

関西大学審査学位論文

MMS を用いた高架橋の道路線形の  
自動生成に関する研究

---

Research for Generating Road Alignment of  
Highway Bridge by MMS

平成 29 年 3 月

姜 文淵

関西大学大学院総合情報学研究科

# 要旨

## 要旨

自動運転システムは、運転の補助システムとして、人間の代わりにシステムが車両を制御する。これにより、人間のミスによる交通事故の削減や、車両のスムーズな動きによる交通容量の増加などを実現し、運転の安全性と快適性を向上させることができる。これらの利点から、1975 年ごろ、コンピューター・ビジョンを用いた自動運転の技術の開発が始まったが、法令や技術上の問題で、実用化までは至らなかった。しかし、近年、レーザスキャナや GPS (Global Positioning System) などの計測データの解析技術やビデオカメラを用いた画像データによる機械学習技術の発展により、自動運転の実用化の実現が目の前に来ている。そこで、内閣府は、平成 28 年の 6 月に戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 自動走行システム研究開発計画を公表し、自動運転技術の実用化の実現を望んでいる。自動運転の技術には、走行環境の認識技術、周辺の状況の判断技術と車両の制御技術がある。それらの技術は、電子地図データに記載されている道路線形情報を利用し、安全な自動走行を実現している。道路線形には、道路中心線、道路境界線、車線ごとの中心線などがある。これらの線形は、自動運転に重要であるが、現存の基盤地図に登録されていない問題がある。そのため、現存 CAD 図面から、線形情報を読み取り基盤地図道路に追加することで、新しい電子地図データを生成することが求められている。しかし、CAD 図面に記載されている線形は、特徴的な断面情報のみ持っているため、自動運転にそのまま適用するのが困難である。

一方、高度経済成長期に建設された道路構造物は、50 年を経過した現在、一斉に老朽化を迎えている。この状況において、内閣府や国土交通省などの関係省庁は、平成 25 年 11 月に「インフラ長寿命化基本計画」を策定し、道路構造物などのインフラの新設から撤去までのライフサイクルの延長を目的に中長期的な維持管理政策を推進している。構造物の維持管理を実現するには、設計図や完成図が必要である。しかし、高度経済成長期に建設された多くの道路橋の図面は紙媒体で、保存義務の期間を経過した後に廃棄されていることや、現況に即しないことがあり、維持管理が困難である。そのため、現況に基づいた図面の再生技術が求められている。道路構造物の図面を生成するには、まず道路の位置と形状を決定する道路中心線を生成する必要がある。

このように、自動運転においても、道路構造物の維持管理においても、道路中心線の再生が非常に重要となっている。

そこで、本研究では、高架橋を対象として、MMS の現況計測結果から、道路中心線の生成を試みる。MMS は、GPS とレーザスキャナを車両に搭載し、道路を走行しながら周辺の環境を高精度に計測できる。そのため、MMS による道路の計測は、一時通行止めを必要としないため、低コストの計測ができ、道路台帳などの作成に活用されている。将来には、本研究で提案した技術を発展させ一般道路に適用することで自動運転の実用化を実現する。

ここで、生成した道路中心線は、自動運転と道路構造物の維持管理へ適用するため、以下の 2 点が望まれている。

---

1.線形の曲率変化が連続していること

2.道路構造令を考慮すること

一般的に、MMS の計測結果の点群データから、高架橋の形状の線形を生成するには、2つの処理が必要である。

1.点群データから形状の特徴点の抽出処理

2.点列から線形の認識とベクトルの算出処理

本研究では、2つの処理に応じて、高架橋の横断面から形状の特徴点を抽出する手法と特徴点列から自然に接続可能な線形を生成する手法を提案する、それぞれの手法を実現するには、主に以下の3つの課題が考えられる。

1.幾何情報の区間の特定が困難であること

2.分岐部などの場所で、それぞれの路線の形状の線形が連続し、正確に幾何情報を認識できないこと

3.特性が異なる MMS 点群データを使用した場合、処理を適用できない可能性があること

本研究では、これらの課題の解決を3つの段階で実現する。まず、高架橋の継ぎ手の位置情報を利用し、線形を分割することで、それぞれの幾何情報のベクトルを計算する基礎的な手法を提案する。そして、将来の一般道路への適用性と広範囲な高架橋の特性を考慮し、継ぎ手などの情報なしで、分岐部への対応が可能な中心線生成手法を提案する。最後に特性が異なる2種類のMMS点群データから、生成した道路中心線の精度を比較することで、提案手法の実用性を評価する。

また、本研究の成果を車線ごとの中心線に適用すると、自動運転のための走行経路を適切に自動生成することができ、自動運転の実用化への貢献を期待できる。

# 目次

# 目次

要旨 .....	3
目次 .....	7
<b>第 1 章 緒論 .....</b>	<b>13</b>
1.1 概説 .....	15
1.2 自動運転 .....	15
1.2.1 自動運転の概説 .....	15
1.2.2 自動運転の技術 .....	20
1.2.3 電子地図データと問題点 .....	22
1.3 道路構造物の維持管理 .....	24
1.3.1 道路構造物の現状 .....	24
1.3.2 図面と道路中心線 .....	26
1.4 道路の計測と線形の生成技術 .....	27
1.4.1 現況の計測技術 .....	27
1.4.2 道路線形の生成技術 .....	30
1.5 研究の目的 .....	31
1.5.1 研究の対象 .....	31
1.5.2 研究の位置づけ .....	31
1.5.3 研究の手順 .....	33
1.6 本論文の構成 .....	34
<b>第 2 章 研究の流れ .....</b>	<b>35</b>
2.1 研究の適用対象 .....	37
2.2 既存研究の提案手法と課題 .....	37
2.2.1 ノイズ除去に関する既存研究 .....	37
2.2.2 道路線形の特徴点の抽出に関する既存研究 .....	39
2.2.3 線形の解析手法に関する既存研究 .....	41
<b>第 3 章 道路構造令に規定されている幾何情報で線形を自動生成する手法 .....</b>	<b>45</b>
3.1 手法の概要 .....	47
3.2 提案システム .....	49
3.3 点群解析部 .....	52
3.3.1 点群解析機能 .....	52
3.3.2 3次元データ生成機能 .....	56
3.3.3 高架橋分割機能 .....	58
3.4 線形解析部 .....	60

3.4.1	線形幾何情報判定機能 .....	60
3.4.2	線形幾何情報補正機能 .....	63
3.4.3	SXF 図面生成機能 .....	66
3.5	実証実験 .....	69
3.5.1	実験計画 .....	69
3.5.2	特徴点の抽出精度の確認実験 .....	71
3.5.3	継ぎ手の抽出精度の確認実験 .....	74
3.5.4	幾何情報の判定精度の確認実験 .....	75
3.5.5	幾何情報の補正精度の確認実験 .....	77
3.5.6	線形の生成精度の確認実験 .....	78
3.5.7	高架橋の外観精度の評価実験 .....	79
3.6	まとめ .....	83
<b>第 4 章 継ぎ手などの情報なしで広範囲な高架橋の道路線形を自動生成する手法 .....</b>		<b>85</b>
4.1	手法の概要 .....	87
4.2	提案システム .....	93
4.3	点群解析部 .....	96
4.3.1	点群解析機能 .....	96
4.3.2	ノイズ除去処理 .....	96
4.3.3	横断面生成処理 .....	97
4.3.4	特徴点抽出処理 .....	99
4.3.5	特徴点選出処理 .....	100
4.3.6	点列分割処理 .....	103
4.4	線形解析部 .....	106
4.4.1	線形解析機能 .....	106
4.4.2	直線抽出処理 .....	107
4.4.3	円弧抽出処理 .....	107
4.4.4	クロソイド曲線生成処理 .....	107
4.4.5	2次曲線生成処理 .....	110
4.4.6	線形補間処理 .....	110
4.5	実証実験 .....	116
4.5.1	実験計画 .....	116
4.5.2	特徴点の抽出精度の確認実験 .....	117
4.5.3	線形の生成精度の確認実験 .....	123
4.5.4	高架橋の外観精度の評価実験 .....	128
4.6	まとめ .....	135

<b>第 5 章 道路線形の自動生成に関する実用性の評価検証の実験</b> ....	<b>137</b>
5.1 実験の概要.....	139
5.2 実験計画.....	141
5.3 MMS と点群データの比較 .....	143
5.3.1 横断点列の密度の比較 .....	143
5.3.2 点群データの位置精度の比較 .....	145
5.3.3 情報種類の比較 .....	147
5.4 実験内容.....	148
5.4.1 ノイズ除去の結果の比較実験 .....	148
5.4.2 特徴点の抽出精度の比較実験 .....	148
5.4.3 高架橋の外観精度の比較実験 .....	150
5.5 パラメータの設定.....	150
5.6 実験結果と考察.....	151
5.7.1 ノイズ除去の結果の比較実験 .....	151
5.7.2 特徴点の抽出精度の比較実験 .....	163
5.7.3 高架橋の外観精度の比較実験 .....	169
5.7 まとめ.....	174
<b>第 6 章 総括</b> .....	<b>177</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>183</b>
<b>謝辞</b> .....	<b>191</b>



# 第 1 章

## 緒論

# 第1章 緒論

## 1.1 概説

道路の線形 (Alignment) は、道路の形状で、直線と曲線の組み合わせにより構成されている。そして、道路の線形には、道路中心線や道路境界線などがある。これらの線形は、様々な分野で必要とされているため、非常に重要である。本研究では、自動運転と道路構造物の維持管理の2つの分野に着目し、道路線形の重要性を紹介し、それぞれの分野における問題点を洗い出す。そして、問題点を解決するための既存手法の調査に伴い、本研究の位置づけを明確にする。

## 1.2 自動運転

### 1.2.1 自動運転の概説

#### (1) 定義

自動運転とは、運転支援システムで、人間の代わりに、走行環境の認識、状況の判断、車両の制御を実施するシステムである。

自動運転は、システムが車両を制御するため、人間の認識、判断、操作ミスにより発生した事故を防ぐことが可能である。また、自動運転は、道路の幅の効率的な利用と走行経路のサグ部の認識により交通渋滞の解消につながる。それらを考慮すると、自動運転は非常に重要である。

自動運転は、自動化の程度により5つのレベル (表 1.1) が定義されている。

表 1.1 自動運転の定義

自動運転のレベル	定義
レベル 0	運転手が完全に車両を制御する
レベル 1	加速, 操舵, 制動の中の1つだけシステムが行う
レベル 2	加速, 操舵, 制動の中の2つシステムが行う
レベル 3	加速, 操舵, 制動3つ全部システムが行う ただし, 特定の場合において, 運転手の対応が必要
レベル 4	有人無人に関わらず, システムが完全に車両を制御する

表 1.1 は、アメリカ道路交通安全局が定義したもの[1]で、日本においても、使用されている。また、表 1.1 のレベル 2 までは、人間が責任をもって運転に介入することが求められている。レベル 3 からは、自動運転時に人間が介さないため、システムの信頼性が求められている。

## (2) 自動運転の歴史

1940 年ごろから現代までの自動運転に関する歴史[2]-[4]をまとめたものを以下に紹介する。

1939 年、アメリカのニューヨーク州にて、「World of Tomorrow」というテーマの万国博覧会が開催された。そこで、「Futurama」という展示型アトラクション（図 1.1）は、超高層ビルや自動化高速道路ネットワークなどを持つ 20 年後のアメリカを描いて、非常に人気を博した。自動化高速道路ネットワークでは、自動車が電波に誘導され、車両間の距離を保ちながら、高速に走行するモデルが提案された。これは自動運転の初めての実現可能な構想[5][6]である。



図 1.1 Futurama

(出典：Computer History Museum, Where to? A History of Autonomous Vehicles, <http://www.computerhistory.org/atcm/where-to-a-history-of-autonomous-vehicles/>)

1950 年代，ラジオ技術の出現と機械システムの発展に伴い，交通事故や，渋滞の防止を目指し，本格的に自動運転の研究が始まり，様々な機械装置[7][8]が開発された．この時代において，ラジオ技術により，無線操作により車両の自動加速や自動ステアリング(図 1.2)が実現された．



図 1.2 無線による自動運転

(出典 : IEEE SPECTRUM, Self-Driving Cars Were Just Around the Corner—in 1960, <http://spectrum.ieee.org/geek-life/history/selfdriving-cars-were-just-around-the-corner-in-1960>)

その後，60 年代に入ると，アナログコンピュータが発展し，それを使用し自動車を制御する研究が行われた．その研究では，地面に埋設したケーブルに電流を流し，電流で生成した磁界を検出し，車両とのずれの算出により操舵を制御している．しかし，その技術は，常時の給電とケーブルの埋設において高額な費用が発生し，実用化まで進めなかった．

70 年代に入ると，デジタルコンピュータが発展し，コンピュータ・ビジョンを利用した自動運転の研究が始まった．まず，道路のレーンマーカを検出し，それに沿った自動走行技術が開発された．この技術は，ケーブルを埋設しないため，コストを抑えることができた．80 年代に入ると，ビジョンのステレオ技術で道路上の障害物を認識し，地図データを利用し，自動走行に成功した．しかし，当時のコンピュータの性能の制約で走行スピードが制限された．

80年代の後半から90年代にかけて、コンピュータの性能の向上につれて、コンピュータビジョン技術を使用した高速走行が実現された。その後、この技術をベースとし、単独の自動車ではなく、複数の自動車の隊列自動走行に関する研究が始まった。90年代後半に入ると、高速道路に磁気マーカを設置することで、自動操舵を実現する研究が行われた。この研究では、長距離で車両間の距離を保つ走行を実現できた。2000年に入ると、自動運転のターゲットが路線バスや、トラックなどに変わり、定刻運転や地球温暖化の防止などを目指していた。

2004年ごろ、アメリカのDARPA（国防高等研究計画局）は無人車両のコンペティション Grand Challenge, さらに2007年に Urban Challenge を開催し、そこで登場したのはGPSや地図データの組み合わせによるナビゲーションとレーザスキャナで障害物の検出が可能な自動運転技術であった。この技術をベースとし、Google社が2009年から、ラテラル制御（操舵）とロンジチュージナル制御（速度、車間距離）を自動化する自動車を開発し、長時間の安全運転を可能にした。特に最近インターネットとディープランニング[9]の技術の発展に伴い、高精度な3次元地図データベースとの組み合わせにより自動運転（図1.3）の性能が飛躍的に向上[10]している。

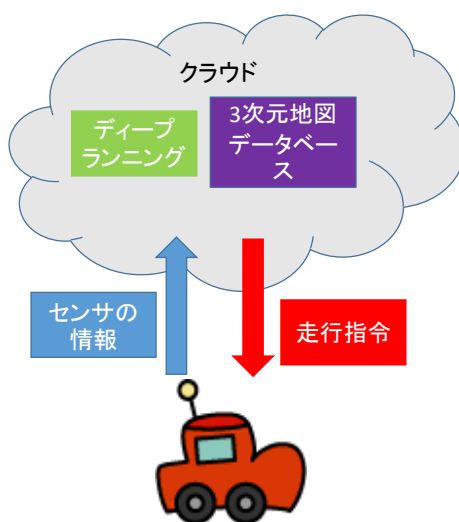


図 1.3 Google 社の自動運転技術

このように、科学技術の進歩に伴い、自動運転技術の実用性も急速に上昇している。

### (3) 日本における自動運転の動き

日本では、1996年に、当時の警察庁、通商産業省、運輸省、郵政省、建設省の5省庁が

「ITS 推進に関する全体構想」を策定した。この構想では 2015 までの 20 年間における 9 つの分野の開発・展開計画を提示[11]-[13]した。その中で、運転安全支援を目的とし、中長期にわたった自動運転の開発が望まれている。当時、磁気やコンピュータ・ビジョンを利用した自動運転の公開実験（図 1.4）が多く行われていた。



図 1.4 公道における隊列自動運転の実験

（出典：上田敏，ITS 研究のマネジメントに関する一考察  
－1996 年に返って、考えること－，

<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/kouenkai/kouenkai2011/happyou/04.pdf>)

2013 年に、内閣府が日本再興戦略，世界最先端 IT 国家創造宣言と科学技術イノベーション総合戦略[14]を決定した。そこで，以下の 3 つの計画が策定された。

- 安全運転支援システム，自動走行システムの開発・環境整備
- 高度運転支援技術・自動走行システムの開発・実用化等を推進
- 交通安全支援・渋滞対策技術により，交通事故死者数ゼロを目指す

その後，2016 年 6 月に，内閣府は，戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)自動走行システム研究開発計画を公表した。計画では，自動運転技術の実用化を目指し，各レベルの具体的な時期(表 1.2)を明らかにした。

表 1.2 自動運転の実現期待時期

自動運転のレベル	期待時期
レベル 0	実現済
レベル 1	実現済
レベル 2	2020 年まで
レベル 3	2020 年を目途
レベル 4	2025 年を目途

そこで、2017 年までには、レベル 2 の実現とレベル 3 に所要の技術の確立が求められている。そして、2020 年を目途にレベル 3 のシステムとレベル 4 の市場化の実現に向かう研究開発が求められている。

このように日本においても、自動運転技術が非常に重視されている。

### 1.2.2 自動運転の技術

自動運転は、走行環境を認識し、状況を判断し、車両を制御している。安全で快適な自動運転を実現するには、それぞれに対応する柔軟な技術が必要である。

走行環境の認識では、GPS、カメラなどを利用し、自己位置や、周辺の障害物と他の車両の位置などを認識[15]している。近年になって、画像処理技術とレーザセンサ機器の発展によりステレオ画像、レーザスキャナ、ミリ波レーダーなどを車両に搭載し（図 1.5）走行環境の認識（図 1.6）に関する研究[16]-[21]が盛んになった。これらの研究では、高解像度または高精度な計測により、道路マーカや障害物などの正確な種類や位置情報を取得可能で、状況判断の安全性を向上できる。また、それ以外には高精度な衛星画像や、マルチスペクトル画像により広範囲な走行環境を認識する研究[22]もなされた。

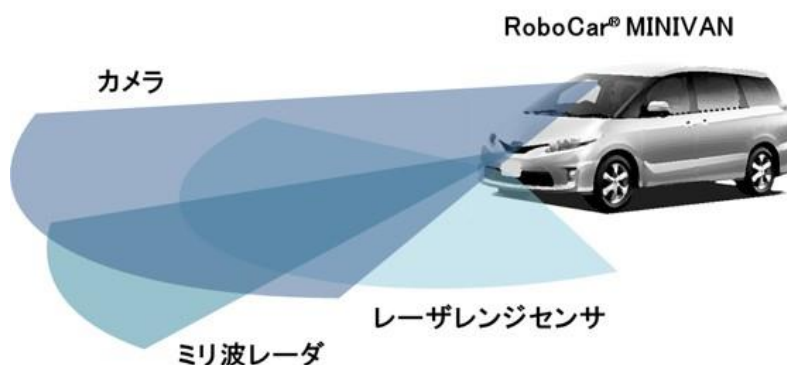


図 1.5 各種センサを搭載した自動車  
(出典：株式会社 ZMP, RoboCar MINIVAN (センサ搭載イメージ),  
<https://www.zmp.co.jp/products/robocar-minivan>)

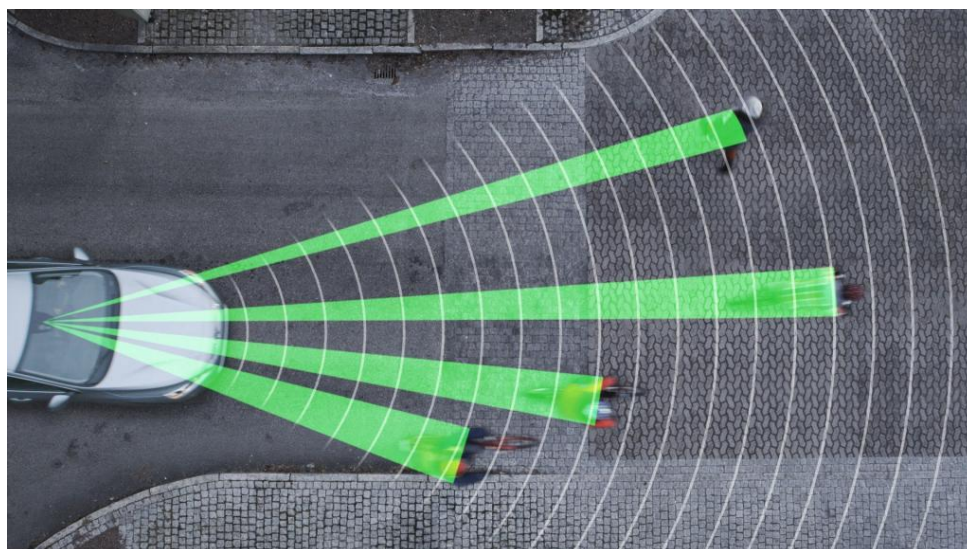


図 1.6 走行環境認識のイメージ  
(出典：THE PAGE, 遠方の障害物把握にも優れるミリ波レーダー,  
<https://thepage.jp/detail/20140615-00000021-wordleaf>)

状況の判断では、認識の結果に対して、車両をどう操作すべきかを決定する。ここで、各種場合に人間らしく対応するため、処理の柔軟性が非常に重要である。例えば、車両の前方に移動体が存在する場合、車両を止めるか避けるかを容易に判断できない。理由としては、移動体の種類や、移動方向と速度が異なると、車両の取るべき措置も完全に異なる。さらに、各種の措置を取った後に、周辺の他の物体への影響を考慮する必要もある。人間は、長期間にわたった経験を積んできたため、短時間で良い判断を下すことが可能である。しかし、機



械に対しては、簡単なルールで対応すると、対応しきれない場合があり、事故が発生する可能性がある。そこで、各種情報に基づき良い措置を導くため、ファジィ論理[23]、ニューラルネットワーク[24]、ディープラーニング[25]-[27]などの手法が提案された。

車両の制御では、判断した結果に対して、電子地図データに基づき、走行経路を生成し、車両を操作する。走行経路の生成において、車両の性能、人間の快適さ、現地での交通ルールなどを考慮する必要がある。例えば、小型車両と大型車両がカーブする場合、それぞれの内側のタイヤが描く回転半径が異なる。同じ走行経路を生成すると、大型車両が内側の道路上の物体と接触する可能性がある。そのため、大型の車両に対して、横の物体との距離を計算し接触しないように曲線の走行経路を生成する必要がある。また、走行経路の生成は、人間の快適さを向上させるには、規定されている幾何情報を使用する必要がある。車両の操作において、走行経路の水平方向、縦断と横断勾配の情報から、適切な操舵と加速の量を計算し指令を下す。

### 1.2.3 電子地図データと問題点

電子地図データとは、現実空間上の道路や町などをはじめ、様々な施設を点・線・面で表現し、またそれらの属性情報を付記可能なデジタル地図データである。1.2.2 項で紹介した自動運転の技術には、電子地図データが使用されている。例えば、走行環境の認識技術では、自車、他車と各種障害物が道路のどの位置に存在するかを認識している。状況の判断技術では、道路と周辺状況の情報から分析を行い、適切な操作指令を下している。車両の制御技術では、道路上の状況に応じて、適切な走行経路を生成している。それらの技術では、電子地図データ（図 1.7）に記載されている道路とその周辺の情報を利用している。



図 1.7 自動運転のための道路電子地図データ

(出典：日経テクノロジー，“線”がクルマの動きを制御する，  
<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/MAG/20150122/400329/>)

自動運転のための電子地図データに記載されている情報としては、道路中心線、道路境界線、車線ごとの中心線などの線形情報、路線の分岐・合流部などの点情報がある。そして、その中で、最も重要なのは道路の位置と形状を決定する道路中心線である。また、この電子地図データは、一般的なナビゲーションの地図データと異なり、高精度な3次元の位置情報や線形の延長方向と曲率半径などのベクトル情報を持っている。自動運転のシステムは、それらの情報に基づき、自車及び他車の位置を計算し、適切な走行経路を生成している。

日本では、阪神・淡路大震災を契機として、地理空間情報活用推進基本法を定め、いつ・どこで・何が・どのような状態かを示す地理空間情報[28]の整備と活用に関する取組を推進してきた。その結果、今日においては、ナビゲーションや防災システムといった多様なサービスが次々と開発され、人々の日常生活や都市の基盤を支える「電子国土」という基盤地図を構築した。しかし、この基盤地図は、地物を面的な情報として管理しているが、道路に関しては、道路中心線形、道路の境界線形、車線毎の線形、交差点や分岐点の線形などの重要な情報が付加されていない。そのため、自動運転の実現には、設計図や完成図などのCAD図面から点(接合点)や線(線形)情報を読み取り、新たに電子地図に追加する必要がある。しかし、現状では、

CAD 図面に構造物の特徴的な断面しか記載されていないため、線形の連続変化の情報が欠落している。このことから、連続する3次元道路の生成が困難である。

## 1.3 道路構造物の維持管理

### 1.3.1 道路構造物の現状

日本では、1955年から1973年までの約18年間において、約年平均10%の経済成長率を達成し、多くのインフラ施設の建設により都市が急速に発展した。特に1964年の東京オリンピックや1970年の大阪万博の開催に伴い、東名高速道路や阪神高速道路など多くの道路構造物（図1.8の赤い枠部分）が建設された。

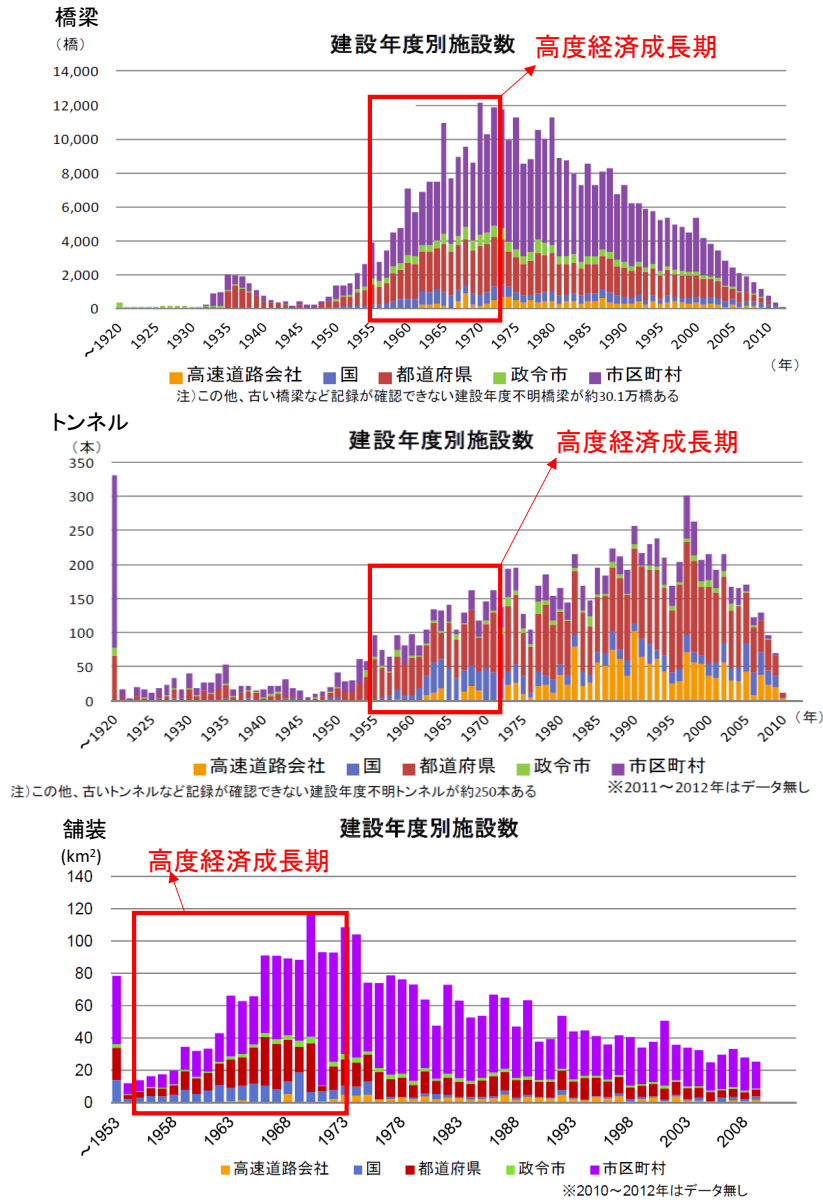


図 1.8 道路構造物の建築数

(出典：国土交通省，道路構造物の修繕及び更新について，

[http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/road\\_maintenance/pdf/29.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/road_maintenance/pdf/29.pdf))

一方、それらの道路構造物は、50 年を経って一斉に老朽化に向かっている。この状況に応じて、内閣府や国土交通省などの関係省庁は、平成 25 年 11 月に「インフラ長寿命化基本計画」を策定し、道路構造物などのインフラの新設から撤去までのライフサイクルの延長を目的に中長期的な維持管理策を推進している。ここで、道路の維持管理を実現するには、参照物として、建設当時の図面が必要とある。

### 1.3.2 図面と道路中心線

道路などの構造物の図面には、一般的に設計図、完成図、現況図（図 1.9）などがある。

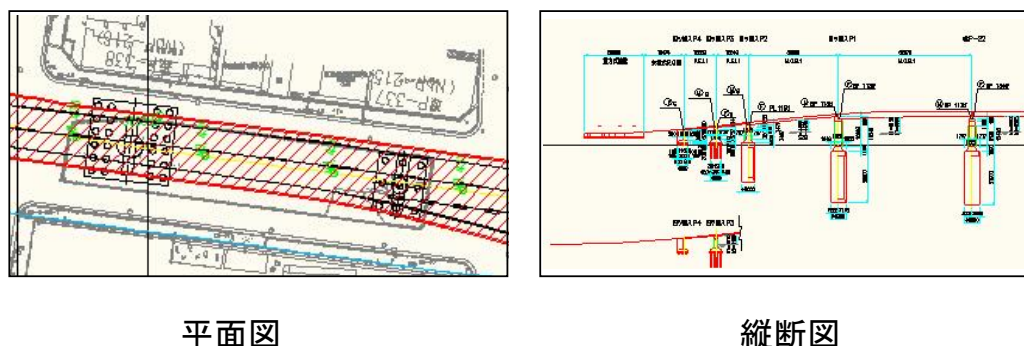


図 1.9 高架橋の現況図

日本では、各種図面を作成するには、AutoCAD[29], Jw\_cad[30], Vectorworks[31], DRACAD[32]など様々な CAD ソフトが使用されている。1990 年代、それらの CAD ソフト間でデータを交換できるように、CAD データ交換標準開発コンソーシアム (SCADEC: Standard CAD data Exchange format in japanese Construction field) は、2000 年に SXF (SCADEC data eXchange Format) [33]形式を開発[34]した。これをきっかけに、国土交通省は、2001 に SXF 形式の図面を CAD の標準形式としての電子納品[35]と過去の図面の電子化の導入により構造物の図面の長期保管を図った。

しかし、1.3.1 項で述べた高度経済成長期に建設された多くの道路構造物に対して、当時パソコンや CAD ソフトが普及していなかったため、それらの図面は紙媒体であった。紙媒体の図面については、各建設会社に約 10~30 年の保管義務[36][37]が付されている。ここで、電子納品の導入時期を考慮すると、高度経済成長期に作成されたそれらの図面は、保管義務が終了した時点で、まだ電子化ができない状態であった。そのため、保管義務が終了した図面は、保管場所の制限により破棄されたり[38]、長期の保管のため、図面が劣化、破損、紛失したりすること[39]が考えられる。また、高度経済成長期に建設された道路構造物は、老朽化[40][41]や自然災害による損害[42]などに伴い、維持管理が頻繁に行われたが、図面の更新がなく、情報の欠落や現況に即していない場合が多くあった。

以上のことから、高度経済成長期に建設された多くの道路構造物に対して、設計図や完成図による維持管理が困難で、現地での再計測[43]による現況図の再生が望まれている。

一般的に、道路図面の作成作業は、まず道路の位置と 3 次元形状を決定する道路中心線からの設計となっている。このことから、現況図の生成において、まず道路中心線の生成が必要である。

## 1.4 道路の計測と線形の生成技術

1.2 節と 1.3 節から、図 1.10 に示すように自動運転においても、道路構造物の維持管理においても、先に道路中心線を生成することが非常に重要であることがわかった。

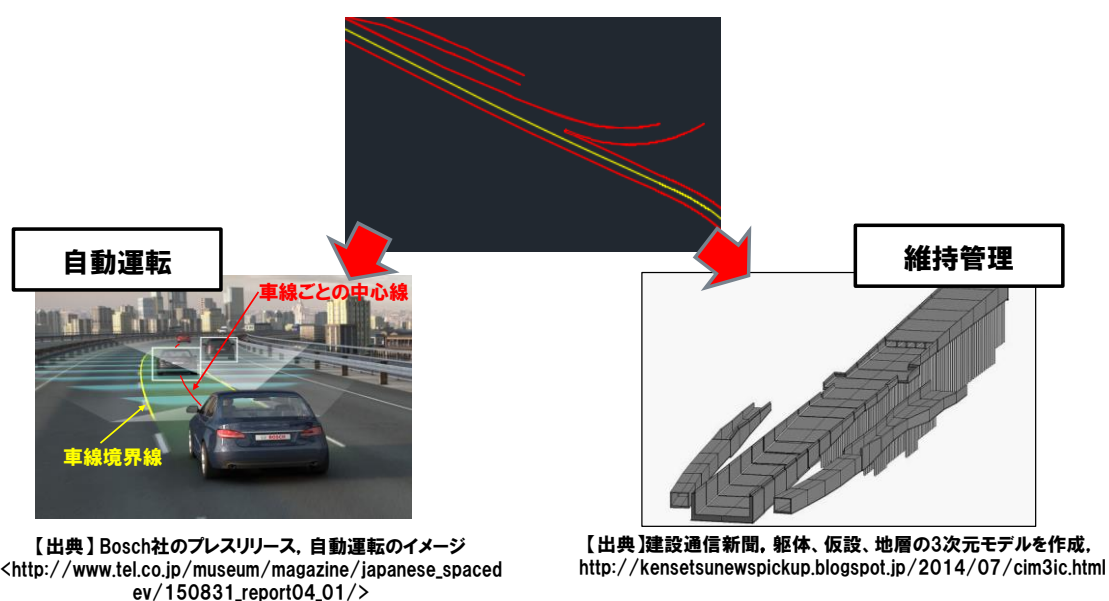


図 1.10 道路中心線を必要とする 2 つの分野

### 1.4.1 現況の計測技術

現況の道路中心線を生成するには、道路構造物を計測する必要がある。しかし、道路構造物を計測すると、一時通行止めなどの措置が必要で、膨大なコストが発生してしまう。そのため、低コストの道路図面の生成技術が望まれている。

図面を迅速に生成する手段として、UAV (Unmanned aerial vehicle) [44], 航空レーザ[45] 地上設置型レーザ, MMS (Mobile Mapping System) [46][47]等の最新のセンシング技術を用いて取得した点群データの活用がある。それぞれの計測技術の特性を表 1.2 に示す。

表 1.2 計測技術の特性

	計測範囲	計測時間	点群密度	計測可能な場所
UAV	狭い	短い	高い	制限なし
航空レーザ	広い	長い	低い	制限なし
地上設置型 レーザ	狭い	長い	高い	人が立ち入り可能な場所
MMS	広い	長い	高い	車両が走行可能な道路と周辺

UAV による計測では、ビデオカメラや GPS アンテナなどの機器を UAV に搭載し、空中から、地形と構造物を計測する。そして、取得した動画像から、画像相関法を利用し、現況の点群データを生成する。この点群データは、密度が高く、高精度な線形解析が可能である。しかし、UAV の飛行時間が短い（約 30～60 分）ため、計測可能な範囲が狭くなっている。このことから、UAV による計測は、広範囲な高架橋などの道路構造物に適用できない。

航空レーザによる計測では、レーザスキャナ、GNSS 測量機、IMU（慣性計測装置）などを航空機に搭載し、UAV より高い高度の空中から地形と構造物を計測する。この技術は、広範囲な計測が可能だが、取得した点群データの密度が低い（約 2 点/m<sup>2</sup>）ため、線形解析の精度が低下し、正確な道路線形を生成できない。

地上設置型レーザは、人が運ぶ計測機器で、固定点による周辺の計測を行う。この技術は、計測時間が長く、取得した点群データの密度も高いが、移動式ではないため、計測可能な範囲が 1 箇所の周辺となっている。このことから、地上設置型レーザによる計測は、UAV と同様に広範囲な高架橋などの道路構造物に適用できない。

MMS（図 1.11）による計測では、GPS アンテナ、IMU（慣性計測装置）、カメラ、レーザスキャナなどの装置（図 1.12）を車両に搭載し、道路を走行したときの軌跡及び周辺の現況を高精度な点群データ（図 1.13）や動画像データなどで取得できる。この技術は、計測時間が長く、点群密度も高く（100 点/m<sup>2</sup>以上）、道路台帳、地形図、基盤地図の整備、道路付属物の維持管理、災害の対策など[48]に活用されている。そのため、MMS は、長距離の道路線形の生成に最も適切だと考えている。

以上のことから、本研究では、高架橋の現況を計測するには、MMS を使用する。



図 1.11 Mobile Mapping System

(出典：三菱電機, MMS Type X(640,440,320,220),  
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/mms/spec.html>)

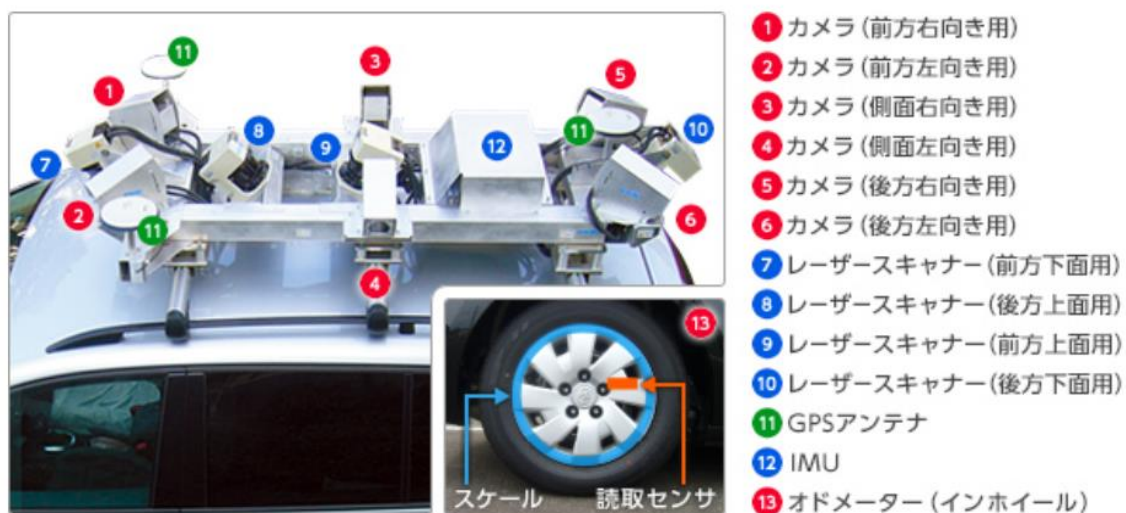


図 1.12 MMS に搭載した装置

(出典：三菱電機, 高精度な三次元計測,  
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/mms/tokucho.html>)



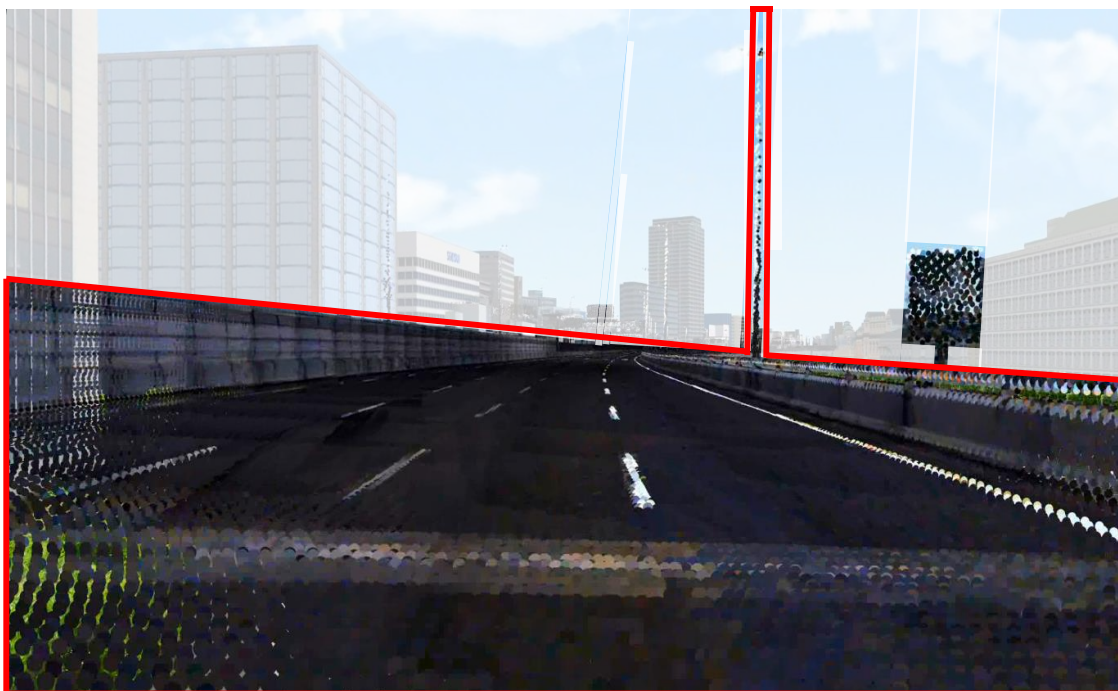


図 1.13 MMS により取得した色付きの点群データ

図 1.12 の MMS では、現実空間の構造物の計測範囲を向上させるため、前後と上下合計 4 つの方向にレーザスキャナを設置している。ただし、MMS は、製造会社や型番により、設置される装置の種類、数、向き方向が完全に異なる場合がある。

図 1.13 の点群データでは、3次元実空間の座標と色属性を持っているが、各点の収集した時間、レーザの反射強度などの属性も取得可能となっている。これらの情報に基づき、高精度な構造物の形状特徴の抽出や、時系列の点群データにより構造物の小さな経年変化の検知などを実現できる。

## 1.4.2 道路線形の生成技術

点群データを用いて道路構造物の図面の再生に関する既研究[49]-[52]では、道路形状の特徴を抽出し、自動的に道路線形の図面を再生することで、省力化を図っている。これらの研究では、生成した図面を市販の CAD ソフトで取り扱えるようにするため、ポリラインやベジェ曲線などを使用し、道路線形の形状を再現している。ポリラインは最も簡単で、線形の点列の密度が高い場合、高精度に道路の形状を表現できる。ベジェ曲線やスプライン曲線などは、複数の制御点により線形を生成し、滑らかな道路の形状を表現できる。

しかし、一般的に、道路の設計に使用される幾何情報（表 1.3）は、道路構造令[53]で規定されている。

表 1.3 道路設計に使用される幾何情報

図面種類	使用可能な幾何情報
平面図	直線, クロソイド曲線, 円弧
縦断図	直線, 2次曲線

表 1.3 から、道路のカーブは、一般的にクロソイド曲線と円弧の 2 種類により設計されていることがわかった。ここで、クロソイド曲線は、急ハンドルを避けるための緩和曲線であり、直線から円弧への曲率変化の連続性を持っている。そのため、クロソイド曲線と前後の線形をスムーズに接続することは、自動運転と道路の維持管理の分野において、非常に重要[54]である。また、電子納品の標準形式である SXF 図面においても、直線、クロソイド曲線、円弧の線形が定義されていることから、正確な道路線形を図面で表現するには、ポリラインやベジェ曲線などではなく、直線、クロソイド曲線と円弧を用いる必要がある。

## 1.5 研究の目的

### 1.5.1 研究の対象

本研究は、道路構造令で定義されている幾何情報を使用し、道路の位置と形状を決定する道路中心線の生成技術を開発する。

道路構造物には、橋梁やトンネルなどがあるが、本研究では、クロソイド曲線が多く使用されている高架橋を研究対象とする。クロソイド曲線は、1.4.2 項の説明のように、曲率が徐々に変化していくため、運転時のハンドルの自然回転を実現できる。そのため、高架橋を対象とした場合、開発した道路線形の生成技術は、走行経路の生成にも適用可能で、自動運転へ適応性が高いと考えている。

### 1.5.2 研究の位置づけ

本研究の位置づけを図 1.14 に示す。

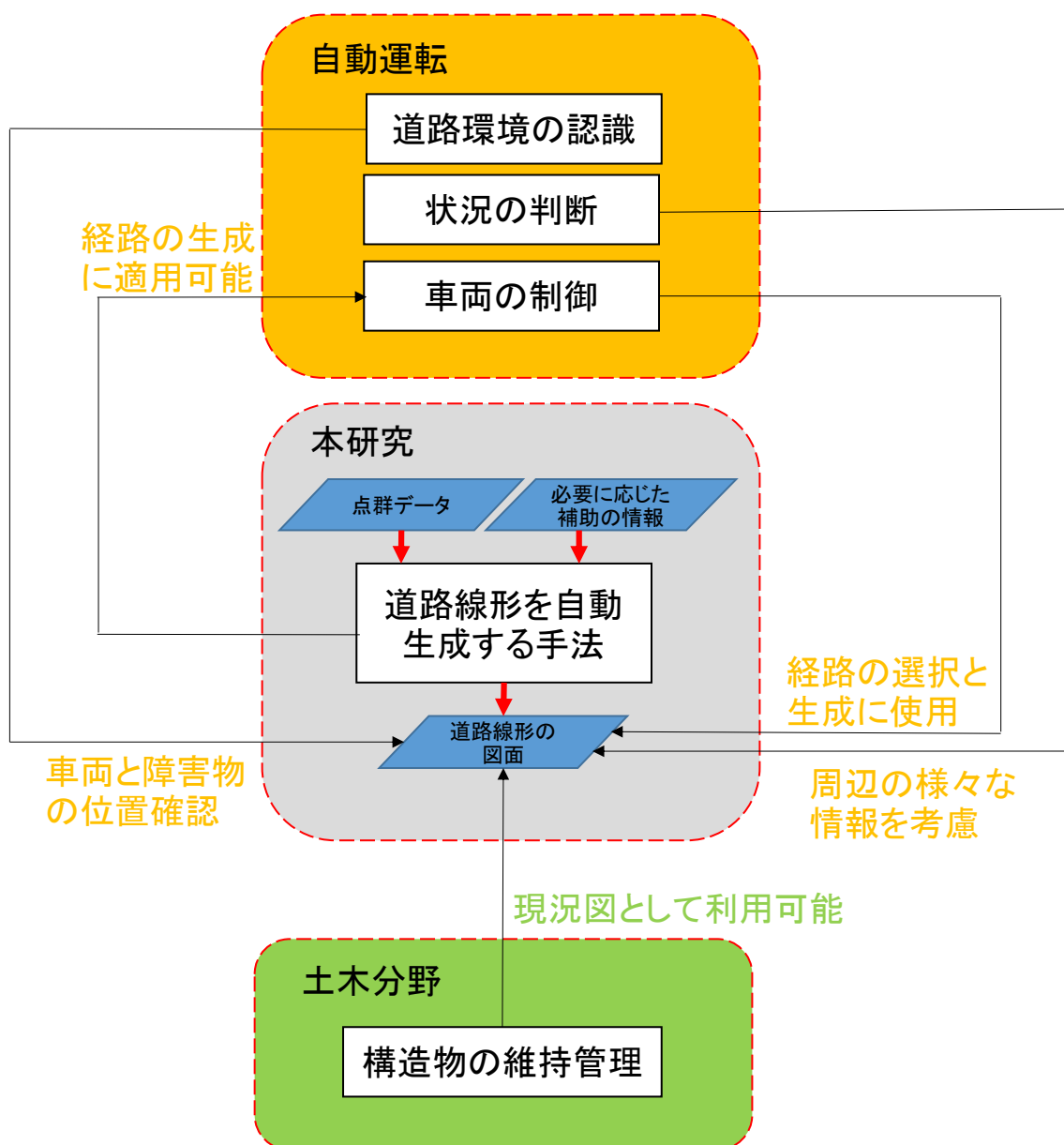


図 1.14 本研究の位置づけ

本研究で生成した線形の図面は、第一に自動運転の様々な技術に使用可能である。例えば、道路環境の認識では、レーダーやレーザスキャナなどのセンサにより検出した障害物は、道路のどの位置に存在するかを確認することで、障害物の種類などを照合可能である。次に、状況の判断では、周辺の総合的な情報をまとめて適切な判断を下すことが可能である。そして、車両の制御では、周辺の走行経路の一部を利用して、適切な新しい経路が生成可能である。最後に、本研究の手法は、経路生成の手法として使用可能である。

また、土木分野において、本研究で生成した現況図は、道路構造物の維持管理に応用可能

である。例えば、高架橋の外形の変状の検知や、道路線形の合理性の判定などが考えられる。

### 1.5.3 研究の手順

本研究は、図 1.15 に示す手順で自動運転のための道路線形の図面の生成技術の確保を目標とする。

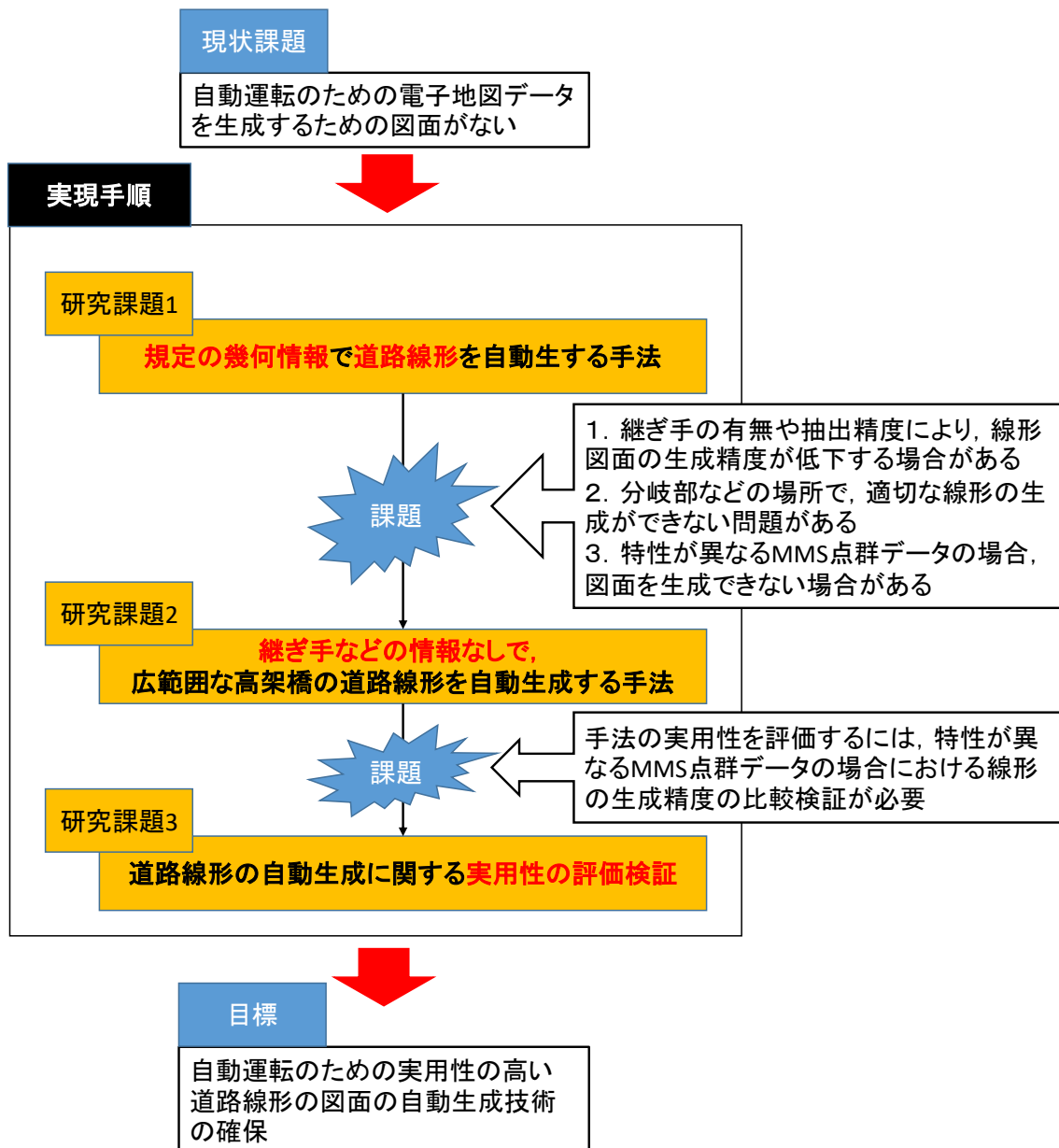


図 1.15 本研究の手順

図 1.15 に示した各研究項目について、以下に概説する。

研究 1 では、線形の生成の基礎技術を確保する。そこで、まず、MMS の点群データから、高架橋の道路線形の特徴点を抽出する。そして、継ぎ手などの情報を利用し、特徴点列を分割し、それぞれの幾何情報を判定しベクトルを算出する。本項目の研究成果は、2012 年 3 月と 2014 年 3 月の土木学会論文集 F3（土木情報）[55][56]に掲載された。

研究 2 では、線形の生成精度と手法の実用性を向上させる。また、将来的に、継ぎ手がない一般道路や、しっかり整備されていない高速道路に対応するため、まず、継ぎ手などの情報を利用せずに、より高精度な線形の生成手法を提案する。そして、高架橋の分岐部において、路線ごとに線形を分類する手法を提案する。最後に、特性が異なる MMS 点群データでも、線形を生成できるように、手法を改良する。本項目の研究成果は、2016 年 11 月のフエジ学会の知能と情報[57]に掲載された。

研究 3 では、実用性を検証するため、特性が異なる 2 つの MMS 点群データから、生成した線形の精度を比較する。そして、両方の点群データから、同程度の精度で線形の生成が可能かどうかを明らかにする。

本論文は、これらの成果を基に開発した技術と研究の今後の展開について整理したものである。

## 1.6 本論文の構成

本研究では、まず、第 2 章で、図面の生成の既存手法について調査し、それらを適用した場合の問題点を洗い出し、研究の着眼点と構想について論じている。第 3 章では、高架橋の特徴点の抽出手法と継ぎ手の位置を利用した線形の解析手法を提案し、その有用性を議論する。第 4 章では、異なる MMS 点群データの特性を考慮し、継ぎ手の位置情報なしで、分岐部を含めた高架橋の道路線形の生成手法を提案し、その有用性を検証する。第 5 章では、特性が異なる MMS 点群データから線形の生成精度を比較し、分析することで提案システムの実用性を検証する。最後に、第 6 章では、研究成果の総括と本研究成果の今後の展開について述べる。

## 第 2 章

### 研究の流れ

## 第2章 研究の流れ

### 2.1 研究の適用対象

本研究では、MMS の点群データから、高架橋の道路線形を自動生成するシステムを開発する。これを実現するには、まず、特徴点の抽出精度を向上させるため、膨大な点群から、高架橋以外の点群を除去する。そして、高架橋の道路線形の特徴点を抽出する。最後に、抽出した特徴点列から、線形の幾何情報を解析し、ベクトルを計算する。

以上の研究対象に関する既存研究の手法とその課題について調査した結果を次節に整理する。

### 2.2 既存研究の提案手法と課題

#### 2.2.1 ノイズ除去に関する既存研究

一般的に、道路におけるノイズは、車両や、電柱などが対象とされる場合が多い。そのため、道路上の車両の除去や電柱などの構造物を認識する研究[58]-[61]が多く行われていた。

しかし、高架橋を対象とした場合には、レーザスキャナの計測距離が長いため、両側に存在する膨大なビルの点群データ（図 2.1）も取得している。これにより、高架橋の道路線形の特徴の抽出精度が低下する場合や、処理のコストが増加する場合は考えられる。そのため、高架橋の両側のビルなどの点群データをノイズとして除去する必要がある。

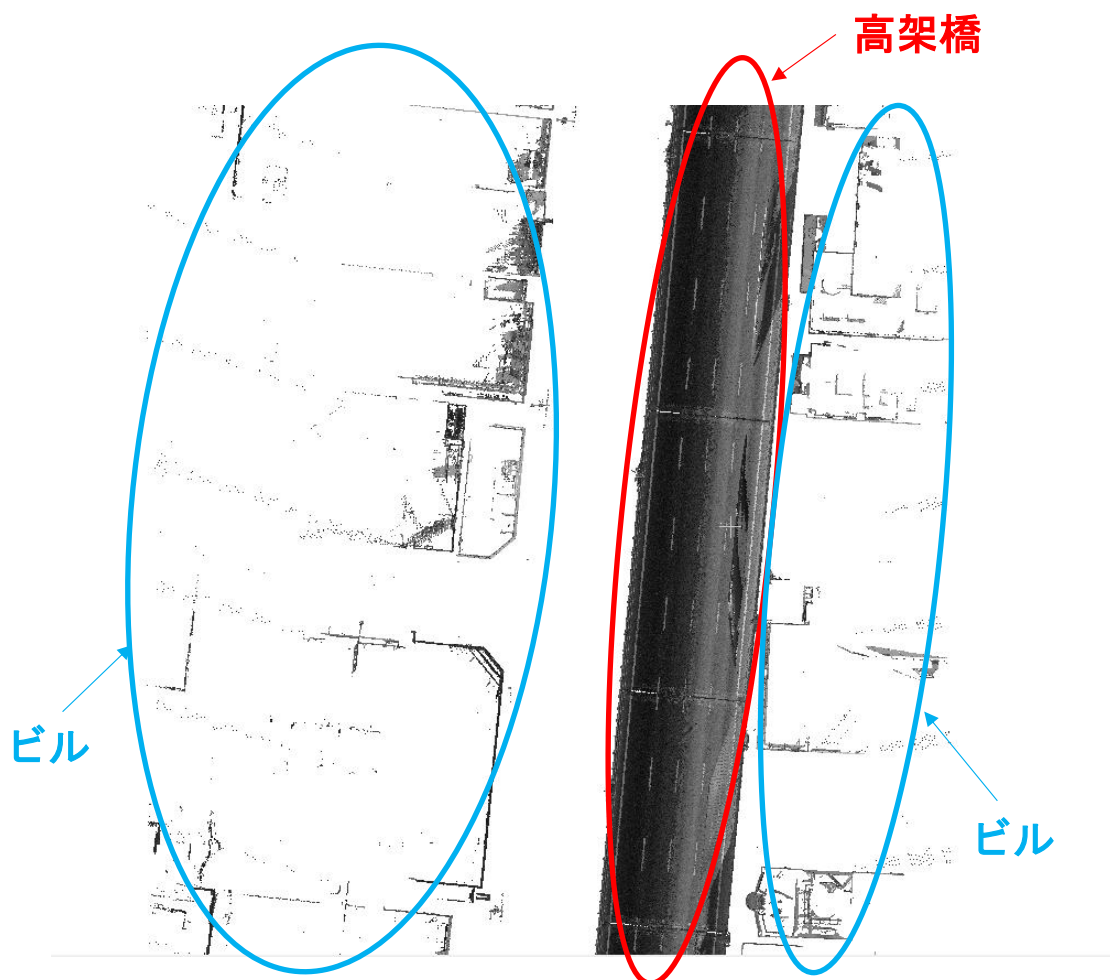


図 2.1 高架橋とビルの点群データ

本研究では、対象となる高架橋の両側のビルをノイズとする。これを実現するには、点群データから、ビルを抽出する必要がある。ビルを抽出する多くの研究[62]-[64]では、航空レーザの点群から、屋根を認識することで実現している。しかし、MMS で取得した点群データは、航空レーザと異なり、図 2.1 のように、多くのビルに屋根の点群がない。そのため、それらの既存研究の手法をそのまま本研究に適用できない。そこで、本研究は、それらの研究の中にあるビルの点群をグルーピングする手法[64]に着眼する。この手法は、点群の各点間の距離により、クラスタリングの最短距離法[65]を用いて、点群データをビルごとに分割している。高架橋の周辺のビルの点群データは、屋根の点群の有無にかかわらず、必ず高架橋の点群データから離れている。そのため、点群のグルーピングを行うと、高架橋を分離可能と考える。一方、長距離の高架橋を計測した場合、処理の計算コストは、点群データの量の増加に伴い、非常に高くなる場合がある。そのため、計算コストを抑えた処理手法が望まれ



ている。そこで、計算コストを抑えた点群データの処理手法[66]が提案されている。この手法では、3次元の点群を2次元の格子に投影することで、点群データの数と情報量を減らし、コストの低減を実現している。本研究は、この手法を参照し、低コストの点群のグルーピング手法を開発する。それによりビルなどの点群データを除去する。

## 2.2.2 道路線形の特徴点の抽出に関する既存研究

高架橋の道路線形を解析するには、まず、高架橋全体の点群データから、道路線形の特徴点を抽出する必要がある。本研究では、図 2.2 に示すように、高架橋両側の壁と路面の交差点を特徴点、連続する特徴点を特徴点列とする。

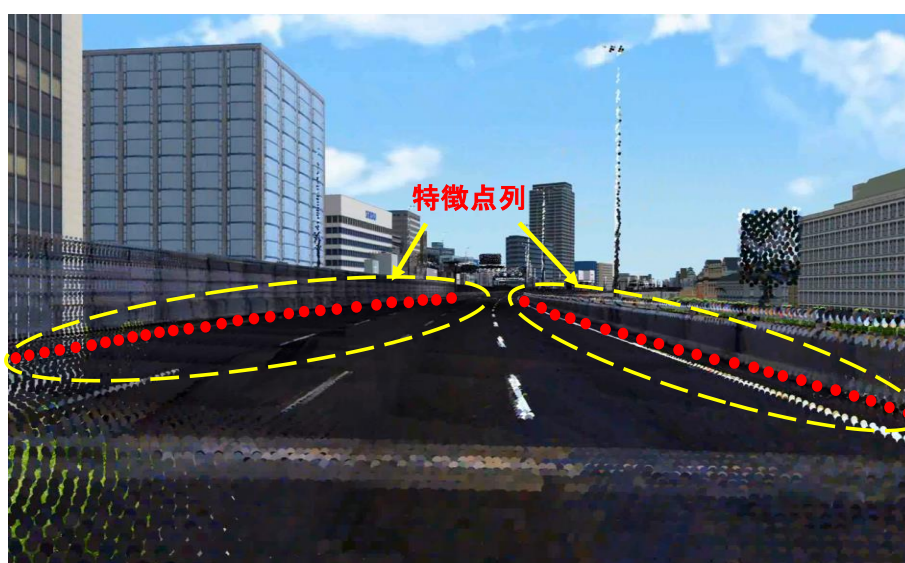
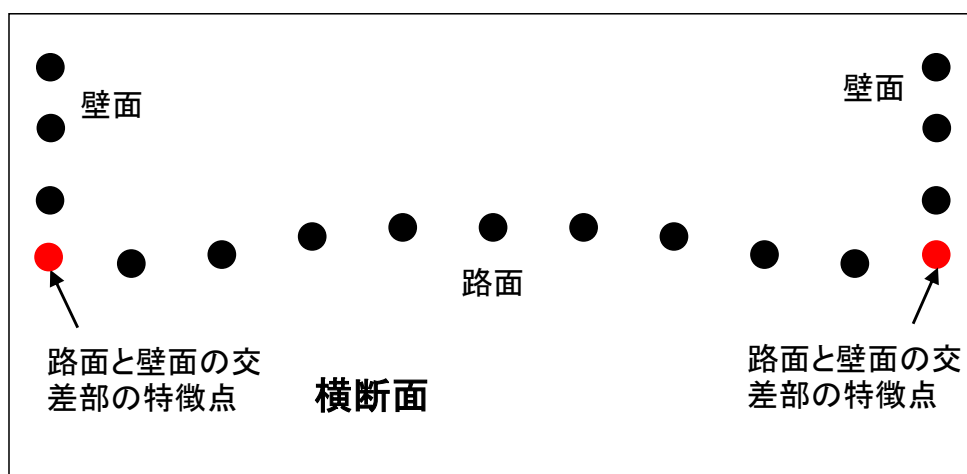


図 2.2 高架橋の特徴点と特徴点列

2つの面の交差部分を抽出するには、各点の法線ベクトルを算出する手法[67]-[73]が一般的である。しかし、法線ベクトルを計算する際に、メッシュの大きさを検討する必要がある。小さすぎる場合、法線ベクトルを正しく算出できない場合がある。一方、大きすぎる場合、交差部の認識が困難な問題がある。さらに、膨大な点群データから、高精度に全部の点の法線ベクトルを算出するには、非常に大きい計算コストがかかる問題がある。

本研究では、2.2.1項で述べたように3次元の点群データを2次元に投影することで計算コストを抑える手法を考案する。その際、投影の2次元面は、道路の横断面を使用する[59]。横断面から特徴点を抽出する手法としては、点列の高さを2回微分し、値の高いまたは低い場所を変化部（図 2.3）として探索する手法が一般的である。

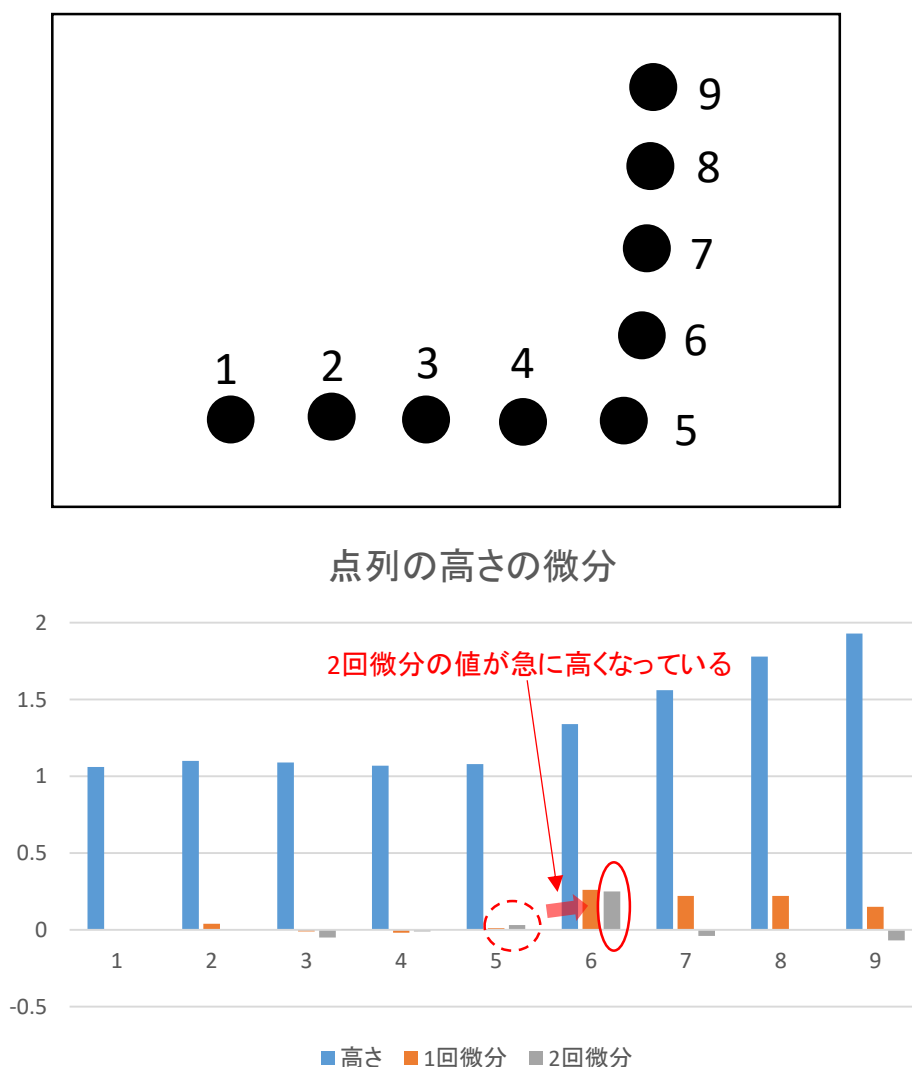


図 2.3 点列の高さとその微分値

しかし、この手法を道路の点群データに適用すると、誤抽出が多く出る問題がある。自動

車道路の路面は、排水勾配を考慮して設計されているため、路面が徐々に変化している。また、MMS の点群データの密度は、計測対象が遠くなると、低くなる性質がある。この2つのことから、点群の密度が低くなると、断面における連続する2点は、非常に離れるため、高さの2回微分値も高くなる。これにより、路面上の点が特徴点として抽出される場合がある。

高さの微分値を用いる手法以外に、様々な手法[74]-[76]が提案されている。研究[74]では、特徴点の標高値と走行線に近い点の標高値の差が 0 に近いという特徴を用いて特徴点の抽出を試みている。しかし、この手法は、路面の排水勾配を考慮していないため、水平でない路面では特徴点を抽出できない課題がある。

研究[75]では、横断面を等間隔に分割し、それぞれの部分の高さを分析している。しかし、この手法では、路面部分の情報の抽出を目的としているため、境界部の抽出精度を求めている。そのため、この手法は、高精度な道路線形の形状の特徴を必要とする本研究には適用できない。

研究[76]では、境界部の点群が水平上に重なるという特徴を利用し、境界部の線形を生成している。しかし、その手法では、点の密度に応じて、パラメータの調整が必要で適用性が低い問題がある。一方、その発展の研究[77]では、点群の高さのヒストグラムの変化を注目している。この手法は、歩道と車道の路面の高さのヒストグラムが高い特徴を利用し、歩道と車道の境界線を抽出している。しかし、高架橋を対象とした場合には、歩道がない問題がある。また、高架橋の路面は、横断勾配や排水勾配があるため、ヒストグラムによる統計処理が困難である。

以上のことから、高架橋の道路線形の特徴を抽出するには、路面の横断勾配に依存しないで、排水勾配を考慮した手法を考案する必要がある。そこで、本研究では、横断面の全体の勾配の変化に着眼し、高精度な特徴点の抽出手法を提案する。

### 2.2.3 線形の解析手法に関する既存研究

道路の線形解析手法については、第1章で述べたように、多くのCADソフトが線形を認識できるように、ポリラインや、スプライン、ベジェなどの曲線を利用する研究が多い。しかし、道路構造令に規定されている幾何情報は、平面上の直線、クロソイド曲線、円弧と縦断面情報直線、2次曲線である。そこで、Gikasらは、規定されている幾何情報で線形を生成して、各点間の位置関係を利用し、おおよその曲率を算出することで、各幾何情報の範

圏を推測し、ベクトルを算出している[78]. 一般的に、直線、クロソイド曲線と円弧のそれぞれの曲率変化は図 2.4 に示すように、0 のまま、緩やかな変化、0 でない値のままになっている.

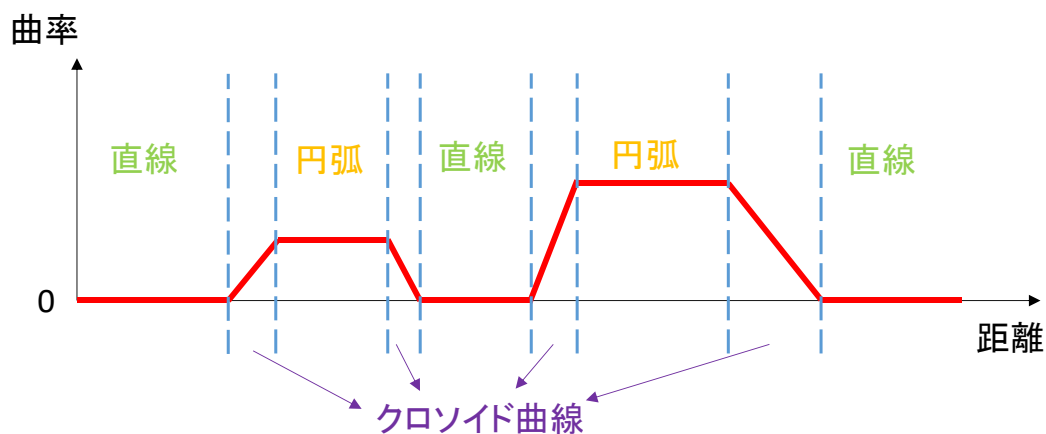


図 2.4 各幾何情報の曲率変化

しかし、道路の両側に抽出された特徴点は、点群密度や、抽出精度により、少しの位置誤差が発生する。それにより、算出された曲率は、図 2.5 に示すように各幾何情報の境界があいまいになっている場合が多い。そのため、この手法は本研究に適用できない。

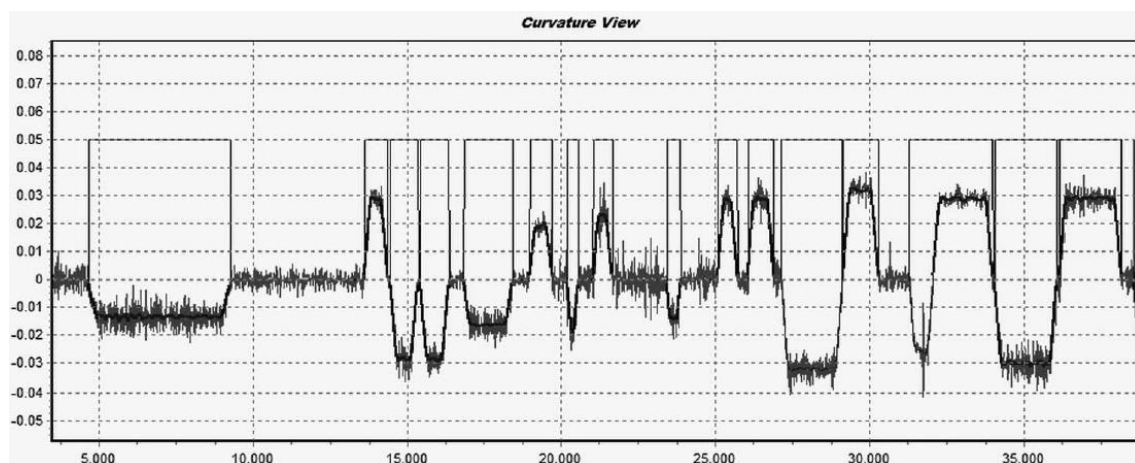


図 2.5 実際の道路の曲率変化例

(出典：Gikas, V. and Stratakos, J. A Novel Geodetic Engineering Method for Accurate and Automated Road/Railway Centerline Geometry Extraction Based on the Bearing Diagram and Fractal Behavior[78])

そこで、本研究では、まず、第3章にて、高架橋がスパンごとに設計されていることに着眼し、継ぎ手の位置情報で線形を分割することによる解析手法を提案し、生成した線形の精

度を検証する。

一方、線形の幾何情報の区間の特定により線形のベクトルを計算する技術では、生成した線形の接続が不自然な場合がある。そのため、線形の生成精度を向上させるため、第4章では、継ぎ手などの情報なしでの解析手法を提案し、システムを改良する。最後に、第5章では、異なる特性の MMS 点群データを用いて改良したシステムの実用性を検証する。

## 第 3 章

# 道路構造令に規定されている 幾何情報で線形を自動生成する 手法

## 第3章 道路構造令に規定されている幾何情報で 線形を自動生成する手法

### 3.1 手法の概要

本章では、自動運転のための線形の自動生成を目的として、高架橋の道路形状の特徴点を抽出し、道路構造令に規定されている幾何情報で線形を生成する手法を提案する。ここで、道路線形の幾何情報を認識するため、高架橋がスパンごとに設計されることに着眼し、継ぎ手の位置により線形を分割する。実証実験では、MMS で実際の高架橋を計測し、取得した点群データから本提案手法により出力した線形の精度と現況の CAD 図面と比較し、提案手法の有用性を検証する。

本章の位置付けを図 3.1 に示す。

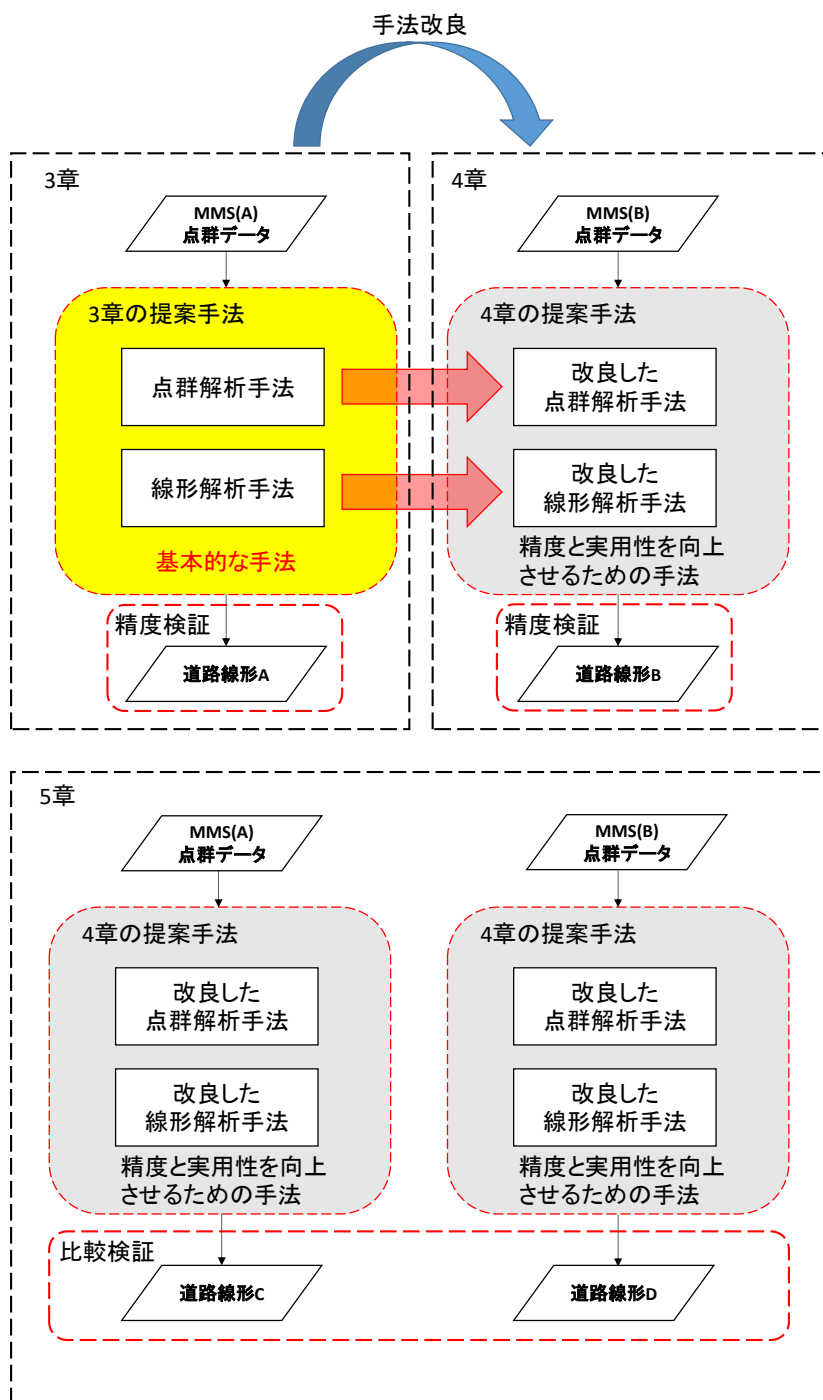


図 3.1 本章の位置づけ

本章では、基本的な技法として、点群解析と線形解析の各手法を提案する。そして、実証実験を通し、生成した線形の精度を評価する。

本章では、自動運転のための線形を生成するため、以下の3つ目標の実現を目指す。

1つ目は、道路構造令に規定されている幾何情報のみで線形を生成することである。第1



章の説明のように、道路の平面線形は、直線、クロソイド曲線と円弧により、縦断線形は、直線と2次曲線により設計されている。そのため、自然な自動運転を実用するには、道路の設計上の幾何情報のみを使用する必要がある。

2つ目は、生成する線形の精度が0.70m以内に抑えることである。日本では、自動車メーカーと測量会社が連携して、電子地図データの作成仕様やメンテナンス手法などの検討を進めているが、現在において、まだ詳細な精度基準が定まっていない状態である。一方、現在の電子地図データは、道路基盤地図データを基に線形などの情報を追加している。このことから、現在において生成する線形の精度は基盤地図データの精度と同等の必要があると考える。道路法施行規則第二条[79]によると、道路関連の平面図の縮尺は1000分の1以上と規定されている。そのため、線形の生成精度は、地図情報レベル1,000に規定されている水平0.70mと標高0.33m以内の誤差精度が望まれている。

3つ目は、道路の線形に使用されるクロソイド曲線の計算コストを抑えることである。近似線形の数式を算出するには、最小二乗法やハフ変換[80]などの手法がある。しかし、それらの手法では、パラメータ数が多いクロソイド曲線式に対して計算コストが膨大になる上に算出できない場合がある。そのため、低計算コストで算出可能な手法が必要となる。

## 3.2 提案システム

本研究は、以上の3つの目標の実現を目指し、図3.2に示すシステムの各手法を提案する。

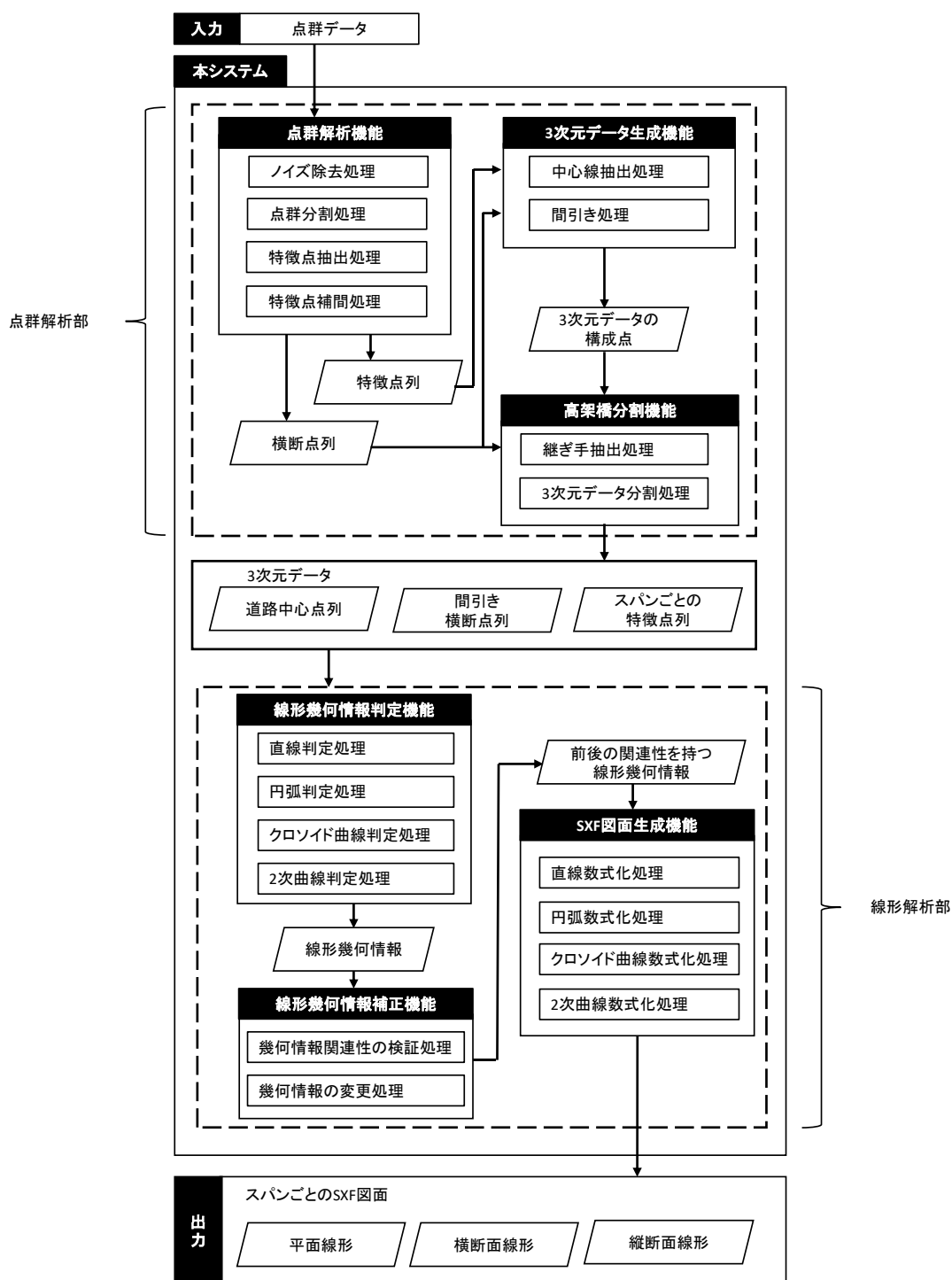


図 3.2 道路構造令に規定されている幾何情報で線形を自動生成するシステム

本システムでは、MMS により取得した高架橋の点群データを入力データとする。また、本システムは、点群解析部と線形解析部により構成される。点群解析部では、図 3.2 に示すように、まず、MMS で取得した高架橋の点群データを解析することで、点群データの平面形状と縦断形状、および横断形状を示す点列を取得し、3次元データを生成する。次に、点

群データの継ぎ手を抽出し、スパンごとに切り分け可能な情報を保持した 3 次元データを生成する。

線形解析部では、図 3.3 に示すように分割された点列から、線形ベクトル情報の算出に必要な線形幾何情報を取得する。さらに、スパン前後の線形の幾何情報の関連性を考慮し、それらの補正を行うことで、線形の幾何情報の認識精度を向上させる。最後に、スパンごとの線形の幾何情報に対応した数式のパラメータを算出し、線形を生成する。

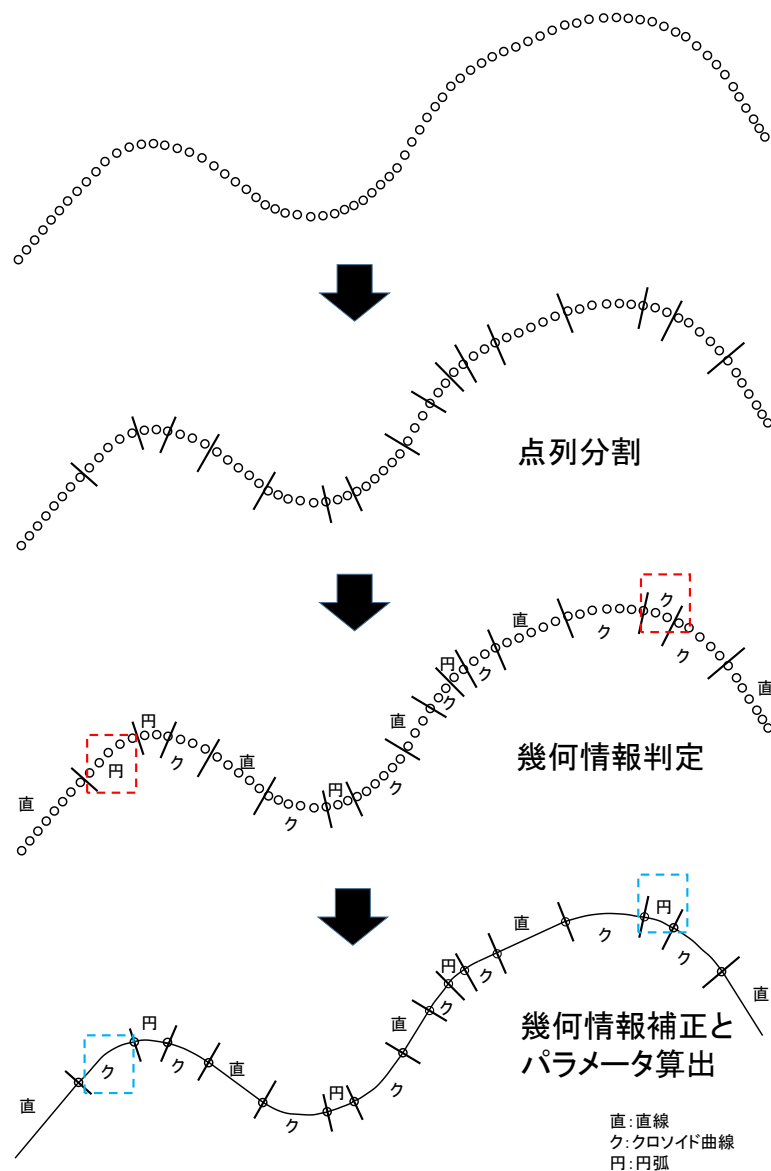


図 3.3 線形解析部のイメージ

## 3.3 点群解析部

点群解析部は、点群解析機能、3次元データ生成機能と高架橋分割機能により構成される。点群解析機能では、点群データから、高架橋の特徴点を抽出する。そして、データ欠損部を補間し、横断点列と特徴点を出力する。3次元データ生成機能では、自動運転に重要な道路中心線情報の抽出と横断点列の間引きを行う。高架橋分割機能では、生成した特徴点列を継ぎ手などの情報で分割する。

### 3.3.1 点群解析機能

本機能は、ノイズ除去処理、点群分割処理、特徴点抽出処理と特徴点補間処理により構成される。

ノイズ除去処理では、高架橋を対象とした3次元データを生成するため、MMSにより取得した点群データから高架橋以外の構造物を示す点群をノイズとして除去する。点群分割処理では、MMSに搭載されたレーザスキャナの特性を利用し、点群データを複数の横断点列に分割する。特徴点抽出処理では、各横断点列の特徴点と両側壁の頂点を抽出する。特徴点補完処理では、計測車両以外の車両などの障害物により発生した測量データの欠損を補うため、データ欠損の生じた前後の横断点列を用いて特徴点を補間する。

#### (1) ノイズ除去処理

本処理では、MMSを用いて取得した点群データから高架橋の3次元データを生成する前処理として、図3.4に示すように、道路周辺のビルなどの構造物を示す点群を除去する。これにより、3次元データの生成に影響する点を大量に除去する。

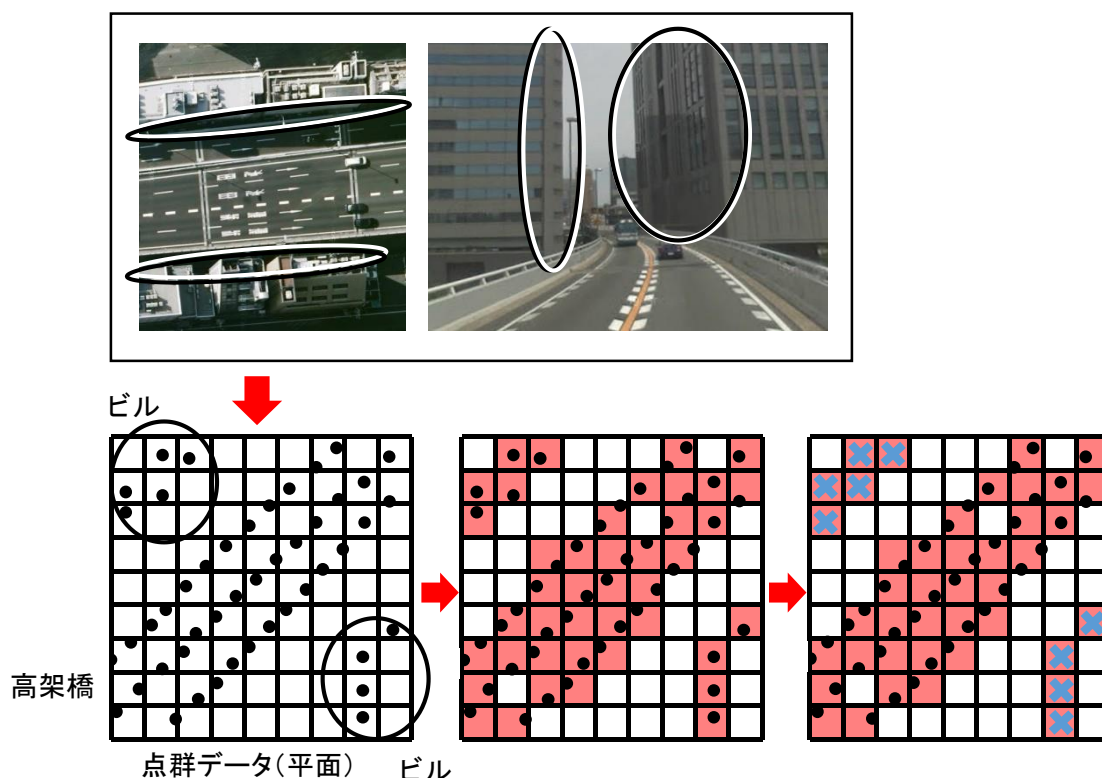


図 3.4 ノイズ除去処理

本処理は、第 2 章で述べたように計算コストを抑えた手法を提案する。具体的には、まず、 $x, y$  平面上の格子状の領域を作成する。次に、MMS を用いて取得した点群データを 2 次元の格子領域に投影する。そして、領域上に点群データが存在する格子と、存在しない格子とでラベリング処理による点群データのグルーピングを行う。最後に、ラベリング結果から、最も大きな集合の点群データを高架橋の領域として取得し、それ以外の集合に含まれる点群データをノイズとして除去する。

## (2) 点群分割処理

本処理では、自動運転に有用な横断情報と道路線形の特徴点を抽出するため、図 3.5 に示すように、高架橋の点群データを横断点列ごとに分割する。

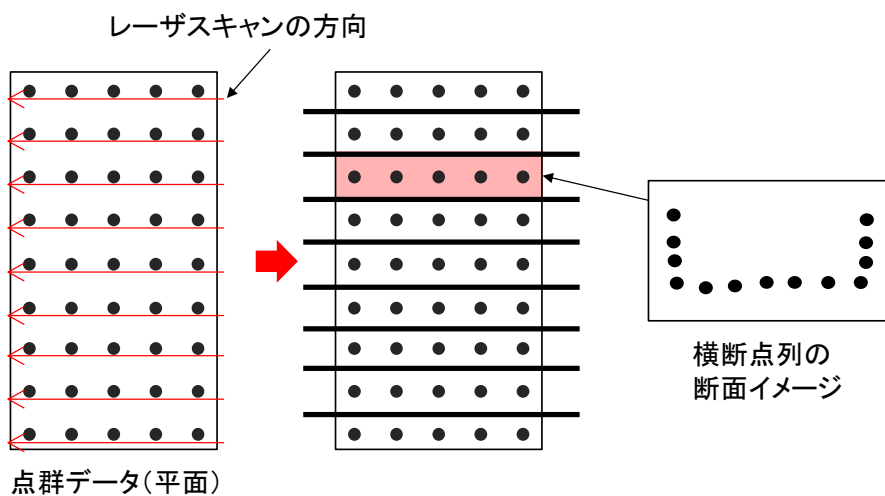


図 3.5 点群分割処理

本研究で対象とする MMS に搭載されたレーザスキャナは、進行方向に対して横断的に連続した計測点を取得するラインスキャン方式が採用されている。そのため、本処理では、この特性を利用した手法を提案する。まず、点群データの各計測点の座標から、各計測点間のレーザスキャン方向を算出する。そして、レーザスキャン方向が一致する集合を 1 つの横断点列として、点群データを複数の横断点列に分割する。

### (3) 特徴点抽出処理

本処理では、第 2 章で述べたように壁面と路面の交差部にある道路線形の特徴点を抽出する。また、道路上の補足情報として、両側の壁の頂点を抽出する。そこで、第 2 章で述べた問題に対して、路面全体の勾配を考慮した手法を考案する。

本処理の詳細を図 3.6 に示す。

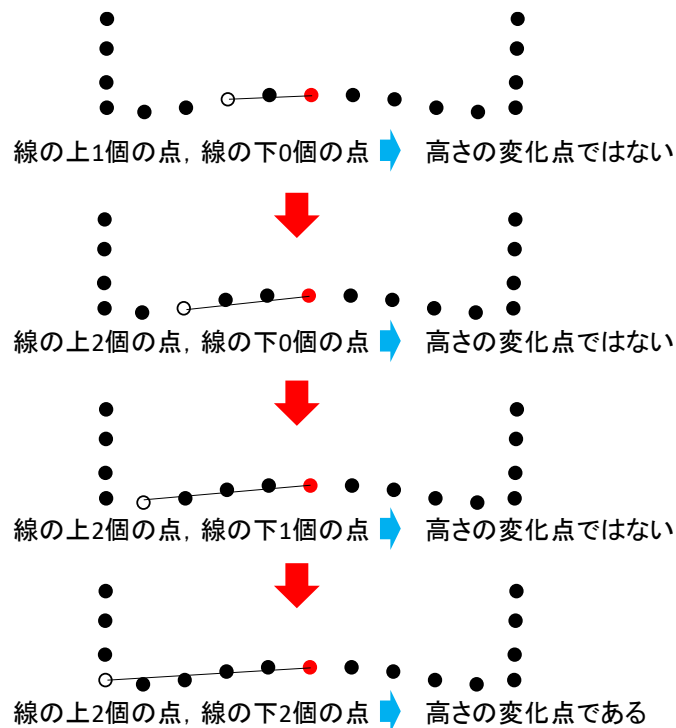


図 3.6 特徴点抽出処理

本処理のアルゴリズムの流れを次に示す。ここで、各横断点列の中央点を  $p_i$  とし、中央点の左右の点を  $p_{i+1}$ 、注目点を  $p_{i+j}$  とする。

- Step.1 : 中央点  $p_i$  と注目点  $p_{i+j}$  を結ぶ線を生成する。
- Step.2 : 中央点  $p_i$  と注目点  $p_{i+j}$  の間に存在する点  $p_{i+1}, p_{i+2}, \dots, p_{i+j-1}$  を取得する。
- Step.3 : Step.2 で取得した各点が Step.1 で生成した線に対して上にある点と下にある点を集計する。
- Step.4 : Step.3 の集計結果において、中央点  $p_i$  と注目点  $p_{i+j}$  を結ぶ線の下にある点の数が上にある点の数を超過した場合は、Step.5 に移行する。超過しない場合は、点  $p_{i+j+1}$  を注目点として取得し、Step.1 に戻る。
- Step.5 : 注目点  $p_{i+j}$  を高さの変化する特徴点として抽出し、横断点列の左右端を点端の特徴点として抽出する。

この手法の特徴としては、水平位置が壁面に近い点が多く抽出されることである。

壁面の頂点については、両側において最も高い点を頂点とする。

#### (4) 特徴点補間処理

本処理では、図 3.7 に示すとおり、MMS から取得した点群データに欠損が生じた場合、

誤った特徴点に対して、前後の横断点列を用いて特徴点を補完する。

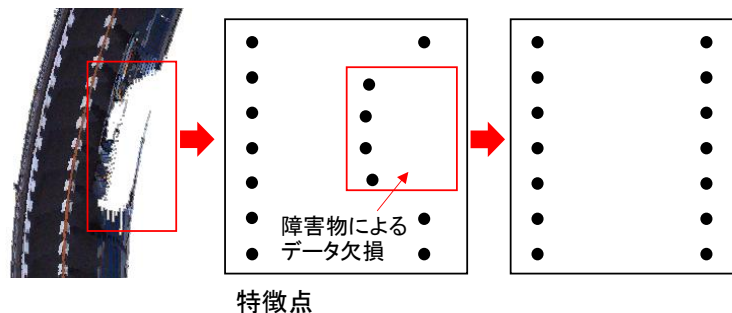


図 3.7 特徴点補間処理

具体的には、まず、各横断点列の路面幅の長さ（以下、「断面幅」）を計算する。次に、図 3.7 のように前後の横断点列と比較して断面幅が急激に変化する横断点列を障害物によるデータ欠損箇所と判断し、前後の断面の特徴点の位置情報から本来の特徴点位置を推定する。そして、推定結果を用いてデータ欠損の生じた横断点列の特徴点を補完する。

### 3.3.2 3次元データ生成機能

自動運転や道路構造物の維持管理に適用するには、道路中心線のみならず、連続する各横断面情報も必要である。さらに、それらの情報は、自動運転システムが容易に取得可能なデータ量まで間引く必要がある。そこで、本処理では、まず図 3.8 に示すように重要な道路中心線形を抽出する。そして、自動運転のシステムが容易に横断情報を取得するため、横断面の間引きを行い、点群データの数を減らす。

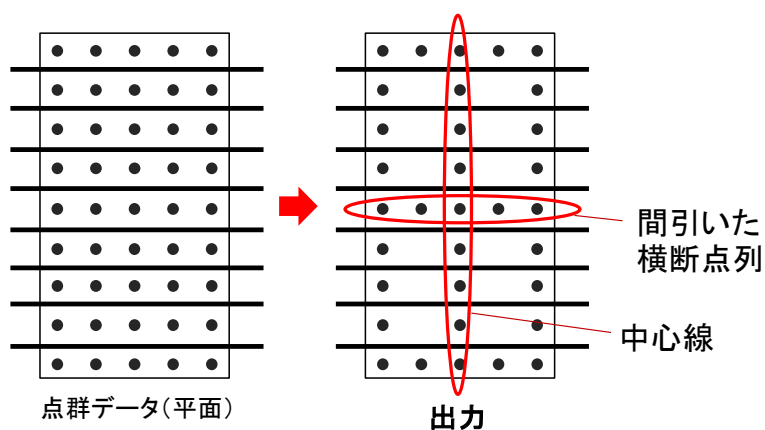


図 3.8 3次元データ生成機能

本処理は、中心線取得処理と間引き処理の 2 つの処理で構成される。中心線抽出処理で



は、道路の平面・縦断形状を示す中心線を取得するため、点群分割処理で分割された各横断点列から中央点を抽出し、連続した中央点の点列を中心線として取得する。横断点列間引き処理では、MMS による膨大なデータ量を軽減するため、まず、各横断点列から特徴点と中央点以外の点群に対して間引き処理を行う。そして、間引き処理によって残された点群を構成点とし、3次元データを生成する。

### (1) 中心線抽出処理

本処理では、図 3.9 に示すように自動運転に重要な要素である中心線を取得する。

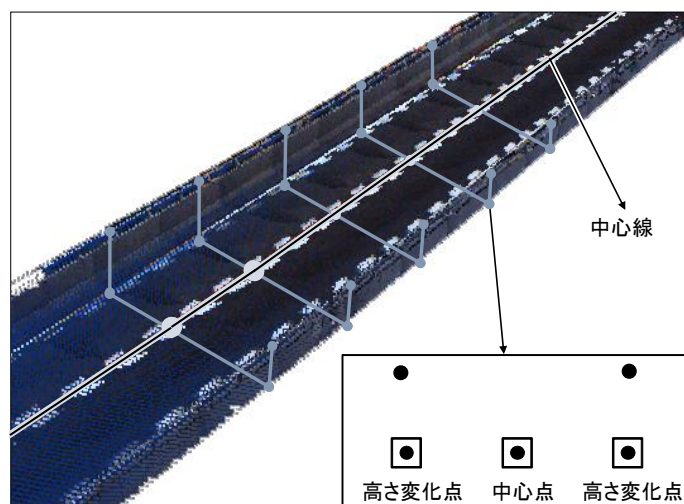


図 3.9 中心線処理

具体的には、各横断面点列の中心点を連続した点列として取得する。このとき、この中心点で構成される点列を高架橋の中心線とする。

### (2) 間引き処理

本処理では、図 3.10 に示すように膨大なデータ量をもつ点群データから、自動運転システムが容易に利用可能なデータ量まで点群データを間引く。

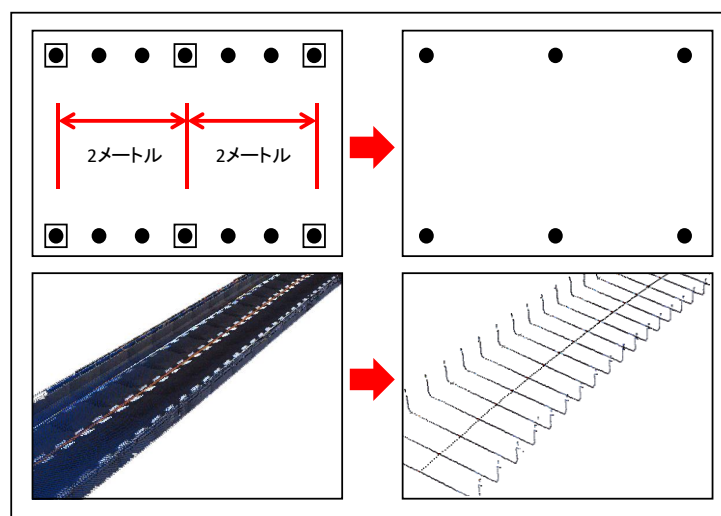


図 3.10 間引き処理

具体的には、まず、構成点となる3次元データを生成して出力する。そして、高架橋の詳細な断面形状を示す情報として、特徴点と同様に間引きを行った横断点列を3次元データと合わせて出力する。なお、3次元モデルの構成点となる横断点列に属する特徴点の取得の距離間隔は、自動運転への適用場面に合わせて、利用ユーザが任意に変更可能な仕様とした。

### 3.3.3 高架橋分割機能

本機能では、線形を構成する各幾何情報を認識できるように、3次元データを分割する。本機能は、継ぎ手抽出処理と3次元データ分割処理の2つの処理で構成される。継ぎ手抽出処理では、MMSから取得できる色情報で継ぎ手の位置を抽出する。3次元データ分割処理では、スパンごとに3次元データと特徴点列を分割する。

#### (1) 継ぎ手抽出処理

本処理は、図 3.11 に示すように MMS 点群データの路面部の色情報を用いて高架橋を分割するための継ぎ手を抽出する。

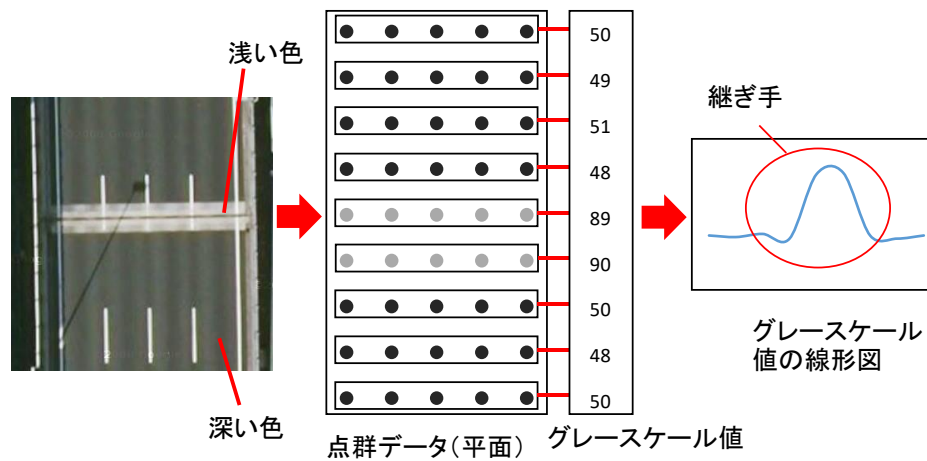


図 3.11 継ぎ手抽出処理のイメージ

具体的には、まず、継ぎ手の抽出精度を向上させるため、点群座標データから白または黄色の路面標識の点群を除去する。次に、各横断点列のグレースケール値の平均を算出する。そして、横断点列の算出結果を前後の横断点列と比較し、閾値以上の変化量が連続する場合は、その箇所を継ぎ手として抽出する。

## (2) 3次元データ分割処理

本処理では、図 3.12 に示すように抽出された継ぎ手ごとに3次元データを分割し、スパンごとの3次元データを構築する。

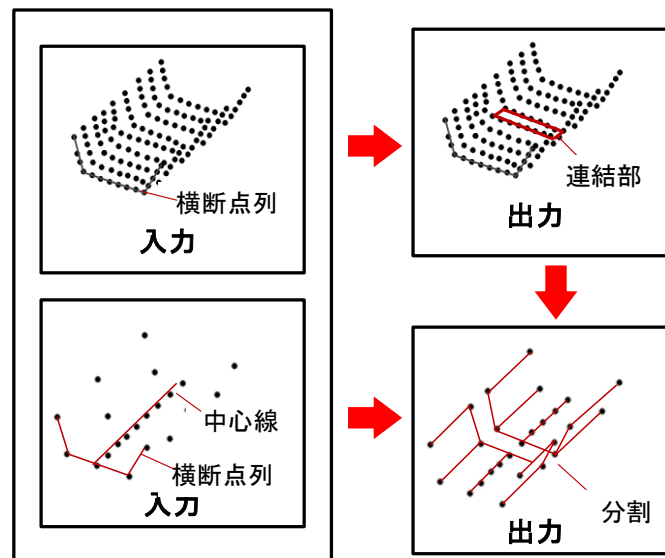


図 3.12 3次元データ分割処理

具体的には、ジョイント部を示す連続の点列から、真ん中の点列を探索する。そして真ん中の点列とその後の点列の間から、3次元モデルを分割する。

## 3.4 線形解析部

線形解析部は、線形幾何情報判定機能、線形幾何情報補正機能と SXF 図面生成機能により構成される。線形幾何情報判定機能では、特徴点列をスパンごとに解析し、その形状の特徴から幾何情報を判定する。線形幾何情報補正機能では、判定された幾何情報が道路構造令に満たさない場合に対して、補正を行う。SXF 図面生成機能では、道路線形の図面の生成に必要な各幾何情報のパラメータを算出する。

### 3.4.1 線形幾何情報判定機能

線形の幾何情報を抽出するには、その種類を把握する必要がある。道路の平面線形には、直線、円弧、クロソイド曲線が用いられる。また、縦断線形には、直線と2次曲線が用いられる。本機能では、3次元データ生成部の出力の一部である継ぎ手の位置を線形の始点と終点の候補とし、各線形の幾何情報を判定する。

本機能は直線判定処理、円弧判定処理、クロソイド曲線判定処理と2次曲線判定処理により構成される。

#### (1) 直線判定処理

本処理では、対象線形の近似直線を算出し、平均誤差により対象線形が直線かを判定する。具体的には、最小二乗法を用いて対象線形の近似直線を生成し、図 3.13 に示すように各特徴点から近似直線への垂線距離の平均値を平均誤差として算出する。平均誤差が小さい場合、対象線形を直線と判定する。判定の基準値は MMS の計測精度を参照する。

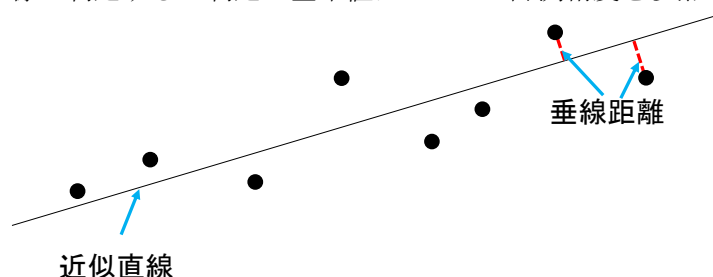


図 3.13 直線判定処理

#### (2) 円弧判定処理

本処理では、直線ではないと判定されたものに対して、算出した近似円との平均誤差により対象線形が円弧であるかを判定する。具体的には、最小二乗法を用いて対象線形の近似円

を生成し、図 3.14 に示すように各特徴点から近似円への垂線距離の平均値を平均誤差として算出する。垂線距離の平均値が小さい場合、対象線形を円弧と判定する。判定の基準値は MMS の計測精度を参照する。

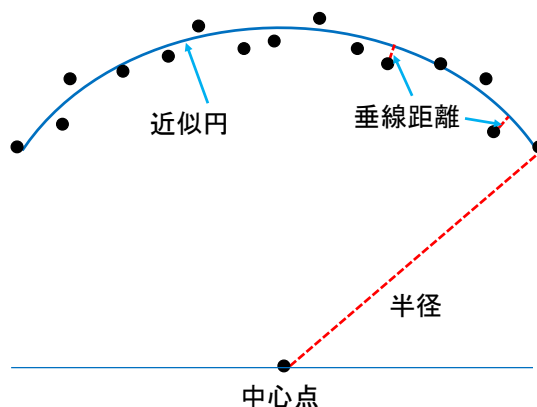


図 3.14 円弧判定処理

### (3) クロソイド曲線判定処理

本処理では、平面上において、直線、円弧のどちらでもないものをクロソイド曲線として識別する。次に、クロソイド曲線の種類を判定する。ここで存在可能なクロソイド曲線の種類は、基点の位置から図 3.15 に示すような 3 種類である。

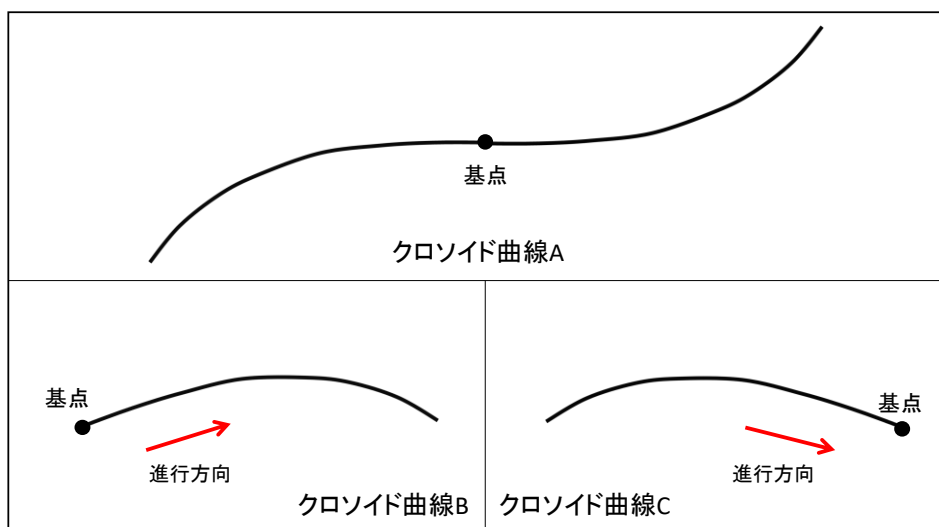


図 3.15 存在可能なクロソイド曲線種類

クロソイド曲線 A では、基点が線形の中央付近にある。クロソイド曲線 B では、基点が進行方向の始点にある。クロソイド曲線 C では、基点が進行方向の終点にある。

これらの種類を認識するには、まず図 3.16 に示すように点列の始点と終点を直線で結ぶ。

次に、線形両側の点を統計し、それぞれの側に連続する複数の点が存在する場合、幾何情報がクロソイド曲線 A と判定する。

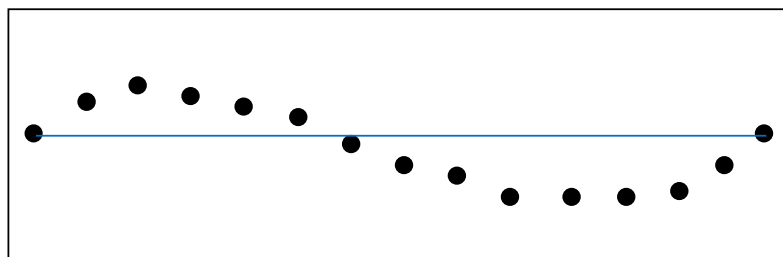


図 3.16 クロソイド曲線種類 A の判定

クロソイド曲線 B とクロソイド曲線 C に対して、図 3.17 に示すようにまず、対象線形を中央から前後 2 個の線形に分ける。次に、最小二乗法を用いて前後の線形の近似円の曲率半径を算出する。最後に、前後の近似円弧の曲率半径を比較することでクロソイド曲線の種類を判定する。

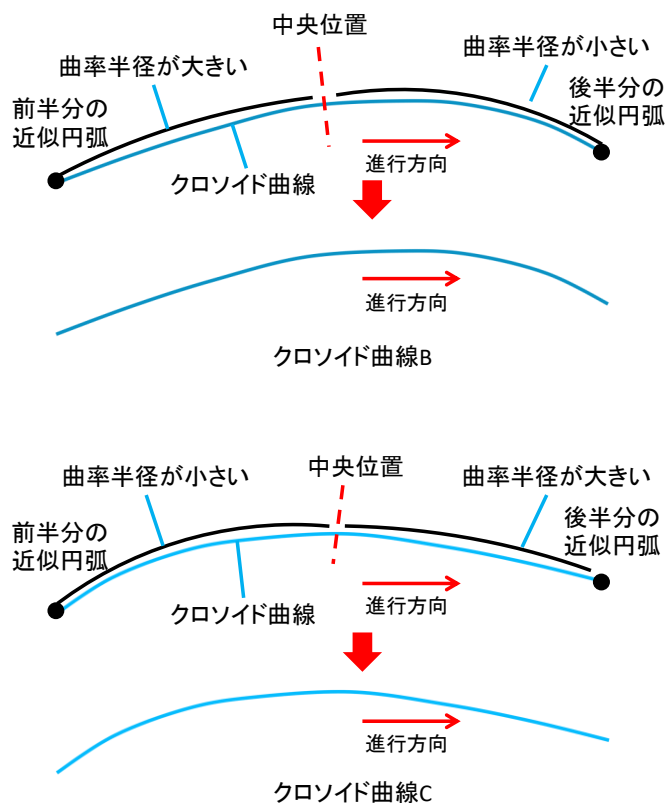


図 3.17 クロソイド曲線 B とクロソイド曲線 C の判定

#### (4) 2次曲線判定処理

本処理では、縦断面上の線形が直線か2次曲線かを判定する。具体的には、平面の直線判定処理と同じように近似直線の平均誤差を算出し、各特徴点から近似直線への垂線距離が小さい場合は対象線形を直線、大きい場合は2次曲線と判定する。

### 3.4.2 線形幾何情報補正機能

円弧やクロソイド曲線の曲率半径が大きい場合や異常な特徴点が多数ある場合、線形幾何情報を誤判定する可能性がある。そこで、本機能では、クロソイド曲線が直線と円弧の間で連続するという特性（図 3.18）に着目し、誤判定の可能性のある線形幾何情報を補正することで、線形の幾何情報の認識精度を向上させる。



図 3.18 クロソイド曲線の特性

#### (1) 幾何情報関連性の検証処理

高架道路橋はスパンごとに設計されるため、線形が複数個のスパンに分かれる可能性がある。このことから3種類の幾何情報の接続可能なパターンは、図 3.19 に示すような8パターンである。

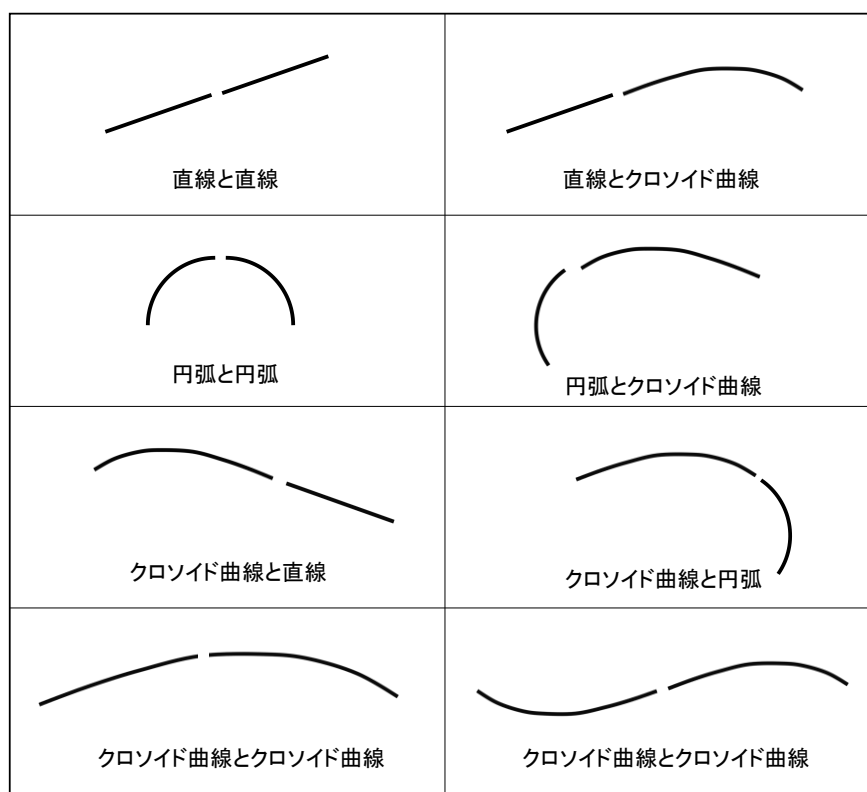


図 3.19 直線，円弧とクロソイド曲線が接続可能なパターン

本処理では，これらの接続可能なパターンに基づき，スパン前後の線形の幾何情報の関連性を検証することで，幾何情報が誤判定された線形を特定し，正確な幾何情報に修正する。

ここで，接続パターンが誤りの場合，どの幾何情報が誤りかを判定するには，全ての線形に2種類の適合度を算出する。それぞれは，平均距離における適合度（以下は適合度 A）（図 3.20），両側面積差分における適合度（以下適合度 B）（図 3.21）となる。

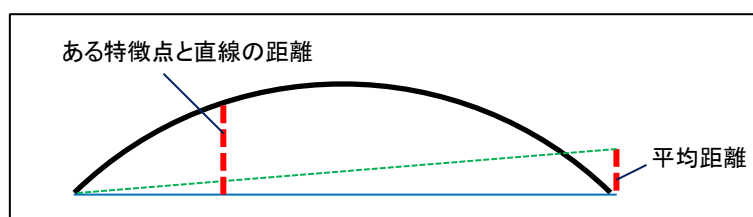


図 3.20 平均距離における適合度



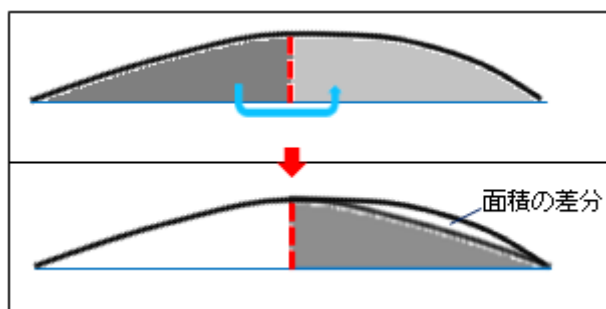


図 3.21 両側の面積差分における適合度

ここで、適合度 A は接続パターンに直線がある場合に使用する。適合度 B は、接続パターンに直線がない場合に使用する。それぞれの適合度の計算結果に対して、値が小さい幾何情報は、他の幾何情報の形状に近い場合、誤判定される可能性が高いと考えられる。本処理は、この特性に基づき適合度の値が小さい幾何情報を優先的に補正する。ただし、適合度が小さい幾何情報の補正ができない場合には、適合度が大きい幾何情報の補正を行う。

## (2) 幾何情報変更処理

本処理では、幾何情報が誤判定された線形を正確な幾何情報に修正する。具体的には、誤判定された線形の幾何情報を順番に他の幾何情報に変更し、線形の両側に接続する幾何情報との関連性（図 3.19）を検証する。ここで、幾何情報の判定回数が多いほど、誤判定の可能性が高いと考えられるため、幾何情報の変更順番は、クロソイド曲線、円弧、直線という幾何情報の判定回数の大きい順を取る。そして、変更した幾何情報が両側の幾何情報との関連性が同時に図 3.19 のパターンに満たす場合、その幾何情報を正確なものとする。

例えば、図 3.22 に示すように、誤った真ん中の幾何情報（円弧）をクロソイド曲線、円弧、直線の順番で変更していく。そして、真ん中の幾何情報がクロソイド曲線と円弧の場合、両側の接続パターンが図 3.19 のパターンにないため、誤りと判断する。最後に、直線で検証する場合、両側の接続パターンが図 3.19 のパターンに存在するため、正しい幾何情報と判断し、円弧を直線に変更する。

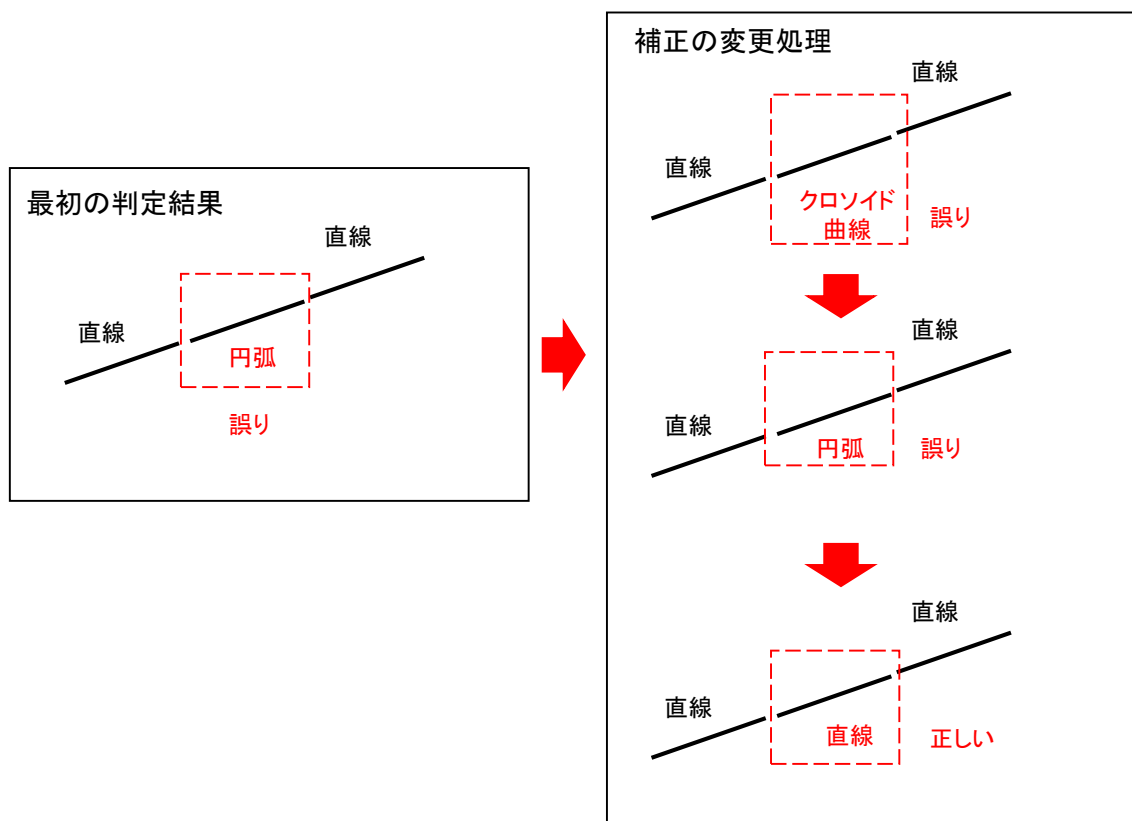


図 3.22 幾何情報の変更処理

### 3.4.3 SXF図面生成機能

本機能では、各線形の幾何情報に応じた数式のパラメータを算出し、線形を電子納品標準の SXF 図面に出力する。本機能は、直線数式化処理、円弧数式化処理、クロソイド曲線数式化処理と 2 次曲線数式化処理により構成される。

#### (1) 直線数式化処理

SXF の直線に必要なパラメータは、始点と終点である。本処理では、線形の近似直線を用いて始点と終点を算出する。具体的には、図 3.23 に示すように、まず最小二乗法により、点列の近似直線を算出する。そして、近似直線に対して両側の特徴点から垂線を引き、それぞれの垂線の足を SXF 直線の始点と終点とする。

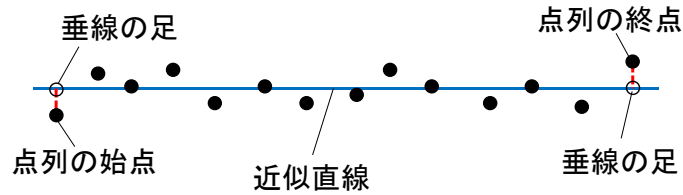


図 3.23 直線のパラメータの算出

### (2) 円弧数式化処理

SXF の円弧に必要なパラメータは、円の中心座標、半径、始角、終角、回転方向である。本処理では、線形の近似円を用いてパラメータを算出する。中心座標と半径は、最小二乗法による近似円の算出から取得する。始角と終角は、図 3.24 に示すように、中心座標と線形の両側の特徴点の座標を用いて算出する。回転方向は、円の中心点と円弧の位置関係により算出する。

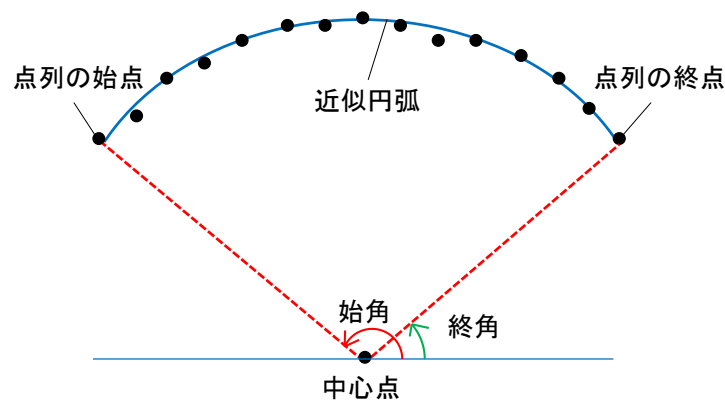


図 3.24 円弧のパラメータの算出

### (3) クロソイド曲線数式化処理

SXF のクロソイド曲線に必要なパラメータは、曲線基点座標、曲線長、定数パラメータ、回転向き、回転角である。本処理では、線形の両側に隣接する線形の情報を用いてパラメータを算出する。

クロソイド曲線 A の基点は、図 3.25 に示すように、まず点列の始点と終点を直線で結ぶ。次に、直線と曲線の交叉により形成された 2 個の面積を取得し、大きさを比較する。面積の小さい側の端点を固定点とし、その反対側から探索を行う。そして、固定点と探索の点で結

んだ直線が線形と 2 つ同じの面積の部分形成する場合、直線と点列の交点をクロソイド曲線 A の基点とする。

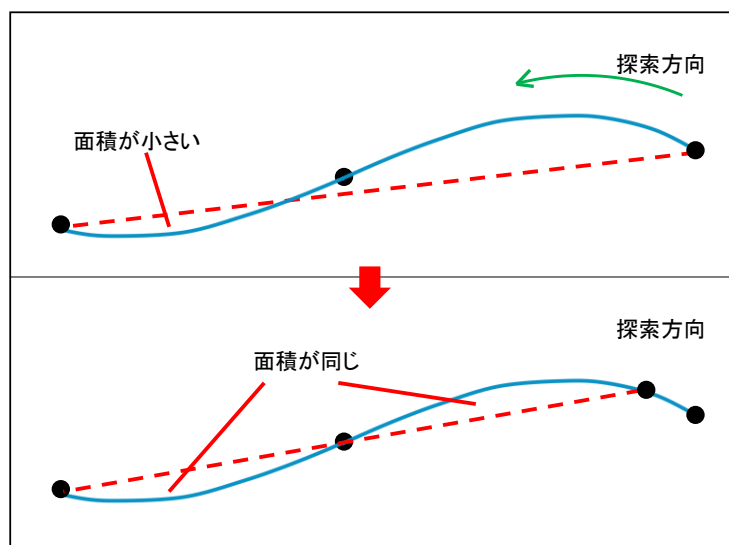


図 3.25 クロソイド曲線 A の基点の算出

クロソイド曲線 B とクロソイド曲線 C の曲線基点は隣接する直線の始点または終点とする。

曲線長と定数パラメータは、次のアルゴリズムで算出する。

Step.1 : 図 3.26 に示すように対象線形の始点と終点を結んだ直線の距離を仮曲線長  $L$  として算出する。

Step.2 :  $L$  をクロソイド曲線の式 (3.1) に代入し、隣接する円弧の曲率半径  $R$  を用いて仮終点 E' の座標を算出する。

$$\left. \begin{aligned} X &= L \left( 1 - \frac{L^2}{2! \times 5 \times 2^2 \times R^2} + \frac{L^4}{4! \times 9 \times 2^4 \times R^4} - \frac{L^6}{6! \times 13 \times 2^6 \times R^6} + \dots \right) \\ Y &= \frac{L^2}{6R} \left( 1 - \frac{L^2}{\frac{3! \times 7 \times 2^2}{3} R^2} + \frac{L^4}{\frac{5! \times 11 \times 2^4}{3} R^4} - \frac{L^6}{\frac{7! \times 15 \times 2^6}{3} R^6} + \dots \right) \end{aligned} \right\} \text{式(3.1)}$$

Step.3 : 始点から仮終点 E' との距離  $d$  を算出し、 $L$  と比較する。

Step.4 :  $d$  と  $L$  の差分を  $d'$  とし判定を行う。  $d'$  が 0 に近い場合、現在の仮曲線長  $L$  を採用しステップ 5 に移行する。  $d'$  が大きい場合、  $L+d'$  の計算結果を新しい仮曲線長  $L$  として Step.2 に移行する。

Step.5 : Step.4 で採用した曲線長  $L$  と隣接する円弧の曲率半径  $R$  を用いて、式 (3.2) により定数パラメータ  $A$  を算出する。

$$A = \sqrt{RL} \quad \text{式(3.2)}$$

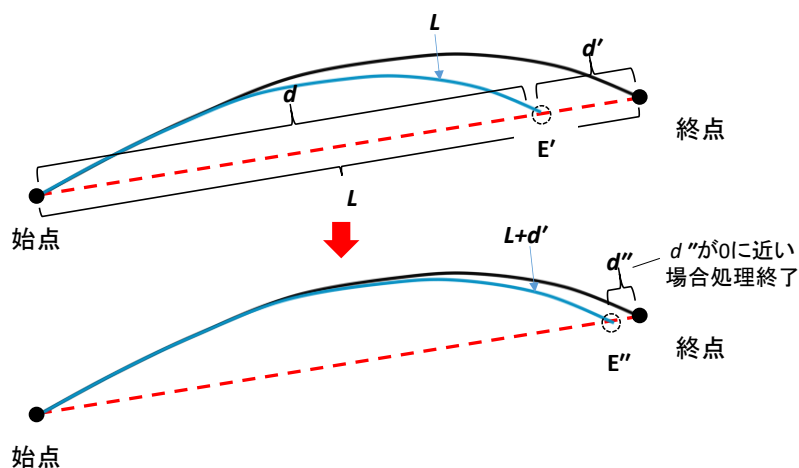


図 3.26 クロソイド曲線のパラメータの算出

クロソイド曲線の回転向きは、近似円の中心点と曲線の位置関係に B より算出する。回転角に関しては、まず、式 (3.1) を用いてクロソイド曲線の終点座標を算出する。次に、曲線基点を回転基点として終点座標を回転させる。そして、終点座標が実際の点との距離が最小になる角度を採用する。

#### (4) 2次曲線数式化処理

SXF 図面では、3次ベジェ曲線を用いて2次曲線を表している。そのため、本処理では、近似2次曲線式のパラメータを利用し、3次ベジェ曲線の制御点を算出する。具体的には、まず、起点を回転基準点として、起終点で結んだ直線が水平の状態まで各点の座標を回転させる。次に、最小二乗法を用いて、近似2次曲線を生成する。そして、点列の起終点、近似2次曲線パラメータにより、近似ベジェ曲線の制御点を算出する。

## 3.5 実証実験

### 3.5.1 実験計画

本研究で提案した道路構造令に規定されている幾何情報で道路線形を生成する手法の有用性を検証するため、特徴点の抽出精度の確認実験、継ぎ手の抽出精度の確認実験、幾何情

報の判定精度の確認実験、幾何情報の補正精度の確認実験、線形の生成精度の確認実験と高架橋の外観精度の評価実験の6項目について、実証実験を行う。本研究の実験計画を図3.27に示す。

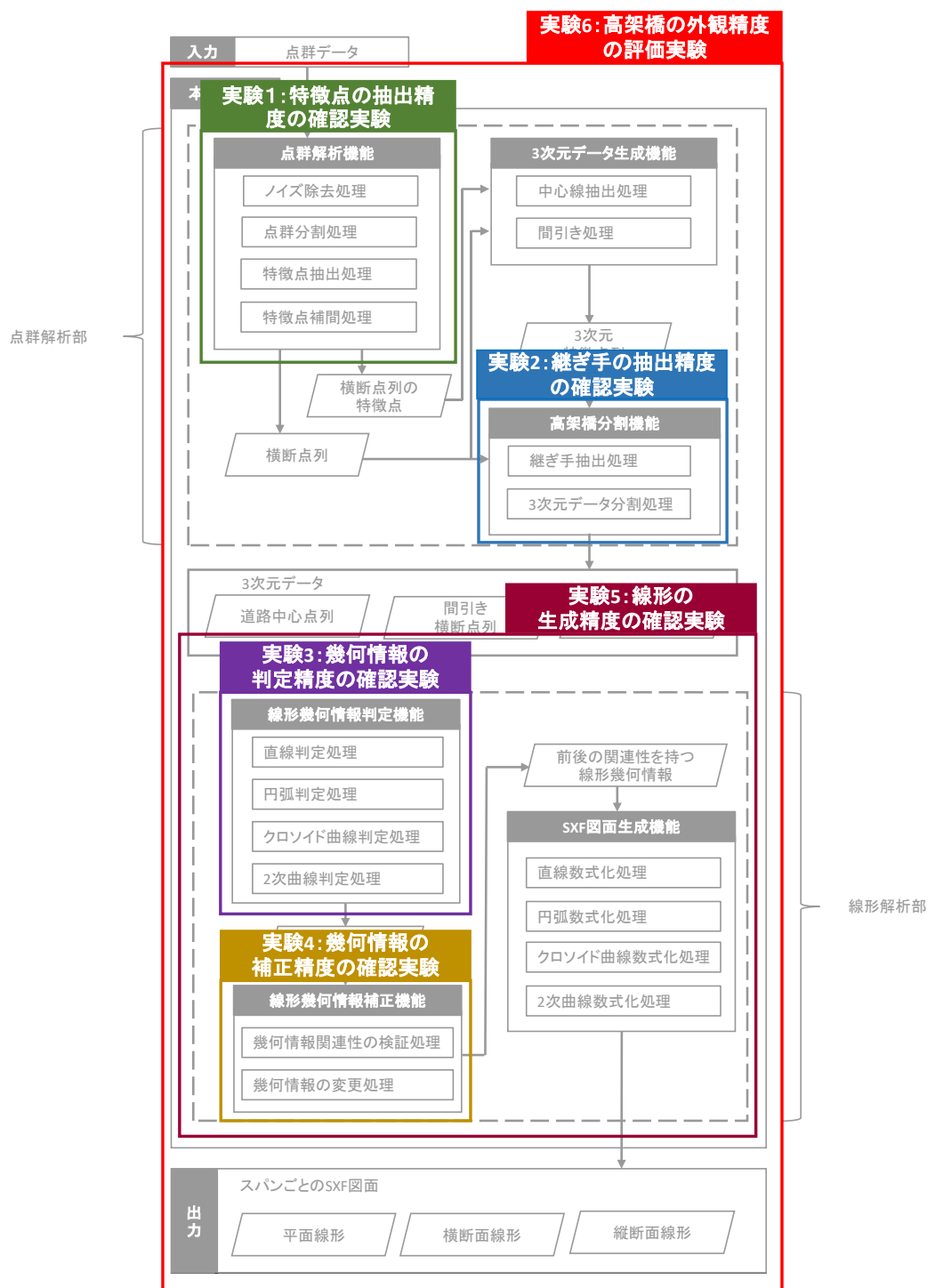


図 3.27 実験計画

実験 1 では、特徴点解析機能の手法の有用性を確認するため、生成した横断面における特徴点の正確さを検証する。実験 2 では、継ぎ手抽出の手法の有用性を確認するため、抽出できた継ぎ手の数と正解データとを比較する。実験 3 では、幾何情報判定機能の有用性を確認するため、分割した各点列から判定した幾何情報と正解データとを比較する。実験 4 では、幾何情報補正機能の有用性を確認するため、誤りのある幾何情報列を補正し、その結果と正解データとを比較する。実験 5 では、線形解析部の有用性を確認するため、点列から線形を生成し、正解データと比較する。実験 6 では、全体のシステムの有用性を確認するため、実際の高架橋の一部の計測結果から生成した線形と正解データとの相関関係を分析し、その結果について考察する。

### 3.5.2 特徴点の抽出精度の確認実験

#### (1) 実験データ

本実験では、MMS から取得した高架道路橋の点群データを利用する。計測対象の高架道路橋は、阪神高速 1 号環状線の一部（図 3.28）である。阪神高速は、路面や壁面などがしっかり整備されているため、取得した点群データに異常なものが少ない。使用する MMS は、三菱電機の MMS Type-S（図 3.29）を用い、詳細仕様を表 3.1 に示す。正解データは、現況の CAD 図面とする。

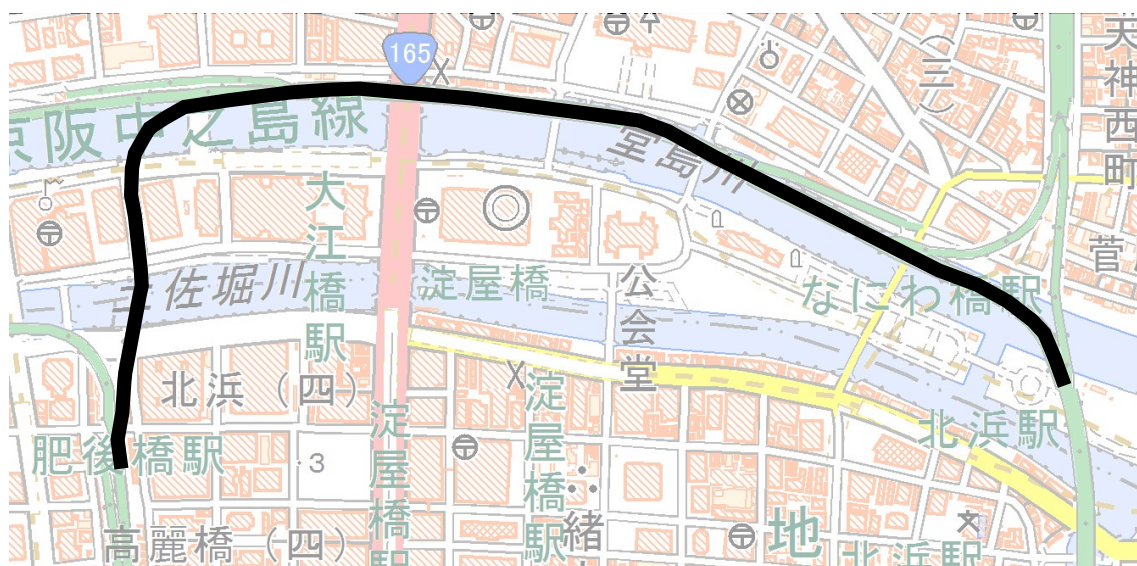


図 3.28 実験の計測範囲  
(出典：国土地理院，電子国土 Web)

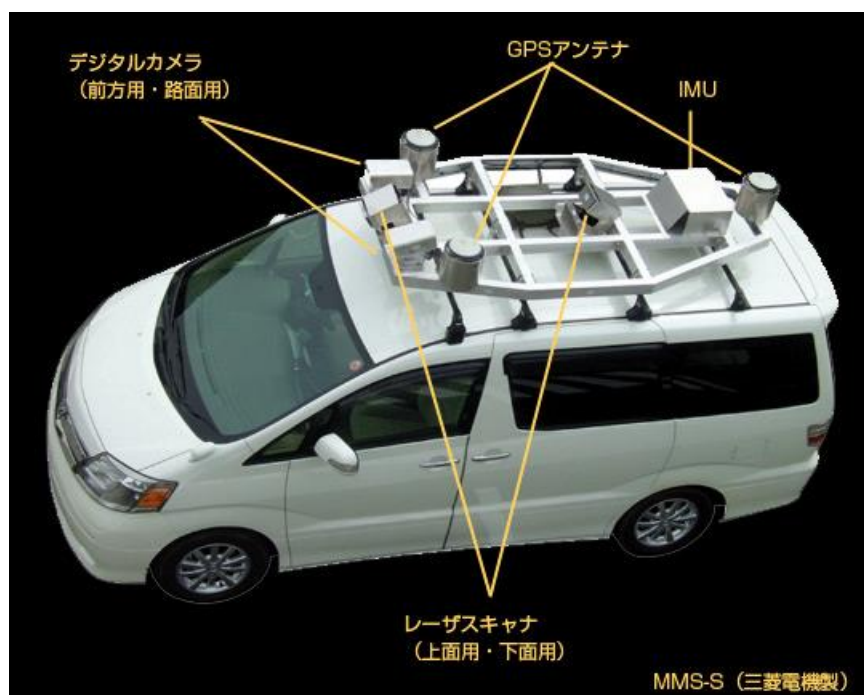


図 3.29 MMS Type-S  
(出典：パスコ，道路現況レーザ計測)

表 3.1 MMS の仕様

点群数	約 119 万点
計測距離	約 1.7km
絶対精度	10cm
相対精度	1cm
各点が所持している情報	直角座標系の XYZ 値と色の RGB 値

## (2) 実験内容

本実験では，生成した横断面における特徴点間の距離と正解データに記載されている距離とを比較し，その誤差を確認する．比較の箇所は，2次元図面に記載されていた計測箇所のうち，実験の計測範囲に含まれる連続の 10 箇所（図 3.30）を対象とした．ただし，データ欠損の大きい箇所を除く．



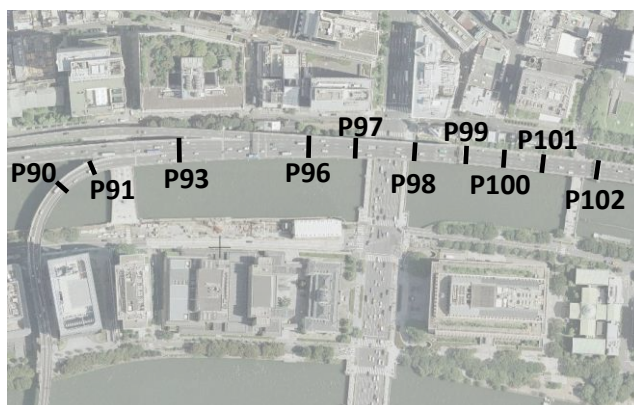


図 3.30 横断面の比較箇所  
(出典：国土地理院，電子国土 Web)

### (3) パラメータの設定

ノイズ除去処理での格子のサイズについては，現況の点群密度と民法第二百三十四条の規定を考慮し，平面投影の格子のサイズを  $0.20\text{m} \times 0.20\text{m}$  とする。

民法第二百三十四条によると，建物の壁と道路の境界線は  $0.5\text{m}$  以上の距離を保つ必要がある。そのため，格子のサイズを  $0.25\text{m}$  以下に設定すれば，高架橋周辺のビルの除去が可能と考えた。

### (4) 実験結果と考察

高架道路橋の 3 次元現況図の横断形状と 2 次元図面に記載された横断形状の寸法値との比較結果を表 3.2 に示す。

表 3.2 比較結果

計測箇所	特徴点間の距離	誤差の絶対値
P90	10.09m	0.02m
P91	10.12m	0.01m
P93	20.11m	0.06m
P96	18.91m	0.02m
P97	16.88m	0.07m
P98	15.52m	0.02m
P99	15.16m	0.01m
P100	15.01m	0.01m
P101	14.98m	0.02m
P102	15.04m	0.03m

表 3.2 をから、計測幅の実距離において、平均で約 0.03m の誤差が出ることがわかった。この誤差は、地図情報レベル 1,000 の水平位置の許容誤差の 0.70m を満たしている。また、MMS は、GPS 衛星を十分に捕捉している状態では、0.10m 以内の絶対精度を有することを考慮すると、提案手法により生成した 3 次元データは、MMS による測定の性能限界に近い精度で現況形状を再現できていると考えられる。

### 3.5.3 継ぎ手の抽出精度の確認実験

#### (1) 実験データ

本実験では、3.4.2 項の実験データと同様に、MMS Type-S で阪神高速 1 号環状線の一部を計測した結果を使用する。

#### (2) 実験内容

本実験では、実験データから提案手法を用いて継ぎ手の位置を特定し、実際のジョイント部の位置と比較して継ぎ手を正確に抽出できているかを確認する。

#### (3) パラメータ設定

継ぎ手部のグレースケール値の変化の閾値については、点列の平均グレースケール値の

変化が急速に 4 以上増加すると、継ぎ手と判定する。本研究で取得した点群データでは、路面の平均グレースケール値が約 26 で、値の平均変動が約 1~2 である。一方、継ぎ手の平均グレースケール値は約 32 になっている。そこで、信頼性を考慮して、路面のグレースケールの変化の閾値を 2 の倍数の 4 に設定する。

#### (4) 実験結果と考察

継ぎ手の抽出精度の検証実験では、まず、本手法で特定した継ぎ手と正解データを比較した結果を表 3.3 に示す。

表 3.3 継ぎ手の抽出結果

正解データ	29 件
抽出した結果	28 件
正解データと一致した数	28 件

表 3.3 から本手法で特定した 28 件の継ぎ手は全て正解データと一致したことから、誤抽出することなく高精度で継ぎ手を特定できたことがわかった。しかし、継ぎ手と周辺の路面の色が近似する場合（図 3.31）は、正しく高架橋を分割できないことがわかった。



図 3.31 抽出できなかった継ぎ手

これは、継ぎ手の箇所における横断点列の RGB 合計値の平均値と前後の路面との差が見られないためである。このような箇所を抽出するには、点群データの反射強度などの属性が必要と考えられる。

### 3.5.4 幾何情報の判定精度の確認実験

#### (1) 実験データ

本実験では、事前に幾何情報を持つ 20 個の線形（図 3.32）を正解データとして生成する。

各線形に対して、線上に存在する点を等距離で20個取得し実験の入力データとする。なお、システムのロバスト性を検証するため、入力データを3パターン用意する。各パターンの各点（X, Y座標）に表3.4に示す変位量をランダムに付加する。

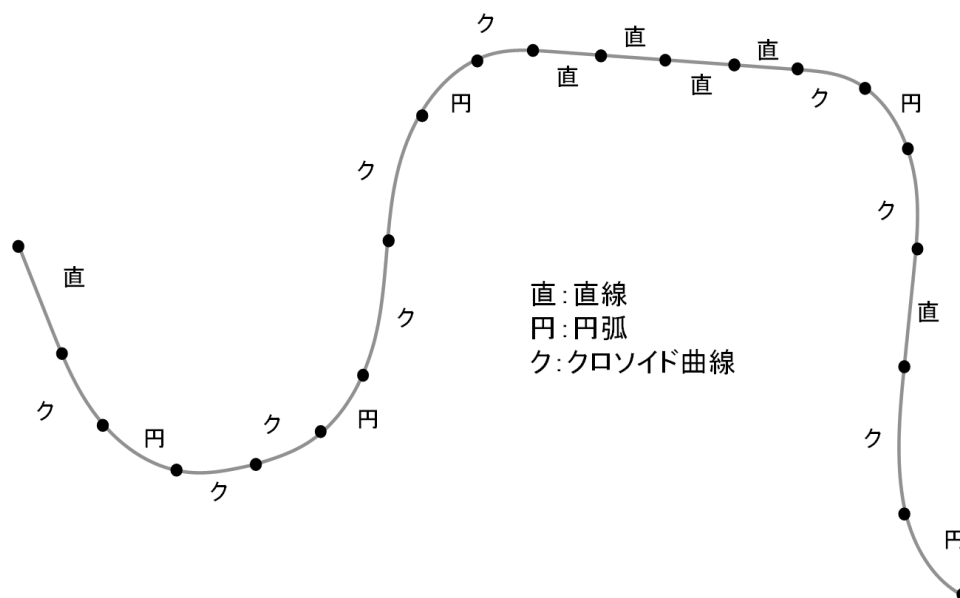


図 3.32 線形幾何情報の判定精度の確認実験の正解データ

表 3.4 用意する3パターンの変位量

	X 値の変位量	Y 値の変位量
パターン1	0m	0m
パターン2	-0.01m~0.01m	-0.01m~0.01m
パターン3	-0.10m~0.10m	-0.10m~0.10m

## (2) 実験内容

本実験では、システムにより出力した20個の幾何情報を正解データと比較し、正確な幾何情報を持つ線形の割合を算出することで、線形幾何情報判定機能の精度を確認する。

## (3) パラメータ設定

MMS点群データは、計測精度が0.10mである。そのため、抽出した点列にも、その値程度のばらつきがあると考えている。このことから、直線判定処理と円弧判定処理における閾値は、0.10m以上を設定する必要がある。そこで、本研究では、安定性を考慮し、0.15mに設定する。

#### (4) 実験結果と考察

幾何情報の判定精度の確認実験の結果（表 3.5）から、すべての部分で幾何情報の判定が正しかったことが分かった。しかし、表 3.4 に示す誤差の増大により判定精度が低くなる可能性がある。実際に、現況データにおいて、点群密度が低い場合、異常な特徴点が抽出され、±0.10m 以上の誤差が想定される。そのため、判定精度を向上させるためには、現況データの点群密度を高い状況で保つことが望ましい。

表 3.5 幾何情報の判定精度の確認実験の結果

	正確に判定された 幾何情報の数	幾何情報の総数	正解率
パターン 1	20 個	20 個	100%
パターン 2	20 個	20 個	100%
パターン 3	20 個	20 個	100%

### 3.5.5 幾何情報の補正精度の確認実験

#### (1) 実験データ

本実験では、20 個の正確な幾何情報を持つ線形の中の  $n$  ( $n: 1 \sim 10$ ) 個を取得し、その幾何種類（直線、円弧、クロソイド曲線）をランダムに他の種類に変更することで、10 パターンのデータを生成し、入力データとする。

#### (2) 実験内容

本実験では、システムにより出力した 10 パターンの結果を正解の幾何情報と比較することで、線形幾何情報補正機能の精度を確認する。

#### (3) パラメータ設定

本処理では、パラメータを使用していない。

#### (4) 実験結果と考察

線形幾何情報補正機能の精度確認の実験結果を表 3.6 に示す。

表 3.6 幾何情報の補正精度の確認実験の結果

	誤りの 幾何情報の総数	正確に補正され た幾何情報の数	補正後の 誤りの数	補正後の正解率
パターン 1	1 個	1 個	0 個	100%
パターン 2	2 個	2 個	0 個	100%
パターン 3	3 個	3 個	0 個	100%
パターン 4	4 個	4 個	0 個	100%
パターン 5	5 個	3 個	3 個	85%
パターン 6	6 個	5 個	2 個	90%
パターン 7	7 個	4 個	3 個	85%
パターン 8	8 個	3 個	8 個	60%
パターン 9	9 個	4 個	5 個	75%
パターン 10	10 個	2 個	8 個	60%

表 3.6 から、誤りの幾何情報が 4 個までのケースですべて補正できた。しかし、誤りの幾何情報が増えた場合、補正が正確にできない問題や補正自体ができない問題が発生した。正確な幾何情報を取得するには、幾何情報判定処理で 80%以上の正解率を確保する必要があると考える。

### 3.5.6 線形の生成精度の確認実験

#### (1) 実験データ

本実験では、3.5.4 項の実験データのパターン 1 を利用する。

#### (2) 実験内容

本実験では、20 個の正確な幾何情報をシステムに入力し、出力結果と正解データとの相関係数および平均二乗誤差を算出し、線形の生成精度を確認する。具体的には、図 3.33 のように各幾何情報の出力結果の近似線に対して、両側と中央の 3 点を評価点とし、その垂線距離の誤差を算出する。

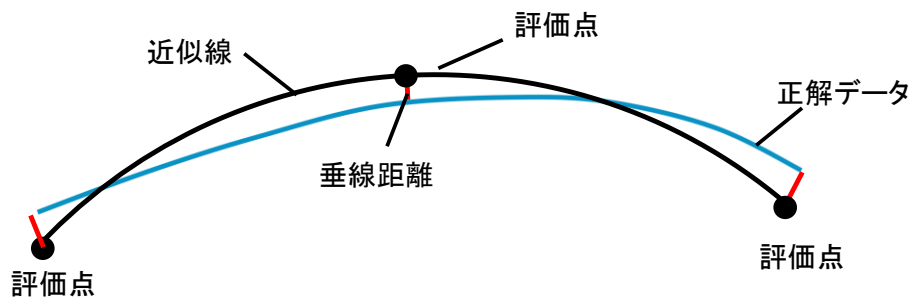


図 3.33 評価点

### (3) パラメータ設定

本実験に関わる手法では、パラメータを使用していない。

### (4) 実験結果と考察

実験の結果を表 3.7 に示す。

表 3.7 線形の生成精度の実験結果

正解データとの相関係数	1.00
正解データとの平均二乗誤差	0.01mm

表 3.7 から、線形の全部の幾何情報が正確に判定された場合、それぞれの数式のパラメータを高精度に算出し、線形を復元できることが分かった。

## 3.5.7 高架橋の外観精度の評価実験

### (1) 実験データ

本実験では、3.5.2 項の実験データと同様に、MMS Type-S で阪神高速 1 号環状線の一部を計測した結果を使用する。正解データは現況の CAD 図面とする。なお、継ぎ手の情報を利用する際に、抽出できなかった部分は、手動により挿入する。

## (2) 実験内容

本実験では、高架橋の道路線形のベクトル情報が復元されたかを判定するため、3.4.6 項の実験方法と同様に、対象線形とシステムが出力した近似線形との近似率を算出する。ここで、平面と縦断面の実験対象は、正解データに記載されている連続線形の部分（図 3.34）とする。

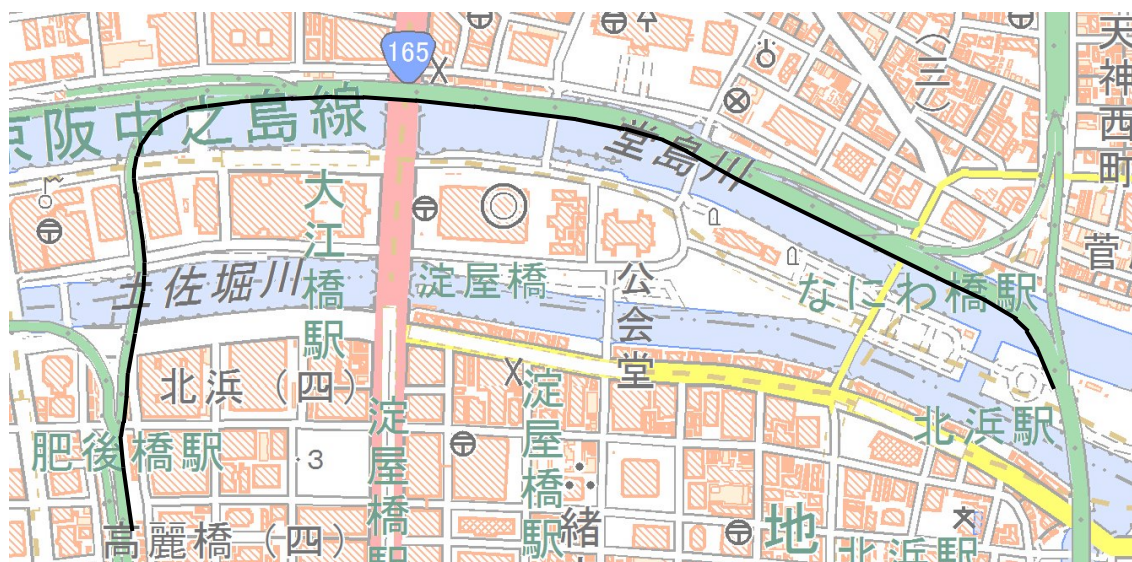


図 3.34 実験対象の線形  
(出典：国土地理院，電子国土 Web)

## (3) パラメータ設定

本実験でのパラメータは、3.4.2 項～3.4.4 項のパラメータを使用する。

## (4) 実験結果と考察

本実験で生成した高架橋の道路線形（図 3.35）の評価結果を表 3.8 に示す。



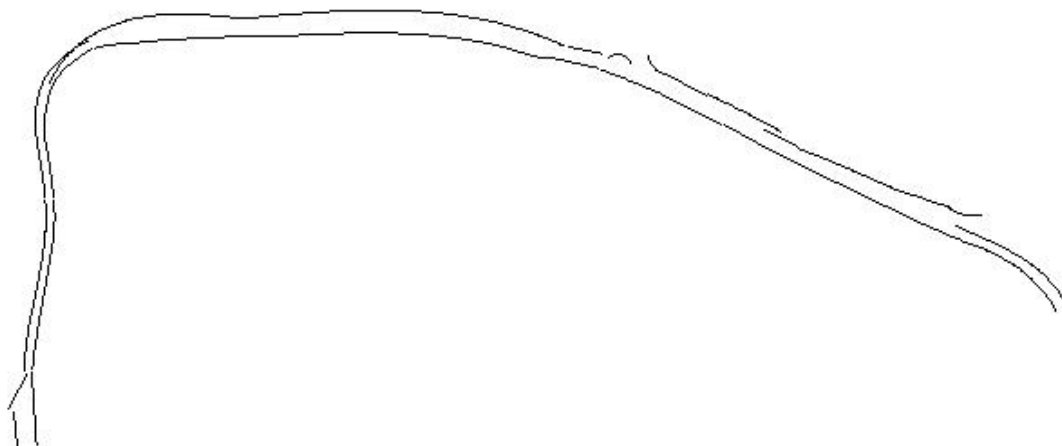


図 3.35 本システムにより生成した高架橋の両側の道路境界線

表 3.8 高架橋の判定精度の確認実験の結果

	相関係数	平均二乗誤差
平面線形	1.00	1.12m
縦断線形	1.00	0.09m
横断線形	1.00	0.13m

表 3.8 の実験結果の相関係数から、本手法による近似線の生成が有効であることが分かった。しかし、平面線形の平均二乗誤差は、第 3.4.6 項の実験結果と異なり、値が大きく、道路法施行規則に満たしてないこともわかった。そこで、図面を確認した結果、次の 3 つの問題が見られた。

1 つ目は、図 3.36 に示すように高架道路橋の分岐部における線形の平均二乗誤差が非常に高いことである。

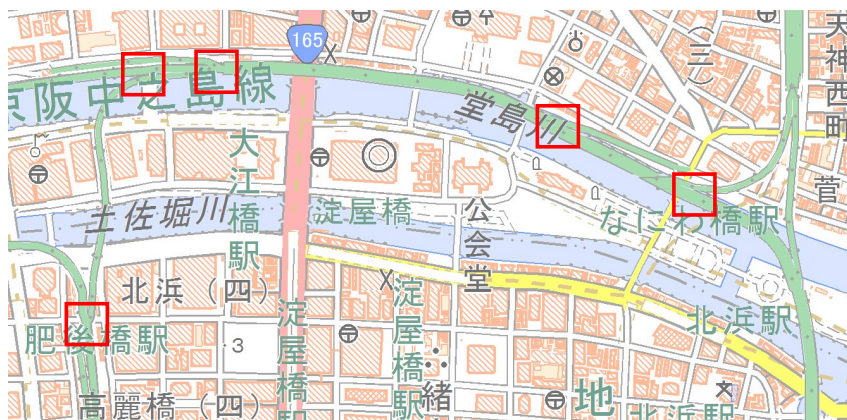


図 3.36 高架橋の分岐部

分岐部において、点列が切れているため、線形補間手法が適用され、大量な特徴点が補間された。これら特徴点は、本来の線形の特徴から、離れている場合が多く、不適切な線形が生成された。この問題を解決するには、データ補間を分岐部に適用せずに近似線を算出する必要がある。また、分岐部では、前後のデータに欠損が発生し、異常な線形が生成される場合もある。この問題を解決するには、分岐部前後のデータの補充による改善が考えられる。

2つ目は、図 3.37 に示すような場所では、クロソイド曲線と隣接の線形との接続が不自然なことである。

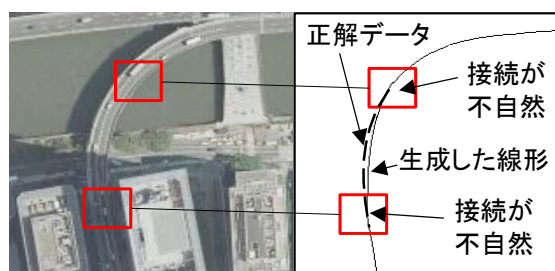


図 3.37 線形の接続が不自然な箇所

詳細な数式パラメータを確認したところ、そのような箇所では、クロソイド曲線の起終点の位置座標が数式に合わないことがわかった。本研究では、クロソイド曲線を隣接の線形と接続させるように、回転角を調整したため、不自然な接続が出現する。この不自然な接続の問題を解決するには、クロソイド曲線のパラメータを利用し、起終点を調整することが必要である。

3つ目は、図 3.38 に示すような箇所で線形が正解データから離れている部分がある。原因は、距離が非常に長い1個のスパンがクロソイド曲線と判定されたためである。クロソイド曲線は、少しの誤差で大きな変化[81]が起きるため、長いほど正解データから離れる可能性が高くなる。一方、長いスパンは、複数の幾何情報による構成されることも考えられるため、その場合、クロソイド曲線と判定される可能性が高く、正解データから離れる原因となる。この問題を解決するには、継ぎ手のみならず、下部工により、高架橋を支間長ごとに分割することが望ましいと考えられる。

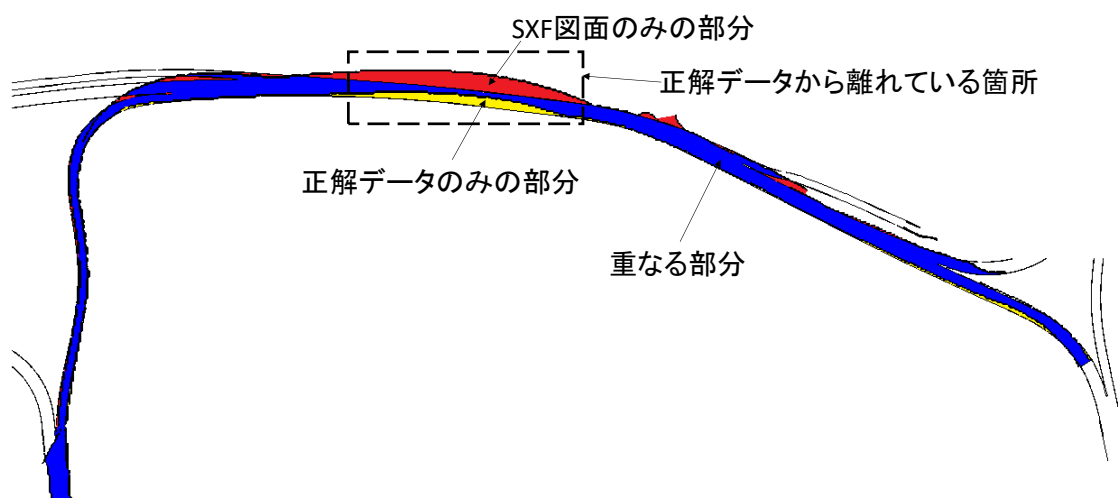


図 3.38 生成した線形が正解データから離れている箇所

### 3.6 まとめ

本研究では、MMS で高架橋を計測した結果の点群データから、特徴点を抽出し、線形を生成する手法を提案した。実証実験では、高精度な特徴点の抽出が可能であることがわかった。また、道路構造令に規定されている幾何情報で高架橋の道路線形を生成可能であることもわかった。一方、クロソイド曲線の起終点位置のずれなどにより接続が不自然な問題や生成精度が低く道路法施行規則を満たせない問題もあった。生成した線形を自動運転や道路構造物の維持管理に適用するには、これらの問題を解決する必要がある。また、分岐部において、適切な線形を生成し、精度を向上させる課題も残った。そこで、第4章では、分岐部を含めた広範囲な高架橋を対象とし、自然に接続する高精度な線形の生成手法と分岐部における適切な線形の生成手法を考案し、システムの実用性を向上させる。

最後に、本研究の提案手法を適用させるために、必要な計測条件や道路構造物の制約条件を表 3.9 まとめる。

表 3.9 本研究の手法の適用条件

項目	説明	制約条件
MMS の仕様	横断面の取得は、レーザスキャナの照射方向に依存している。	レーザスキャナの照射方向が進行方向と垂直になること
MMS の時速	MMS は、時速 20km～80km での計測が可能である。一方、80km の場合、横断点列の間隔が約 0.2m になるが、処理への影響が小さい。	時速 80km 以内
MMS の走行線路	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 横断面を正確に取得するため、MMS の進行方向が道路の進行方向と一致するのが望ましい</li> <li>● データの欠損により、線形の生成精度が低下するため、データの欠損を避ける走行が望ましい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 車線の変更を避けること</li> <li>● 他の車両と並走をしないこと</li> <li>● 他の車両の追い越しをしないこと</li> <li>● 他の車両からの追い越しをしないこと</li> </ul>
点群データの仕様	継ぎ手を抽出するため、通常の座標情報以外に、RGB 情報も必要	点群データの RGB 色情報が必要
高架橋の特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 壁面と路面の交差部を特徴点として抽出しているため、壁面がない場合、正確に路面境界線を抽出できない</li> <li>● 横断面点列の高さの変化を利用して、特徴点を探索しているため、中央分離帯がある場合、向こう側の特徴点を抽出できない</li> <li>● 本研究では、継ぎ手を用いて、線形を分割しているため、継ぎ手の抽出が可能な高架橋が望ましい</li> <li>● 分岐部への対応ができない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 高架橋の両側にコンクリート型防護欄があること</li> <li>● 中央分離帯がないこと</li> <li>● 継ぎ手の色が路面の色と異なること。</li> <li>● 路面舗装の補修が少ないこと</li> <li>● 高架橋の処理区間に分岐部が含まれていないこと</li> </ul>
自然環境	水により、レーザスキャナの計測精度が低下する可能性がある。	雨や霧などの水気が多い環境を避けること

## 第 4 章

# 継ぎ手などの情報なしで広範囲な 高架橋の道路線形を自動生成する 手法

## 第4章 継ぎ手などの情報なしで広範囲な 高架橋の道路線形を自動生成する手法

### 4.1 手法の概要

第3章で提案した手法には、クロソイド曲線と前後の線形との接続が不自然な問題があった。自動運転では、線形の曲率がハンドリング操作を制御している。そのため、接続が不自然な線形を使用する場合、自動車は、車線から離脱することが考えられる。一方、自動運転に適用させるには、広範囲な高架橋の道路線形を生成する必要がある。道路網は、異なる多くの路線で構成されている。そのため、異なる路線が交わる分岐部などの場所における対応の分割処理が不可欠である。また、特性が異なる MMS 点群データの場合、システムの中の点群データの特性に依存する手法を適用できない可能性があり、手法の改良が必要である。本章では、道路線形の生成精度の向上と、分岐部を含めた高架橋への適用性や特性が異なる MMS 点群データからの適応性などの実用性の向上を試みる。

本章の位置付けを図 4.1 に示す。

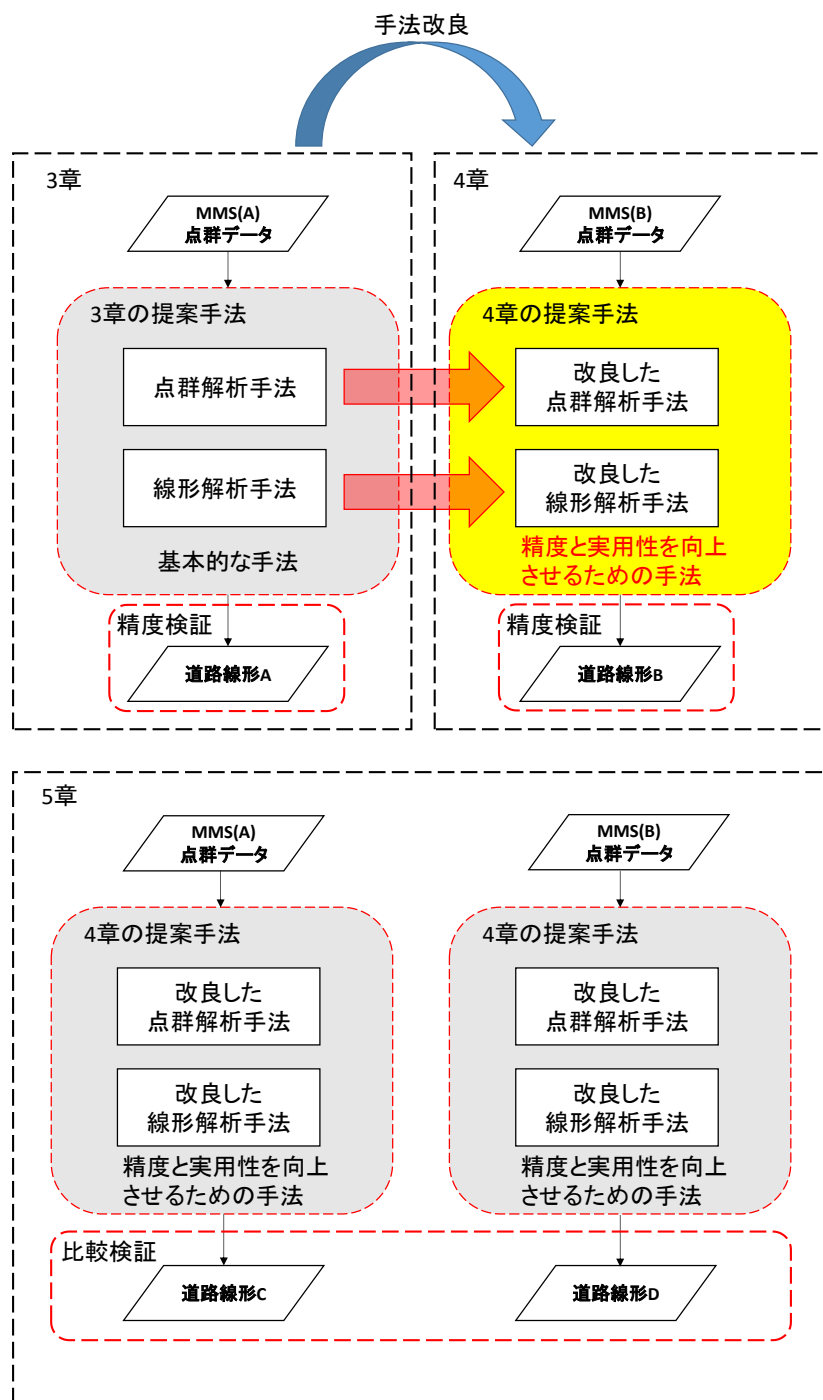


図 4.1 本章の位置づけ

本章では、システムの実用性を向上させるため、線形の生成精度と実用性の向上の目標を実現するため、以下の7つの方法で第3章で提案した各手法を改良する。

1つ目は、横断面の取得にラインスキャンの方向に依存しない手法を使用することである。第3章で述べた点群分割処理は、点群データのラインスキャンの方向を利用している。ライ

ンスキャンの方向は、レーザスキャナの設置方向に依存している。しかし、レーザスキャナの設置方向は、図 4.2 に示すように MMS の製造会社や型番により異なっている。そのため、図 4.3 に示すようにそれぞれの MMS で取得した点群データのラインスキャンの方向も異なる。

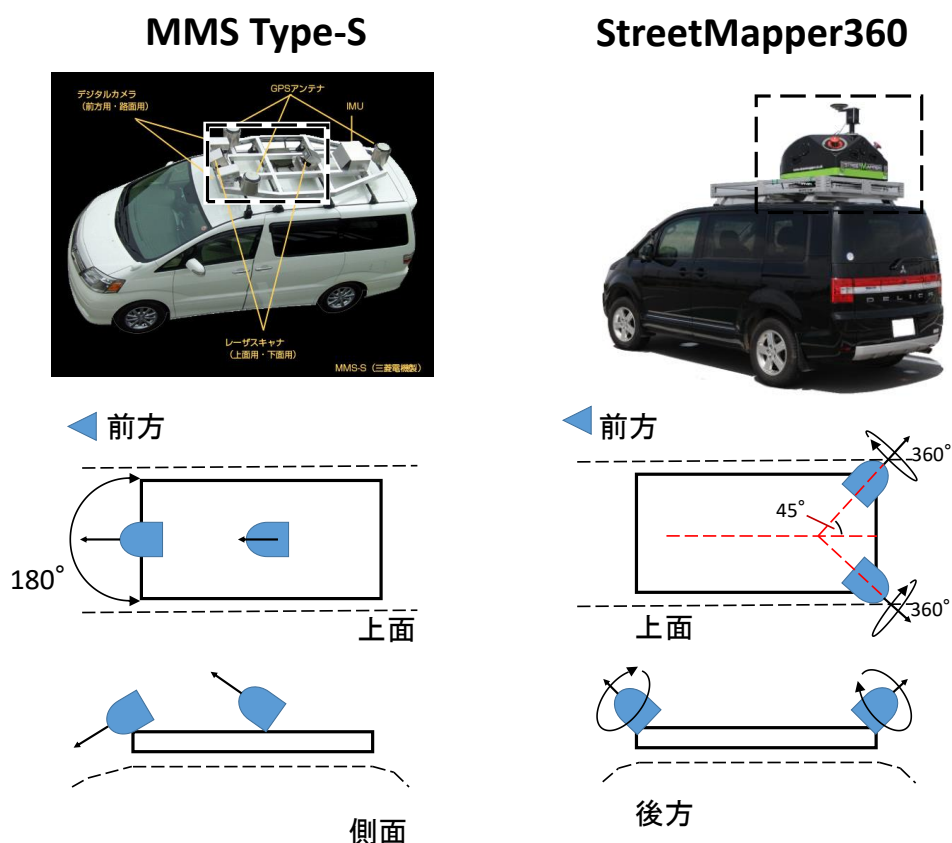


図 4.2 レーザスキャナの設置角度が異なる 2 種類の MMS



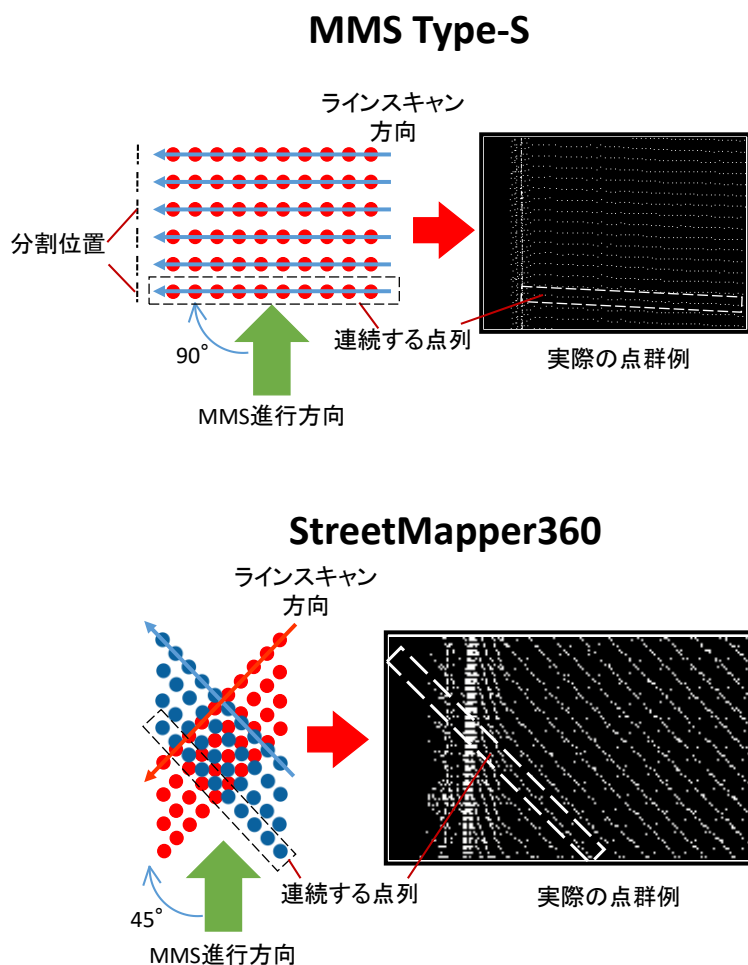


図 4.3 ラインスキャンの方向が異なる 2 種類の点群データ

この特性の違いにより、横断面の取得ができない場合がある。そこで、本研究では、GPS 履歴ポイントを使用した手法を提案する。

2つ目は、横断点列の密度に依存しない特徴点の抽出手法を使用することである。特徴点抽出処理は、横断面における点数の統計により特徴点を特定している。しかし、レーザスキャナが複数台設置された場合、図 4.4 に示すように横断面における点列の密度には大きなばらつきが発生する。

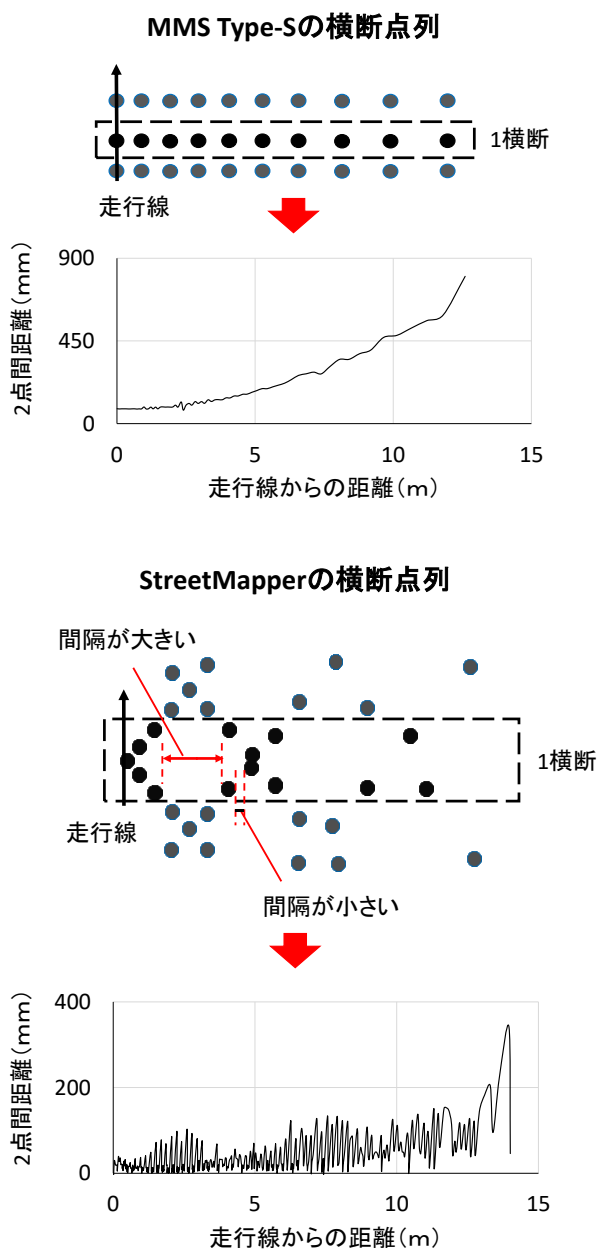


図 4.4 横断点列の密度が異なる 2 種類の点群データ

この特性の違いにより、特徴点の判定が困難な場合がある。これに対して、本項では、壁面と路面で形成した形状に着目した手法を提案する。

3つ目は、継ぎ手などの情報を使用しないことである。継ぎ手の位置は、設計した道路線形の各幾何情報起終点からずれる場合や、異なる幾何情報間に設置されない場合がある。これらの場合においては、生成したクロソイド曲線の精度が低下する。また、将来的には、継ぎ手がない一般道路や整備されていない高速道路の線形を生成することを考慮すると、

継ぎ手なしでの線形解析手法が必要である。そこで、本研究では、第3章の線形解析部を修正する。具体的には、全体の形状を認識して、線形を構成する可能な幾何情報を抽出し、それぞれの起終点を調整する。

4つ目は、線形の補正により生成した点列を使用しないことである。補正処理により生成した点列は、本来の線形の特徴から離れる場合があり、補正点が多くなると、線形の生成精度が低下すると考えられる。そのため、本研究では、補正処理により生成した点列を点群解析部の入力データから除去する。

5つ目は、特徴点から、精度の良いものを抽出することである。MMSは、レーザスキャナの種類により性能が異なり、また、計測車両からの距離に応じて点群密度が低下する。その場合、対向車線を含めた高架橋の横断形状の把握が困難となり、特徴点の抽出精度が低下する。そのため、本研究では、特徴点の抽出後に位置誤差を考慮して、さらに高精度な特徴点のみを抽出する。

6つ目は、線形を用いた適切な補間を行うことである。道路の線形を生成する時、直線、クロソイド曲線、円弧のパターンで対応できず、線形の種別が認識できずに途切れる場合がある。線形を接続させるには、適切な補間手法が必要である。そこで、本研究では、道路構造令の解説と運用14)に記載された次の3つの要件を考慮し、線形を補間する手法を考案する。道路構造令の解説と運用では、次に示す要件が定義されている。

- 1) 急ハンドルを避けるため、直線と円弧との間にクロソイド曲線を挿入する。
- 2) クロソイド曲線を使うことにより生じた移程量  $S$  が十分に小さい場合、直線と円弧とを直接接続させることが可能である。移程量  $S$  の計算式を式(4.1)に示す。

$$S = \frac{1}{24} \cdot \frac{L^2}{R} \quad \text{式(4.1)}$$

ここで、 $L$ はクロソイド曲線長、 $R$ は曲率半径である。

- 3) クロソイド曲線の定数パラメータ  $A$  は、式(4.2)を満たすことが望ましい。

$$\frac{R}{3} \leq A \leq R \quad \text{式(4.2)}$$

7つ目は、分岐部などの場所において、適切な点列の分割処理を追加することである。高架橋の分岐部において、正確な線形を生成できない課題である。高架橋全体の図面を生成する場合、分岐部の正確な線形の生成手法が必要となる。そこで、本研究では、各特徴点がこの路線に属するかを認識して特徴点列を分割することで、正確な分岐部の線形を生成する。

これらの7つの方法のうち、3つ目から6つ目の方法は、線形の生成精度を向上させ、1

つ目、2つ目、7つ目の方法はシステムの実用性を向上させる。

## 4.2 提案システム

本研究では、第 2.1 節で示した課題を解消し、高精度な高架橋の道路線形を生成するシステムを提案する。本提案システムの流れを図 4.5 に示す。

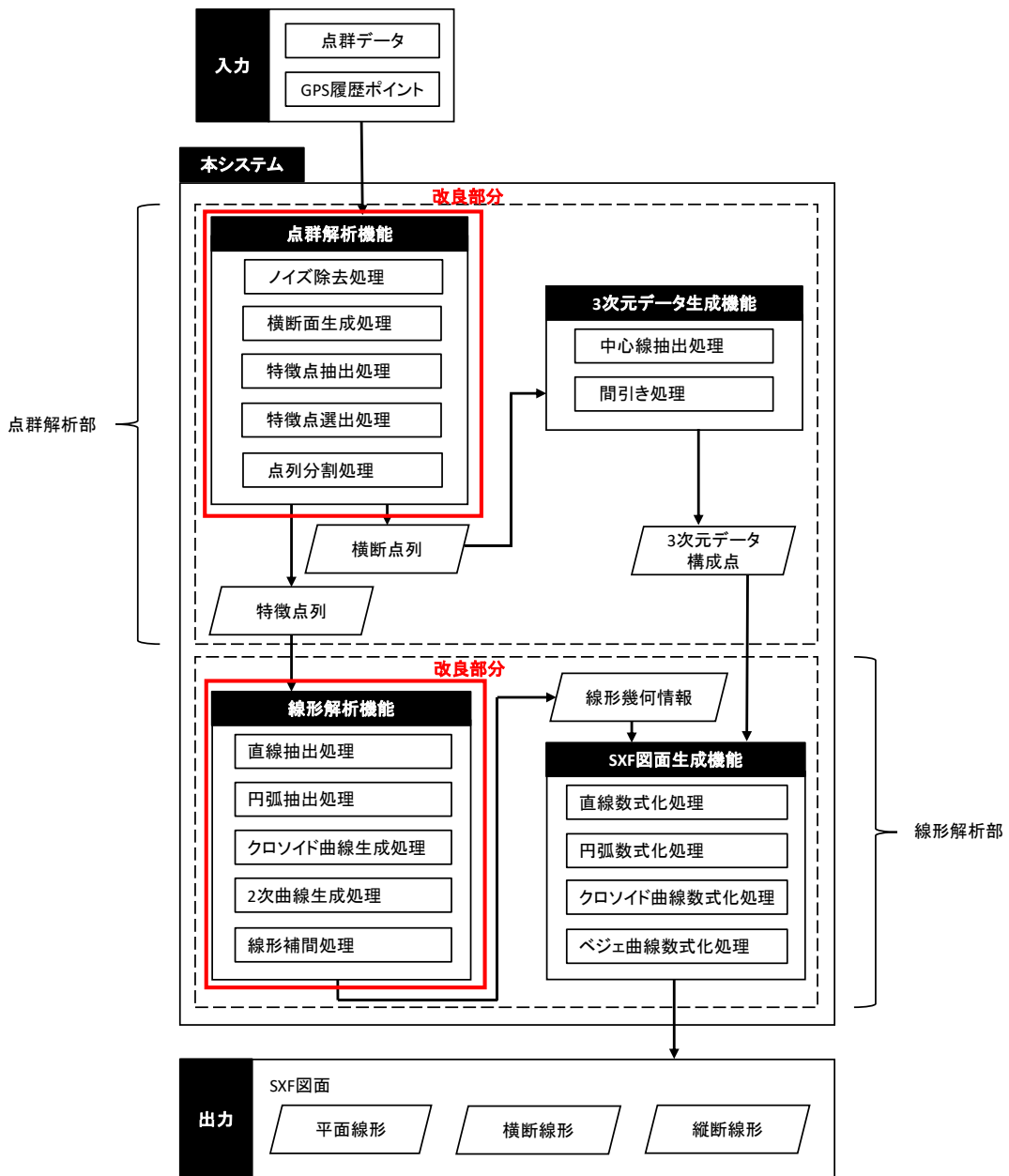


図 4.5 継ぎ手などの情報なしで線形を自動生成するシステム

本システムは、第3章で提案したシステムを改良したものである。改良した部分（図 4.5 の赤枠）は、点群解析機能と線形解析機能である。ここで、点群解析機能の改良は、先に述べた1つ目、2つ目、4つ目、5つ目と7つ目の方法を、線形解析機能の改良は、3つ目と6つ目の方法を実現する。

また、本システムでは、MMS により取得した点群データと GPS から取得した走行軌跡（以下、GPS 履歴ポイント）を入力データとする。ここで、点群データは、標定点により位置を調整したものとする。また、同じ場所を2回走行した場合、それぞれの点群データは同一の標定点により調整する。そして、調整した両方のデータを統合したものを入力データとする。

本システムは、点群解析部と線形解析部により構成される。点群解析部では、第3章と同様に横断面の取得により高精度な特徴点の抽出を目指す。まず、点群補間機能により生成された点により線形の生成精度が低下する可能性があるため、この機能を削除する。次に、第3章で使用した MMS 点群データの特性と異なるものが使用される場合を考慮し、MMS 点群データの特性が異なっても、提案手法を適用できるように各機能を修正する。

線形解析部の線形解析機能は、平面図と縦断図に分けて処理を行う。まず、平面図の処理では、図 4.6 に示すように点列から直線を抽出する。次に、直線抽出の後に残った点群データから円弧を抽出する。そして、直線と円弧間にクロソイド曲線を生成する。最後に、線形補間処理により、対応できない区間に線形を生成する。また、縦断図の処理では、まず、平面図の処理と同様に点列から直線を抽出する。そして、直線間を接続する2次曲線を生成する。最後に、2次曲線を生成できない区間に対して線形補間を行う。

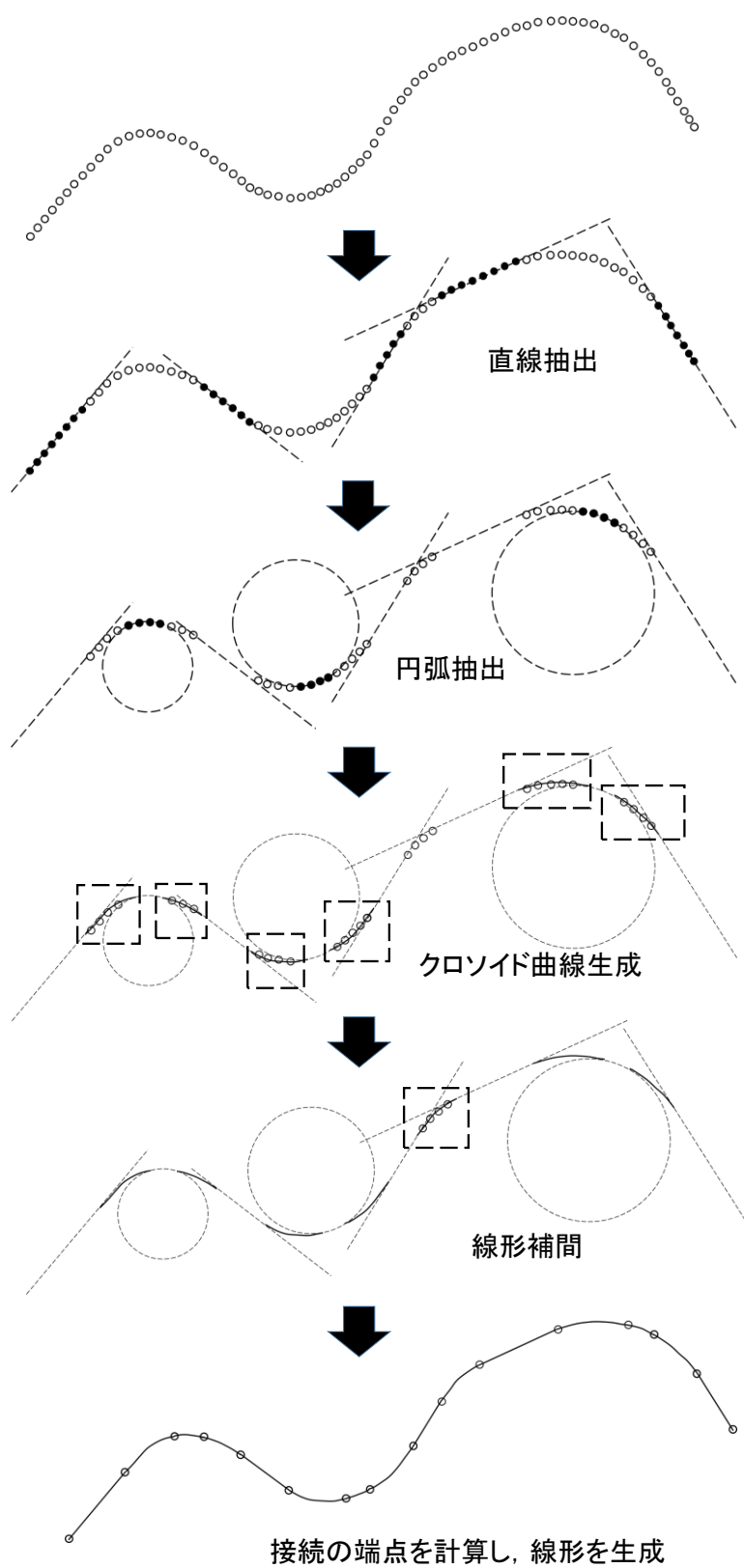


図 4.6 継ぎ手の位置情報を利用しない線形解析部のイメージ

本章では、改良した部分について説明する。3次元データ生成機能と SXF 図面生成機能の詳細は、第3章を参照されたい。

## 4.3 点群解析部

本節では、線形の生成精度の向上と、分岐部への対応と特性が異なる MMS 点群データを使用した場合に対応した適切な改良を行う。

### 4.3.1 点群解析機能

本機能は、ノイズ除去処理、横断面生成処理、特徴点抽出処理、特徴点選出処理と点列分割処理により構成される。ノイズ除去処理は第3章と同様に周辺ビルを除去する。横断面生成処理では、GPS 履歴ポイントを利用し、横断方向を算出し、横断面の点列を取得する。特徴点抽出処理では、第3章と同様に壁面と路面の変化点を抽出する。特徴点選出処理では、抽出した特徴点から、さらに精度の良いものを抽出し、線形の生成精度を向上させる。点列分割処理では、線形を正確に生成するため、分岐部などに対して、点列を適切に分割する。

### 4.3.2 ノイズ除去処理

#### (1) 手法の検討

本処理は、第3章と同様に点群を2次元の格子に投影し、ラベリングを行う手法を使用する。ただし、本研究では、広範囲な高架橋を処理対象とするため、コンピュータの性能により、処理できない場合が考えられる。そのため、本項では、走行履歴ポイントを利用し、高架橋を一定距離ごとに分割した後、第3章の提案手法を使用する。

また、到達距離の長いレーザスキャナを用いた MMS の場合、両側の構造物を示す点群データの量が対象となる高架橋より数倍多いことが考えられる。このことから両側のビルなどの点群領域が高架橋本体より大きくなり、正確にノイズ除去ができない場合がある。そのため、本処理では、高架橋を一定距離ごとに分割する際に、MMS 走行線から非常に遠い点群データを事前に除去する。

## (2) 処理の詳細

まず、図 4.7 に示すように入力データの GPS 履歴ポイントから上下と左右において一定距離を指定してラベリング処理の領域を生成し、領域以外の点群データを除去する。

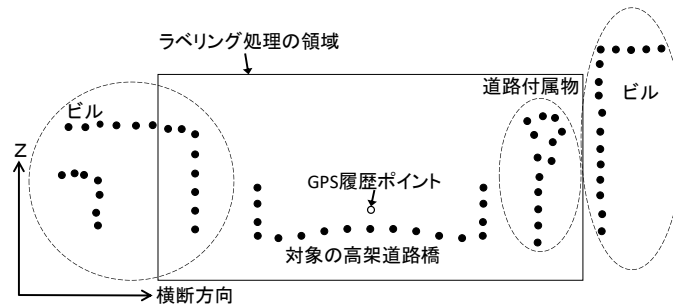


図 4.7 ラベリング領域の生成

領域の左右の距離を対象の高架橋における最も広い場所の幅以上の値に設定することで、道路の端を走行しても、高架橋の路面および両側の壁を含めた領域を取得できる。次に、第3章と同様にラベリング領域内の点群データを格子状の平面に投影し、ラベリングによるグルーピングを行う。

### 4.3.3 横断面生成処理

#### (1) 手法の検討

本処理では、線形解析機能に用いられる特徴点を抽出するための横断面を生成する。横断面を生成するには、道路の横断方向を把握する必要がある。道路の横断方向を取得する手法には、レーザスキャナの設置角度に依存した手法[74]と GPS 履歴ポイントに基づく手法[82]がある。レーザスキャナの設置角度に依存した手法では、レーザスキャナのラインスキャン方向が道路の横断方向に近似する特徴を利用している。しかし、4.3.1 項ので述べたように、MMS は、種類によりラインスキャンの方向が道路の横断方向と異なる場合がある。そのため、本研究では、様々な MMS に対応できるように、ラインスキャンの方向に依存しない GPS 履歴ポイントに基づく手法を利用する。

横断面を生成するには、投影法、バッファ法と TIN 法がある[83]。バッファ法と TIN 法では、既存の点の情報により生成した新しい点や線を横断面としている。しかし、これらの点や線には、計測した高精度な点の位置から離れる問題がある。そこで、本研究では、高精度な図面を生成するため、点群データ自体の  $x$ ,  $y$  座標値を利用する投影法を使用する。



## (2) 手法の詳細

まず、図 4.8 に示すように MMS で走行時の各 GPS 履歴ポイントを結んだ線分を走行線とする。次に、図 4.9 に示すように、走行線のそれぞれの線分の垂線方向を横断方向とする。そして、図 4.10 に示すように走行線において一定間隔  $d$  ごとに横断方向を算出し、各点と各横断方向との距離を算出する。最後に、各横断方向への距離が  $d/2$  以下の点群データで断面を生成する。

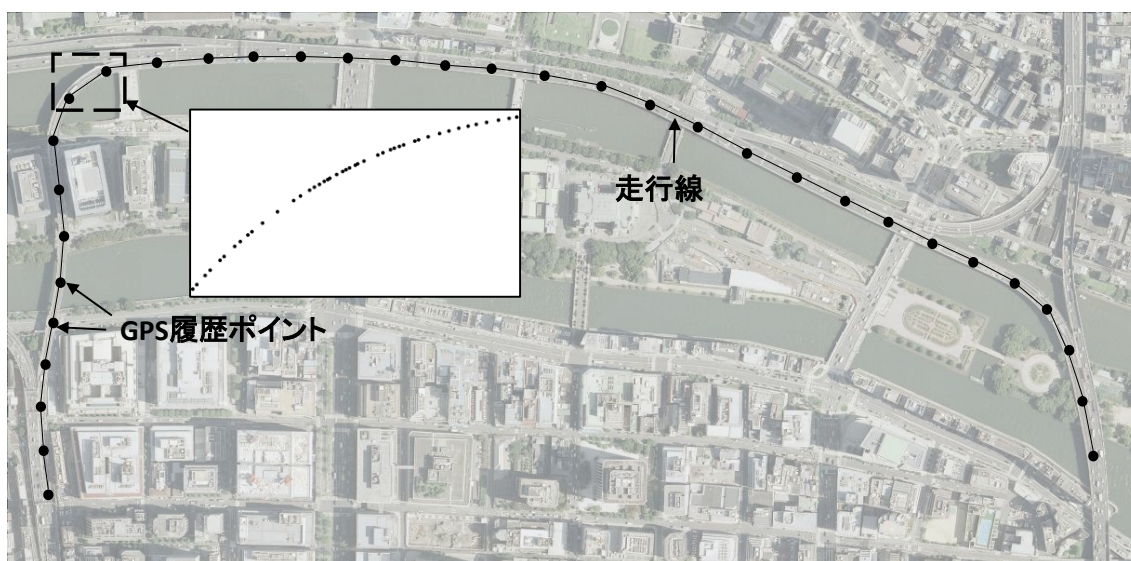


図 4.8 GPS 履歴ポイントと走行線

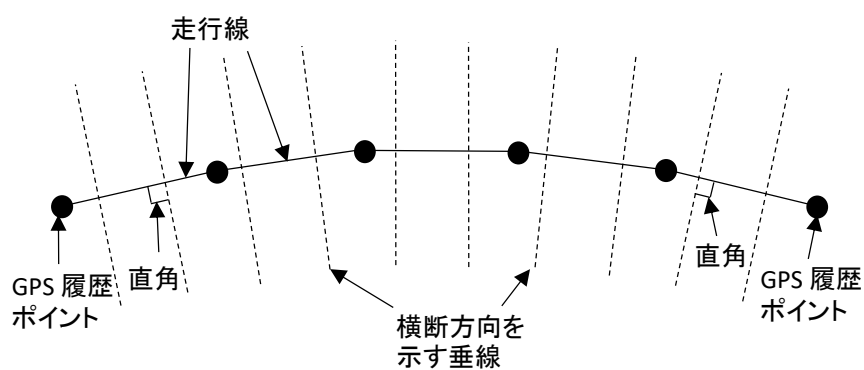


図 4.9 横断方向の算出

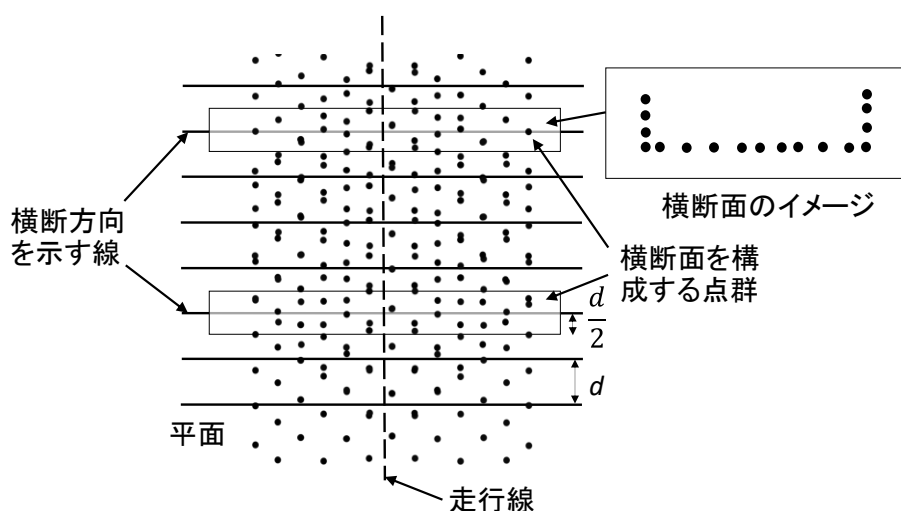


図 4.10 横断面の取得

高架橋の線形は、直線、緩やかなクロソイド曲線と円弧により構成されている。そのため、道路に沿って車両が走行した場合、GPS 履歴ポイントは急激な角度変化がなく、緩やかな線形になると考える。また、本研究に使用する GPS 履歴ポイントは、GPS で取得した位置情報を IMU（慣性計測装置）による加速度と角速度によって補間されたものとする。これにより、GPS 履歴ポイントは、2つのポイントの間隔が約 0.04m である。以上のことから、本手法により生成した各横断面は、カーブにおける大幅な空き間隔がなく、連続する特徴点の抽出が可能と考えられる。

#### 4.3.4 特徴点抽出処理

本処理では、横断点列の密度に依存せずに、高架橋の両側に存在するコンクリート壁に着目し、走行線に近い点および壁の頂点の横断面上における位置情報を利用した計算手法を提案する。

まず、横断面から、平面上の走行線に最も近い点を抽出する。次に、図 4.11 に示すように抽出した点と両側の壁面の頂点とをそれぞれ直線で結ぶ。高架橋において、壁面の頂点は、基本的に両側の最も高い位置にある。そのため、本手法では、走行線の両側の標高値が最も大きい点を壁面の頂点とする。そして、横断面の各点から直線との垂線距離を計算する。最後に、垂線の距離が最も長い点を交差部の特徴点として抽出する。

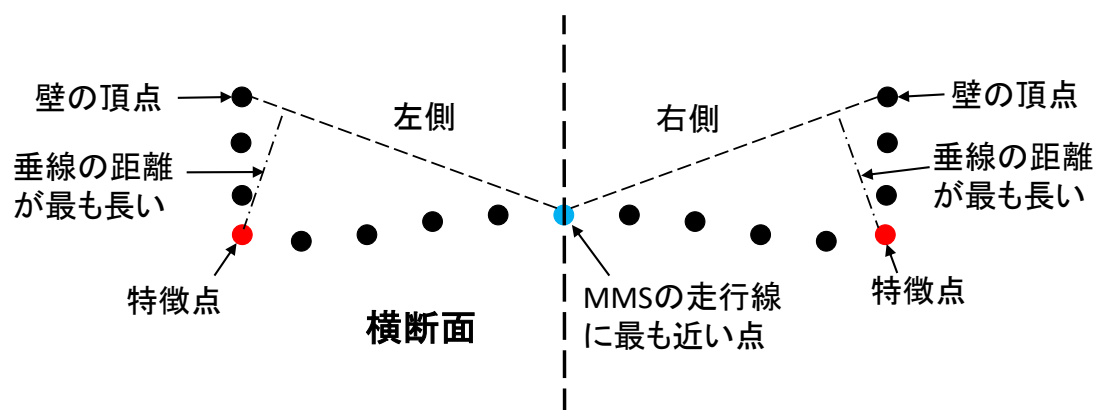


図 4.11 特徴点の取得

ここで、垂線距離を計算する時に、2次元横断面上の最も長い直線は、3次元上で他の点の垂線距離より短い場合がある。そのため、路面と壁面の交差部から離れる点が抽出されることが考えられるが、本処理では、横断面上の2次元情報を使用する。

この手法は、道路の両側に縁石がある場合に対しても、高精度な特徴点の抽出が可能である。ただし、2つの路線の壁が非常に近い場合、隣接の壁の特徴点が取得される可能性があるため、点群データの取得時間を用いて、走行線への所属の判別を行う。

### 4.3.5 特徴点選出処理

#### (1) 手法の検討

レーザスキャナの性能が低い場合や壁面が計測車両から遠い位置に存在する場合、点群データの密度が低下するため、路面と壁面の交差部の特徴点を取得できないことがある。この場合、抽出した特徴点が路面と壁面の交差部とは一致しないため、各点と実際の交差部との距離にばらつき（図 4.12）が発生する。これらの点列を用いて近似線形を発生させた場合、線形が交差部から離れ、図面精度が地図情報レベル 1,000 の許容誤差に収まらない状況となる。

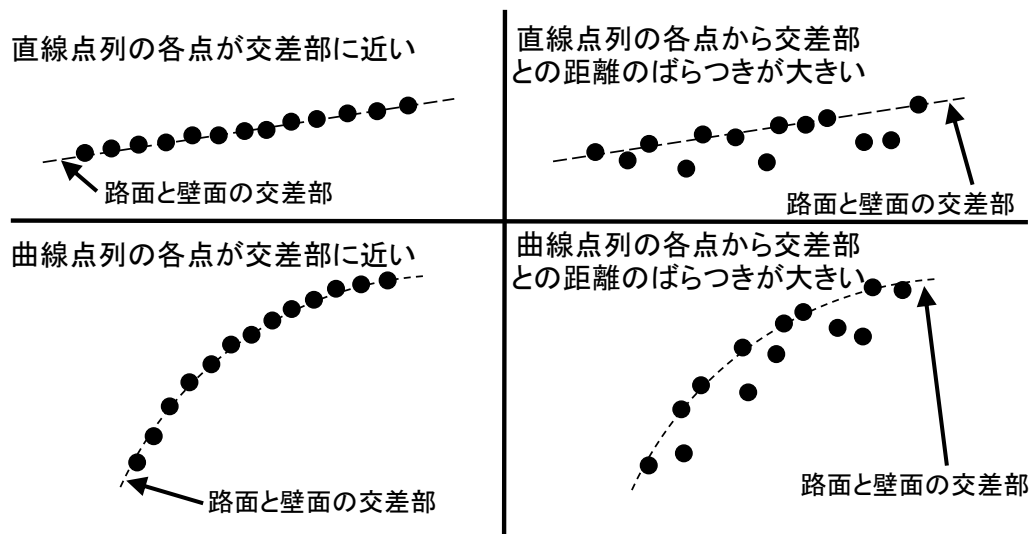


図 4.12 特徴点のばらつきのイメージ

そこで、本処理では、抽出した特徴点から、路面と壁面の交差部に近い特徴点を選出することにより、道路形状の線形を生成する。そして、選出した特徴点から、道路の中心位置を表す点群データを生成する。

防護柵設置要綱[84]によると、高度経済成長期に建設された多くの高架橋は、基本的に直壁型のコンクリート防護柵を利用している。この場合、本章での提案手法により抽出した特徴点は、図 4.13 に示すように、走行線から遠いほど路面と壁面の交差部に近いという特徴がある。本処理では、この特徴を利用し、一定間隔ごとに精度の良い特徴点を抽出する。これにより、図 4.12 に示すようなばらつきを抑えることができると考えられる。

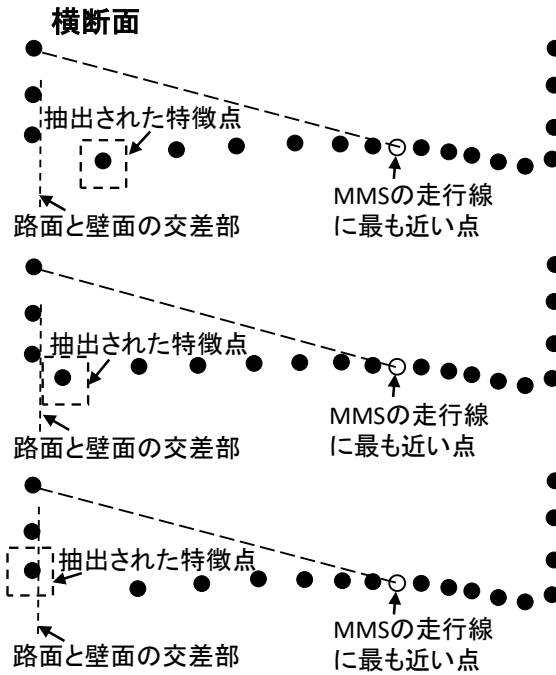


図 4.13 特徴点の性質

(2) 手法の詳細

本処理では、まず、図 4.14 に示すように、一定数の横断ごとに処理の区間を生成する。次に各特徴点から走行線までの水平距離を計算する。そして、各区間の中で水平距離が最も長い特徴点を抽出し、それ以外の特徴点を除去する。

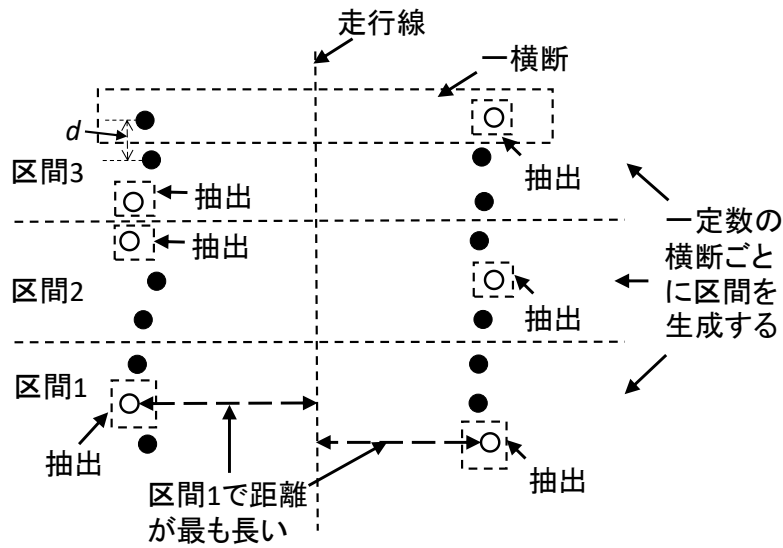


図 4.14 特徴点の選出処理

ただし、この手法は、斜めの壁を処理する場合、交差点より外側の点が抽出されるが、線形の生成精度には大きい変化はない。

### 4.3.6 点列分割処理

#### (1) 手法の検討

高架橋の両側の路面と壁面の交差部の線形を生成するには、全体の特徴点列を左右に分割する必要がある。しかし、複数本の路線が交差する分岐部において特徴点列が連続する場合（図 4.15）や、異なる路線の壁が近い場所において特徴点が混在する場合（図 4.16）などでは、各路線の点列を正しく認識できない。

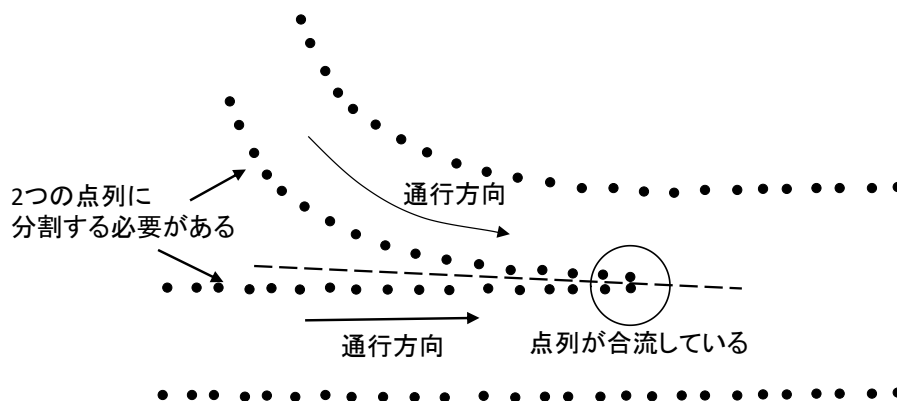


図 4.15 分岐部の点列

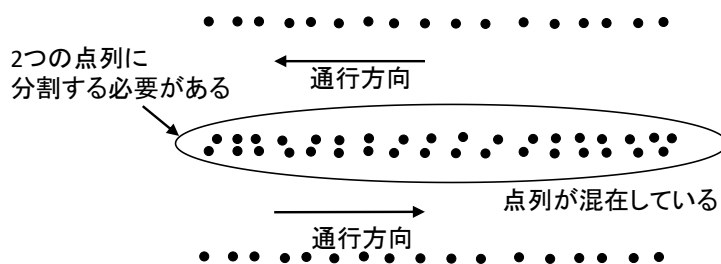


図 4.16 異なる路線が近い場合の点列

そこで、本処理では、特徴点列と走行線との位置関係を利用し、分岐部と路線間が近い場合のそれぞれの事例（図 4.17a, 図 4.18a）に対応して、路線ごとの点列に分割する。この手法により、様々な高架橋に対して、正確な線形の生成が可能と考えられる。

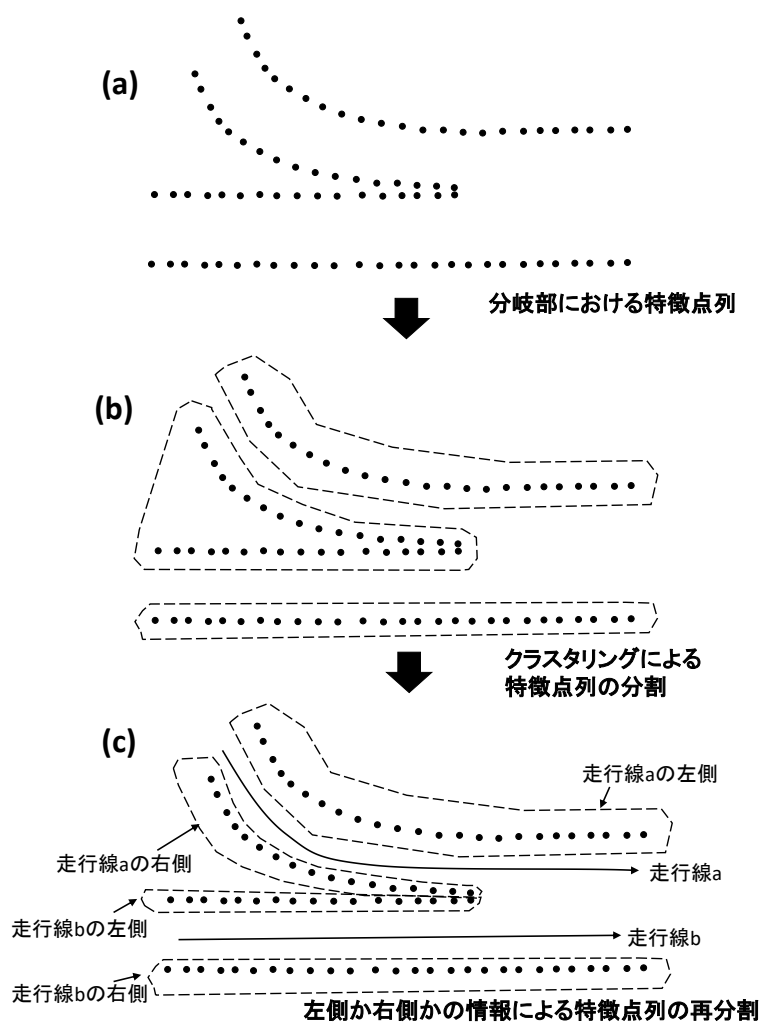


図 4.17 分岐部における点列の分割

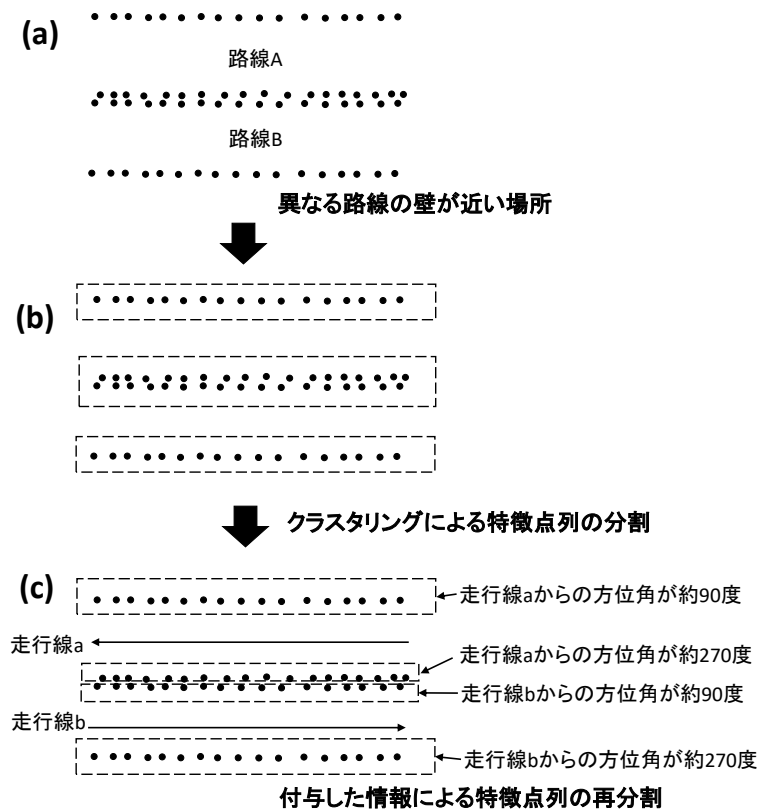


図 4.18 異なる路線が近い場所における点列の分割

分岐部では、点群データをユークリッド距離に基づきクラスタリングすることで、路線ごとの点列（図 4.17b, 図 4.18b）を作成する。ユークリッド距離に基づく階層型クラスタ分析手法では、クラスタ間の距離の算出時に最短距離法[65], 最長距離法[65], 群平均法[85], ウォード法[86]などが一般的に使用されている。本研究では、連続する点列を可能な限り一つのクラスタに含めることを目的とするため、最短距離法を採用する。

路線間が近い場合、路線ごとに連続または混在する点列を分割する必要があるため、それぞれの点列と走行線との対応関係（図 4.17c, 図 4.18c）を用いて分離する。ここで、分岐部の 2 本の走行線に属するそれぞれの特徴点は、走行線に対する左側か右側かの情報（図 4.17c）が必ず異なる。また、異なる路線の壁が近い場所の 2 本の走行線に属するそれぞれの特徴点は、走行線に対する方位角（図 4.18c）が必ず異なる。方位角とは、ある特徴点が存在する横断面の中心から特徴点に向かう横断方向の直角座標系における水平角度である。これらの特徴から、近隣の 2 つの特徴点は、走行線に対する左側か右側かの情報と方位角が大きく異なる場合、必ず異なる路線に属することが分かる。そのため、路線ごとの点列を分割するには、走行線に対する左側か右側かの情報と方位角を利用する。なお、本処理では、



点列が立体交差する場合を考慮し、点群データの3次元情報を利用して分割する。

## (2) 処理の詳細

まず、最短距離法を用いて、離れている点列を分割する。次に、分割された各点列の中の全ての特徴点に、走行線の左側か右側かの情報と走行線からの方位角の情報を付与する。そして、隣接する2つの特徴点に対して、間の距離が短く、さらに左右情報が同様で方位角が近似する場合、それらを同じ路線の近傍点同士とし、1つの路線点列に加える。一方、間の距離が短い、左右情報や方位角が異なる2点を異なる路線の点とみなし、それぞれの路線点列に加える。また、左右情報が一致し、しかも方位角が近似する近傍点が2つ以上かつ異なる路線点列に存在する場合、それぞれの路線点列を1つにまとめる。この処理を繰り返すと、路線ごとに、道路分岐部や点列混在部における点列の再分割が可能と考えられる。

## 4.4 線形解析部

本節では、継ぎ手などの情報なしで、高精度な道路形状の線形を生成可能な点群解析手法を考案する。

### 4.4.1 線形解析機能

本機能では、起終点を用いずにクロソイド曲線の数式に基づく反復の探索処理を利用し、自然に接続するクロソイド曲線を生成する。これにより、第3章での提案手法により生じた不自然な接続問題を解決する。反復の探索処理で使用される直線と円弧の情報は、最小二乗法やハフ変換[80]などの手法により容易に抽出できる。

一方、道路の縦断設計には、直線と2次曲線が用いられる。2次曲線は、両側の接線と接点の情報からその方程式を用いて容易に計算できる。そのため、縦断では、直線を抽出しその間に2次曲線の方程式により線形を生成する。この方法で対応できない例外的な場合には、線形補間手法を提案し、自然に接続する平面と縦断の線形を実現する。

ここで、平面上では直線で設計されるが、縦断上では直線でない場合が想定される。そのため、各処理では、それぞれの面における線形を認識できるように、点群データの2次元情報を使用する。

本機能は、直線抽出処理、円弧抽出処理、クロソイド曲線生成処理、2次曲線生成処理と線形補間処理により構成される。各処理の詳細を次に示す。

#### 4.4.2 直線抽出処理

直線抽出の方法には、前後点との方位角の比較や最小二乗法などをはじめ、多くの手法がある。その中で、ハフ変換は、計算コストが比較的に大きいですが、抽出精度が高く、多くの研究で用いられる。ハフ変換を用いることで、パラメータ数が少ない直線に対して、高精度に直線を抽出できる。本処理では、入力された特徴点列から、それぞれの  $x$ ,  $y$  座標値を用いてハフ変換を行い、直線を示す複数の点列を抽出し、それぞれの直線勾配と仮起終点を取得する。

#### 4.4.3 円弧抽出処理

本処理では、直線を抽出した後に残った点群データに対して、円弧を示す点列を抽出し、円弧の中心、曲率半径と仮起終点を取得する。円の数式パラメータが直線より多いため、ハフ変換を用いた場合、計算コストが高くなり、特に曲率半径が大きい円弧に対して、抽出できない可能性がある。そのため、本処理では、計算コストが比較的低い RANSAC 法[87]を用いる。RANSAC 法は、一部のデータのみを取り出して線形の数式を計算し、パラメータの投票を行う。この処理を複数回繰り返す、投票数が最も多いパラメータを採用する。これにより、曲率半径が大きい円弧でも抽出できる。本研究は、特徴点の  $x$ ,  $y$  座標値を用いて、RANSAC 法を適用し、円弧を示す点列のパラメータを取得する。

#### 4.4.4 クロソイド曲線生成処理

##### (1) 手法の検討

クロソイド曲線は、パラメータ数が多いためハフ変換などを用いた場合、計算コストにより計算できない問題がある。一方、クロソイド曲線の前方の直線の終点と後方の円弧の起点により計算する方法もあるが、接続が不適切となる問題がある。この問題の解決策として、クロソイド曲線の形状が終点における接線の角度、スケールが終点の曲率により決定され

る特徴を利用し、曲線を生成する手法[88]がある。この手法では、曲線の基点から終点までの水平距離と終点における接線を利用し、曲線長を計算することにより曲線の他のパラメータを算出する。しかし、計測した現況データから、クロソイド曲線の起終点を正確に特定できないため、既知の情報により改良した手法が必要である。

そこで、本研究では、直線と円弧の抽出結果から得られた直線の平面上の勾配、円弧の中心の  $x$ ,  $y$  座標値と曲率半径を利用し、自然に接続可能なクロソイド曲線を生成する。このクロソイド曲線を生成した後、直線の終点と円弧の起点を調整し、連続する線形を生成する。

## (2) 処理の詳細

まず、次の手順により、クロソイド曲線の生成の反復処理に使用するデフォルト値を算出する。

Step.1 : 抽出した直線と円弧の点列上の位置を取得する。

Step.2 : 直線と円弧との間の区間を仮クロソイド曲線部とする。

Step.3 : 円弧の円中心から直線に垂線をおろし、垂線の方法と距離をデフォルト値として算出する。

次に、円中心から直線におろした垂線の方法を開始方法とし、図 4.19 に示すように円中心から円弧上の任意の点  $P_c$  への方法と開始方法との間の夾角を  $\tau$  として、次の反復処理によりクロソイド曲線を生成する。

Step.1 :  $\tau$  を 0 度から 90 度まで変化させ、次の STEP 2 から STEP 4 までの処理を繰り返す。

Step.2 : 式(4.3)を用いてクロソイド曲線の長さ  $L$  を計算する。ここで、 $R$  は円弧の曲率半径とする。

$$L = 2\tau R \quad \text{式(4.3)}$$

Step.3 : 式(4.4)を用いてクロソイド曲線の終点座標  $Y$  を計算する。

$$Y = \frac{L^2}{6R} \left( 1 - \frac{L^2}{3! \times 7 \times 2^2} R^2 + \frac{L^4}{5! \times 11 \times 2^4} R^4 - \frac{L^6}{7! \times 15 \times 2^6} R^6 + \dots \right) \quad \text{式(4.4)}$$

Step.4 :  $P_c$  から直線へおろした垂線の距離を  $Y'$  として、 $Y$  と  $Y'$  の差を  $e$  として計算する。

Step.5 : STEP 2 から STEP 4 で繰り返し計算した  $e$  の最小値を取得する。

Step.6 : 取得した値が 0m の場合 (ただし、本研究では、小数の桁落ちなどを考慮し、

0.0001m 以下の距離を 0m と設定), その時の角度  $\tau$  により計算した  $L$  を利用し, 式(4.5)によりクロソイド曲線の定数パラメータ  $A$  を算出する. それ以外の場合, 対象の直線と円弧の間にスムーズに接続可能なクロソイド曲線が存在しないと判断し, 処理を終了させる.

$$A = \sqrt{RL} \quad \text{式(4.5)}$$

Step.7 : STEP 6 の  $\tau$  を用いて円弧の開始角度と開始端点を算出する.

Step.8 : STEP 6 の  $L$  を用いて, 式(4.6)によりクロソイド曲線の終点座標の  $X$  値を計算する.

$$X = L \left( 1 - \frac{L^2}{2! \times 5 \times 2^2 \times R^2} + \frac{L^4}{4! \times 9 \times 2^4 \times R^4} - \frac{L^6}{6! \times 13 \times 2^6 \times R^6} + \dots \right) \quad \text{式(4.6)}$$

Step.9 : 終点座標の  $X$  値と直線の勾配を用いて, 円弧の開始端点から直線の終了端点までの水平オフセット距離を計算することにより, 直線の終了端点の座標を算出する.

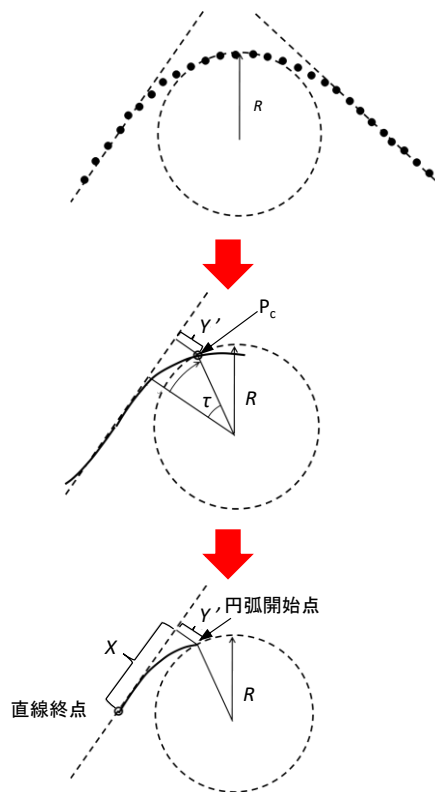


図 4.19 クロソイド曲線の算出方法

本手順で処理を行うことで, 直線と円弧における位置があいまいな線形端点の使用を避

けることができるため、スムーズに接続可能なクロソイド曲線を低コストで生成できる。

#### 4.4.5 2次曲線生成処理

本処理では、2本の直線の情報から、その間に近似する2次曲線を既存の数式で計算する。図 4.20 に示すように2本の直線の交点を算出し、交点から2本の直線の夾角を2等分する線を引く。以降、交点を原点、引いた線を Y 軸とした座標系を用いる。まず、交点に近い線分の端点を接点 P1 とし、P1 と交点の距離を利用して、もう一方の接点 P2 を算出する。次に、2次曲線の式(4.7)を微分した接線の数式から式(4.8)に変換する。そして、接線としての直線の起終点を用いて、勾配  $k$  を算出する。続いて、式(4.7)と式(4.8)により P1 と P2 で2本の直線に接する2次曲線のパラメータ  $a$  と  $b$  を算出する。最後に、直線の端点を P1 と P2 に調整する。

$$y = ax^2 + b \quad \text{式(4.7)}$$

$$a = \frac{k}{2x} \quad \text{式(4.8)}$$

式(4.8)において、 $x$  は接点の座標、 $k$  は接線の勾配である。

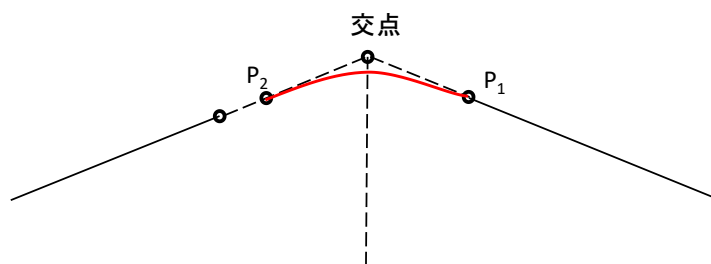


図 4.20 2次曲線の算出方法

#### 4.4.6 線形補間処理

直線と円弧の抽出結果において、次の場合により線形が不連続(図 4.21)になることが考えられる。

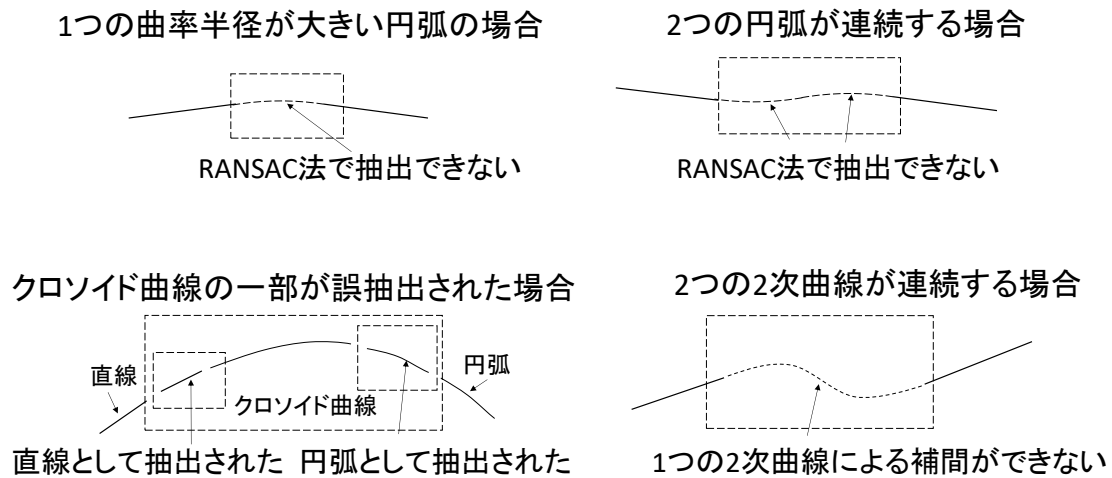


図 4.21 線形が切れる4つの場合

- 1) 円弧抽出処理で、曲率半径が非常に大きく、RANSAC法[87]の閾値を超える円弧を抽出できない場合。
- 2) 分岐部において、連続する曲率半径が非常に大きい2つの円弧を同時に抽出できない場合。
- 3) 長いクロソイド曲線において、曲線の一部が円弧または直線と認識され、クロソイド曲線を正確に生成できない場合。
- 4) 2つの2次曲線が連続し、2次曲線を正確に生成できない場合。

線形補間処理は、直線で補間する方法と前後の線形の形状を考慮した曲線を用いた補間がある。しかし、直線での補間は容易に実現できるが、補間された線形が自然に接続していない問題がある。また曲線での補間は自然に接続することが可能であるが、道路に使用される幾何要素でない場合がある。そこで、本処理では、道路構造令の解説と運用[53]を考慮し、これら4つの場合に対して、既存の数式を利用し、点列の形状を保つようにそれぞれの線形の補間処理を提案する。道路構造令の解説と運用では、クロソイド曲線の移程量が0.2m未満で曲率半径が非常に大きい円弧(表4.1)を使用する場合、クロソイド曲線を省略することができる。そのため、1)と2)では、2本の直線を円弧で接続し、3)では、抽出された円弧と直線がクロソイド曲線かどうかの判定を行う。4)では、2本の直線間をスムーズに接続させるような2つの2次曲線を計算する。

表 4.1 クロソイド曲線が省略可能な曲率半径

設計速度 (km/h)	120	100	80	60
計算値(m)	2,100	1,450	930	520
ラウンド値(m)	2,100	1,500	900	500

(1) 曲率半径が非常に大きい円弧を抽出できない場合

本処理では、図 4.22 に示すように平面上の 2 本の直線の間には交点があれば、直線間に 1 つの円弧があると判断して補間する。

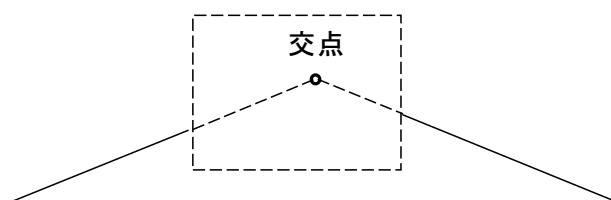


図 4.22 交点が線分間にある場合

線形を補間する場合、生成した線形は、区間内の点列の形状に近似するほど、精度が高くなる。そのため、本処理では、点列の各点の  $x$ ,  $y$  座標値で算出した近似円弧の曲率半径を用いて補間を行う。まず、抽出された 2 本の直線間の全ての特徴点を抽出する。次に、最小二乗法を用いて、特徴点群の近似円弧の曲率半径  $r$  を算出する。そして、図 4.23 に示すように交点から 2 本の直線の夾角  $\alpha$  を 2 等分する線を引き、 $\alpha$  と  $r$  を利用し交点から円中心までの距離  $l$  を算出する。最後に円中心と  $r$  を利用し、2 本の直線と接する円弧を生成する。これにより、曲率半径が非常に大きい円弧の補間が可能となる。

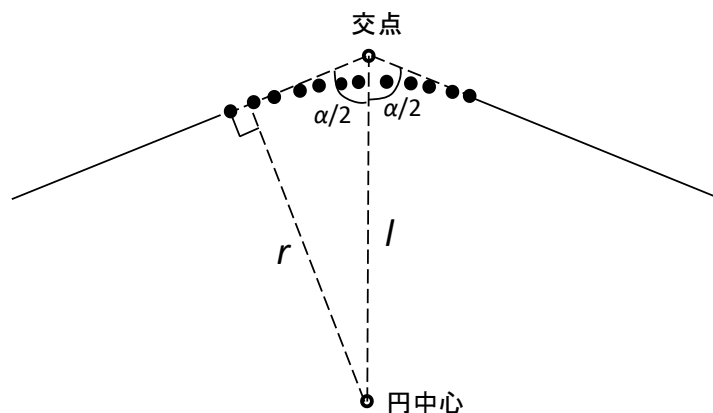


図 4.23 円弧を用いた補間

**(2) 連続する 2 つの円弧を抽出できない場合**

本処理では、図 4.24 に示すように 2 本の線分を延長した直線として想定し、線分上に交点がある場合と線分の外に交点がある場合、直線間に 2 つの円弧があると判断して補間を行う。

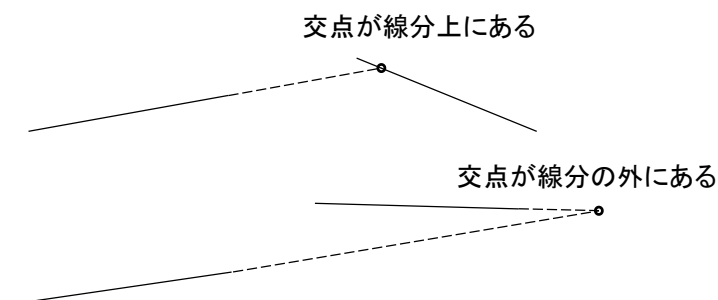


図 4.24 交点が線分上か外にある場合

本処理では、(1)の場合と同様に 2 つの円弧の形状を近似させるように、点列の各点の  $x$ ,  $y$  座標値で算出したそれぞれの近似円弧の曲率半径を用いて補間する。具体的には、図 4.25 に示すように抽出された 2 本の直線の間の特徴点を抽出する。次に、抽出した特徴点列から、最小二乗法により 2 つの近似円弧の曲率半径  $r_1$  と  $r_2$  を算出する。そして、直線の端点を接点とし、 $r_1$  と  $r_2$  を用いて、2 つの近似円弧を生成する。しかし、算出した 2 つの近似円弧は自然に接続せずにズレが発生する。そこで、2 つの円弧を互いに接するように、 $r_1$  と  $r_2$  を調整する。ただし、近似線形の形状を保つには、2 つの円弧の曲率半径  $r_1$  と  $r_2$  の比率を維持する必要がある。これにより、連続する 2 つの円弧の補間が可能となる。



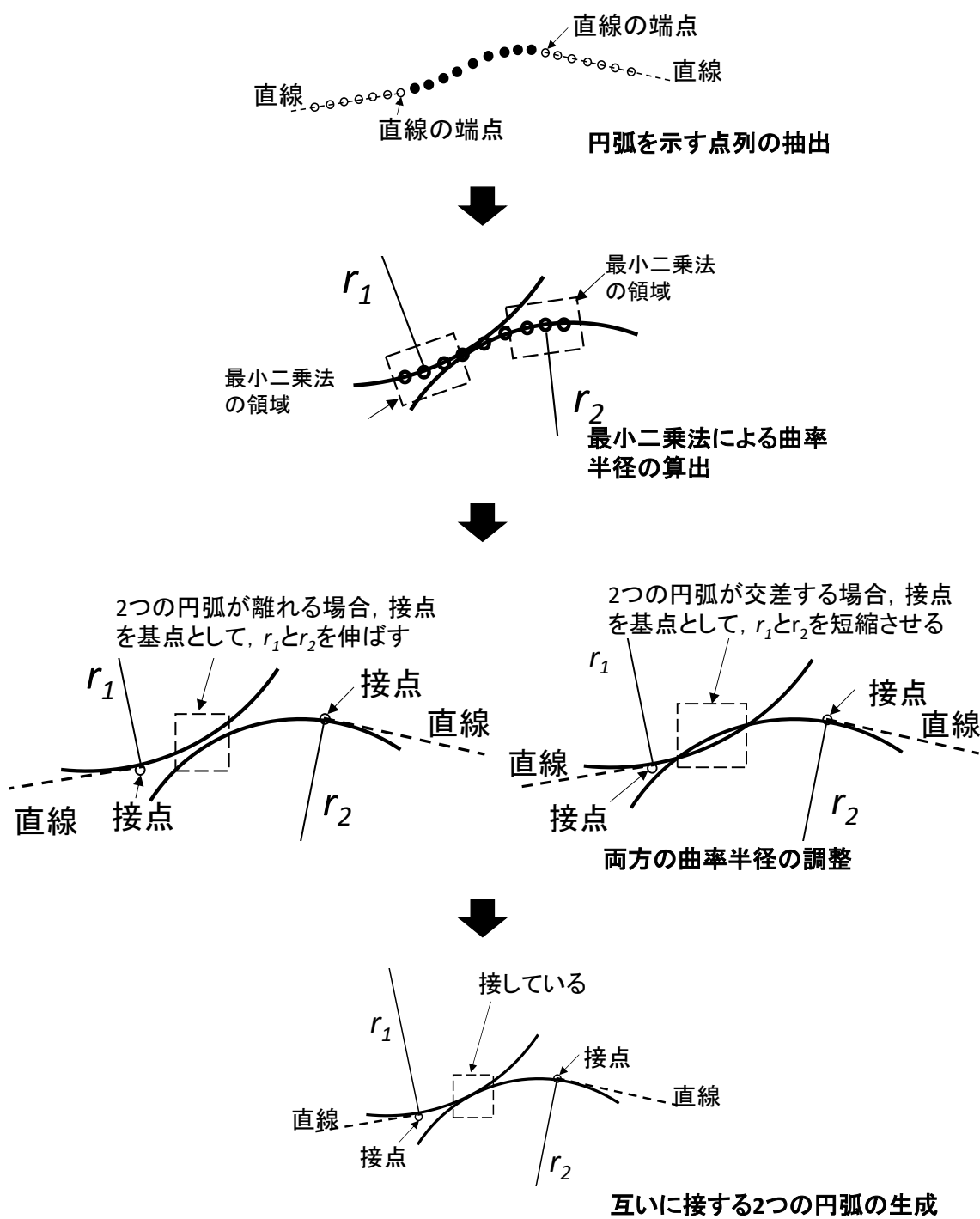


図 4.25 2つの円弧を用いた補間

(3) クロソイド曲線の一部が直線または円弧として抽出された場合

本処理では、平面図において、抽出された円弧が連続する場合、または円弧に隣接する直

線が短い場合、線形の誤認識と判定して補正を行う。クロソイド曲線の曲率半径の平均は、隣接する円弧の曲率半径より必ず大きいという特徴がある。この特徴を利用し、円弧抽出処理で抽出した連続する円弧の中から曲率半径が最も小さいものを円弧とし、それ以外のものをクロソイド曲線の一部とする。そして、円弧に隣接する直線が短く、さらにこの短い直線に長い直線が隣接する場合、短い直線をクロソイド曲線の一部とする。このように判定した後の円弧や直線の情報を利用し、クロソイド曲線生成処理の手法を用いてクロソイド曲線を生成する。これにより、一部が誤抽出されたクロソイド曲線の補間が可能となる。

#### (4) 縦断勾配が連続的に変化する場合

本処理では、連続する2つの円弧を抽出できない場合と同様に、2本の線分を延長した直線として想定し、線分上に交点がある場合と線分の外に交点がある場合、直線間に2つの2次曲線があると判定し補間を行う。道路に使用する2次曲線は、円弧に近似し、曲率半径で表示すること[53]がある。そのため、2つの2次曲線の近似線形の精度を高くするには、2つの円弧を用いた補間の手法と同様にそれぞれに近似する円弧の曲率半径を利用し、2次曲線を生成する。まず、接する2つの円とそれらの接線  $L_c$  を算出する。次に、図 4.26 に示すように、1本の直線  $L_1$  の端点を接点とし、 $L_c$  上のもう1つの接点を算出する。そして、2つの接点で2本の直線と接するように2次曲線を生成する。最後に、もう1本の直線  $L_2$  に対しても同様に2次曲線を生成する。これにより、 $L_1$  と  $L_2$  と互いに接する2つの2次曲線の生成が可能となる。

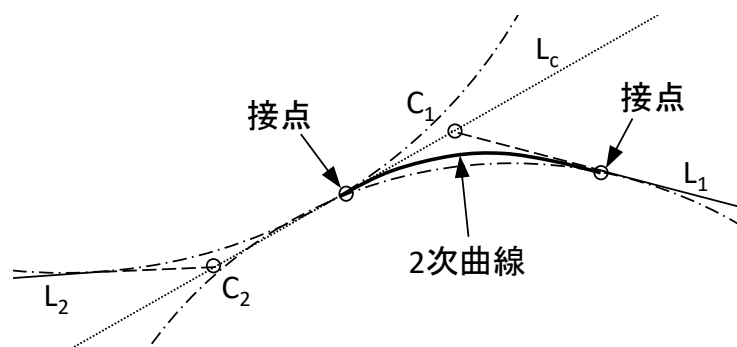


図 4.26 2つの2次曲線を用いた補間

ただし、 $L_1$  と  $L_c$  の交点  $C_1$  から  $L_1$  上の接点までの距離が2つの交点  $C_1$  と  $C_2$  間の距離の半分より大きい場合、 $C_1$  と  $C_2$  の線分の中心点を接点とし、 $L_1$  における接点を再計算する必要がある。これにより、2つの2次曲線の補間が可能となる。

## 4.5 実証実験

### 4.5.1 実験計画

本提案手法の有用性を確認するため、事前に用意した線形から生成した点群データとMMSにより計測した現況の点群データの2種類を用いて、特徴点の抽出精度、線形の生成精度と高架橋の外観精度の3項目について評価実験を行う。本研究の実験計画を図4.27に示す。

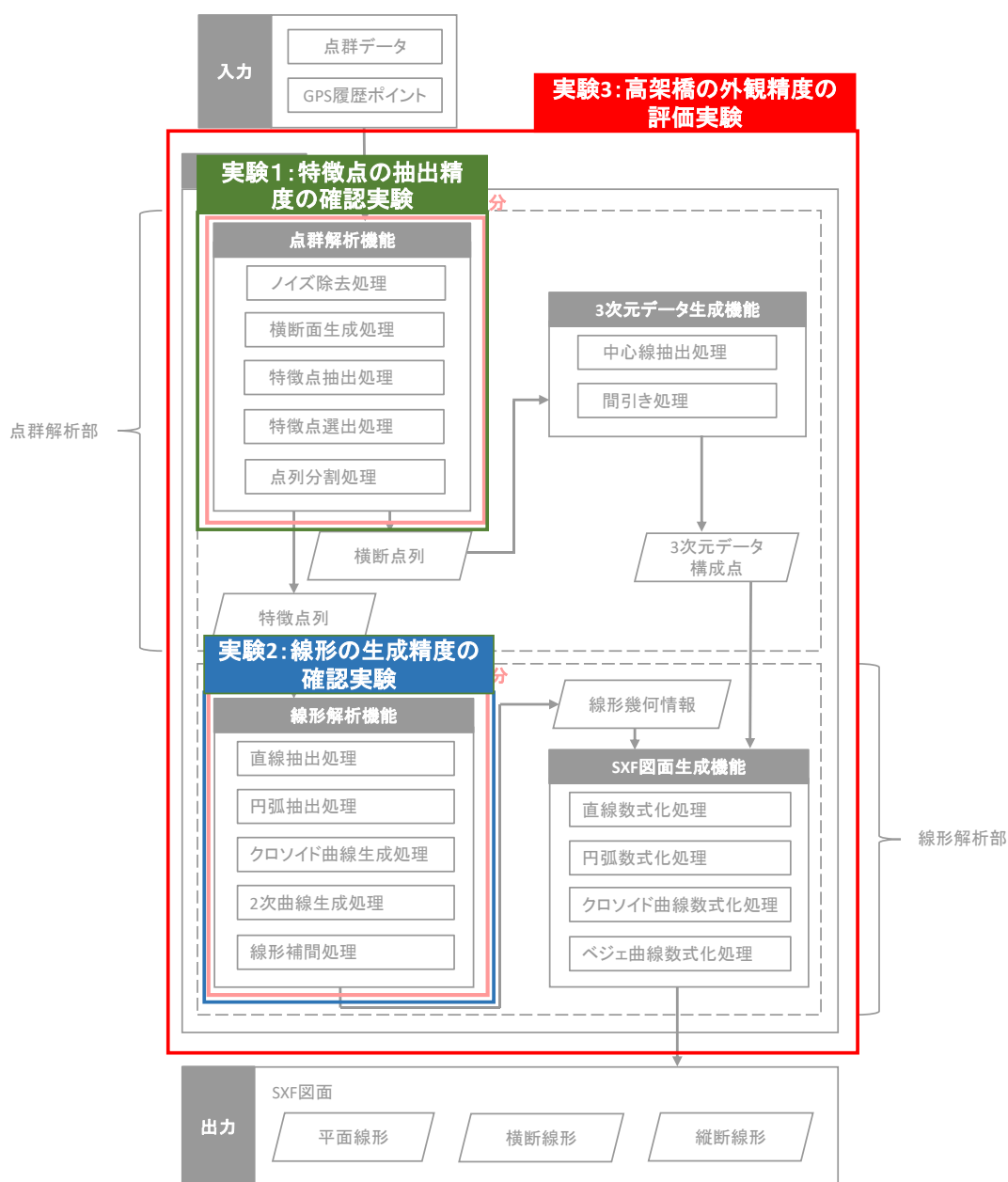


図 4.27 実験計画

図 4.27 の実験計画は、評価実験により検証する項目を明確化するため、図 4.5 のシステムの流れとの対応関係を図示したものである。特徴点の抽出精度の確認実験では、点群解析機能により生成した特徴点列の位置精度を検証する。線形の生成精度の確認実験では、線形解析機能により生成した線形の幾何情報の精度を検証する。高架橋の外観精度の評価実験では、実際の高架橋の現況データから、生成した道路線形の再現精度を検証する。

## 4.5.2 特徴点の抽出精度の確認実験

### (1) 実験データ

本実験では、MMS から取得した高架橋の点群データを利用する。計測対象の高架橋は第 3 章と同様に路面や壁面などが整備されている阪神高速 1 号環状線（図 4.28）である。また、阪神高速 1 号環状線は全路線の壁が垂直なものになっている。

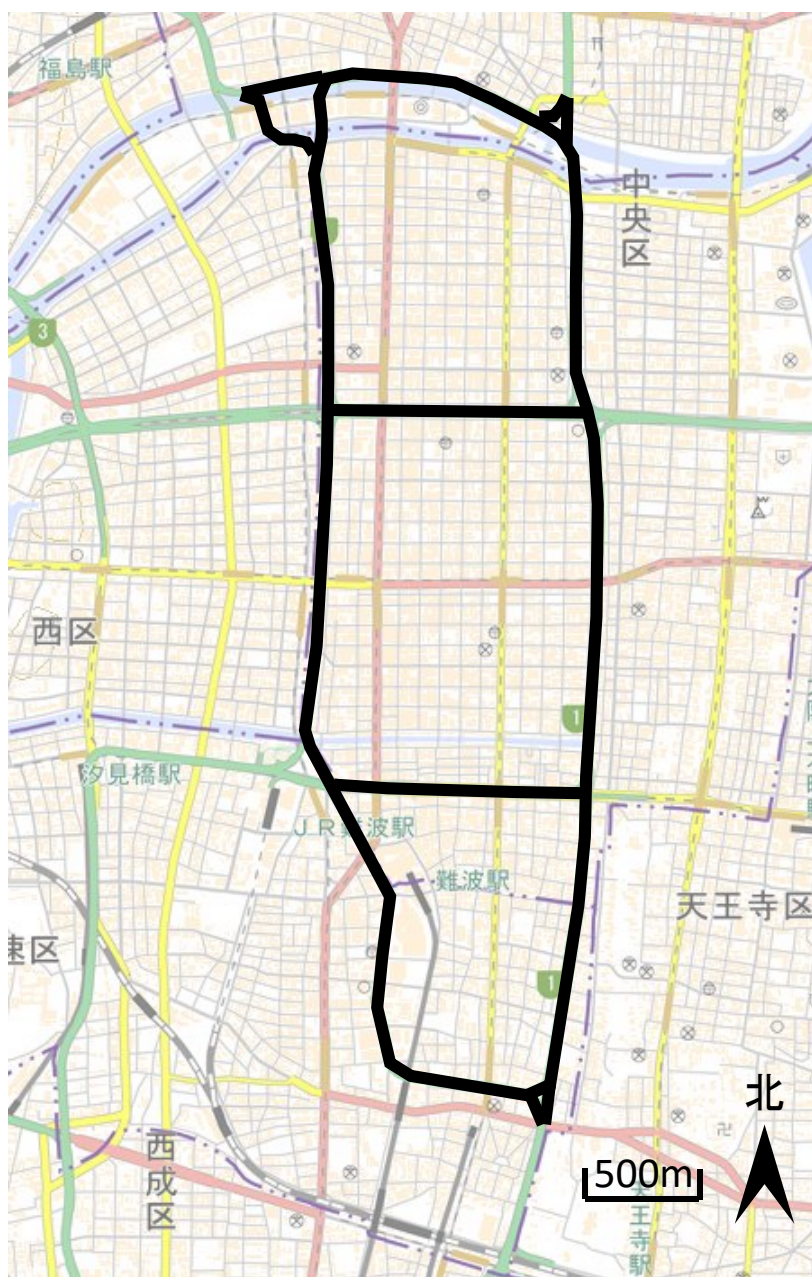


図 4.28 実験の計測範囲  
(出典：国土地理院，電子国土 Web)

点群データは、取得した後トータルステーションにより計測した複数個の標定点で補正したものを使用する。使用する MMS (StreetMapper360) の詳細仕様を表 4.2 に示す。GPS 受信機は 0.5 秒間隔で位置を取得している。その位置情報は、IMU により補間され、2 点間の平均間隔が約 0.04m となっている。本実験では、計算コストを下げるために、平均間隔が約 2m となるまで点を間引いたデータを用いる。正解データは、現況の CAD 図面とする。

表 4.2 StreetMapper360 の仕様

絶対精度	10mm
相対精度	5mm
最大取得点数	約 300,000 点/秒 (1 台)
最大到達距離	500m

## (2) 実験内容

本実験では、特徴点抽出手法の有用性を確認するため、正解データの CAD 図面と本システムにより生成した道路線形とを比較する。まず、正解データに記載されている横断の計測箇所の内、実験の計測範囲に含まれる 20 箇所（図 4.29）を対象とする。この 20 箇所は、高架橋全線からおおよそ等間隔に取得するものとする。次に、正解データに記載されている計測箇所の横断幅員と本システムにより生成した横断幅員とを比較し、その誤差を確認する。

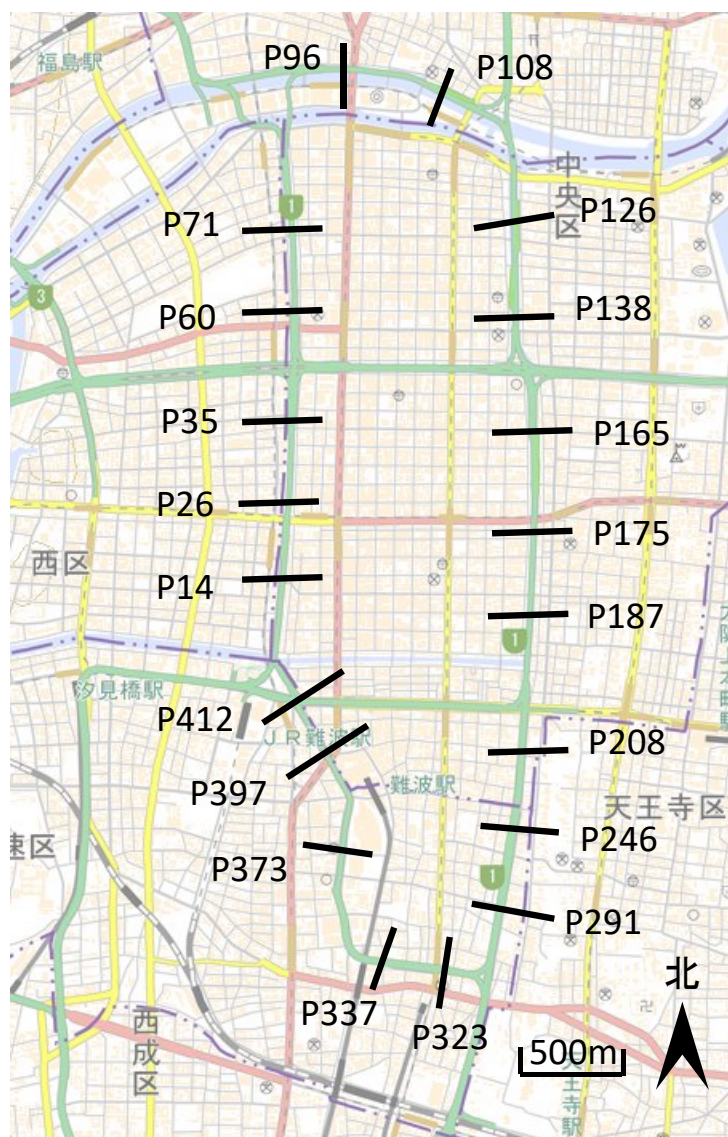


図 4.29 特徴点の抽出精度を確認する箇所  
(出典：国土地理院，電子国土 Web)

### (3) パラメータの設定

ノイズ除去処理では、計測対象の高架橋における最大の道路幅や壁の高さを考慮し、GPS 履歴ポイントから左右 30m、上下 5m 以内の領域をラベリング処理の領域とする。また、現況の点群密度と民法第二百三十四条に規定されている構造物の間隔 (0.5m) を考慮し、平面投影の格子のサイズを 0.25m×0.25m とする。

横断面生成処理における横断の間隔  $d$  は、点群密度と計算可能なコストを考慮し、第 3 章の点列の間隔と近い値の 0.10m に設定する。

特徴点選出処理では、適切な横断面数を決定するため、点列のばらつきが大きい場所におい

てパラメータ実験を行った。実験では、横断数を 1 から 10 まで設定し、それぞれの値で抽出した特徴点列の近似直線を生成し、点列との標準偏差を計算することで、ばらつきの収束程度を確認する。これにより、最適な値を決定する。実験の結果 (図 4.30) から、横断数が 3 以上の場合、点列のばらつきが 0.1m 以内に収束されたことがわかった。そのため、本研究では、横断数を 3 に設定する。ただし、この値は、点群データの密度状況によりユーザが指定可能である。

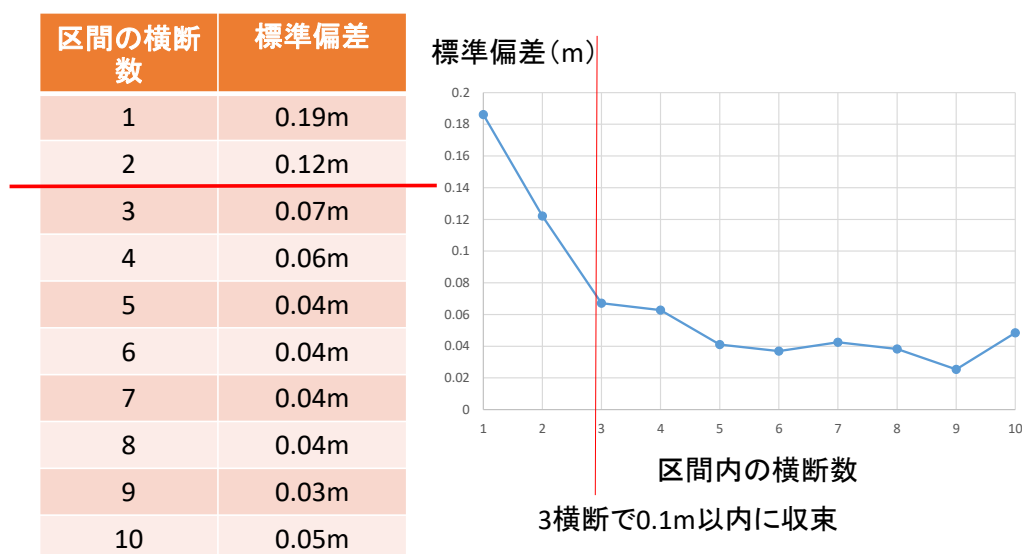


図 4.30 横断数を決定するための実験結果

点列分割処理では、分割した点列の起点から延長した線分と終点から延長した線分のなす角が 90 度以内であれば処理可能である。道路構造令の第 15 条の曲率半径に定義されている通り、高架橋では短い区間で急激な変化のある設計はできない。また、現況の高架橋を確認したところ、なす角が 90 度以上の線分間の距離は最低でも 1,000m 以上になっている。一方、その値は、走行線の両側の点列を分割するため、道路幅員以上の値に設定する必要がある。一般的に、道路の 1 車道の最低幅員は 3~3.5m になっているので、本研究では、3m 以内の点を近傍点とする。

#### (4) 実験結果と考察

本システムにより抽出した横断面の特徴点間の距離と正解データとの比較結果を表 4.3 に示す。



表 4.3 特徴点の抽出精度の結果

計測箇所	正解データ	生成した線形	誤差
P14	15.00m	15.07m	0.07m
P26	15.00m	15.07m	0.07m
P35	18.95m	18.99m	0.04m
P60	15.00m	15.09m	0.09m
P71	15.41m	15.47m	0.05m
P96	18.93m	18.93m	0.00m
P108	15.00m	15.02m	0.02m
P126	15.00m	14.99m	0.01m
P138	15.69m	15.79m	0.10m
P165	16.38m	16.40m	0.02m
P175	15.68m	15.75m	0.07m
P187	15.00m	15.07m	0.07m
P208	8.50m	8.59m	0.09m
P246	8.50m	8.58m	0.08m
P291	8.50m	8.58m	0.08m
P323	9.34m	9.48m	0.13m
P337	9.44m	9.52m	0.08m
P373	8.49m	8.70m	0.21m
P397	8.54m	8.58m	0.03m
P412	8.50m	8.61m	0.11m

表 4.3 では、誤差の絶対値が最小 0.00m、最大 0.21m、平均 0.07m、標準偏差が 0.05m であった。また、点群データを詳細に確認した結果、誤差が大きい P323 と P373 では、図 4.31 に示すように路面と壁面の境界が垂直ではなく斜めだった。このため、明確な交差部がないことにより、特徴点が見いだせないことが誤差の大きい原因であると考えられる。それ以外の箇所では、全て 0.1m 程度の誤差に収まった。走行線から取得した横断方向と正解データとのズレにより 2 点間の距離が少し長いことを考慮すると、生成した横断幅員は現況に非常に近いことが分かった。

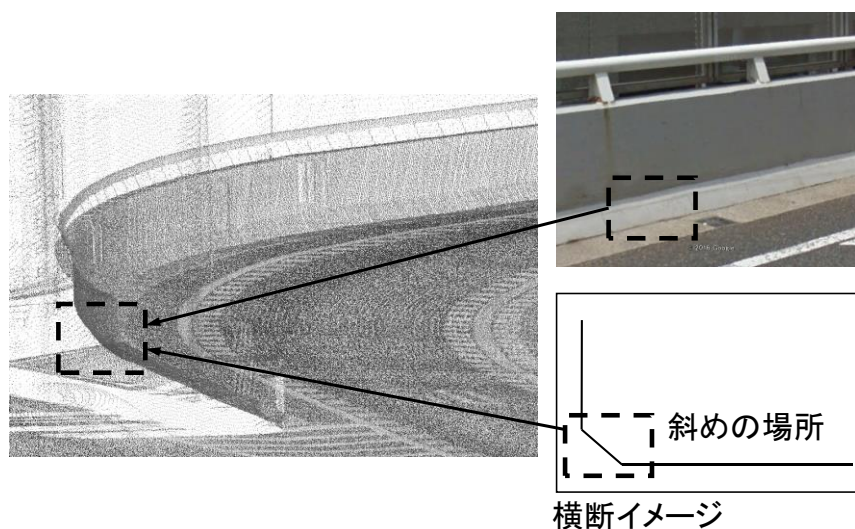


図 4.31 横と壁面の境界を判定しにくい箇所

また、これらの誤差は第3章と同様に地図情報レベル1,000の水平位置の許容誤差の0.70mを満たしている。そのため、抽出した特徴点は自動運転への利用が十分に期待できる。

一方、全体の横断面を確認した結果、約90%の横断面の壁頂点を正確に抽出できることが分かった。正確に抽出できなかった場所は、高架橋の付属物、分岐部の隣接する壁、車などのノイズが原因となっている。高架橋の付属物や分岐部の隣接する壁の頂点が抽出された場合、特徴点の抽出に第3.3節で説明した特徴を適用できる。そのため、これらの場合でも、路面と壁面との特徴点を正確に取得し高精度な図面を生成できる。一方、車などのノイズがある場合、データ欠損が発生するため特徴点を抽出できない。しかし、複数回の走行により欠損部を補間することで、提案手法での特徴点の抽出が可能と考えられる。

また、生成した特徴点列を確認した結果から、全ての点列が路線ごとに分割できたことがわかった。以上、提案した分割手法の有用性が確認できた。

### 4.5.3 線形の生成精度の確認実験

#### (1) 実験データ

本実験では、起終点と幾何情報が分かる複数個の線形で生成したものを正解データ（図4.32）とし、各線形から等間隔に100個の点を選定しシステムの入力データとする。

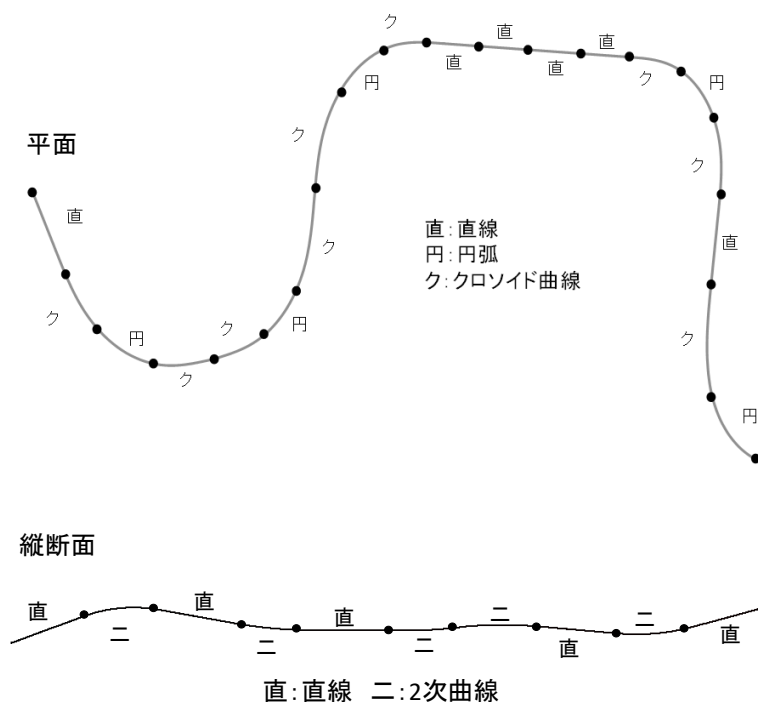


図 4.32 線形の生成精度の確認実験の正解データ

本実験の平面の正解データは、第 3.5.4 項と同様に、合計 20 個の直線、クロソイド曲線と円弧で構成し、縦断面の正解データは、合計 10 個の直線と 2 次曲線で構成した。それぞれの線形は、高架橋の支間長と同様におよそ等間隔のものとする。

なお、本研究では、第 3 章と同様に図 4.12 のようなばらつきを考慮するため、表 4.4 に示すパターンの変位量を選定した各点に付与し、各パターンで生成した図面を確認することで、提案手法のロバスト性を評価する。

表 4.4 用意する 3 パターンの変位量

	X 値の変位量	Y 値の変位量
パターン 1	0m	0m
パターン 2	-0.01m~0.01m	-0.01m~0.01m
パターン 3	-0.10m~0.10m	-0.10m~0.10m

## (2) 実験内容

本実験では、システムにより出力した線形の幾何情報と正解データとを比較し、正確な幾何情報を抽出した割合を算出することで、線形抽出手法の有用性を評価する。また、本実験

では、生成した線形と正解データとの相関係数および平均二乗誤差を算出することで、線形生成手法と線形補間手法の有用性を確認する。

### (3) パラメータの設定

直線抽出処理における平面の直線抽出のハフ変換では、計算コストと抽出精度がトレードオフであることを考慮し、最大限細分化できる  $0.03\text{m} \times 0.03\text{m}$  の格子に点群データを投影する。角度の変化量については、精度変化の実験を行い、その結果から、 $0.1$  度以下の値を設定すると、結果が大きく変化しないことがわかった。そのため、本研究では角度の変化量を  $0.1$  度に設定する。抽出可能な直線の最小距離については、高架橋がスパンごとに設計されることを考慮した値を利用する。実験データの一部を調査してみると、最小のスパンが約  $40\text{m}$  になっているが、継ぎ手のずれを考慮する必要があるため、最小のスパンの半分の値の  $20\text{m}$  を設定する。

円弧抽出処理の RANSAC 法について、抽出可能な半径の最小値は、道路構造令の第 15 条の曲率半径の最小値の  $15\text{m}$  を考慮し、 $10\text{m}$  に設定する。一方、抽出可能な半径の最大値は、 $1,000\text{m}$  以上の場合、円弧がハフ変換により直線として抽出されるため、 $1,000\text{m}$  に設定する。反復回数は、実験から、一般的に 20 回以内に結果が出るが、特殊な場合を考慮し十分な精度を取得できるように  $2,000$  回に設定する。

クロソイド曲線生成処理では、角度の変化量を  $0.01$  度に設定する。この値に設定すると、スパンの約  $40\text{m}$  の長さのクロソイド曲線では、接続点のずれが  $0.01\text{m}$  以下に収まり、十分な精度が得られると考えている。

### (4) 実験結果と考察

本システムにより生成した各線形の幾何情報の種類と正解データとの比較を表 4.5 に示す。

表 4.5 幾何情報の種類と正解データとの比較結果

			正解数	正確に抽出された数	誤抽出数	再現率
パターン1	平面	直	6	6	2	0.75
		円	5	5	0	1.00
		ク	9	9	0	1.00
	縦断面	直	5	5	1	0.83
		二	5	5	0	1.00
パターン2	平面	直	6	6	2	0.75
		円	5	5	0	1.00
		ク	9	9	0	1.00
	縦断面	直	5	5	1	0.83
		二	5	5	0	1.00
パターン3	平面	直	6	6	3	0.67
		円	5	5	0	1.00
		ク	9	9	0	1.00
	縦断面	直	5	5	1	0.83
		二	5	5	0	1.00

また、生成した近似線と正解データとの相関係数および平均二乗誤差を表 4.6 に示す。

表 4.6 高架橋の判定精度の確認実験の結果

		相関係数	平均二乗誤差
パターン1	平面線形	1.00	0.03m
	縦断線形	1.00	0.20m
パターン2	平面線形	1.00	0.02m
	縦断線形	1.00	0.25m
パターン3	平面線形	1.00	0.03m
	縦断線形	1.00	0.06m

表 4.5 では、幾何情報の種類の再現率は、最低 0.67 で、全体の平均は約 0.91 となった。また、抽出した円弧と 2 次曲線の数と種類は完全に一致した。すなわち、本提案手法により、高精度に幾何情報の種類と数を抽出できることが分かった。一方、パターン1とパター

ン2の平面図では、直線が2本、パターン3の平面図では、直線が3本誤抽出された。これは、連続するクロソイド曲線の基点付近が直線に近似していることが原因である。また、全てのパターンの縦断面では、直線が1本ずつ誤抽出された。これは、2つの2次曲線をスムーズに接続させるため、線形補間処理により短い直線を追加したためである。表4.4に示した変位量の増大により、多くの点が線形から大きく離れ、幾何情報の抽出精度が低下する場合が考えられる。これは、点群密度が非常に低い場合に相当する。そのため、密度が非常に低い点群データを利用する場合、複数回の走行により点群密度を増加させることが望ましい。

表4.6の相関係数と平均二乗誤差から、3つのパターンとも、本提案システムにより高精度に平面線形を生成できることが分かった。これらの誤差は、第3章の誤差より大きいですが、地図情報レベル1,000の水平位置の許容誤差の0.70mの1/10以内に収まっていることから、十分な精度が得られたと考えている。また、全てのクロソイド曲線を確認した結果、第3章のような不自然な接続（図4.33）がないことも分かった。

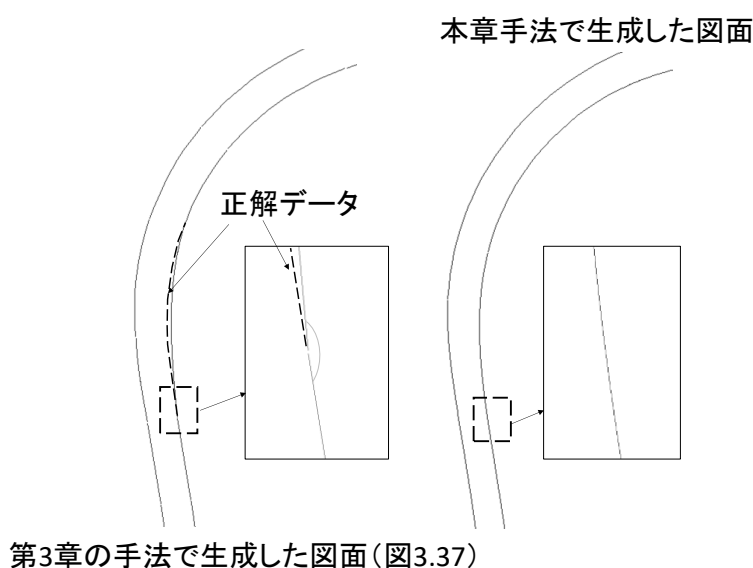


図 4.33 線形の生成精度の確認実験の正解データ

しかし、縦断面の平均二乗誤差は平面より大きくなっている。これは、縦断面の勾配変化が緩やかで、直線が正解データより長く抽出されることが原因となっている。特に、変位量の大きいパターン3では、直線が短く抽出されたため、平均二乗誤差がパターン1とパターン2より小さい。

以上のことから、特徴点抽出精度の平均誤差が0.10m程度（表4.3）であるので、特徴点

抽出機能により取得した特徴点を用いて、高精度な近似線形の生成が可能であることが分かった。

## 4.5.4 高架橋外観精度の評価実験

### (1) 実験データ

本実験では、特徴点の抽出精度の確認実験で用いた阪神高速 1 号環状線の補正済の計測結果を使用する。ただし、MMS で複数回走行し、取得した点群データを使用する。

### (2) 実験内容

本実験では、正確な線形ベクトル情報が復元されたかどうかを判定するため、本システムにより出力した平面図と縦断面図の近似線と正解データとの近似率を算出する。具体的には、生成した各線形から 1m 間隔で評価点を取得する。そして、評価点を用いて特徴点列および正解データとの相関係数と平均二乗誤差により評価を行う。

### (3) パラメータの設定

本実験におけるパラメータについて、基本的に 4.5.2 項と 4.5.3 項と同様なパラメータに設定する。ただし、ハフ変換のとき、間隔が遠い 2 つの点列が 1 直線として抽出される場合 (図 4.34) がある。

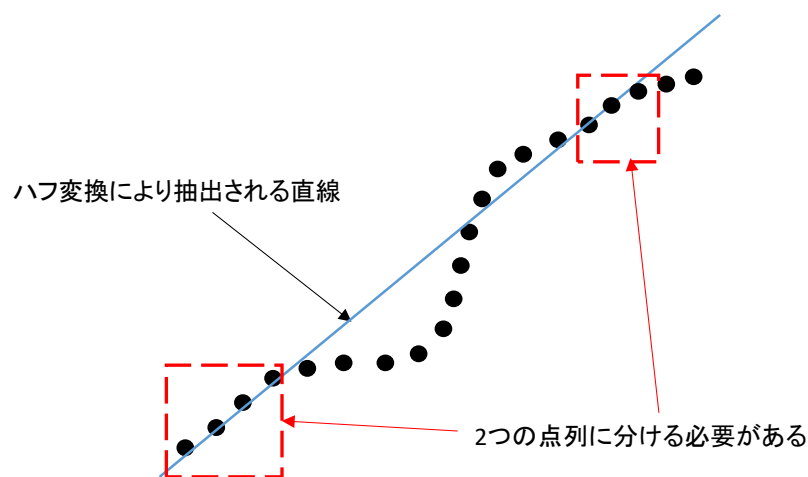


図 4.34 間隔が遠い 2 つの点列が 1 直線として抽出される例

図 4.34 の例では、点列の中の空きスペースの最小距離を指定することで、点列を 2 つに

分ける必要がある。ここで、4.5.3 と同様に高架橋がスパンごとに設計されることを考慮した値を利用する。最小のスパンが約 40m になっていることから、約 40m 以内に図 4.34 のような変化はないと考える。そのため、本研究では、空きスペースの最小距離をその値以下のラウンド値の 30m に設定する。

#### (4) 実験結果と考察

高架橋の現況データから、本システムにより生成した平面図(図 4.35)、縦断図(図 4.36)と正解データとの比較結果を表 4.7 に示す。



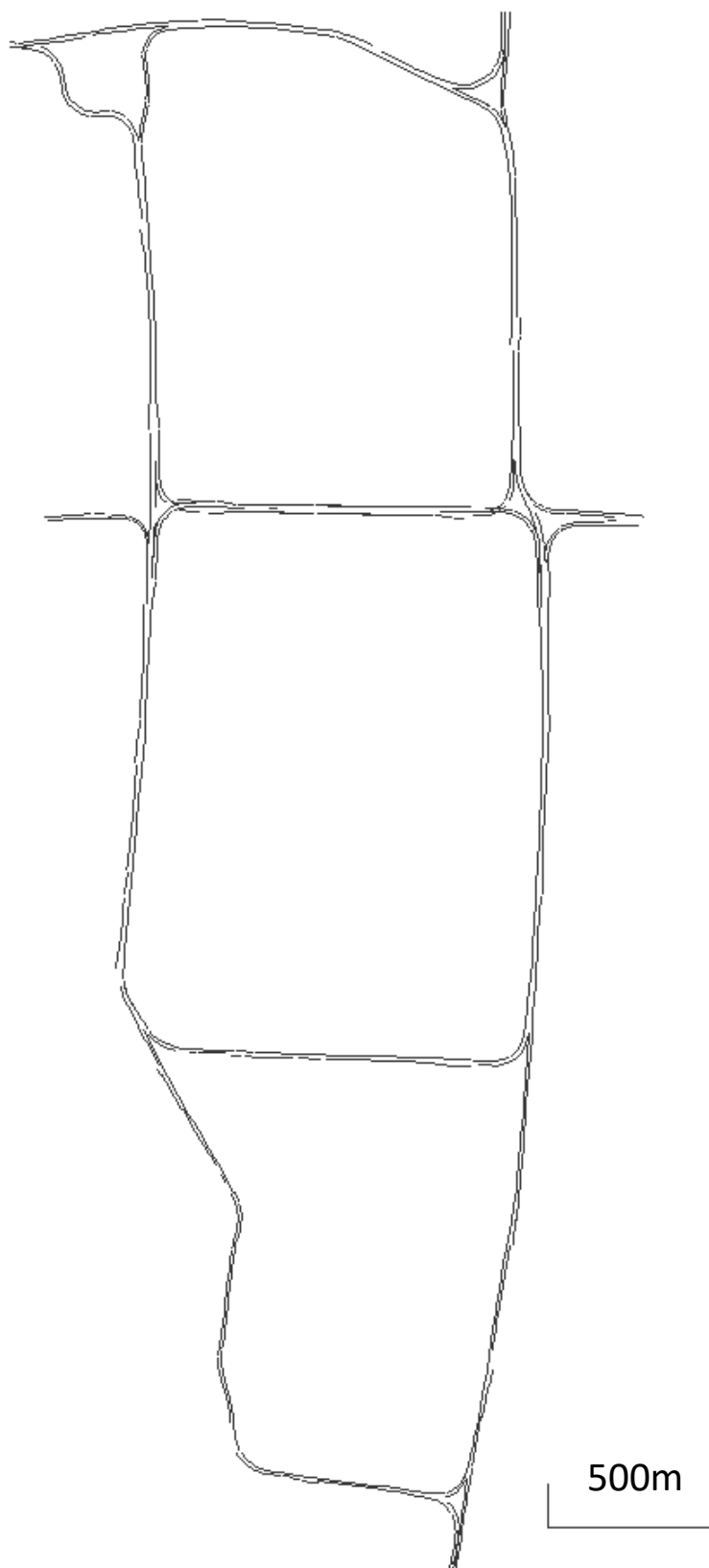


図 4.35 生成した高架道路橋の SXF 平面図



図 4.36 生成した高架道路橋の SXF 縦断図

表 4.7 生成した線形と正解データとの確認実験結果

	相関係数	平均二乗誤差
平面図	1.00	0.90m
縦断図	1.00	0.55m

表 4.7 の相関係数から、本システムにより高精度に高架橋の図面を生成できることが分かった。しかし、生成した図面と正解データとの平均二乗誤差が約 0.90m で、地図情報レベル 1,000 の水平位置および標高の許容誤差の 0.70m と 0.33m を満たしていないことも分かった。一方、生成した線形と抽出した特徴点列との比較結果（表 4.8）では、平均二乗誤差が約 0.54m となっている。

表 4.8 生成した線形と抽出した特徴点列との確認実験結果

	相関係数	平均二乗誤差
平面図	1.00	0.54m
縦断図	1.00	0.04m

そこで、実際にトータルステーションにより計測した標定点座標を確認した結果、一部の標定点自体にも正解データから数十 cm から 3m ほどのズレ（図 4.37）がある。

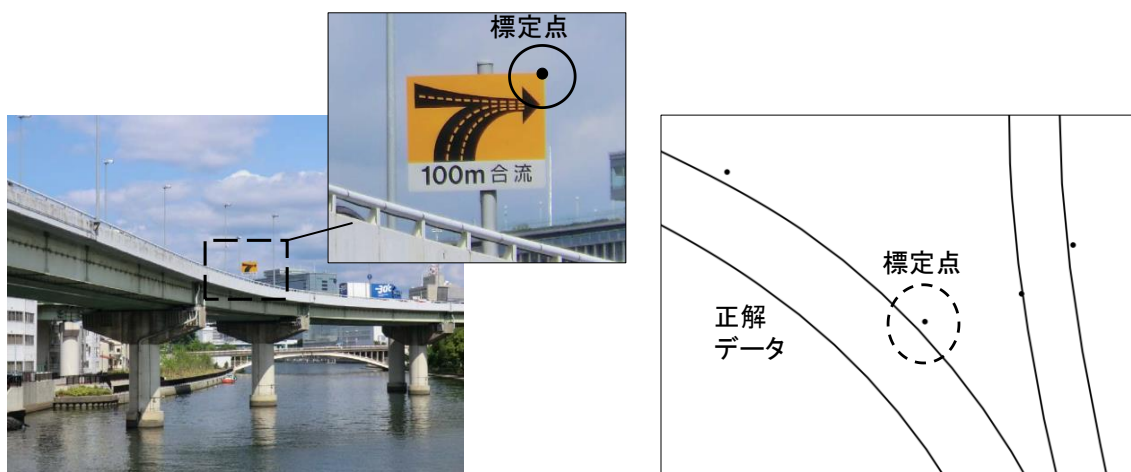


図 4.37 正解データから離れている標定点

このことから、生成した図面の多くの誤差は、正解データと実際の現況物との位置ズレが原因と考えられる。

また、生成された線形では、図 4.38 に示すようにクロソイド曲線と円弧の接続端点が離れている箇所が4箇所（図 4.39）見られた。

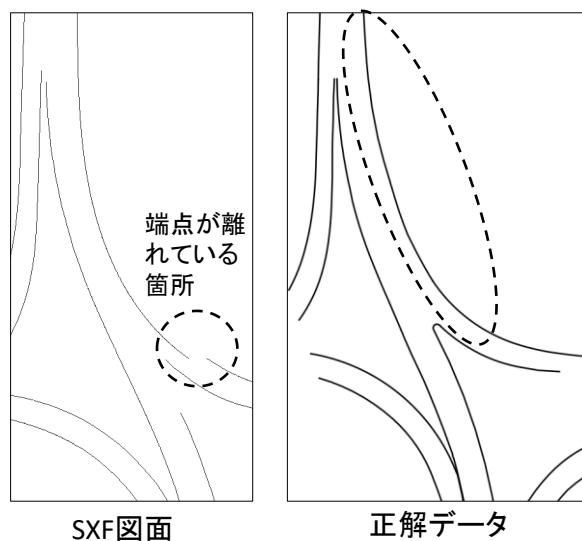


図 4.38 クロソイド曲線を生成できなかった部分

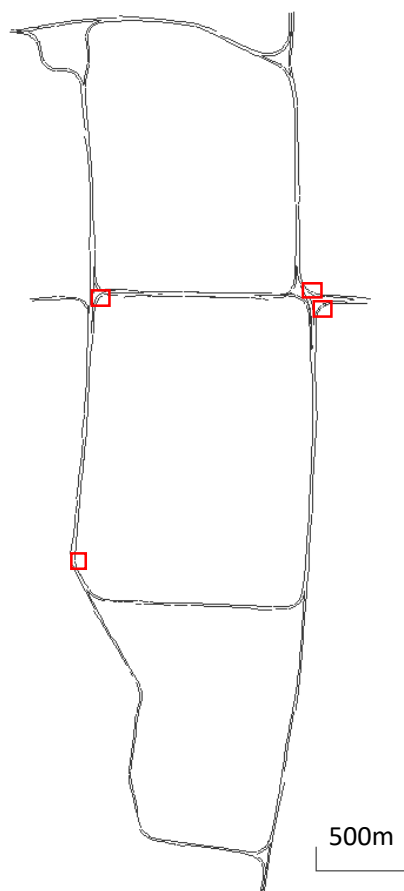


図 4.39 クロソイド曲線を生成できなかった箇所

特徴点列を詳細に確認した結果、それらの箇所では、直線と円弧の間のクロソイド曲線区間が非常に長く、式(4.2)の条件を満たしていないことが分かった。また、これらの箇所は、実験対象の大阪環状線から、他の高速道路への分岐路線である。両方の道路は同一の時期に設計されていないため、特殊な幾何情報の接続パターンという例外的な事象が存在する可能性が考えられる。これを解決するには、クロソイド曲線区間の点群情報を利用した線形生成手法を考案する必要がある。

このようなクロソイド曲線を取り除いて、平均二乗誤差を再計算すると、表 4.9 に示すように約 0.08m の誤差で、地図情報レベル 1,000 の水平位置および標高の許容誤差の 0.70m と 0.33m を満たしており、特徴点列と生成した線形が近似していることが分かった。そのため、特徴点列の各点から道路を表す線形までの距離のばらつきは、特徴点選出処理により抑えられていると考えられる。

表 4.9 生成した線形と抽出した特徴点列との再比較実験結果

	相関係数	平均二乗誤差
平面図	1.00	0.08m

他にも生成された図面には、次の2つの問題点が見つかった。1つ目は、生成した道路線形が途中で切れている箇所があった。現況の点群データを確認した結果、原因は他の車両により発生したデータ欠損（図 4.40）であることが分かった。この問題については、計測時と同じ路線を複数回走行して、欠損部を補間することで解決できると考えられる。

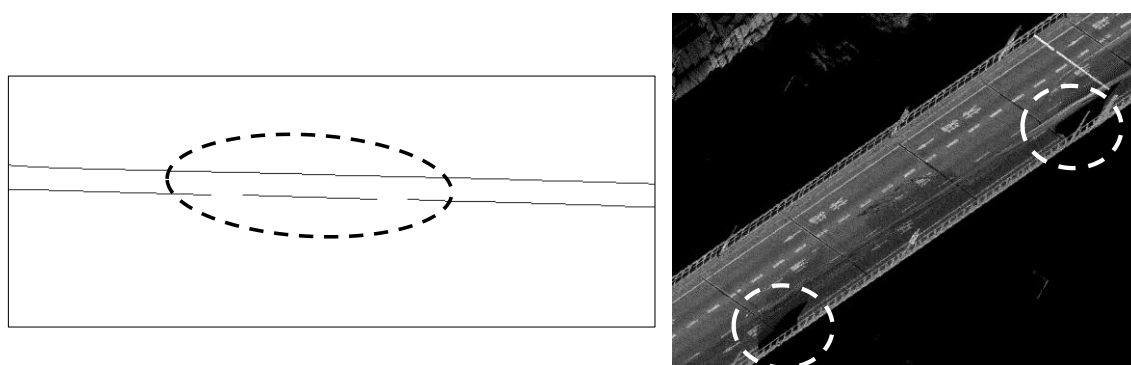


図 4.40 切れている線形

2つ目は、走行線の起終点と分岐部において、正解データより線形が短い箇所（図 4.41）があった。これは、線形の開始部と終了部がクロソイド曲線であり隣接線形の情報がなく計算できないことや、短い直線であるため点数が少なくノイズとして除去されたことが原因となっている。このような問題は、起終点付近の再計測やノイズとした点群データの再利用により近似線を補間する手法を考案することで解消できると考えられる。

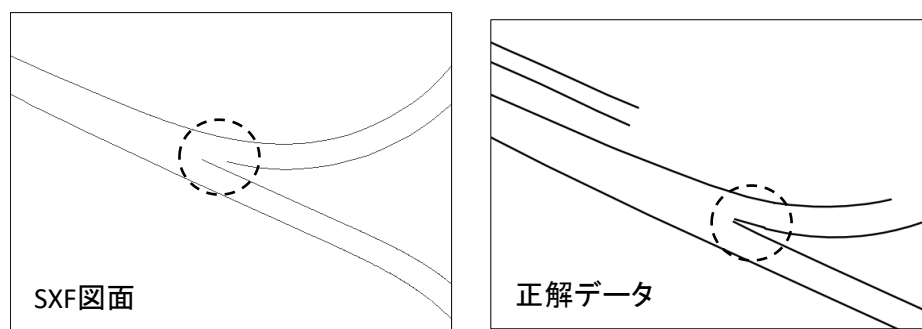


図 4.41 短くなっている線形

それ以外の区間では、線形が自然に接続していることを確認できた。結論として、提案し

たクロソイド曲線の生成手法や線形補間手法が有用であることが分かった。

## 4.6 まとめ

本章では、高架橋を MMS で複数回計測することで、高架橋の特徴点を抽出し、継ぎ手などの補足情報なしで、路線ごとに近似線形を生成する手法を提案した。

提案の特徴点選出手法では、特徴点の中から、精度が良いものを抽出しているため、MMS の点群密度が低い場合でも高精度な図面の生成が可能になった。クロソイド曲線の生成手法では、前後の直線の勾配と円弧の中心と曲率半径を用いるため、低コストの計算での生成が可能になった。また、直線と円弧の端点位置を計算し、スムーズに接続するクロソイド曲線の生成を実現できた。線形補間の手法では、道路構造令の解説と運用を考慮し、線形が切れている区間を補正することで、連続線形の生成を実現した。さらに、点列の分割手法により、広範囲な高架橋における分岐部への対応が可能になった。

実験の結果から、点群データの位置誤差が 0.10m 以内の場合、高精度に図面の生成が可能であることが分かった。さらに、生成した図面から、第 3 章で問題となった直線と円弧間にクロソイド曲線が不自然に接続する問題を解消できたことが分かった。このことにより、本システムで生成した道路線形は、道路構造令に規定されている幾何情報により構成され、自然な曲率変化を持ち、自動運転道路構造物の維持管理のための線形図面としての利用が期待できる。

今後は、本章で設定している「垂直な壁を対象とすること」や「中央分離帯がある道路は対象外であること」などの制約条件の解消や、分岐部で線形が途切れる課題を解消しつつ、車線ごとに連続する中心線の生成手法を考察する予定である。これにより、車線中心線形を生成し、自動運転の走行経路の生成が期待できる。

最後に、本研究の提案手法を適用させるために、必要な計測条件や道路構造物の制約条件を表 4.10 まとめる。

表 4.10 本研究の手法の適用条件

項目	説明	制約条件
MMS の時速	MMS は、時速 20km~80km での計測が可能である。	時速 80km 以内
MMS の走行線路	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 横断方向の計算は、MMS の進行方向が道路の進行方向と一致するのが望ましい。</li> <li>● データの欠損により、線形の生成精度が低下するため、データの欠損を避ける走行が望ましい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 車線の変更を避けること</li> <li>● 他の車両と並走をしないこと</li> <li>● 他の車両の追い越しを避けること</li> <li>● 他の車両からの追い越しを避けること</li> </ul>
点群データの仕様	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 横断方向の計算では、GPS 履歴ポイントを利用している。</li> <li>● 点群データの探索を行う際に、計測際の取得時間があれば、探索時間を短縮できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● GPS 履歴ポイントが必要</li> <li>● 取得時間の情報がある点群データが望ましい</li> </ul>
高架橋の特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 壁面と路面の交差部を特徴点として抽出しているため、壁面がない場合、正確に路面境界線を抽出できない。</li> <li>● 中央分離帯がある場合、対向車線の特徴点の抽出ができない場合がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 高架橋の両側にコンクリート型防護欄があること</li> <li>● 中央分離帯がないことが望ましい</li> </ul>
自然環境	水により、レーザスキャナの計測精度が低下する可能性がある。	雨や霧などの水気が多い自然環境を避けること

本提案手法は、横断面点列の抽出において、レーザスキャナの照射方向に依存しないため、特性が異なる点群データでも対応可能である。また、データ欠損部や点群密度が低い場所において、複数回の走行により欠損の点群データを補完し、正確な線形が生成可能となっている。これらの特性から、本提案手法を利用する場合、走行線としての GPS 履歴ポイントがあれば、MMS 以外の点群データでも、道路線形の生成が可能である。そのため、本提案手法による道路線形の生成は、過去に構造物の点群データを取得したことがある場合、新たに MMS で計測する必要がなく、コストを抑えることができる。

## 第 5 章

# 道路線形の自動生成に関する 実用性の評価検証の実験



## 第5章 道路線形の自動生成に関する実用性の評価 検証の実験

### 5.1 実験の概要

第4章では、道路線形の生成精度の向上と実用性を向上させるため、第3章で提案した手法を改良した。そして、実証実験では、広範囲な高架橋を計測し取得した点群データをシステムに入力し、生成した線形の精度を検証した。その結果では、システムの高架橋への適用性と道路線形の生成精度の向上を確認した。一方、システムの実用性を証明するには、高架橋への適用性のみならず、特性が異なる MMS の点群データからの適応性を検証する必要がある。しかし、第4章の実験では、StreetMapper360 のみの点群データを対象とし、生成した道路境界線の精度を確認したが、特性が異なる MMS の点群データから、生成した線形同士の比較評価まで言及できていないため、特性が異なる MMS 点群データに対する適応性が不明確である。そこで、本研究では、まず、特性が異なる MMS の点群データの違いについて比較分析を行う。次いで、それぞれの点群データを提案システムに適用し、出力結果の違いの比較と分析で、同程度の精度で道路境界線と道路中心線の生成が可能かを検証する。最後に、線形の生成精度に影響する要因について考察する。

本章の位置付けを図 5.1 に示す。

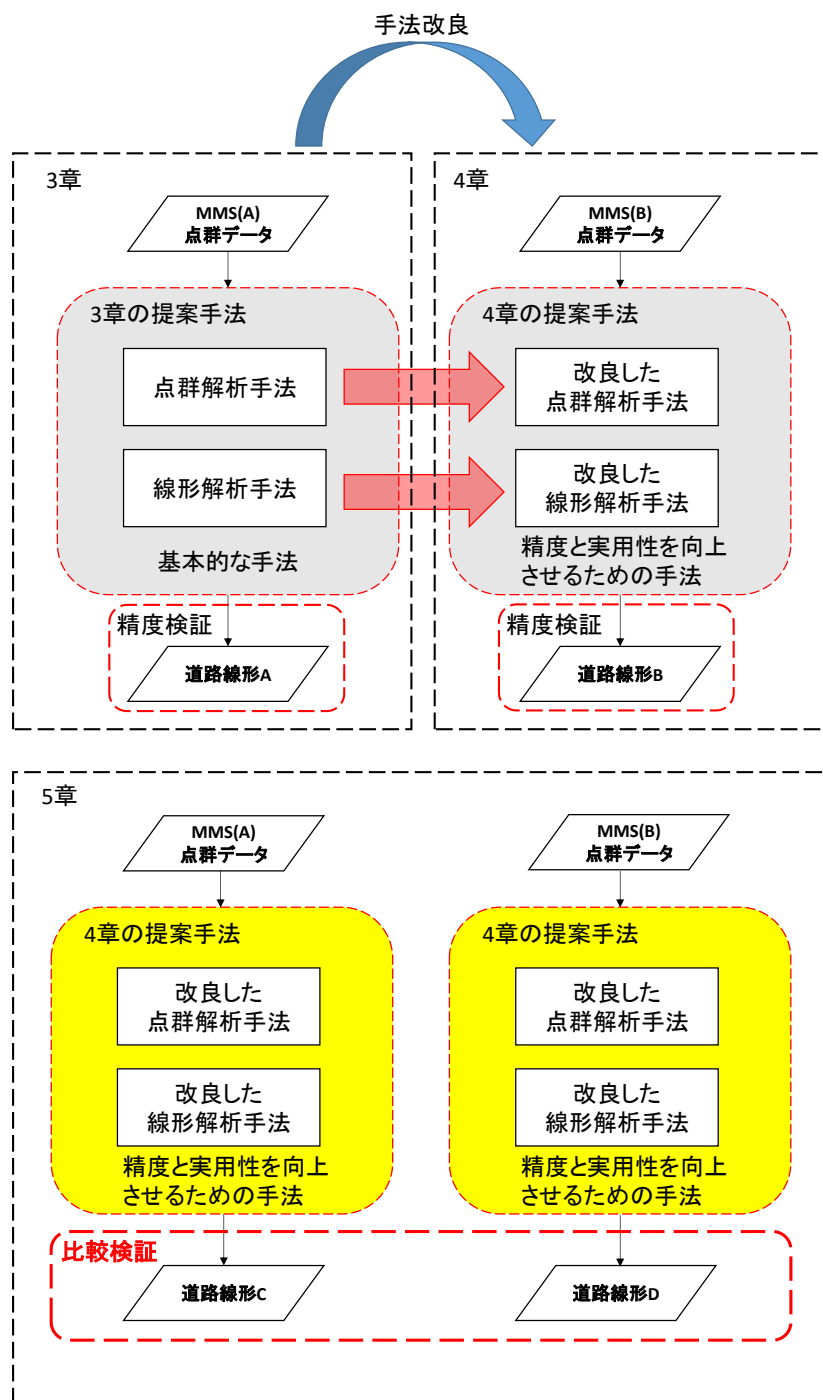


図 5.1 本章の位置づけ

本章は、第4章の提案手法の実用性を検証するため、特性が異なるMMS点群データを用いて、生成した道路線形の比較と検証実験を行う。

## 5.2 実験計画

本実験では、システムの実用性を検証するため、特性が異なる 2 種類の MMS 点群データから生成した道路境界線と道路中心線を比較する。また、本章では、手動で生成した GPS 履歴ポイントを入力データとし、2 種類の MMS 点群データに適用する。

まず、事前実験として、特性が異なる 2 種類の MMS 点群データを分析する。この実験では、MMS の仕様の違い、点群データの特性と取得精度の違いを確認する。

次に、2 種類を点群データから、ノイズ除去、特徴点の抽出精度と高架橋の外観精度の 3 項目について比較実験を行い、システムの実用性を検証する。本研究の実験計画を図 5.2 に示す。

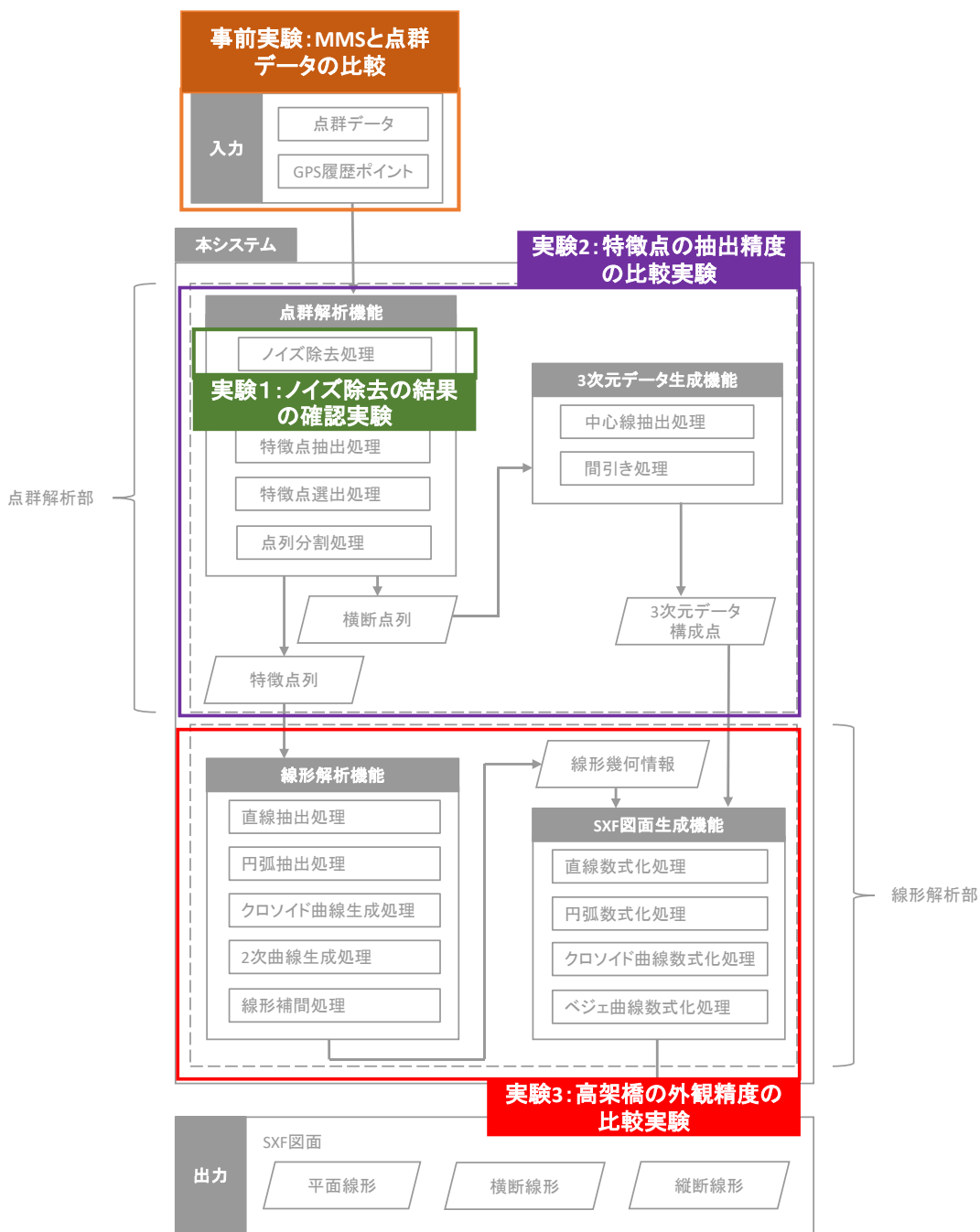


図 5.2 実験計画

ノイズ除去の比較実験では、両方のデータとも、高架橋の周辺のビルなどのノイズを除去できたかを確認する。特徴点の抽出精度の比較実験では、点群解析機能により生成した両方の特徴点列の位置精度を検証する。高架橋の外観精度の比較実験では、実際の高架橋の計測結果から生成した道路境界線と道路中心線の精度の違いを分析し、点群データの特性から生成精度に影響する原因を解明する。

## 5.3 MMSと点群データの比較

本節では、実験に使用する2種類のMMS点群データを解析し、それらの特性の違いを説明する。

本実験に使用する2種類のMMSは、第3章の三菱電機社製のMMS Type-Sと第4章の3D Laser Mapping社製のStreetMapper360となっている。2つのMMSの仕様を表5.1に示す。

表 5.1 実験に使用する2種類のMMSの比較

MMS タイプ	MMS Type-S	StreetMapper360
レーザスキャナ	SICK 社 LMS291-S5 (2台)	RIEGL 社 VQ-250 (2台)
絶対精度	10cm	1cm
相対精度	1cm	0.5cm
最大取得点数	約 13,575 点/秒 (1台)	約 300,000 点/秒 (1台)
最大到達距離	80m	500m
ラインスキャンの方向	車両の進行方向と約 90 度	車両の進行方向と約 45 度

表 5.1 から、本実験に使用する2種類のMMS点群データは、計測精度、秒間の取得点数、最大計測可能な距離、ラインスキャンの方向などの特性が大きく異なることがわかった。また、本節では、表 5.1 で示した仕様以外には、点群データの横断点列の密度と位置精度の比較を行う。

### 5.3.1 横断点列の密度の比較

MMS Type-S と StreetMapper360 の点群データを図 5.3 と図 5.4 に示す。

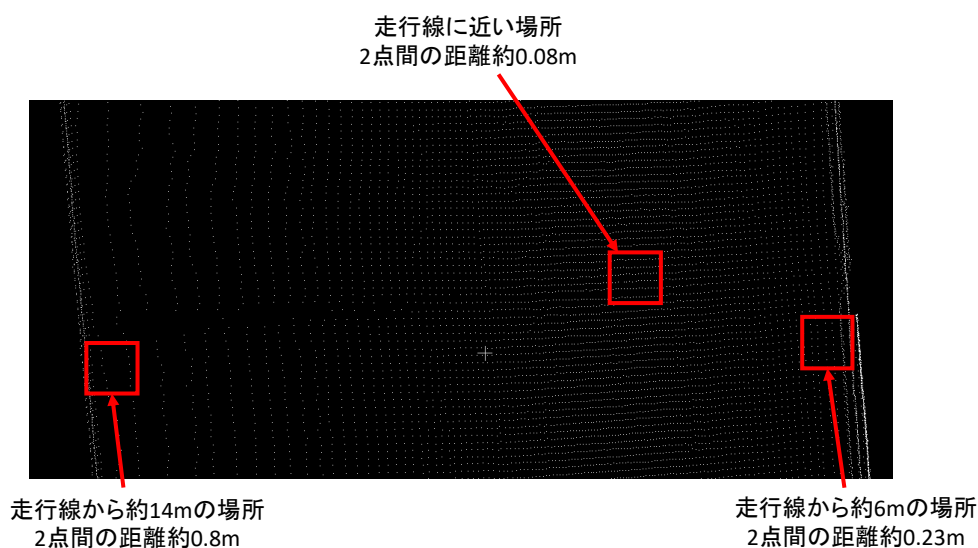


図 5.3 MMS Type-S の横断点列の密度

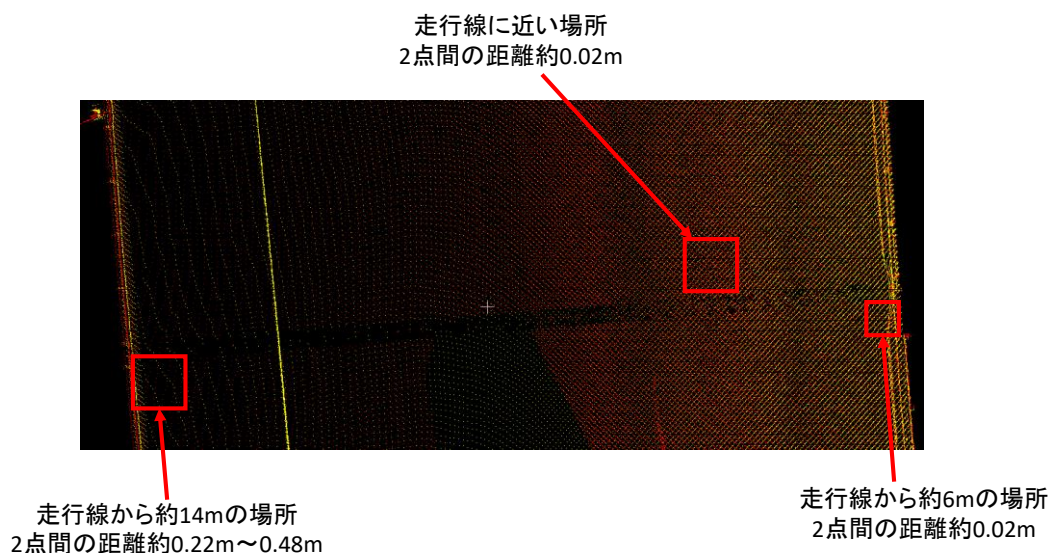


図 5.4 StreetMapper360 の横断点列の密度

図 5.3 と図 5.4 からそれぞれの横断点列の密度が大きく異なることがわかった。

図 5.3 では、走行線から約 6m 離れている場所において、横断点列の密度が 0.08m から 0.20m まで変化し、0.12m の差が出た。一方、図 5.4 では、走行線から離れている距離が 6m までの場所において、横断点列の密度の大きい変化が見られなかった。さらに、MMS Type-S の点群データでは、走行線から 16m 以上離れると、路面の計測ができなくなること（図 5.5）もわかった。

計測ができない箇所

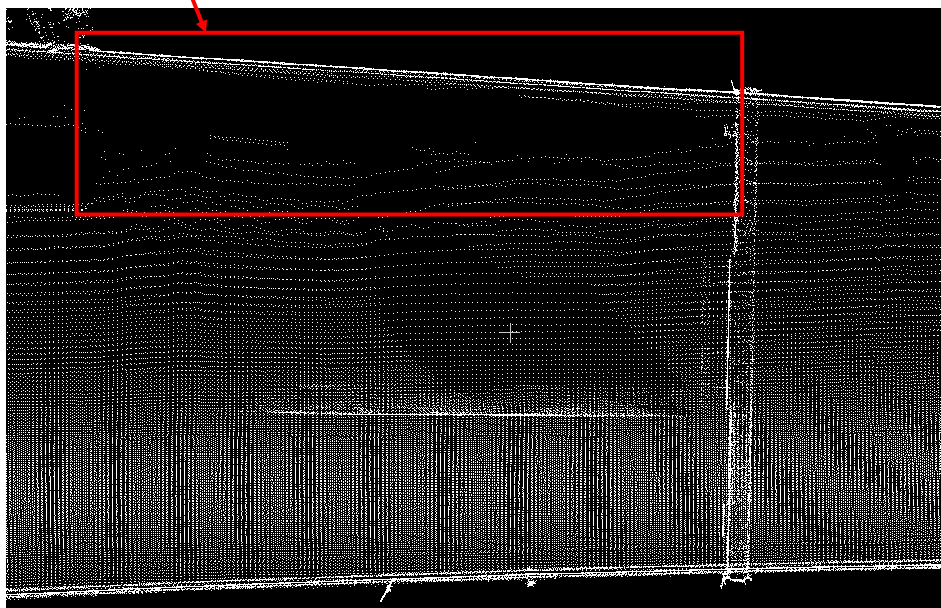


図 5.5 MMS Type-S で計測できない箇所

### 5.3.2 点群データの位置精度の比較

MMS は、GPS で取得した位置情報に基づいて、点群データを生成している。しかし、GPS の位置精度は、機材や、天候などの状況により大きく変化する。そこで、本項では、点群データから手動で道路の付属物（図 5.6）のある 4 箇所（図 5.7）で標定点を指定し、それらの位置精度を比較する。

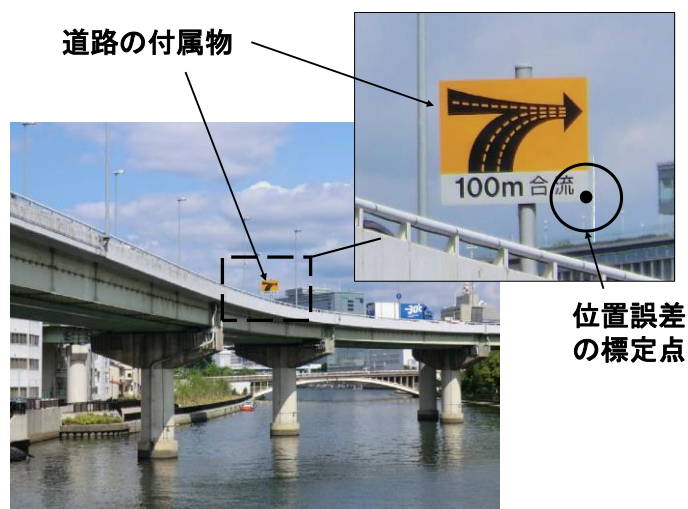


図 5.6 道路の付属物と標定点

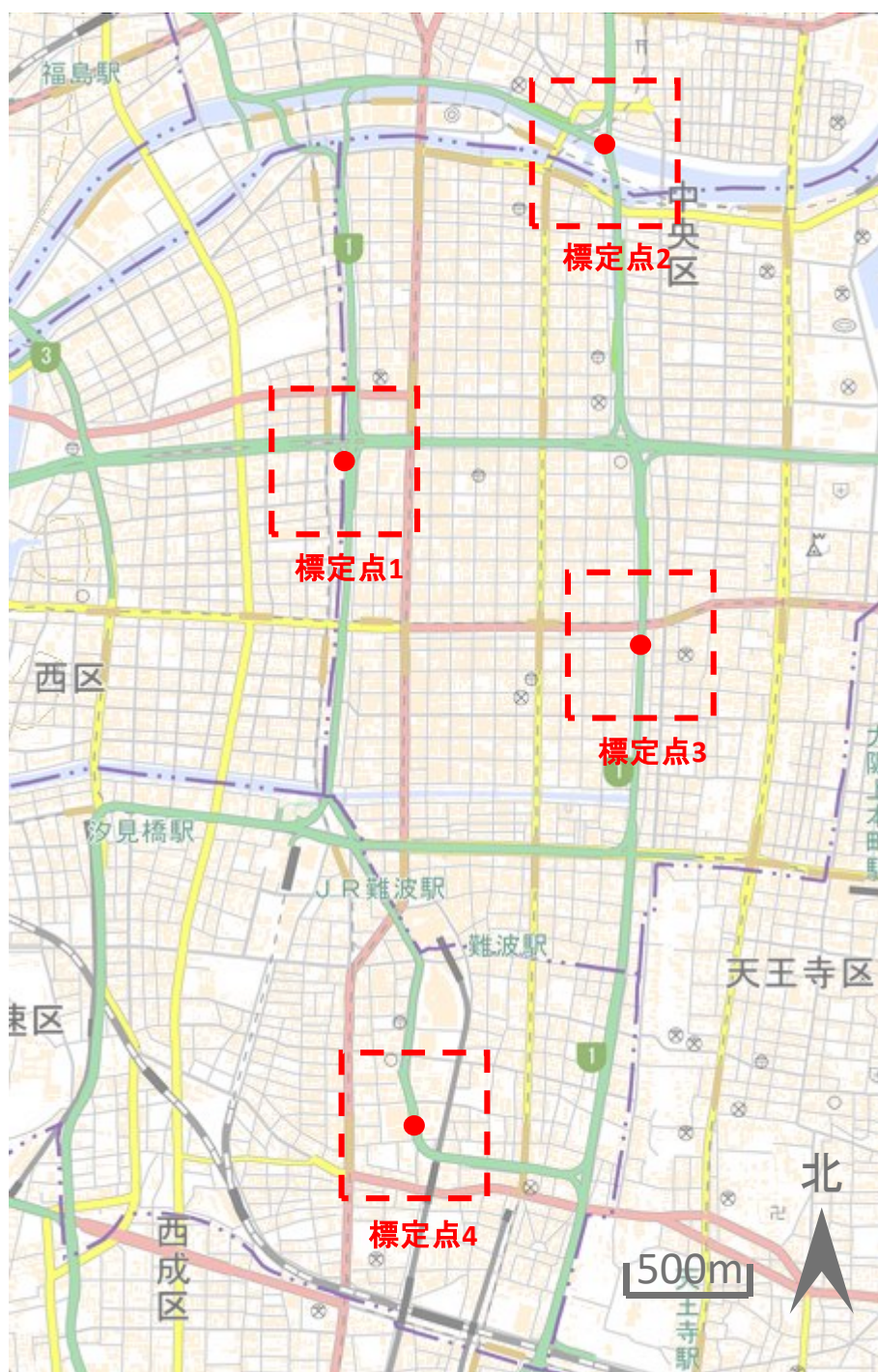


図 5.7 4箇所の標定点  
(出典：国土地理院，電子国土 Web)

比較の結果を表 5.2 に示す。



表 5.2 2 種類の MMS 点群データの位置精度の比較結果

標定点箇所		座標 X 値	座標 Y 値	標高 (m)
標定点 1	MMS Type-S	-46003.61	-146215.38	16.05
	StreetMapper360	-46005.20	-146216.44	14.66
	正解データ	-46003.67	-146216.37	
標定点 2	MMS Type-S	-44971.68	-144918.33	17.80
	StreetMapper360	-44971.82	-144918.13	17.77
	正解データ	-44973.00	-144919.72	
標定点 3	MMS Type-S	-44820.21	-146894.70	18.96
	StreetMapper360	-44820.65	-146894.63	18.47
	正解データ	-44820.31	-146894.72	
標定点 4	MMS Type-S	-45760.17	-148861.48	19.467
	StreetMapper360	-45760.24	-148861.66	19.408
	正解データ	-45760.47	-148860.03	

表 5.2 から、両方の標定点は、最小約 0.19m (標定点 4)、最大約 1.91m (標定点 1)、平均約 0.70m のずれがあることがわかった。また、両方の標高誤差も約 1m の誤差があることがわかった。一方、両方の標定点は、正解データから 0.4m~2m (MMS Type-S の平均が約 1.12m, StreetMapper360 の平均が約 1.38m) ほどずれている。

### 5.3.3 情報種類の比較

本実験での計測対象の高架橋は、阪神高速 1 号環状線である。また、使用する MMS Type-S と StreetMapper360 の点群データの情報を表 5.3 に示す。

表 5.3 実験に使用する2種類のMMSの比較

MMS タイプ	持っている情報
MMS Type-S	点群データの直角座標系の X,Y 値と標高値 点群データの RGB の色情報
StreetMapper360	点群データの直角座標系の X,Y 値と標高値 点群データの反射強度 点群データの各点の取得時間 GPS 履歴ポイントの直角座標系の X,Y 値と標高値 GPS 履歴ポイントの各点の取得時間

表 5.3 の StreetMapper360 の点群データでは、点群データ以外に、GPS 履歴ポイントが入っている。GPS 履歴ポイントは、MMS が走行時に記録した GPS の位置で、IMU により補正されたものである。一般的には、GPS を使用している MMS では、GPS 履歴ポイントが記録されるが、今回使用する MMS Type-S のデータには入っていない。そのため、本章では、手で仮の GPS 履歴ポイントを生成し、両方の入力データとする。

## 5.4 実験内容

### 5.4.1 ノイズ除去の結果の比較実験

ノイズ除去の結果の比較実験では、両方の点群データのノイズ除去結果を確認する。そして、ノイズを除去できない部分について、原因を分析する。

### 5.4.2 特徴点の抽出精度の比較実験

特徴点の抽出精度の比較実験では、正解データの CAD 図面と本システムを用いて抽出した両方の特徴点とを比較する。実験の計測箇所は、図 5.8 に示す 20 箇所とする。この 20 箇所は実験対象のうち、計測可能な箇所からおおよそ等間隔に取得したものである。

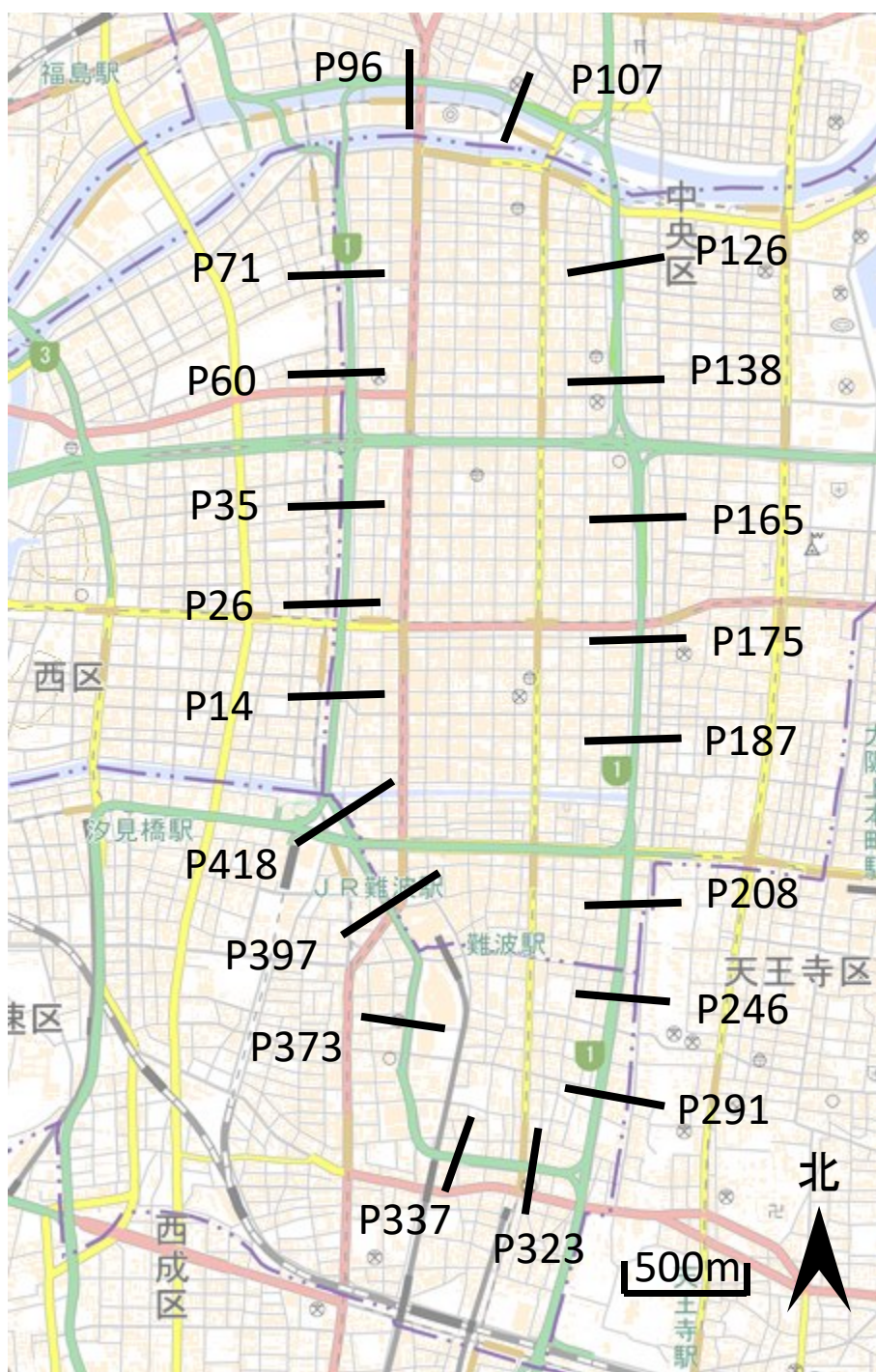


図 5.8 実験の計測箇所

まず、本システムにより生成した両方の横断幅と正解データとを比較し、計測精度を確認する。そして、本システムにより抽出した特徴点群間の距離と実空間の距離との誤差を確認する。最後に、両方の誤差を比較し、相違について分析する。

実験の正解データは第3章と第4章で用いた同様なCAD図面を用いる。

### 5.4.3 高架橋の外観精度の比較実験

高架橋の外観精度の比較実験では、両方の MMS 点群データを用いて、提案手法により、線形ベクトル情報（道路境界線と道路中心線）の復元精度を確認する。また、生成した2種類の線形を比較し、特性の異なる MMS の点群データにより生成した線形の違いを確認する。具体的には、第4章と同様に、線形の評価点を算出し、全体の評価点と正解データの相関係数と平均二乗誤差により評価を行う。

実験の正解データは第3章と第4章で用いた同様な CAD 図面を用いる。

## 5.5 パラメータの設定

本実験のパラメータは、基本的に第4章と同様に設定する。ただし、特徴点の選出処理において、区間の横断数を決定するため、第4章と同様にばらつきが大きい点列の一部を取得し、標準偏差の算出実験を行った。実験の結果（図 5.9）から、区間の横断数が7以上の場合、標準偏差が全部 0.10m 程度に収まったことがわかった。そのため、本章の実験では、区間の横断数を7に設定する。

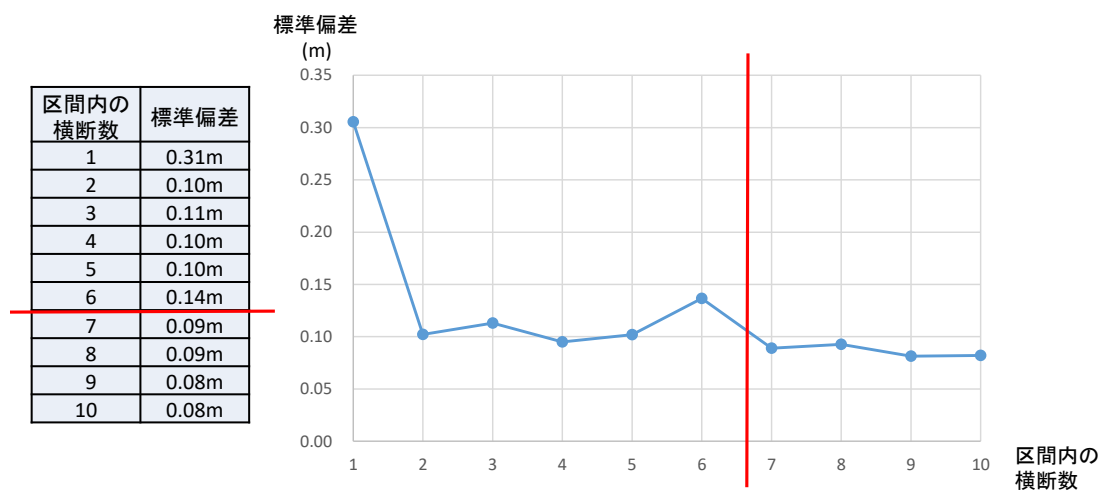


図 5.9 特徴点の選出処理における横断数を決定するための実験結果

## 5.6 実験結果と考察

### 5.6.1 ノイズ除去の結果の比較実験

MMS Type-S と StreetMapper360 の点群データからノイズ除去した結果を図 5.10～図 5.19 に示す。



図 5.10 MMS Type-S の点群データのノイズ除去の結果 (1)



図 5.11 MMS Type-S の点群データのノイズ除去の結果 (2)



図 5.12 MMS Type-S の点群データのノイズ除去の結果 (3)



図 5.13 MMS Type-S の点群データのノイズ除去の結果 (4)



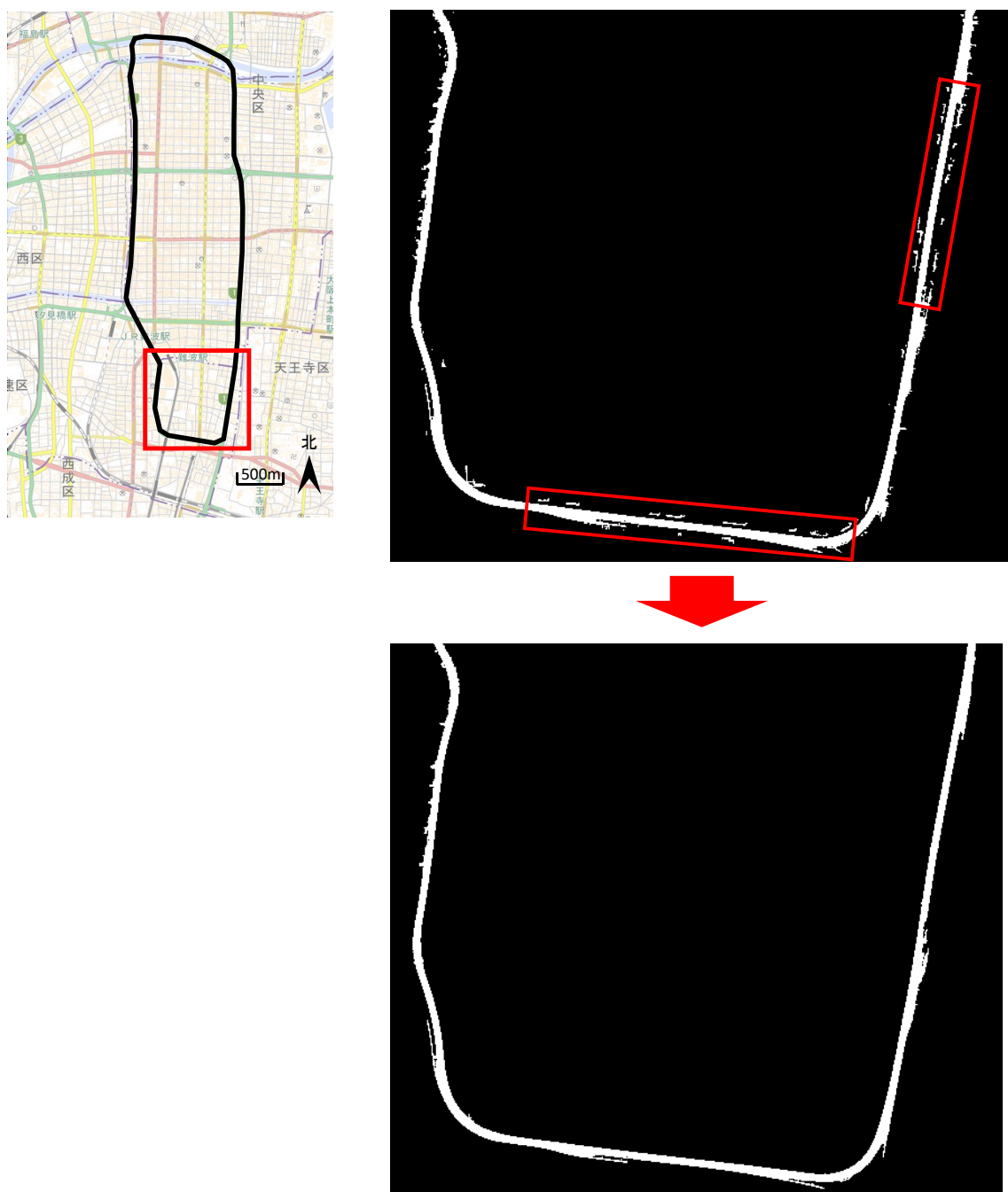


図 5.14 MMS Type-S の点群データのノイズ除去の結果 (5)

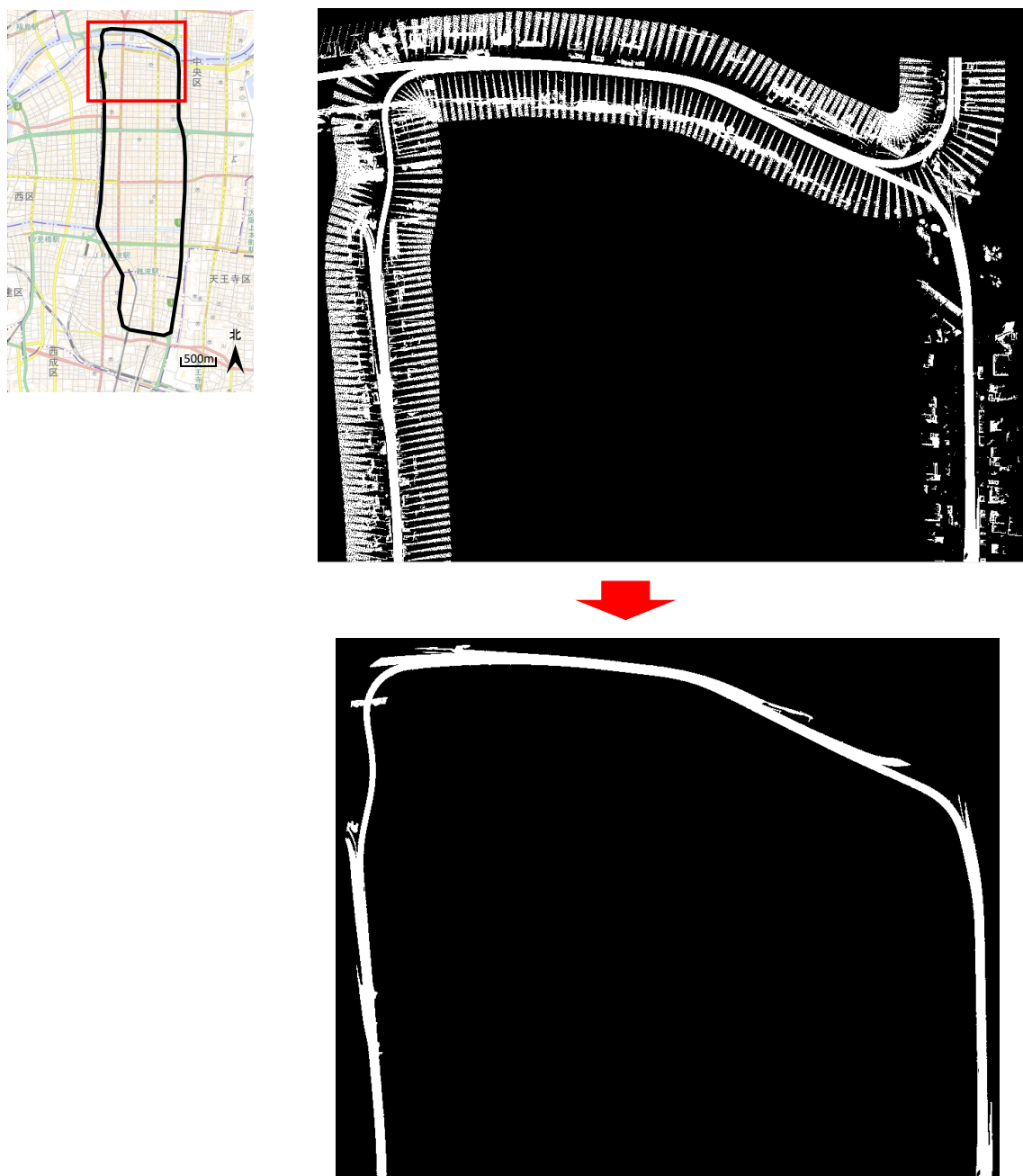


図 5.15 StreetMapper360 の点群データのノイズ除去の結果 (1)

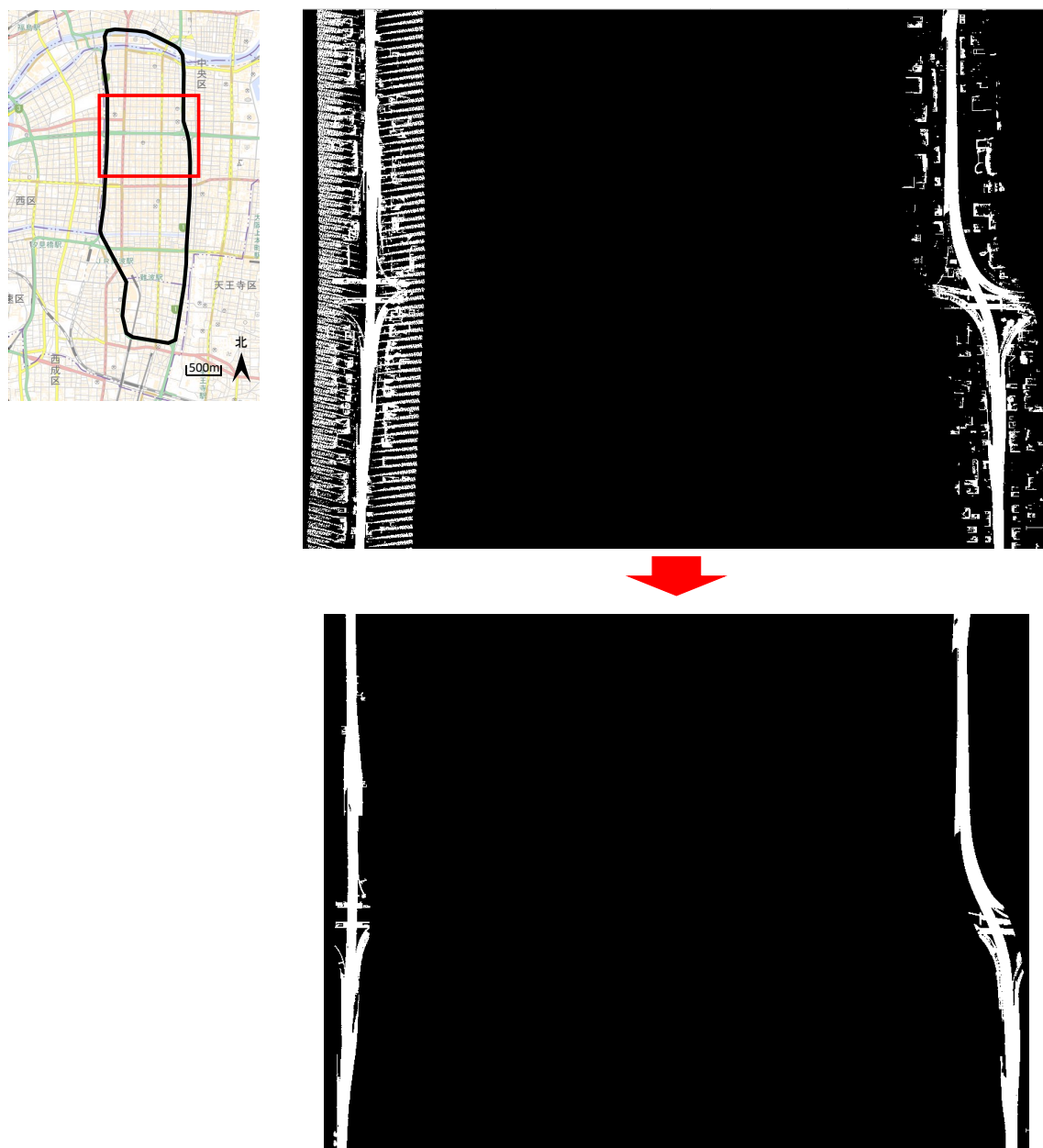


図 5.16 StreetMapper360 の点群データのノイズ除去の結果 (2)

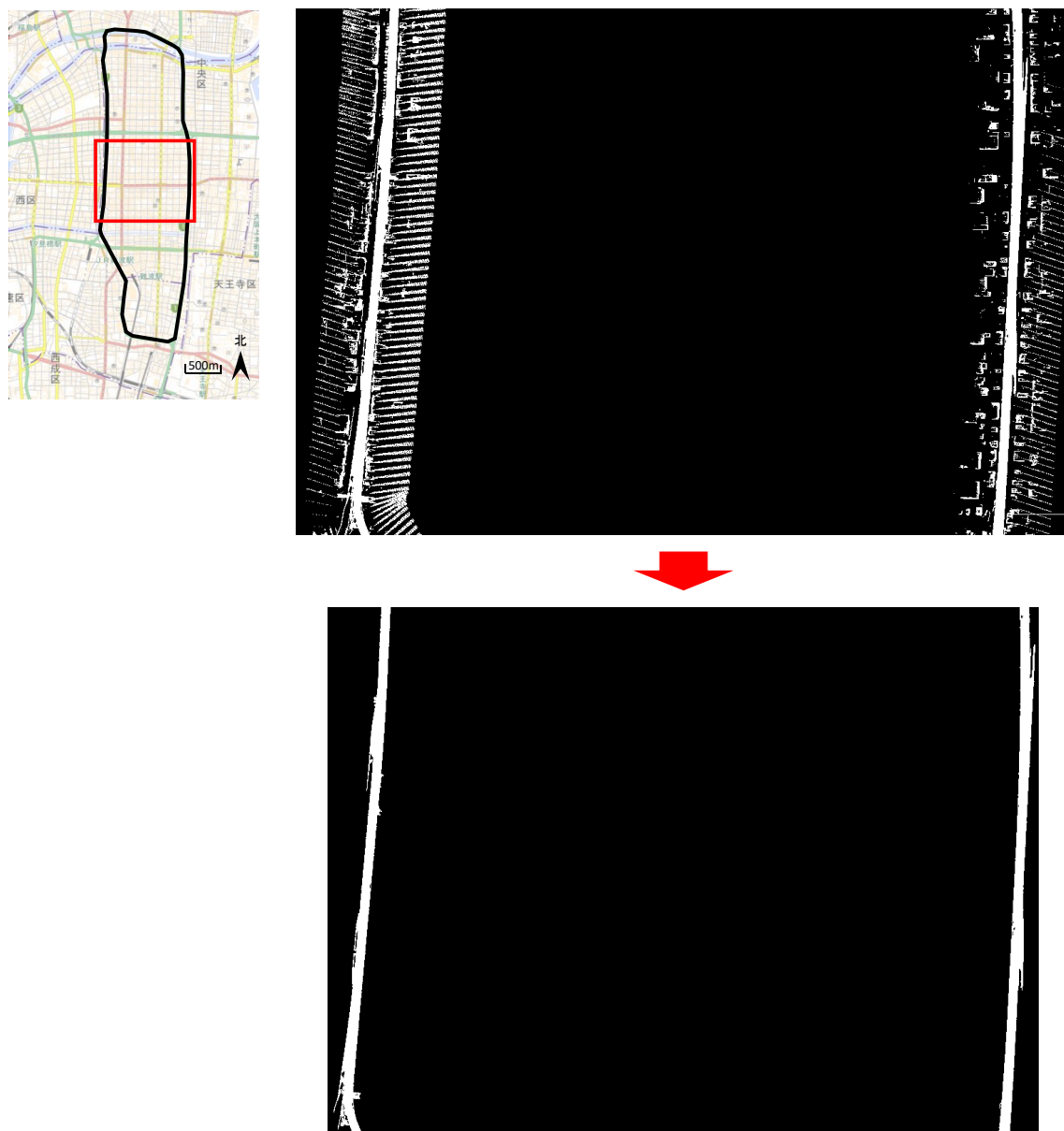


図 5.17 StreetMapper360 の点群データのノイズ除去の結果 (3)

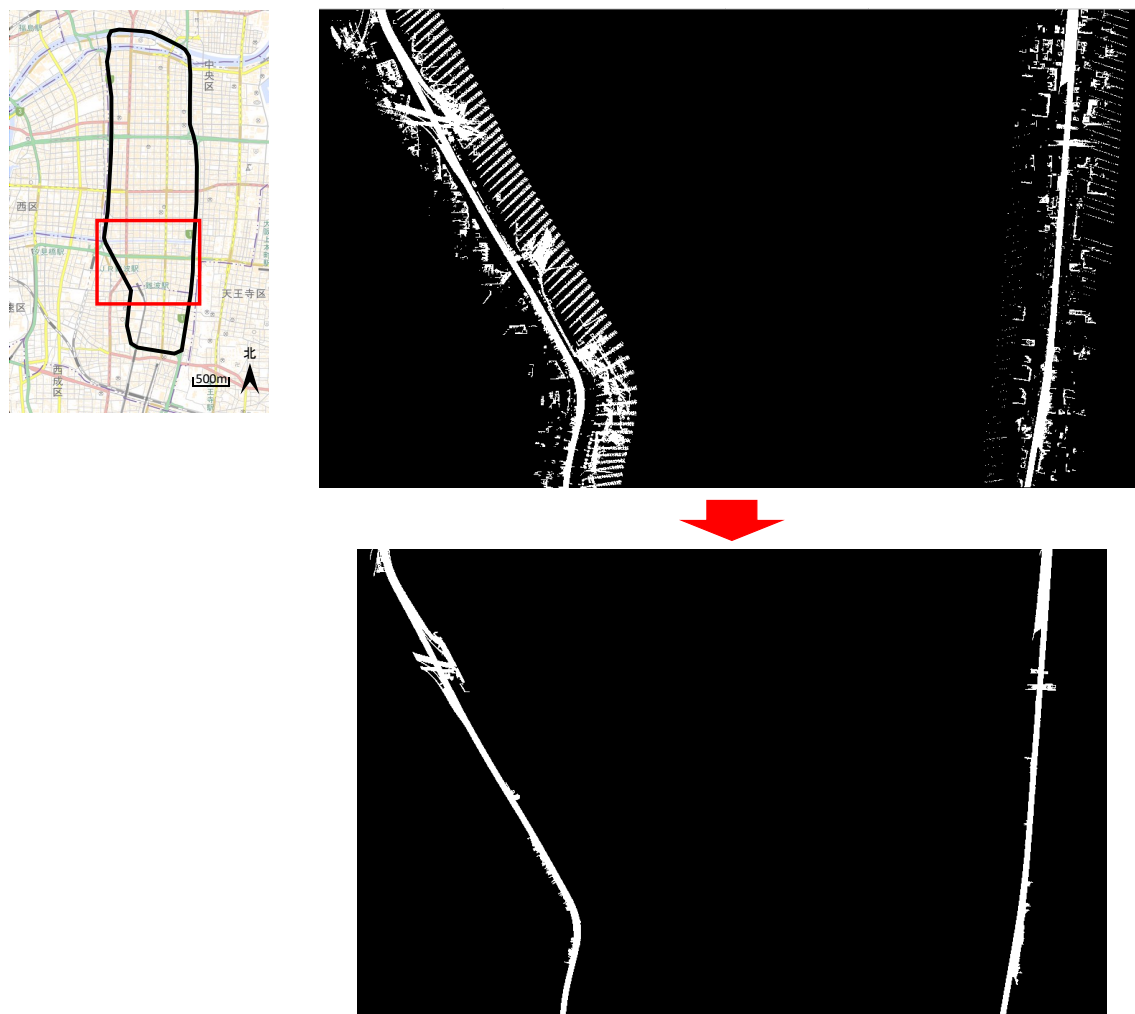


図 5.18 StreetMapper360 の点群データのノイズ除去の結果 (4)

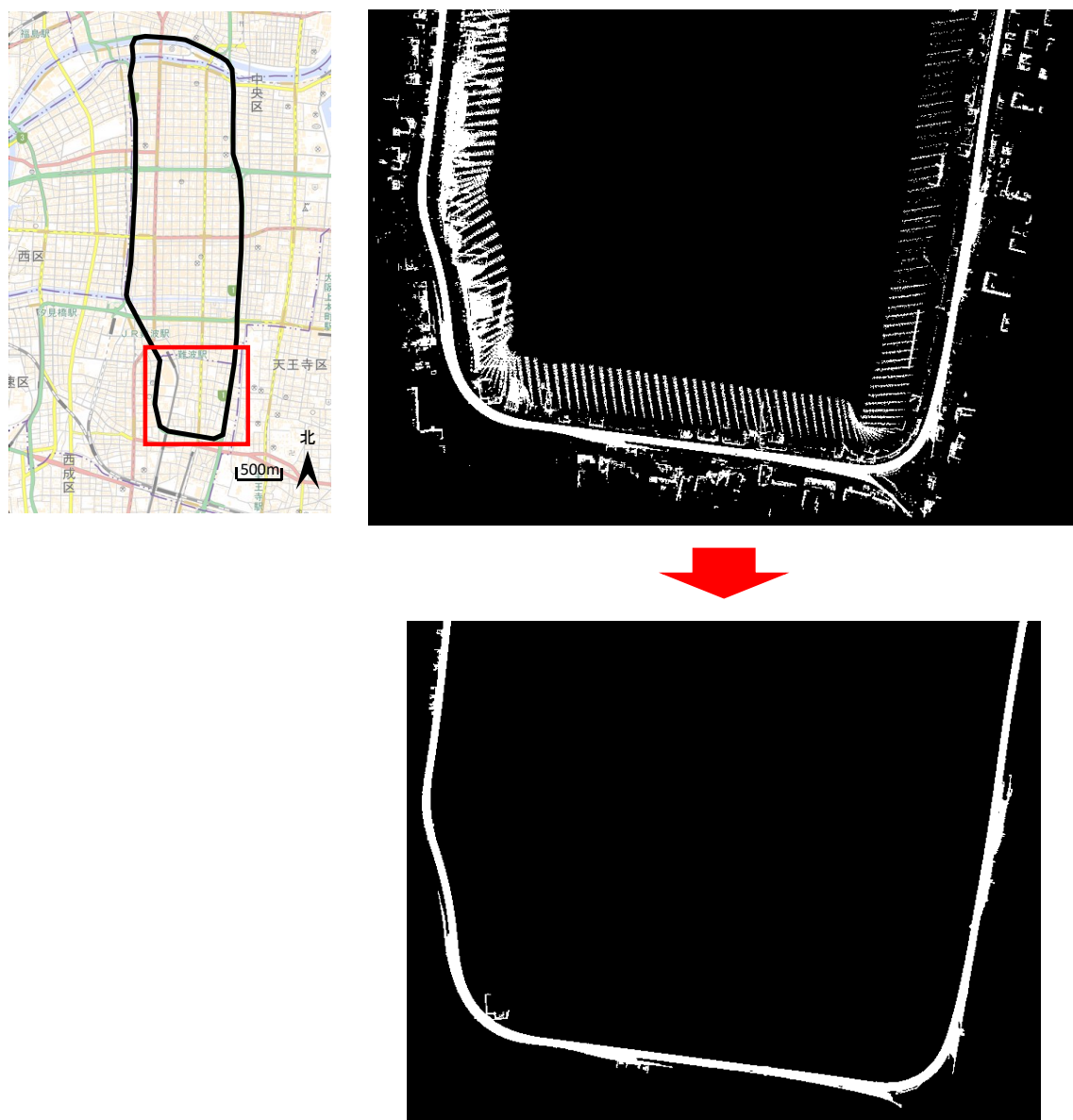


図 5.19 StreetMapper360 の点群データのノイズ除去の結果 (5)

図 5.10～図 5.19 から、StreetMapper360 は、搭載されているレーザスキャナの計測距離が非常に長いため、遠くに存在する構造物も計測され、ノイズが多くなっていることがわかった。そして、提案のノイズ除去手法を適用した結果、MMS Type-S の点群データ（図 5.10～図 5.14 の赤枠）においても、StreetMapper360 の点群データにおいても、大部分のノイズを除去できたことがわかった。このように、点群密度が大きく異なる両方の点群データにおいてもノイズ除去ができるため、手法の実用性が高いといえる。しかし、図 5.20 に示すように点群密度が非常に低い場所では、離れている路面の点もノイズとして除去されることがある。これに対しては、点群密度が非常に低い場所を複数回走行することで解決できる。

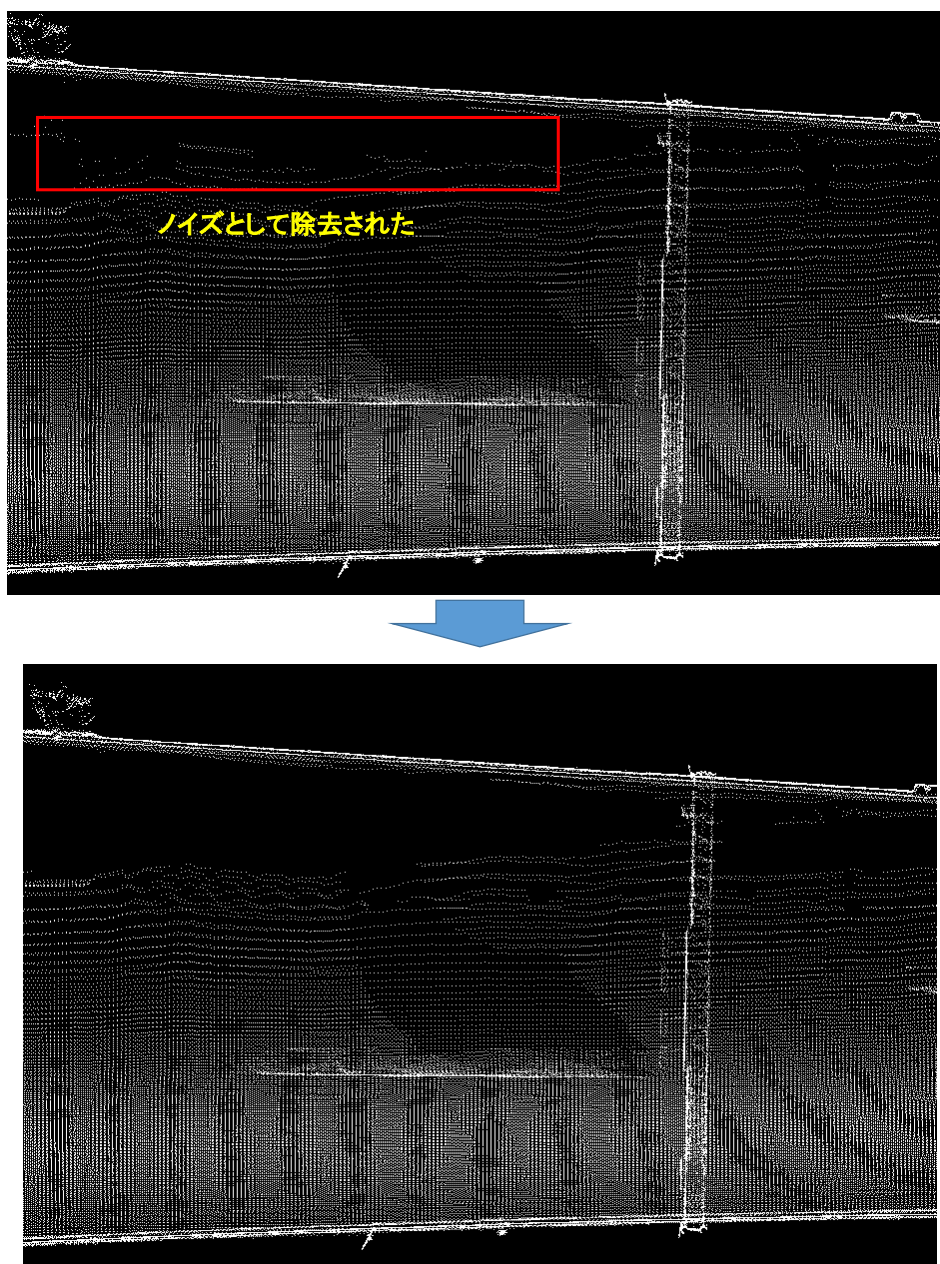


図 5.20 点群密度が非常に薄い場所のノイズ除去の結果

一方、ビルなどのノイズを除去できなかった場合もあった。具体的には、以下の3つの場合となっている。

1つ目は、図 5.21 に示すように、樹木の枝などが高架橋の外側の壁面と接触する場合である。この場合、ノイズの樹木の点群データが高架橋と繋がっているため、点群データの分割ができなかった。この問題に対しては、樹木を認識する技術が有効だと考えている。

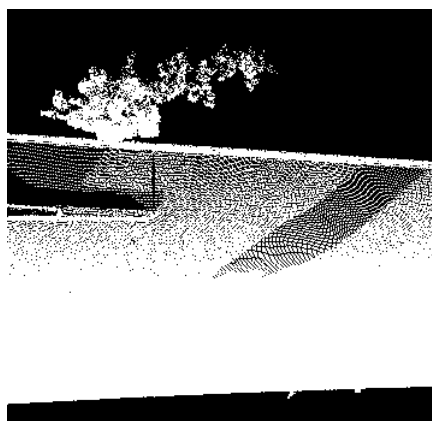


図 5.21 ノイズの除去ができない箇所（樹木の枝などが接触する場合）

2つ目は、何もない高架橋とビル間に複数個の点がある場合(図 5.22)である。これは、レーザスキャナの計測精度による誤差の問題と考えられる。この問題は、複数回の計測結果から、精度の良い点群データを処理対象とすることで解決可能と考えている。

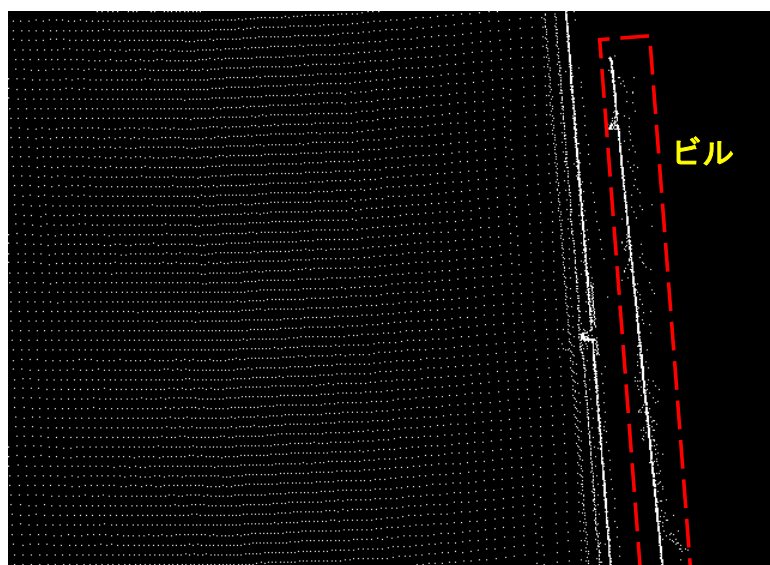


図 5.22 ノイズの除去ができない箇所（計測精度がよくない場合）

3つ目は、図 5.23 に示すように、異なる構造物が立体交差する場合である。この場合、平面上において、両方の構造物が重なるため、分割できなかった。この問題は、手動で生成した仮想な GPS 履歴ポイントではなく、実際の GPS 履歴ポイントの標高情報を使用し、解析用の点群データの使用範囲を限定することで解決可能である。



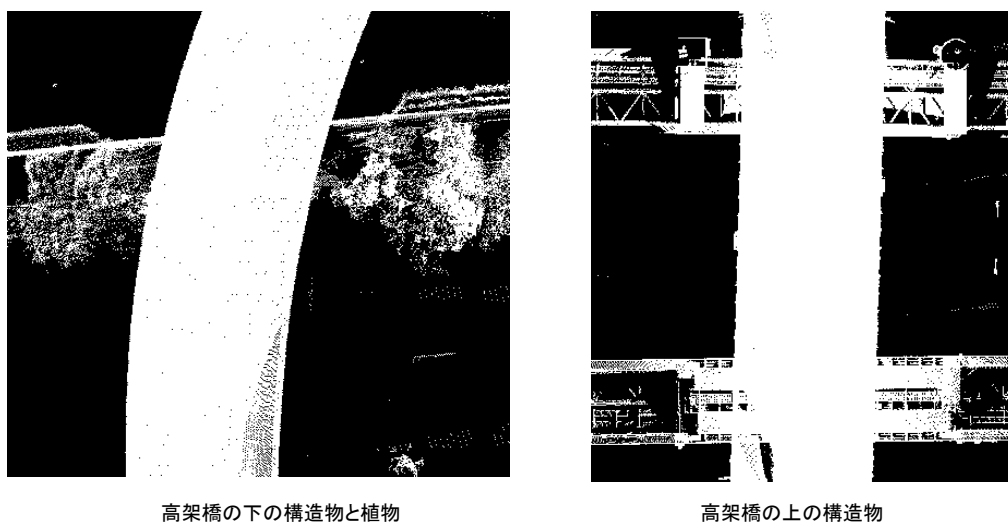


図 5.23 ノイズの除去ができない箇所（立体交差の場合）

### 5.6.2 特徴点の抽出精度の比較実験

まず、2種類の MMS 点群データから抽出した特徴点を図 5.24～図 5.29 に示す。

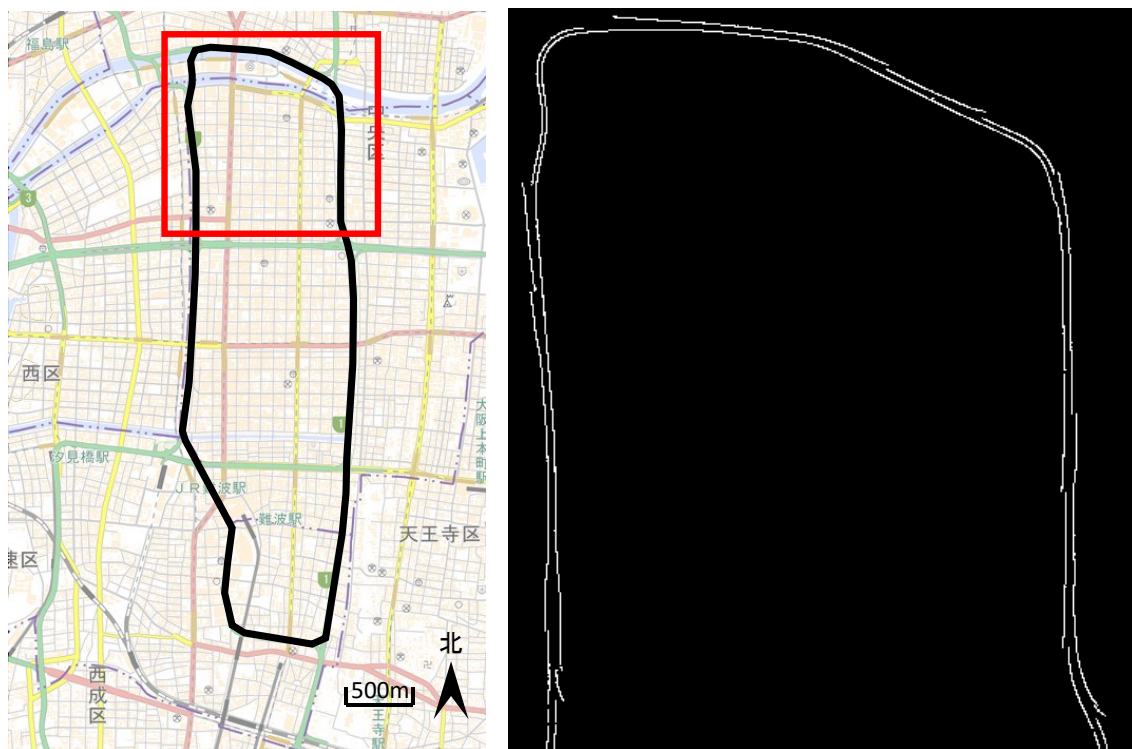


図 5.24 MMS Type-S の点群データから抽出した特徴点 (1)

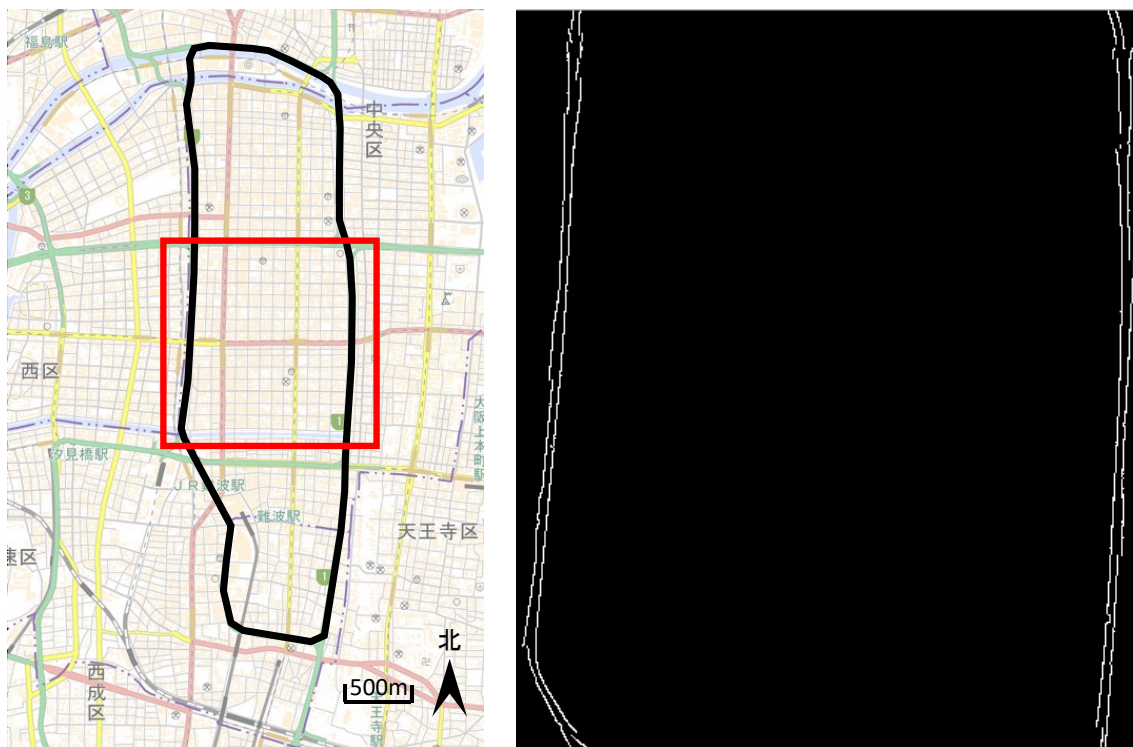


図 5.25 MMS Type-S の点群データから抽出した特徴点 (2)

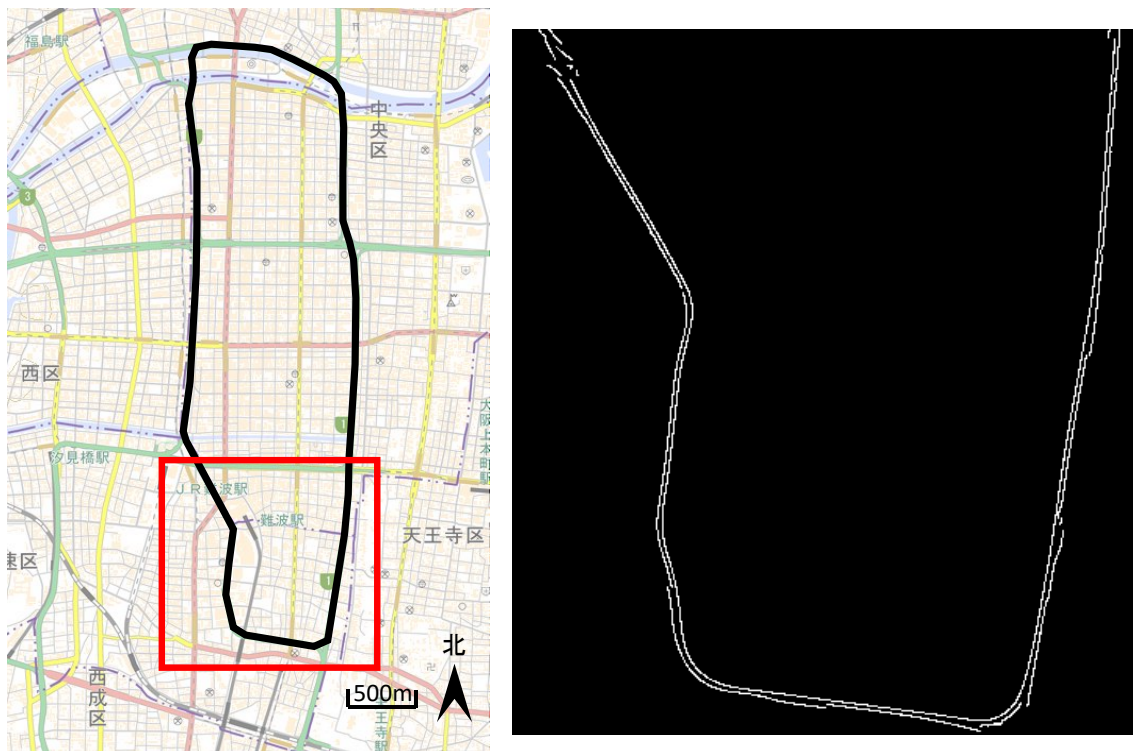


図 5.26 MMS Type-S の点群データから抽出した特徴点 (3)

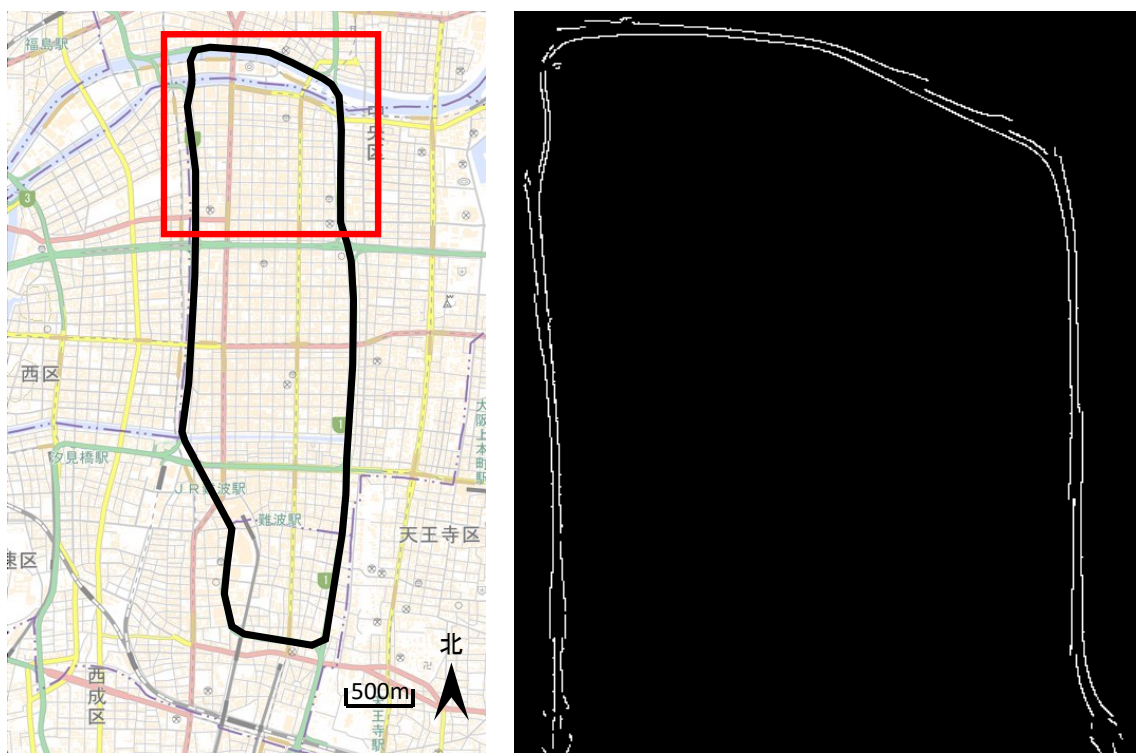


図 5.27 StreetMapper360 の点群データから抽出した特徴点列 (1)

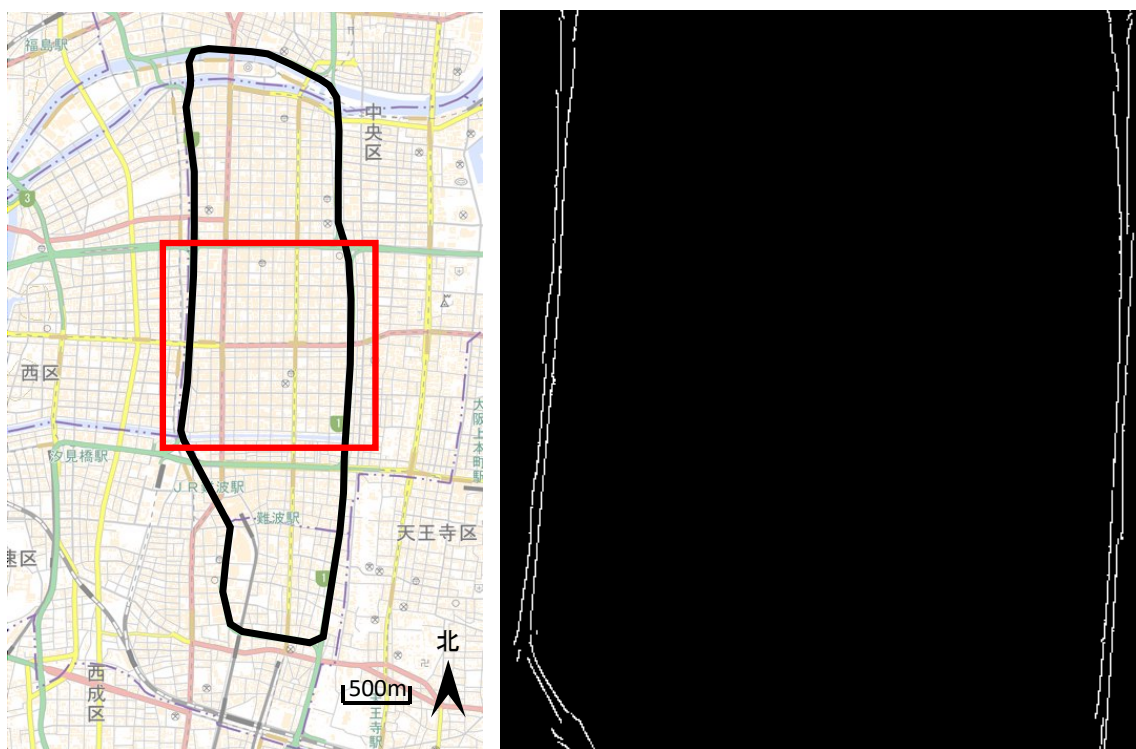


図 5.28 StreetMapper360 の点群データから抽出した特徴点列 (2)

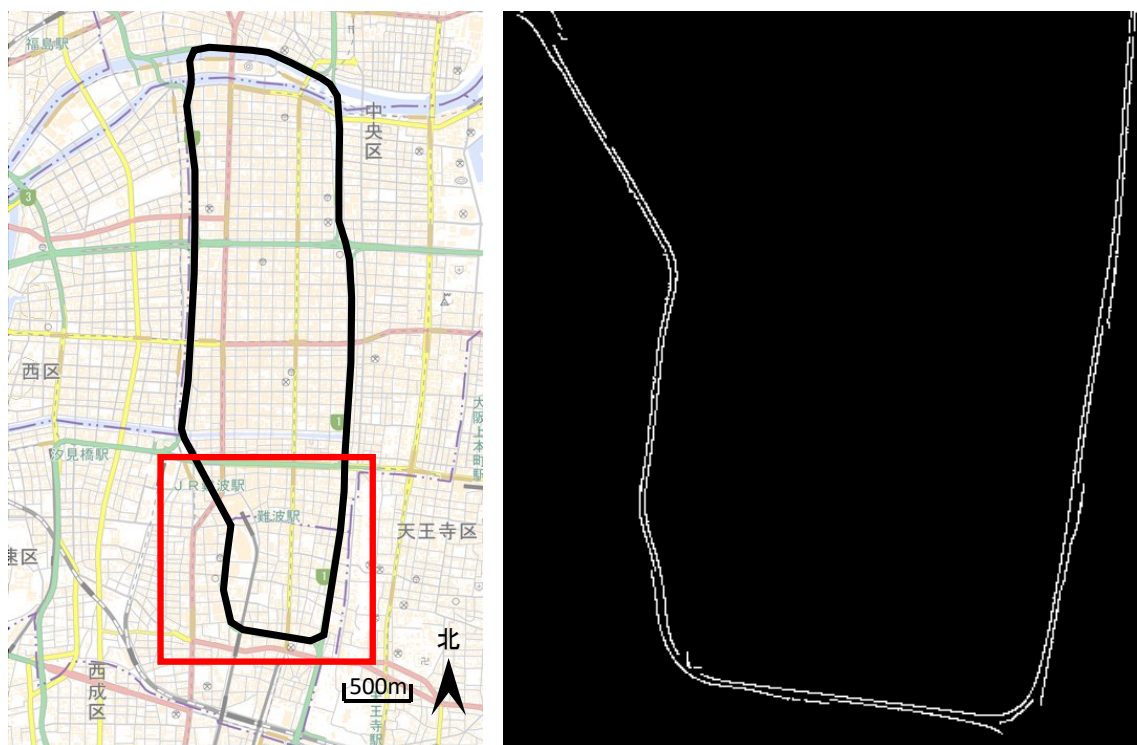


図 5.29 StreetMapper360 の点群データから抽出した特徴点列 (3)

図 5.24～図 5.29 により，両方の点群データから，大部分の区間において，問題なく特徴点を抽出できたことがわかった．また，両方の特徴点の抽出精度の比較結果を表 5.4 と図 5.30 に示す．

表 5.4 両方の特徴点の抽出精度

計測箇所	MMS Type-S		StreetMapper360	
	特徴点間の距離	正解データとの誤差	特徴点間の距離	正解データとの誤差
p14	15.07m	0.07m	15.07m	0.07m
p26	15.09m	0.09m	15.06m	0.06m
p35	18.95m	0.00m	18.96m	0.01m
p60	15.08m	0.08m	15.09m	0.09m
p71	15.47m	0.06m	15.51m	0.10m
p96	18.94m	0.01m	18.91m	0.02m
p107	22.13m	0.06m	22.06m	0.00m
p126	14.99m	0.01m	15.08m	0.08m
p138	15.78m	0.09m	15.79m	0.10m
p165	16.46m	0.08m	16.43m	0.06m
p175	15.75m	0.07m	15.73m	0.05m
p187	15.08m	0.08m	15.07m	0.07m
p208	8.59m	0.09m	8.60m	0.10m
p246	8.56m	0.06m	8.61m	0.11m
p291	8.58m	0.08m	8.58m	0.08m
p323	9.50m	0.15m	9.49m	0.15m
p337	9.51m	0.07m	9.53m	0.08m
p373	8.69m	0.20m	8.67m	0.19m
p397	8.60m	0.06m	8.60m	0.06m
p418	15.91m	0.07m	15.85m	0.01m

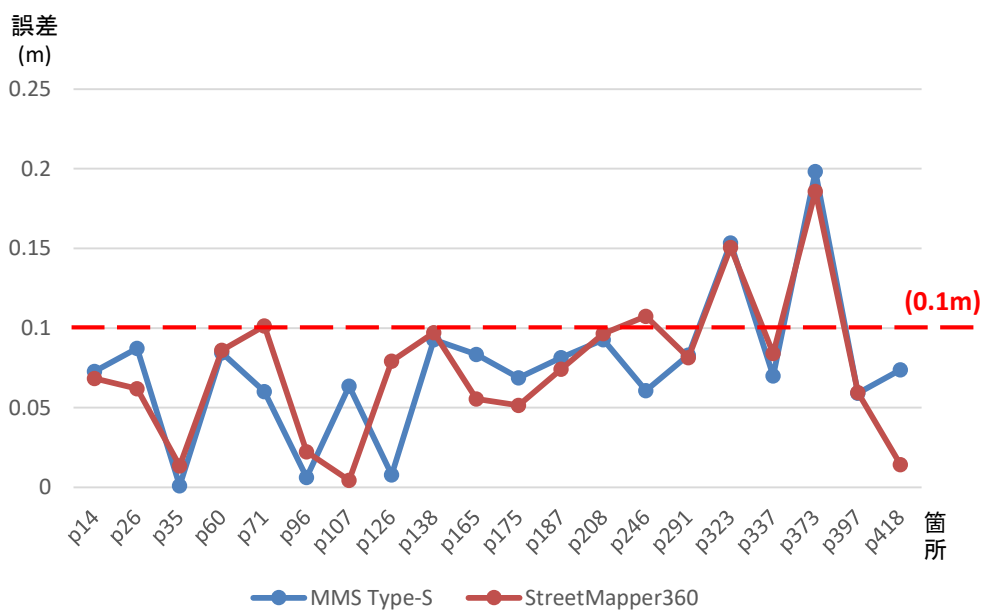


図 5.30 MMS Type-S と StreetMapper360 の特徴点の誤差の比較

結果では、両方データとも、多くの誤差が 0.10m 以内に収まっていることがわかった。また、両方誤差の比較では、すべての箇所における誤差の差分が MMS 計測精度の 0.10m 程度以内に収まっている。そのため、両方の点群データから同程度の精度で特徴点の抽出が可能といえる。そして、特徴点の抽出結果を詳細に確認したところ、ビルのノイズを除去できなかった箇所 (図 5.22) においても、正確に高架橋の線形の特徴点を抽出できた。しかし、図 5.18 の P323 と P373 の箇所において、第 4 章で述べたように、路面と壁面の交差部の判定が困難で、誤差が 0.15m を上回っている。また、図 5.21 と図 5.31 のようなノイズ除去できなかった箇所では、正確に高架橋の線形の特徴点を抽出できなかった。

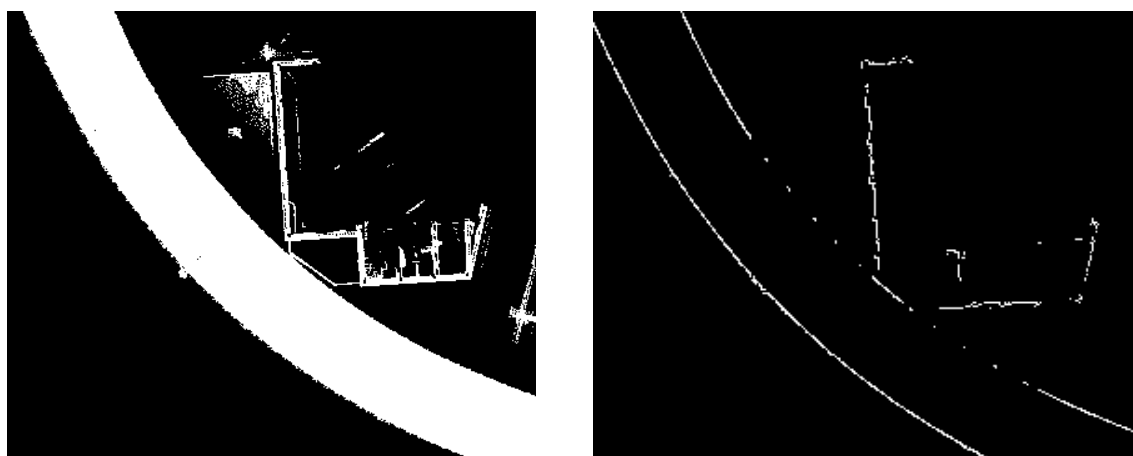


図 5.31 特徴点を正確に抽出できなかった箇所

そこで、全体の点群データを詳細に確認したところ、それらの箇所では、高架橋の壁により、計測できない箇所（図 5.32）に点群データが存在し、それを壁の点群データとして認識したことが特徴点の抽出失敗の原因であった。その箇所の点群データの取得時間を確認すると、高架橋の路面の計測時間と異なっている。このことから、計測できない箇所に存在する点群データは、地上を走行時に取得した点群データだと考えられる。この部分の点群データがない場合には、図 5.22 のビルとのノイズと同様に、第 4 章で提案した特徴点抽出手法で正確に高架橋の線形の特徴点を抽出できると考える。

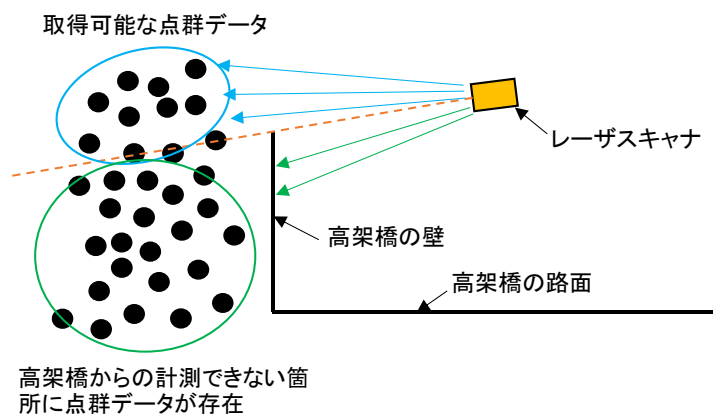


図 5.32 特徴点を正確に抽出できなかった原因

### 5.6.3 高架橋の外観精度の比較実験

MMS Type-S の点群データから生成した道路境界線と道路中心線を図 5.33、StreetMapper360 の点群データから生成した道路境界線と道路中心線を図 5.34 に示す。

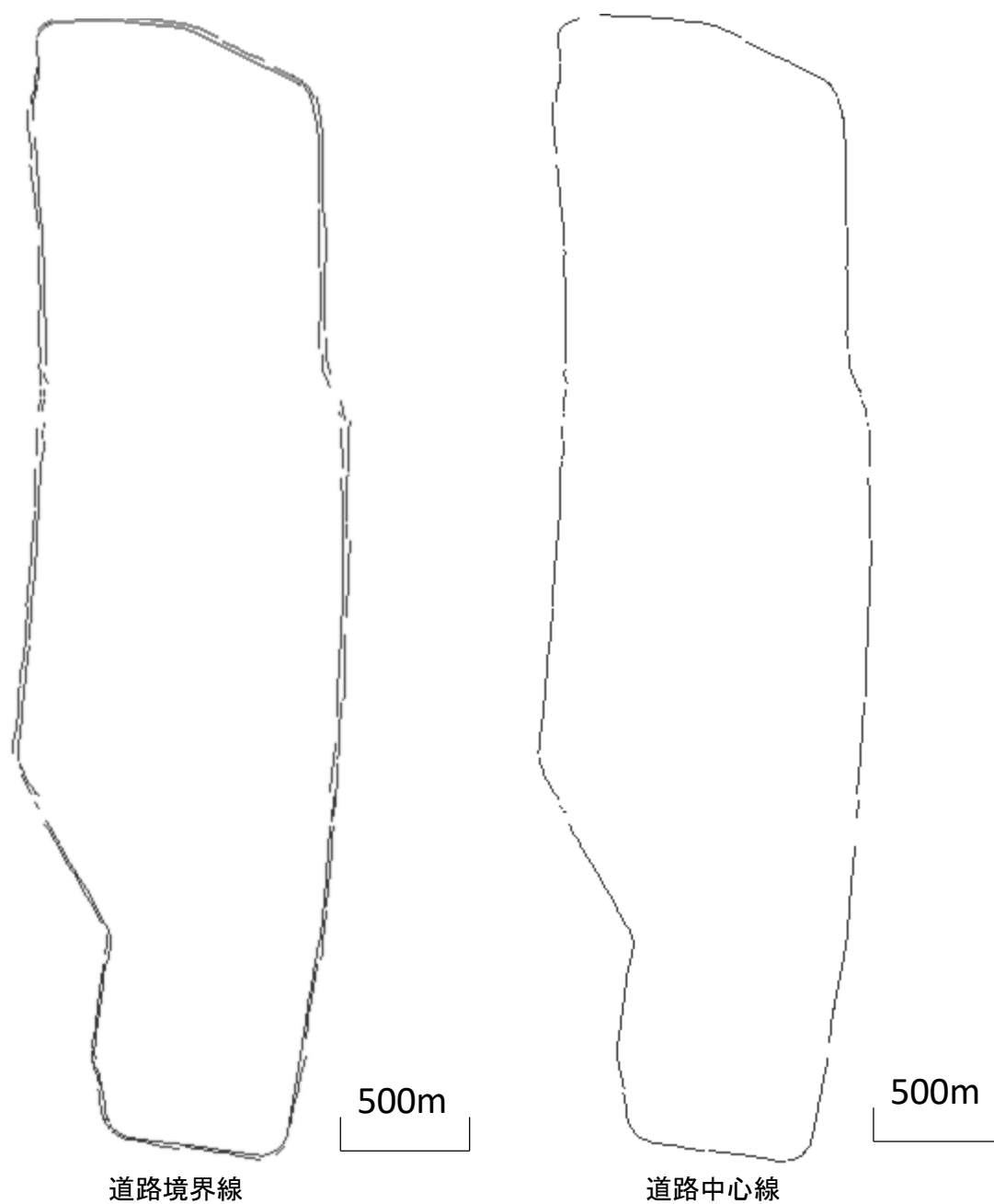


図 5.33 MMS Type-S の点群データから生成した道路線形



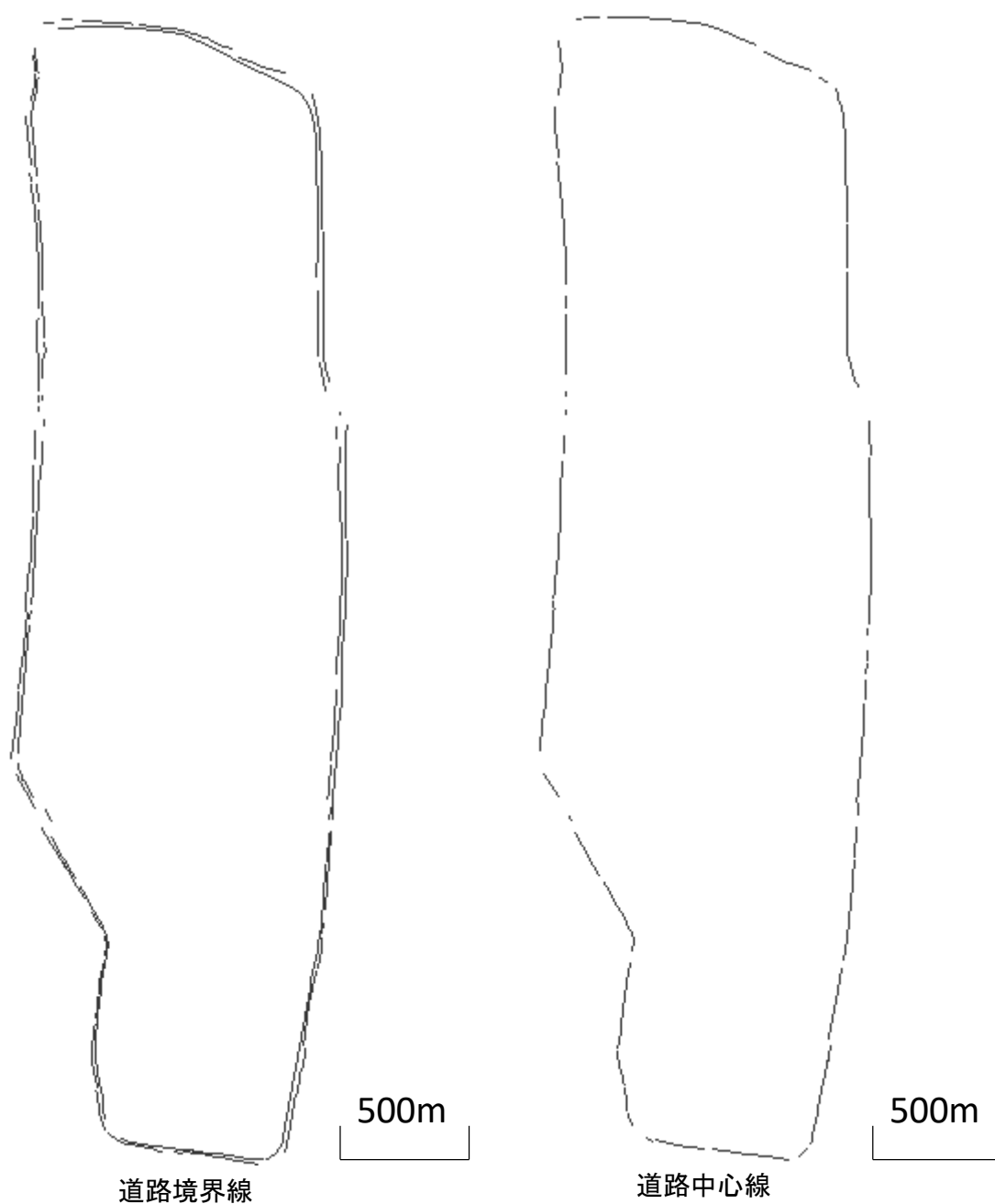


図 5.34 StreetMapper360 の点群データから生成した道路線形

図 5.33 と図 5.34 から、両方の点群データにおいて、高架橋の形状に近似する線形を生成できたことがわかった。一方、StreetMapper360 の道路中心線は、MMS Type-S より切れている箇所が多く見られた。これは2つの原因が考えられる。1つ目は、分岐部や合流部において、路面の幅が急に変化し、中心位置も急に変わることである。2つ目は、図 5.31 のような特徴点の抽出が失敗し、中心位置を算出できないことである。

両方の MMS で取得した点群データから生成した線形と正解データとの相関係数と平均二乗誤差を表 5.5 に示す。

表 5.5 道路境界線と正解データとの精度の比較結果

	相関係数	平均二乗誤差
MMS Type-S	1.00	0.88m
StreetMapper360	1.00	1.18m

平均二乗誤差を比較すると、MMS Type-S では約 0.88m で、StreetMapper360 では 1.18m で、その差分は約 0.30m となっている。一方、5.4.2 項の実験結果では、両方の点群自体の位置ずれが平均約 0.70m となっている。このことから、両方の線形の精度の差分は点群自体の位置ずれから生じた差分であることがわかった。また、生成した線形の精度が地図情報レベル 1,000 の水平位置の許容誤差の 0.70cm を満たしていないことが明らかになった。これは、5.3.2 項の実験結果に示したように正解データと点群データ間のずれが原因になっている。そして、線形の生成精度を評価するには、第 4 章と同様に線形と抽出した特徴点列との比較を行う。比較の結果を表 5.6 に示す。

表 5.6 道路境界線と特徴点列との精度の比較結果

	相関係数	平均二乗誤差
MMS Type-S	1.00	0.55m
StreetMapper360	1.00	0.59m

表 5.6 から、両方の点群データの平均二乗誤差が近いこと、同程度の精度で線形の生成が可能であることがわかった。また、それらの誤差は、地図情報レベル 1,000 の平面の許容誤差の 0.70m を満たしている。一方、この誤差は、第 4 章の 0.8m より非常に大きくなっている。詳細に線形を確認すると、誤差が大きい原因は 2 つある。1 つ目は、図 5.31 のようにカーブの線形の真ん中で切れていることである。この場合には、点列が欠損し、正確に円弧を抽出できないため、誤差が大きいクロソイド曲線が生成される。2 つ目は、図 5.35 の箇所において 2 つのカーブの間に短い直線の抽出が失敗で、正確に線形を生成できなかったことである。

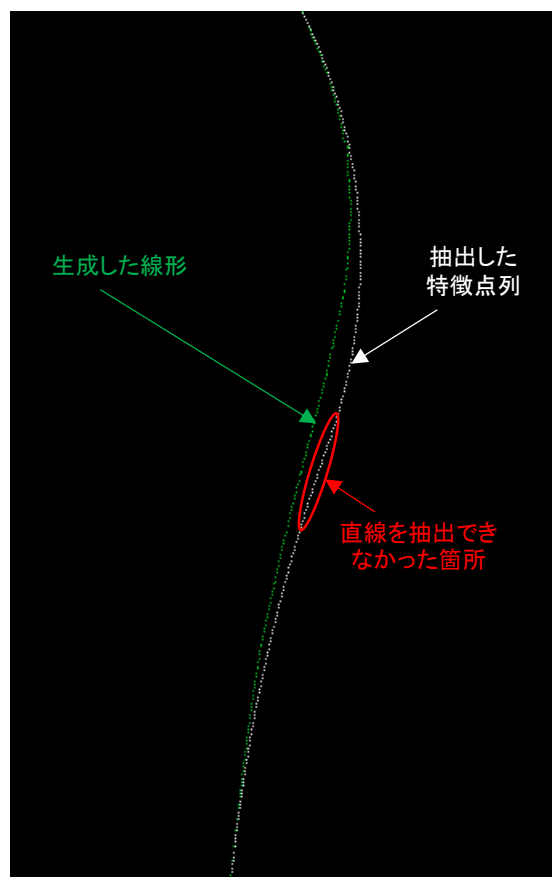


図 5.35 正確に線形を生成できなかった箇所

本実験では、特徴点選出処理におけるパラメータの横断数が第4章より大きいため、抽出された特徴点の数が少なくなった。この場合には、短い直線の点数が非常に少なくノイズとして除去された。そして、このような箇所を除いて平均二乗誤差が 0.19m と 0.17m(表 5.7)という小さい値になった

表 5.7 道路境界線と特徴点列との精度の最比較の結果

	相関係数	平均二乗誤差
MMS Type-S	1.00	0.19m
StreetMapper360	1.00	0.17m

また、道路中心線と特徴点列との比較結果を表 5.8 に示す。

表 5.8 道路中心線と特徴点列との精度の比較結果

	相関係数	平均二乗誤差
MMS Type-S	1.00	0.27m
StreetMapper360	1.00	0.27m

表 5.8 の平均二乗誤差は、表 5.7 と同様に正確に線形を生成できなかった箇所を除いたものである。そして、結果から、両方とも約 0.27m の平均二乗誤差となり、地図情報レベル 1,000 の水平位置の許容誤差の 0.70m を満たしている。また、生成した道路中心線は、道路境界線と同様に、実際の GPS 履歴ポイントを使用することで、さらなる生成精度の向上が可能と考えられる。

両方の縦断線形と特徴点列との精度比較を表 5.9 に示す。

表 5.9 縦断線形と特徴点列との精度の比較結果

		相関係数	平均二乗誤差
MMS Type-S	道路境界線	1.00	0.16m
	道路中心線	1.00	0.13m
StreetMapper360	道路境界線	1.00	0.19m
	道路中心線	1.00	0.18m

表 5.9 から、両方とも、平均二乗誤差が地図情報レベル 1,000 の標高の許容誤差の 0.33m を満たしている。また、両方の平均二乗誤差の差分も小さい。そのため、両方の特徴点列から同程度の高精度で、縦断線形を生成できたといえる。

以上のことから、ラインスキャンの方向や、点群の横断密度などの特性が大きく異なる 2 種類の MMS 点群データから、同様に高精度な高架橋の道路線形の自動生成が可能であることがわかった。ただし、生成した道路線形の精度は MMS の GPS 精度に依存している。

## 5.7 まとめ

本章では、まず、2 種類の MMS と点群データの特性の違いを分析する。そして、2 種類の点群データと生成した道路の中心線点列を入力データとし、第 4 章の提案システムに適用する。最後に、2 種類の点群データをシステムに適用した結果を比較し、システムの実用

性の評価実験を行った。

ノイズ除去の比較実験の結果では、両方とも高精度にノイズを除去できたが、レーザの計測精度により、高架橋に近いビルを除去できない場合もあった。

特徴点の抽出精度の比較実験では、両方とも高精度に特徴点の抽出が可能である。また、ノイズ除去処理で除去できなかった箇所に対しても、正確に特徴点を抽出できる部分があることがわかった。しかし、点群密度が低いレーザスキャナの場合、MMS から遠い場所の計測が困難で、特徴点の抽出精度が低下する可能性がある。この問題は、MMS で複数回の計測により解決可能である。

高架橋の外観精度の比較実験では、両方の点群データから、高精度に線形の生成が可能であるが、GPS の位置誤差により、両方の線形の間はずれが発生する場合がある。この問題は、トータルステーションなどで取得した標定点により両方の点群データを補正することで解決できると考えられる。また、直線や円弧を抽出できない箇所において、線形の生成精度が低下する問題がある。これを解決するには、点列の位置を考慮した補間手法が必要と考える。

これらのことにより、本システムの各提案手法は、MMS 点群データのラインスキャンの方向や、点群の横断密度などの特性が大きく異なっても、同程度の精度で道路線形を生成できるため、実用性が高く、自動運転の実用化のための基礎的な手法として評価できる。

## 第 6 章

### 総括

## 第6章 総括

センサ技術とデータ解析技術の向上により、自動運転の技術の実用化が目の前に来ている。そして、自動運転の技術としては、走行環境の認識、状況の判断と車両の制御の技術がある。走行環境の認識技術では、自車、他車と各種障害物が道路のどの位置に存在するかを認識している。状況の判断技術では、道路と周辺状況の情報から分析を行い、適切な操作指令を下している。車両の制御技術では、道路上の状況に応じて、適切な走行経路を生成している。それらの技術では、電子地図データに記載されている道路中心線、道路境界線、車線ごとの中心線、交差点などの情報を利用している。しかし、現存の基盤地図は、構造物を面的な情報で管理し、道路の線形情報を持っていないため、自動運転に適用することが困難である。このため、現存の CAD 図面から必要な情報を読み取り基盤地図データに道路線形や交差点などの情報を基盤地図に追加し、新しい電子地図データを生成する必要がある。しかし、現状では、CAD 図面に特徴的な断面情報しか記載されていないため、線形の形状変化の連続性を持っていない。

一方、高度経済成長期に建設された多くの道路構造物は、一斉に老朽化を迎え、適切な維持管理が求められている。構造物の維持管理を実施するには、参照の設計図や完成図が必要である。高度経済成長期に制作された図面は、紙媒体で、10～30 年の保存義務が課せられている。しかし、現状では、保存年数を超過すると、それらの道路構造物の図面が廃棄される場合や、現況に即しない場合がある。それらの場合においては、道路構造物を適切に維持管理するのが困難で、現況から図面を再生する技術が求められている。ここで、道路図面を生成する際に、まず、道路の位置と形状を決定する道路中心線を生成する必要がある。

このように、自動運転においても、道路構造物の維持管理においても、道路中心線が重要となっている。

多くの既存研究では、ポリラインや、ベジェ曲線などで道路の線形を生成している。しかし、これらの幾何情報は、道路構造令に規定されていないため、自動運転や道路構造物の維持管理への適用が困難である。これに対して、本研究では、道路構造令の規定の幾何情報から構成される線形を生成する技術とシステムを開発し、その有用性を検証するとともに、実用化に向けての改善について取り組んだ。

各章で取り組んだ内容について、それぞれ概説する。

第 1 章では、道路中心線が自動運転と道路構造物の維持管理という 2 つの分野における重要性を説明し、現状の問題点を導いた。この問題点に対して、MMS の計測技術とそれによる図面の生成技術を紹介し、2 つの分野への適用性を分析する。その結果、多くの研究が道路構造令に規定されている幾何情報を使用しないため、適用性が低いことがわかった。このことに対して、本研究では、道路構造令に規定されている幾何情報で高架橋の道路線形を自動生成する手法を提案し、その手法に基づきシステムを開発するという本研究の枠組みを提示した。

第2章では、自動運転を目的とした道路線形の自動生成システムを構築するために、必要な技術を洗い出した。次に、それぞれの技術に関する既存手法を調査した。そして、これらの技術の適用性を明らかにし、適切な新しい手法や改良手法を提案した。例えば、既存手法を実際の高架橋に適用した際に発生する課題点として「路面勾配が特徴点の抽出精度に影響すること」や「幾何情報のあいまいな境界が線形の生成精度に影響すること」などを挙げ、それらに対する解決手法とし「横断面を取得し、全体の形状を考慮した特徴点の抽出手法」と「継ぎ手の抽出により線形を分割し、線形を生成する手法」を提案した。これらに基づき、開発する高架橋の道路線形の自動生成システムの全容について図で示し、本研究で実現する範囲について明確化した。

第3章では、第1章と第2章における課題に対して、継ぎ手の位置情報を利用し、道路線形を分割し、ベクトル情報を計算する手法を提案した。そこで、高架橋の両側のビルなどのノイズの除去、高架橋の道路線形の特徴点の抽出と規定の幾何情報を用いて点列から線形の自動生成手法の詳細について記述した。そして、実証実験では、特徴点の抽出精度と線形の生成精度の検証により、提案システムの有用性を確認した。

第4章では、線形の生成精度とシステムの実用性の向上を目的として、第3章の提案した手法を改良した。「クロソイド曲線の不自然な接続」という課題に対して、「継ぎ手などの情報を利用せずに線形を生成する手法」を提案した。また、「広範囲な高架橋の対応処理」と「特性が異なるMMS点群データの対応処理」として、「分岐部の線形分割処理」や「GPS履歴ポイントを利用した横断面の取得手法」を提案した。さらに、線形の生成精度を向上させるため、「特徴点選出処理」を提案した。そして、実証実験では、改良した手法により高精度な特徴点の抽出と自然に接続する線形の生成が可能であることを明確にした。

第5章では、システムの実用性を確認するため、特性が異なるMMS点群データから生成した線形精度を比較し、両方の相違について分析を行い、適応性を評価した。比較結果から、ラインスキャンの方向や点群密度などの特性が大きく異なる両方の点群データから、同程度の精度で高架橋の道路境界線と道路中心線を生成可能であるが、線形の生成精度がGPSの位置誤差に依存することがわかった。

以上の研究成果より、自動運転と道路構造物の維持管理のための道路線形の生成技術として、本研究の提案手法と開発システムの有用性と実用性を実証した。

本研究で生成した道路線形と3次元データは、自動運転と道路構造物の維持管理以外に、ハザードマップ、災害シミュレーション、都市景観のシミュレーションなど様々な分野で使用可能である。このことから、本研究は社会への貢献度が高いといえる。

本研究成果の今後の展開として、自動運転の走行経路の自動生成への適用を検討する。

本研究で生成した道路線形は道路構造令に規定されている幾何情報で構成され、自然な接続を実現している。そのため、生成した線形は自動運転の走行経路としての利用が十分だと考えている。一方、走行経路の生成技術として利用する場合、車線ごとの中心線点列を抽出する必要がある。道路の車線については、一般的に、白線により抽出が可能である。しか



し、実際には白線のない場合や他のマーカにより抽出が困難な場合が多くある。そこで、今後は、道路の車線を認識するため、関連する既存技術と法令の調査や、MMS 点群データ以外のデータを同時に使用する手法の検討を行う予定である。

また、今後の展開では、高架橋以外に、他の道路構造物への適用も検討している。

まず、一般道路では、クロソイド曲線を使用しない場所が多いため、他の法令を参照した手法の検討が必要である。一方、本研究の提案手法は、走行経路の生成技術として利用する場合、クロソイド曲線の制限条件がないため、検討可能な接続パターン数が非常に多い。そこで、大量の自動車のキャンデータを参照する線形の生成技術を検討したいと考えている。

さらに、トンネルでは、高架橋の道路線形の性質と近いため、本手法の適用性が高いと考えられる。しかし、GPS を受信できないため、MMS で取得した点群データは、点群の位置精度が低い問題がある。そのため、トンネルの出入口の位置を利用した点群データの自動補正技術を検討したいと考えている。

最後に、普通の橋梁では、コンクリート型の防護柵がないため、両側の特徴点の抽出が困難である。さらに、吊り橋のような場合では、上部工にケーブルが多く使用され、橋梁の形状を認識することが困難な場合がある。そのため、壁面と路面の交差部以外の特徴点の検出手法を検討したいと考えている。

このように、本研究の応用対象の適用性を検討しながら、既存研究と法令の参照を通し、本研究で提案した手法の実用性をさらに向上させる。最後に、長期間にわたって、実験を繰り返すことで、信頼性の高い自動運転の実用化技術の確立を目指す。

## 参考文献

## 参考文献

- [1] 三原寛司, 景山浩二: 自動運転に関する法規制と実証実験, 情報処理, 情報処理学会, Vol.57, No.5, pp.460-464 (2016).
- [2] Cheon, S: An Overview of Automated Highway Systems (AHS) and the Social and Institutional Challenges They Face, University of California Transportation Center (2002).
- [3] 津川定之: 自動車の自動運転—その特長と課題—, 研究報告高度交通システム (ITS), 情報処理学会, Vol.39, No.9, pp.1-8 (2009).
- [4] 津川定之: 自動運転技術の発展, 国際交通安全学会誌, 国際交通安全学会, Vol.40, No.2, pp.82-90 (2015).
- [5] WIRED : The Original Futurama, 入手先<<https://www.wired.com/2007/11/ff-futurama-original/>> (入手 2016.10.18).
- [6] Biblion : WORLD'S FAIR Enter the World of Tomorrow, 入手先<<http://exhibitions.nypl.org/biblion/worldsfair/enter-world-tomorrow-futurama-and-beyond/story/story-gmfuturama/>> (入手 2016.10.18).
- [7] Rashid, G. Automatic vehicle control system. US 2804160 A. 1957-5-8.
- [8] Fraser, H. W., Sumners Sumner J. Automatic vehicle parking system. US 2656940 A. 1953-10-27.
- [9] Deng, L., and Yu, D.: Deep Learning Methods and Applications, *Foundations and Trends in Signal Processing*, now publishers, Vol.7, No.3-4, pp.197-387 (2014).
- [10] 川端由美, 宮田拓弥: 自動車産業が壊れる日自動運転の “先” にある新秩序, Wedge, 株式会社ウエッジ, Vol.28, No.6, pp.12-35 (2016).
- [11] 国土交通省 : ITS 全体構想, 入手先<<http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/5Ministries/>> (入手 2016.10.18).
- [12] 小塚一宏: ITS (高度道路交通システム) の国内外の動向, 豊田中央研究所 R&D レビュー, 豊田中央研究所, Vol.33, No.3, pp.53-68 (1998).
- [13] 上田敏: ITS 研究のマネジメントに関する一考察—1996 年に返って、考えること—, 入手先<<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/kouenkai/kouenkai2011/happyou/04.pdf>> (入手 2016.10.18).
- [14] 国土交通省: 最近の自動運転の実現に向けた取組概要, 入手先<<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/autopilot/pdf/05/8.pdf>> (入手 2016-10-18).
- [15] Roman, C., Sapienza, M., Ball, P., Ou, S., Cuzzolin, F. and Torr, H. S. P.: Heterogeneous Wireless System Testbed for Remote Image Processing in Automated Vehicles, *2016 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*, IEEE, pp.1-5 (2016).
- [16] Park, J., Lee, J. and Son S.: A Survey of Obstacle Detection Using Vision Sensor for Autonomous Vehicles, *2016 IEEE 22nd International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA)*, IEEE, p264 (2016).
- [17] Allodi, M., Broggi, A., Giaquinto, D., Patander, M. and Prioletti, A.: Machine learning in tracking associations with stereo vision and lidar observations for an autonomous vehicle, *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, IEEE, pp.648-653 (2016).

- [18] 小野ロ一則：CCD カメラを用いたレーンマーカの検出，映像情報メディア学会誌，Vol.68，No.10，pp.775-779 (2014).
- [19] 磯貝俊樹，松浦充保，川合健夫：レーザスキャナを用いたレーンマーカ検出，映像情報メディア学会誌，Vol.68，No.10，pp.780-784 (2014).
- [20] 実吉敬二：パッシブビジョンを用いた障害物の検出，映像情報メディア学会誌，Vol.68，No.10，pp.789-793 (2014).
- [21] 菅沼直樹：アクティブセンサを用いた障害物の検出，映像情報メディア学会誌，Vol.68，No.10，pp.794-797 (2014).
- [22] Liu, W., Yamazaki, F. and Vu, T. T.: Automated Vehicle Extraction and Speed Determination From QuickBird Satellite Images, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, IEEE, Vol.4, No.1 (2011).
- [23] Altrock, V. C.: Fuzzy logic and NeuroFuzzy applications explained, Prentice Hall (1995).
- [24] Homma, T., Atlas, E. L. and Marks II, J. R.: AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR SPATIOTEMPORAL BIPOLAR PATTERNS: APPLICATION TO PHONEME CLASSIFICATION, *NIPS'87 Proceedings of the 1987 International Conference on Neural Information Processing Systems*, NIPS Proceedings, pp.31-40 (1987).
- [25] 有尾拓誠，杉町敏之，深尾隆則，河島宏紀：自動運転車のファジィ推論を応用したセルフゲインチューニング，ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集，No.2012，pp.2P1-S07(1)-2P1-S07(4) (2012).
- [26] 谷添鉄平，河本晶晴，武藤大治，横井博一：多様な運転操作可能な自動駐車システム，電子情報通信学会技術研究報告，電子情報通信学会，Vol.105，No.419，pp.93-96 (2005).
- [27] Huval, B., Wang, T., Tandon, S., Kiske, J., Song, W., Pazhayampallil, J., Andriluka, M., Rajpurkar, P., Migimatsu, T., Cheng-Yue, R., Mujica, F., Costes, A. and Ng, Y. A.: An Empirical Evaluation of Deep Learning on Highway Driving, arXiv preprint arXiv:1504.01716v3 (2015).
- [28] 内閣府：地理空間情報活用推進基本法，入手先<<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H19/H19H0063.html>> (入手 2016.10.24).
- [29] AUTODESK：製品，入手先<<http://www.autodesk.co.jp/products>> (入手 2016.10.24).
- [30] jw\_software\_club：ダウンロード，入手先<<http://www.jwcad.net/download.htm>> (入手 2016.10.24).
- [31] エーアンドエー株式会社：VECTORWORKS2016，入手先<<http://www.aanda.co.jp/Vectorworks2016/index.html>> (入手 2016.10.24).
- [32] 株式会社ピボット：DRA-CAD15 シリーズ，入手先<<http://www.pivot.co.jp/product/program/dracad/index.html>> (入手 2016.10.24).
- [33] 国土交通省 電子納品ホームページ：SXFVer.3.1 仕様書（第2版），<[http://www.cals-ed.go.jp/sxf\\_ver3-1\\_specification\\_draft/](http://www.cals-ed.go.jp/sxf_ver3-1_specification_draft/)>，(入手 2016.10.24).
- [34] 望月義明：建設業界における CAD データ交換標準の開発，東芝レビュー，オーム社，Vol.56，No.6 (2006).
- [35] J 国土交通省：CAD 製図基準に関する運用ガイドライン(案)，入手先<<http://www.mlit.go.jp/tec/it/cals/050831/img/05.pdf>>，(入手 2016.10.24).
- [36] 日本建設業連合会：建築工事における書類・図面の電子化／保存ガイドライン第2版，

- 入手先<[http://www.nikkenren.com/kenchiku/bcs\\_it/report/edoc2/edoc\\_guideline\\_v200.pdf](http://www.nikkenren.com/kenchiku/bcs_it/report/edoc2/edoc_guideline_v200.pdf)>, (入手 2016.10.24).
- [37] 国土交通省：地方整備局文書管理規則，入手先<[http://www.mlit.go.jp/page/kanbo01\\_hy\\_000166.html](http://www.mlit.go.jp/page/kanbo01_hy_000166.html)>, (入手 2016.10.24).
- [38] 大阪府情報公開審査会：「新住宅市街地開発法関係文書不存在決定異議申立事案」に関する答申，大公審答申第174号 (2009).
- [39] 富士ゼロックス北海道：DocuWorksCITY お客様事例集概要，入手先<<https://www.fujixerox.co.jp/hkx/product/event/dw/news/city030.html>>, (入手 2016.10.24).
- [40] 中村秀明，鬼丸浩幸，河村圭，宮本文穂：Bridge Management System による複数橋梁の維持管理計画策定，コンクリート工学年次論文集，日本コンクリート工学協会，Vol.23，No.1，pp.1219-1224 (2001).
- [41] 横山博司，中村秀明，河村圭，宮本文穂：Bridge Management System における劣化要因を考慮した維持管理対策の選定，コンクリート工学年次論文集，日本コンクリート工学協会，Vol.23，No.1，pp.1225-1230 (2001).
- [42] 久田真：東北地方におけるインフラ維持管理の取り組み～「産学官」総力戦の課題解決のために～，入手先<<https://www.fujixerox.co.jp/hkx/product/event/dw/news/city030.html>>, (2016.10.24).
- [43] 松井義昌，青木茂，上川一真：3次元レーザースキャナーの建築リニューアル工事における活用事例(耐久性・保全,材料施工)，日本建築学会大会学術講演梗概集，Vol.2005，pp.33-pp.34 (2005).
- [44] 塚田義典，田中成典，窪田諭，中村健二，岡中秀騎：点群データを用いた橋梁の3次元モデルの生成に関する研究，知能と情報，ファジィ学会，Vol.27，No.5，pp.796-812 (2015).
- [45] 川野浩平，田中成典，今井龍一，中村健二：レーザプロファイラデータを用いた河川空間の3次元モデル構築手法に関する研究，情報処理学会論文誌データベース，情報処理学会，Vol.8，No.1，pp.55-72 (2009).
- [46] 三菱電機：三菱モバイルマッピングシステム高精度 GPS 移動計測装置，入手先<<http://www.mitsubishielectric.co.jp/pas/mms/>>, (入手 2016.10.24).
- [47] 福森秀晃，佐田達典，大久保秀晃，清水哲也，村山盛行：3次元レーザースキャナーの測定精度に関する基礎的実験，土木情報利用技術論文集，土木学会，Vol.18，pp.193-200 (2009).
- [48] パスコ：MMS (Mobile Mapping System：モバイル・マッピング・システム) を利用した道路マネージメント，入手先<<http://www.pasco.co.jp/products/mms/>>, (入手 2016.10.24).
- [49] 小林一郎，宮下征士，坂口将人，上田誠：MMS データを用いた視距改良設計，土木情報利用技術論文集，土木学会，Vol.18，pp.1-8 (2009).
- [50] 折原照崇，柳澤政生，戸川望，新田知之，進藤大介，田中清貴：曲線道路を滑らかに接続する道路ネットワーク整形手法，組込みシステムシンポジウム2014論文集，情報処理学会，Vol.2014，pp.69-74 (2014).
- [51] Liang, Z., Zheng, G. and Li, J.: Automatic parking path optimization based on Bezier curve fitting, 2012 IEEE International Conference on Automation and Logistics, IEEE, pp.583-587 (2012).

- [52] Jo, K. and Sunwoo, M. Generation of a Precise Roadway Map for Autonomous Cars, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, Vol.15, No.3, pp.925-937 (2014).
- [53] 日本道路協会：道路構造令の解説と運用 (2004).
- [54] Wang, L., Miura, K., Nakamae, E., Yamamoto, T. and Wang, T.: An Approximation Approach of The Clothoid Curve Defined in The Interval  $[0, \pi/2]$  and Its Offset by Free-Form Curves, *Computer-Aided Design*, Elsevier, Vol.33, No.14, pp.1049-1058 (2001).
- [55] 田中成典, 北川悦司, 姜文淵, 安彦智史, 川野浩平：道路橋上部工の維持管理のための3次元現況図の自動生成に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.68, No.2, pp.I\_181-I\_189 (2012).
- [56] 姜文淵, 田中成典：高架道路橋上部工の維持管理のための SXF 図面の自動生成に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.70, No.2, pp.I\_319- I\_327 (2014).
- [57] 田中成典, 中村健二, 山本雄平, 今井龍一, 窪田諭, 姜文淵：MMS 点群データを用いた高架道路橋の線形の自動生成に関する研究, 知能と情報, ファジィ学会, Vol.28, No.5, pp.826-845 (2016).
- [58] 石川貴一郎, 小倉徹也, 天野嘉春, 橋詰匠：Mobile Mapping System による三次元点群と時系列画像を用いた対向車点群の除去, 精密工学会学術講演会講演論文集, 精密工学会, Vol.2010A, No.0, pp.57-58 (2010).
- [59] 小倉徹也, 石川貴一郎, 天野嘉春, 橋詰匠：Mobile Mapping System の三次元点群処理に関する研究:断面に着目したグルーピングによる対向車除去, 精密工学会学術講演会講演論文集, 精密工学会, Vol.2011S, No.0, pp.719-720 (2011).
- [60] 小倉徹也, 石川貴一郎, 天野嘉春, 橋詰匠：Mobile Mapping System の三次元点群処理に関する研究—複数レーザを利用した対向車除去, 精密工学会学術講演会講演論文集, 精密工学会, Vol.2011A, No.0, pp.137-138 (2011).
- [61] 亀井克之, 富樫健司, 橋本義明, 西川啓一：モービルマッピングシステムによる三次元点群データからの電柱検出方式, 電気学会論文誌. C, 電気学会, Vol.134, No.5, pp.747-754 (2014).
- [62] Abdullah, S., Awrangjeb, M. and Lu, G.: Automatic segmentation of LiDAR point cloud data at different height levels for 3D building extraction, *2014 IEEE International conference on Multimedia and Expo workshops (ICMEW)*, IEEE, pp.1-6 (2014).
- [63] Jochem, A., Höfle, B., Wichmann, V., Rutzinger, M. and Zipf, A.: Area-wide roof plane segmentation in airborne LiDAR point clouds, *Computer, Environment and Urban Systems*, Elsevier, Vol. 36, No.1, pp.54-64 (2012).
- [64] Awrangjeb, M. and Lu, G.: Automatic Building Footprint Extraction and Regularisation from LIDAR Point Cloud Data, *2014 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)*, IEEE, pp.1-8 (2014).
- [65] 高田治, 宮本定明:ファジィデータに対するL1距離を用いたファジィクラスタリング, 日本ファジィ学会誌, ファジィ学会, Vol.13, No.6, pp.689-698 (2001).
- [66] Yao, Y. and Hu, Q.: Automatic Extraction Method Study of Road Marking Lines Based on Projection of Point Clouds, *2014 22nd International Conference on Geoinformatics*, IEEE, pp.1-4 (2014).
- [67] Li, Z., Zhang, L., Tong, X., Du, Bo., Zhang, Z., Liu, H., Mei, J., Xing, X. and Mathiopoulos T. P.: A Three-Step Approach for TLS Point Cloud Classification , *IEEE Transa*

- tions on Geoscience and Remote Sensing*, IEEE, Vol.54, No.9, pp.5412-5424 (2016).
- [68] Zhou, G., Cao, S. and Zhou, J.: Planar Segmentation Using Range Images From Terrestrial Laser Scanning, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE, Vol.13, No.2, pp.257-261 (2016).
- [69] Ylimaki, M., Kannala, J., Holappa, J., Brandt, S. S. and Heikkila, J.: Fast and accurate multi-view reconstruction by multi-stage prioritised matching, *IET Computer Vision*, IET, Vol.9, No.4, pp.576-587 (2015).
- [70] Kong, D., Xu, L., Li, X. and Li, S.: K-Plane-Based Classification of Airborne LiDAR Data for Accurate Building Roof Measurement, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, Vol.63, No.5, pp.1200-1214 (2014).
- [71] Zheng, G. and Moskal, L. M.: Leaf Orientation Retrieval From Terrestrial Laser Scanning (TLS) Data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, IEEE, Vol.50, No.10, pp.3970-3979 (2012).
- [72] Zhang, Z. Zhang, L., Tong, X., Mathiopoulos, P. T., Guo, B., Huang, X., Wang, Z. and Wang, Y.: A Multilevel Point-Cluster-Based Discriminative Feature for ALS Point Cloud Classification, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, IEEE, Vol.54, No. 6, pp.3309-3321 (2016).
- [73] Zhao, C. and Meng, X.: An improved algorithm for k-nearest-neighbor finding and surface normals estimation, *Tsinghua Science and Technology*, Tsinghua University, Vol.14, No.S1, pp.77-81 (2009).
- [74] Lee, H., Park, J. and Chung, W. : Curb Feature based Localization of a Mobile Robot in Urban Road Environments, *International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, pp. 2794-2799 (2015).
- [75] Guan, H., Li, J., Yu, Y., Chapman, M. and Wang, C.: Automated Road Information Extraction From Mobile Laser Scanning Data, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, Vol.16, No.1, pp.194-205 (2015).
- [76] 花田吏, 荒木俊輔, 碓崎賢一: MMS データを用いた歩行空間情報取得手法, 地理システム学会講演論文集, 地理システム学会, Vol.20 (2011).
- [77] 花田吏, 曾鑫, 荒木俊輔, 碓崎賢一: MMS 点群データの密度に依存しない道路図化情報取得手法, 地理システム学会講演論文集, 地理システム学会, Vol.21, pp. ROMBUNNO.D-2-2 (2012).
- [78] Gikas, V. and Stratakos, J. : A Novel Geodetic Engineering Method for Accurate and Automated Road/Railway Centerline Geometry Extraction Based on the Bearing Diagram and Fractal Behavior, *Intelligent Transportation Systems*, IEEE, Vol.13, No.1, pp.115-126 (2012).
- [79] 国土交通省: 道路法施行規則 (1952).
- [80] Duda, R. and Hart, P. : Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures, *Communications of the ACM*, ACM, Vol.15, No.1, pp.11-15 (1972).
- [81] Schwartz, D. : Clothoid Road Geometry Unsuitable for Sensor Fusion Clothoid Parameter Sloshing, *Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, pp.484-488 (2003).
- [82] Wang, H., Luo, H., Wen, C., Cheng, J., Li, P., Chen, Y., Wang, C. and Li, J. : Road Boundaries Detection Based on Local Normal Saliency From Mobile Laser Scanning Data, *Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE, Vol.12, No.10, pp.2085-2089 (2015).
- [83] 大谷周: 航空レーザ測量活用による中小河川の治水安全度評価, 建設の施工企画,

pp.11-15(2009).

- [84] 日本道路協会：防護柵設置要綱 (1972).
- [85] 宮本定明：ファジィグラフによる階層的クラスタリングについて，日本ファジィ学会誌，ファジィ学会， Vol.5, No.6, pp.1354-1371 (1993).
- [86] 岩田一貴，林朗：クラスタリングにおけるクラスタ間の新しい非類似度について，電子情報通信学会技術研究報告. NC，ニューロコンピューティング，電子情報通信学会， Vol.105, No.658, pp.79-84 (2006).
- [87] Fischler, M. and Bolles, R. : Random Sample Consensus a Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Communications of the ACM*, ACM, Vol.24, No.6, pp.381-395 (1981).
- [88] Wilde D. : Computing Clothoid Segments for Trajectory Generation, *Intelligent Robots and Systems*, IEEE, pp.2440-2445 (2009).



# 謝辞

## 謝辞

本論文を取りまとめるにあたり，関西大学の教員の皆様および田中研究室の学生諸氏より，御多忙の中，終始一貫して，暖かく懇切丁寧な御指導御鞭撻，またすばらしく充実した研究環境を賜りました．中でも，研究全般に渡り，明確な方向付けまでして頂きました関西大学総合情報学部総合情報学科 田中成典教授に心より感謝の意を表しますと共に厚く御礼申し上げます．

本論文の研究を遂行するにあたり，関西大学総合情報学部総合情報学科 伊藤俊秀教授，及び辻光宏教授には，終始多大なご協力と御支援を賜りました．深く感謝する次第であります．

また，田中研究室であり，2016 年度時点において，関西大学環境都市工学部の准教授の窪田諭様，大阪経済大学情報社会学部の准教授の中村健二様，東京都市大学工学部の准教授の今井龍一様，関西大学先端科学技術推進機構の特命助教の山本雄平様，寺口敏生様と岩手県立大学ソフトウェア情報学部の塚田義典様には，終始一貫した研究への御理解ならびに貴重な御助言を賜りました．深く感謝する次第であります．

第 3 章の研究を遂行するにあたり，田中研究室であり，2016 年度時点において，阪南大学経営情報学部教授の北川悦司様，仁愛大学コミュニケーション学科の講師の安彦智史様，国土技術政策総合研究所社会資本マネジメント研究センター社会資本情報基盤研究室の川野浩平様にご協力賜りました．深く感謝する次第であります．

第 4 章の研究を遂行するにあたり，(株)アスコ大東空間情報部の大月庄治様，田中恭介様，土屋剛様，岩井拓也様，道路部の平松健士様および田中研究室であり，2016 年度時点において，日本電気(株)スマートネットワーク事業部の苗柄踏様にご協力賜りました．深く感謝する次第であります．

---

また、第3章から第5章の研究を遂行するにあたり、阪神高速（株）と（株）アスコ大東に、本研究の実証実験で利用した2次元図面とMMS点群データを提供して頂きました。深く感謝する次第であります。

最後に、勉学への意欲に対して深い理解と協力を頂いた父（姜新华）、母（华浩珍）、と姉（姜俪俊）に感謝し末永く健康であることを切に願っております。