i+1}\}$ として示される. 取得時刻 t_i における点 P_i は, 平面直角座標と標高で示された点群の座標 (x_i^p, y_i^p, z_i^p) からなる. 走行軌跡は MMS の位置における座標と車両の姿勢の情報であり, $Q = \{Q_j = (\mathbf{q}_j, c_j, t_j) | \mathbf{q}_j = (x_j^q, y_j^q, z_j^q), c_j =$

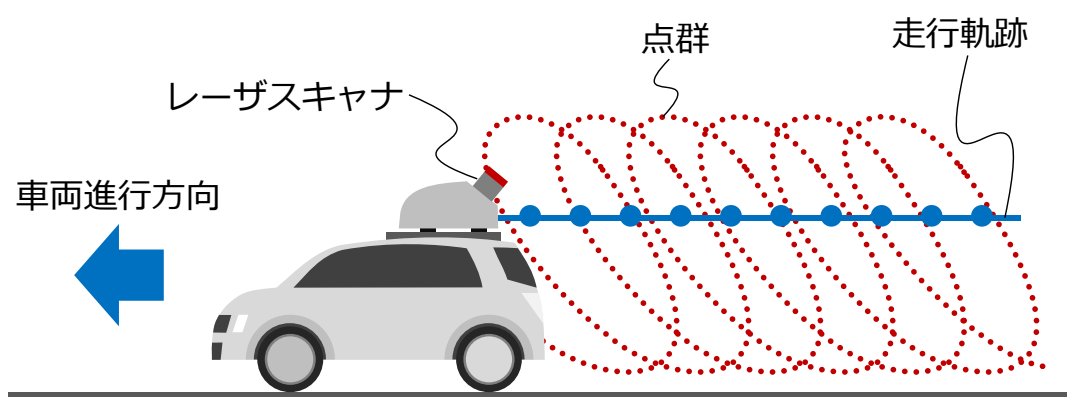


図 2.1 レーザスキャナの設置角度と点群及び走行軌跡

$(\omega_j, \varphi_j, \kappa_j), j = 1, \dots, m, t_j < t_{j+1}$ }として示される. 取得時刻 t_j における点 Q_j は, 平面直角座標と標高で示された MMS (IMU の設置位置) の座標 (x_j^q, y_j^q, z_j^q) と, 車両の姿勢を表す各座標軸に対応する角度 $(\omega_j, \varphi_j, \kappa_j)$ からなる. ω_j は仰角, φ_j はローリング角, κ_j は方位角を意味する. スキャンラインは走行軌跡の真上で点群 P を分割し, 取得時刻の順番によって並べられたレーザスキャナのスキャン 1 周分の点列として定義される (図 2.2).

提案手法では, スキャンラインから算出した各点の湾曲度 (詳細については 2.1.3 項で説明) に基づいて, 縁石点と考えられるシード点を抽出し, シード点を起点に湾曲度と抽出される線の滑らかさに基づいて点を追跡することにより車道境界線を取得する. 湾曲度の計算を安定させるため, 後述する点群の投影, 不均一点の削除, スキャンラインの平滑化, 一定距離の近傍点を使用した湾曲度算出を行う.

提案手法の概要を図 2.3 に示す. 本手法では, (1) 車両の進行方向に垂直な平面に投影したスキャンラインの座標を算出し, (2) スキャンラインの勾配変化を評価するための指標として湾曲度を算出する. そして, (3) 植栽などの不均一部点群を除外した後に, (4) 雑草等による縁石の遮蔽や計測ノイズの影響を低減するためにスキャンラインを構成する各点を平滑化する. その後, 平滑化したスキャンラインに対して湾曲度を再計算し, (5) 湾曲度と走行軌跡との相対位置関係を使用して車道境界線のシード点 (縁石上の点) を抽出する. 最後に (6) シード点からの車道境界部の追跡により車道境界線を生成する. ステップ (1) から (4) はスキャンラインに基づく処理であり, (5) と (6) は各スキャンラインを統合した処理である. 各ステップの詳細を以下に示す.



図 2.2 スキャンライン

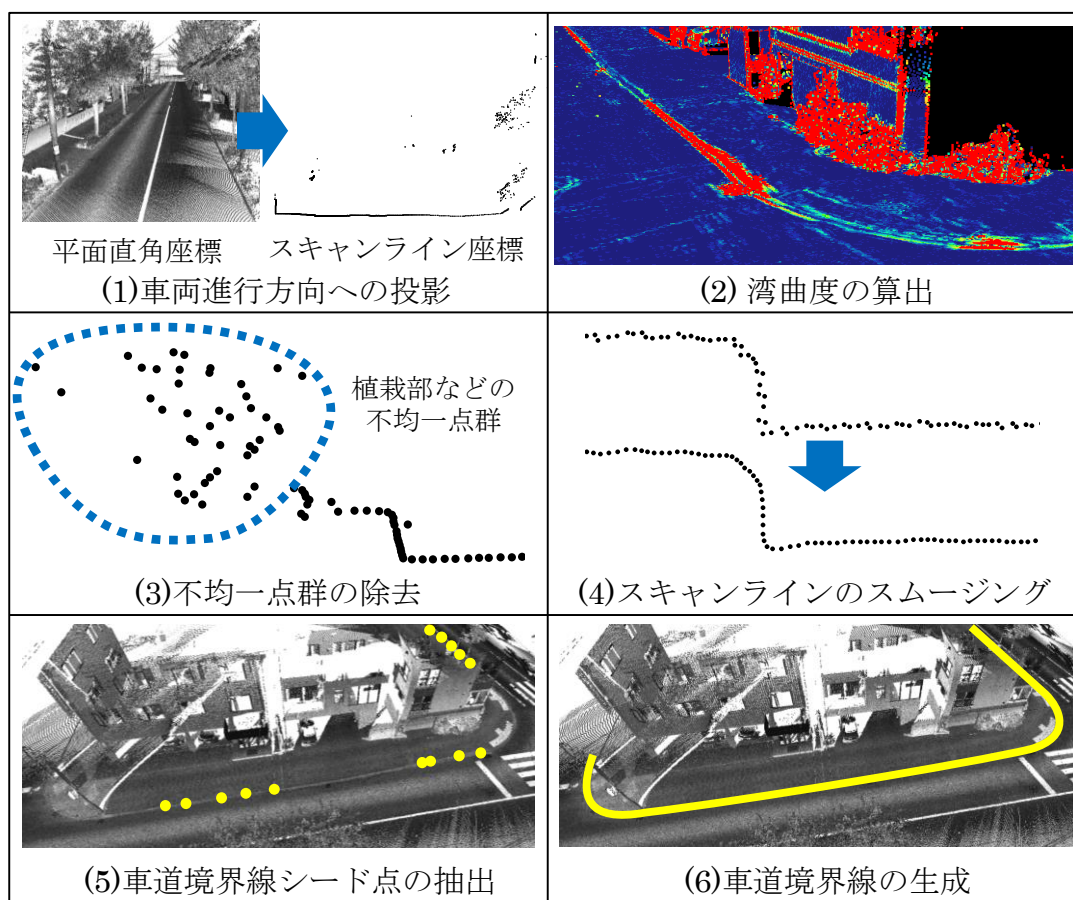


図 2.3 車道境界線の抽出手法

2.1.2 MMS 点群の車両進行方向への投影

図 2.4 に示すように、MMS 車両へのレーザスキャナの設置角に依存せずに縁石等のコーナー点を検出できるようにするために、車両の進行方向に垂直な平面に点群を投影する。点 P_i の投影後の座標 $\hat{p}_i = (\hat{x}_i, \hat{z}_i)$ は式(2.1)と式(2.2)によって算出する。

$$\hat{x}_i = (x_i^p - x_j^q) \cos \kappa_j + (y_i^p - y_j^q) \sin \kappa_j \quad (2.1)$$

$$\hat{z}_i = z_i \quad (2.2)$$

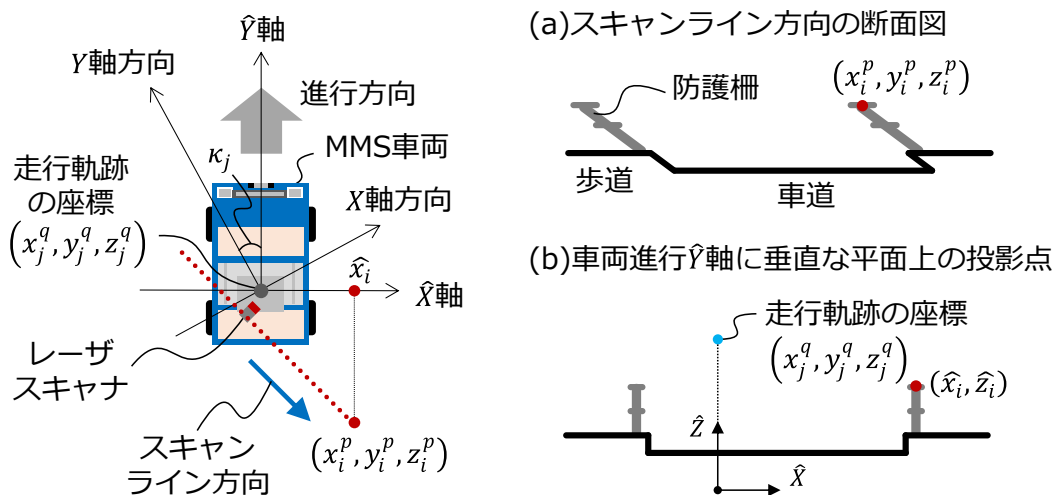


図 2.4 車両進行方向への点群の投影

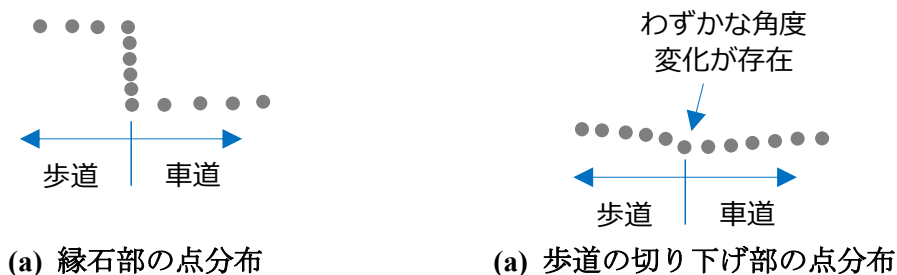


図 2.5 縁石部及び歩道の切り下げ部の点分布

ここで、 \hat{x}_i は車両進行方向に垂直な平面上の水平方向の座標値であり、 \hat{z}_i は鉛直方向の座標値、 (x_j^q, y_j^q) と κ_j は点 P_i の取得時刻 t_i における走行軌跡の座標および方位角である(図 2.4)。取得時刻 t_i における走行軌跡の座標および方位角が走行軌跡 Q に存在しない場合は、前後の取得時刻における走行軌跡点 2 点の、時刻による線形補間により求める。

2.1.3 湾曲度の算出

縁石のエッジ部においては、スキャンライン上の水平・鉛直方向の局所点分布が大きく変化する。また、歩道の切り下げ部では、原則、歩道部と車道部の境界において横断勾配が変化するように設計されていることから、スキャンライン上の局所点分布方向もわずかに変化する(図 2.5)。この変化を認識するために、式(2.3)に示す通り、湾曲度 ρ_i を、注目点 \hat{p}_i とその前後の近傍点 \hat{p}_s および \hat{p}_e の 3 点のなす角度を π から減算した値と定義する(図 2.6)。

$$\rho_i = S_i(\pi - \angle \hat{p}_s \hat{p}_i \hat{p}_e) \quad (2.3)$$

ここで S_i は湾曲度の符号であり、湾曲度の計算に使用する 3 点の形状がレーザスキャナの位置に対して凹形状である場合は 1、凸形状である場合は -1 とする。また、 $t_s < t_i < t_e$ とする。計測ノイズの影響を低減するため、近傍点 \hat{p}_s および \hat{p}_e は、点 \hat{p}_i から一定距離 τ_{lc} (本研究では 80mm~150mm を使用) 内の最遠点とする。これにより、図 2.7 に示すように、隣接点を使用する場合と比較して正確に湾曲度を算出できる。なお、一定距離 τ_{lc} 内に近傍点が存在しない場合は、注目点 \hat{p}_i の隣接点を使用して湾曲度を算出する。

湾曲度が 0 度に近い場合、水平面や鉛直面の構成点であると考えられ、 ± 90 度に近い場合、エッジ点であると考えられる。湾曲度が 180 度または -180 度に近い場合、離れた地物間の境界点であるジャンプエッジ点や植栽などの不均一部の構成点であると考えられる。

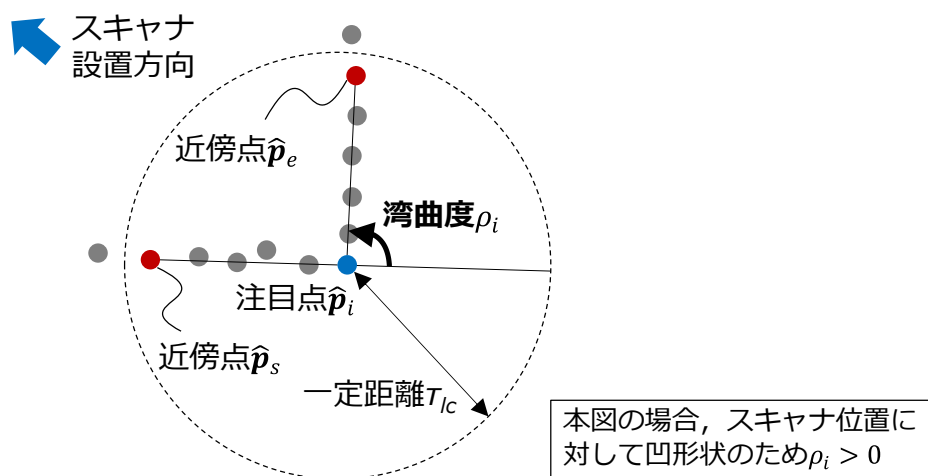
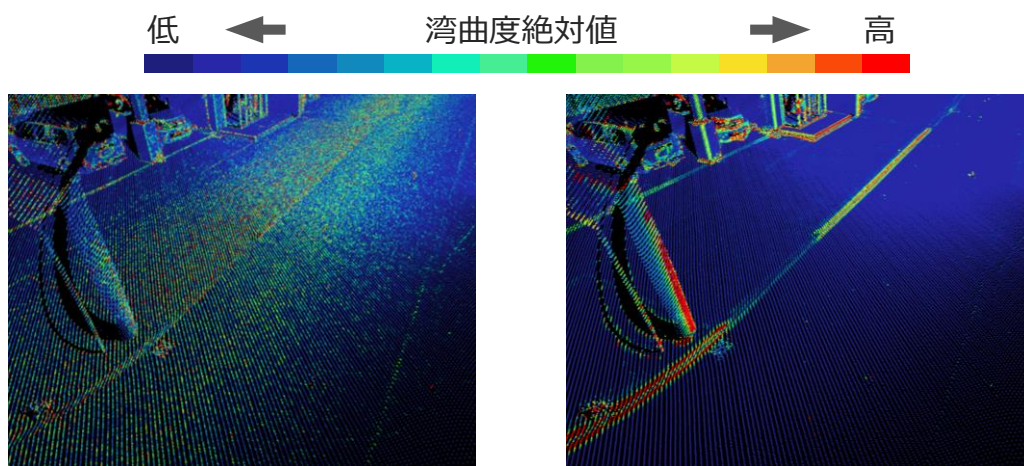


図 2.6 湾曲度の定義



(a) 隣接点を使用した場合

(b) 最遠点を使用した場合

図 2.7 最遠点の選択による湾曲度算出の効果

2.1.4 不均一点群の除外

車道境界付近に存在する植栽などの箇所における不均一点群は、車道境界線の抽出率を低下させる可能性があるため、以降の処理の対象外とする。これらの点群の湾曲度の絶対値は高くなる傾向にある。そこで、湾曲度の絶対値がしきい値（本研究では150度）以上の点は以降の処理の対象外とする。さらに、マルチエコーによる同一時刻の点も不均一点と考えられるため、処理の対象外とする。図 2.8 に示すように、縁石が植物で軽微に覆われている場合は、本手法によって不均一点が除去されるため、以降のステップにおける縁石部の抽出が容易となる。

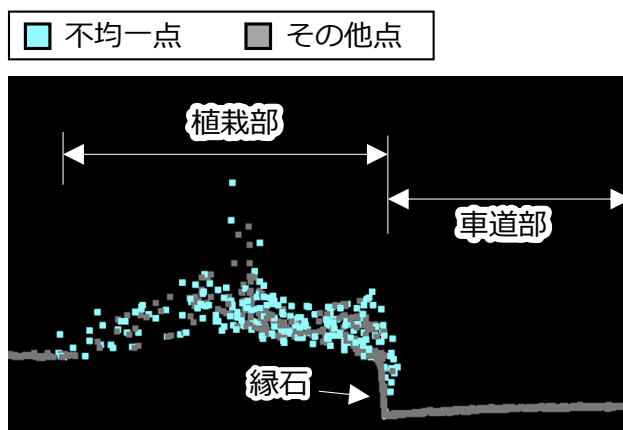


図 2.8 湾曲度の絶対値による不均一点の除外

2.1.5 スキャンラインの平滑化

2.1.6 項で述べる車道境界線の追跡処理は、湾曲度の変化に敏感であることから、計測ノイズの影響の低減が必要である。よって、スキャンラインに対して平滑化フィルタを適用することを検討する。実際のスキャンラインに対して、ガウシアンフィルタ、ラプラシアンフィルタおよび Taubin Smoothing[60]を適用し、適切な平滑化方法と処理パラメータを決定する。

ガウシアンフィルタはガウス分布に従ってカーネル内の重みを算出したフィルタであり、画像のぼかし処理などに使用される。ガウシアンフィルタ後のスキャンラインの各点の座標は式(2.4)～(2.6)によって与えられる。

$$\hat{\mathbf{p}}'_i = \frac{1}{W_i} \sum_{j \in i^*} h_j \cdot \hat{\mathbf{p}}_j \quad (2.4)$$

$$W_i = \sum_{j \in i^*} h_j \quad (2.5)$$

$$h_j = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{d_j^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.6)$$

ここで、 i^* は点 i の近傍点集合、 h_j は点 j におけるガウス分布による係数、 d_j は点 i と点 j の距離、 σ^2 は分散である。

ラプラシアンフィルタは、主に画像からエッジを検出するために使用されている他、点群やメッシュに対して適用してオブジェクトの骨格を検出する用途でも用いられている[61][62]。ラプラシアンフィルタ後のスキャンラインの各点の座標は式(2.7)～(2.9)によって与えられる。

$$\hat{\mathbf{p}}'_i = \hat{\mathbf{p}}_i + \lambda \Delta \hat{\mathbf{p}}_i \quad (2.7)$$

$$\Delta \hat{\mathbf{p}}_i = \sum_{j \in i^*} w_{ij} (\hat{\mathbf{p}}_j - \hat{\mathbf{p}}_i) \quad (2.8)$$

$$w_{ij} = \frac{|\hat{\mathbf{p}}_j - \hat{\mathbf{p}}_i|^{-1}}{\sum_{j \in i^*} |\hat{\mathbf{p}}_j - \hat{\mathbf{p}}_i|^{-1}} \quad (2.9)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{p}}'_i$ は点 i におけるフィルタ適用後の座標、 $\hat{\mathbf{p}}_i$ は点 i におけるフィルタ適用前の座標、 λ はスムージングの強度、 i^* は点 i の近傍点集合、 w_{ij} は距離に反比例した重み

である。

Taubin Smoothing はローパスフィルタリングによって計測ノイズを取り除く手法であり, 正と負のスケールファクタを入れ替えながらガウス平滑化ステップを繰り返す. Taubin Smoothing 後のスキャンラインの各点の座標は式(2.10)によって与えられる.

$$\hat{\mathbf{p}}_i^{t+1} = \hat{\mathbf{p}}_i^t + \lambda \sum_{j \in N(i)} w_{ij} (\hat{\mathbf{p}}_j^t - \hat{\mathbf{p}}_i^t) \quad (2.10)$$

ここで, $\hat{\mathbf{p}}_i^t$ は t 回目の平滑化時における点 i の座標, w_{ij} は重み, $N(i)$ は点 i のスキャンライン上の隣接点, λ はスケールファクタである.

各平滑化フィルタを図 2.9 に示す 2 箇所の実際のスキャンラインに対して適用する. 図 2.9(a) の区間 1 は縁石の側面にノイズ点が含まれる箇所であり, (b) の区間 2 は舗装面及び縁石部の損傷が大きい箇所である. 各平滑化フィルタの適用結果を図 2.10 と図 2.11 に示す. なお, 各フィルタでは着目点とその隣接点 2 点を使用し, ラプラシアンフィルタにおいては $\lambda = 1$ を, ガウシアンフィルタにおいては $\sigma^2 = 0.1$ を使用した. Taubin Smoothing においては, 重み w_{ij} は隣接点数の逆数として 0.5 とし, スケールファクタ λ は Taubin[60] の実験によって採用された値 (平滑化ステップの偶数回目においては $\lambda = 0.6307$ を, 奇数回目においては $\lambda = -0.6732$) を使用した.

図 2.10 に示す区間 1 への平滑化フィルタ適用結果では, 全てのフィルタにおいて平滑化を繰り返すことにより計測ノイズが目立たなくなることが確認できる. 縁石のエッジ形状に着目すると, ガウシアンフィルタとラプラシアンフィルタでは適用回数が増えることで形状縮退が見られる一方で, Taubin Smoothing では形状を維持していた. 図 2.11 に示す区間 2 への平滑化フィルタ適用結果では, 損傷による影響が低減し, 滑らかなスキャンラインが生成されていた. 縁石のエッジ形状に着目すると, 区間 1 の結果と同様に, ガウシアンフィルタとラプラシアンフィルタでは適用回数が増えることで形状縮退が見られる一方で, Taubin Smoothing では形状を維持していた. 以上の結果より, 本研究では, Taubin Smoothing を 20 回適用することによってスキャンラインを平滑化する. なお, Taubin Smoothing を適用した後は湾曲度を再計算する.

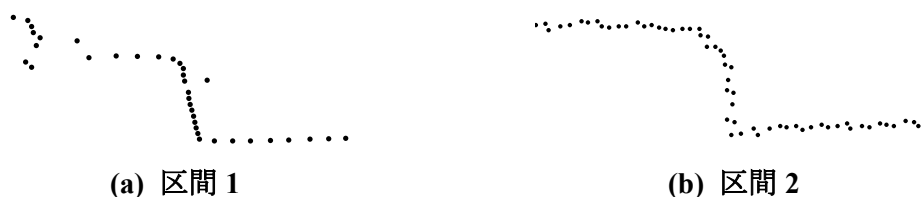


図 2.9 平滑化フィルタの実験に使用するスキャンライン

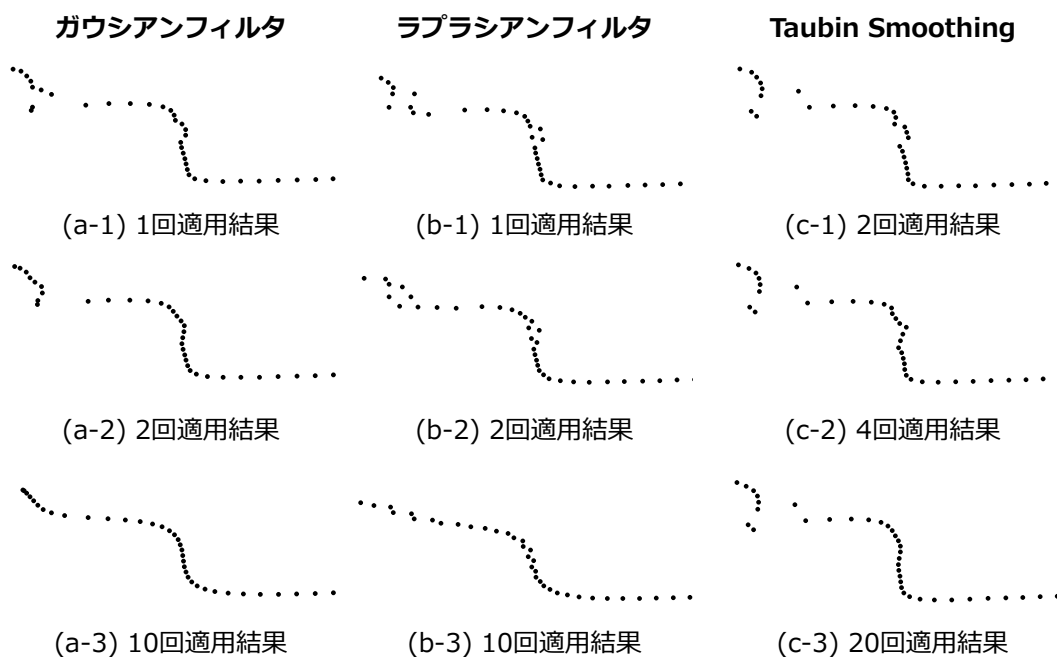


図 2.10 区間 1 への平滑化フィルタ適用結果

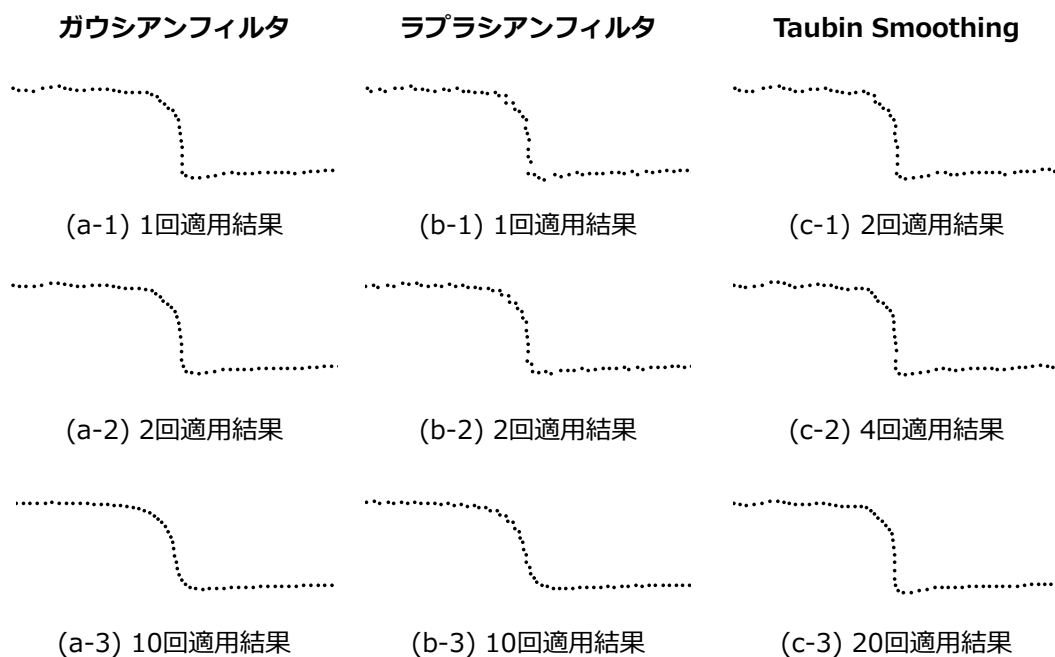


図 2.11 区間 2 への平滑化フィルタ適用結果

2.1.6 車道境界線シード点の抽出

車道境界線の抽出においては、はじめに縁石エッジ部と考えられる点をシード点として抽出し、シード点から車道境界点を追跡していく。本手法においては以下の手順によりシード点を抽出する。

まず、図 2.12 に示すように、湾曲度 ρ_i が一定の範囲 $[\tau_{\rho_{min}}, \tau_{\rho_{max}}]$ 内にあり、局所的にピークとなる点（湾曲度ピーク点）を抽出する。縁石エッジ部はレーザスキャナの位置に対して凹形状であるため、湾曲度の範囲は 90 度付近とする。次に、図 2.13 に示すように、各領域内において走行軌跡直下の点から左右それぞれの道路外側に向かってスキャンラインを走査し、最初に現れる湾曲度ピーク点をシード候補点として取得する。取得したシード候補点集合の中には、歩道の切り下げ部や交差点部といった縁石のない箇所において、非縁石点が含まれると考えられる。そこで、シード候補点が縁石点のみで構成されている場合、局所的なシード候補点集合は直線近似できるという性質を利用して縁石部の点のみをシード候補点から抽出する。具体的には、まず、図 2.14(a)に示すように、MMS 点群を走行軌跡の進行方向に一定間隔 L_s ごとに領域分割し（本研究では $L_s = 1.0 m$ とする）、さらに走行軌跡を境界として左右それぞれの領域に分割する。

続いて、各領域内のシード候補点集合に対して RANSAC を使用した直線フィッティングを行い、図 2.14(b)に示すように、得られた直線上の 1 点をシード点とする。RANSAC においてインライアと判定された点の割合が少ない区間では、シード点を抽出しない。本研究では、フィッティングのしきい値を 30~50mm として、シード点抽出対象とするインライア点の割合は 80%とする。この処理は、フィッティングする線分の方向に制約を設けないため、縁石が車線進行方向や走行軌跡に平行でない場合でもシード点を抽出できる。一方で、車両の道路接地面構成点など縁石以外の点がシード点として残る場合があるが、これらの点は車道境界線の抽出後に削除される。

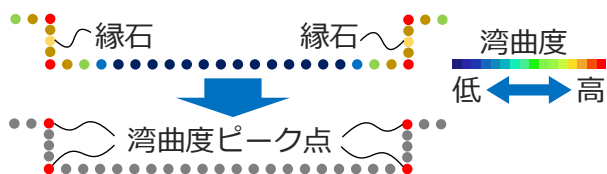


図 2.12 湾曲度ピーク点の抽出

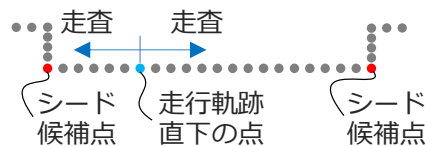
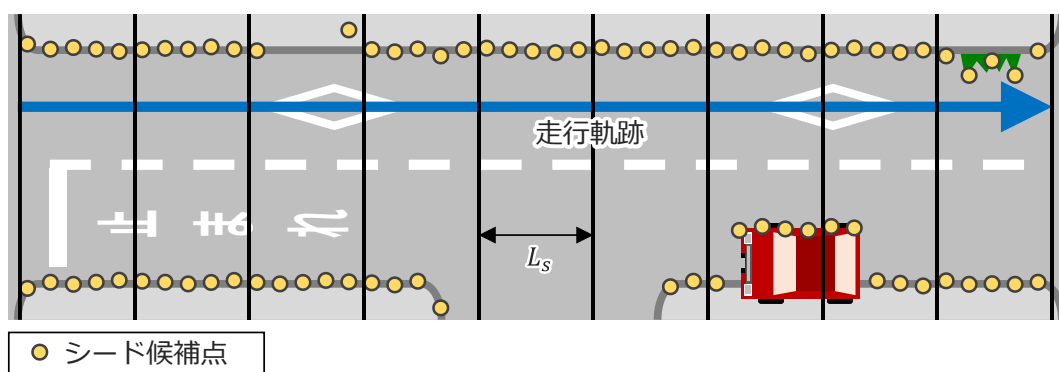
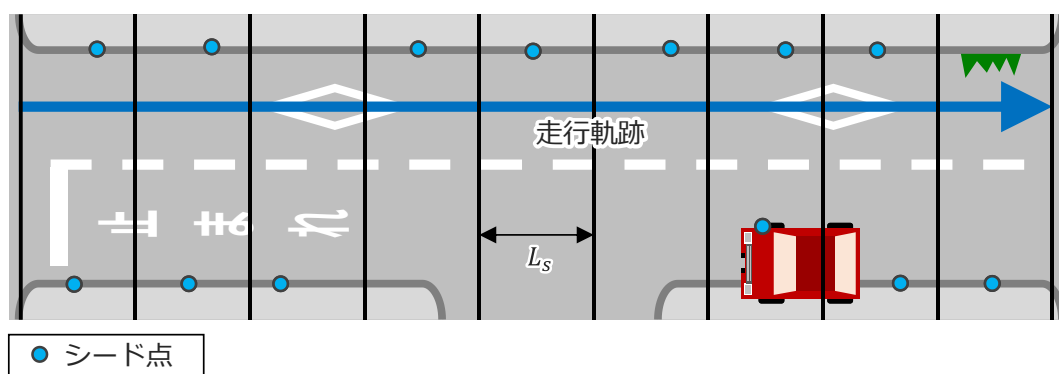


図 2.13 シード候補点の抽出



(a) 走行軌跡による領域分割



(b) RANSC によるシード点の抽出

図 2.14 車道境界線シード点の抽出

2.1.7 車道境界線の生成

車道境界線は、相対的に湾曲度の高い点から構成され、直線または滑らかな曲線となる。よって、シード点の周辺領域を探索し、湾曲度が相対的に高い点を、抽出される車道境界線の滑らかさを考慮しつつ接続していくことにより車道境界線を生成する。本手法では 2.1.6 項で抽出したシード点は、全て車道境界線に含まれるようにする。

車道境界線の生成処理の概要を図 2.15 に示す。本処理においては現在の車道境界線の端点をフロントと呼ぶ。最初に全シード点をフロントとして設定し (図 2.15 (a)), 各フロント f において、 f から一定距離離れた局所領域内の後述するエネルギーが最小の点、または、より近くに存在するシード点を f の接続候補点として取得する (図 2.15 (b))。得られた接続候補点集合のうち最もエネルギーの小さな候補点を、対応するフロントと接続し、新たなフロントとして設定する (図 2.15 (c))。ただし、シード点が接続候補点として取得されている場合は、そのシード点を優先的に接続する (図 2.15 (d))。以上の処理を全てのフロントにおいて接続候補点が無くなるまで繰り返すことで車道境界候補線を生成する。

接続候補点の抽出処理では、まず、図 2.16 に示すように、フロント f を基準として後述の探索方向 v_k に一定距離 d 離れた位置から探索半径 r 内に含まれる点群 S を取得する。ただし、 S は、平面上ならびに不均一部の点を除くため、湾曲度の絶対値が一定範囲 $[\tau_{b_{min}}, \tau_{b_{max}}]$ 内にあり、かつ、湾曲度に対するスミノルフ・グラブス検定（外れ値検出法の一つ）により外れ値とならなかった点集合とする。本研究では、 $d = 0.5\text{m}$ 、 $r = 0.25\text{m}$ 、 $\tau_{b_{min}} = 6.0 \sim 10.0$ 度、 $\tau_{b_{max}} = 110$ 度とした。

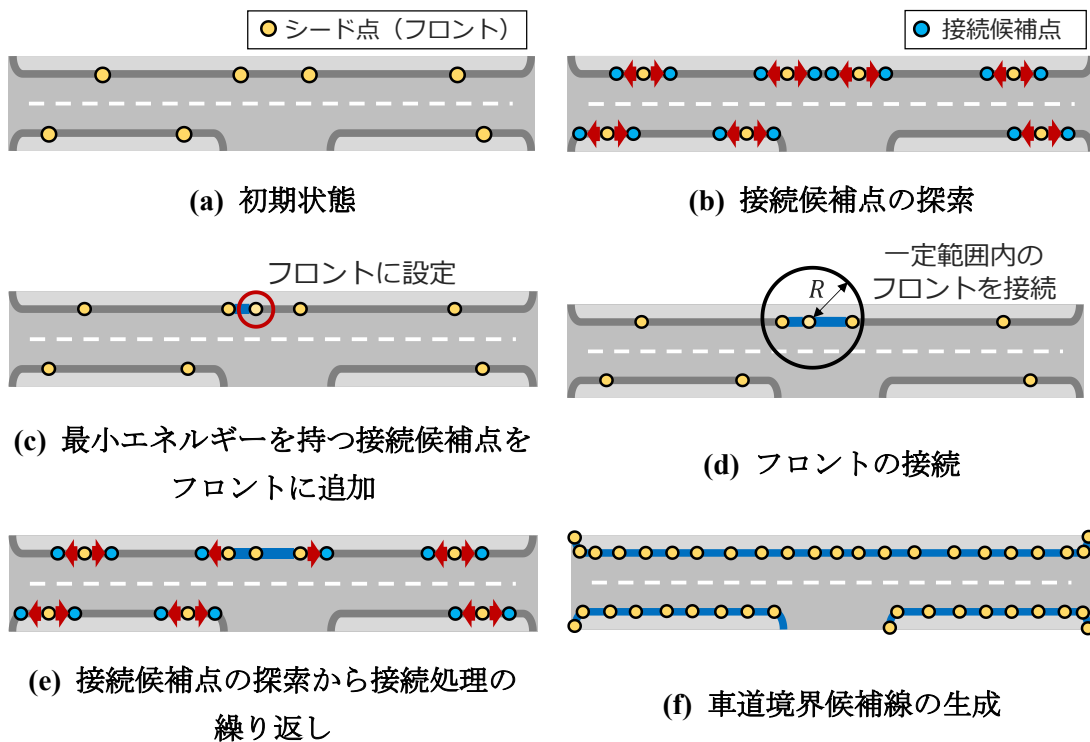


図 2.15 車道境界線の生成

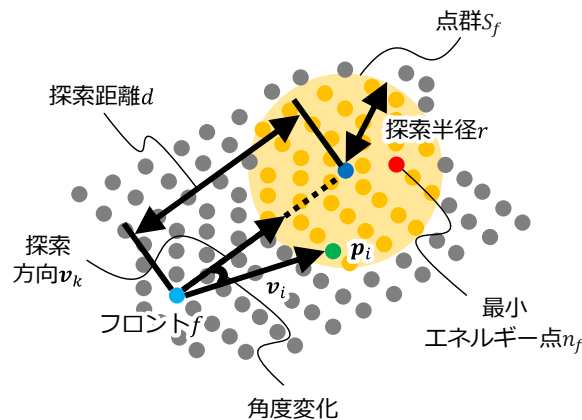


図 2.16 接続候補点の探索

そして、式(2.11)によって与えられる3つのエネルギーの重み付き和が最小となる点 n_f を f の接続候補点とする。

$$n_f = \arg \min_{i \in S_f} \{\alpha E_b(i) + \beta E_h(i) + \gamma E_v(i)\} \quad (2.11)$$

ここで、 $E_b(i)$ 、 $E_h(i)$ 、 $E_v(i)$ は点 i における湾曲度の相対値と水平方向および鉛直方向の角度変化によるエネルギー、 α 、 β 、 γ は各エネルギーに対する重みであり、本研究では、 $\alpha = 1.0$ 、 $\beta = 5.0 \sim 10.0$ 、 $\gamma = 20.0 \sim 25.0$ とした。各エネルギーは式(2.12)～(2.14)によって定義する。

$$E_b(i) = -\frac{\rho_i - \mu_\rho}{\sigma_\rho} \quad (2.12)$$

$$E_h(i) = \frac{|\Delta\theta_h(i)|}{\pi} \quad (2.13)$$

$$E_v(i) = \frac{2|\Delta\theta_v(i)|}{\pi} \quad (2.14)$$

ここで、 μ_ρ および σ_ρ は局所点群 S における湾曲度の平均値および標準偏差である。 $\Delta\theta_h(i)$ および $\Delta\theta_v(i)$ は、対象点 i とフロント f との差分ベクトル \mathbf{v}_i と探索方向ベクトル \mathbf{v}_k との水平方向の角度差ならびに鉛直方向の角度差である。探索方向ベクトル \mathbf{v}_k は、図 2.17 および式(2.15)に示すように、フロント f と車道境界候補線上の隣接2点 g 、 h を用いた2つの差分ベクトル $\mathbf{v}_1 = \mathbf{p}_f - \mathbf{p}_g$ 、 $\mathbf{v}_2 = \mathbf{p}_g - \mathbf{p}_h$ の重み付き和として定義する。

$$\mathbf{v}_k = a\mathbf{v}_1 + b\mathbf{v}_2 \quad (2.15)$$

ここで、 a および b は重みである（本研究では $a = 0.7$ 、 $b = 0.3$ とする）。車道境界候補線の構成点が3点未満の場合であり、隣接点 g 、 h が存在しない場合は、現在の車道境界候補線のシード点取得時の RANSAC によって算出された線分の方角を探索方向ベクトル \mathbf{v}_k とする。 S が点を含まない場合は、車道境界線追跡処理を終了する。

続いて、誤抽出と考えられる車道境界候補線を削除する。まず、一定長さ τ_c 以下の車道境界候補線を削除する。次に、車両などの車道上の地物に対応する車道境界候補線を削除するために、図 2.18 に示すように、車道境界候補線上の一定の空間範囲（幅 w_l および高さ h_{l1} 以上高さ h_{l2} 未満）に一定数 τ_u 以上の点群が存在する場合は、その車道

境界候補線を削除する。さらに、歩道側において抽出された車道境界候補線を削除する。この処理は、図 2.19 に示すように、車道境界候補線 c の端点と最寄りの走行軌跡構成点を結ぶ線分が、他の車道境界候補線と交差する場合、 c を削除することにより行う。本研究では、環境やシステムに応じて $\tau_c = 1.0 \sim 2.0\text{m}$, $w_l = 0.2\text{m}$, $h_{l1} = 1.0\text{m}$, $h_{l2} = 2.0\text{m}$, $\tau_u = 1000$ の値を用いた。

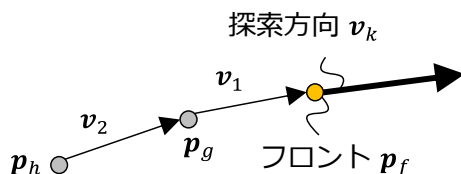


図 2.17 水平方向および鉛直方向の角度変化

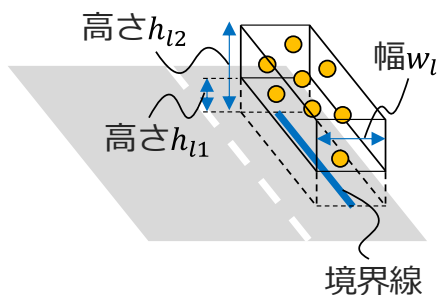


図 2.18 車道上の地物に対応する車道境界候補線の削除

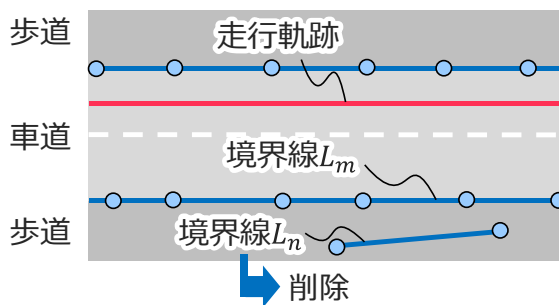


図 2.19 歩道側の車道境界候補線の削除

2.2 車道境界線の抽出結果

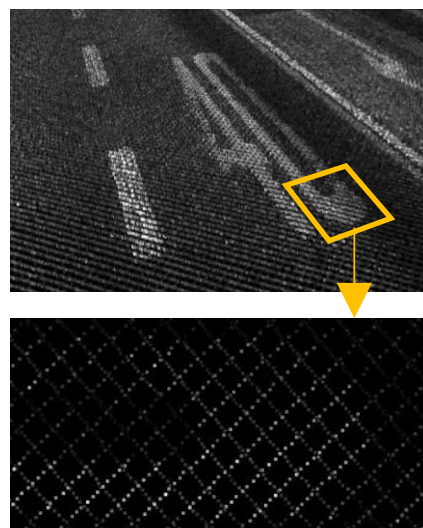
2.2.1 実験用データ

実証実験では、異なる仕様からなる MMS に対する提案手法の抽出性能を評価するために、川崎市麻生区内において 3D Laser Mapping 社製 MMS 「Street Mapper 360」 [63] (図 2.20) と三菱電機社製 MMS 「MMS-X500ZL」 [64] (図 2.21) によって同じ道路を計測したデータを使用した。また道路構造の差異による抽出性能を評価するために、Street Mapper 360 によって取得した札幌市北区内のデータも使用した。札幌市の検証サイトは川崎市より縁石が低い傾向にある。使用した MMS の仕様と取得した点群の

概要を表 2.1 に、各検証サイトの道路構造を表 2.2 に示す。なお、以降では川崎市麻生区を Street Mapper 360 によって計測したデータはデータ A、川崎市麻生区を MMS-X500ZL によって計測したデータはデータ B、札幌市北区を計測したデータはデータ C とする。データ A, B, C それぞれの点数は約 1,800 万点, 5,700 万点, 1,700 万点であった。



(a) MMS 外観

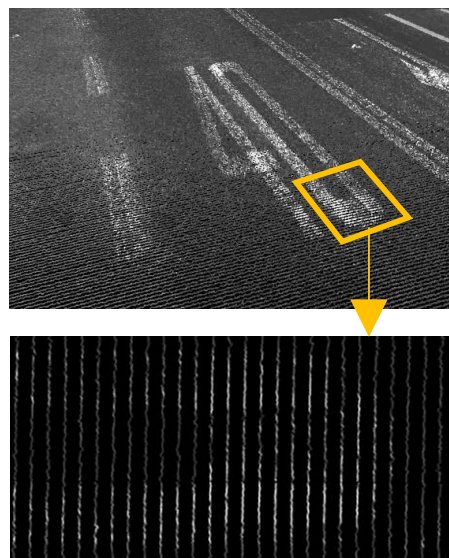


(b) 取得点群

図 2.20 Street Mapper 360 の外観と取得点群



(a) MMS 外観



(b) 取得点群

図 2.21 MMS-X500ZL の外観と取得点群

表 2.1 MMS の仕様と取得点群の概要

MMS名称	Street Mapper 360	MMS-X500ZL
製造会社	3D Laser Mapping	三菱電機
レーザスキャナ	RIEGL VQ-250 (2台)	Z+F Profiler 9012 (1台)
レーザスキャナ 設置角度	・車両進行方向に対して45度 (Yaw角方向) ・下方向に40度 (Pitch角方向)	・車両進行方向に対して0度 (道路横断方向) ・下方向に20度 (Pitch角方向)
レーザスキャナ 設置高さ	地上約2m	地上約2.2m
パルスレート	200 kHz	1016 kHz
スキャンレート	100 rps	200 rps
点間隔	・スキャナ直下の地面にて 約10mm ・スキャナ直下から5m 離れた地面にて約35mm	・スキャナ直下の地面にて 約3mm ・スキャナ直下から5m 離れた地面にて約16mm
スキャンライン間隔	最大約110mm (MMS計測時の最大速度は 約40km/h)	最大約50mm (MMS計測時の最大速度は 約40km/h)

表 2.2 各検証サイトの道路構造

計測地区	川崎市麻生区	札幌市北区
全長	約600m	約600m
車線数	2車線	2車線・3車線
幅員	約10m	約7.5m～約11.5m
縁石高さ	約200mm	約80mm～約170mm

2.2.2 評価方法

関連研究 (Kumar ら[65]など) で広く使用されている Heipke の手法[66]を使用して抽出結果を定量評価する。この方法では、正解データを使用して、抽出した車道境界線 (以降、抽出データと呼ぶ) を評価する。本評価では、正解データを手動にて作成した。なお、正解データは、点群から目視で確認できる部分において作成し、車両の後ろなどのオクルージョン部分では作成していない。

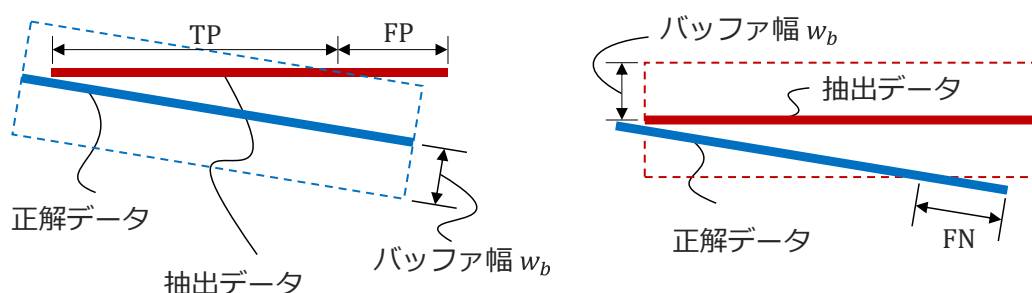


図 2.22 定量評価方法

図 2.22 に示すように、正解データから一定幅 w_b を持つバッファに含まれる抽出データを True Positive (TP) と定義し、バッファの外側の抽出データを False Positive (FP) と定義する。また、抽出データから同様の幅 w_b を持つバッファの外にある正解データは False Negative (FN) として定義する。抽出境界線の完全性、正確性、品質、精度、ギャップ率および合計ギャップ長は式(2.16)～(2.21)によって定義される。

$$\text{完全性} \quad c = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2.16)$$

$$\text{正確性} \quad p = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2.17)$$

$$\text{品質} \quad q = \frac{TP}{TP + FP + FN} \quad (2.18)$$

$$\text{精度} \quad a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l (d_i^2)}{l}} \quad (2.19)$$

$$\text{ギャップ率} \quad g = \frac{n}{r} \quad (2.20)$$

$$\text{合計ギャップ長} \quad \mu = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i)}{n} \quad (2.21)$$

ここで d_i は正解データとバッファ内に含まれる i 番目の抽出データとの最短距離であり、 l はバッファ内に含まれる抽出データ数である。式(2.19)の精度は、バッファ内に含まれる抽出データと正解データとの間の平均距離を表す。 n は正解データのバッファの外側にある抽出データの区間数である。 h_i は正解データのバッファの外側にある i 番目の抽出データの長さである。

これらの評価指標は、バッファ幅 w_b の影響を大きく受けるため、 w_b の適切な設定が必要である。バッファ幅として、既往研究の Qui ら[36]は 200 mm, Gézero ら[47]は

50mm, Kumar ら[65]は 100~500 mm の範囲の複数の値を採用している. 本論文では w_b を 10~100 mm までの 10mm ごとの値を用いて抽出性能を評価した.

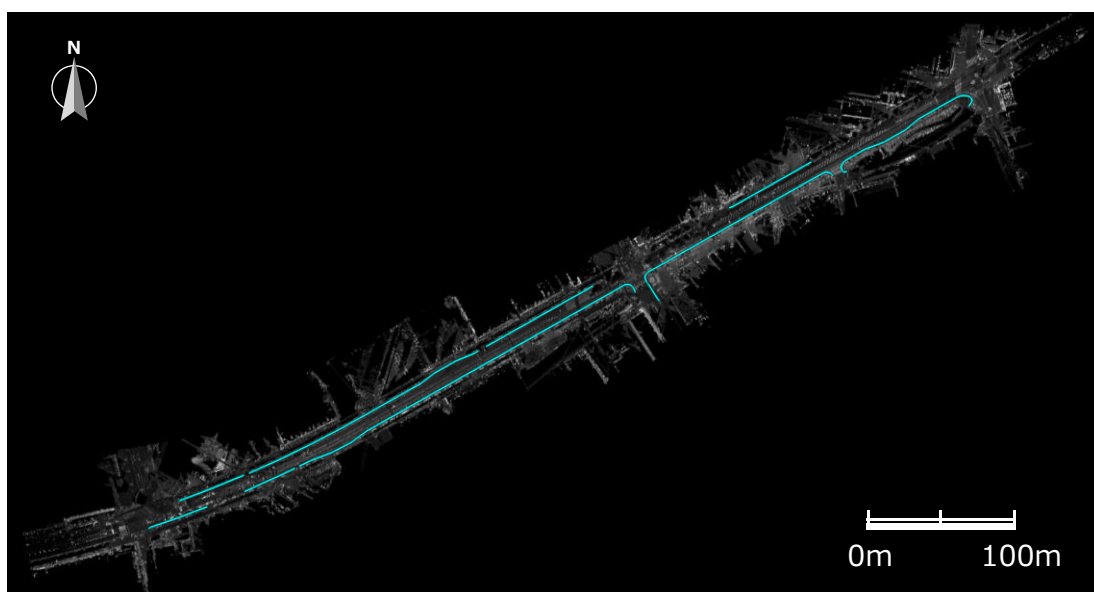
なお, 各指標の計算を簡易化するために, 線分の代わりに抽出データおよび正解データ上で 10 mm 間隔で発生させた点を計算に使用した. また, 評価のために, 抽出データを MMS 進行方向の左右ごとに縁石, 切り下げ, 交差点に分割し, 個別に各評価指標を算出した. なお, 縁石の変形部(切り下げ部と縁石の切り替わりの部分)は縁石部として評価し, 横断歩道用の切り下げ部は交差点部として評価した.

2.2.3 抽出結果と評価

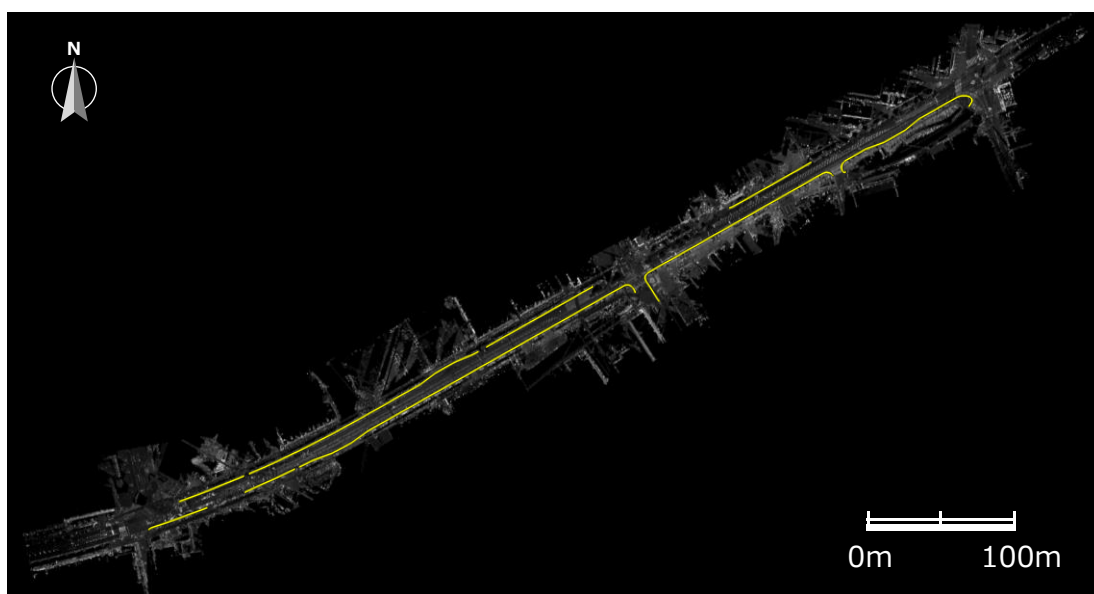
データ A から C に対する車道境界線の抽出結果の全体図と正解データを図 2.23, 図 2.26, 図 2.29 に示す. また, 各データの抽出データの拡大図を図 2.24, 図 2.27, 図 2.30 に示す.

抽出結果の全体図と正解データより, 交差点端部での差異は一部見られるものの(図 2.30 左端), 正解データと視覚的にはほぼ同様の車道境界線を抽出できていることがわかる. 図 2.24 (a) (b) などに示すような高さの違う縁石や切り下げ部, また, 図 2.24 (c) や図 2.27 (d) に示すような交差点部やバスベイ部などの MMS の走行方向と平行でない箇所においても車道境界線を抽出できている. さらに, 抽出結果の全体図に見られるような異なる幅の道路において, MMS の走行車線と反対側の車道境界線を抽出できている. 提案手法は道路構造の違いに頑健であるといえる. また, 図 2.27 (c), 図 2.30 (d) に示すような雑草による軽微な縁石の遮蔽区間においても車道境界線を抽出できていることがわかる. なお, 交差点部においては, StreetMapper360 から抽出した車道境界線の方が MMS-X500ZL の車道境界線よりも長くなる傾向にあり, これは, レーザスキャナの設置角度と台数の差異によるものであると考えられる.

バッファ長を 50mm とした場合の抽出境界線の定量評価結果として, 各データの抽出データの抽出誤差を図 2.25, 図 2.28, 図 2.31 に, 進行方向の左右ごとの各評価指標を表 2.3 から表 2.5 に示す. データ A とデータ B は, 完全性, 正確性, 品質が全体で 98.8~99.5%であった. データ C は, 完全性, 正確性, 品質が全体で 92.9~95.8%であった. 切り下げ部は, 縁石部と同等の品質を達成した. 一方で, 交差点は大きくカーブしており, 縁石も存在しないことから, 縁石や切り下げより完全性, 正確性, 品質が低くなる傾向となった. データ C は, 交差点周辺において MMS 走行車線に対する交差道路の縁石部も取得できている. この縁石部の抽出性能が低いいため, データ C はデータ A, データ B に比べて, 比較的抽出性能が低くなったと考えられる.



(a) 抽出境界線の全体図



(b) 参照境界線（手動抽出結果）の全体図

図 2.23 データ A の車道境界線抽出結果

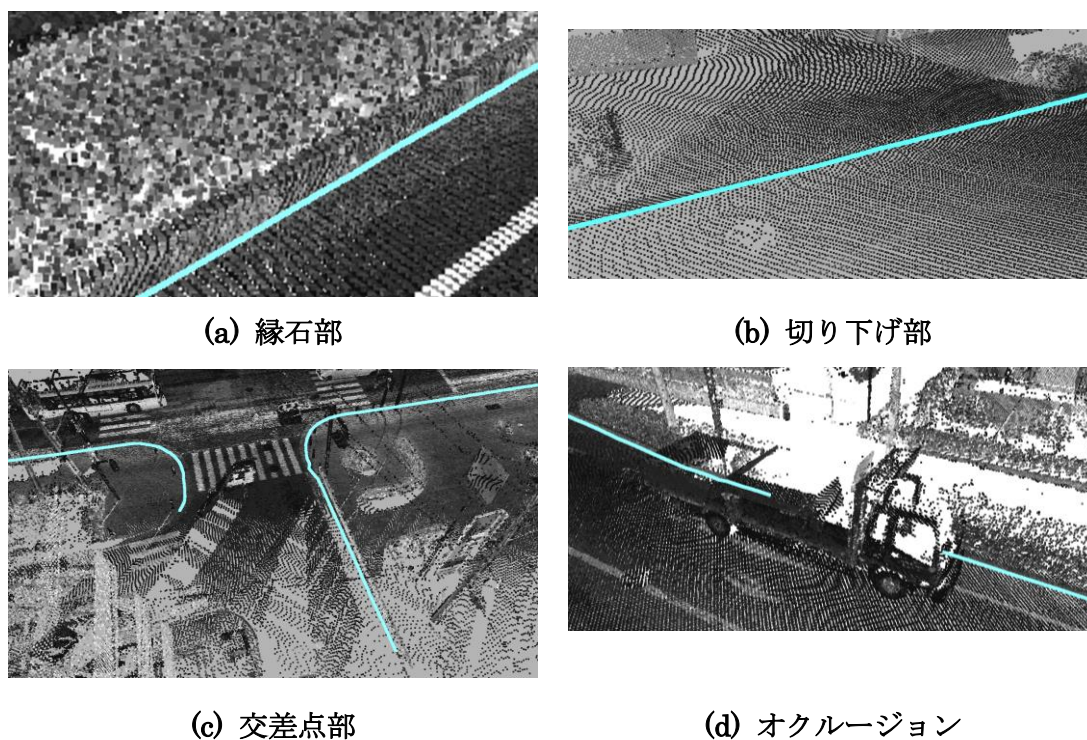


図 2.24 データ A の車道境界線抽出結果の拡大図

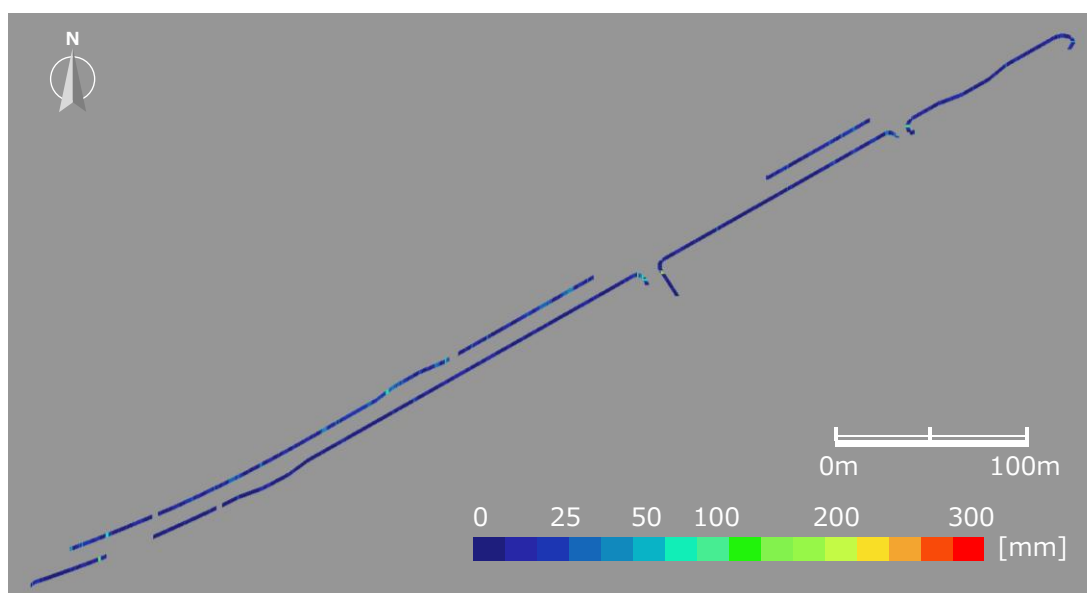
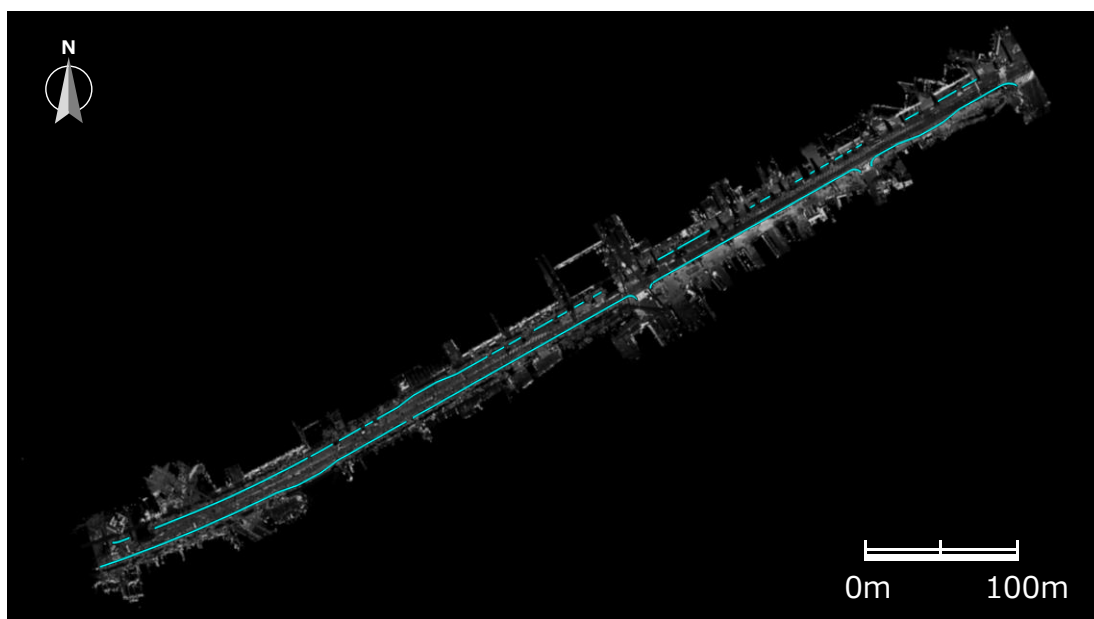
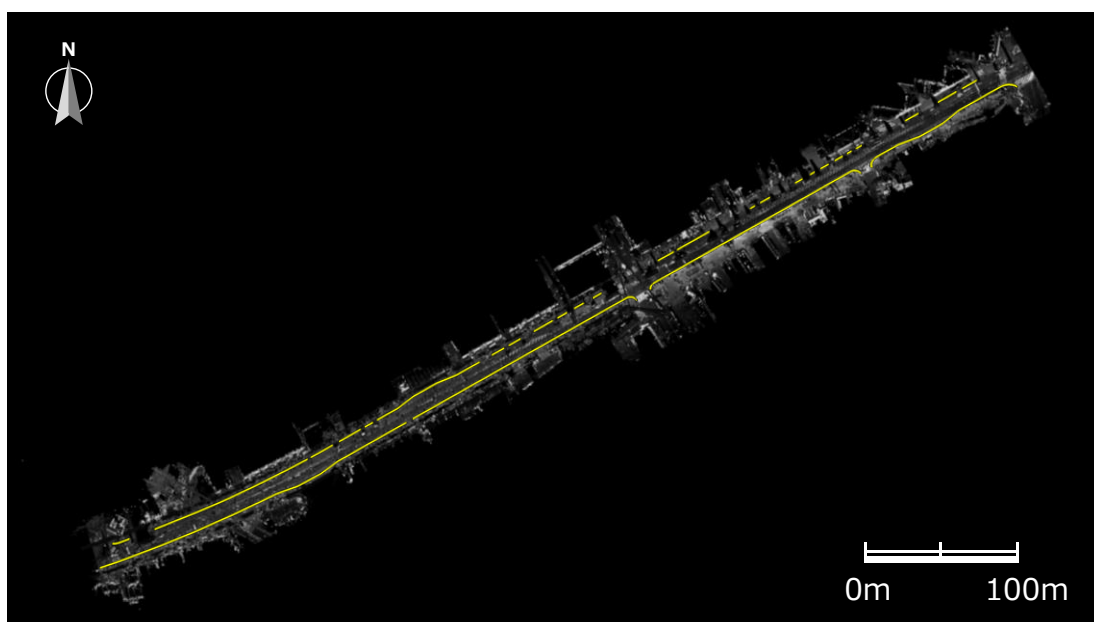


図 2.25 データ A の車道境界線抽出誤差



(a) 抽出境界線の全体図



(b) 参照境界線（手動抽出結果）の全体図

図 2.26 データ B の車道境界線抽出結果

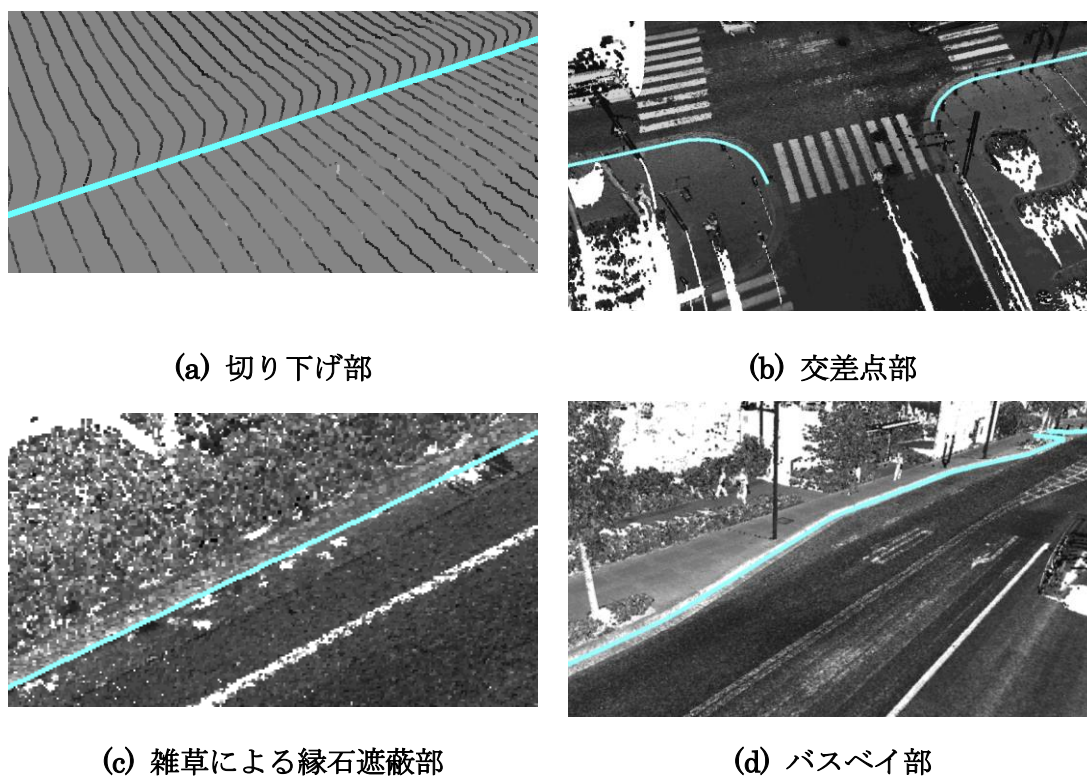


図 2.27 データ B の車道境界線抽出結果の拡大図

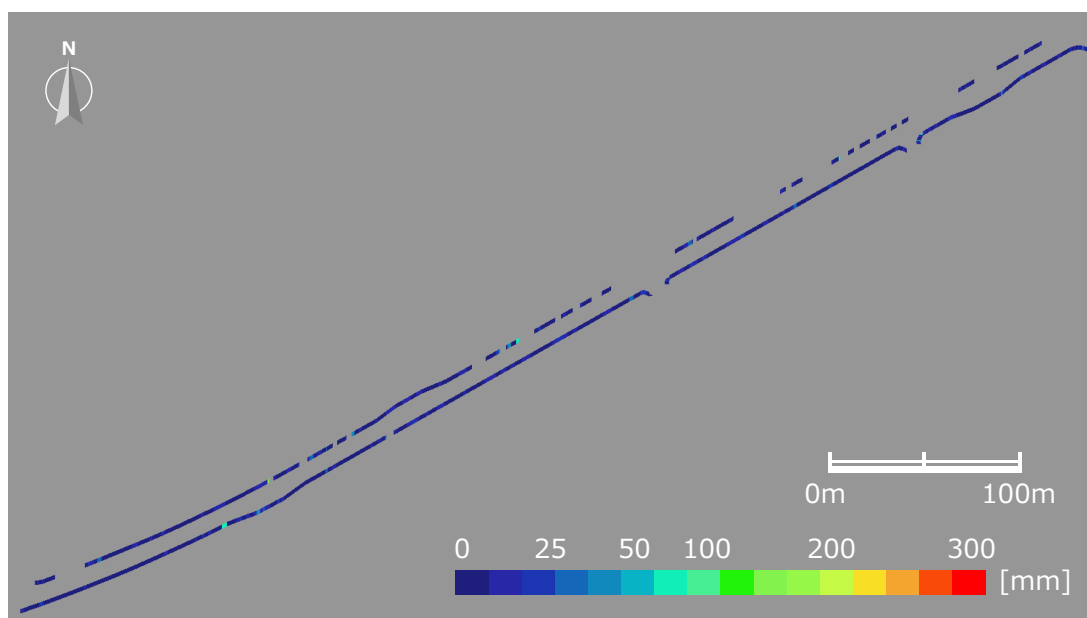
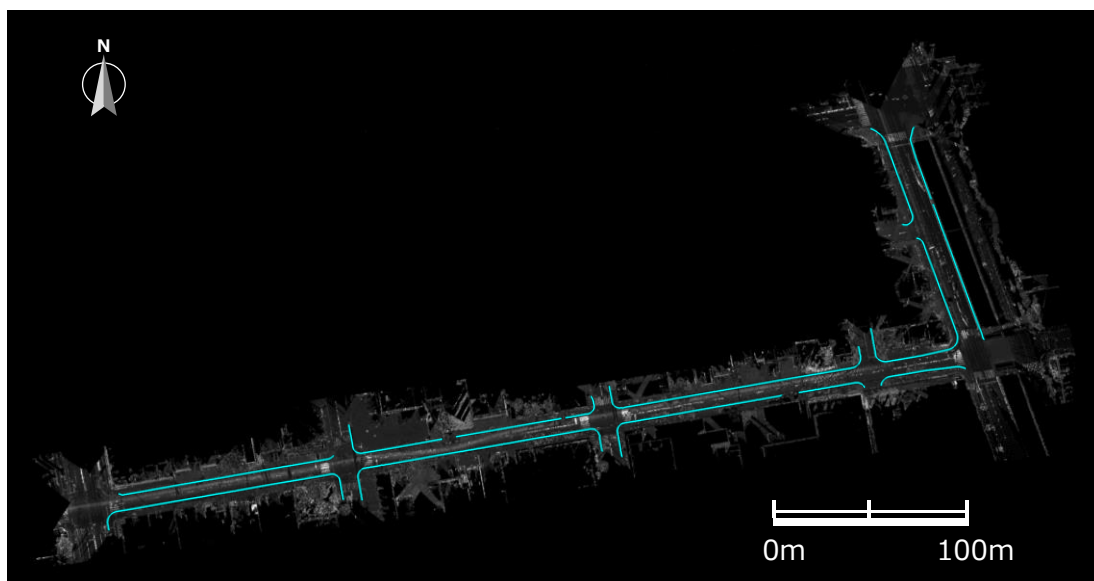
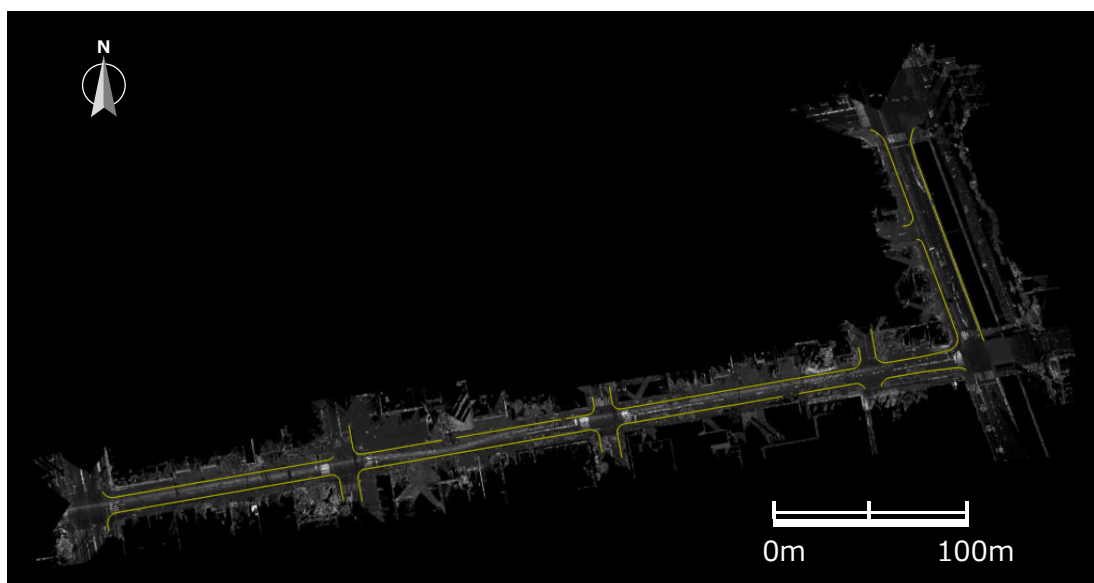


図 2.28 データ B の車道境界線抽出誤差



(a) 抽出境界線の全体図



(b) 参照境界線（手動抽出結果）の全体図

図 2.29 データ C の車道境界線抽出結果

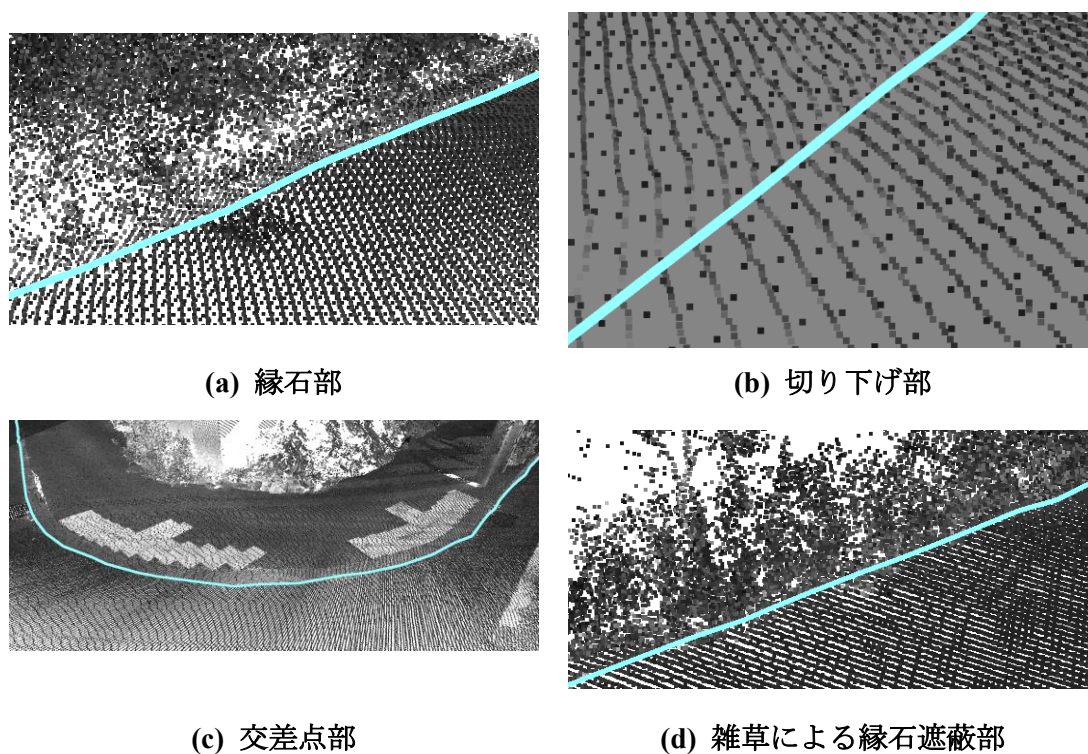


図 2.30 データ C の車道境界線抽出結果の拡大図

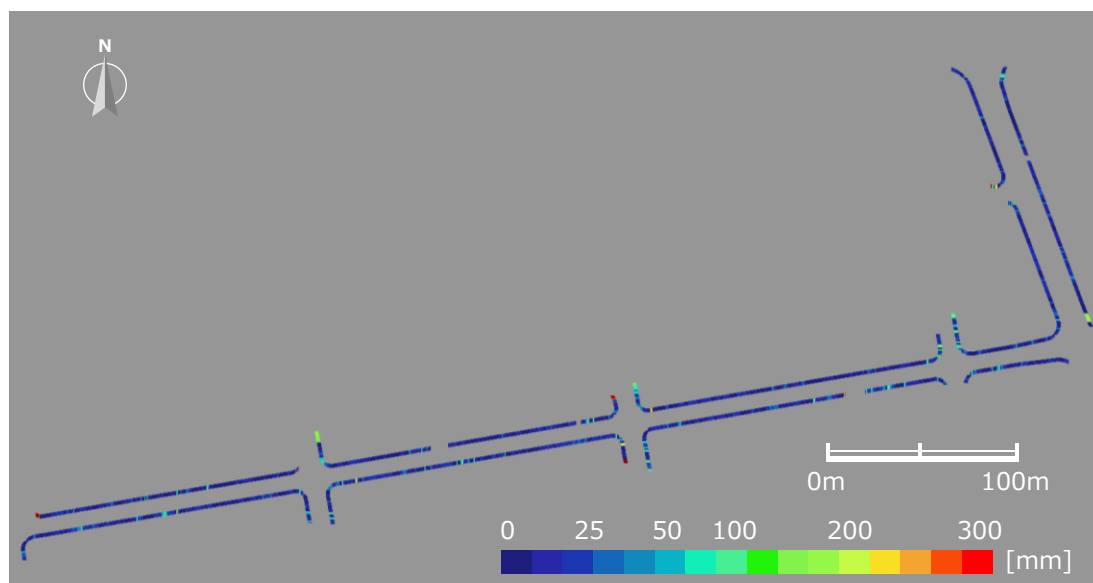


図 2.31 データ C の車道境界線抽出誤差

精度はデータ A が 10.2~23.2mm, データ B が 10.8~17.5mm, データ C が 13.3~20.7mm となった。交差点の精度は縁石や切り下げより低下する傾向となった。ギャップ数はデータ A, B, C でそれぞれ 16, 17, 89 であった。また, 合計ギャップ長はデータ A, B, C それぞれで 8.3m, 7.0m, 54.6m を示した。また, 正解データの全体の長さはデータ A, B, C でそれぞれ 953m, 947m, 1138m であった。

10mm から 100mm までのバッファ幅における完全性と合計ギャップ長を図 2.32 に示す。なお, 正確性と品質は完全性と同様の傾向を示し, ギャップ数は合計ギャップ長と同様の傾向を示した。データ A と B においては, バッファ幅 50mm 以上において完全性と合計ギャップ長の変化はほとんどなかった。データ C は, データ A と B よりもバッファ幅に対する完全性の値が低く, 合計ギャップ長が長くなる傾向となった。交差点の完全性は全データで共通して全体や切り下げよりも低くなる傾向となった。

MMS の進行方向に対する左右の車道境界線の違いやシステムに違いによる抽出性能の顕著な差異は見られなかった。これは, 湾曲度の算出やスキャンラインの平滑化処理といった点密度に影響を受けにくくする処理を採用した効果と考えられる。データ C の交差点で見られる左側の抽出性能が右側より低い理由は, 左側の交差点における未検出である。

表 2.3 データ A の定量評価結果

指標	進行方向左側			進行方向右側		
	全体	切り下げ	交差点	全体	切り下げ	交差点
完全性[%]	98.9	100.0	92.0	99.4	100.0	-
正確性[%]	98.9	99.9	92.3	99.5	100.0	-
品質[%]	98.9	100.0	92.1	99.5	100.0	-
精度[mm]	10.5	10.2	18.4	19.6	23.2	-
ギャップ数[箇所]	12	1	10	4	0	-
合計ギャップ長[m]	6.4	0.0	5.3	1.9	0.0	-

表 2.4 データ B の定量評価結果

指標	進行方向左側			進行方向右側		
	全体	切り下げ	交差点	全体	切り下げ	交差点
完全性[%]	99.5	99.9	96.6	98.8	100.0	-
正確性[%]	99.5	99.9	96.4	97.5	100.0	-
品質[%]	99.5	99.9	96.5	98.1	100.0	-
精度[mm]	11.9	13.8	17.5	11.0	10.8	-
ギャップ数[箇所]	8	1	3	9	0	-
合計ギャップ長[m]	2.8	0.1	1.4	4.2	0.0	-

表 2.5 データ C の定量評価結果

指標	進行方向左側			進行方向右側		
	全体	切り下げ	交差点	全体	切り下げ	交差点
完全性[%]	94.5	99.4	87.3	95.7	92.1	93.3
正確性[%]	92.9	99.4	80.2	95.7	92.2	93.2
品質[%]	93.7	99.4	83.6	95.7	92.1	93.3
精度[mm]	15.2	13.3	19.2	18.0	17.3	20.7
ギャップ数[箇所]	42	3	23	47	11	20
合計ギャップ長[m]	30.3	0.8	13.6	24.3	9.0	5.8

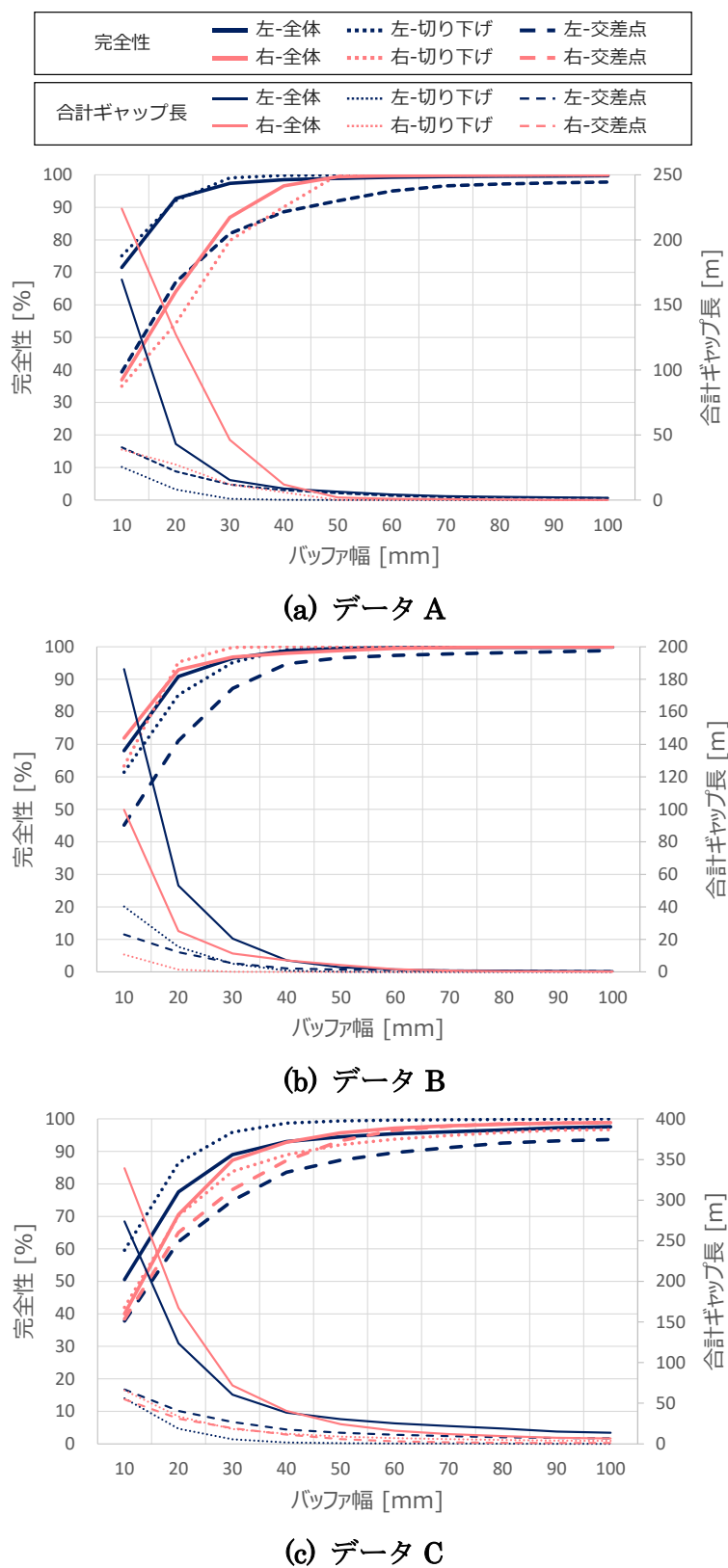
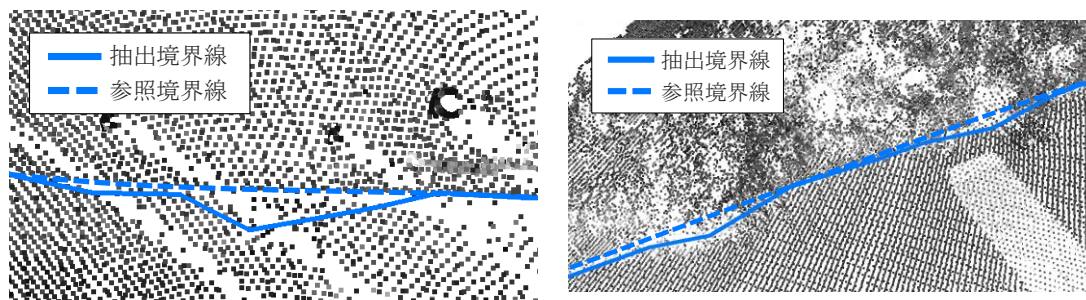


図 2.32 複数バッファ幅による完全性と合計ギャップ長



(a) データ B 交差点部

(b) データ C 縁石遮蔽部

図 2.33 ギャップ箇所の例

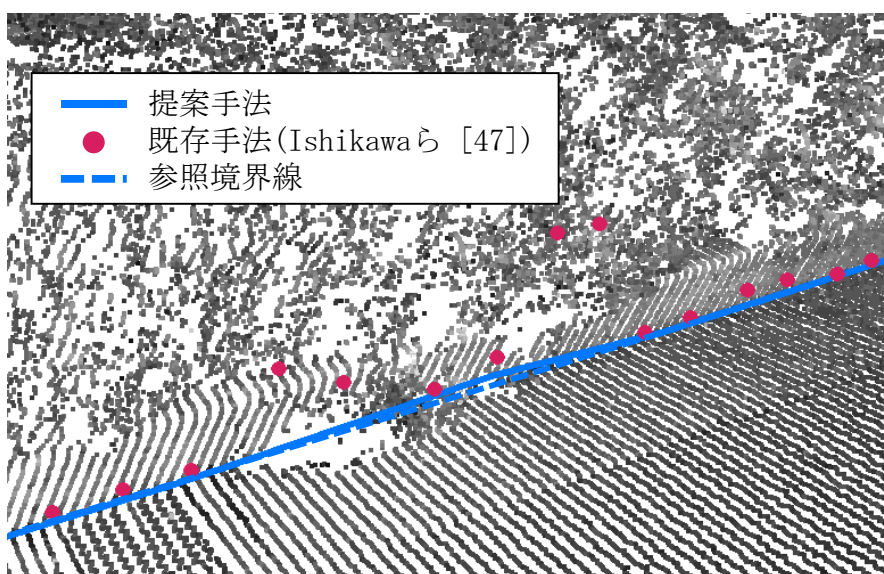


図 2.34 既存手法との比較

バッファ幅を 50mm とした場合にギャップと判定された箇所の一部を図 2.33 に示す。図 2.33 (a)はデータ B の交差点部であり、縁石が存在していない箇所である。この箇所におけるギャップは、車道境界で段差がほとんどなく、周辺の舗装面において凹凸が存在していることが原因であると考えられる。図 2.33 (b)はデータ C の縁石部であり、植栽によって縁石が約 1m 遮蔽されている。この箇所におけるギャップは、車道境界点の追跡時に設定した点群探索半径（図 2.16）内に車道境界部の計測点が存在していないことが原因と考えられる。

既往研究では、Gézero ら[47]はバッファ幅を 50mm として 95.8%を達成し、Kumar ら[65]はバッファ幅を 100mm として 70.0%を達成している。正確な比較には同じ検証サイトで各手法を適用する必要があるが、上記既往研究の結果は交差点部を含んでいない直線区間での評価であることに対し、本手法は交差点を含む検証サイトにおいてバ

ツファ幅を 50mm として全体で 94.5~99.5%の完全性を達成しており、他の手法と比較しても同等以上の性能を有しているといえる。また、データ B の植栽によって遮蔽された縁石部において Ishikawa ら[46]の手法を適用した結果を図 2.34 に示す。Ishikawa らの手法は低密度点群を対象とした手法であるため、低密度化した点群を対象に車道境界点を抽出した。Ishikawa らの手法では縁石の遮蔽による縁石部の欠損や植栽の影響を受けている一方で、本手法はそれらの影響を受けずに車道境界線を正確に抽出できていることが分かる。

実証実験に使用した計算機の仕様は表 2.6 に示すとおりであり、各データの処理時間は表 2.7 に示すとおり、実用上十分な結果となった。なお、開発環境は Microsoft Visual Studio 2012 Professional SP2 であり、開発言語は C++を用いた。

表 2.6 計算機の仕様

項目	仕様
OS	Microsoft Windows 10 Pro
CPU	Intel® Core™ i7-7700K 4.2GHz
RAM	32GB

表 2.7 実証実験における処理時間

項目	データA	データB	データC
計測距離	約600m	約600m	約600m
点数	約1,800万点	約5,700万点	約1,700万点
処理時間	61.9秒	103.5秒	49.1秒

2.3 まとめ

本章ではスキャンラインの湾曲度評価に基づく MMS 点群からの車道境界線の抽出手法を提案した。提案手法では、計測ノイズや車道境界周辺の植栽や雑草の影響を受けにくくするため、不均一点群の除外とスキャンラインのスモーキングを行った。さらに、スキャンラインから算出した各点の湾曲度に基づいて縁石点と考えられるシード点を抽出し、シード点から湾曲度と道路境界線の滑らかさに基づいて点を追跡することにより車道境界線を抽出した。提案手法を MMS 点群に適用したところ、段差の小さい歩道切り下げ部や交差点部などにおいても車道境界線を抽出できることを確認

した。定量評価を行った結果、全体で 92.9~99.5%の品質と 10.5~19.6mm の精度を達成した。また、提案手法は MMS のシステムの違いや道路構造の差異に対して頑健に動作していた。

提案手法で抽出した車道境界線ポリラインを地図データとするには、取得されなかった車道境界の遮蔽部を補間したり、異なる MMS 点群から取得した交差する道路などの車道境界線ポリラインと統合する必要がある。よって、複数の車道境界線ポリラインを統合する手法の開発が今後の課題である。また、高精度道路地図のうち例えばダイナミックマップにおいては、車道境界線（路肩縁）は車道外へのアクセス可否を属性として有する仕様となっている。本論文で抽出した車道境界線を実用的なデータとして活用するためには、縁石や歩道の切り下げを自動判定し、車道境界線ポリラインに車道外へのアクセス可否を属性として付与することが望ましい。さらに、自動運転では、工事等によって変化する車道境界に対応して車道境界線ポリラインを効率良く更新していくことが不可欠である。よって、車道境界線ポリラインを生成した区間において、車道境界線を抽出し、変化を自動抽出すると共に、車道境界線ポリラインを更新する手法を確立する必要がある。

第2章の内容は、写真測量とリモートセンシングの 60 巻 2 号に掲載された「スキャンラインの湾曲度評価に基づく MMS 取得点群からの車道境界線抽出」の内容を引用している。

第3章 MMS 点群からの道路面における領域・線状型損傷のベクトルデータ抽出

3.1 提案する領域・線状型損傷抽出手法

3.1.1 提案手法の概要

本研究では, MMS によって取得した点群と走行軌跡とを入力として, わだち掘れやポットホール, 寄り等の領域型損傷をポリゴン, ひび割れや舗装の継ぎ目等の線状型損傷をポリラインとして出力する手法を提案する.

本研究で扱う MMS 点群は $P = \{P_i = (\mathbf{p}_i, t_i, I_i) | \mathbf{p}_i = (x_i^p, y_i^p, z_i^p), i = 1, \dots, n, t_i < t_{i+1}\}$ として示される. 取得時刻 t_i における点 P_i は, 平面直角座標と標高で示された点群の座標 (x_i^p, y_i^p, z_i^p) と反射強度 I_i からなる. 走行軌跡は $Q = \{Q_j = (\mathbf{q}_j, \mathbf{c}_j, t_j) | j = 1, \dots, s, t_j < t_{j+1}\}$ として表し, \mathbf{q}_j は, 取得時刻 t_j における平面直角座標と標高で示された MMS の座標, \mathbf{c}_j は車両の姿勢を表す各座標軸に対応する角度である.

提案手法の概要を図 3.1 に示す. 提案手法では, 損傷のない舗装面である正常舗装面をスキャンラインごとに推定し, 正常舗装面と各点の高さの差分である変状変位置量から領域型と線状型損傷を抽出する. なお, レーザスキャナは車両の進行方向に対して一定角度で傾けて設置されているものとし[64], 走行軌跡の真上で点群 P を分割し取得時刻の順番によって並べられた点列を, レーザスキャナのスキャン 1 周分の点列であるスキャンラインと定義する. 提案手法ではまず, スキャンラインごとに各点の非損傷度を考慮した曲線フィッティングにより領域型と線状型損傷の正常舗装面をそれぞれ推定し, 変状変位置量を算出する (図 3.1 (a)). 次に領域型損傷の正常舗装面から算出した変状変位置量を用いて領域型損傷のポリゴン生成と種別判定を行う (図 3.1 (b)). 最後に線状型損傷の正常舗装面から算出した変状変位置量を用いて線状型損傷のポリラインを生成する (図 3.1 (c)). 領域型損傷と線状型損傷の抽出は点群に対する処理とする. 各処理の詳細を次節以降にて述べる.

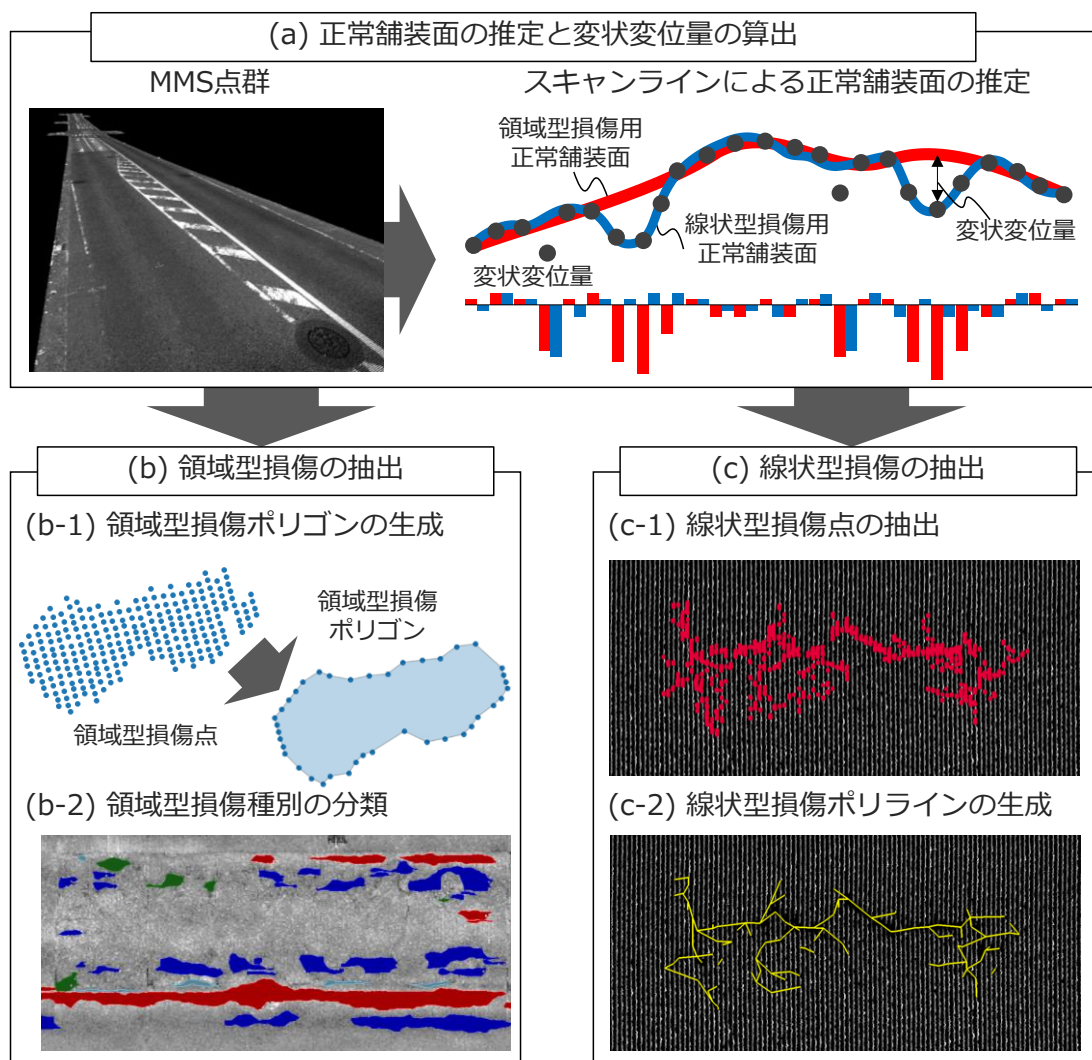


図 3.1 道路面損傷抽出手法の概要

3.1.2 正常舗装面推定と変状変位置算出

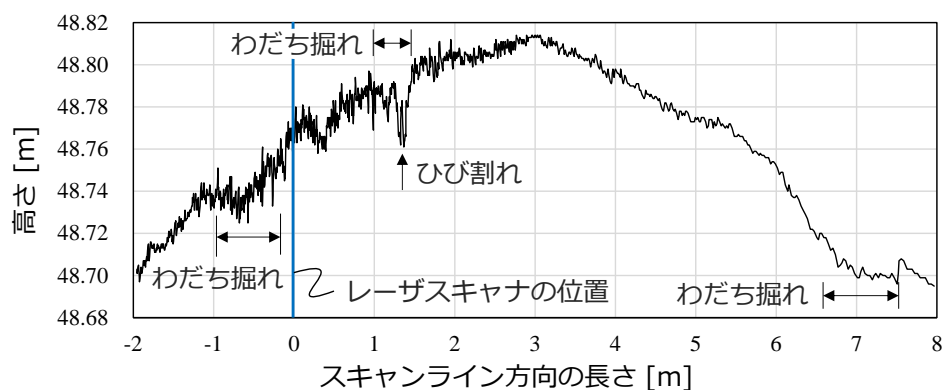
3.1.2.1 概要

各点の正常舗装面は滑らかな曲面で表現できると仮定し、本研究では、スキャンラインに対応する正常舗装面の断面を区分的にフィットした3次曲線の系列を用いて表すものとする。損傷の影響を受けずに正常舗装面を推定するために、湾曲度または後述する非損傷度を重みとした3次曲線フィッティングを試行する。広範囲に変状が存在する領域型損傷と局所に變状が存在する線状型損傷の変状変位置を抽出するために、定義域の異なる曲線のフィットを行い、領域型と線状型損傷の正常舗装面をそれぞれ推定する。

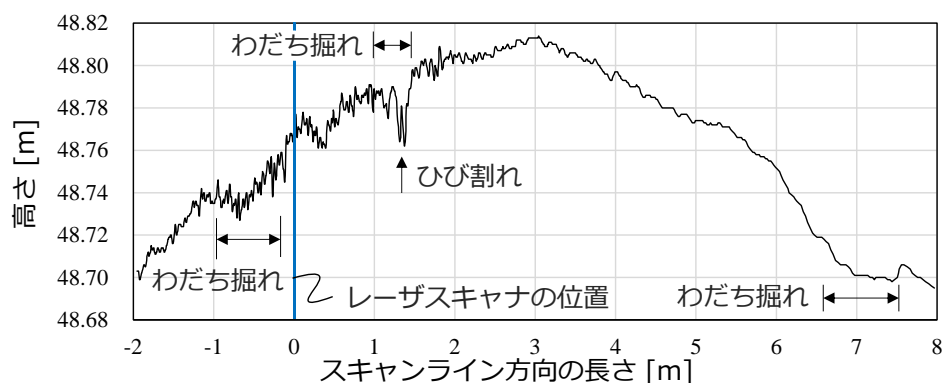
本手法では、まず、計測ノイズを除去するため、スキャンラインに対して平滑化フィルタを適用する。次にスキャンラインの湾曲度に基づき各点の非損傷度を求める。そして、非損傷度を重みとした区分的3次曲線のフィッティングにより正常舗装面を推定する。最後に、各点から正常舗装面までの高さの差分を変状変位置量として算出する。なお、フィルタリングと曲線フィッティング、ならびに変状変位置量の算出は、2.1.2 項にて述べた MMS の進行方向に垂直な平面に投影したスキャンラインを用いて行う。点 i の投影後の座標値は $\hat{p}_i = (\hat{x}_i, \hat{z}_i)$ と表す。

3.1.2.2 平滑化フィルタ

計測ノイズの影響を低減するため、各スキャンラインに対して正と負のスケールファクタを入れ替えながらガウス平滑化ステップを繰り返す Taubin Smoothing[60]を適用する。スムージング回数は実験的に 50 回とした。平滑化により、図 3.2 に示す通り、ひび割れ等の損傷形状を維持しながら、計測ノイズを低減できることを確認した。



(a) 元のスキャンライン



(b) スムージング 50 回適用結果

図 3.2 スキャンラインの平滑化

3.1.2.3 非損傷度の算出

損傷の影響を受けずに正常舗装面を推定するために、スキャンラインの湾曲度に基づいた非損傷度を提案する。湾曲度は、図 2.6 に示すように、着目点とその前後の近傍点から算出される局所的な勾配変化であり、道路勾配に影響を受けず、近傍点を選択する際の距離（近傍距離）によって変わる。図 3.3 は損傷部を含む仮想のスキャンラインと、スキャンライン上の特定箇所での近傍距離を変化させた場合の湾曲度分布である。湾曲度の値は、損傷のない箇所においてスケールによらず大きくなり、損傷部では特定のスケールにおいて小さくなる。損傷の最深部である P1 では、損傷の幅と近傍距離が一致した場合に、湾曲度の値が最も小さくなる。P2 と P3 の湾曲度は P1 よりも大きくなる傾向にあり、P4 では、P2 と P3 より湾曲度が小さくなる場合がある。また、損傷から一定距離離れた P5 においても近傍距離の取り方によっては湾曲度の値が小さくなる。

上記のとおり、損傷部の湾曲度は、近傍距離を一定の範囲で変化させた場合に、特定の近傍距離で一定値以下になることから、この傾向を利用した損傷程度を表す指標として非損傷度を提案する。各点 i の非損傷度 ω_i は、式 (3.1) に示すマルチスケールで湾曲度が一定値 τ_ρ 以下である割合と定義する。

$$\omega_i = \frac{\sum_{r \in R} B_i(r)}{|R|} \quad (3.1)$$

ここで、式 (3.1) 中の $B_i(r)$ は式 (3.2) (3.3) で定義される。

$$B_i(r) = \begin{cases} 1 & \text{if } \rho_i^r \leq \tau_\rho \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\rho_i^r = 180 - \angle \hat{\mathbf{p}}_r^s \hat{\mathbf{p}}_i \hat{\mathbf{p}}_r^e \quad (3.3)$$

ここで R は近傍点選択距離の集合、近傍点 $\hat{\mathbf{p}}_r^s$ および $\hat{\mathbf{p}}_r^e$ は、点 $\hat{\mathbf{p}}_i$ から一定距離 r 内のスキャンラインに沿った手前方向、奥方向の最遠点とする。 $\angle \hat{\mathbf{p}}_r^s \hat{\mathbf{p}}_i \hat{\mathbf{p}}_r^e$ は 3 点からなる角度のうち、小さい方の角度の絶対値とする。非損傷度 ω_i は損傷のない平坦部において 1 に近い値となり、損傷部およびその周辺においては小さい値となる。

$R = \{10n \text{ [mm]} | n = 1, \dots, 50\}$, $\tau_\rho = 177 \text{ deg}$ として、損傷部を含む仮想のスキャンラインに対して非損傷度を算出した結果を図 3.4 に示す。非損傷度は損傷部の中心において 0 となっており、損傷部から離れるにつれて非損傷度は 1 に近づいている。以降の処理においては、 $R = \{10n \text{ [mm]} | n = 1, \dots, 50\}$, $\tau_\rho = 177 \text{ deg}$ を採用した。

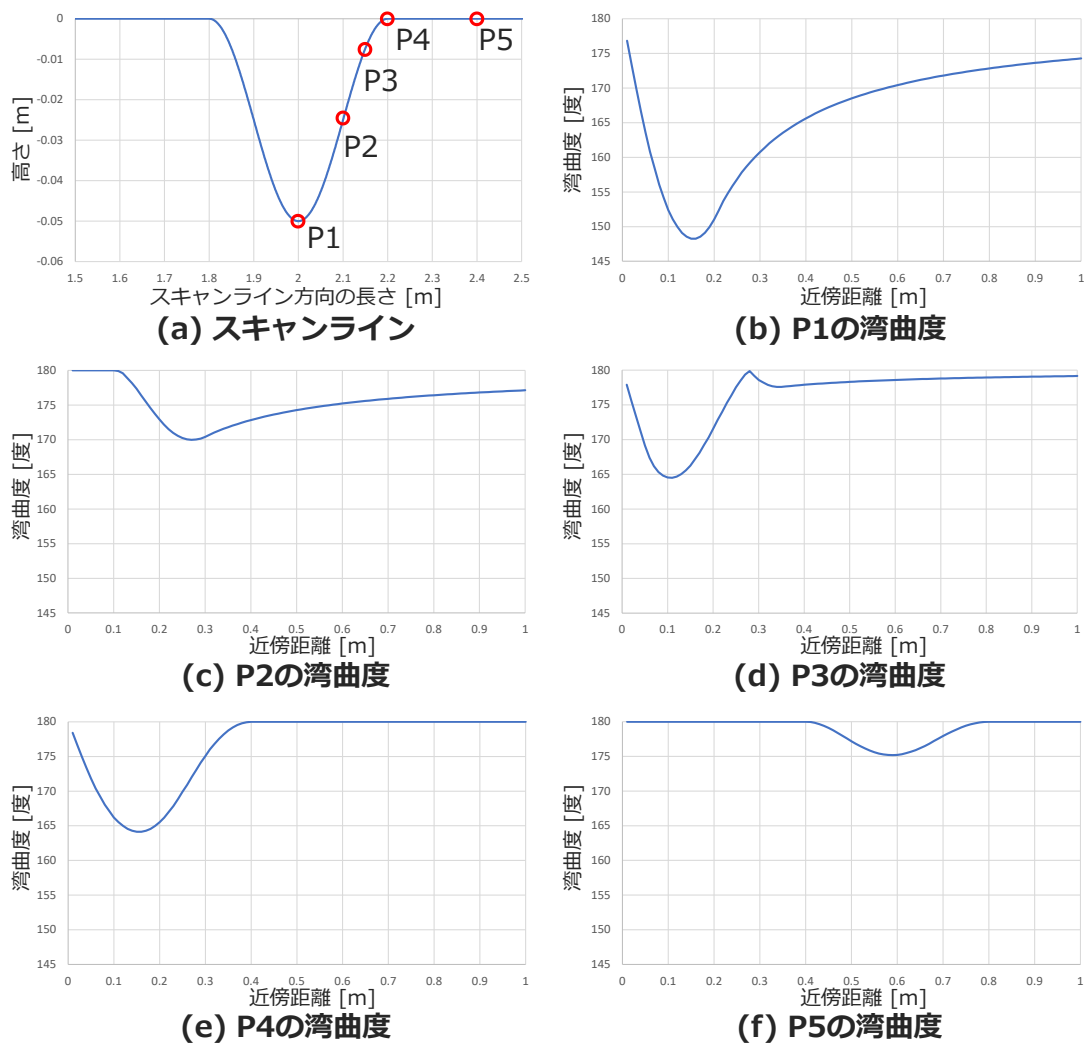


図 3.3 損傷近傍箇所の湾曲度分布

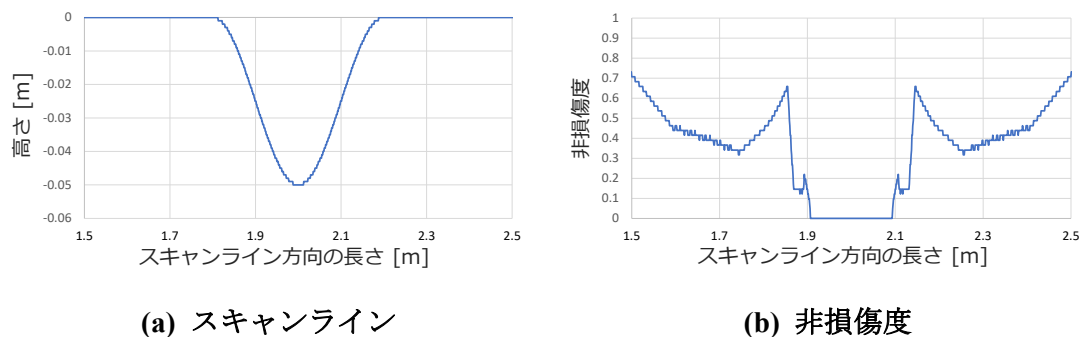


図 3.4 損傷近傍箇所の非損傷度

3.1.2.4 正常舗装面推定と変状変位置算出

正常舗装面は滑らかな曲面で表現できると仮定し、スキャンラインの一定区間ごとに3次曲線をフィットさせていき、フィット曲線を正常舗装面とする。本手法においては、フィット区間を変えるだけで、スケールの異なる領域型と線状型損傷を抽出できるようにする。図 3.5 に示すように、領域型損傷と線状型損傷それぞれにおいて異なる $3d$ の範囲によって3次曲線をフィットし、判定区間 d のフィット曲線を正常舗装面として採用する。さらに判定区間 d 内の各点 i において正常舗装面からの変状変位置量 Δz_i を算出する。以上の処理を d ずつ曲線のフィット範囲をシフトしながら実施する。3次曲線のフィットは式 (3.4) によって行う。

$$\min \sum_{i \in S} \psi_i |f(\hat{x}_i) - \hat{z}_i|^2 \quad (3.4)$$

ここで、 S は $3d$ 内の点集合、 ψ_i は点 i の重み、 $f(x)$ は x の3次多項式曲線である。重み ψ_i は、 $\psi_i = 1$ とする場合、 $\psi_i = \omega_i$ とする場合、湾曲度 ρ_i^r から式 (3.5) によって算出した値 v_i^r を使用する場合を試行する。

$$v_i^r = 1.0 - \frac{1.0}{1.0 + e^{-\rho_i^r + 10}} \quad (3.5)$$

式 (3.5) は湾曲度が0度の場合に v_i^r が1に近い値となり、20度の場合に v_i^r が0に近い値となるロジスティック曲線である。判定区間 d 内の各点 i の変状変位置量 Δz_i は式 (3.6) によって算出する。

$$\Delta z_i = \hat{z}_i - f(\hat{x}_i) \quad (3.6)$$

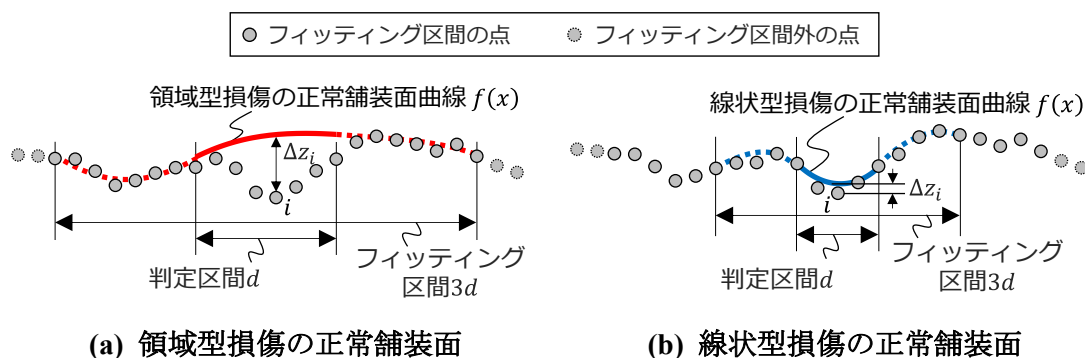


図 3.5 正常舗装面

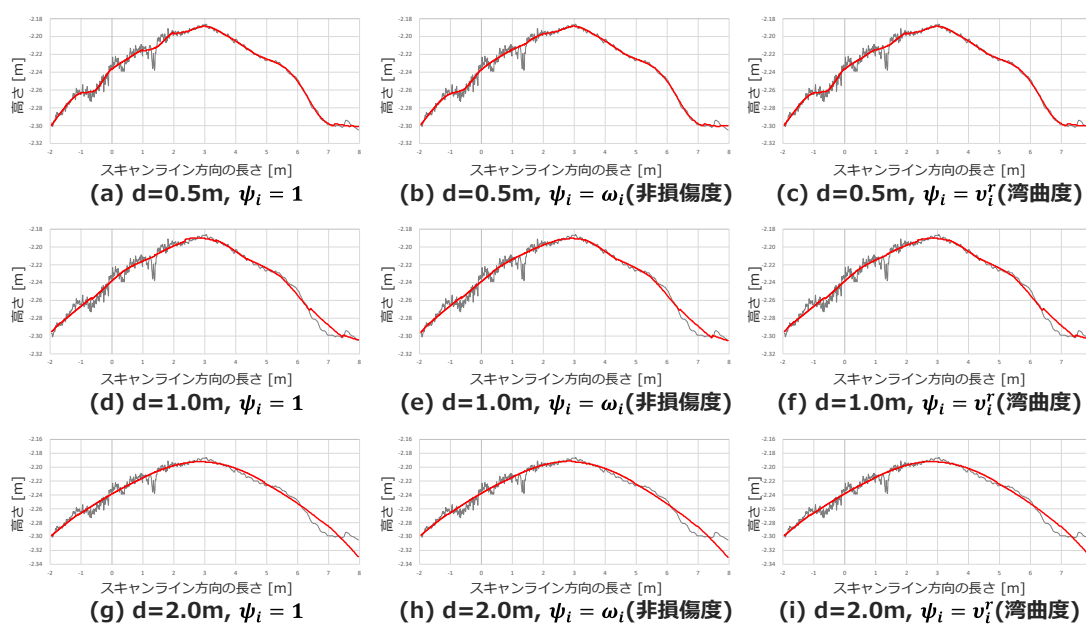


図 3.6 領域型損傷の正常舗装面推定結果

図 3.6 に実際の MMS 点群のスキャンラインに対して適用した領域型損傷の正常舗装面の推定結果を示す。ここでは、3 種類の重みに対して判定区間 $d = 0.5m$, $d = 1.0m$, $d = 2.0m$ としたパターンを試行した。また、湾曲度の一定距離 r は $0.3m$ とした。重みとして非損傷度を使用 ($\psi_i = \omega_i$) した場合は、 $\psi_i = 1$ とした場合よりも領域型損傷と考えられる箇所に影響を受けずに正常舗装面を推定している。また、重みとして非損傷度と湾曲度を使用した場合を比較すると、ほとんど同様の傾向となっている。判定区間 d は $0.5m$ では領域型損傷と考えられる箇所の影響を受けやすく、 $2.0m$ では正常舗装面の形状を再現しにくい傾向となった。

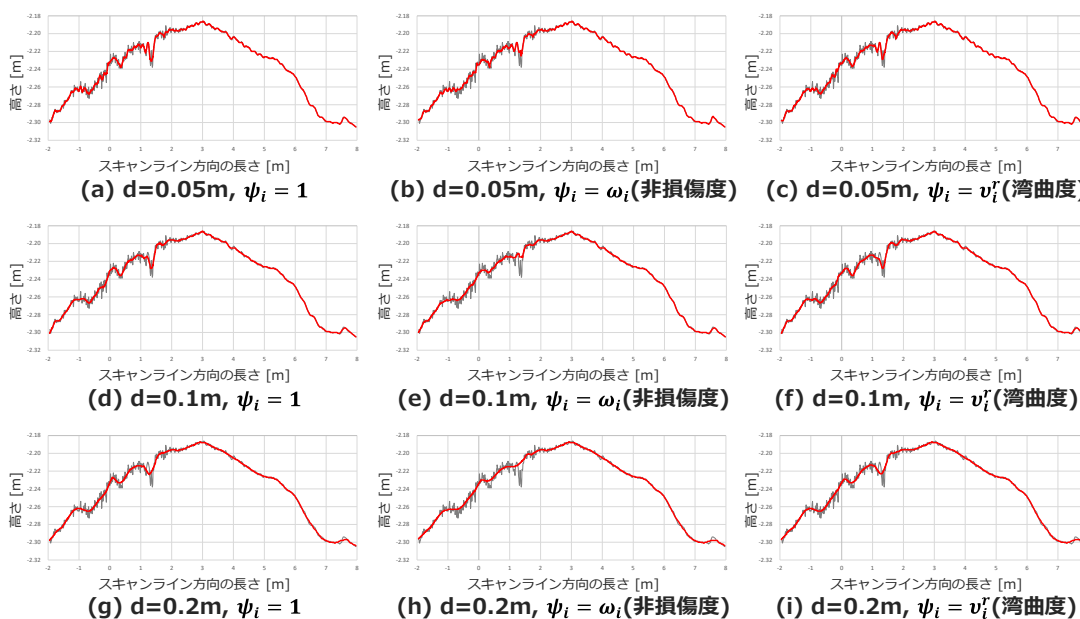


図 3.7 線状型損傷の正常舗装面推定結果

図 3.7 に実際の MMS 点群のスキャンラインに対して適用した線状型損傷の正常舗装面の推定結果を示す。ここでは、3 種類の重みに対して判定区間 $d = 0.05m$, $d = 0.1m$, $d = 0.2m$ としたパターンを試行した。また、湾曲度の一定距離 r は $0.05m$ とした。重み $\psi_i = 1$ とした場合は、線状型損傷と考えられる箇所の影響を受けている一方、重みとして非損傷度を使用した場合は、影響を受けずに正常舗装面を推定している。また、重みとして非損傷度と湾曲度を使用した場合を比較すると、非損傷度を使用した方が、線状型損傷と考えられる箇所の影響を受けにくい傾向にある。判定区間 d は $0.05m$ では線状型損傷と考えられる箇所の影響を受けやすく、 $0.2m$ では正常舗装面の形状を単純化しすぎる傾向となった。

以上の実験の結果から、領域型損傷と線状型損傷の正常舗装面推定においては、重みとして非損傷度を使用し、判定区間はそれぞれ $d = 1.0m$, $d = 0.1m$ とした。

3.1.3 領域型損傷の抽出

3.1.3.1 概要

領域型損傷は損傷種別と損傷の程度を表す指標を属性として持つポリゴンとして出力する。領域型損傷の抽出方法を図 3.8 に示す。はじめに、領域型損傷の正常舗装面から算出した変状変位量の閾値処理によって損傷候補点を抽出する。次に孤立した損傷候補点の削除や、損傷候補点集合内の小さい穴の補填のために、損傷候補点集合に対してモルフォロジー演算を行う。そして、得られた損傷点集合をクラスタリングし、各クラスタの外形ポリゴンを取得する。最後に外形ポリゴンを損傷種別によって分類すると共に損傷の程度を表す指標を外形ポリゴンの属性として付与する。

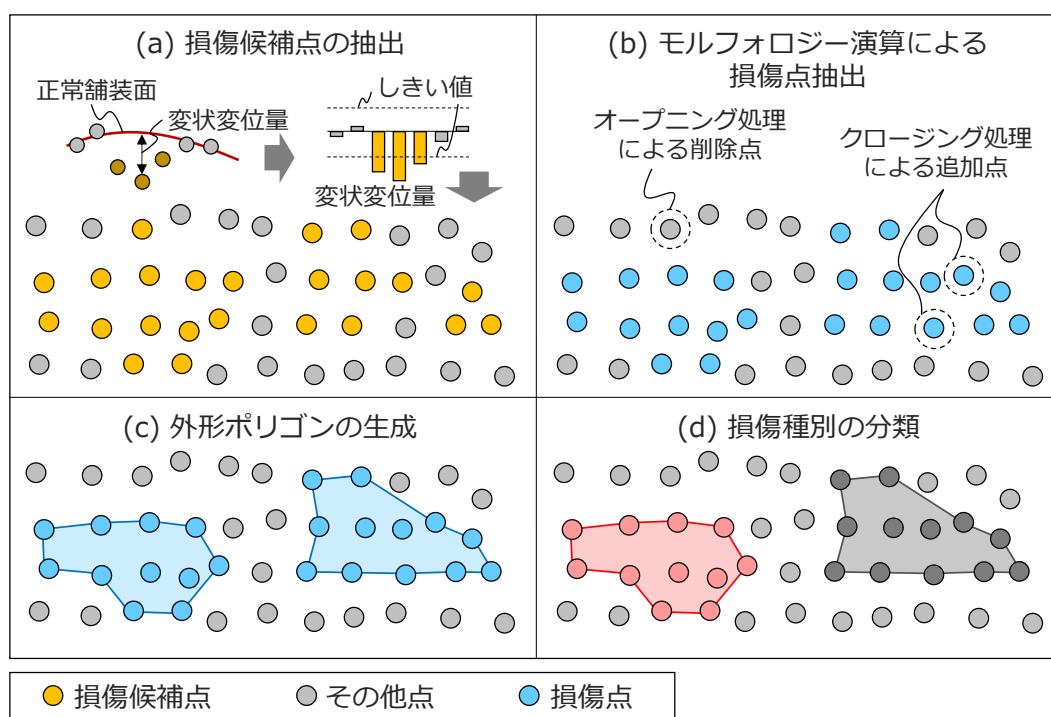


図 3.8 領域型損傷の抽出方法

3.1.3.2 領域型損傷の領域抽出とポリゴン表現

領域型損傷には、図 3.9 に示すように、変状変位量が負の値となるわだち掘れやポットホール等の凹形状の損傷と、変状変位量が正の値となる寄り等の凸形状の損傷が存在する。それぞれの損傷を抽出するため、変状変位量が閾値 τ_b 以下または τ_u 以上の点を損傷候補点として取得する。本手法では $\tau_b = -5mm$ 、 $\tau_u = 5mm$ とした。

次に、孤立した損傷候補点を削除するために損傷候補点集合に対してモルフォロジーのオープニング演算を行う（図 3.10(b)）。さらに損傷候補点集合内の小さい穴を補填するためにクロージング演算を行い、損傷点集合を得る（図 3.10(c)）。続いて、領域成長法により損傷点集合をクラスタリングし、損傷領域ごとの点集合を得る。これらの処理は、点群の密度差と MMS 走行時の速度に起因するスキャンラインの間隔の変化に対応するため、Zhong ら[57]と同様に、Time Grid 空間において実施する。Time Grid 空間は、図 3.11 に示すように、スキャンライン番号とスキャンライン上の何番目の点であるかを示す番号からなる空間である。また、凹形状と凸形状の損傷候補点集合に対して別々に行う。モルフォロジー演算におけるカーネルサイズは 3×3 、収縮および膨張はそれぞれ 1 回ずつとした。また、領域成長法における近傍点探索範囲は隣接点のみとした。

最後に、各損傷クラスタに対して凸包の一般化手法である Alpha Shape[67]を適用し、損傷領域ポリゴンを作成する。本手法において閉円板の半径は実験的に $0.1m$ とした。

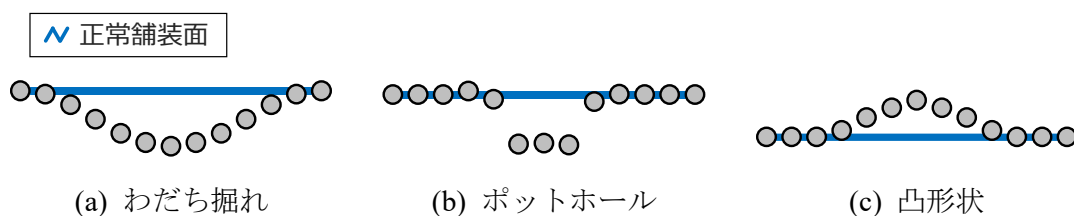


図 3.9 領域型損傷の点群分布

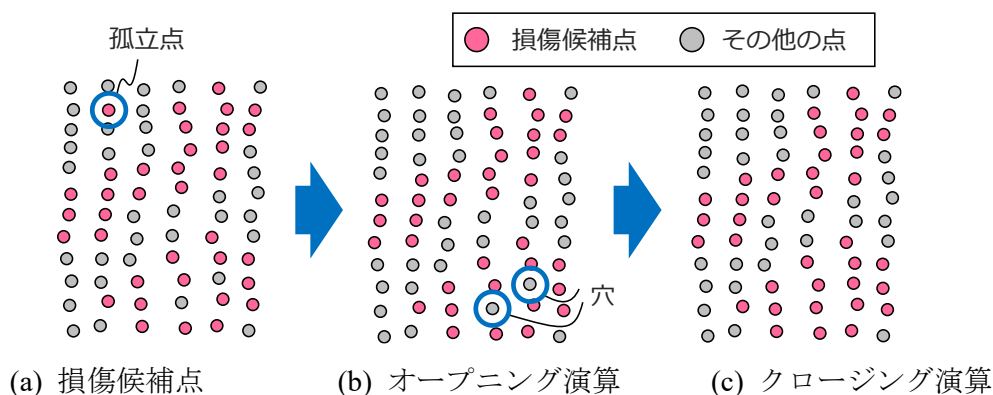


図 3.10 モルフォロジーによる孤立点の削除と穴の補填

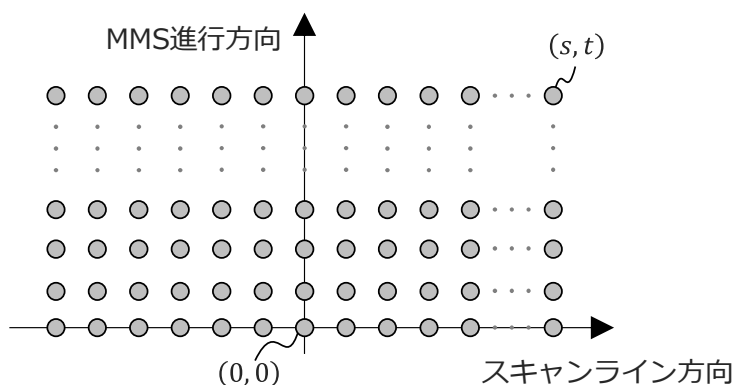


図 3.11 TimeGrid 空間

3.1.3.3 領域型損傷種別の判定

抽出した各領域型損傷 j の種別判定には、国際的に普及している舗装状態指数調査基準である ASTM D6433[68]などで利用されている最大変状変位量 m_j の他、変状変位量の中央値 d_j 、面積 a_j 、面積周長比 r_j を用いる。ポットホールは外形線が円形状に近く、平均して一定の深さを持つ傾向にあることから面積周長比と変状変位量の中央値を導入している。さらに、わだち掘れは発生要因から車線中心線から一定距離の範囲に存在しているため、車線中心線からの距離 l_j （領域の重心点と車線中心線との最短距離）も種別判定に用いる。本手法では閾値処理により領域型損傷種別を判定するものとし、閾値は実験的に決定することとした。閾値処理の判定基準を表 3.1 に示す。なお、凹形状の損傷の判定はポットホール、わだち掘れ、その他凹形状の順番に行う。また、本実装では車線中心線は手動にて作成した。

最終的に各領域型損傷 j のポリゴンに損傷種別と算出した指標の組 $(m_j, d_j, a_j, r_j, l_j)$ を属性として付与して出力する。

表 3.1 領域型損傷種別の判定基準

損傷種別	最大/最小 変状変位量 m	変状変位量 中央値 d	面積 a	周長面積比 r	車線中心線 からの距離 l
わだち掘れ	≤ -5 mm	-	-	-	≥ 0.2 m ≤ 1.2 m
ポットホール	≤ -13 mm	≤ -9 mm	≥ 0.008 m ² ≤ 0.44 m ²	≤ 25.0 %	-
その他凹形状	≤ -5 mm	-	-	-	-
凸形状	≥ 5 mm	-	-	-	-

3.1.4 線状型損傷の抽出

3.1.4.1 概要

線状型損傷は、損傷の深さ情報を有する、分岐を持つポリラインとして出力する。本手法では、まず、舗装面の粗さに依存せずに線状型損傷を抽出するため、線状型損傷の正常舗装面から算出した変状変位量に適応的しきい値処理[69]を適用することにより損傷候補点集合を取得する（図 3.12 (a)）。次に、孤立した損傷候補点を削除し（図 3.12 (b)）、領域成長法により損傷候補点集合をクラスタリングする（図 3.12 (c)）。そして、Random Forest[56]によって線状型損傷クラスタを抽出する（図 3.12 (d)）。最後に、線状型損傷クラスタの代表点を用いて作成した Delaunay 三角形分割から最小スパニングツリーを構築することにより線状型損傷ポリラインを作成する（図 3.12 (e)）。

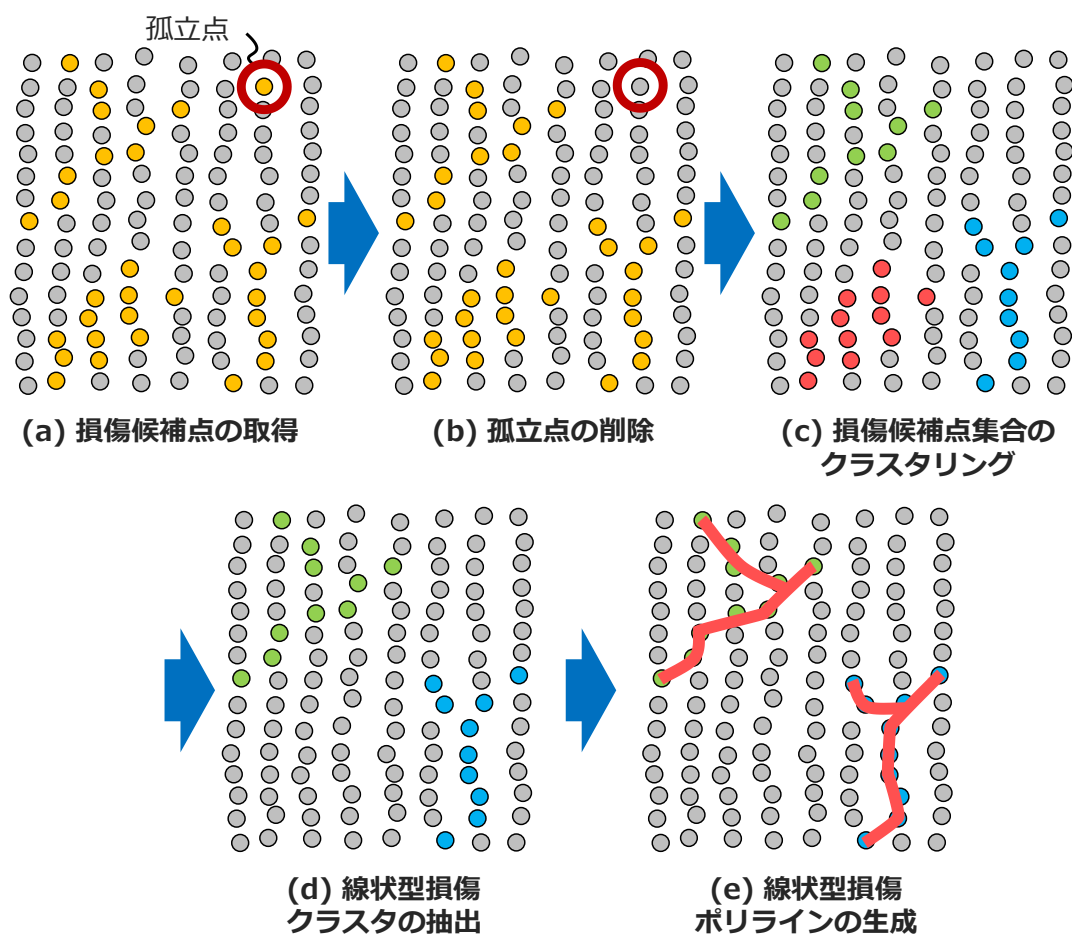


図 3.12 線状型損傷の抽出

3.1.4.2 線状型損傷候補点の抽出

道路舗装面においては、アスファルト舗装表層の微細な剥離といった線状型損傷以外の微細な凹凸が存在する。そのため、変状変位量に対する閾値処理によって線状型損傷を抽出する場合は、道路舗装面の状態に応じた閾値設定が必要になる。そこで、本手法では、Time Grid 空間における変状変位量の中央値に基づく適応的しきい値処理を用いた、式 (3.7) の条件を満たす点を損傷候補点として抽出する。

$$d_{st} < G(s, t) - c \quad (3.7)$$

ここで、 d_{st} は Time Grid 空間の座標 (s, t) における変状変位置量、 $G(s, t)$ は座標 (s, t) の近傍範囲における変状変位置量の中央値、 c は調整変数である。実験的に近傍範囲は 20×20 とし、調整変数 c は $5mm$ とした。

次に孤立した損傷候補点を除去するため、図 3.13 に示すように、着目点 i から近傍点までの距離に基づくフィルタリングを行う。具体的には式 (3.8) の条件を満たす点 i を孤立点として除去する。

$$\frac{\sum_{j \in i^*} L_i^j}{|i^*|} > \tau_k \quad (3.8)$$

ここで、 i^* は着目点 i の近傍点の集合、 L_i^j は着目点 i から点 j までの水平方向の距離、 τ_k は距離判定しきい値である。本手法においては、実験的に $i^* = 10$ 、 $\tau_k = 50mm$ とした。

3.1.4.3 線状型損傷クラスタの検出

図 3.14 に示すように損傷候補点を領域成長法によりクラスタリングし、得られた損傷候補クラスタを構成する点集合から水平面上の Oriented Bounding Box (OBB) を作成する。OBB の長辺が閾値 τ_l より短い場合、または OBB の面積が閾値 τ_a より大きい場合は線状型損傷以外であると判断し、その損傷候補クラスタを削除する。本手法においては、実験的に領域成長法の近傍探索範囲は $60mm$ とし、 $\tau_l = 0.2m$ 、 $\tau_a = 5m^2$ とした。

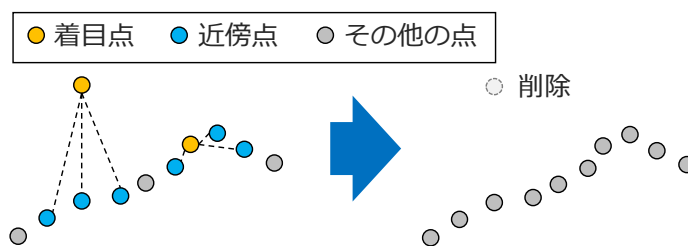


図 3.13 孤立した損傷候補点の除去

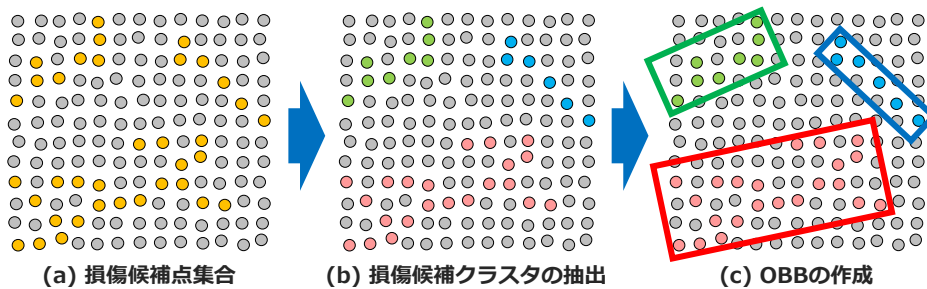


図 3.14 線状型損傷クラスタの検出

損傷候補クラスタの中には、抽出対象とする線状型損傷以外にマンホール部や集水柵部等が含まれる場合がある。本研究では、この損傷候補クラスタから線状型損傷クラスタの検出に機械学習分類法の1つである Random Forest を用いる。説明変数は表 3.2 に示す 21 個の指標を使用する。面積は OBB の面積であり、アスペクト比は図 3.15 に示すように OBB の短辺を長辺にて除算した値とする。損傷候補点占有率は、図 3.16 に示すように、OBB を 25mm 及び 50mm のグリッドに分割し、損傷候補点を 1 点以上含むセルの割合である。変位変位量及び反射強度に関する指標は、OBB 内の損傷候補点集合から算出した値である。非損傷度による点の割合は、図 3.17 に示すように、OBB 内の損傷候補点集合における非損傷度が 25%未満, 25%以上 50%未満, 50%以上 75%未満, 75%以上の点の割合である。平均 Linearity d_L , 平均 Omnivariance d_O , 平均 Eigenentropy d_E は、着目点とその近傍点に対する主成分分析によって算出される固有値に基づく特徴量であり、式 (3.9)~(3.11) によって与えられる[70].

$$d_L = \frac{\sum_{i \in R} \frac{\lambda_i^f - \lambda_i^s}{\lambda_i^f}}{|R|} \quad (3.9)$$

$$d_O = \frac{\sum_{i \in R} \sqrt{\lambda_i^f \cdot \lambda_i^s}}{|R|} \quad (3.10)$$

$$d_E = \frac{-\sum_{i \in R} \lambda_i^f \lambda_i^s \cdot \ln(\lambda_i^f \lambda_i^s)}{|R|} \quad (3.11)$$

ここで、 λ_i^f は点 i の第 1 主成分の固有値、 λ_i^s は点 i の第 2 主成分の固有値、 R は OBB 内の損傷候補点集合である。各点の固有値は、着目点から 0.1m に含まれる点集合に対して 2 次元の主成分分析を適用することで算出した。

目的変数は線状型損傷クラスタと非線状型損傷クラスタの 2 値とした。

ここまでに得られた線状型損傷クラスタは、過分割となる傾向が見られた。そこで、線状型損傷クラスタの構成点に対し、より大きな近傍探索範囲 τ_r を用いた領域成長法を適用し、最終的な線状損傷クラスタを得る。本手法においては、 $\tau_r = 300\text{mm}$ とした。

表 3.2 Random Forest における説明変数

指標	単位
OBB面積	m ²
アスペクト比	-
25mm解像度損傷候補点占有率	%
50mm解像度損傷候補点占有率	%
変状変位量の平均値	m
変状変位量の中央値	m
変状変位量の標準偏差	m
変状変位量の第1四分位数	m
変状変位量の第3四分位数	m
反射強度の平均値	-
反射強度の中央値	-
非損傷度の平均値	-
非損傷度の中央値	-
非損傷度の標準偏差	-
非損傷度が0%-25%の点の割合	%
非損傷度が25%-50%の点の割合	%
非損傷度が50%-75%の点の割合	%
非損傷度が75%-100%の点の割合	%
平均Linearity	-
平均Omnivariance	-
平均Eigenentropy	-

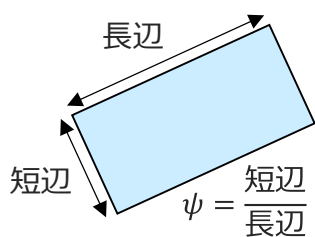


図 3.15 アスペクト比

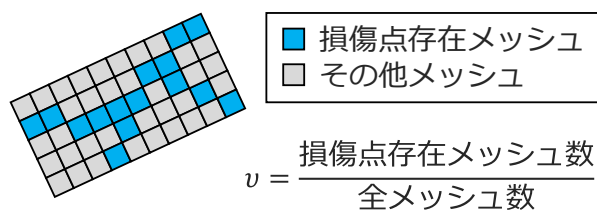


図 3.16 損傷候補点占有率

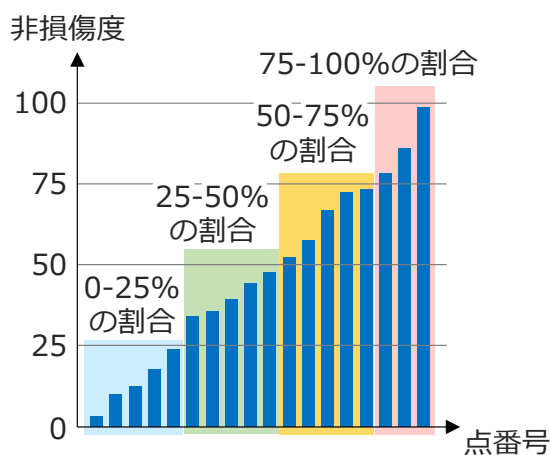


図 3.17 非損傷度の分布割合

3.1.4.4 線状型損傷のポリライン表現

本研究では、線状型損傷の端点が正確に表現され、局所的な最深点を頂点として用い、かつ表現の簡素化のため一定の長さ以上の線分で構成された線状型損傷のポリラインを生成する。提案法は、図 3.18 に示すとおり、線状型損傷クラスタの構成点から代表点を抽出し、その点を接続してポリラインを生成する。

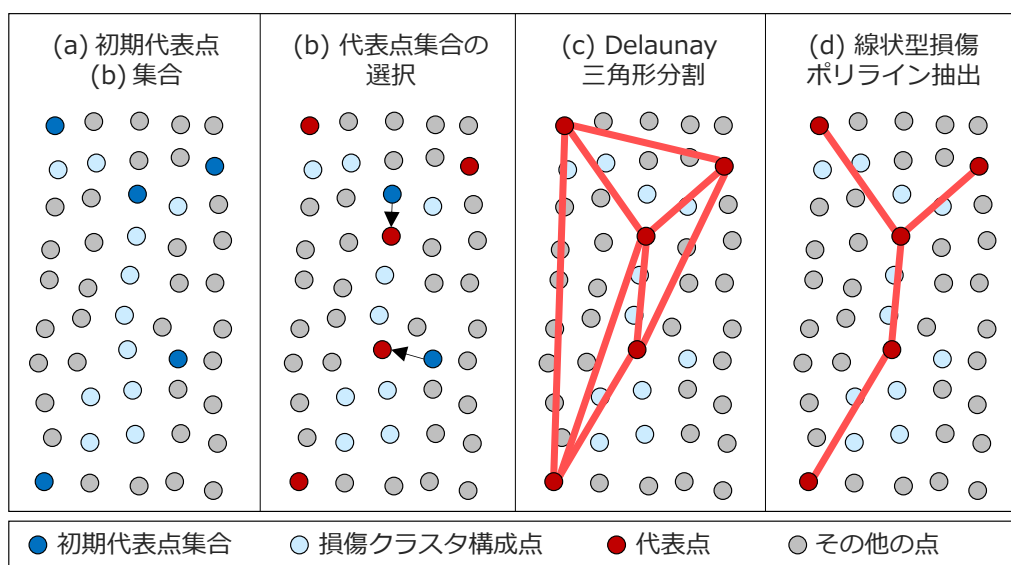


図 3.18 線状型損傷ポリラインの生成

はじめに, Farthest Point Sampling (FPS) [71]を行い, 線状型損傷クラスタの構成点から一定距離 τ_f 以上の点間隔をもつ初期代表点集合を抽出する. FPS は点分布が空間的に一様になるように点集合を選択する手法であり, 図 3.19 に示すように, まず, 最小 X 座標を持つ点を初期代表点 p_0 として選択する. 次に, 点 p_0 から各点までの距離を算出し記録すると共に, 最遠点の距離がしきい値 τ_b 以上である場合, その点を初期代表点として選択する. 続いて, 選択した点から初期代表点以外の他の点までの距離をそれぞれ算出し, 距離が記録された距離よりも短い場合は距離を更新する. そして, 最も長い距離がしきい値 τ_b 以上であれば, その点を初期代表点として選択する. 以上の処理を, 距離のしきい値を満たす点が存在しなくなるまで繰り返す.

初期代表点を局所的に最も深い位置の点とするため, 各初期代表点をその一定距離 r_p 内の変状変位量が最小の点に置き換える. ただし, 損傷端部の初期代表点を保存するため, 図 3.20 に示すように, 式 (3.12) の値 e_k が $\pi/2$ 以下の場合には置き換えずに代表点とする.

$$e_k = \max_{(i,j) \in N_k} (\angle p'_i p'_k p'_j) \quad (3.12)$$

ここで, N_k は代表点 k の距離 τ_n 内に含まれる初期代表点集合, p'_i は点 i の水平面上の位置である. $\angle p'_i p'_k p'_j$ は3点からなる角度のうち, 小さい方の角度の絶対値とする. 最後に代表点の周辺 τ_c の範囲に他の代表点が存在する場合, 変状変位量が小さい方の代表点のみを残す. 本手法においては, 実験的に $\tau_f = 30\text{mm}$, $r_p = 15\text{mm}$, $\tau_n = 100\text{mm}$, $\tau_c = 50\text{mm}$ とした.

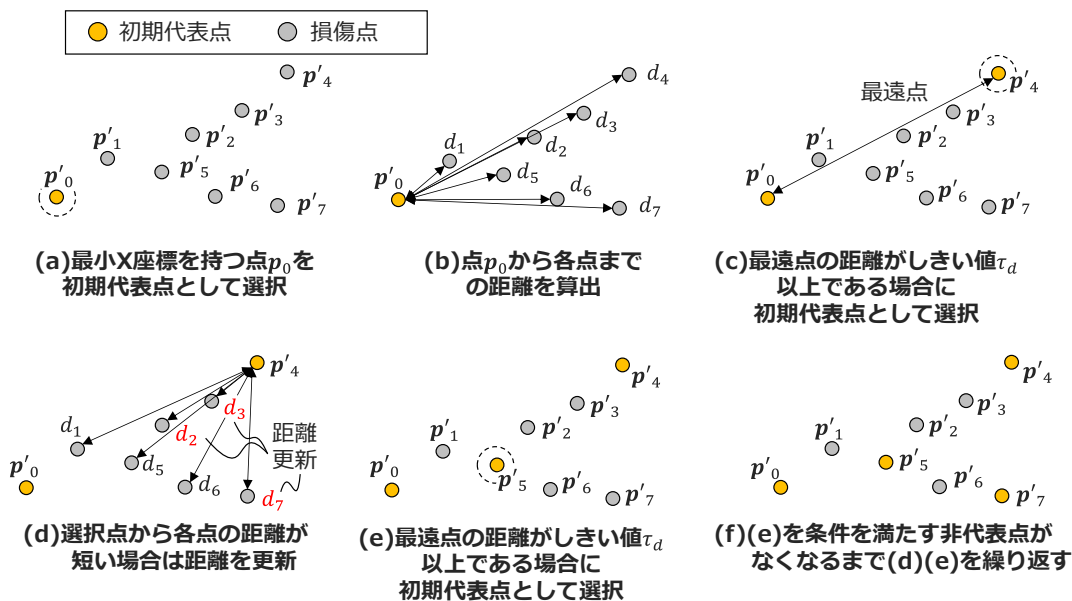


図 3.19 Farthest Point Sampling による初期代表点集合の抽出

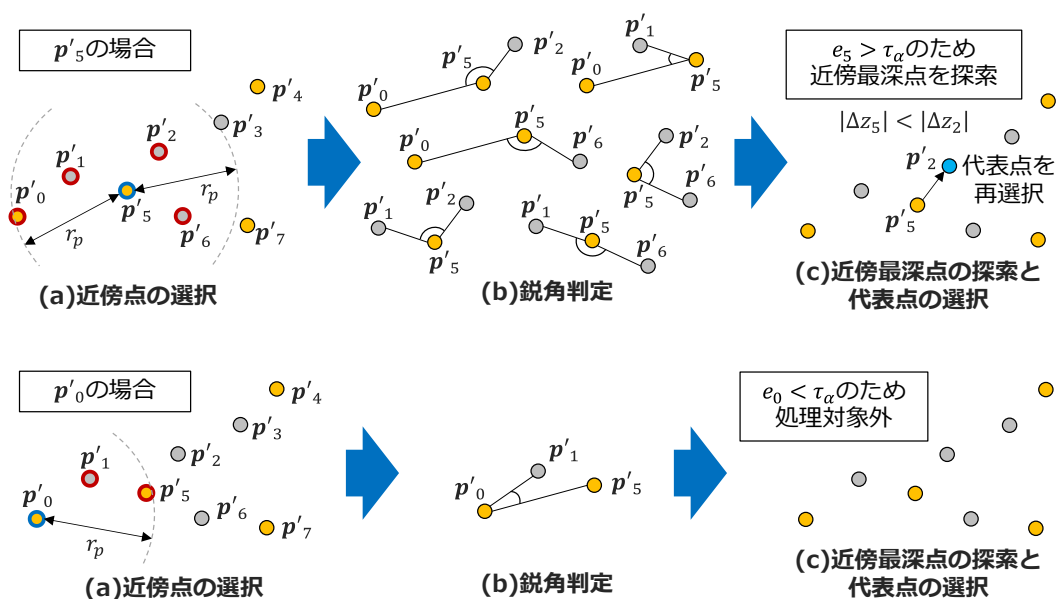


図 3.20 鋭角判定による損傷端部における初期代表点の保存

本手法では、出力ポリラインの交差を防ぐため、線状型損傷ポリラインの初期グラフを代表点の Delaunay 三角形分割により生成し、その最小スパニングツリー (MST) を線状型損傷ポリラインとして出力する (図 3.21)。MST の生成において、線状型損傷に沿ったエッジを残すため、各エッジにおいて対応する損傷の代表値を求め、その逆数を MST 構築の重みとする。図 3.21 (a)に示すように Delaunay 三角形のエッジは端点以外が点群と対応づいていないため、本研究では Time Grid 空間における端点間の最短経路上の点集合をダイクストラ法[72]により取得する。

損傷の代表値は、図 3.22 に示すように、点集合の変状変位量の平均値、中央値、標準偏差、第 3 四分位数について実験した結果、最も線状型損傷に反応した変状変位量絶対値の第 3 四分位数を採用した。MST は Prim 法[73]によって構築し、MST の線分に損傷の深さに関する情報として変状変位量の第 3 四分位数を付与して線状型損傷ポリラインとして出力する。最後に、全長が一定長さ以下 (本研究では100mm) のポリラインはノイズとみなし削除する。

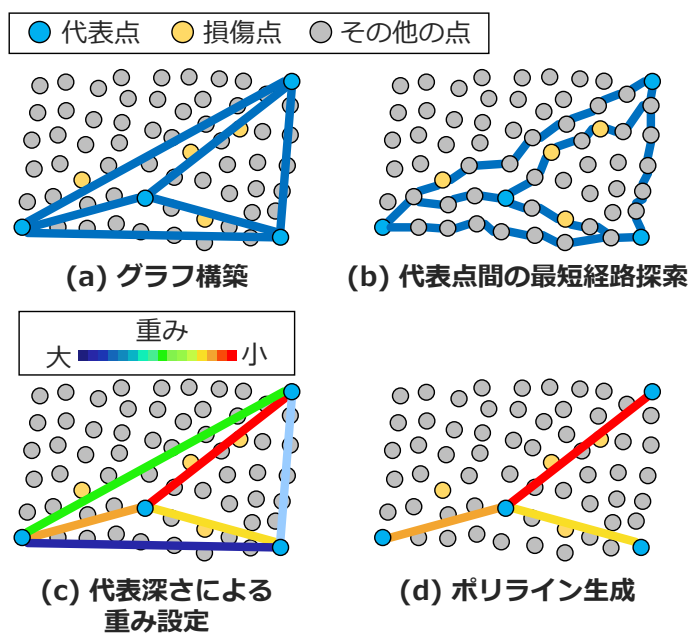


図 3.21 MSTの構築によるポリラインの生成

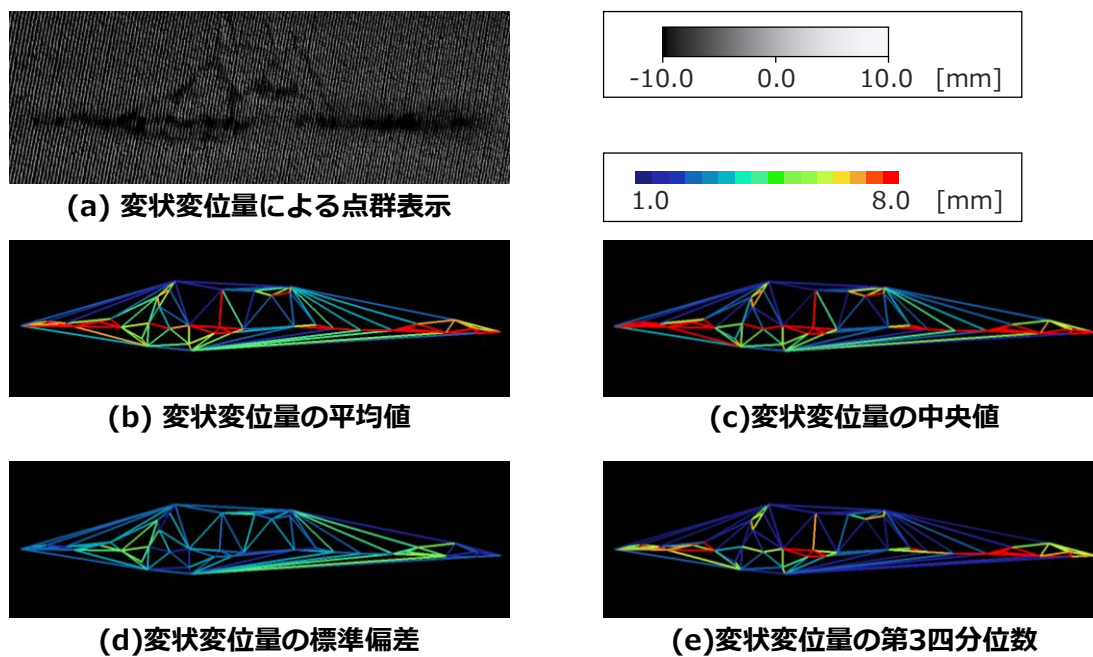


図 3.22 損傷代表値の比較

3.2 領域・線状型損傷の抽出結果

3.2.1 実験用データ

実証実験では、図 2.21 に示す三菱電機社製 MMS 「MMS-X500ZL」 [64] によって川崎市麻生区内を 2018 年および 2021 年に計測した道路総延長 1.95km の点群を使用した。対象とした道路は、片側 1 車線の市道である。点群は車道部のみを対象とするため、車道の舗装面以外の点群を手動にて除去した (図 3.23)。



(a) 元の MMS 点群



(b) 車道部舗装面のための MMS 点群

図 3.23 元の MMS 点群と車道部舗装面のための MMS 点群

3.2.2 正常舗装面推定と変状変位置算出の評価

推定した領域型と線状型損傷の正常舗装面の例を図 3.24 に示す。領域型損傷の正常舗装面はわだち掘れや凸部といった大きい損傷部に、線状型損傷の正常舗装面はひび割れ部の小さい損傷に影響を受けずに推定できている。

図 3.25 に示す区間 1 の点群に対する領域型損傷の変状変位置算出結果を図 3.26 に、図 3.27 に示す区間 2 の点群に対する領域型と線状型損傷の変状変位置算出結果を図 3.28 と図 3.29 に、および図 3.30 に示す区間 3 の点群に対する線状型損傷の変状変位置を算出した結果を図 3.31 にそれぞれ示す。区間 1 と区間 2 は 2 車線分の道路(図 3.25 および図 3.27 の上側の車線を MMS が走行)、区間 3 は MMS が走行した車線のみを示している。

図 3.26 と図 3.28 においてはわだち掘れや凸部が、図 3.29 と図 3.31 においてはひび割れや舗装面の継ぎ目が確認でき、反射強度により色付けした点群では確認が難しい損傷を認識できることが分かった。図 3.28 において変状変位置の深い箇所の一部は、図 3.29 においても変状変位置が深い。これは、領域型損傷の領域内に線状型損傷が存在していると考えられる。また、領域型損傷の変状変位置は、MMS の走行した車線の対向車線においても変化を確認できる一方、線状型損傷の変状変位置は対向車線ではほとんど変化していない。レーザスキャナからの距離の離れた位置では点間隔が広がるため、対向車線では線状型損傷を認識できないと考えられる。なお、3.1.2.4 目で述べた正常舗装面の推定法において、判定区間の境界におけるフィット曲線の連続性を考慮していないが、損傷検出のための変状変位置の推定において問題とならないことを目視確認した。

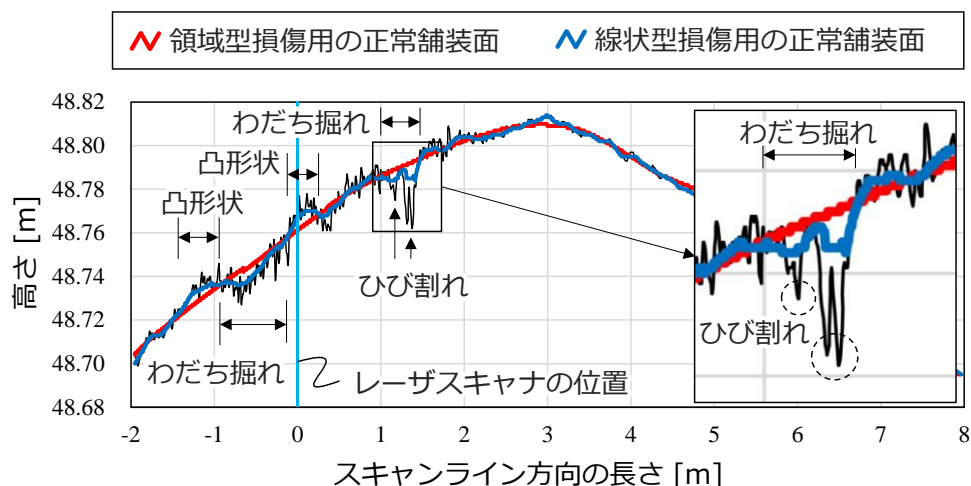


図 3.24 正常舗装面の推定結果



図 3.25 区間 1 における点群の反射強度表示

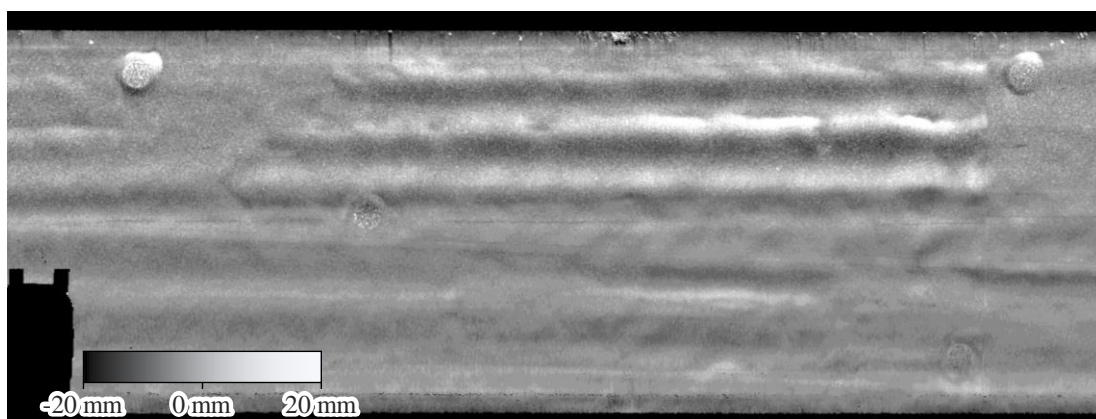


図 3.26 領域型損傷の正常舗装面からの変位（区間 1）

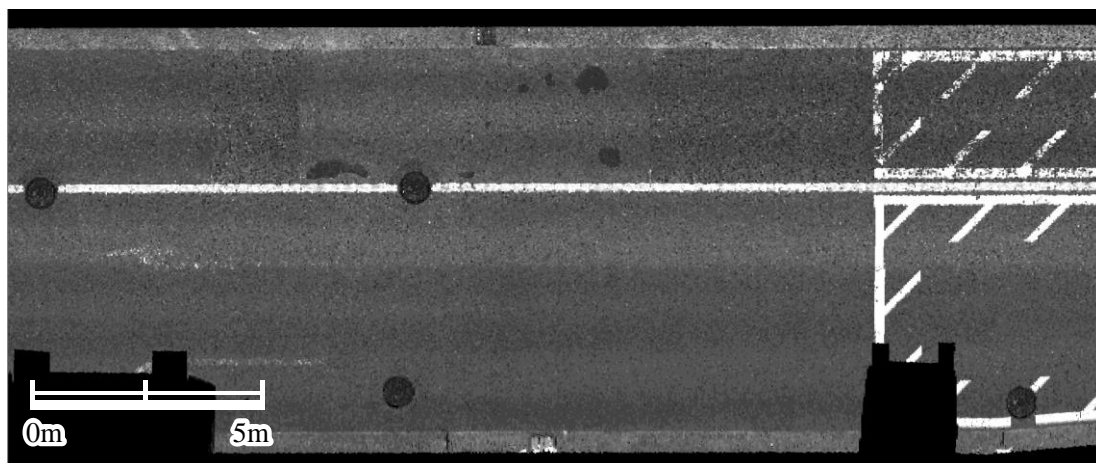


図 3.27 区間 2 における点群の反射強度表示

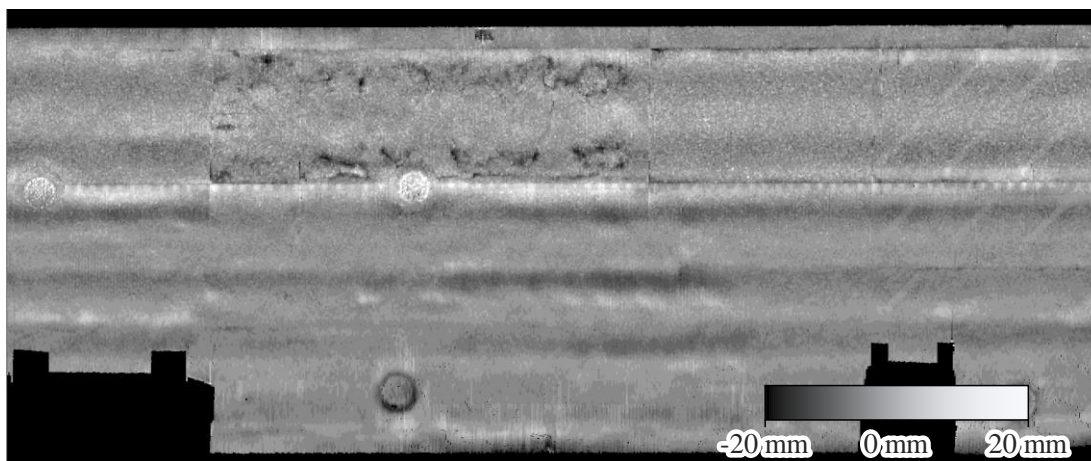


図 3.28 領域型損傷の正常舗装面からの変位 (区間 2)

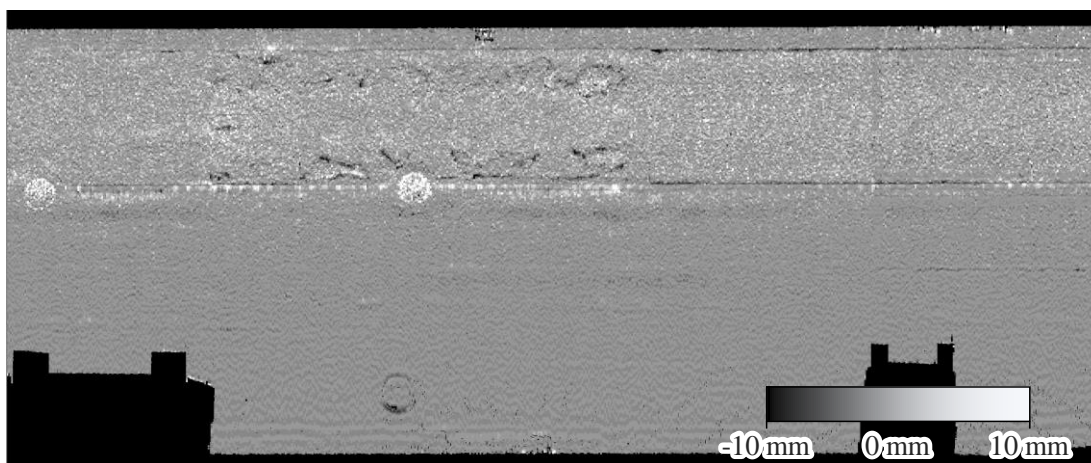


図 3.29 線状型損傷の正常舗装面からの変位 (区間 2)

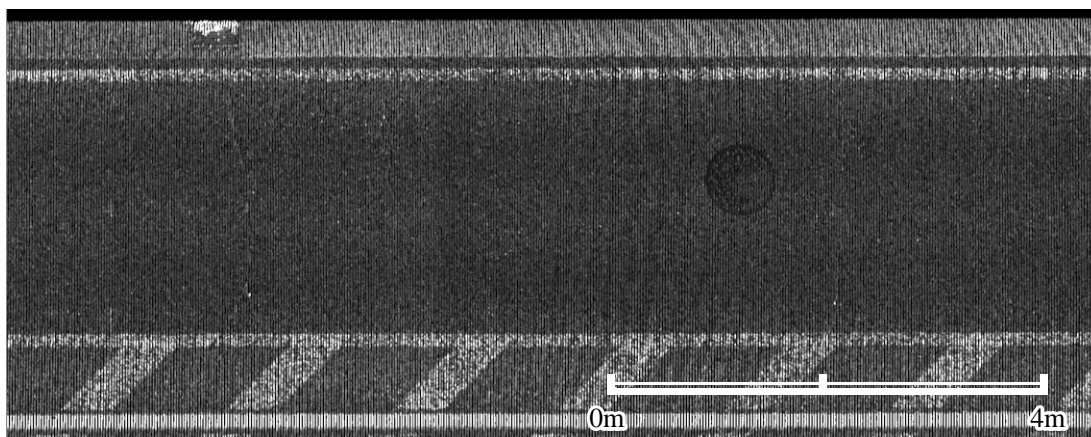


図 3.30 区間 3 における点群の反射強度表示

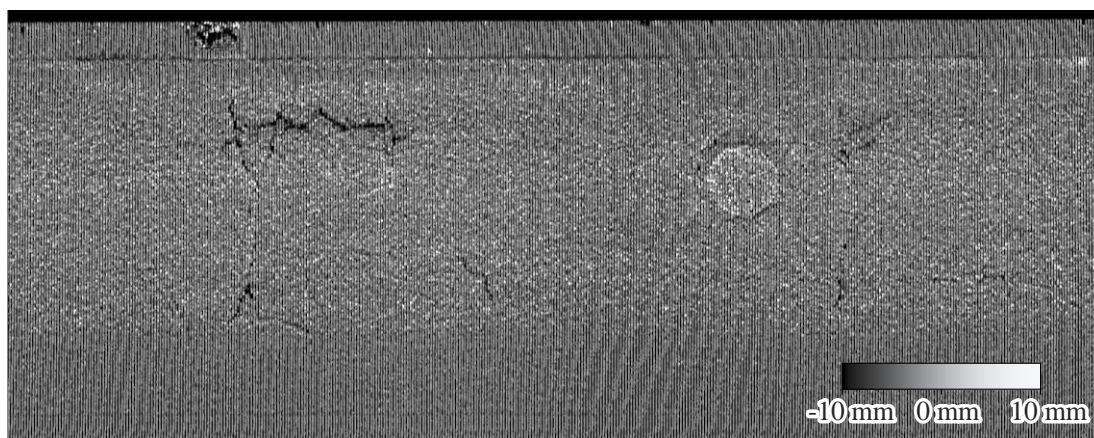


図 3.31 線状型損傷の正常舗装面からの変位（区間 3）

3.2.3 領域型損傷の抽出結果とその評価

図 3.26 に対する領域型損傷の抽出結果を図 3.32 に、図 3.28 に対する領域型損傷の抽出結果を図 3.33 に示す。図中の色は損傷種別判定結果を示している。変位変位量の大きい領域が抽出されており、わだち掘れは道路の進行方向に分布している傾向がある。また、わだち掘れと平行して凸型の損傷が分布しており、これは車両通行部に隣接して発生する寄りである。

領域型損傷の抽出性能を評価するため、区間 1 における損傷領域ポリゴンを手動で作成し、提案手法により抽出した領域型損傷ポリゴンと比較した。図 3.34 に手動ならびに提案手法により得られた領域型損傷ポリゴンの正解抽出領域と未/過検出領域を示す。図より各領域の境界部において非重複領域が見られるものの、領域内部では十分な重複が見られており、領域型損傷の存在箇所や広がり、分布を把握することが可能であることを確認した。抽出領域と正解領域の共通部分から 2 つの領域の和集合を除外することで得られる IoU (Intersection over Union) を算出した結果は 80.2%であった。IoU は、同じサイズの正方形 2 つのうち 1 つを斜めに長さの 6% 移動させた場合に 79.1% となることから、本手法では領域型損傷の存在範囲を把握できる性能が得られたと考えられる。

損傷種別の認識に関して、目視確認ではあるが、わだち掘れと凸形状の損傷領域は概ね正しく判別できており、ポットホールは実験データに含まれている数カ所において正しく判別できていた。一方、マンホールの周辺をポットホールと誤判定するケースも見られた（図 3.32 左上）。実験に用いたデータでは、損傷種別を明瞭に判別でき

ない箇所が多く、全体の定量評価が困難であった。実現場での損傷の確認を含めた実証実験による定量評価は今後の課題とする。領域型損傷の変状変位量の最大／最小値と中央値によってポリゴンを色分け表示した結果を図 3.35 に示す。変状変位量の代表値により領域型損傷ポリゴンを色分けするによって、地図上で直感的に損傷の程度を把握可能であり、損傷状態を表すコンパクトな情報として有効であると考えられる。

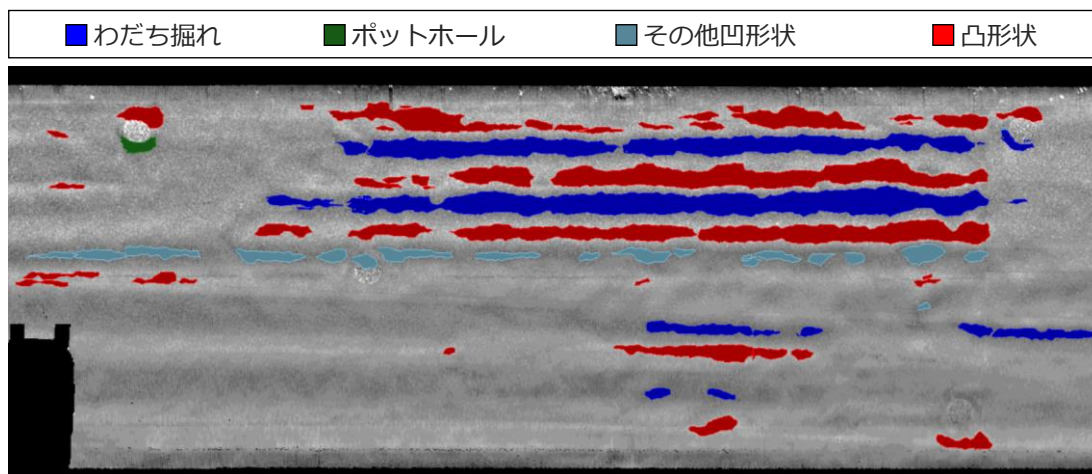


図 3.32 領域型損傷の抽出及び分類結果（区間 1）

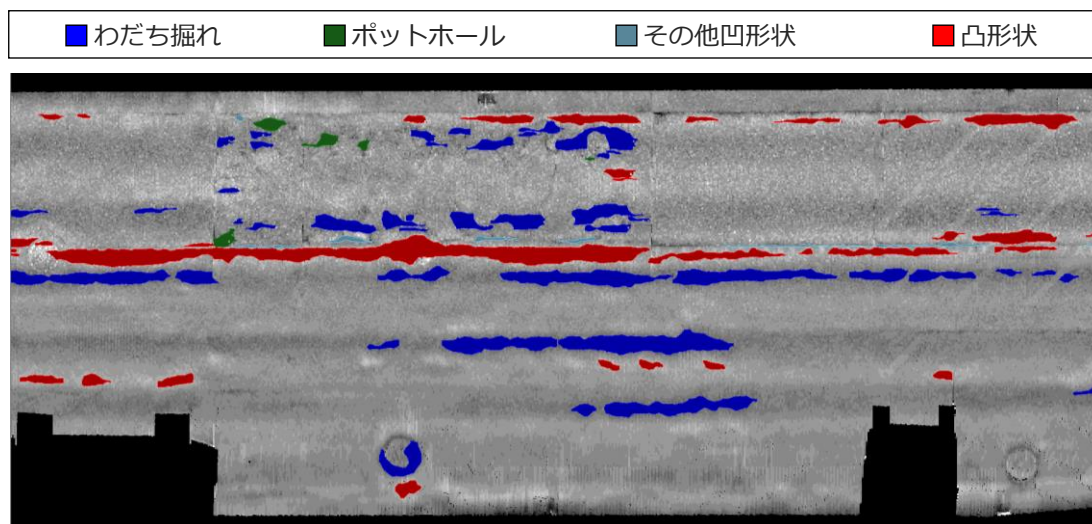


図 3.33 領域型損傷の抽出及び分類結果（区間 2）

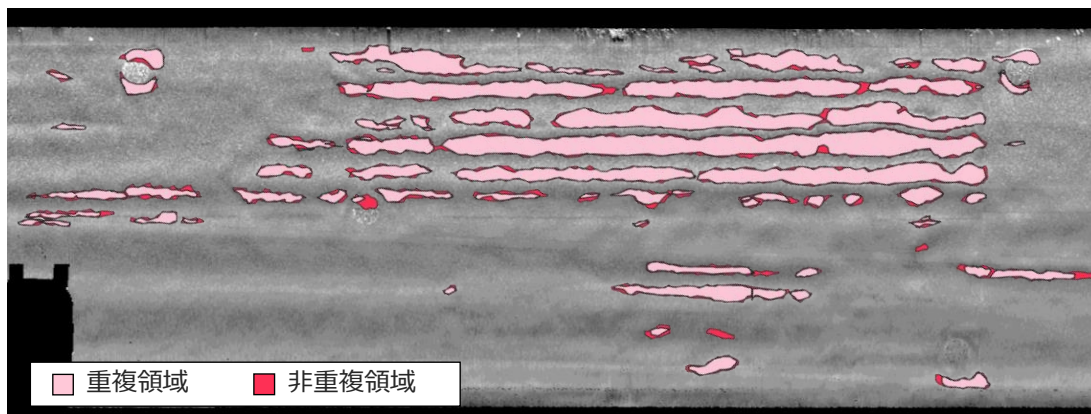
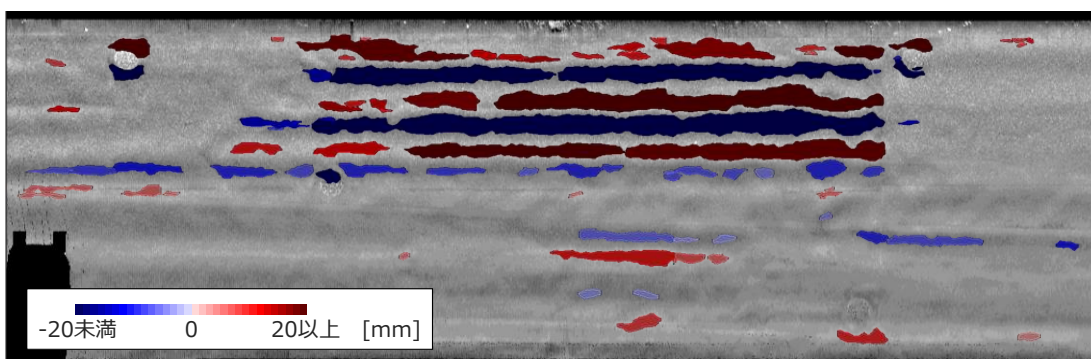
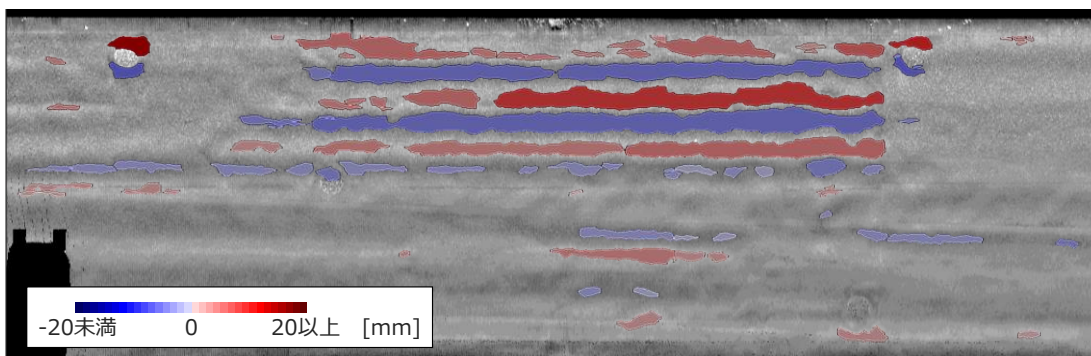


図 3.34 抽出データと正解データの比較 (区間 1)



(a) 最大/最小変状変位量



(b) 変状変位量中央値

図 3.35 領域型損傷の変状変異量によるポリゴン表現

3.2.4 線状型損傷の抽出結果とその評価

図 3.36 に適応的しきい値処理によって抽出した線状型損傷候補点を示す。線状型損傷候補点には線状型損傷を含む一方で、損傷部以外の点が多く含まれる。図 3.37 はフィルタリングを行い、領域成長法によりクラスタリングした結果である。線状型損傷候補点に対して k 近傍の距離に基づくフィルタリングを行うと、損傷部以外の点が削除される。図 3.38 は損傷候補クラスタの OBB を算出し、OBB 長辺の長さによって損傷部以外のクラスタを除去した結果であり、除去後に残った損傷候補クラスタのみに OBB を表示している。この処理により多くの損傷部以外のクラスタが削除されるが、舗装面が面的に荒れている箇所や集水桝の箇所などが損傷候補クラスタとして残った。損傷候補クラスタに対して Random Forest を適用した結果、分類の Accuracy は 95.4%、Precisions は 92.7%、Recall は 92.5%、F1-score は 92.6% を達成した。図 3.39 に示すように、Random Forest によって、図 3.31 において確認できる損傷の深い箇所を損傷部として分類できている他、アスファルト面と側溝の継ぎ目も損傷部として分類されている。なお、Random Forest によるクラスタ分類は、MMS 点群内の検証区間を決定し、その他の区間に含まれる 3,011 個のクラスタを用いて学習を行い、検証区間内の 1,355 個のクラスタに対して行った。ハイパーパラメータはグリッドサーチにより決定し、ツリーの最大深さ (Max Depth) は 30、作成ツリー数 (N Estimators) は 110 とし、分割に使用するフィーチャ数 (Max Features) の算出にはフィールド数の平方根を使用した。Random Forest における Feature Importance は、反射強度の平均値、OBB のアスペクト比、反射強度の中央値、Linearity の平均値の順に値が大きかった。

区間3と区間2において最終的に抽出された線状型損傷ポリラインを図 3.40 と図 3.42 に示す。Random Forest によって損傷部と判定されたクラスタのうち、損傷の深い箇所がポリライン化されている。結果を定量評価するために、図 3.41 と図 3.43 に示す正解データを手動で作成した。目視による比較では、細かい形状が十分に再現できていない箇所があるものの、線状型損傷の形状を概ねとらえたポリラインが抽出できていることが分かる。

線状型損傷の抽出結果を、図 2.22 および式 (2.16)~(2.19) に示す Heipke[66]の提案方法によって算出される完全性、正確性、品質および精度によって定量評価する。精度の計算は、実際には線分上に一定間隔に発生させた点を使用して計算する。これらの評価指標は、バッファ幅 w_b の影響を大きく受けるため、 w_b の適切な設定が必要である。本論文ではバッファ幅 w_b を 10mm から 100mm まで 10mm ずつ増加させて評価した。

評価結果を表 3.3 に示す。バッファ幅が 50mm の場合に完全性、正確性、精度は 90.7%、97.0%、10.0mm となり、50mm 以上のバッファ幅では評価指標の値の変化はわずかであった。結果より、提案手法では線状型損傷の存在箇所や形状の把握が十分に行える線状型損傷ポリラインを生成できることがわかった。

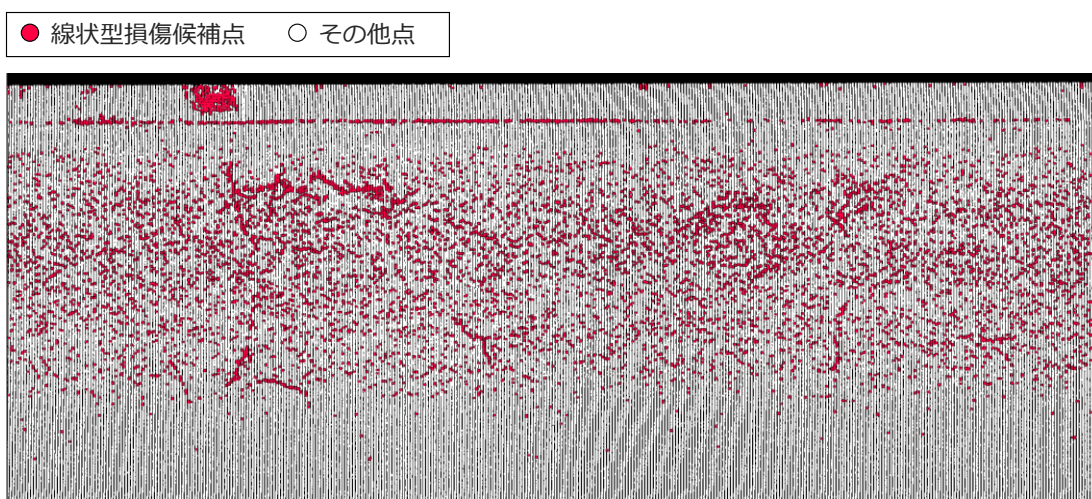


図 3.36 線状型損傷候補点の抽出結果 (区間 3)

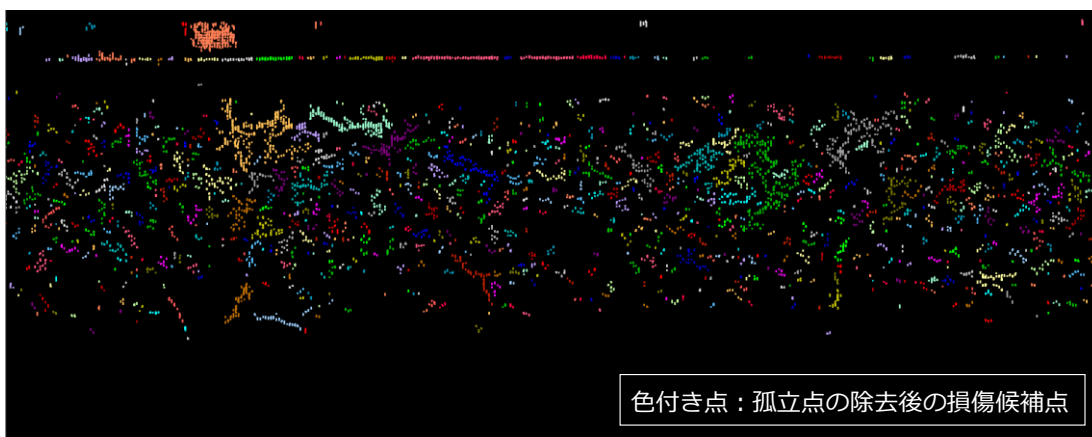


図 3.37 フィルタリング及びクラスタリング結果 (区間 3)

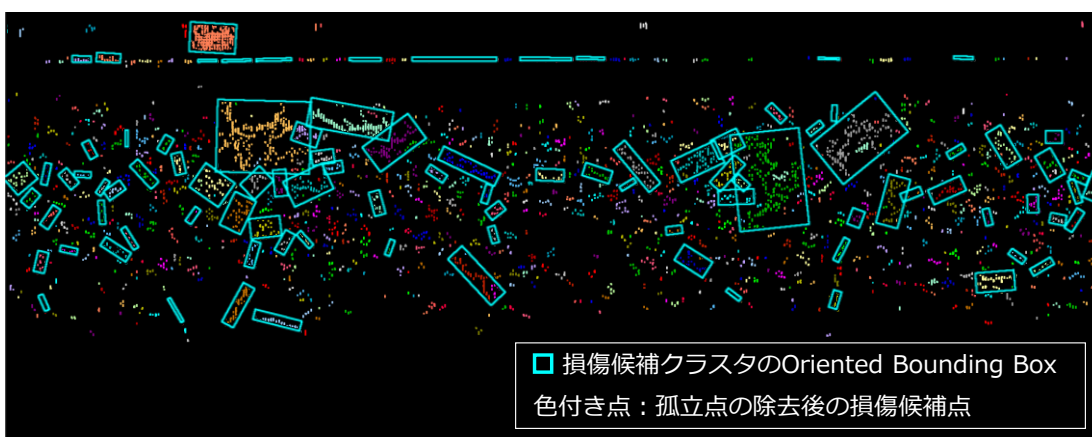


図 3.38 OBB の長辺による損傷候補クラスタの抽出結果 (区間 3)

■ 線状型損傷クラスタOriented Bounding Box
■ 非線状型損傷クラスタOriented Bounding Box

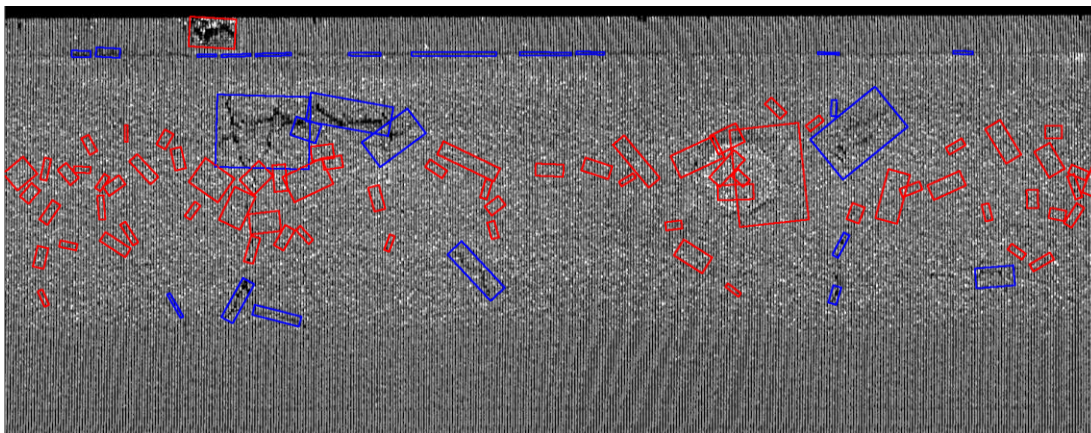


図 3.39 Random Forest による線状型損傷クラスタの抽出結果 (区間 3)

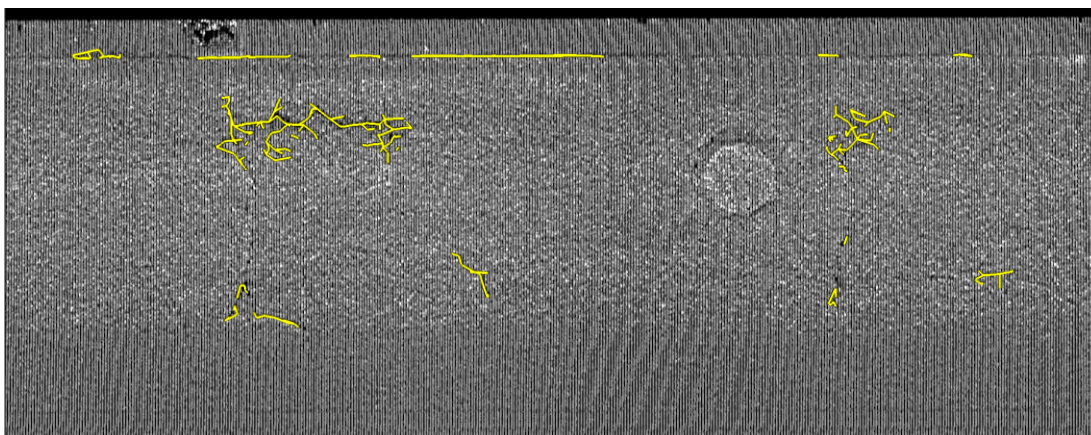


図 3.40 線状型損傷ポリラインの生成結果 (区間 3)

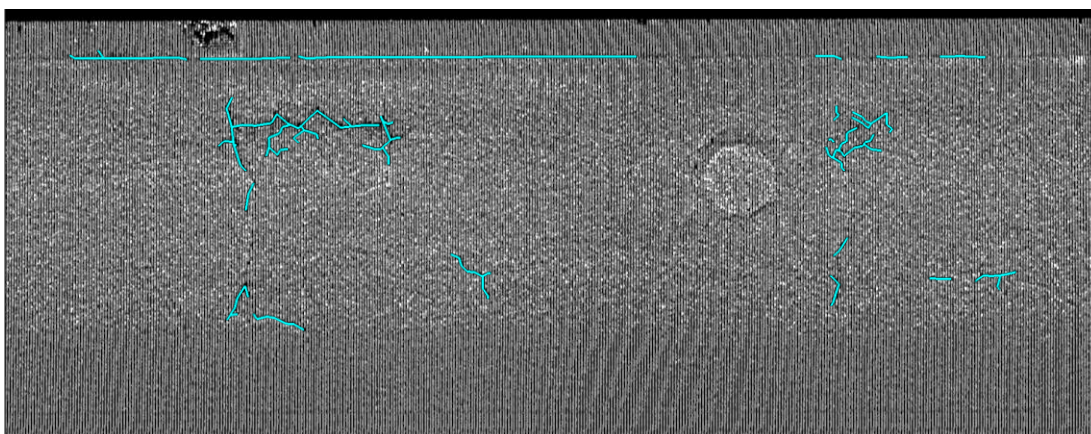


図 3.41 線状型損傷の正解データ (区間 3)

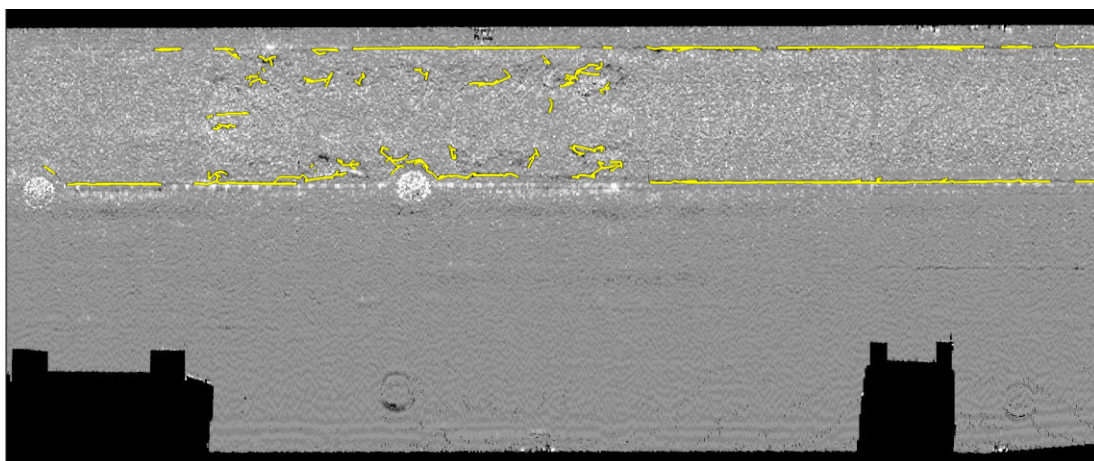


図 3.42 線状型損傷ポリラインの生成結果（区間 2）

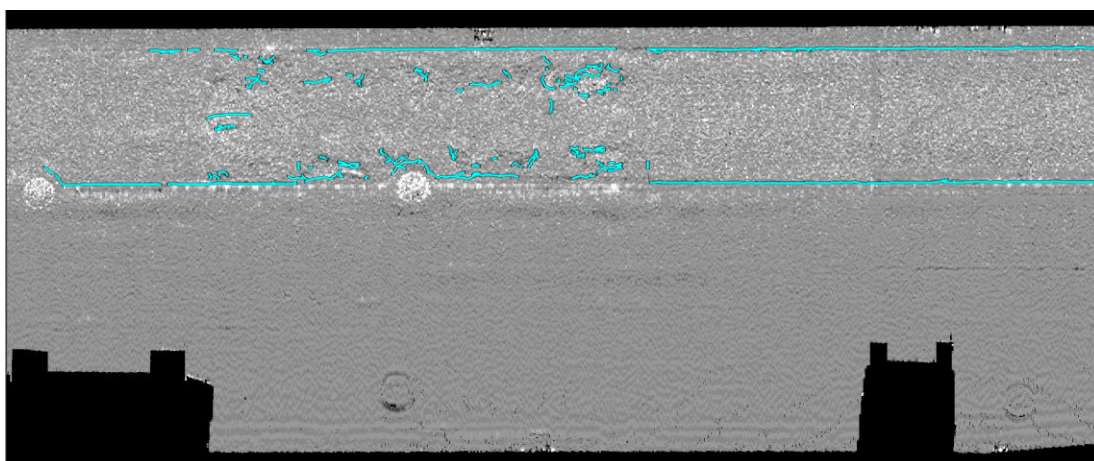


図 3.43 線状型損傷の正解データ（区間 2）

表 3.3 線状型損傷の定量評価結果

バッファ幅 mm	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
完全性 %	69.5	84.7	88.1	89.7	90.7	91.3	91.7	92.1	92.4	92.7
正確性 %	63.4	88.0	93.1	95.5	97.0	97.7	98.3	98.7	99.0	99.3
品質 %	49.6	75.9	82.8	86.1	88.2	89.4	90.3	90.9	91.5	92.1
精度 mm	5.6	7.9	8.8	9.5	10.0	10.3	10.6	10.9	11.1	11.4

3.3 まとめ

第3章では、MMS 点群を対象として、領域型損傷と線状型損傷をベクトルデータとして抽出する手法を提案した。本章における結論は以下のとおりである。

- (1) MMS 点群のスキャンラインに対する非損傷度を用いた 3 次曲線フィッティングによる、損傷部の影響を受けにくい正常舗装面の推定手法を提案し、領域型と線状型損傷の変状変位量をそれぞれ抽出できることを確認した。
- (2) 領域型損傷の種別と損傷の程度を表す指標を付与した領域型損傷ポリゴンを出力する手法を提案した。定量評価の結果、IoU は 80.2% を達成し、得られた領域型損傷ポリゴンによって領域型損傷の存在箇所や広がり、分布の把握が可能であることを確認した。
- (3) 損傷の深さを表す指標を付与した線状型損傷ポリラインを出力する手法を提案した。定量評価の結果、Recall, Precision, RMS はそれぞれ 90.7%, 97.0%, 10.0mm を達成し、得られた線状型損傷ポリラインによって線状型損傷の存在箇所や形状の把握が十分に行えることを確認した。

提案手法で得られる損傷のベクトルデータによる表現は、損傷情報の詳細な管理や可視化、地理空間データとしての維持管理、既存の損傷記録データへの変換が可能である。今後の課題は、実現場で地上レーザ点群や画像などを取得し、領域型損傷種別の確認を含めた実証実験を行うことにより、領域型損傷の種別判定性能の定量評価を行うことである。また、予防保全型の道路維持管理を実現するために、多時期の損傷状態から損傷程度の将来予測する手法を確立することも今後の課題として挙げられる。

第3章の内容及び、図 3.1, 図 3.8, 図 3.18, 図 3.24, 図 3.25, 図 3.26, 図 3.30, 図 3.31, 図 3.32, 図 3.34, 図 3.36, 図 3.39, 図 3.40, 図 3.41, 表 3.1 は、精密工学会誌 89 巻 8 号に掲載された「MMS 取得点群からの道路面における領域・線状型損傷のベクトルデータ抽出」から引用している。

第4章 結論と今後の課題

4.1 結論

本研究では、MMS によって取得した点群と走行軌跡からの車道境界線抽出手法と道路損傷の抽出手法の開発を目的とした。具体的には、市街地の一般道路を対象として、スキャンラインの平滑化と湾曲度を用いた車道境界線の追跡による車道境界線の抽出手法を提案し、実際の道路において MMS を走行させることで取得したデータを用いて手法の有効性を評価した。また、道路のわだち掘れやポットホール等の領域型損傷とひび割れ等の線状型損傷を、スキャンラインの非損傷度に基づいて推定した正常舗装面からの変状変位量を使用してベクトルデータを抽出する手法を提案し、MMS 取得データを用いて、抽出性能や分類性能を評価した。

本論文で得られた結論をそれぞれ下記にまとめる。

- (1) MMS 点群におけるスキャンラインの湾曲度を使用して、縁石や切り下げ部の下端を通過する車道境界線を抽出する方法を開発した。関連研究と比較した提案手法の特徴は、縁石の切り下げ部や交差点の抽出精度が高く、レーザスキャナの設置角度や雑草などによる縁石の遮蔽に影響を受けにくいことである。提案手法では、まず、計測ノイズや車道境界周辺の植栽や雑草の影響を受けにくくするため、不均一点群の除外とスキャンラインの平滑化を行った。さらに、スキャンラインから算出した各点の湾曲度に基づいて、縁石部の点と考えられるシード点を抽出し、シード点から車道境界線の構成点を追跡することにより車道境界線を抽出した。実証実験では、レーザスキャナの搭載台数や設置角度の異なる MMS を使用して、MMS システムの違いによる頑健性を評価した。また、道路構造の異なる地区においても適切に提案手法が動作するか確認した。結果として、段差の小さい歩道切り下げ部や交差点部などにおいても車道境界線を抽出できることを確認し、完全性、正確性、および品質で 92.9% ~ 99.5%、合計で 10.5mm ~ 19.6mm の精度を達成した。
- (2) MMS 点群から道路舗装面におけるわだち掘れやポットホール等の領域型損傷とひび割れ等の線状型損傷をベクトルデータとして抽出する方法を開発した。関連研究と比較した提案手法の特徴は、単一のフレームワークを使用して領域

型と線状型損傷を抽出でき、様々なスケールと複雑な形状を持つ損傷を抽出できることである。提案手法では、各点における損傷の影響度を表す指標を用いた3次曲線フィッティングにより、損傷部の影響を受けにくい正常舗装面の推定手法を開発した。領域型損傷の種別と損傷の程度を表す指標を付与した領域型損傷ポリゴンを出力した。定量評価の結果、IoUは80.2%を達成し、得られた領域型損傷ポリゴンによって領域型損傷の存在箇所や広がり、分布の把握が可能であることを確認した。また、損傷の深さを表す指標を付与した線状型損傷ポリラインを出力した。定量評価の結果、Recall, Precision, RMSはそれぞれ90.7%, 97.0%, 10.0mmを達成し、得られた線状型損傷ポリラインによって線状型損傷の存在箇所や形状の把握が十分に行えることを確認した。

4.2 今後の課題

本論文で提案した手法の実用性を高めるための課題を以下に述べる。

- (1) 抽出した車道境界線ポリラインを地図データとするには、取得されなかった車道境界の遮蔽部を補間したり、異なるMMS点群から取得した交差する道路などの車道境界線ポリラインと統合する必要がある。よって、複数の車道境界線ポリラインを統合する手法の開発が必要となる。
- (2) 高精度道路地図のうち例えばダイナミックマップにおいては、車道境界線（路肩縁）は車道外へのアクセス可否を属性として有する仕様となっている。本論文で抽出した車道境界線を実用的なデータとして活用するためには、縁石や歩道の切り下げを自動判定し、車道境界線ポリラインに車道外へのアクセス可否を属性として付与することが望ましい。
- (3) 自動運転では、工事等によって変化する車道境界に対応して車道境界線ポリラインを効率良く更新していくことが不可欠である。よって、車道境界線ポリラインを生成した区間において、車道境界線を抽出し、変化を自動抽出すると共に、車道境界線ポリラインを更新する手法を確立する必要がある。
- (4) 道路舗装面の損傷抽出においては、抽出した領域型および線状型損傷を正常舗装面からの変状変位量を可視化した画像を用いて定量評価した。より正確に抽出性能を評価するためには、実現場において地上レーザ点群や画像などを取得し、定量評価することが望ましい。また、領域型損傷の種別判定性能を定量評価することが必要である。

- (5) 道路損傷の抽出においては、予防保全型の道路維持管理を実現するために、多時期において道路舗装面の損傷を抽出し、将来の損傷程度を予測する手法の確立が必要である。

参考文献

- [1] 内閣官房情報通信技術(IT)総合戦略室, 「官民 ITS 構想・ロードマップ これまでの取組と今後の ITS 構想の基本的考え方」, <https://cio.go.jp/policy-transport> (最終閲覧日: 2023 年 5 月 14 日)
- [2] 国土地理院, 「基盤地図情報サイト」, <https://www.gsi.go.jp/kiban/> (最終閲覧日: 2023 年 5 月 14 日)
- [3] 東京都建設局, 「道路台帳測量関係の要領等」, <https://www.kensetsu.metro.tokyo.lg.jp/jigyo/road/kijunten/dourokanri0054.html> (最終閲覧日: 2023 年 5 月 14 日)
- [4] 東京臨海部実証実験コンソーシアム, 「自動走行システム向け地図データ仕様への提案 Ver.1.1」, <https://www.sip-adus.go.jp/rd/rddata/rd04/103a.pdf> (最終閲覧日: 2023 年 5 月 14 日)
- [5] HERE, 「HERE360 news - HERE introduces HD Live Map to show the path to highly automated driving」, <https://www.here.com/learn/blog/here-introduces-hd-live-map-to-show-the-path-to-highly-automated-driving> (最終閲覧日: 2023 年 5 月 14 日)
- [6] TomTom Maps, 「HD MAP」, <http://download.tomtom.com/open/banners/HD-Map-Product-Info-Sheet-improved-1.pdf> (最終閲覧日: 2023 年 5 月 14 日)
- [7] 国土交通省, 「道路統計年報 2021」, <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/index.html> (最終閲覧日: 2023 年 5 月 14 日)
- [8] ダイナミックマッププラットフォーム株式会社, 「高精度 3 次元地図データ(HD マップ)」, https://www.dynamic-maps.co.jp/news/2021/0407_2.html (最終閲覧日: 2023 年 5 月 14 日)
- [9] 首相官邸, 「官民 ITS 構想・ロードマップ 2020」 (最終閲覧日: 2023 年 5 月 14 日)
- [10] AUTOCAR JAPAN, <https://www.autocar.jp/post/900117/> (最終閲覧日: 2023 年 5 月 14 日)
- [11] 公益社団法人日本道路協会, <https://www.road.or.jp/> (最終閲覧日: 2023 年 5 月 14 日)
- [12] 一般社団法人北海道舗装事業協会, 「舗装の凹凸形状」, https://hoso-jigyo.or.jp/cms/wp-content/uploads/2020/09/jirei_08.pdf (最終閲覧日: 2023 年 5 月 30 日)

-
- [13] 一般社団法人日本建設業連合会, 「建設業の現状 - 4. 建設労働」 <https://www.nikkenren.com/publication/handbook/chart6-4/index.html> (最終閲覧日: 2023年5月29日)
- [14] 国土交通省, 「これからの舗装マネジメント」, <https://www.mlit.go.jp/common/001145725.pdf> (最終閲覧日: 2023年5月14日)
- [15] 東京都建設局, 「道路の管理」, <https://www.kensetsu.metro.tokyo.lg.jp/jigyo/road/kanri/index.html> (最終閲覧日: 2023年5月14日)
- [16] 国土交通省道路局, 「舗装点検要領」, https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo28_10.pdf (最終閲覧日: 2023年5月14日)
- [17] 公益社団法人日本道路協会, ”平成31年度版 舗装調査・試験法便覧”, 公益社団法人日本道路協会, 2019.
- [18] 富山和也, 中村博康, 増戸洋幸, 城本政一, 渡邊一弘, “共通試験結果に基づく路面プロファイルの有効性とその検証方法”, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.71, No.3, pp.I_9-I16, 2015.
- [19] 国土交通省, 「発注者責任を果たすための今後の建設生産・管理システムのあり方に関する懇談会 維持管理部会(平成30年度第1回) 維持管理に関する現状と課題」, <https://www.nilim.go.jp/lab/peg/img/file1727.pdf> (最終閲覧日: 2023年5月29日)
- [20] 内閣官房, 「連携型インフラデータプラットフォームの構築等, インフラ維持管理に関する対策」, https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/5kanenkasokuka/pdf/kakutaisaku4.pdf (最終閲覧日: 2023年5月29日)
- [21] RIEGL JAPAN, 「製品情報 - RIEGL VZ-600i」, <https://www.riegl-japan.co.jp/product/terrstrial/riegl-vz-600i.html> (最終閲覧日: 2023年5月14日)
- [22] Leica Geosystems, 「Leica Pegasus:Backpack 背負型の移動体計測器」, <https://leica-geosystems.com/ja-jp/products/mobile-mapping-systems/capture-platforms/leica-pegasus-backpack> (最終閲覧日: 2023年5月14日)
- [23] アジア航測株式会社, 「資料ダウンロード」, <https://www.ajiko.co.jp/dl> (最終閲覧日: 2023年5月14日)
- [24] H. Guan, J. Li, Y. Yu, C. Wang, M. Chapman, B. Yang, “Using mobile laser scanning data for automated extraction of road markings”, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 87, pp. 93-107, 2014.
- [25] GDAL, https://gdal.org/tutorials/gdal_grid_tut.html

-
- [26] M. Cheng, H. Zhang, C. Wang, J. Li, “Extraction and classification of road markings using mobile laser scanning point clouds”, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol.10, No.3, pp.1182-1196, 2017.
- [27] N. Otsu, “A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.9, No.1, pp.62-65, 1979.
- [28] PCL, Region growing segmentation, https://pcl.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/region_growing_segmentation.html
- [29] J. Guo, M. J. Tsai, J. Y. Han, “Automatic reconstruction of road surface features by using terrestrial mobile lidar”, *Automation in Construction*, Vol.58, pp.165-175, 2015.
- [30] O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox, “U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation”, *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, 2015.
- [31] C. Wen, X. Sun, J. Li, C. Wang, Y. Guo, A. Habib, “A deep learning framework for road marking extraction, classification and completion from mobile laser scanning point clouds”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.147, pp. 178-192, 2019.
- [32] L. Ma, J. Li, Y. Li, Z. Zhong, M. Chapman, “Generation of horizontally curved driving lines in HD maps using mobile laser scanning point clouds”, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol.12, No.5, 2019
- [33] PCL, Removing outliers using a StatisticalOutlierRemoval filter, https://pcl.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/statistical_outlier.html
- [34] M. Soilán, B. Riveiro, J. Martínez-Sánchez, P. Arias, “Traffic sign detection in MLS acquired point clouds for geometric and image-based semantic inventory”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.114, pp.92-101, 2016.
- [35] H. Guan, W. Yan, Y. Yu, L. Zhong, D. Li, “Robust Traffic-Sign Detection and Classification Using Mobile LiDAR Data with Digital Images”, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. Vol.11, No.5, pp. 1715-1724, 2018.
- [36] K. Qui, K. Sun, K. Ding, Z. Shu, “A Fast and Robust Algorithm for Road Edges Extraction from LIDAR Data”, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.XLI-B5, pp.693-698, 2016.

-
- [37] M. Fischler, R. Bolles, "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography", *Communications of the ACM*, Vol.24, No.6, pp.385-391, 1981.
- [38] A. Hervieu, B. Soheilian, "Semi-Automatic Road/Pavement Modeling using Mobile Laser Scanning", *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.II-3/W3, pp.31-36, 2013.
- [39] J. Hernández, B. Marcotegui, "Filtering of Artifacts and Pavement Segmentation from Mobile LiDAR Data", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.38, Part 3/W8, pp.329-333, 2009.
- [40] B. Rodríguez-Cuenca, S. García-Cortés, C. Ordóñez, M. Alonso, "Morphological Operations to Extract Urban Curbs in 3D MLS Point Clouds", *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Vol.5, No.6. 2016.
- [41] D. Zai, J. Li, Y. Guo, M. Cheng, Y. Lin, H. Luo, C. Wang, "3-D Road Boundary Extraction from Mobile Laser Scanning Data via Supervoxels and Graph Cuts", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.19, No.3, pp.802-813, 2018.
- [42] Z. Sha, Y. Chen, W. Li, C. Wang, A. Nurunnabi, J. Li, "A Boundary-enhanced Supervoxel Method for Extraction of Road Edges in MLS Point Clouds", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.XLIII-B1, pp.65-71, 2020.
- [43] B. Yang, L. Fang, J. Li, "Semi-automated extraction and delineation of 3D roads of street scene from mobile laser scanning point clouds", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.79, pp.80-93, 2013.
- [44] R. Miyazaki, M. Yamamoto, K. Harada, "Line-based planar structure extraction from a point cloud with an anisotropic distribution", *International Journal of Automation Technology*, Vol.11, No.4, pp.657-665, 2017.
- [45] D. Douglas, T. Peucker, "Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature", *The Canadian Cartographer*, Vol.10, No.2, pp.112-122, 1973.
- [46] K. Ishikawa, D. Kubo, Y. Amano, "Curb detection and accessibility evaluation from low-density mobile mapping point cloud data", *International Journal of Automation Technology*, Vol.12, No.3, pp.376-385, 2018.

-
- [47] L. Gézero, C. Antunes, “Automated Road Curb Break Lines Extraction from Mobile LiDAR Point Clouds”, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Vol.8, No.11, 2019.
- [48] H. Oliveira, P. L. Correia, “Automatic road crack segmentation using entropy and image dynamic thresholding”, 2009 17th European Signal Processing Conference, pp. 622-626, 2009.
- [49] H. Zhao, G. Qin, X. Wang, “Improvement of canny algorithm based on pavement edge detection”, 2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing, pp.964-967, 2010.
- [50] A. Ayenu-Prah, N. Attoh-Okine, “Evaluating pavement cracks with bidimensional empirical mode decomposition”, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Vol.2008, 2008.
- [51] H. Maeda, Y. Sekimoto, T. Seto, T. Kashiyaama, H. Omata, “Road Damage Detection Using Deep Neural Networks with Images Captured Through a Smartphone”, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018.
- [52] 中日本高速道路株式会社, 「安全性向上 3 カ年計画の取組み状況」, <https://www.cnexco.co.jp/corporate/safety/torikumi/torikumi/vol04/> (最終閲覧日 : 2023 年 5 月 31 日)
- [53] D. Zhang, Q. Zou, H. Lin, X. Xu, L. He, R. Gui, Q. Li, “Automatic Pavement Defect Detection Using 3D Laser Profiling Technology”, *Automation in Construction*, Vol.96, pp.350-365, 2018.
- [54] M. R. De Blasiis, A. Di Benedetto, M. Fiani, “Mobile Laser Scanning Data for the Evaluation of Pavement Surface Distress”, *Remote Sensing*, Vol.12, No.6, 2020.
- [55] B. B. Van Der Horst, R. C. Lindenbergh, S. W. J. Puister, “Mobile Laser Scan Data for Road Surface Damage Detection”, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.XLII-2/W13, pp.1141-1148, 2019.
- [56] L. Breiman, “Random Forest”, *Machine Learning*, Vol.45, pp5-32, 2001.
- [57] M. Zhong, L. Sui, Z. Wang, D. Hu, “Pavement Crack Detection from Mobile Laser Scanning Point Clouds Using a Time Grid”, *Sensors*, Vol.20, No.15, 2020.
- [58] P. D. Río-Barral, M. Soilán, S. M. González-Collazo, P. Arias, “Pavement Crack Detection and Clustering via Region-Growing Algorithm from 3D MLS Point Clouds”, *Remote Sensing*, Vol.14, No.22, 2022.

-
- [59] L. Ma, J. Li, “SD-GCN: Saliency-Based Dilated Graph Convolution Network for Pavement Crack Extraction from 3D Point Clouds”, *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, Vol.111, 2022.
- [60] G. Taubin, “A Signal Processing Approach to Fair Surface Design”, *ACM Computer Graphics Proceeding SIGGRAPH '95*, pp.351-358, 1995.
- [61] O. Au, C. Tai, H. Chu, D. Cohen-Or, T. Lee, “Skeleton Extraction by Mesh Contraction”, *ACM Transactions on Graphics*, Vol.27, No.3, pp.1-10, 2008.
- [62] H. Yokoyama, H. Date, S. Kanai, H. Takeda, “Detection and Classification of Pole-like Objects from Mobile Laser Scanning Data of Urban Environments”, *International Journal of CAD/CAM*, Vol.13, No.1, pp.1-10, 2013.
- [63] I. Puente, H. González-Jorge, J. Martínez-Sánchez, P. Arias, “Review of mobile mapping and surveying technologies”, *Measurement*, Vol.46, No.7, pp.2127-2145, 2013.
- [64] 三菱電機株式会社, 「三菱モービルマッピングシステム 高精度 GPS 移動計測装置」, <https://www.mitsubishielectric.co.jp/mms/tokucho.html> (最終閲覧日:2023年5月31日)
- [65] P. Kumar, C. McElhinney, P. Lewis, T. McCarthy, “An automated algorithm for extracting road edges from terrestrial mobile LiDAR data”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.85, pp.44-55, 2013.
- [66] C. Heipke, H. Mayer, C. Wiedemann, O. Jamet, “Evaluation of Automatic Road Extraction”, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.32, Part 3/2W3, pp.47-56, 1997.
- [67] H. Edelsbrunner, D. Kirkpatrick, R. Seidel, “On the Shape of a Set of Points in the Plane”, *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol.29, No.4, pp.551-559, 1983.
- [68] ASTM, “Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys, D6433-07”, *ASTM International*, 2008.
- [69] OpenCV, 「その他の画像変換」, http://opencv.jp/opencv-2svn/cpp/miscellaneous_image_transformations.html
- [70] M. Weinmann, B. Jutzi, S. Hinz, C. Mallet, “Semantic point cloud interpretation based on optimal neighborhoods, relevant features and efficient classifiers”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.105, pp.286-304, 2015.

-
- [71] Y. Eldar, M. Lindenbaum, M. Porat, Y. Y. Zeevi, "The Farthest Point Strategy for Progressive Image Sampling", IEEE Transactions on Image Processing, Vol.6, No.9, pp.1305-1315, 1997.
- [72] E. W. Dijkstra, "A Note on Two Problems in Connexion with Graphs", Numerische Mathematik, Vol. 1, pp.269-271, 1959.
- [73] R. C. Prim, "Shortest connection networks and some generalisations", Bell System Technical Journal, Vol. 36, pp.1389-1401, 1957.

謝辞

本論文は、北海道大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻博士課程において行った研究をまとめたものです。論文執筆にあたり、大変多くの方々からご指導ならびにご協力を頂きました。この場を借りて改めて御礼申し上げます。

本専攻の伊達宏昭准教授におかれましては、指導教官として本研究の遂行にあたり多くの時間を割いていただき、多くの知識や示唆に富む助言をいただくと共に、研究の細部に至るまで丁寧にご指導いただきました。また、国内外の学会での発表など多くの機会を与えていただき、研究者として貴重な経験を積ませていただきました。研究活動においては、仕事との両立にご理解いただき、新型コロナウイルス感染症の蔓延により研究の遂行が困難になる状況下においても、定期的にコミュニケーションをとっていただき、多くのお心遣いをいただきました。ここに深甚なる感謝を申し上げます。

本専攻の金井理特任教授におかれましては、定期的に議論させていただき、学会発表の際に的確なご指導をいただきました。また、副査として、本論文に対して多くのご指導及びご助言をいただき、心より感謝申し上げます。本専攻の小野里雅彦教授におかれましては、副査として、本論文に対して多くのご指導及びご助言をいただき、心より感謝申し上げます。

アジア航測株式会社の土居原健様、織田和夫室長におかれましては、博士後期課程への挑戦を後押しいただき、研究活動を温かく見守っていただきました。同社の政木英一取締役、水上幸治執行役員、新名恭仁所長には、博士後期課程に挑戦する機会をいただき、研究と仕事を円滑に遂行するために多くのご配慮をいただきました。池田辰也副統括部長には、業務を通じて本研究を実施するきっかけを与えていただきました。高草木佑菜様には、本研究の資料整理にご協力いただきました。吉村方男部長、野中秀樹課長、内田修様、計測技術研究室の同僚には、様々な形で研究活動を応援いただき、サポートいただきました。アジア航測株式会社の皆様に心から感謝の意を表します。

本専攻のデジタル幾何処理工学研究室の皆様には、温かく研究室に迎えていただき、楽しい研究生活を送ることができましたことを感謝します。

最後に、長期間にわたり仕事と学業の両立を生活面と精神面で支えていただいた妻と、毎日活力を与えてもらった長女に心より感謝します。

発表実績

I. 査読付き学術雑誌

1. 本間亮平, 伊達宏昭, 金井理, “スキャンラインの湾曲度評価に基づく MMS 取得点群からの車道境界線抽出”, 写真測量とリモートセンシング, Vol.60, No.2, pp.53-64, 2021.
2. 本間亮平, 伊達宏昭, 金井理, “MMS 取得点群からの道路面における領域・線状型損傷のベクトルデータ抽出”, 精密工学会誌, Vol.89, No.8, pp.654-660, 2023.

II. 査読付き国際会議プロシーディング

1. R. Honma, H. Date, and S. Kanai, “EXTRACTION OF ROAD EDGES FROM MLS POINT CLOUDS USING BEND ANGLE OF SCANLINES”, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B2-2020, pp.1091-1097, 2020.

III. 学会発表

1. 本間亮平, 伊達宏昭, 金井理, “スキャンラインの湾曲度評価に基づく MMS 取得点群からの車道境界線抽出”, 日本写真測量学会秋季学術講演会, pp.53-64, 2019.
2. 本間亮平, 伊達宏昭, 金井理, “MMS 取得点群を用いた道路空間情報の抽出 (第2報) -スキャンラインの湾曲度評価に基づく MMS 取得点群からの車道境界線の抽出と性能評価-”, 精密工学会春季大会学術講演会, pp.53-64, 2020.

IV. その他発表

1. 本間亮平, 伊達宏昭, 金井理, “MMS 取得点群からの車道境界線抽出と性能評価”, 2020 年度第 3 回動体計測研究会, オンライン, 11 月, 2020. (口頭, 査読なし)