

自動運転時代に向けた高精度衛星測位技術による道路地図情報の拡充と高度利用に関する研究

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学 公開日: 2024-06-17 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 外谷, 新 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/0002000653

博士論文

自動運転時代に向けた高精度衛星測位技術による
道路地図情報の拡充と高度利用に関する研究

2023年12月

静岡大学
大学院自然科学系教育部
情報科学専攻

外谷 新

目次

【第1章】序論	1
【1-1】研究の背景	1
【1-2】本論文の構成	2
【第2章】研究の概要	4
【2-1】研究の領域	4
【2-2】研究の対象	5
【2-3】研究の目的	6
【2-4】研究の手順	7
【2-5】関連研究	9
【第3章】基本方針と検証方法	18
【3-1】基本方針	18
【3-2】測位精度の概念	18
【3-3】作業規程の準則	20
【3-4】プローブデータのバイアス	21
【3-5】比較検証の基本的な考え方	23
【第4章】公共測量及び高精度三次元地図とネットワーク道路地図	24
【4-1】公共測量	24
【4-2】電子基準点	24
【4-3】MMSによるデータ整備	25
【4-4-1】高精度三次元地図	28
【4-4-2】ネットワーク道路地図	31
【4-4-3】高精度プローブデータ	32
【4-4-4】地形図	33
【第5章】衛星測位システム	35
【5-1】衛星測位の概要	35
【5-2】位置情報取得の原理	35
【5-3】衛星測位の種類	36
【5-4】衛星測位の精度	36
【5-5】ディファレンシャル測位	38
【5-6】キネマティック測位	39
【第6章】研究環境	41
【6-1】衛星測位システム	41
【6-2】解析に用いたパーソナルコンピュータ	44
【6-3】利用したソフトウェア	44
【第7章】研究の具体的手順	46
【7-1】車線リンクを利用したプローブデータの精度検証	46
【7-2】プローブデータを利用した車道リンクの検証	47
【第8章】高精度三次元地図を利用したプローブデータの精度検証	48
【8-1】ダイナミックマップの概要	48
【8-2】研究対象区間とプローブデータの収集	49
【8-3】データクレンジングによる研究対象区間の選別	50
【8-4】地理情報システムの処理手順と車線リンクとプローブデータの較差の結果	53
【8-5】車線リンクの検証	59
【8-6】交差点における精度	62
【8-7】想定される一般道路でのバイアス	64

【8-8】 高精度三次元地図に求められる精度.....	65
【第9章】 プローブデータを利用したネットワーク道路地図の検証.....	67
【9-1】 一般財団法人日本デジタル道路地図協会（DRM 協会）	67
【9-2】 DRM-DB の利用.....	68
【9-3】 国際的な活動	68
【9-4】 ネットワーク道路地図	68
【9-5】 広範囲データの収集	70
【9-6】 取得結果	77
【9-7】 供用開始直後の道路区間での収集	78
【9-8】 対象路線	79
【9-9】 検証手法	82
【9-10】 地理情報システムによる処理手順と結果.....	82
【9-11】 緩衝領域生成による車道リンクの検証.....	87
【9-12】 地理情報システムによる処理手順と結果.....	88
【9-13】 車道リンクの検証	90
【9-14】 想定される大量プローブデータ取得時のバイアス.....	92
【9-15】 想定される都市計画道路でのバイアス.....	93
【第10章】 結論	94
【10-1】 とりまとめ	94
【10-2】 考察	95
謝辞	97
【参照文献等】	98
【付録】 道路台帳	105
【付-1】 道路台帳の現状と研究概要	105
【付-2】 MMS で取得したデータを利用した道路台帳の整備	106
【付-3】 各道路地図情報の比較	108
【付-3-1】 現道路台帳現況平面図と新道路台帳現況平面図.....	108
【付-3-2】 新道路台帳現況平面図と高精度三次元地図.....	112
【付-3-3】 まとめ	114

図の目次

図 1	入力ソースと地理情報システム機能等のイメージ	4
図 2	車道リンク、車線リンク、プローブデータのイメージ	6
図 3	測定における精密性と正確性の概念	19
図 4	想定するプローブデータのバイアス	21
図 5	地図情報の精度とプローブデータのバイアスの関係	22
図 6	従来手法と本研究の地図情報検証方法の比較	23
図 7	電子基準点配転図（令和4年4月1日時点）と電子基準点内部の機器構成	25
図 8	MMS 計測時におけるコース間の統合と調整点	26
図 9	自動運転支援のための高精度三次元地図作成手順	27
図 10	高精度三次元地図（二次元表示）	28
図 11	高精度三次元地図（三次元表示）	28
図 12	高精度三次元地図（三次元表示遠景）	29
図 13	ネットワーク道路地図（車道リンクと車道ノードのみ表示）	31
図 14	高精度プローブデータ	32
図 15	地形図	33
図 16	測位衛星と受信機の位置関係	35
図 17	衛星測位の種類	36
図 18	仰角による電離層遅延量の差	37
図 19	ディファレンシャル測位のイメージ	38
図 20	キネマティック測位のイメージ	39
図 21	搬送波のイメージ	39
図 22	搬送波位相値を用いる測位	40
図 23	基準局の設置状況	41
図 24	計測に利用したロガーシステム構成	42
図 25	システム全体構成	43
図 26	RTKLIB 画面表示例	44
図 27	地理情報システム ArcGIS Pro3.1.2 の画面表示例	45
図 28	地図情報レベル 500 と計測機器のバイアス	46
図 29	地図情報レベル 2500 と計測機器のバイアス	47
図 30	ダイナミックマップの概念	48
図 31	研究対象区間全体におけるプローブデータと車線リンクの表示	49
図 32	プローブデータと車線リンクの表示	50
図 33	交差点内部でプローブデータが誤った車線リンクにマッチングする例	51
図 34	交差点内部を運転操作により車線リンクから逸脱する例	52
図 35	交差点車線リンクと車線リンクの表示例	53
図 36	プローブデータと車線リンクの較差毎プローブデータのポイント数（西→東）	54
図 37	プローブデータと車線リンクの較差毎プローブデータのポイント数（東→西）	54
図 38	道路幅員 4m 未満の区間（一条線化）	55
図 39	道路幅員 4m 未満区間における較差毎プローブデータのポイント数（西→東）	56
図 40	道路幅員 4m 未満区間における較差毎プローブデータのポイント数（東→西）	56
図 41	道路上の障害物を回避する例	57
図 42	較差 0.5m 以上を削除した較差毎プローブデータのポイント数（西→東）	58
図 43	較差 0.5m 以上を削除した較差毎プローブデータのポイント数（東→西）	58
図 44	交差点の位置図と各交差点の拡大状況	63
図 45	地図情報レベルとプローブデータのバイアス	64

図 46	道路におけるバイアスのイメージ	64
図 47	道路幅員狭隘区間における車両緩衝区間のイメージ	65
図 48	デジタル道路地図 (DRM-DB) の構成	67
図 49	プローブデータ作成工程とデータの流れ	69
図 50	地図情報レベル 2500 を想定したバイアス	70
図 51	GNSS アンテナ設置状況	71
図 52	1号車日単位取得エポック数	72
図 53	2号車日単位取得エポック数	73
図 54	3号車日単位取得エポック数	73
図 55	4号車日単位取得エポック数	74
図 56	GNSS アンテナの設置位置と測位衛星の位置	75
図 57	収集した高精度プローブデータ	75
図 58	高精度プローブデータと DRM-DB 表示例 (全データ)	76
図 59	高精度プローブデータと DRM-DB 表示例 (Fix 解のみ)	76
図 60	研究対象路線	79
図 61	データ取得区間におけるプローブデータ	80
図 62	Float 解の発生場所	81
図 63	検証方法	82
図 64	検証用データ生成イメージ	83
図 65	プローブデータと道路ネットワーク地図の較差毎ポイント数 (東→西)	84
図 66	プローブデータと道路ネットワーク地図の較差毎ポイント数 (西→東)	84
図 67	遠州鉄道高架下交差点付近のプローブデータと車道リンクの較差が大きい区間	85
図 68	信号待ちによるポイント数の拡大	85
図 69	遠州鉄道高架下付近交差点の航空写真	86
図 70	車道リンクから生成したバッファを利用して検証する場合のイメージ	87
図 71	プローブデータが車道リンクに近づく場合	88
図 72	車道リンクがプローブデータに近づく場合	88
図 73	車道リンクの誤差検出箇所	89
図 74	A 地点より C 地点を望む	89
図 75	大量のプローブデータ取得時のバイアス	92
図 76	供用開始直後の都市計画道路におけるプローブデータ取得時のバイアス	93
図 77	本研究で利用した道路地図情報	106
図 78	数値図化のイメージ	107
図 79	点群オルソによる補備測量	107
図 80	JA 和地交差点付近の道路台帳現況平面図	109
図 81	南庄内小学校交差点付近の道路台帳現況平面図	110
図 82	庄内中学校交差点付近の道路台帳現況平面図	111
図 83	新道路台帳現況平面図と高精度三次元地図の較差	112
図 84	高精度三次元地図と新道路台帳現況平面図の比較	113
図 85	高精度三次元地図 (車道境界線) と新道路台帳現況平面図の重ね合わせ	113

表の目次

表 1	関連研究の整理	14
表 2	地図情報レベルと水平位置の標準偏差及び本研究で利用する空間情報	20
表 3	高精度三次元地図のデータ量	30
表 4	ネットワーク道路地図のデータ量	31
表 5	高精度プローブデータのデータ量	32
表 6	地形図のデータ量	34

表 7 基準局詳細	41
表 8 研究に利用したパーソナルコンピュータの仕様.....	44
表 9 道路構造等により分類した較差等の集計.....	60
表 10 各車両（各ロガー）の稼働日数と Fix 率.....	74
表 11 プローブデータの集計	91

【第1章】序論

【1-1】研究の背景

100年に一度のモビリティ改革といわれ、自動車のEV化や自動運転などの技術開発が急速に進んでいる。モビリティの改革という視点では、MaaS(Mobility as a Service)が世界中で展開され始めている。MaaSの起源はヘルシンキにあるAalto UniversityのSonja Heikkilä氏の修士論文と言われている[1]。MaaSとは、スマートフォン等のアプリを利用して、タクシーを含む電車、バス等公共交通機関及びレンタカーやレンタサイクル等のサービス、これらの乗り換え情報の検索、予約、支払い、決済等を一元的に提供するものである。さらに、CASE(Connected, Autonomous, Shared, Electric)という言葉も今後のモビリティを想定するうえで重要なキーワードである。自動車等が情報通信により接続され、自動運転技術が進み、ガソリン車からEV車にシフトし、さらに、個人所有の自動車から共有するという概念に移行する可能性を示唆したものである。MaaSでは様々な交通機関の接続性を地図上に展開して最短経路を検索する機能が重要であり、自動運転を支援するためには高精度な地図が必要になる。

現在市販されているナビゲーションシステムは道路の接続性を重視してデータ整備されており、目的地までの最短経路を検索することは可能であるが、車両の走行する位置を明確に指定したデータとなっていない。国内において自動運転を支援するための高精度三次元地図はダイナミックマッププラットフォーム株式会社が全国の高速度道路及び自動車専用道路の区間を提供している。ダイナミックマッププラットフォーム株式会社は国内のトヨタ自動車株式会社、日産自動車株式会社、スズキ株式会社等国内におけるほぼ全ての自動車会社が出資して設立された会社である。

自動運転を実現させるためには車両の位置を推定するための技術も重要となる。自己位置を推定するための1つには測位衛星を利用した方法があり、アメリカのGPS(Global Positioning System)、ロシアのGLONASS(Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema)、欧州のGalileoを総称して、GNSS(Global Navigation Satellite System)という。各GNSSは使用する衛星の数、軌道、精度などに違いがある。しかし、これらのシステムは相互に運用が可能であり、GNSS受信機は複数のシステムの信号を利用し、組み合わせることでより高い精度で位置を推定することができる。

自動運転の普及は一層進むことが予想される。自動運転を支える技術分野として衛星測位や地理情報等を含む空間情報技術は益々重要なものとなる。

【1-2】本論文の構成

「第1章 序論」では本研究における社会的な背景や技術動向を述べている。

「第2章 研究の概要」では研究対象や研究の目的、手順を述べている。本研究にて重要となる地理情報システムや衛星測位技術に関する空間情報技術の全体像、研究対象となる高精度三次元地図の車線リンクやネットワーク道路地図の車道リンクについて説明している。関連研究については高精度三次元地図やネットワーク道路地図、SLAM、衛星画像等を利用した道路抽出等広範囲に調査し、整理している。

「第3章 基本方針と検証方法」では測位精度の概念を説明し、車線リンクや車道リンクとプローブデータを比較することにより、公共測量における作業規程の準則に照らして、位置精度から検証する方法について述べている。本研究で利用しているキネマティック測位は高精度の測位を実現している。プローブデータには衛星測位の誤差と運転操作によるバイアスが含まれるため、このバイアスと地図情報レベルについての考え方をまとめている。

「第4章 公共測量及び高精度三次元地図とネットワーク道路地図」では公共測量や電子基準点について説明している。本研究で利用した高精度三次元地図は公共測量として整備され、作成手順等について述べている。研究で利用する各種地図情報の概要やデータ項目、データ量についても取りまとめている。

「第5章 衛星測位システム」では衛星測位システムの概要や位置情報取得の原理、衛星測位の種類、測位衛星の精度等について説明している。本研究ではキネマティック測位を利用している。搬送波位相や整数アンビギュイティ等について述べ、高精度の測位の概念について説明している。

「第6章 研究環境」では研究に利用した衛星測位システムの基準局の仕様、測位衛星から信号を受信するロガーシステム等のシステム構成を説明している。衛星測位から受信した信号の解析に利用したソフトウェアやプローブデータを解析するために利用した地理情報システム、パーソナルコンピュータの仕様についても述べている。

「第7章 研究の具体的手順」では高精度三次元地図の地物である車線リンクを利用したプローブデータの精度検証、プローブデータを利用したネットワーク道路地図の車道リンクの精度検証における実施手順について説明している。利用する地図情報について位置精度の尺度である地図情報レベルとプローブデータのバイアスを関連付けて述べている。

「第8章 高精度三次元地図を利用したプローブデータの精度検証」では高精度三次元地図の車線リンクとプローブデータの較差について、地理情報システムを利用し、分析している。道路構造や道路環境による分類にて較差を取りまとめることにより、プローブデータの地図情報レベルを想定することができた。

「第9章 プローブデータを利用したネットワーク道路地図の検証」ではネットワーク道路地図の車道リンクとプローブデータの較差検証のために、大量のプローブデータを取

得した。また、供用開始直後の都市計画道路において、車道リンクとプローブデータの較差について地理情報システムを利用し、分析している。車道リンクは公表値以上の地図情報レベルとなった。

「第 10 章 結論」では研究を総括した。また、考察において、衛星測位システムを利用することによるマルチパスによる位置精度の低下等の課題や高分解能の光学人工衛星画像を利用することによる道路抽出等について言及し、今後の展望等について述べている。

【第2章】研究の概要

【2-1】研究の領域

空間情報技術は、空間上の様々なデータの収集、管理、分析、表示を行うものである。様々な空間情報を取り扱うツールとして地理情報システム（Geographic Information System）がある。地理情報システムは、様々なデータレイヤーを重ね合わせることで、複数の入力ソースからのデータを分析し、複雑な問題解決や意思決定を行うことができる。地理情報システムは多岐にわたる分野で活用されている。例えば、都市計画分野では土地利用、交通網、河川及び道路等に関するインフラ配置計画、環境管理では自然資源の保護、災害リスクの評価等である。

また、入力ソースは地表の広範囲をカバーすることが可能となる衛星画像や航空写真、標高・山脈・河川・海洋等の自然的特徴および道路・建物等の人工的特徴を示すために作成された地形図、水質・大気等の状況等をリアルタイムに収集するセンサーデータ等がある。測位衛星を利用して地球上の位置を示すデータもセンサーデータとして捉えることができる。

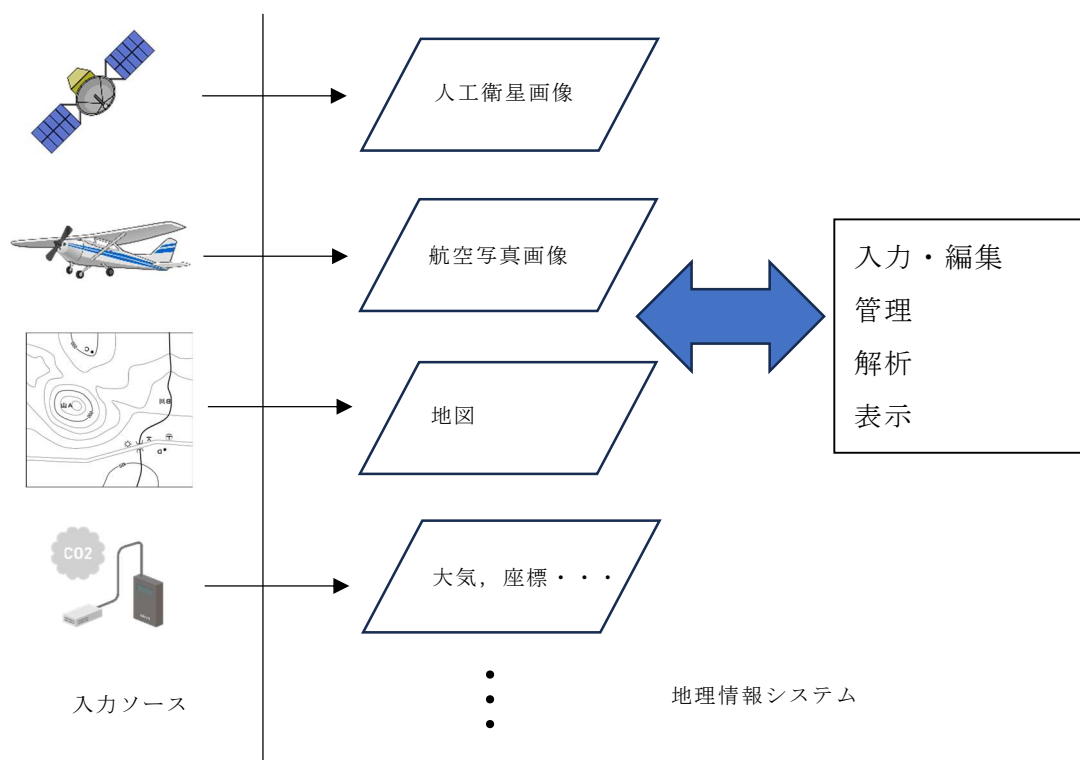


図 1 入力ソースと地理情報システム機能等のイメージ

本研究では入力ソースとして、衛星測位技術を利用して取得した車両軌跡の位置情報を示すプローブデータ、道路の接続性を考慮して作成された道路ネットワーク地図、自動運転支援のための高精度三次元地図を利用している。この入力ソースから特定の地物に着目し、地理情報システムを利用して分析を行っている。

【2-2】研究の対象

自動運転技術は様々なセンサーを活用している。LiDAR (Light Detection and Ranging) は光を使って物体や地面の距離を計測している。また、車両に搭載されたカメラや超音波センサー、位置情報を提供する GNSS も重要な役割を果たしている。これらのセンサーから得られるデータをもとに、SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) 技術が使用され、自動運転車は正確な位置を知り、周囲の環境地図を作成し、自動運転車は判断し、適切に操作される。

SLAM による車両周辺の環境地図は主として実在する地物を対象としている。高精度三次元地図を構成する情報には実在地物の他に仮想地物も含まれている。車線の中心に位置し走行経路を示す車線リンク及び車道の接続性を示す車道リンクは仮想地物であり、SLAM 技術により瞬時に判断することは困難であると考えられる。技術の進展により仮想地物の認識が実現できても、道路上に区画線等が存在していない場合や舗装の摩耗、天候等環境に左右される可能性がある。このことから、車両の走行ラインを示す車線リンクと道路の接続性を示す車道リンクは予め自動運転車に搭載される可能性が高いと考えられる。自動運転を支援する地図情報の項目は様々なものが考えられるが、最低限の情報として車両の走行位置を示す車線リンクがあれば SLAM により周辺環境を判断しながら走行できる可能性がある。

また、市販されているナビゲーションシステムの道路ネットワークを示す地図データは車道リンクに近い情報である。ナビゲーションシステムは現在位置の把握と目的地までの経路指示、商業や観光等の情報提供を目的としていて、車線上の走行位置を示す情報ではない。高精度三次元地図は車両を運行するうえで、高い位置精度が求められるが、ナビゲーションシステムの地図データは高精度三次元地図と比較して位置精度は低い。但し、自動運転を支援するための道路地図情報としては車道リンクも重要な構成要素となり、車線リンクと同様に仮想地物であることから、本研究の対象とした。

図 2 はプローブデータと車道リンク及び車線リンクのイメージを示したものである。

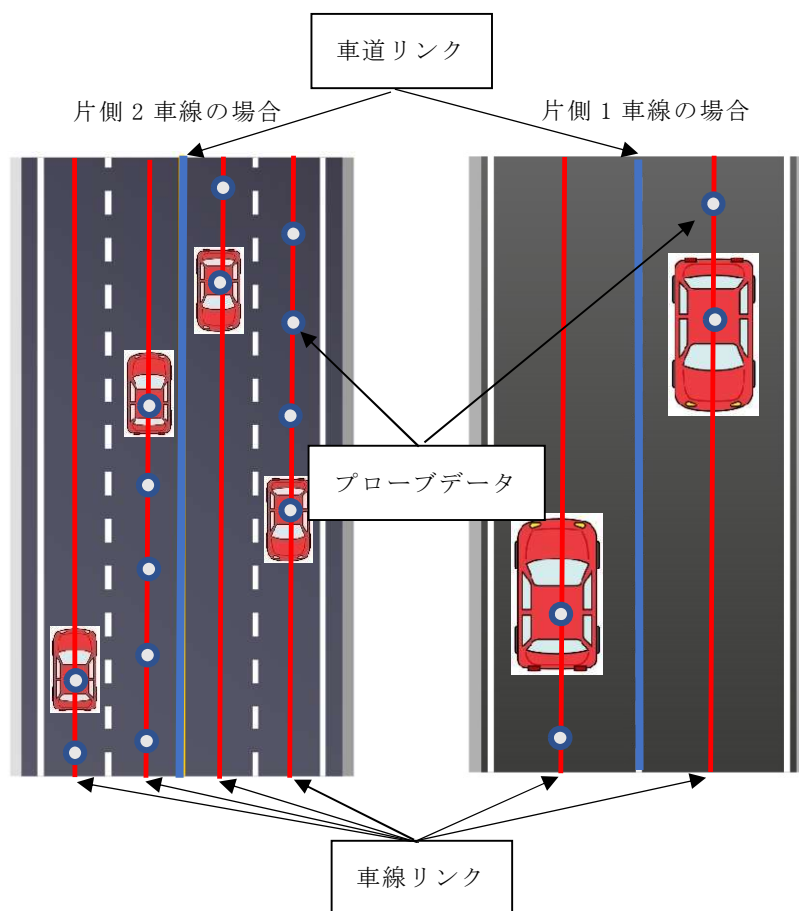


図 2 車道リンク，車線リンク，プローブデータのイメージ

【2-3】研究の目的

地図情報の整備後に，地形や社会の変化に応じて地図情報を修正し，維持管理することは重要である．高精度三次元地図と市販のナビゲーションシステムの定期的な更新には，適切な入力ソースを選択して更新し，管理することが必要となる．

自動運転の利用場面では，車線リンクは車線における車両位置の認識，車道リンクは，目的地までの経路指示を目的としている．地図情報を利用するには目的に応じた精度を有する地図を選択することが重要である．そして，その地図を作成するためには要求する位置精度が担保される作成手法及び入力ソースを選択する必要がある．

そこで，本研究では車線リンクや車道リンクの位置精度を確認し，整備及び維持するための効率的な手法について，空間情報技術を利用して研究するものである．

【2-4】研究の手順

高精度三次元地図は浜松市が自動運転の実証実験を実施している 10 km 区間において整備したデータを利用した。このデータは実証実験を実施している区間のみの貸し出しとなっていた。2024 年 1 月現在インターネットで確認できる高精度三次元地図を提供している機関は浜松市のみであり、申請により受け付けている[2]。

データフォーマットが公開されている市販のナビゲーションシステムの地図データを入手することは困難であり、類似するものとして、一般財団法人日本デジタル道路地図協会（DRM 協会）が全国シームレスに提供しているデジタル道路地図（DRM-DB）を利用した。DRM-DB は市町村単位で貸与しており、浜松市全域を借用した。DRM-DB は市販されているナビゲーションの元となるデータであり、高速道路会社、道路関係公社、都道府県、市町村等の道路管理者から提供される資料により毎年データの更新を行っている[3]。

本研究の対象となる車線リンクは浜松市から借用した高精度三次元地図を利用し、車道リンクについては、DRM-DB を利用した。

車線リンク及び車道リンクを整備及び編集するためには既存の地図や航空写真を利用することが一般的である。高精度三次元地図については MMS（Mobile Mapping System）により整備されるのが一般的である。MMS についても盛んに研究開発が進められている[4][5]。

高精度三次元地図の一部である車線リンクは高精度に取得されたもので、同等の精度を持つ地図は行政等が上下水道や道路施設を管理する目的で整備した図面に該当する。車線リンクを作成及び維持管理する目的であれば、これらの施設管理に利用している図面を利用する選択肢もあるが、紙による提供やデータ化されていても画像情報としての提供等行政により提供方法が異なっており、自動運転時代を想定している本研究の選択としては適切でない。

また、現地にて一般的な地上測量である光波測距儀により計測する方法もあるが、測量機器を操作するためには専門的な技術が必要であり、歩道を含む道路上で計測するには行政への申請も必要となる。また、一般車両が通行する中での計測行為は危険が伴うため、本研究で選択するには困難である。

そこで、交通環境に捕らわれず、車線リンクに近似したデータを収集できる可能性があるプローブデータを利用することが現実的であると考えた。一般的にプローブデータは測位衛星からの信号により地上の移動体に設置した受信機の位置を特定する仕組みであり、採用する測位手法や機器により、得られる位置精度は異なっている。衛星測位手法の一つであるキネマティック（Kinematic）測位は cm 級の位置精度が得られる[6]。

整備する地図情報は利用目的により位置精度が異なり、一般的に位置精度の目安として縮尺で表現されることが多い。大縮尺と言われる縮尺 1/500 は位置精度が高く、地物の表現が細かい。小縮尺と言われる縮尺 1/25000 は位置精度が低く、地物の表現は省略さ

れて表現されている。本研究では位置精度を指標として取り扱っていることから、目的に応じた地図の縮尺と位置精度について体系的に取りまとめられた国土交通省の作業規程の準則[7]を参照することにした。この準則を参照して、車線リンク及び車道リンク、プローブデータの位置精度を整理する。

本研究ではキネマティック測位を実現するためのシステムを学内に構築した。

借用した地図情報レベル500の高精度三次元地図を構成する地物を分析し、仮想地物である車線リンクの構造等を理解する。車線リンクを真の値として、車線リンクとプローブデータの較差を検証することにより、プローブデータの位置精度を把握する。

借用した地図情報レベル25000（都市計画区域内は2500）のDRM-DBを構成する地物について分析し、仮想地物である車道リンクの構造を理解する。プローブデータを真の値として、プローブデータと車道リンクの較差を検証することにより、車道リンクの位置精度を把握する。大量のプローブデータを入手するためには、他者への協力が必要であると考え、地元の自動車学校に依頼し、送迎車に測位衛星の電波を受信する仕組みであるロガーシステムを装着し、プローブデータを収集した。都市計画区域内においては、供用開始直後の道路区間を筆者の自家用車を利用してプローブデータを収集した。

これらの道路地図情報、プローブデータを地理情報システムに投入し、解析を実施する。解析には地理情報システムであるArcGIS Pro 3.1.2を利用した。

これらの手順により分析することにより、キネマティック測位により取得したプローブデータと車線リンクや車道リンクと位置的な較差を分析し、較差が少なければ、プローブデータは車線リンクや車道リンクの維持管理に利用可能なデータとなる。

なお、本稿では複数の道路地図情報を取り扱うため、断りのない限り、車線リンクは高精度三次元地図の地物を指し、車道リンクはDRM-DBの地物を指す。

また、DRM-DBは商品名であることから、以降は断りのない限り、ネットワーク道路地図と表現する。

【2-5】関連研究

ネットワーク道路地図に関する先行研究では、久保田ら[8]がプローブデータを用いてネットワーク道路地図の位置ずれの自動補正の開発を実施している。この研究では株式会社ナビタイムジャパンのスマートフォンなどの携帯端末向けカーナビアプリ起動時に取得されたプローブデータを利用して、交差点内部の車道ノードの精度向上について研究している。研究結果の最終的な誤差は RMSE で 3m 程度となっていた。プローブデータを利用してネットワーク道路地図の位置精度向上に着目したものはあるが、利用しているプローブデータがスマートフォンを利用しているため衛星信号受信機として数 m の誤差を容認したものとなっている。本研究がネットワーク道路地図の位置精度検証や精度向上を含んでいることから目的が類似している。しかし、本研究では cm 級の計測が可能となるキネマティック測位を利用していることが先行研究とは異なっている。

また、金杉ら[9]はオープンストリートマップ(OSM)における道路データの品質推定手法において、ネットワーク道路地図との比較により日本全国を対象として研究している。1 km メッシュ単位に実施して、ネットワーク道路地図と OSM の交差率と網羅率を算出している。研究結果では OSM の交差率が 0.8 以上のメッシュの割合が約 84.1% となり、概ね同程度の位置に整備されていると評価している。また、網羅率については 35.4% のメッシュにて OSM がネットワーク道路地図よりも道路延長が短いことが示された。また、地方部においてはネットワーク道路地図の取得規準以下である 3m 未満の道路を OSM では取得しているケースがあり網羅率が高い傾向があったと報告している。OSM の精度検証にネットワーク道路地図を利用した事例ではあるが、ネットワーク道路地図より精度の低い地図情報を対象としており本研究と異なっている。しかし、全国を対象とした精度検証や網羅率の研究手法については本研究が限定的な区間を対象としていることから、研究範囲を広げた場合に参考となる。

渡辺ら[10]はプローブデータの分析に適したデジタル道路地図を生成するためにネットワーク道路地図を利用している。ネットワーク道路地図の他に地理院地図、航空写真などを参照して、メッシュデータを生成し、ネットワーク道路地図の車道リンク情報周辺のデータを関連づけている。プローブデータは独自に自動車や自転車スマートフォンを利用して GPS や重加速度センサーのデータを収集している。また、交差点を俯瞰するビルにビデオカメラを設置し、移動軌跡を取得することによりプローブデータを生成させている。この研究ではネットワーク道路地図を参照しているが、メッシュ化した情報に目視にて歩道などの情報を修正追加するなど限定的に利用している。生成したデジタル道路地図はメッシュ状のデータであり、研究目的は交通分析であることから本研究とは異なっている。

Greenfeld[11]は GPS 計測値とデジタル道路地図のマップマッチングについて研究を行っている。主として、マップマッチングに関するアルゴリズムを紹介している。報告が 2002 年となっているが、GPS により取得した信号で自己位置を推定し、車道リンクにマ

ッチングしている。本研究の処理過程で参考となる文献である。

森[12]の研究ではプローブカーデータの分析による燃費予測モデルの構築の際にネットワーク道路地図の属性である勾配のデータを利用している。萩田ら[13]はネットワーク道路地図を利用して交通事故の分析をしている。ネットワーク道路地図を利用した研究は交通に関連するものが多い。

高精度三次元地図に関する先行事例は多数ある。本研究に関連する分野としては、今井ら[14]がダイナミックマップを用いた道路地物の三次元空間の領域生成に関する研究がある。ダイナミックマップは静的情報と動的情報を含み、高精度三次元地図は静的情報に位置づけられる。研究の名称ではダイナミックマップとなっているが、本稿ではダイナミックマップを高精度三次元地図と読み替える。高精度三次元地図で取得した項目である道路区画線や交差点領域、道路標示、道路標識等のデータを鉛直方向に押し出すことにより三次元空間の領域を生成させる。この時、地図情報レベル 500 の許容誤差である 0.25m を考慮してバッファを設ける。その領域に MMS により取得した点群情報を重畳させ、点群情報に取得した項目の属性情報を付加する。次に手動にて同じ点群情報に取得した項目の属性情報を付加して比較することにより有用性を検討したものである。重畳させて属性を付加した点群情報と手動にて属性を付加した点群情報を比較して検証した結果、一致率は 0.968 となった。本研究でも地図情報レベルによる許容誤差を考慮している意味で一部類似性がある。

Bao ら[15]は自動運転に向けた高精度地図作成に関する研究において、高精度地図の作成方法及び地物について広く調査し、現状を取りまとめている。本研究では高精度三次元地図と表現しているが、文献には三次元の表記がないものもある。本稿では断りのない限り、高精度地図と高精度三次元地図は同じものとみなす。照会されている内容は道路標示や道路境界等の実在地物を対象としている。本研究と関連する分野では道路網の抽出について航空写真、衛星画像を利用する事例が紹介されている。航空写真を利用した抽出結果を既存の道路網データである SpaceNet や DeepGlobe との比較を行い抽出し、精度は高いもので 83.79%となっていた。また、車線リンクに関する情報として Lanelet2, OpenDRIVE, Apollo Maps のデータ構造の紹介をしている。また、この研究では画像の抽出結果と既存データの比較を行っており、本研究の位置精度に関する研究とは異なっている。抽出結果は高いもので 83.79%となっており、道路網を抽出する手段としては航空写真や衛星画像の利用は有効である。

Elghazaly ら[16]は高精度地図及び測量における課題と今後の展望について、レビュー論文として報告している。高精度地図を提供している企業や作成手法、MMS 機器の仕様等について広く紹介している。本研究に関連する内容では自動運転を支援するためには車線リンクの詳細なデータが必要であることや維持管理が重要と指摘している。今後の課題として、標準化、スケーラビリティ、通信網等のインフラストラクチャー、地図の著作権、

プライバシー等をあげている．本研究が自動運転時代を想定していることから参考となる内容である．

Tsushima ら[17]は自動運転用高精度三次元地図の作成手法について紹介をしている．MMS の機器仕様や図化手法について事例を交えて報告している．品質保証は，ISO 19157 に従って行われ，絶対位置精度の許容品質限界は RMSE 0.25m となっている．本研究にて，自動運转向け高精度三次元地図の位置精度も水平位置の標準偏差が 0.25m となっているため，ISO 基準からも自動運转向けの位置精度は地図情報レベル 500 と推察できる．

今井ら[18]は高精度三次元地図と道路基盤地図情報の相互変換手法に関する研究を行っている．国土交通省，ダイナミックマッププラットフォーム株式会社よりデータ仕様書を手に入れ，直接変換できるものと加工すると変換できる地物に分類している．この分類に基づき，高精度三次元地図と道路基盤地図情報が双方から変換もしくは加工して変換した地図を Googlemap の航空写真と比較することにより，目視にて有用性を確認している．また，同一区間において双方のデータを手に入れできなかったため，MMS で取得した情報をもとに独自でデータを整備して，高精度三次元地図を整備している．整備した箇所は高速道路における直線部分や出入口部分の限定した箇所である．この区間において同様の手法により相互に変換し，地理情報システムを利用して重畳することにより，任意の 4 点における較差は 0.162m~0.169m となった．地図情報レベル 500 の許容水平誤差が 0.25m としていることから有効であると報告している．本研究でも評価した点数は異なるが，検証結果の指標として地図情報レベルの許容誤差を利用していることから一部類似性がある．

また，井川ら[19]は高精度三次元地図データ及び点群情報の検索効率化手法を研究している．名古屋大学にて開発した自動運転の実験システムである Autoware を利用することを前提とした研究である．自己位置推定に必要な点群の領域をレーン全周囲型とレーン左右重視型に分け，高精度三次元地図の地物の項目を参照して点群情報の ID を追加している．PostgreSQL 利用して関連テーブルの構成を 1:1 型，1:n 型，カラム追加型に分けてデータサイズや検索時間を検証したものである．研究結果はデータサイズ及び検索時間においてレーン左右重視型，関連テーブルはカラム追加型が優位となった．この研究の目的は自己位置推定時の点群情報を高速に取得するために高精度三次元地図の一部である車線レーンと道路領域を利用したものである．

SLAM に関する研究は多数ある．Roh ら[20]は 1 km 四方の区間において点群情報と三次元地図を利用したデータから SLAM で補正された車両姿勢と車線位置を修正する仕組みを研究している．赤井ら[21]も LiDAR から取得する三次元点群を利用し Inertial Navigation System と併用することにより自己位置推定の改善を試みている．藤間ら[22]もカメラ情報や車両挙動情報から車道リンクと GNSS を利用して車両位置を補正する手法について研究している．本研究では車両近傍の地図ではなく，広域の地図を対象としているので視点は異なるが，本研究において参考となる事例である．

道路地物を検出する研究も行われている。梅原ら[23]は三次元点群から道路地物の識別について研究を実施している。糸氏ら[24]は三次元点群から道路上のポットホールの検出について、本間[25]は路面舗装の傷み具合の抽出、竹内ら[26]は山道を対象とした路側認識による高精度地図整備等の研究を実施している。また、松尾ら[27]は個別の車両から収集した三次元点群を合成して、歩行者や車両などの動的物体検知について研究している。盛田ら[28]は高精度三次元地図を防災や社会インフラの管理に適用するための方向性について提言している。本研究は、車線リンクや車道リンクの仮想地物を対象としており、道路上地物の検知や動的情報の検知等実在地物を対象としているので、研究対象となる地物は異なるが、参考となる事例である。

自動運転を想定した場合のサーバー負荷についての研究も実施されている。斎藤ら[29]は車両密度を考慮したエッジサーバーの利用により負荷分散を検討している。細野ら[30]は車両 1,600 台までは処理遅延なくクラウドで処理できるが、エッジサーバーでは 3,200 台まで処理できるとしている。杉坂ら[31]は車両からの送信回数や移動距離により通信トラフィックの分析をしている。赤間ら[32]はダイナミックマップにおける準動的情報である事故発生箇所のデータクレンジングに関する提案を実施している。いずれの研究も自動運転車が取得する各種センサーからのデータ量が膨大になることを想定して、システム構成を検討している。Tihanyi[33]らは自動運転車両やインフラからのデータを統合することによって、交通環境のリアルタイムデジタルツインを作成する画期的な協調認識システムを紹介している。本研究が対象とした車線リンク及び車道リンクは画像や点群情報と比較してデータ量が少ないことからハードウェア及び通信上の負荷は少ないと考えられる。

衛星画像や航空写真から地物を抽出する研究もある。新村ら[34]は 0.5m 分解能の GeoEye-1 衛星画像を利用して車両のエッジを抽出している。上瀧ら[35]は航空写真を利用して道路の抽出を実施しており、0.5m 解像度(1,000×1,000 ピクセル)において、8割程度の道路を抽出し、位置精度は RMS で 0.8m 程度としている。大野ら[36]は空中写真を用いた地物抽出性能評価用データセットについて整理し、国内及び海外のデータセットを比較し、検証している。衛星画像や航空写真を利用した地物の把握は広範囲を対象とすることがメリットであり、本研究と相互に補完することが重要である。

車両の車線変更や挙動に関する研究も参考となる。岡田ら[37]は小型電気自動車を用いて、自動運転時代を想定した空間情報基盤を介して協調運転の研究を行っている。Zhou ら[38]は自動運転車両と人間による通常運転車両が混在する場合の車線変更について強化学習により運転効率、快適性、安全性について研究を行っている。市川ら[39]は車道リンクに紐づけられたウィンカーや減速等のプローブデータから交通状況の先読み情報を車線単位に展開する試みを行っている。横山ら[40]は交通状況を把握するためにスマートフォンで収集したセンサーデータを利用して車両の挙動分析を行っている。米陀ら

[41]は LiDAR, 車載カメラ, GNSS を利用し, 高速道路におけるレーンチェンジの経路計画のモデル化を研究している. 久松ら[42]は車線維持支援の実現のために車線中心に沿ったハンドル操作を行う研究において, 高精度三次元地図を利用している. 車両の挙動に関する研究では車線リンクが重要なデータとなることが想定できる.

OSM, Google Maps, Google Street View 等を利用した研究もある. Haklay[43]は OSM を包括的に解説し, 位置や属性の精度等の品質管理は行っていないとの報告をしている. 早川ら[44]も日本における OSM と海外の OSM を比較して, 日本の OSM コミュニティは急激に活性化しているものの, オブジェクトの粒度が粗いことを指摘している. 小川[45]は都市間高速道路における案内標識の表示地名に関する研究において, Google Maps, Google Street View を利用してデータを収集している. 羽倉ら[46]は交差点事故防止マップ生成のために, Google Street View 及び Open Street Map を利用してカーブミラーの位置情報を可視化している. 今井ら[47]はスマートフォンの GPS 基地局を元を取得されたモバイル空間統計を利用して交通データの分析をしている. 岩井ら[48]は GPS と LOG 機能付きカメラを活用して建物被害調査時に調査行動の軌跡と被害箇所をデジタル地図上に整理している. OSM, Google Maps, Google Street View 等は全国を網羅しており, 現地確認をするツールとして非常に有用なものであると考えられる.

表 1 関連研究の整理

① ネットワーク道路地図

筆者	プローブデータ	データ整備	解析	精度	備考
久保田ら[8]	○	○		3m 程度	誤差の改善は 0.08m 程度
金杉ら[9]		○		1 km	メッシュ単位で OSM とネットワーク道路地図の網羅率を検証
渡辺ら[10]		○			ネットワーク道路地図を利用した地図整備
Greenfeld[11]	○				マップマッチング手法の紹介
森[12]			○		ネットワーク道路地図を利用した燃費解析
萩田ら[13]			○		ネットワーク道路地図を利用した交通事故分析
本研究との比較：ネットワーク道路地図とプローブデータを利用して地図情報を作成及び編集する事例があり、スマートフォンのプローブデータを利用して、誤差が 3m となっていた。誤差の改善も 0.08m であり、m 単位の誤差となっている。本研究ではネットワーク道路地図の車道リンクとプローブデータの水平位置の標準偏差が 0.53m となっている。					

② 高精度三次元地図

筆者	データ整備	システム	抽出率	精度	備考
今井ら[14]	○		96.8%		実在地物の抽出率 ダイナミックマップは 地図情報レベル 500 の 記載あり
Bao ら[15]	○		83.79%		地物の抽出率
ELGHAZALY ら [16]	○			cm レベル	レビュー論文（高精度 三次元地図に関する部 分）
Tsushima ら [17]	○			0.25m	MMS 性能表示
今井ら[18]	○			0.162m～ 0.169m	高精度三次元地図と道 路基盤地図との変換に よる道路標示の較差
井川ら[19]	○	○			高精度三次元地図の利 用
本研究との比較：道路基盤地図を変換して、高精度三次元地図と較差を比較することにより、検証した事例は本研究と類似性はあるが、着目している地物が路肩や道路標示等の実在地物である。本研究は車線リンクや車道リンク等の仮想地物である。また、検証した 6 ポイントにおいて較差が 0.162m～0.169m として評価している。本研究では数百単位のポイントを利用して検証を実施している。地物の較差における評価は本研究と同様に作業規程の準則を参照している事例が多い。					

③ SLAM

筆者	ネットワーク道路地図	高精度三次元地図	点群情報	GNSS	備考
Roh ら[20]		○	○		自己位置推定
赤井ら[21]			○		自己位置推定
藤間ら[22]	○			○	自己位置推定
本研究との比較：SLAM 等に関連する研究では、各種センサー及び高精度三次元地図を利用して自己					

位置を推定する研究が行われており、高精度な地図情報が求められているのが推察できる。

④ 地物抽出

筆者	対象地物	参照データ	備考
梅原ら[23]	車両, 人, 標識柱, 電柱, 信号柱, フェンス, 低木, 中高木等	点群情報	F 値 (0.52~0.57) 等
糸氏ら[24]	ポットホール (陥没)	点群情報	速度による抽出
本間[25]	道路損傷	点群情報	線状損傷の抽出率は IoU で 80.2%
竹内ら[26]	山道路側	車載単眼カメラ	
松尾ら[27]	人及び車	点群情報	高精度三次元地図を GoogleMaps で代替
盛田ら[28]	社会インフラ全般	点群情報等	MMS 計測データの応用

本研究との比較：点群情報や画像情報から地物を抽出する研究は多数あるが、実在地物や道路損傷を対象としている。本研究は仮想地物を対象としている。

⑤ ダイナミックマップシステム構想

筆者	エッジサーバー	データ整備	セキュリティ	備考
斎藤ら[29]	○			エッジサーバーの負荷分散
細野ら[30]	○			クラウドで広域, エッジで局所
杉坂ら[31]		○		送信周期は交差点領域で 100ms, 直線領域で 500ms シミュレータは Scenaregie
赤間ら[32]			○	ダイナミックマップの運用を想定してたプローブデータのクレンジング
Tihanyi ら [33]	○			デジタルツイン時代の将来構想

本研究との比較：ダイナミックマップの動的情報や準動的情報の情報量が多くなることを想定し、システム構成についても研究が行われている。本研究の対象としている車線リンクや車道リンクは画像や点群情報と比較してデータ量や通信等の負荷が少ない。

⑥ 衛星及び航空写真画像からの地物判読

筆者	衛星画像	航空写真	対象地物	精度	備考
新村ら[34]	○		自動車		衛星画像 0.5m 分解能
上瀧ら[35]		○	道路	0.8m	航空写真 0.5m 分解能
大野ら[36]		○	道路, 建物, 畑, 水田等		データセットの紹介

本研究との比較：衛星画像や航空写真からの道路の判読が行われている事例が複数あり、分解能は 0.5m 程度で誤差も 0.8m 程度となっていた。近年では人工衛星に搭載される光学センサーも分解能が高くなっており、航空写真を利用した図化精度と同等の精度が期待できる。判読は画像解析によるものが多い。本研究は、GNSS を利用して車両軌跡を連続的に車線リンクと近似するものとして取得している。

⑦ 車両挙動

筆者	ネットワーク道路地図	高精度三次元地図	スマートフォン	RTK-GNSS	車線変更	備考
岡田ら[37]		○		○		協調走行
Zhou ら[38]					○	協調走行

市川ら[39]	○					車線別の交通情報を生成
横山ら[40]			○		○	加速度，角速度，GNSS から挙動を推定
米蛇ら[41]				○	○	走行軌跡のモデル評価
久松ら[42]				○		車線維持支援
本研究との比較：車両の挙動や協調走行に関する研究では本研究で利用したキネマティック測位を利用したものが複数あった。						

⑧ OSM, Google Maps 等

筆者	OSM	Google Maps	Google Steet View	その他	備考
Haklay ら [43]	○				OSM コミュニティ及び機能等照会
早川ら[44]	○				日本のコミュニティと海外を比較して分析
小川[45]		○	○		Google Maps 等を利用して高速道路における案内標識の表示地名を分析
羽倉ら[46]	○		○		カーブミラーの検出
今井ら[47]				モバイル空間統計	交通データの分析・可視化の紹介
岩井ら[48]				パナソニック独自地図	GNSS，ログ機能付きデジタルカメラを利用した建物被害調査
本研究との比較：OSM や Google Maps 等の道路地図情報は国内及び海外における現地の環境を把握するには極めて有効なツールであるが，高精度な位置情報が要求される自動運転に利用される可能性は低いと考えられる。					

本研究で扱う道路地図情報等に関連するものとして，表 1 に示すように，広範囲に関連研究を調査した．ネットワーク道路地図や高精度三次元地図，SLAM，道路地物の抽出，ダイナミックマップ関連のシステム構想，衛星画像や航空写真から道路等の地物判読，車両挙動，OSM, Google Maps 等の事例があった．

本研究が関連研究と異なっていることは車線リンクや車道リンク等の仮想地物を対象としていることである．実在地物は比較的精度検証が容易であるが，仮想地物は検証の方法があいまいとなる可能性があるため，先行事例では研究の対象とならなかった可能性がある．

また，関連研究では位置精度を検証する際に抽出するサンプリングも少ない傾向がある．国土交通省国土地理院が発行する「品質の要求，評価及び報告のための規則」[49]によると対象となる地物や縮尺にもよるが，サンプリングは全体の 2%程度の任意抽出と目視による検査となっている．本研究が任意抽出手法でなく，プローブデータという連続したデータと既存データを比較するという趣旨でも関連研究とは異なっている．

さらに，広範囲を研究対象とした場合に，地図情報レベル 500 の地図を準備することは労力が必要となり，限定した区域での研究が多いと考える．

位置精度の検証は、同一と推定される2つの地物の較差を計算することが一般的であり、関連研究及び本研究でも考え方は同じである。関連研究には地図検証の指標として、地図情報レベル及び水平位置の標準偏差を利用している場合が多いが、これは国土交通省の作業規程準則を参照しており、本研究の考え方と合致している。

【第3章】基本方針と検証方法

【3-1】基本方針

車線リンク及び車道リンクとプローブデータの各データにおける位置精度を分析する。位置精度は作業規程の準則と照らし合わせることにより、地図情報レベル等を判断する。

本研究で利用する高精度衛星測位技術の1つであるキネマティック測位はcm級の精度にて測位することが可能である。この測位技術を利用して取得したプローブデータと車線リンクを比較することによりプローブデータの正確性を検証する。

正確性が検証されたプローブデータをネットワーク道路地図の車道リンクに適用して精度を検証する。車道リンクの検証は大量のプローブデータを取得し、分析するものと区間を限定したものに分けて実施した。

【3-2】測位精度の概念

測量機器や測位衛星等を利用して取得した位置情報には真の位置に対して何かしらの誤差を含んでいる。この誤差を測位誤差といい、測位誤差の統計的な様子を測位精度という。測位精度が高いということは、誤差が小さく正確な測定が実施されていることになる。

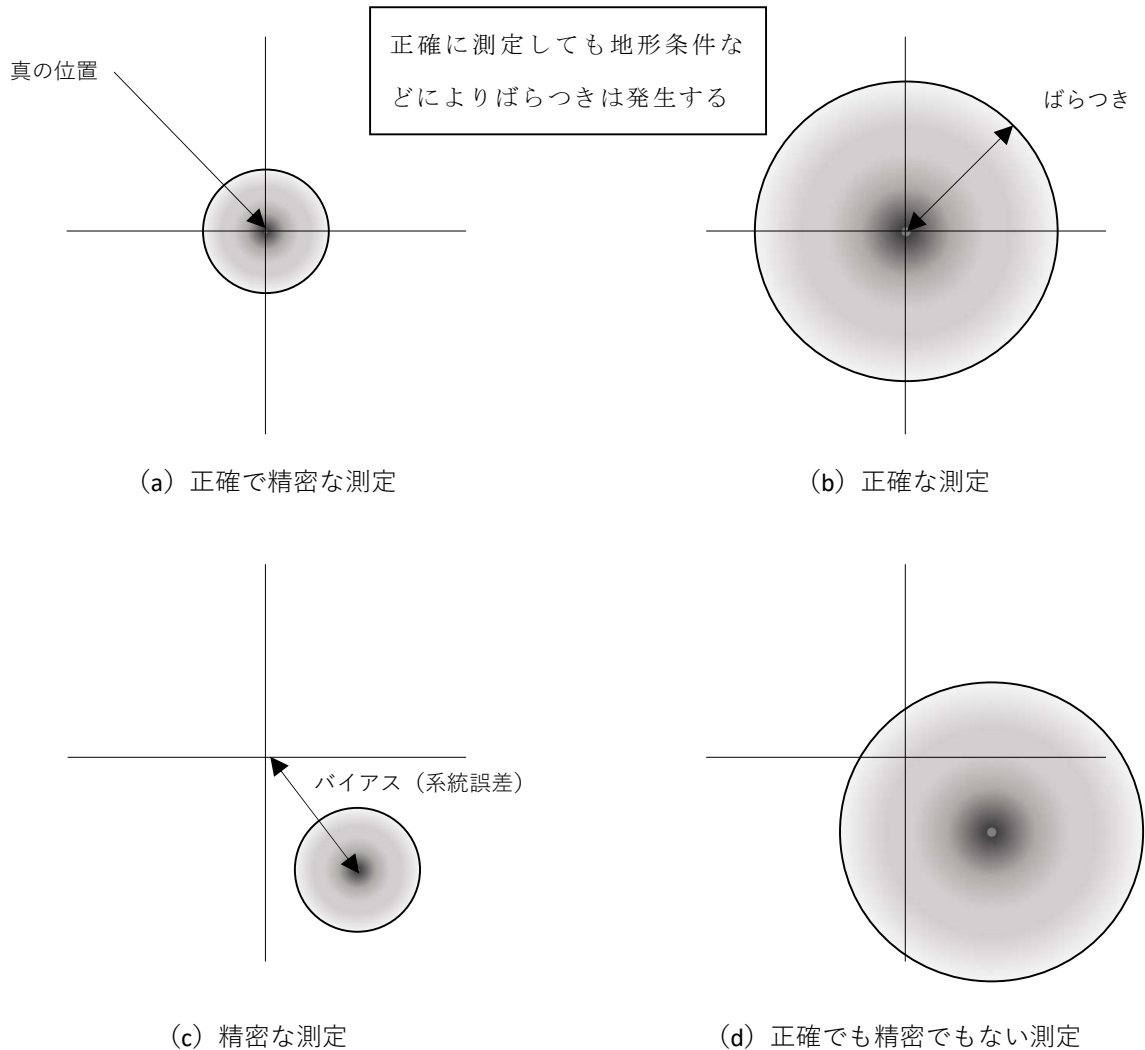
図3に示すように、精度は精密性と正確性に分けて考えることができる。

精密性とは測定した結果にばらつきが少ないことである。測定条件が変わらなければ回数に関係なく、同じ結果が出てくることになる。測定結果には、ばらつきを除いた真の値からバイアス成分やオフセット誤差等の系統的なズレが含まれる。従って、多数の計測を実施し、平均化しても誤差が残ることになる。

正確性とは、ばらつきが大きくても平均値が真の値に近いことをいう。ばらつきが大きくても系統誤差が小さいため、同一条件下で多数の測定結果を平均すれば正しい測定結果を得ることができる[50]。

測量行為は目的に応じて様々な計測が実施され、計測する手法も多岐に渡る。例えば、行政が道路管理に利用する精度の高い地図情報レベル500～1000程度の道路台帳現況平面図は航空写真や光波測距儀、MMS等を利用した座標値から作成される。個々の測定機器は様々な技術を複合的に組み合わせて活用されている。一般的に公共測量では、国土地理院の基準点を利用もしくは利用して検証しており、全国の国土を対象として一定程度の正確性を担保していると考えられる。

本研究では位置精度の評価に国土交通省の作業規程の準則を利用することから，公共測量と本研究で利用する地図及び機器の概念を整理する．



出典：GPS 技術入門 43 頁に筆者により

図 3 測定における精密性と正確性の概念

本研究で利用する高精度三次元地図は作業規程の準則に従い，地図情報レベル 500 で整備されていることから (a) 正確で精密な測定となる．作業規程で定められた機器を利用して計測し，成果品の検査も基準に則り実施されている．ネットワーク道路地図は国土地理院の地図情報レベル 25000 地形図を基にされていることから (b) 正確な測定に分類される．一方で，キネマティック測位を利用して収集したプローブデータは (c) 精密な測定と位置づけられる．バイアス部分には，主としてキネマティック測位による誤差と人間の自動車操作による誤差が考えられる．リアルタイムキネマティック測位が cm 級の精度により計測できることから，バイアスの値は人間の操作によるものが大きいと考えられる．

【3-3】作業規程の準則

作業規程の準則は関連研究でも位置精度の検証に参照されている。作業規程の準則は公共測量の目的に応じた作業規程を作成するための標準的な基準として、測量法第 34 条の規定に基づき、作業規程の準則が国土交通大臣によって、昭和 26 年に制定された。

公共測量では、目的に応じた地図情報レベルの成果物を決定し、そのレベルを満たす測量方法及び機器を選択する。地図情報レベルは水平位置の標準偏差等で分類されている。

標準偏差が小さい地図情報レベル 500 は施設管理に、位置精度をある程度許容できる地図情報レベル 2500 は計画系の業務に利用する等行政では目的に応じて地図情報レベルを選択している。

表 2 は作業規程の準則第 106 条に示されている地図情報レベルと水平位置の標準偏差及び本研究で利用する空間情報についてまとめたものである。

表 2 地図情報レベルと水平位置の標準偏差及び本研究で利用する空間情報

地図情報レベル	水平位置の標準偏差	利用する空間情報
250	0.12m 以内	
500	0.25m 以内	高精度三次元地図
1000	0.70m 以内	
2500	1.75m 以内	ネットワーク道路地図 (都市計画区域内)
5000	3.50m 以内	
10000	7.00m 以内	
25000	記載なし	ネットワーク道路地図 (都市計画区域外)

【3-4】プローブデータのバイアス

プローブデータは車両の軌跡を示すものであり，車両の操作は，個人の癖及び道路環境により，変化する．この操作に含まれるバイアス部分を仮定しないと研究を進行することが困難となる．

そこで，図 4 に示すように本研究では都市計画道路で設定されることが多い車線幅員 3.5m を設定し，通常運転では幅員の 1/2 となる 1.75m 以内を走行するものとしてバイアスを仮定する．

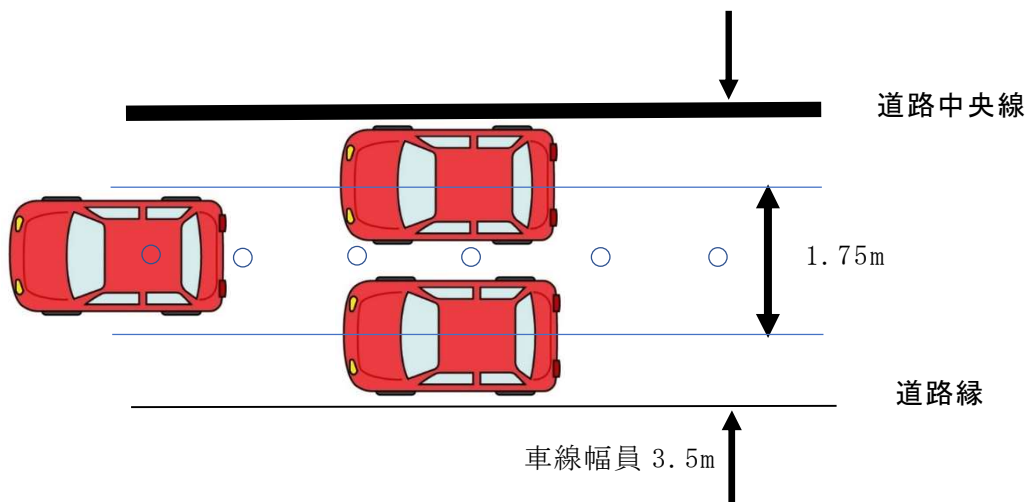


図 4 想定するプローブデータのバイアス

作業規程の準則による地図情報レベル 500 の水平位置の標準偏差は 0.25m，地図情報レベル 2500 は 1.75m となっている．キネマティック測位は cm 級の位置精度となっている．図 5 は，これらの関係をイメージとして示したものである．中心を真の位置とすると，地図情報レベル 500 の要求精度にて測量行為により計測した結果，0.25m 以内に収まる．地図情報レベル 2500 の場合は 1.75m 以内に収まる．キネマティック測位は cm 級の精密な測位により取得されたプローブデータは地図情報レベルと比較することにより，正確性を推定することができる．

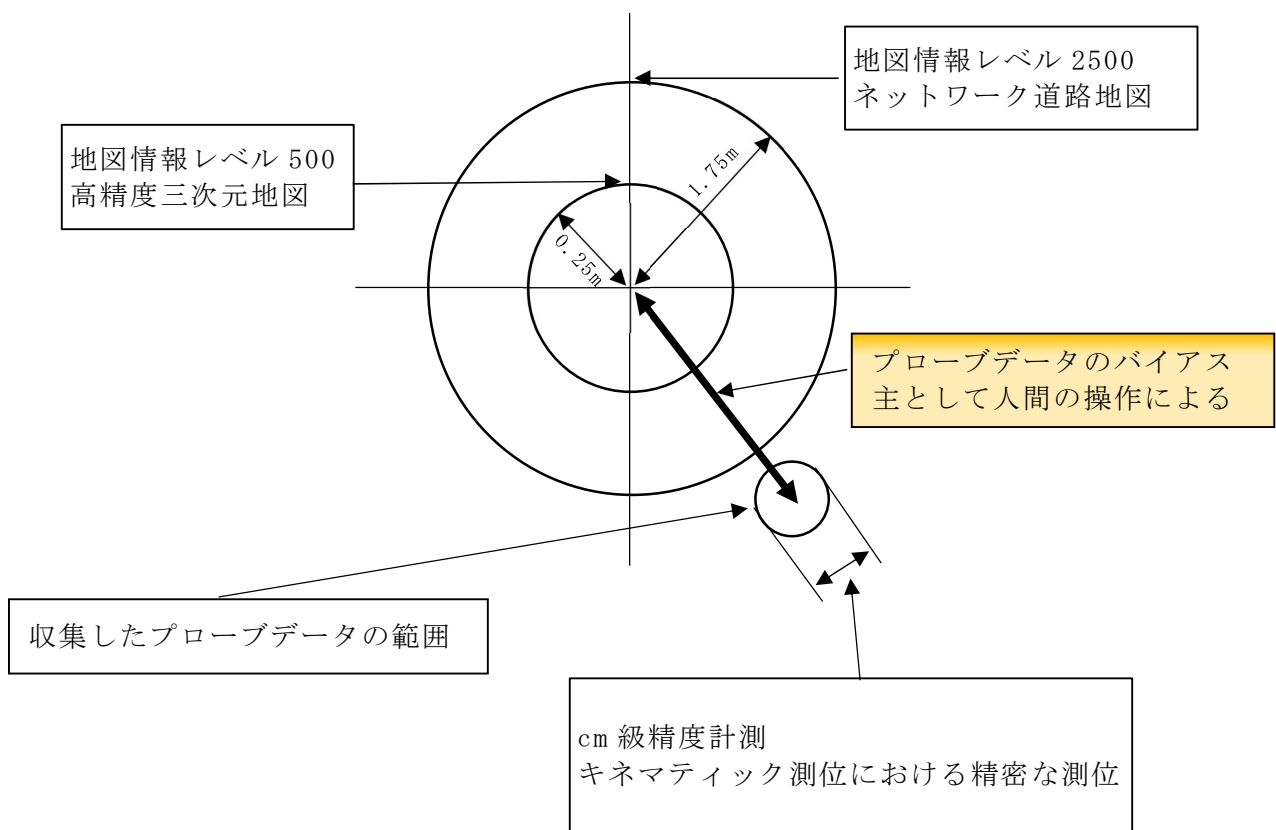


図 5 地図情報の精度とプローブデータのバイアスの関係

【3-5】比較検証の基本的な考え方

関連研究において、今井ら[17]が行ったように、位置精度の検証はサンプルを抽出し実施するケースが多く、比較的サンプル数が少ない。関連研究と同様に検証を実施するのであれば、道路地図情報の変化点に該当する検証点を選定し、2%のオーダーで検証することにより、目的を達成することになる。本研究の特徴は、連続したプローブデータを用いて、比較対象となる線形の地図データを検証していることである。

図 6 は従来手法と本研究との比較である。従来の検証手法では真の線データに対して、L1 データと L2 データが同じ成果と見なされてしまう。

本研究では、真の線データ上を車両が通行すると仮定すると、連続しているプローブデータを利用して L1 と比較することにより、従来手法では検出されなかったエラー区間を検出できる可能性がある。

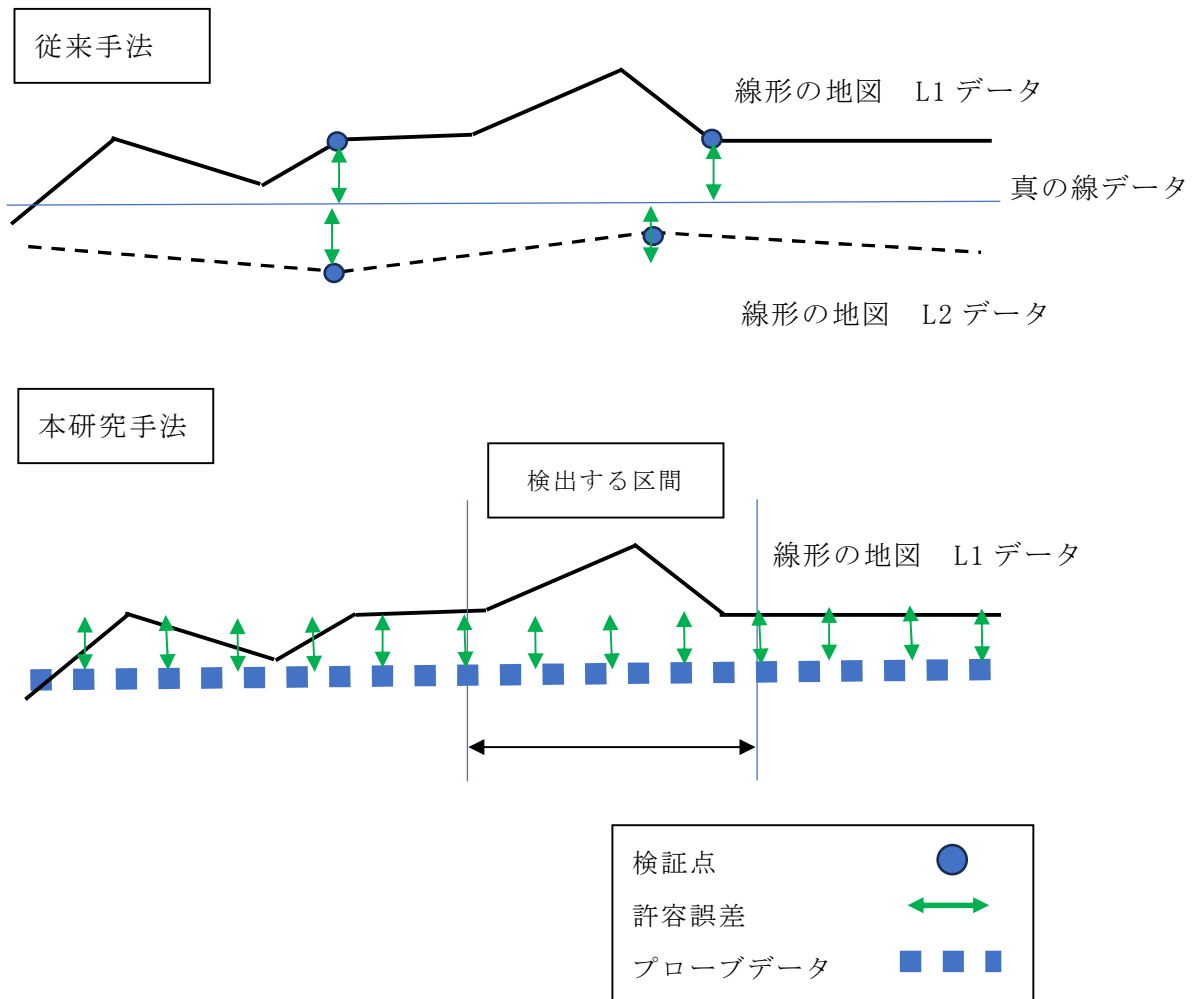


図 6 従来手法と本研究の地図情報検証方法の比較

【第4章】公共測量及び高精度三次元地図とネットワーク道路地図

【4-1】公共測量

公共測量は、測量法第5条第1号に「その測量の実施に要する費用の全部又は一部を国又は公共団体が負担し、又は補助して行う測量」と規定されているように、建物に関する測量や精度を要しない測量等一部の例外を除いて、公共団体が費用を負担したものは公共測量となる。公共測量として実施する測量業務は、作業規定に則り実施することになる。作業規程には、公共測量を実施する手順等が記載されているほかに、利用する測量機器についての性能や検定等について記載されている。地図や地理情報、測位衛星を利用して取得した位置情報等は整備した手法や手続きにより成果の性質が大きく異なっている。

【4-2】電子基準点

公共測量にて範囲に地図を作成する場合には、航空写真測量により実施されるのが一般的であった。近年では、MMS等により、道路上を連続的に計測することも可能となっている。

公共測量における評定点及び調整点等は国土地理院の管理する電子基準点を参照もしくは利用している。電子基準点は、図7に示すように、全国約1,300か所に設置されており、日本における位置の基準である国家座標に批准している。外観は高さ5mほどのステンレス製ピラーで、上部に測位衛星からの電波を受信するアンテナ、内部には受信機と通信用機器等が格納されている。基礎部には、電子基準点付属標と呼ばれる金属標が設置されており、光波測距儀等を用いる基準点として測量にも利用できるようになっている[51]。



出典：国土交通省国土地理院ホームページ

図 7 電子基準点配転図（令和 4 年 4 月 1 日時点）と電子基準点内部の機器構成

【4-3】MMS によるデータ整備

2019(令和元)年 12 月に国土地理院が「車載写真レーザ測量システムを用いた三次元点群測量マニュアル（案）」[52]を三次元点群情報整備のために必要な作業内容の明確化・標準化を目的として策定した。同マニュアルの第 32 条標準的な作業工程には、作業計画、調整点の設置、移動取得及びデータ処理、オリジナルデータの作成という手順が明記されている。

図 8 に示すように、MMS により点群情報を取得する場合はコース間を統合し、調整点を前述した基準点を批准することにより、国土全体から見た正確性を担保している。

一般的に公共測量を実施する場合、評定点や調整点等を写真等に写しこむことにより、

図郭やコース間の位置合わせを実施している。さらに、評定点や調整点から前述した基準点を批准することにより、国家座標との位置関係を確定する。

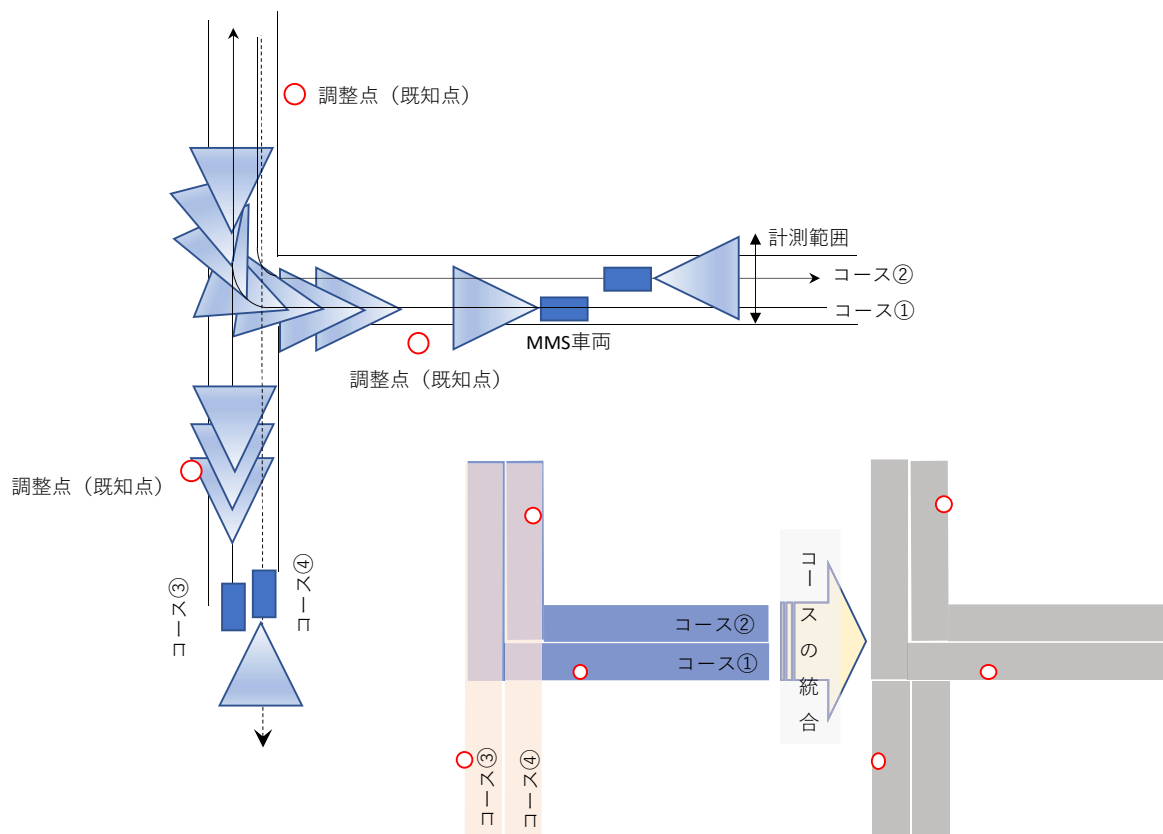
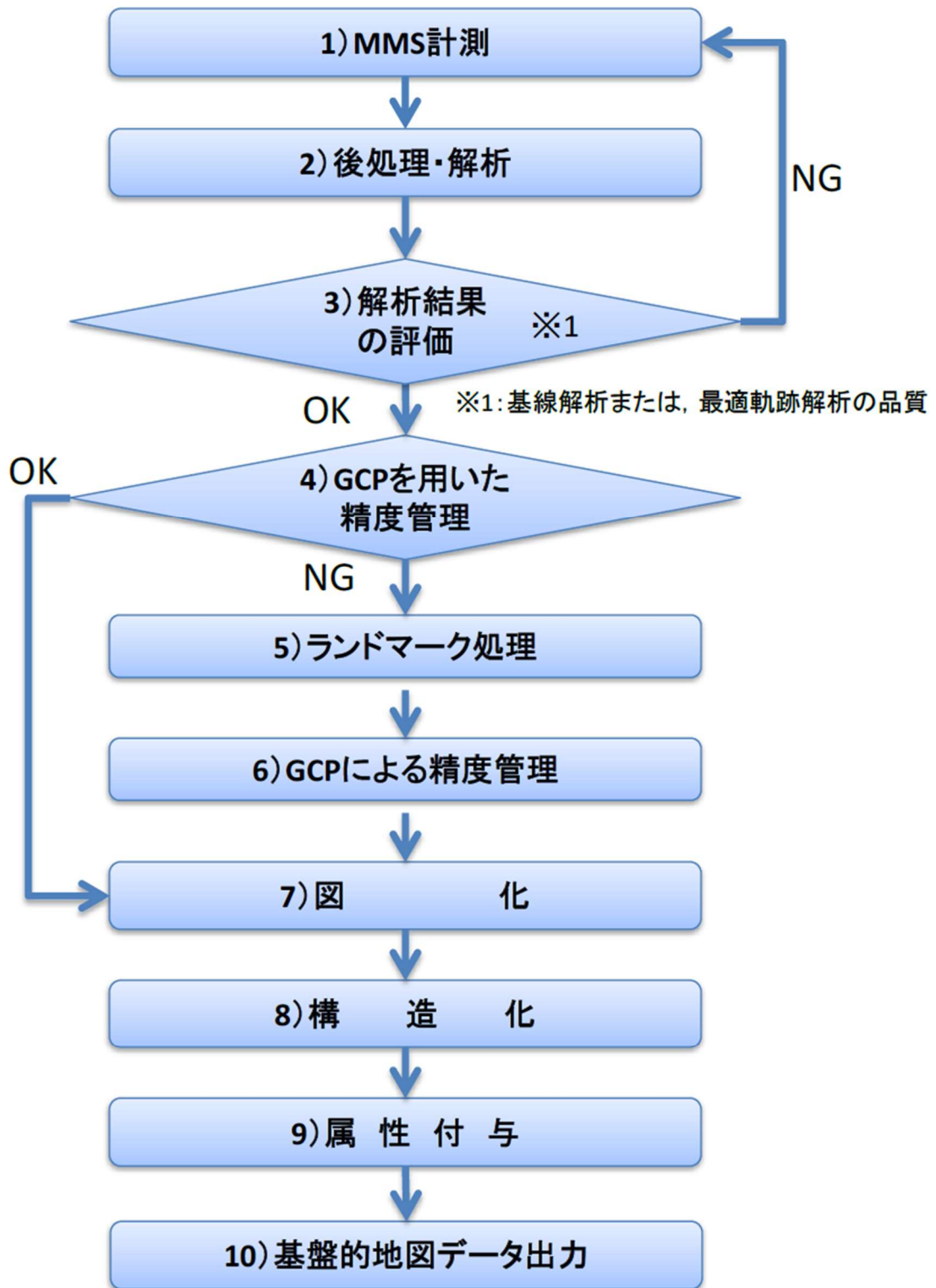


図 8 MMS 計測時におけるコース間の統合と調整点

MMS を用いた自動運転支援のための高精度三次元地図については、ダイナミックマップ構築検討コンソーシアムが取りまとめた「地図データ作成要領（案）Ver 1.0」[53]や東京臨海部実証実験コンソーシアムが取りまとめた「自動走行システム向け地図データ仕様への提案 Ver. 1.1【地図データ作成時におけるガイドライン】」[54]があるので参考になる。本研究で利用する車道リンク及び車線リンクは、図 9 に示す図化の工程時に位置情報を取得し、構造化にて変化点となるノードとリンクの関係性をデータ化し、属性付与の段階で、道路種別や車線種別、車線幅員等の情報を付与する。



出典：地図データ作成要領（案）Ver 1.0 7 頁

図 9 自動運転支援のための高精度三次元地図作成手順

【4-4-1】高精度三次元地図

標準化に近いデータ構造として、内閣府が推進している「戦略的イノベーションプログラム (SIP: Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program)」にて、検討された「自動走行システム向け地図データ使用への提案 Ver1.1」[55]及び「自動走行システム向け地図データ符号化仕様への提案 (試作データ用符号化仕様) Ver1.0」[56]を参照して作成した地図情報レベル 500 の自動運転支援を目的とした地図情報である。本研究では、浜松市より貸与を受けた[2]。

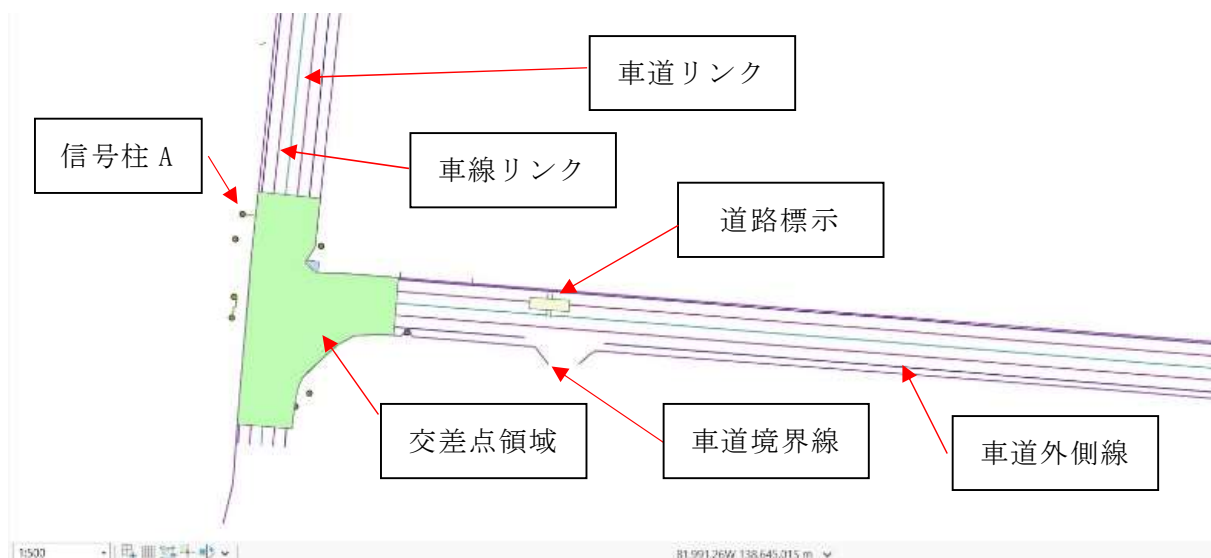


図 10 高精度三次元地図 (二次元表示)

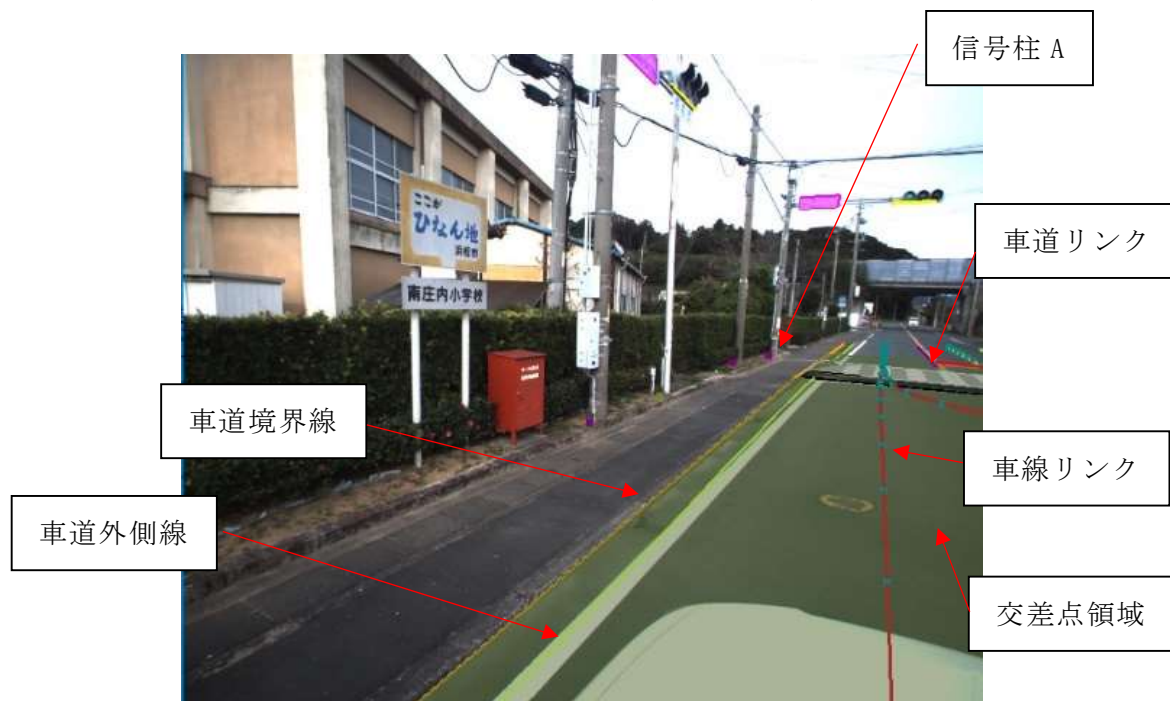


図 11 高精度三次元地図 (三次元表示)

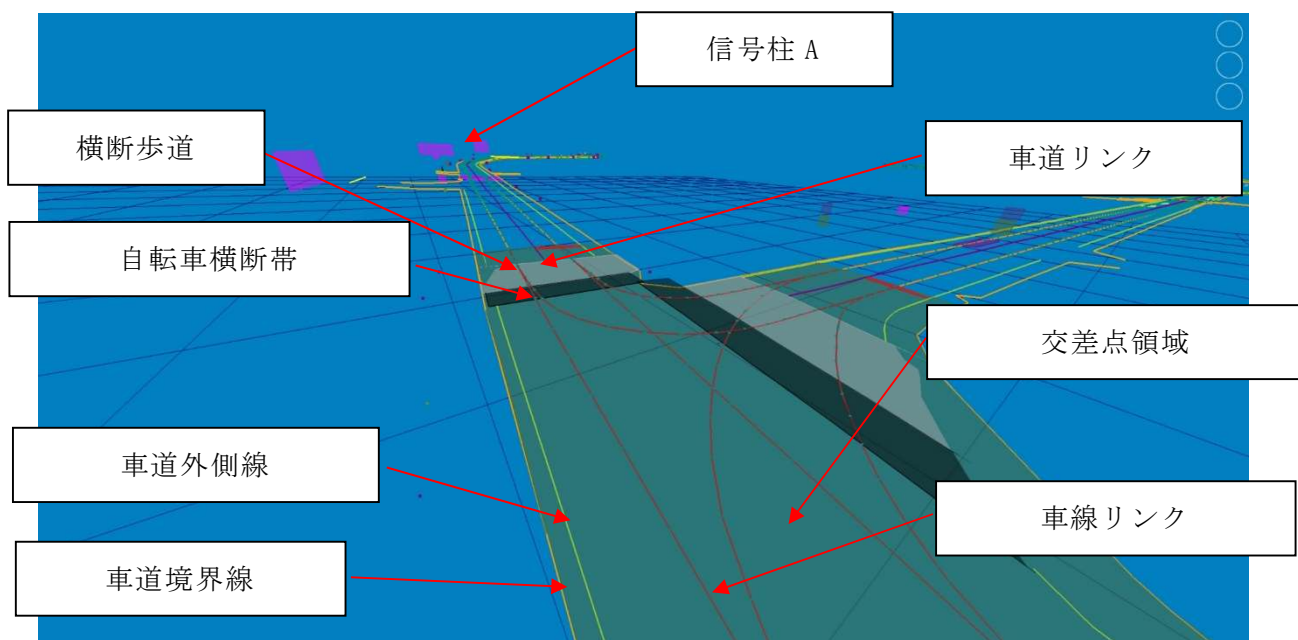


図 12 高精度三次元地図（三次元表示遠景）

図 10 は二次元で表示したものである。交差点範囲，車線リンク，車道リンク，道路縁，道路標示等がデータ化されている。

図 11 は MMS で撮影した交差点の情報を車載カメラの画像と重畳し，三次元ビューワーで表示したものである。信号電柱と地面設置位置，信号照明の位置情報が三次元で取得されている。

図 12 は図 11 の三次元モデルを分かりやすくするために，車載カメラの画像を重畳しないで，図 11 の箇所を全体的に表示したものである。

表 3 は借用した研究対象区間 10 km における高精度三次元地図の項目毎データ量を示したものである。

表 3 高精度三次元地図のデータ量

項目	データ量 (KB)	項目数	図形タイプ
車線リンク(車線リンク)	495	417	ライン
車線リンク(交差点内車線リンク)	170	163	ライン
車道リンク	414	97	ライン
車道中央線	155	201	ライン
車道境界線(区画線)	52	18	ライン
車道外側線	451	653	ライン
路肩縁	238	325	ライン
交差点内領域	41	23	ライン
道路標示	145	257	ポリゴン
道路標識	136	246	ライン
車両信号機(本体)	6	16	ライン
電柱	24	224	ポイント

【4-4-2】ネットワーク道路地図

ネットワーク道路地図（DRM-DB）は日本デジタル道路地図協会（DRM協会）が作成し提供する道路ネットワークを基本として整備した地図情報である。地図情報レベル25000の道路ネットワークを表現したデータである。詳細は、全国デジタル道路地図データベース標準 DRM 標準フォーマット 21 運用規程世界測地系第 1.6 版[57]及び DRM 標準フォーマット 21 第 1.3 版[58]にてまとめられている。都市計画区域は地図情報レベル 25000 となっている。本研究では DRM-DB 3003BW-3D 版（2018（平成 30）年 3 月版）の一部を DRM 協会により地図情報形式に変換し、貸与されたデータを利用している。また、本研究では利用しなかったが、背景データとして、河川や鉄道、行政界等のデータも提供されている。本稿では断りのない限り、DRM-DB をネットワーク道路地図という。

図 13 は車道リンクと車道ノードのみ表示したものである。

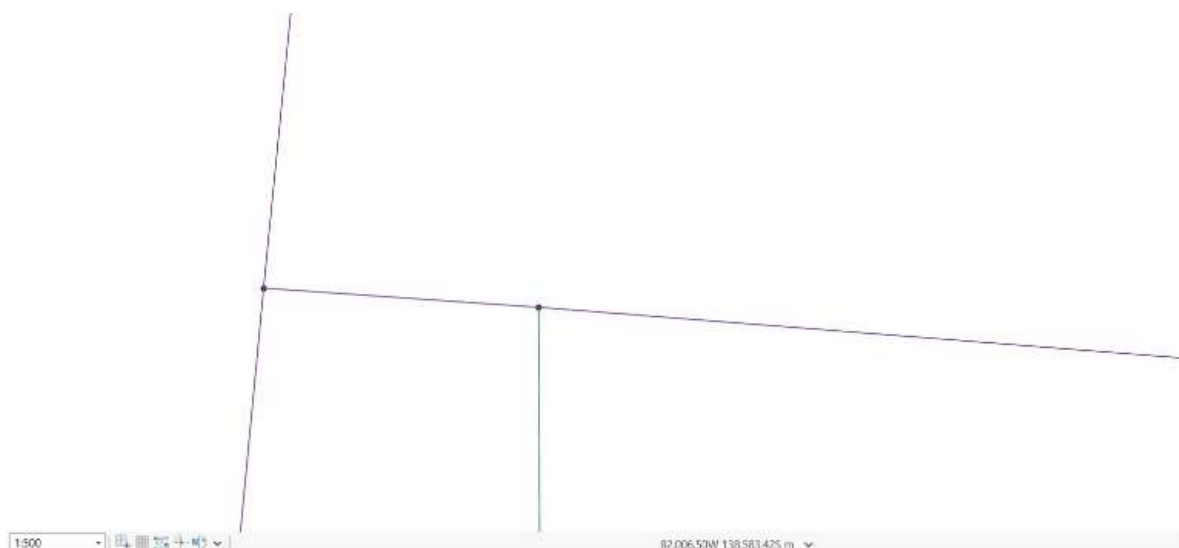


図 13 ネットワーク道路地図（車道リンクと車道ノードのみ表示）

借用した地図情報の属性情報として、道路管理者コード、道路種別コード、道路幅員区分コード等の情報もデータに内挿されている。ネットワーク道路地図は年に 1 回、国土地理院の基盤地図情報や全国の道路管理者等から提供される情報を用いて、データを更新している。表 4 は浜松市全域のネットワーク道路地図の項目毎データ量を示したものである。道路リンク延長の合計は 9,965 km である。

表 4 ネットワーク道路地図のデータ量

項目	データ量 (KB)	項目数	図形タイプ
全道路リンク	22,466	75,858	ライン
全道路ノード	6,552	51,983	ポイント

【4-4-3】高精度プローブデータ

図 14 は自動車に搭載し、自動車の走行軌跡をキネマティック測位により取得したプローブデータである。測位衛星から発信される電波の受信状況等に影響されるが、cmレベルでの計測が可能である。

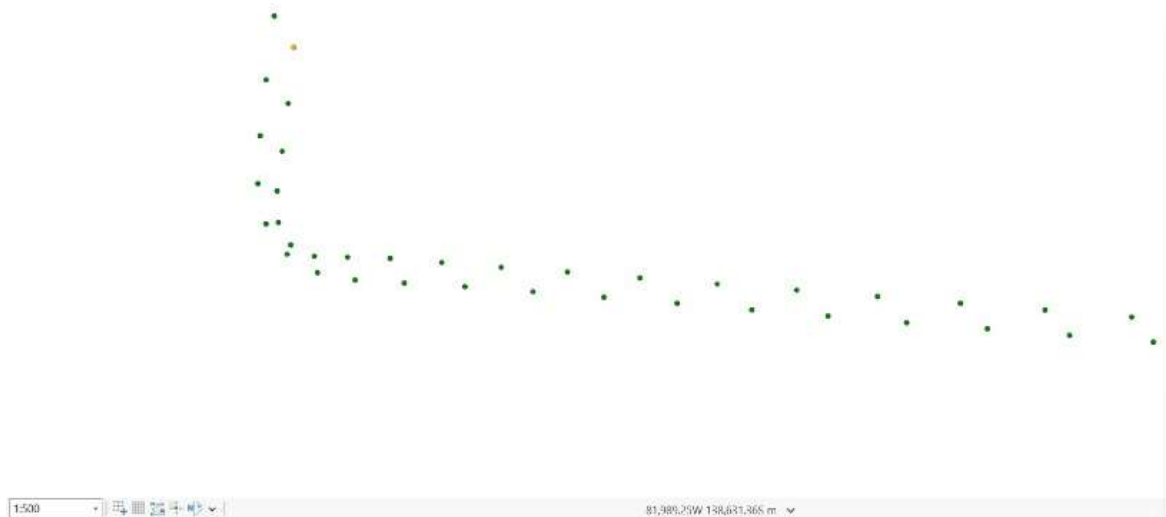


図 14 高精度プローブデータ

表 5 高精度プローブデータのデータ量

項目	データ量 (KB)	項目数	図形タイプ
庄内プローブデータ (庄内地区 10 km 程度区間)	12,434	1,598	ポイント
送迎車 1 プローブデータ	212,171	1,493,687	ポイント
送迎車 2 プローブデータ	184,416	1,298,304	ポイント
送迎車 3 プローブデータ	87,875	688,990	ポイント
送迎車 4 プローブデータ	174,714	1,230,022	ポイント

【4-4-4】地形図

図 15 は浜松市が 2015 年 5 月に撮影した航空写真を利用して 2017 年 2 月に作成した地図情報レベル 2500 の地形図である。都市計画法第 6 条には都市計画区域について 5 年ごとに、人口規模、産業分類別の就業人口の規模、市街地の面積、土地利用などに関する現況及び将来の見通しについての基礎調査を行うことが規定されている。この調査において、最新の地形や構造物の情報が必要となるため、行政では、地形図の更新を 5 年ごとに実施している [59]。

本研究が道路中心に実施されており、データ化されているため、全体を補完するために背景地図として利用する。



図 15 地形図

表 6 は浜松市より購入した地形図の 1 メッシュ（図郭）分のデータ量である。図郭番号は OB69-2 で、高精度三次元地図を整備した地域内のものである。

表 6 地形図のデータ量

項目	データ量 (KB)	項目数	図形タイプ
地形図 1.5 km × 2.0 km 建物, 道路, 等高線, 標高単点等 高精度三次元整備地区は約 6 メッシュ程度 であるがメッシュ単位にデータ量が異なる	29,854	1	メッシュ

【第5章】衛星測位システム

【5-1】衛星測位の概要

人工衛星を利用した測位システムをGNSS (Global Navigation Satellite System) という。GNSSは米国によって運用されているGPS (Global Positioning System), ロシアのGLONASS (Global Navigation Satellite System), 欧州連合 (EU) のGalileo, 日本の準天頂衛星 (Quasi-Zenith Satellite System) みちびき等を利用して地球規模で測位する仕組みである。衛星測位において, 捕捉する衛星の数が多ければ, 測位精度を向上させる可能性が高くなる。

みちびきは, 2018年11月より4機体制でサービスを開始した。2025年度以降, みちびきの7機が確立されると, 日本上空に常に4機以上のみちびきの衛星が滞空するようになるため, みちびき単独での持続測位が可能なる[60]。

【5-2】位置情報取得の原理

地球上の任意の位置を特定する場合は, 既知となる3点からの距離により算出することが可能である。求める位置を (x, y, z) , 3機の測位衛星A, B, Cの位置を既知とし, それぞれ (x_a, y_a, z_a) , (x_b, y_b, z_b) , (x_c, y_c, z_c) とすると, 3つの連立方程式により計算が可能である。

しかし, 測位衛星の内蔵する原子時計に対して, 受信機側の時計誤差が大きいため, 3つの未知数以外に受信機側の時計誤差を推定する必要がある。すべての測位衛星間の時刻は同期しているため, 衛星受信機間の時計誤差は全ての衛星に対して同じ値となる。

そこで, 衛星測位では4機目の測位衛星Dの位置 (x_d, y_d, z_d) を既知として, 4つの連立方程式を解くことにより, 図16のような位置の座標を特定している。

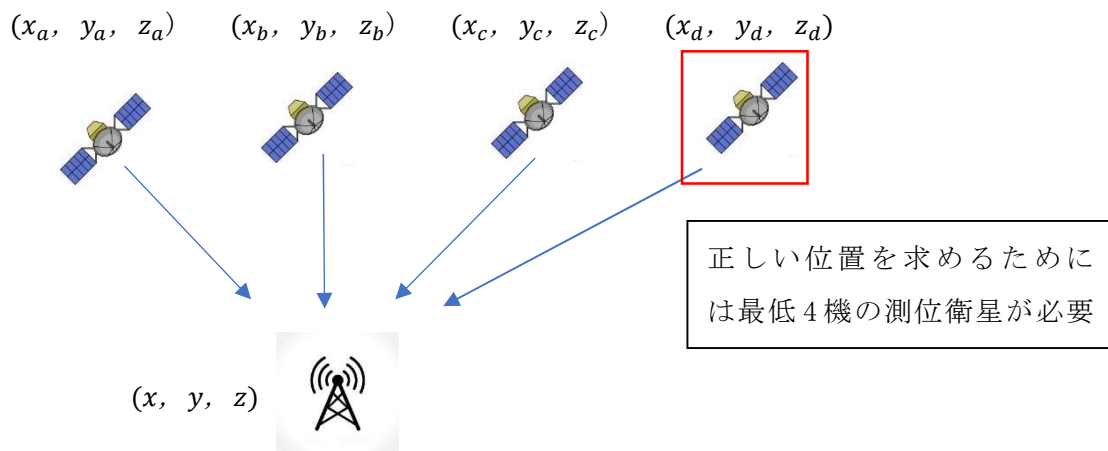


図 16 測位衛星と受信機の位置関係

【5-3】衛星測位の種類

衛星測位の種類は図 17 に示すように、測位衛星からコード位相と搬送波位相を用いる手法に大きく分類される。ディファレンシャル測位は原理からすれば単独測位と同じ手法を用いるが、2 台の受信機で同時観測して誤差を低減する手法は相対測位という意味で、干渉測位と並べて扱われることもある[61]。

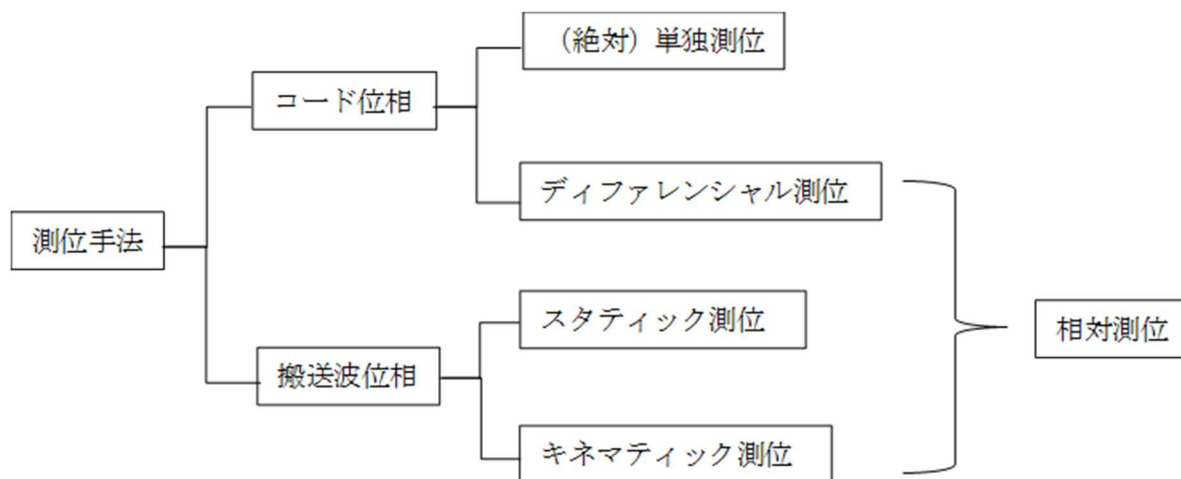


図 17 衛星測位の種類

【5-4】衛星測位の精度

測位衛星を利用し取得した位置情報における誤差は主として以下の要因による[6]。

① 測位衛星の軌道

太陽や月の引力の影響で測位衛星の軌道が変化することによって生じる。

② 測位衛星の時計時刻

測位衛星の原子時計が稼働中に生じる時刻のずれ。

このずれは測位衛星が発信するデータに含まれる補正情報により補正が可能である。

③ 電波の伝送中の速度遅延

図 18 に示すように、大気中での電波速度が遅延することによって、測位衛星と受信機との間の距離が見かけ上大きくなってしまわずれである。主に電離層と対流圏において発生する。地上約 100 km～300 km 付近で地球を取り巻く気体分子が電離した電離層では測位衛星から発信された電波の伝送速度が電離層の密度に比例して遅くなる。また、対流圏（地表～地上 10 km 程度）では空気乾燥による影響と空気中に含まれる水蒸気により遅延が発生する。

これらは測位衛星から送信される電離層遅延補正データにより、補正が可能である。

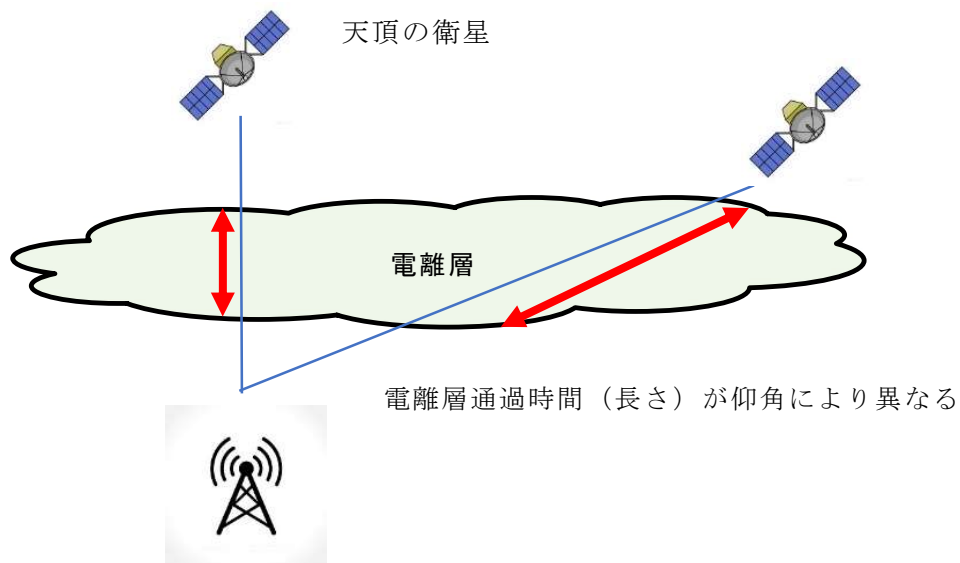


図 18 仰角による電離層遅延量の差

④ マルチパス

マルチパスとは測位衛星からの電波が高層ビルや高い岩山等で反射して受信機に届く現象である。電波が直接届く場合より長い距離を伝送されるので、反射した電波を測位に利用すると実際の位置との間に誤差が生じる。

⑤ 衛星の配置

衛星測位によって取得できる位置情報は、測位時点での天空上での測位衛星の配置によって変わる。測位の場所や時刻によっては、利用できる測位衛星の数が少なくなってしまう可能性があり、算出された位置に誤差が生じる。

測位に必要なとなる4機以上の測位衛星は天空全体に高い位置で散らばっているほど、測位は正確になる。逆に、測位位置から同じ位置に測位衛星が集中しているほど精度は低下する。また、地平線や水平線に近い、仰角が低いと建物等に遮蔽されて、測位に利用できる測位衛星の数が減少し、精度が低下することがある。

このような天空上の測位衛星の配置による測位精度は PDOP (Position Dilution of Precision) という尺度によって表現されており、PDOP の値が小さいほど測位の精度が高くなる。

【5-5】ディファレンシャル測位

測位衛星から受信機までの真の距離に対して、誤差を含んだ距離を疑似距離という。測位衛星の誤差は受信機に共通に表れる。従って、既知の地点に受信機を固定して疑似距離を測定し、真の距離との差である誤差を配信することにより離れた地点の受信機の疑似距離を補正することができる。このように位置が既知な基準局が各衛星の誤差情報を測定して配信し、移動局側の受信機の測位誤差を補正する方法を図 19 に示すようにディファレンシャル測位という。

ディファレンシャル測位では前述した測位衛星の軌道や時計時刻、電波の伝送中の速度遅延を補正することが可能である。精度は数 m 単位の精度とされている。

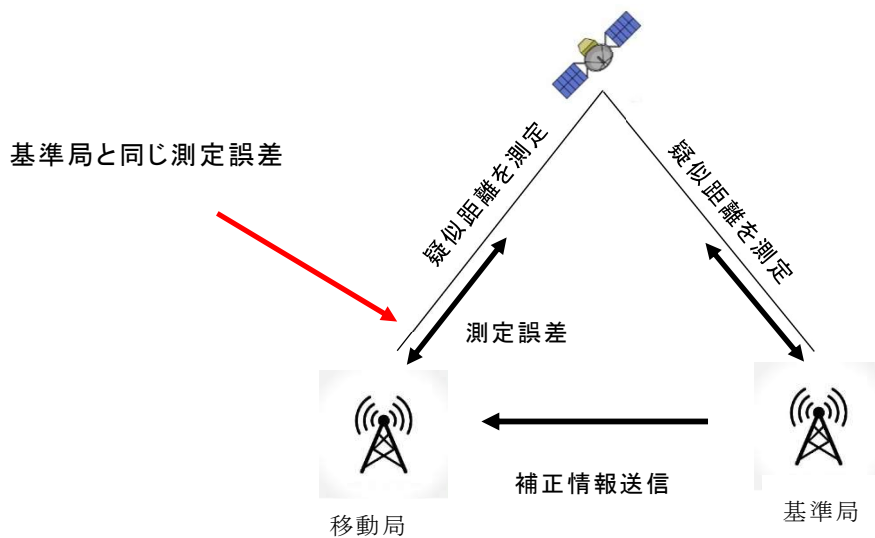


図 19 ディファレンシャル測位のイメージ

【5-6】キネマティック測位

本研究では図 20 に示すように、干渉測位であるキネマティック (Kinematic) 測位を利用している。

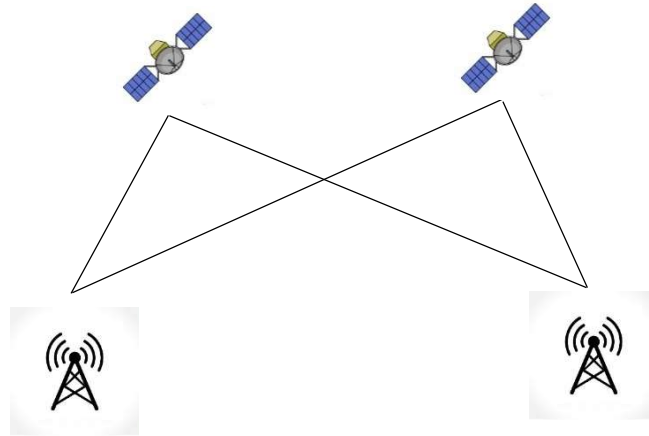


図 20 キネマティック測位のイメージ

前述のディファレンシャル測位は時刻等を示すコード信号により処理を行っていたが、干渉測位は測位衛星から発信された電波の搬送波位相により処理を行っている。搬送波位相測位はコード測位よりもはるかに高い精度を提供することができる。搬送波測位では搬送波の波の数で距離を測定している。波の一周期内の非常に小さな変化まで検出することが可能になる。

図 21 は搬送波のイメージである。GPS の L1-C/A 信号の場合、1 波長は約 19cm、波の位相を 100 分割程度で計測が可能であるから、疑似距離の精度は 1.9 mm 程度となる。

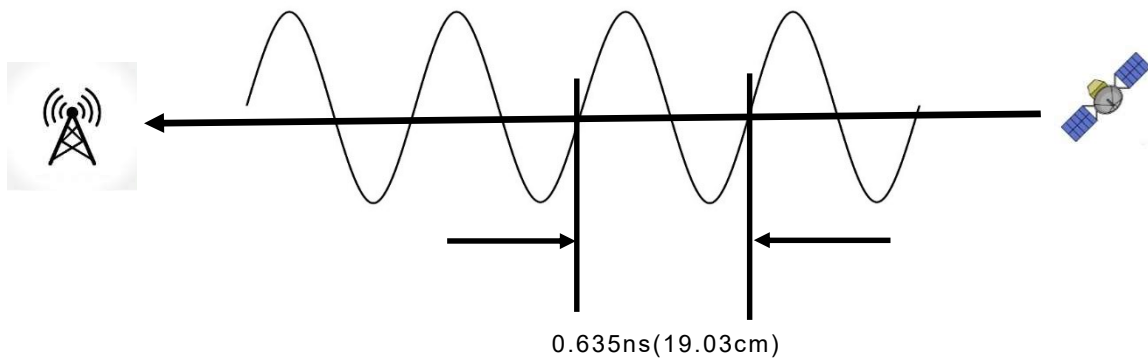
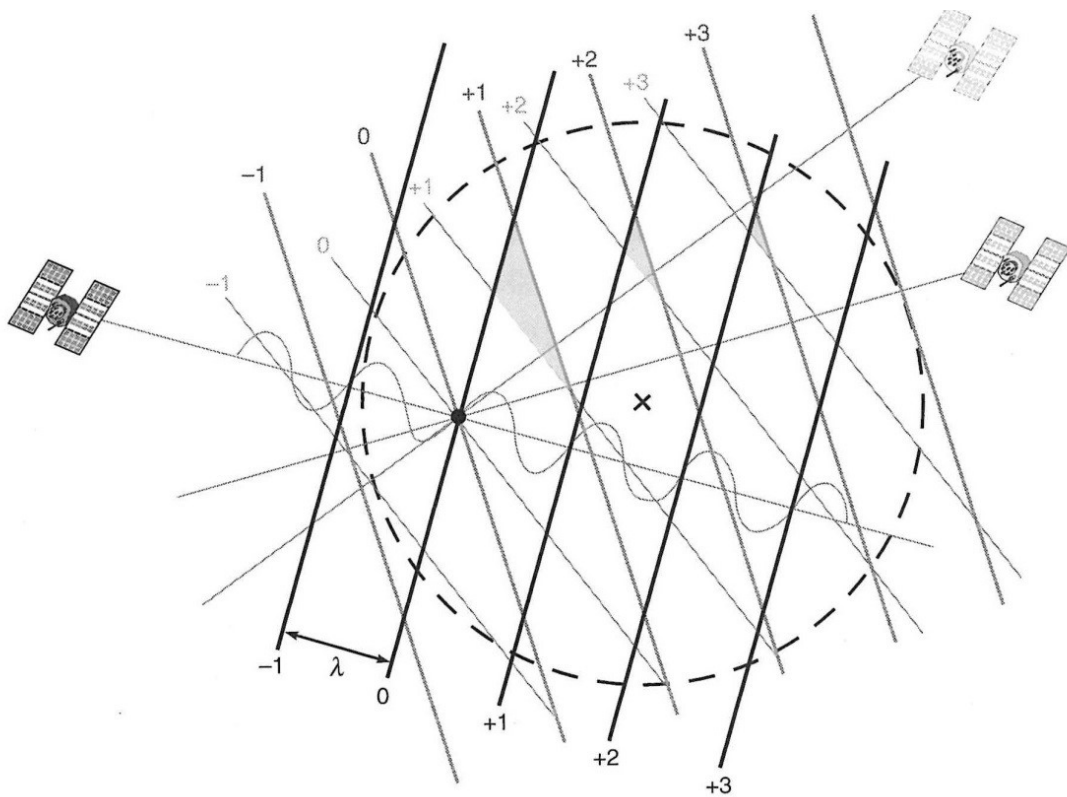


図 21 搬送波のイメージ

測位衛星からの波長の数の小数部分は分かっても、整数部分は不確定となる。

この整数部分のあいまいさ（整数アンビギュイティ）を計算し、Fix 解を求めることにより、正確な距離情報を得ることが可能となる。

図 22 は求めたい位置の近傍を示しており、各測位衛星から受信した電波の 1 波長間隔の波面をイメージしたものである。2 機の測位衛星の測定値のみがある場合は、その双方の測位衛星に対する波の波面が交差する点の全てに対して求める位置の解が存在する。第 3 の測位衛星の測定値がこの不確定性を解決する。3 機の測位衛星全ての測定値に一致する唯一の点が探索領域に存在する。すなわち 3 機の測位衛星から受信した波の波面が交差する位置に求める解がある。



出典：精説 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機 223 頁

図 22 搬送波位相値を用いる測位

一方で、整数アンビギュイティを決定しない状態の測位結果を Float 解という。Fix 解は数 cm の位置精度、Float 解は数十 cm から数 m 程度の位置精度となる。十分な数の測位衛星から良好に測位信号を受信しないと Fix 解を得ることは困難である [62]。

【第 6 章】研究環境

【6-1】衛星測位システム

筆者が所属する研究室では衛星測位用の基準局を設置し、2017 年より無償にて高精度衛星測位のための補正情報を国内で初めて事前登録無しに提供している。基準局は Trimble 社製の NetR9 を利用している。本製品は国土地理院の電子基準点（1 級基準点）に利用されているものと同等のものである。

この基準局のデータを利用することにより、cm 級の高精度測位を実現することが可能となる。高精度測位を実現するための範囲は基準局からおよそ 10km である。

基準局の詳細を表 7、設置状況を図 23 に示す[63]。

表 7 基準局詳細

設置場所	静岡大学浜松キャンパス（浜松市中央区城北 3-5-1） 情報学部 2 号館屋上
座標位置	北緯 34 度 43 分 34.36951 秒，東経 137 度 43 分 05.85101 秒， 楕円体高 112.490m
XYZ (ECEF) 座標 (m)	-3882623.495, 3530650.353, 3613009.095
対応衛星 システム	GPS/GLONAS/ Galileo/BeiDou/ QZSS

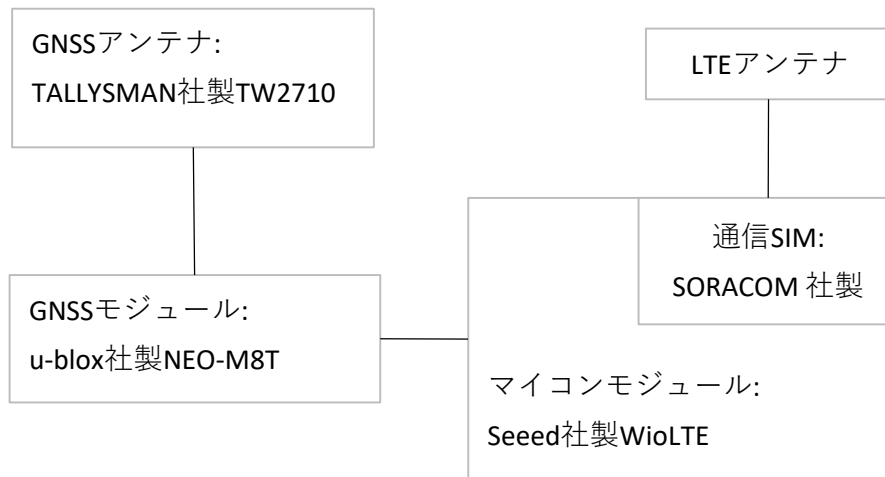
2018 年の計測において、GNSS モジュールは u-blox 社 NEO-M8T と LTE 機能付きプロトタイプピン
グ・マイコンモジュールの Seeed 社製 WioLTE 等
を利用して図 24 のように組み立てた。GNSS モジュー
ルによる観測は 1 秒 1 回行い、その時のデータサイ
ズは約 1KB 以下である。ソラコム社の SIM での LTE
による通信速度は上り・下り 512kbps であり、利用
料金（上り・下り）0.24 円/MB・0.8 円/MB であっ
た。人工衛星の種類は GPS, GLONASS, BeiDou, み
ちびき等の同時受信に対応している。干渉測位可能
な観測データを出力でき、100 ドル以下で購入可能
な GNSS モジュールである。



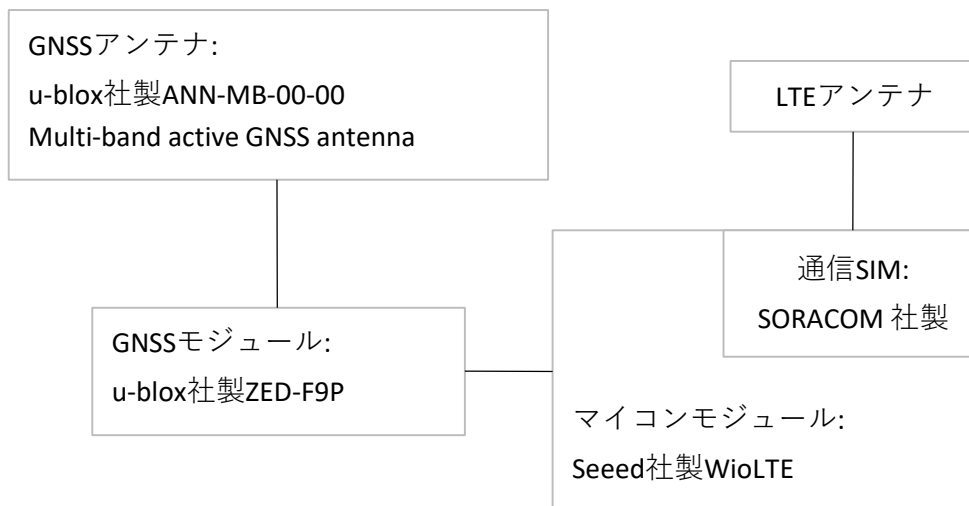
図 23 基準局の設置状況

前述の GNSS モジュール u-blox 社 NEO-M8T は測位衛星から発信される電波が 1 周波のみ受信が可能であった。測位衛星から送信されてくる電波には、1575.42MHz 帯の L1 信号と 1227.60MHz 帯の L2 信号の 2 種類の信号がある。2 周波の電波を受信することができれば、周波数の違いから遅延量の差を読み取り、2 つの電波の到着時間を比較し、遅延量を補正することが可能となり、1 周波測位に比べ短時間で高精度な測位ができる。

2019 年の計測では L1 信号に加えて L2 信号の 2 つの周波数帯の電波を受信し測位に利用できる u-blox 社 ZED-F9P を利用した。



① 2018 年計測時のロガーシステム構成



② 2019 年計測時のロガーシステム構成

図 24 計測に利用したロガーシステム構成

研究に利用した基準局及びロガーシステムを利用して構築したシステム構成を図 25 に示す。

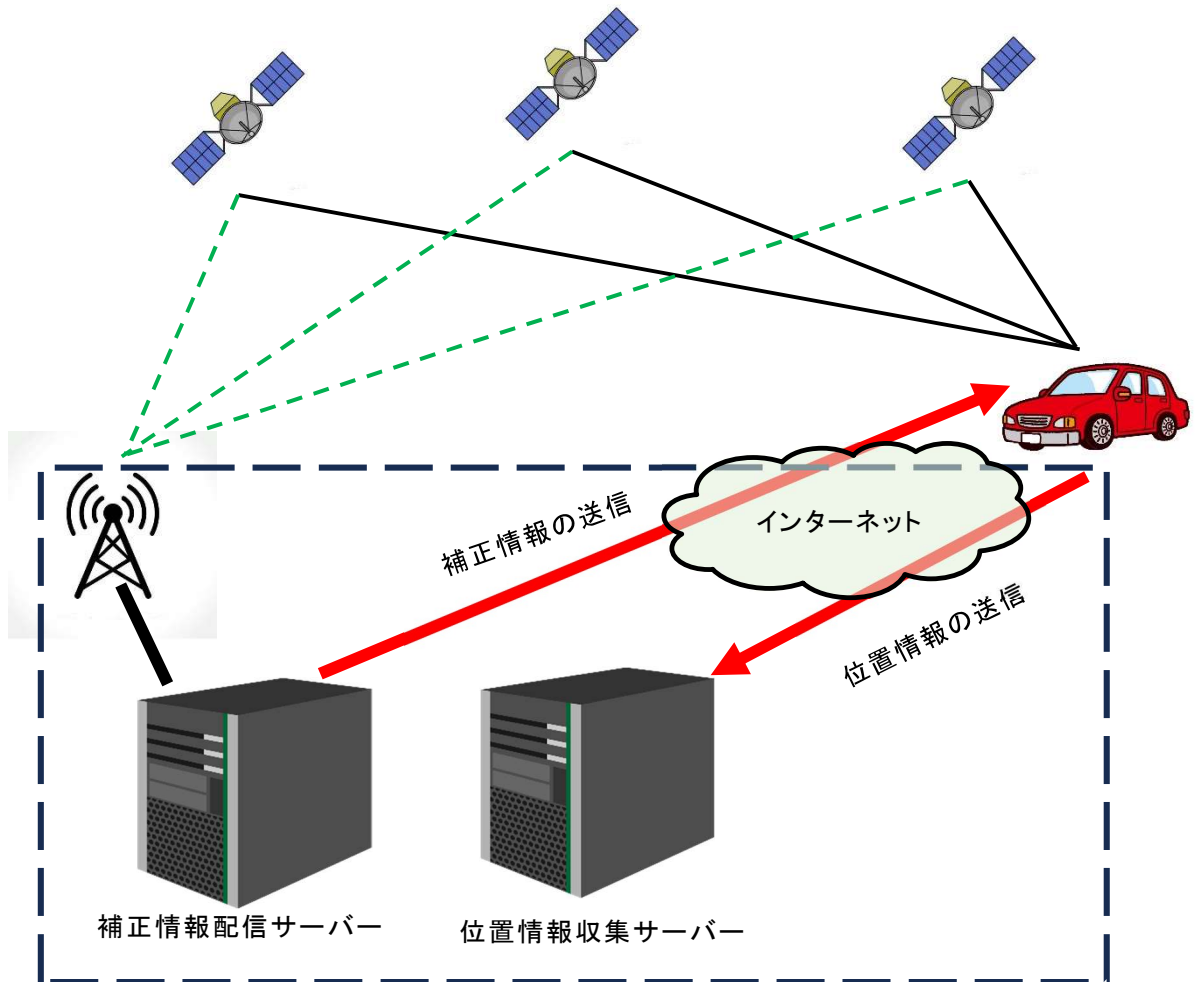


図 25 システム全体構成

測位基準局及び各種サーバーは静岡大学構内に整備した。基準局は地理的に固定されており、各測位衛星から受信する信号により、その衛星自体及び周囲の大気の状態が引き起こす誤差を観測できる。基準局が観測した情報は、基準局の座標等を合わせて、インターネットを経由して、リアルタイムに自動車のロガーシステムに送信することで測位補正情報として利用することができる。ロガーシステム内で処理された位置情報はインターネットを経由して位置情報収集サーバーに送信される仕組みである。

【6-2】解析に用いたパーソナルコンピュータ

今回利用したパーソナルコンピュータを表 8 に示す。今回扱ったデータは大きいものでも数百 MB 程度のデータであるから、空間解析に要した時間は数秒程度である。

表 8 研究に利用したパーソナルコンピュータの仕様

製品名	Inspiron 13-7359
プロセッサ	Intel(R) Core(TM) i7-6500U CPU @2.5GHz 2.60GHz
メモリー	8GB
システム	64 ビット オペレーティングシステム x64 ベース プロセッサ
OS	Windows 10 Pro
ストレージ	SanDisk Z400s 2.5 7MM 256GB SSD

【6-3】利用したソフトウェア

受信した衛星信号の解析には解析ソフトウェアとして有名な RTKLIB[64]を利用した。複数の測位衛星の信号をサポートしており、リアルタイム及び後処理のキネマティック測位を実行することが可能である。

図 26 は RTKLIB を利用して天空の人工衛星の位置を示したものである。

研究では測位情報の精度向上のために後処理を実施している。つまり、天空の測位衛星の状況を考慮して、仰角マスクの調整や利用する人工衛星の変更により、測位精度を向上している。

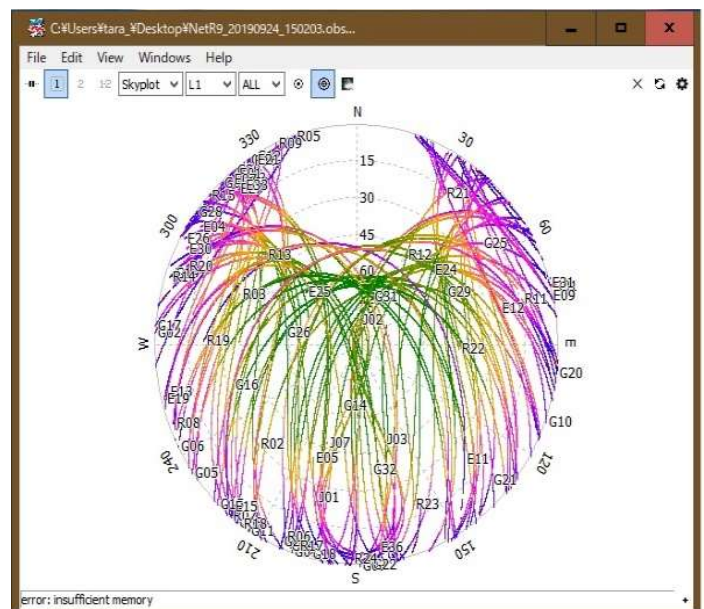


図 26 RTKLIB 画面表示例

また、本研究では地理情報システムとして、図 27 に示す ArcGIS Pro3.1.2[65]を利用した。ArcGIS は Esri (Environmental Systems Research Institute) 社によって開発された空間情報を扱うための包括的なプラットフォームである。このプラットフォームは、地図データの収集、管理、解析を行うためのツールを提供している。

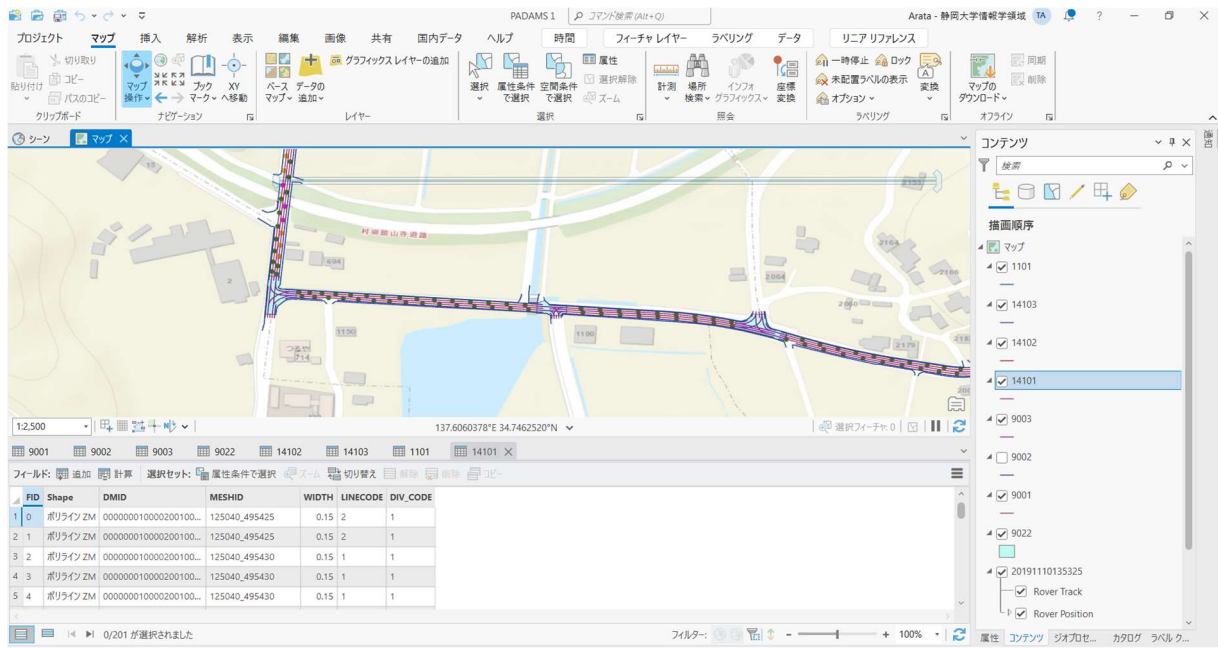


図 27 地理情報システム ArcGIS Pro3.1.2 の画面表示例

【第7章】研究の具体的手順

【7-1】車線リンクを利用したプローブデータの精度検証

高精度三次元地図の車線リンクを正解データとして、プローブデータの検証を実施する。この検証を実施することによって、プローブデータに含まれる人間の操作によるバイアスを求める。通常運転では車線の中央から車線幅員の 1/2 となる 1.75m 以内を走行するものとして仮定する。

地図情報レベル 2500 の水平位置の標準偏差は 1.75m 以内、地図情報レベル 500 は 0.25m 以内となっていることから、図 28 のプローブデータの計測結果の集合である S1 は中心に近づくと考えられる。

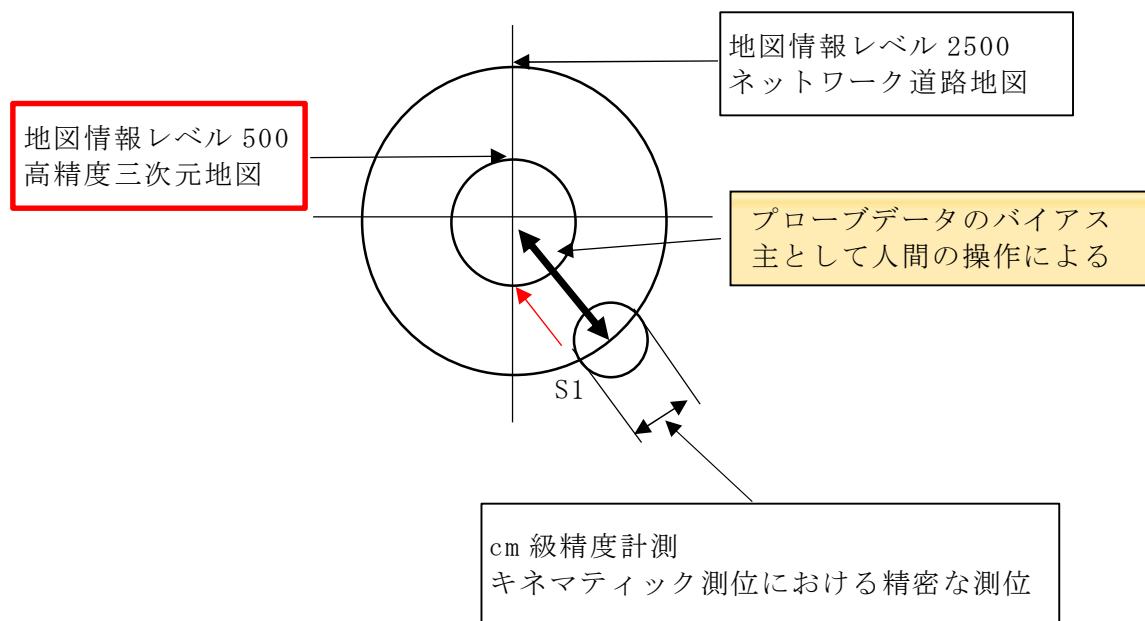


図 28 地図情報レベル 500 と計測機器のバイアス

【7-2】プローブデータを利用した車道リンクの検証

車線リンクとプローブデータを検証して得た人間のバイアスを期待精度として、ネットワーク道路地図の車道リンクを検証する。

浜松市内全域のネットワーク道路地図を借用しているため、大量のプローブデータ収集を試みる。大量に収集するためには、外部の協力を得て実施する必要がある。しかし、外部に委託すると機器の管理や様々な人間による個人差のバイアスが増加することが予想される。図 29 の S1 は外に離れると想定される。

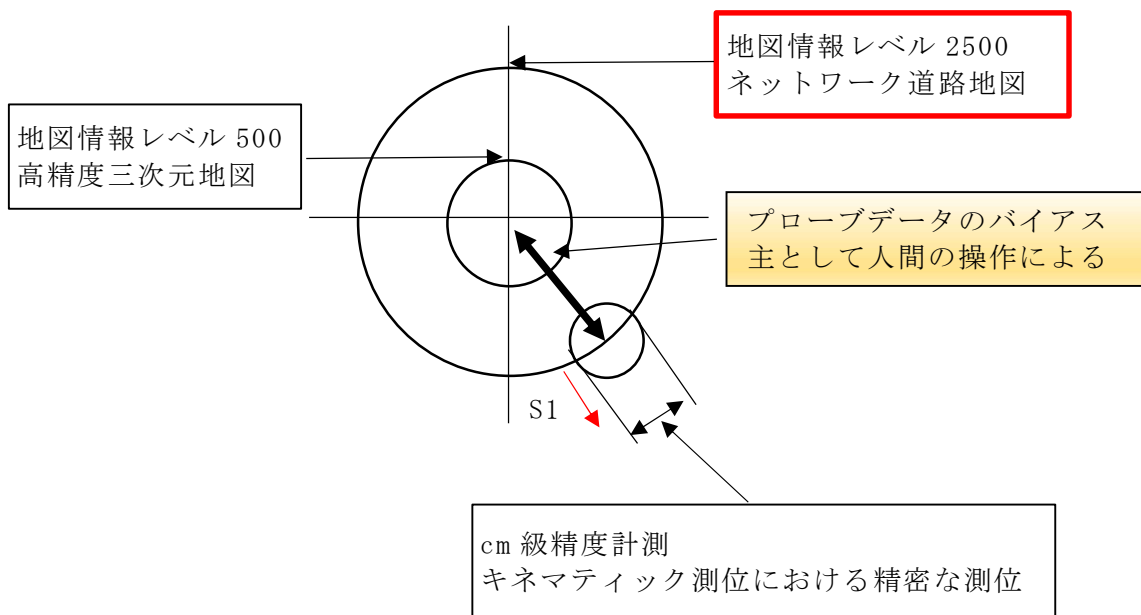


図 29 地図情報レベル 2500 と計測機器のバイアス

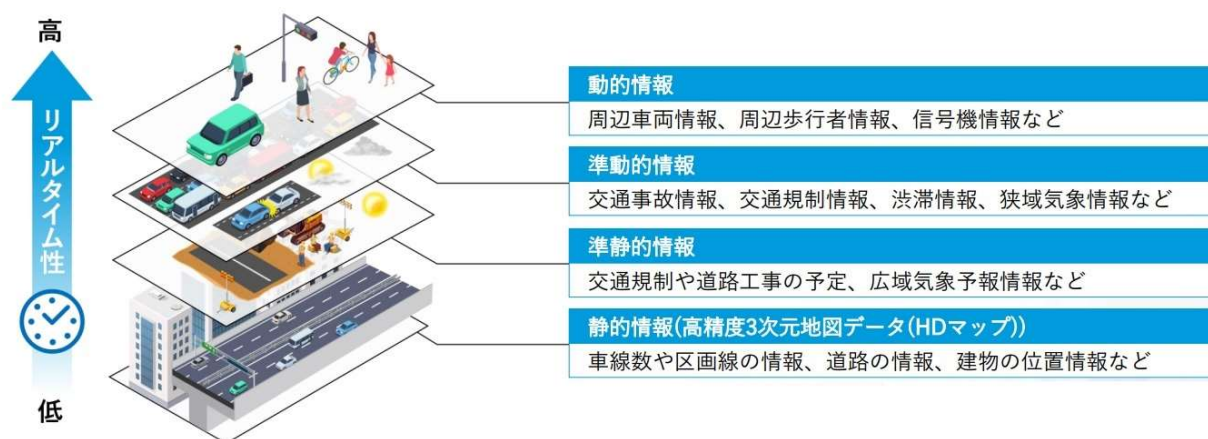
大量のプローブデータを取得した結果、Fix 解が極めて少なかったため、区域を限定して車道リンクの検証を試みた。

ネットワーク道路地図は、都市計画区域内を地図情報レベル 2500 と公表している [66]。さらに、地図情報レベル 500 に近い設計図を道路管理者から収集して修正しているため、供用開始時の道路についてはネットワーク道路地図の公表精度である 2500 を上回っている可能性がある。そこで、供用開始直後の区間において検証を実施する。

【第8章】高精度三次元地図を利用したプローブデータの精度検証

【8-1】ダイナミックマップの概要

ダイナミックマップは自動運転を支援するための様々な情報を組み合わせたデジタル地図である。図 30 に示すように4階層に分類されている。



出典：ダイナミックマッププラットフォーム株式会社 高精度三次元地図（HD マップ）の概要

図 30 ダイナミックマップの概念

車両や歩行者、信号機現示などの動的情報、交通事故や渋滞などの準動的情報、交通規制や道路工事などの準静的情報、道路の車線、区画線、建物、標識などの静的情報に分類される。

また、実在地物と仮想地物という概念もある。実在地物は道路の区画線や信号機、標識などを指し、仮想地物とは車両が走行することを想定した車線リンクや道路の接続性を表現する車道リンクがある。本章ではダイナミックマップの静的情報に位置づけられる高精度三次元地図の仮想地物である車線リンクを利用する。

国内ではダイナミックマッププラットフォーム株式会社が高精度三次元地図や高精度三次元点群情報を取り扱っているが、本研究で利用した高精度三次元地図は浜松市から借用したものであり、取得する基準や地物の内容は異なっている[67]。浜松市は自動運転の実証実験を実施している区間に限って、高精度三次元地図を作成していた。

【8-2】研究対象区間とプローブデータの収集

図 31 は借用した浜松市西区庄内町付近を中心に、車線リンク及びプローブデータを全域表示したものである。取得したプローブデータは毎秒1回取得されたものであり、対象範囲の1598ポイントのうち、高架区間において、2ポイントが単独測位（精度数m）、4ポイントがFloat解（精度数十cm～数m）以外は全てFix解（精度数cm）となっていた。従って、本研究で取得したプローブデータはロガーシステムの受信機取得時点では、ほぼ全域について、cm級の精度が期待できる。

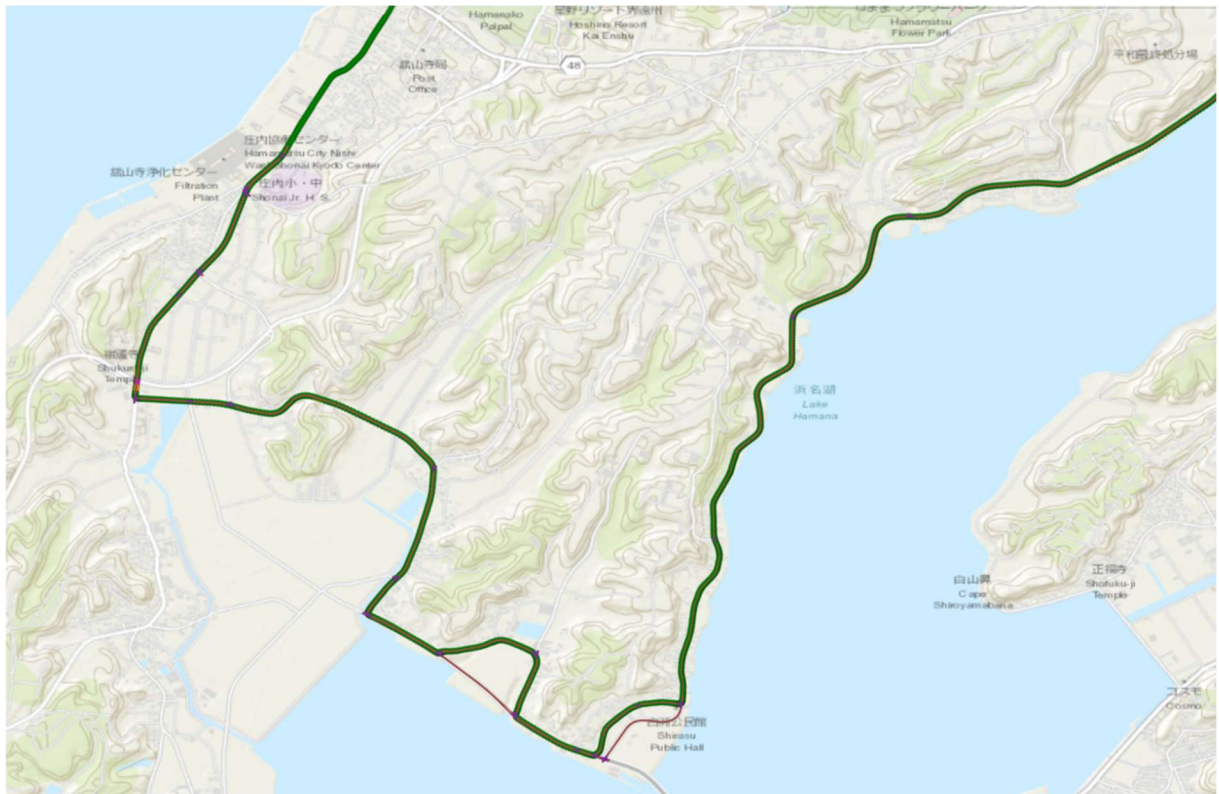


図 31 研究対象区間全体におけるプローブデータと車線リンクの表示

【8-3】データクレンジングによる研究対象区間の選別

データクレンジングは、データ分析の前処理段階で重要なプロセスである。データセットから不正確、不完全、不適切、関連性のない部分を検出して修正または除去する作業である。クレンジングされたデータは、分析の精度を高め、より信頼性のある結果をもたらす。

著しく逸脱したデータがないことについて、図 31 により全体を俯瞰し、確認する。

図 32 は拡大してプローブデータと車線リンクの重なり具合を表示したものである。概ね一致している。



図 32 プローブデータと車線リンクの表示

図 33 は交差点内部のプローブデータと車線リンクの例である。プローブデータ A と車線リンク 1 の較差を計算すべきところを、地理情報システムでは車線リンク 2 との較差を算出してしまう。データの構造上の問題である。

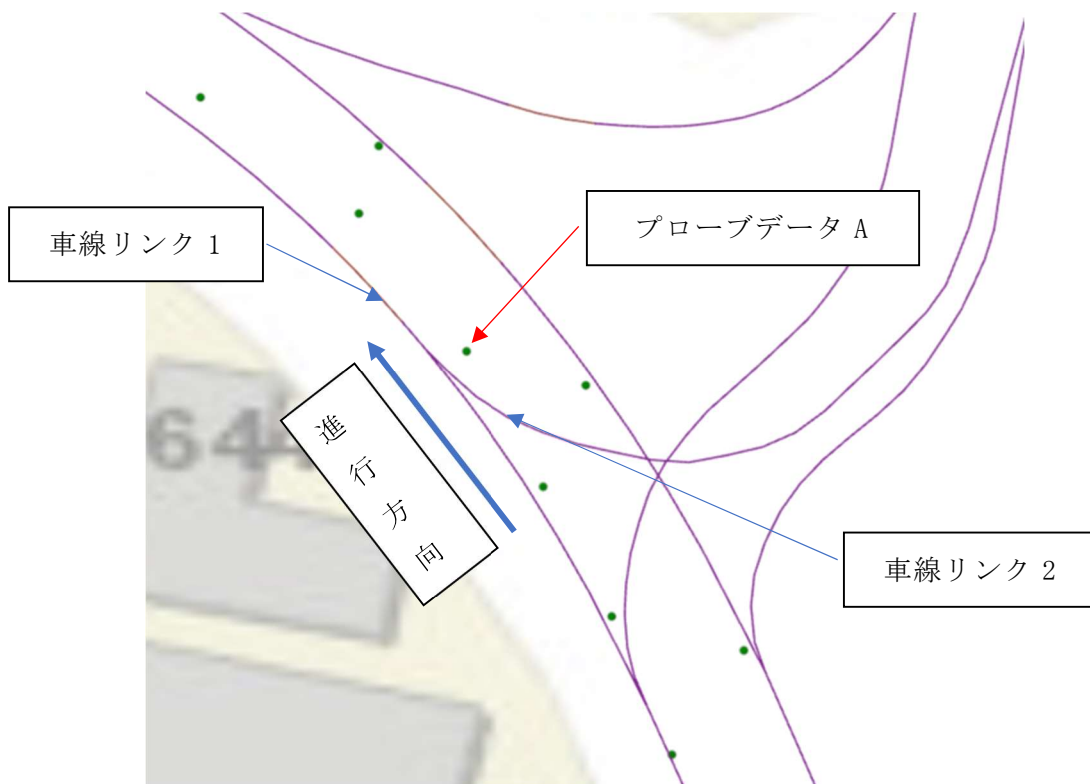


図 33 交差点内部でプローブデータが誤った車線リンクにマッチングする例

図 34 は交差点内部を右折する場合に，車線レーンを著しく逸脱する例である．個人差によるものである．

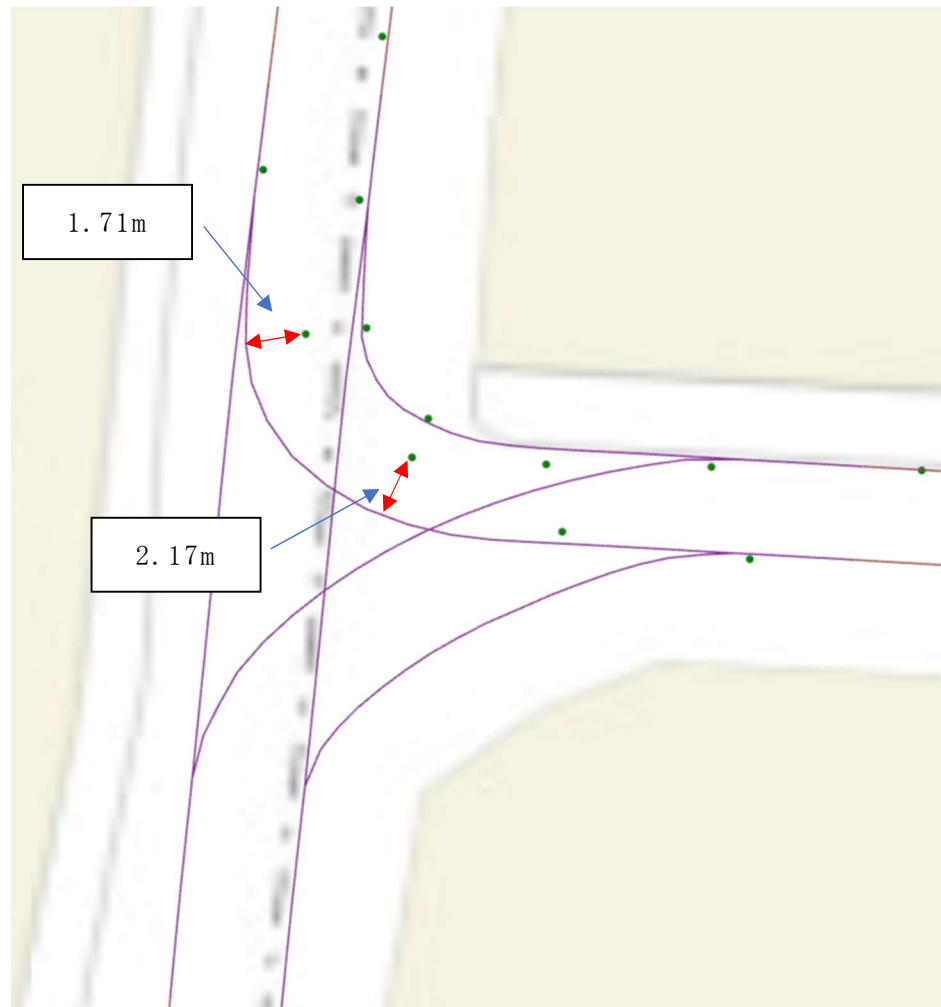


図 34 交差点内部を運転操作により車線リンクから逸脱する例

プローブデータのバイアスを最大1.75mと仮定している．全ての交差点において発生するものではないが，交差点内部は対象外としてデータを分析する．

交差点車線リンクと車線リンクは別フィーチャータイトして整備しているのて、交差点車線リンクではなく、車線リンクを対象にして処理を行った。

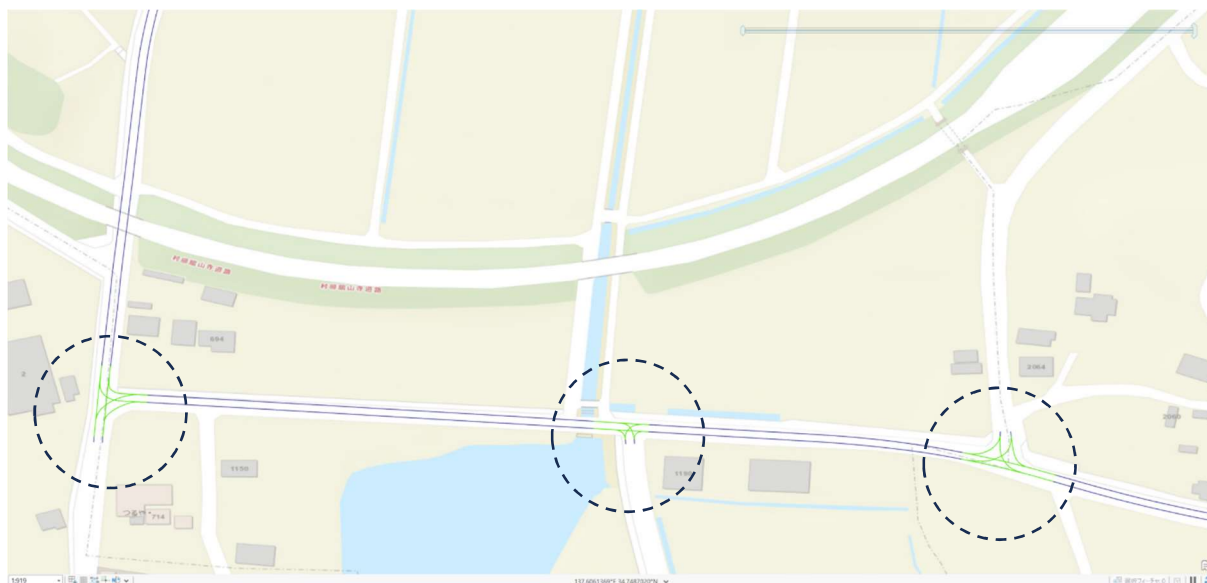


図 35 交差点車線リンクと車線リンクの表示例

【8-4】地理情報システムの処理手順と車線リンクとプローブデータの較差の結果

車線リンクとプローブデータの較差の計算処理は地理情報システムである ArcGIS Pro3.1.2 を利用する。プローブデータと車線リンクを選択し、near コマンドを利用することにより、数秒で各プローブデータの属性値に車線リンクの座標値や距離を追加することができる。

- ① 車線リンクとプローブデータを空間的に重ね合わせる。
- ② プローブデータにから鉛直方向に最も近い車線リンクの座標値をプローブデータの属性情報として新たに生成する。
- ③ プローブデータの属性に新しく生成した近傍の車線リンクの座標値とプローブデータが持つ座標値を比較することにより、プローブデータと車線リンクとの較差を求めることができる。

図 36 は西側から東側に走行したプローブデータと車線リンクの較差毎にプローブデータ数を集計したものである。図 37 は東側から西側に走行したプローブデータと車線リンクの較差毎にプローブデータ数を集計したものである。

両図ともプローブデータと車線リンクの較差は概ね 30cm 以下に集中している。

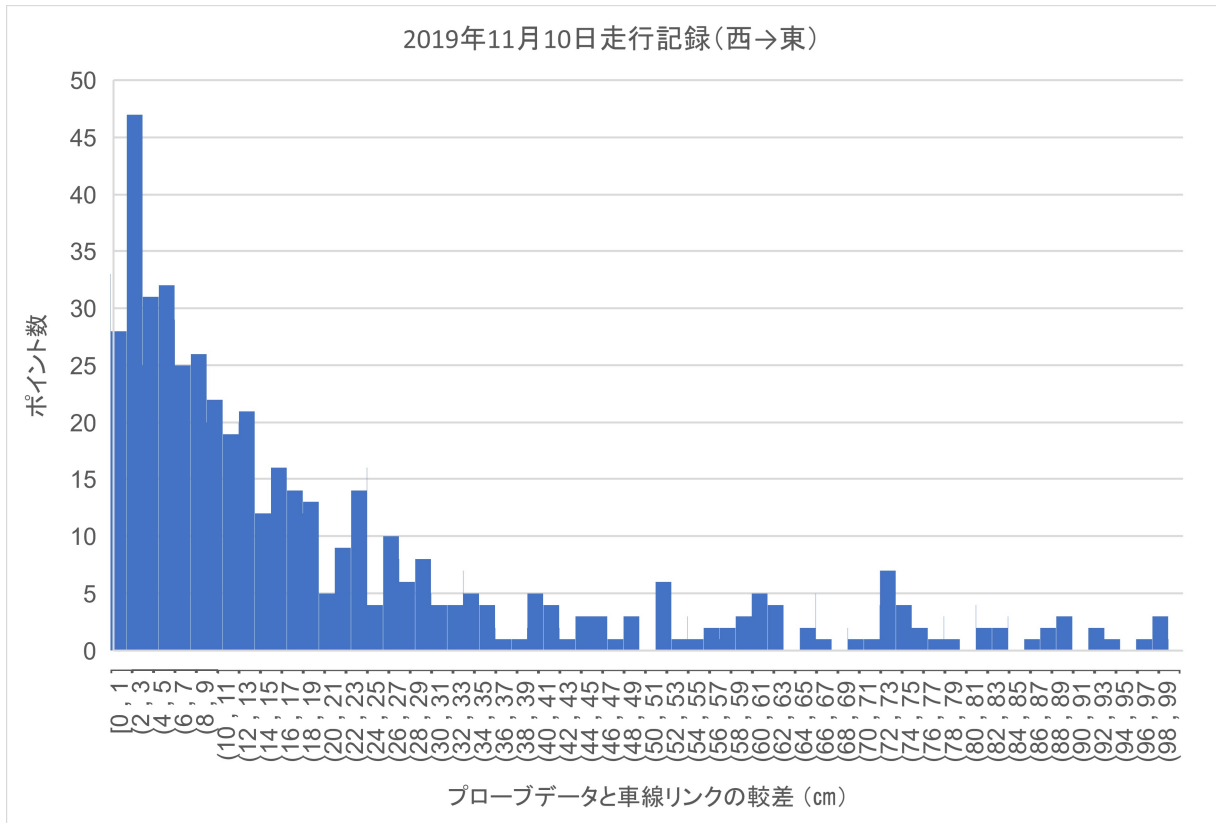


図 36 プローブデータと車線リンクの較差毎プローブデータのポイント数 (西→東)

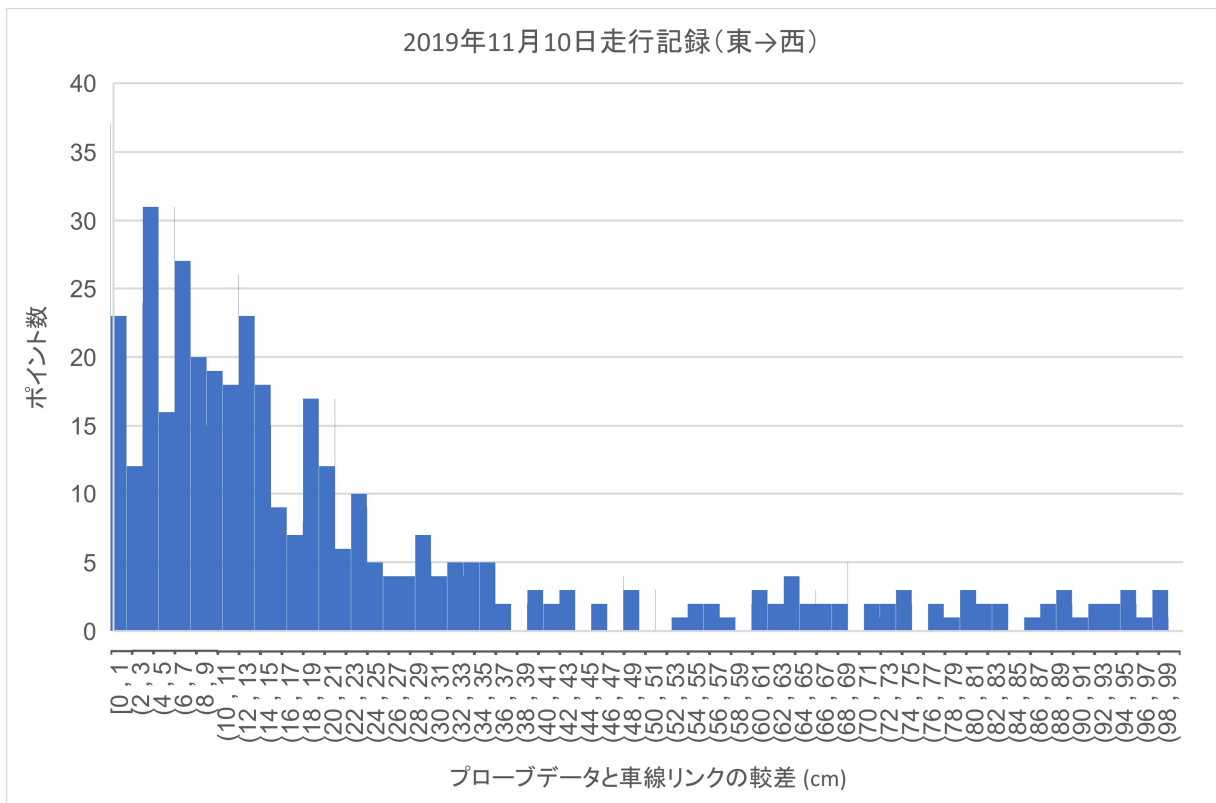


図 37 プローブデータと車線リンクの較差毎プローブデータのポイント数 (東→西)



図 38 道路幅員 4m 未満の区間（一条線化）

高精度三次元地図作成時の取得基準によると、道路幅員 4m 未満区間は図化時に車線リンクを転位して車線の中央に寄せ、一条線化して描画する仕様となっている。研究区間では図 38 に示す区間のみであり、対象区間から外して集計をした。図 39、図 40 は道路幅員 4m 未満の区間を削除した結果である。

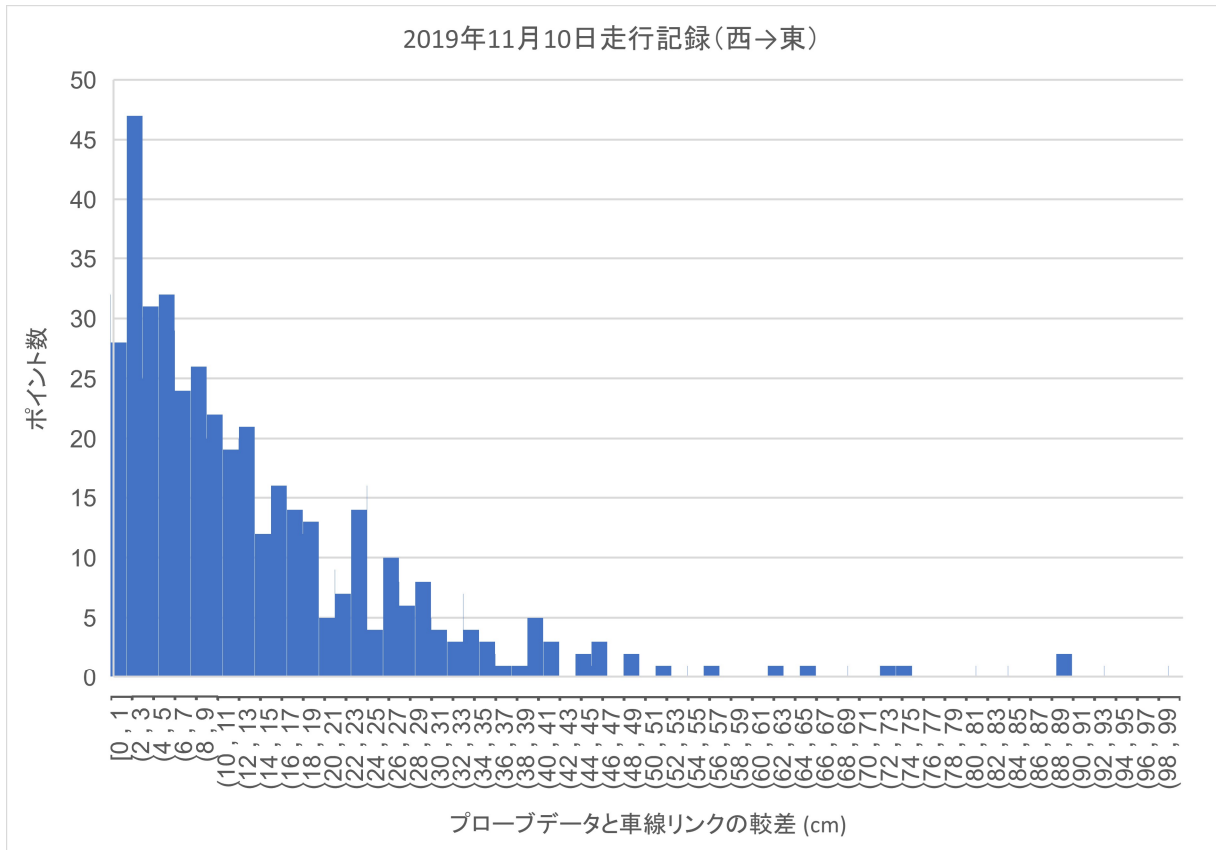


図 39 道路幅員 4m 未満区間における較差毎プローブデータのポイント数 (西→東)

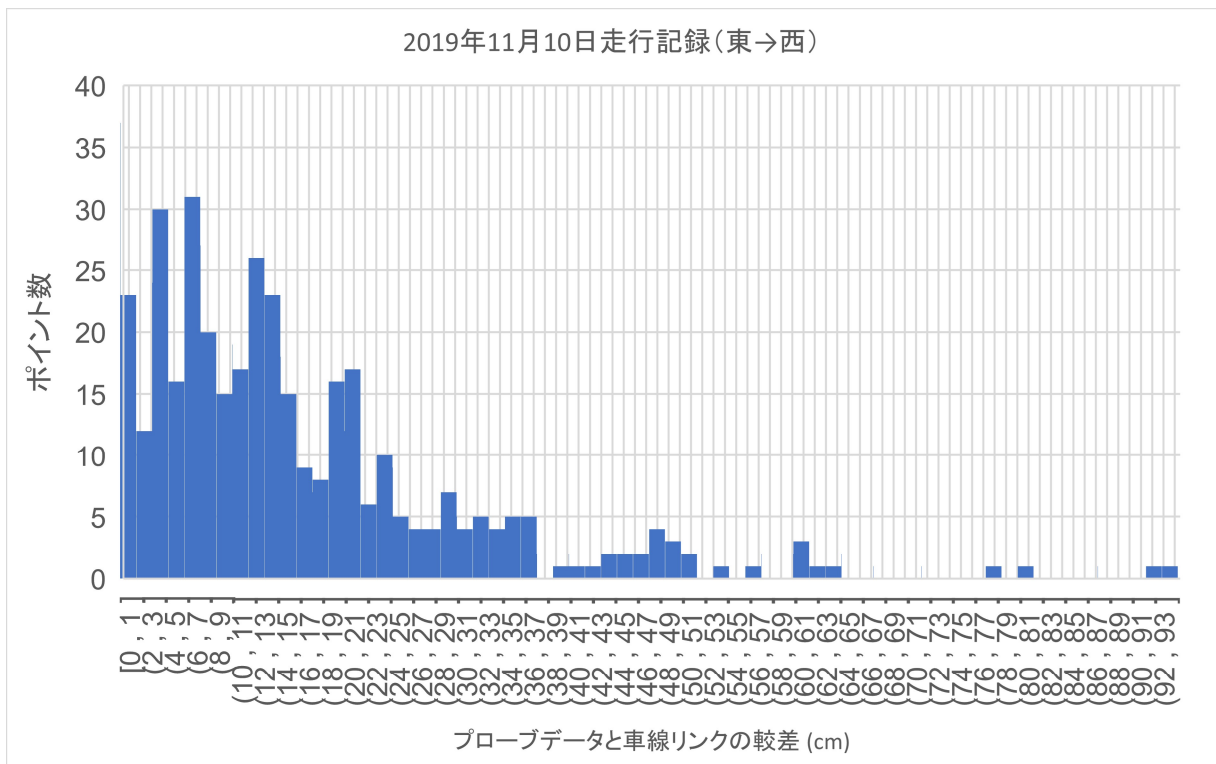


図 40 道路幅員 4m 未満区間における較差毎プローブデータのポイント数 (東→西)

幅員 4m 未満の車線リンクを車線中央部分に寄せて一条線化した区間を除いたことにより，図 39 及び図 40 は図 36 及び図 37 と比較して，プローブデータと車線リンクの較差が大きいポイント数が減っている。

次に，道路環境による精度低下について考慮する。

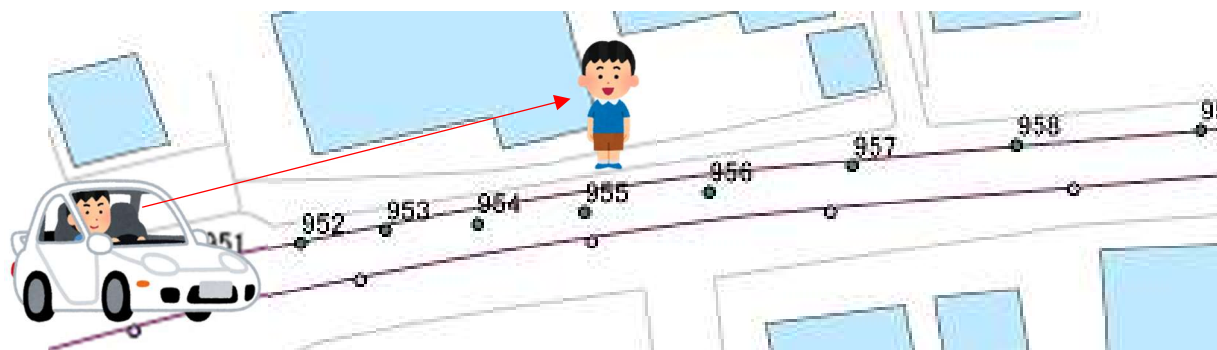


図 41 道路上の障害物を回避する例

図 41 は車両が道路上の歩行者や駐停車の障害物を避けようとして，右方向に寄った事例である。発生するタイミングや場所は特定することができないが，回避行動をとったと想定される車線リンクとプローブデータの較差 0.5m 以上のデータを除去する。

除去した結果を図 42 及び図 43 に示す。

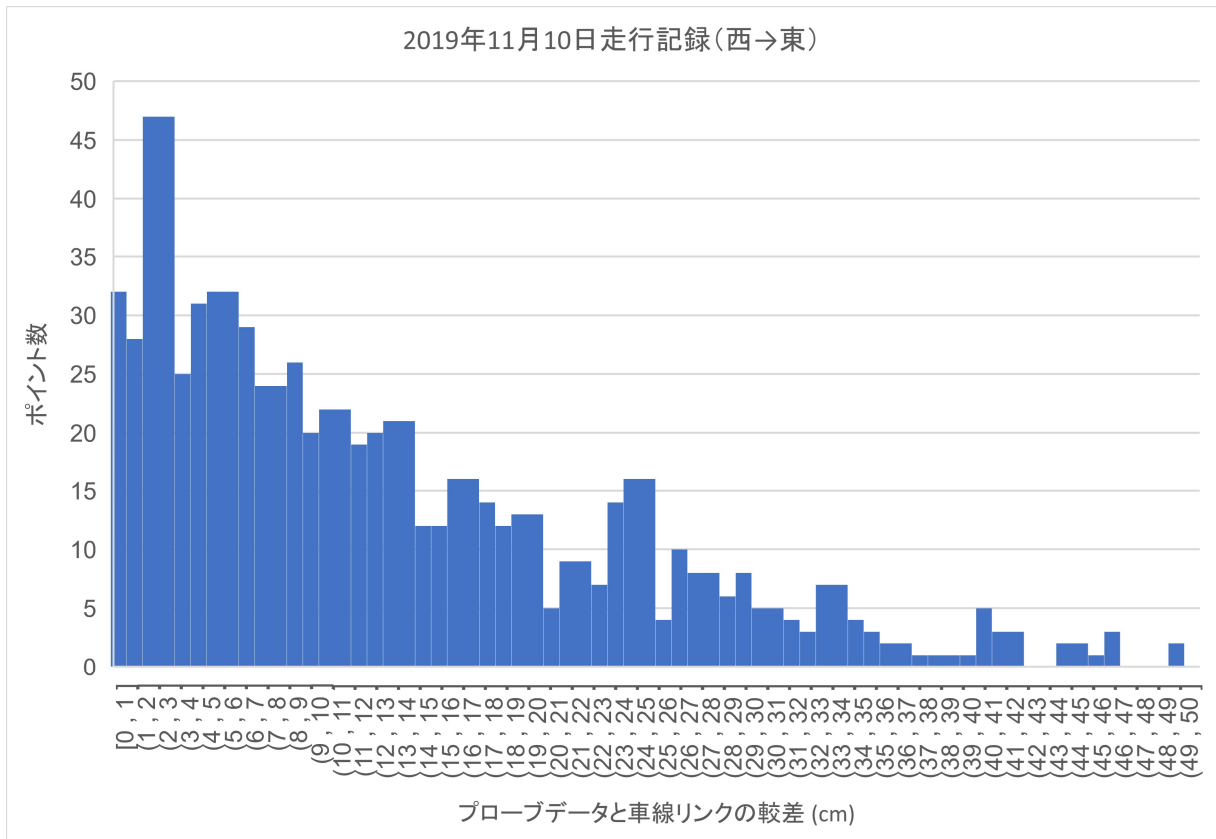


図 42 較差 0.5m 以上を削除した較差毎プローブデータのポイント数 (西→東)

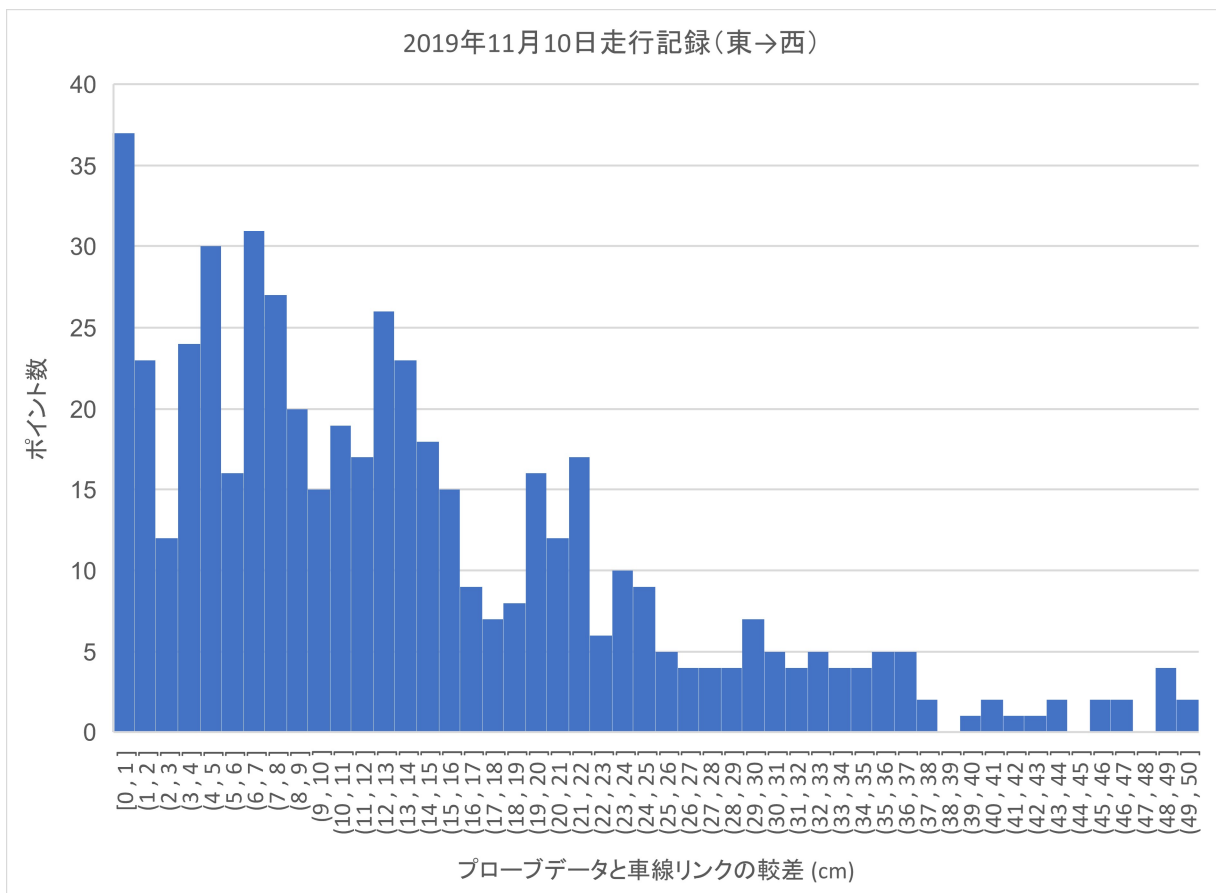


図 43 較差 0.5m 以上を削除した較差毎プローブデータのポイント数 (東→西)

【8-5】車線リンクの検証

精度に関する検証は「国土地理院技術資料 A・1-No.306 品質の要求，評価及び報告のための規則 Ver. 1.0 2005(平成 17)年 1 月（初版） 2007(平成 19)年 3 月（一部改訂）国土交通省国土地理院」[68]（以下，地理院規則という。）を参照した。地理院規則によると，精度に関する計算式は次式で示されている。

$$\text{標準偏差} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (xi - Xi)^2 + (yi - Yi)^2}{n-1}}$$

xi : データ集合内の検査対象のデータの位置の X 座標

yi : データ集合内の検査対象のデータの位置の Y 座標

Xi : より正確度の高いデータの位置の X 座標

Yi : より正確度の高いデータの位置の Y 座標

n : サンプル数

地理院規則は地理情報標準プロファイル (JPGIS) [69]に基づく空間データの品質評価のために必要となる基本的な事項について記載している。本研究では，検査対象のデータの位置座標をプローブデータとし，より正確度の高いデータの位置座標は MMS を用いて取得した地図情報レベル 500 の高精度三次元地図における車線リンクとする [70]。

表 9 にプローブデータと車線リンクの較差について取りまとめる。

表 9 道路構造等により分類した較差等の集計

	交差点を除いた区間	幅員 4m 未満で一条線化した区間を除いた区間	プローブデータと車線リンクの較差が 0.5m 以上を除いた区間	備考
西→東				
ポイント数	704	605	589	総ポイント数：820
総点数に対する割合 (%)	86%	74%	72%	
平均較差 (m)	0.22	0.15	0.13	
標準偏差 (m)	1.17	0.64	0.54	
東→西				
ポイント数	623	545	526	総ポイント数：778
総点数に対する割合 (%)	80%	70%	68%	
平均較差 (m)	0.23	0.16	0.14	
標準偏差 (m)	1.23	0.70	0.59	
合計				
ポイント数	1327	1150	1115	総ポイント数：1598
総点数に対する割合 (%)	83%	72%	70%	
平均較差 (m)	0.22	0.15	0.14	
標準偏差 (m)	1.20	0.67	0.56	

道路構造上の交差点区間を対象から外し、集計したところ、往復走行距離約 20 km の約 83% が該当し、往復の平均較差は 0.22m であった。次に、幅員 4m 未満で車線リンクを中央に転位する区間を除くと、72% となり、平均較差は 0.15m となった。この区間においては場所が特定できるため、精度を向上するための方策がたてやすい。一方で、道路上障害物等の影響による道路環境による較差は場所が特定できないため、精度向上の方策を立てることが困難である。障害を回避するための行動として 0.5m 以上の較差を除いたところ、プローブデータと車線リンク平均較差は 0.14m となり、0.01m の改善に留まった、ポイント数から想定される距離も 70% になり、2% 程度減少するのみであった。

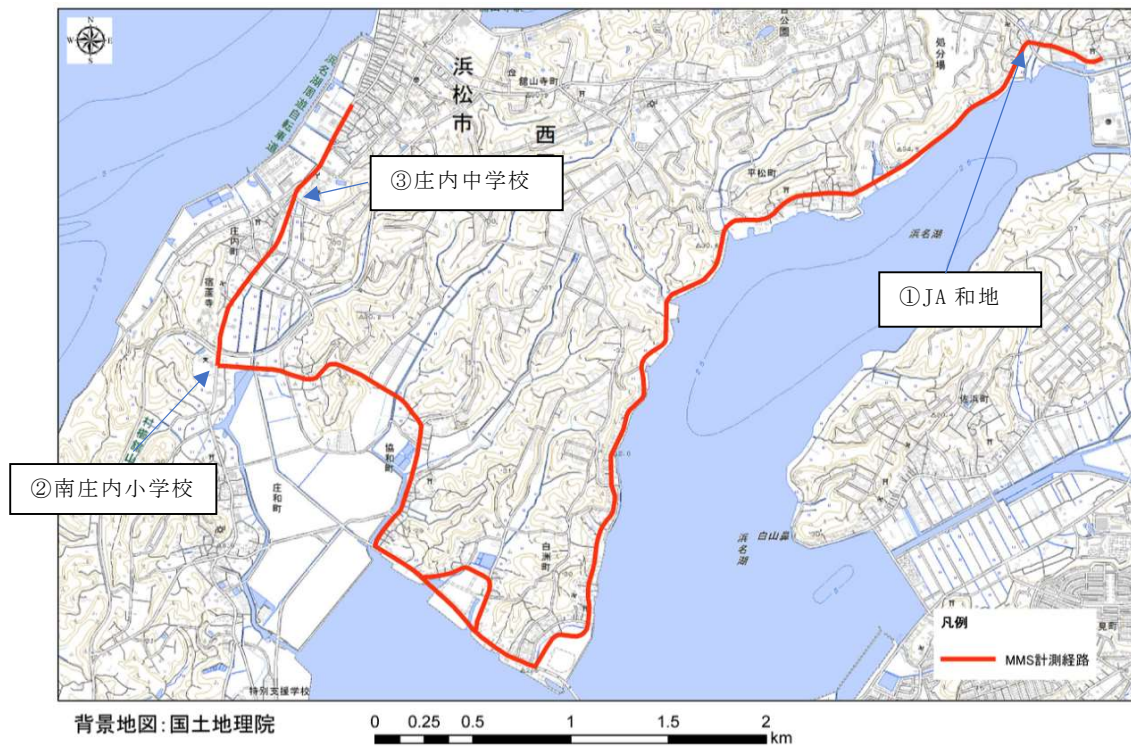
また、標準偏差を作業規程の準則に照らし合わせると、交差点以外の全区間では地図情報レベル 2500 程度、そこから幅員 4m 未満道路を除いた区間及び道路環境による影響として 0.5m の較差を除いた区間では地図情報レベル 1000 程度となる。

幅員減少区間においては、車線リンクの転位によるものであるから、改善が容易である。この区間においては、プローブデータが実際に走行した軌跡であり、高精度三次元地

図の作業規程により，強制的に転位した車線リンクより，実際の車線リンクとしての位置精度はプローブデータの方が高いと考えられる．

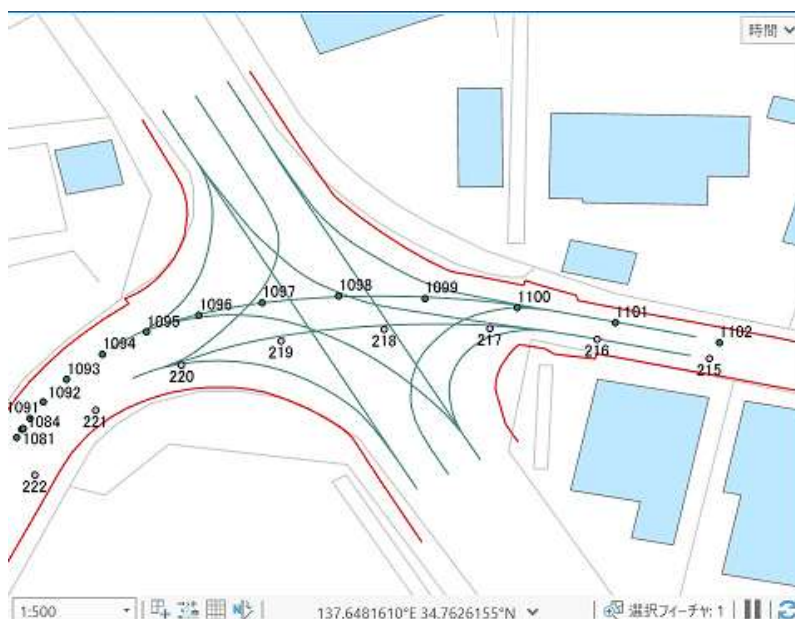
【8-6】交差点における精度

参考として、図 44 に示すように、三か所の交差点にてプローブデータと交差点車線リンクの較差を確認する。各交差点での較差は道路の線形及び個人差によりばらつきがあると考えられる。交差点内部を直進する場合は較差が低いが右折する場合に較差が大きくなる傾向がある。



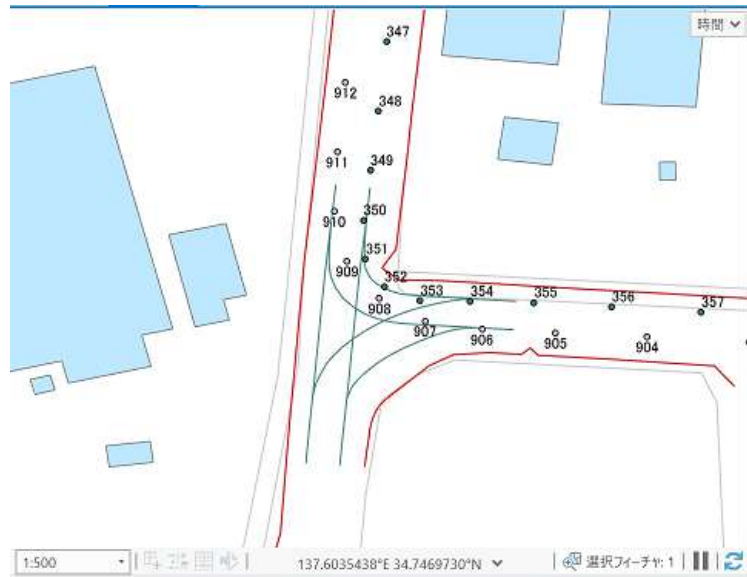
① JA 和地交差点

ポイント	最短距離(m)	
西→東		
1095		0.21
1096		0.12
1097		0.07
1098		0.12
1099		0.11
1100		0.23
1101		0.08
東→西		
216		0.01
217		0.29
218		0.44
219		0.48
220		0.32



②南庄内小学校

ポイント	最短距離(m)
西→東	
350	0.26
351	0.13
352	0.13
353	0.55
354	0.32
東→西	
906	0.18
907	0.42
908	2.17
909	1.71
910	0.16



③庄内中学校

ポイント	最短距離(m)
西→東	
273	0.17
274	0.25
275	0.28
東→西	
985	0.16
986	0.32
987	0.13
988	0.51

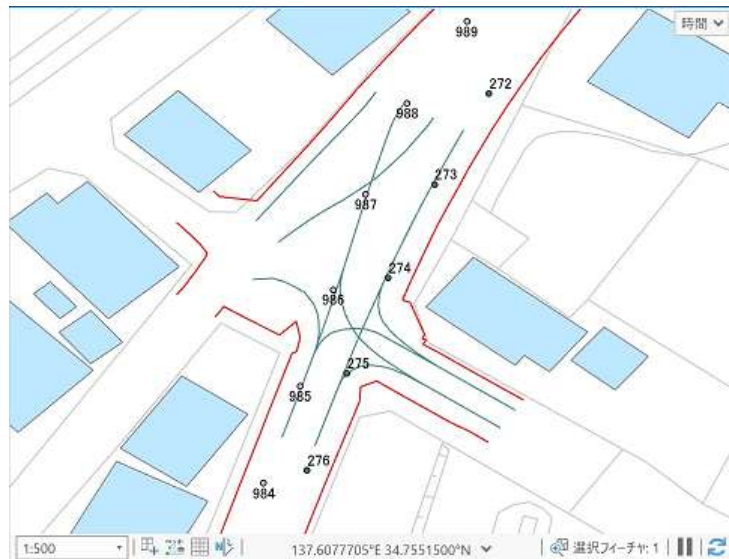


図 44 交差点の位置図と各交差点の拡大状況

【8-7】想定される一般道路でのバイアス

当初，一般道路走行時のバイアスは1.75mを想定したが，実験結果から研究対象区間において，比較的道路環境の良い状態で走行する場合の人間の運転操作によるバイアスは図45及び図46に示すように0.14mと推察される。

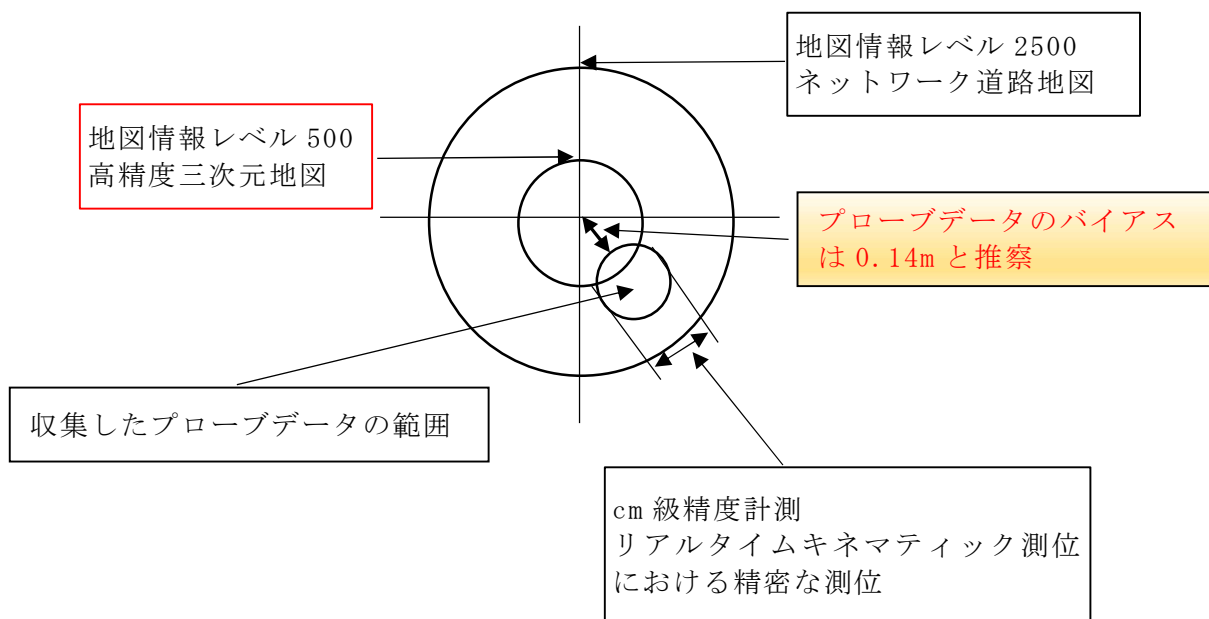


図 45 地図情報レベルとプローブデータのバイアス

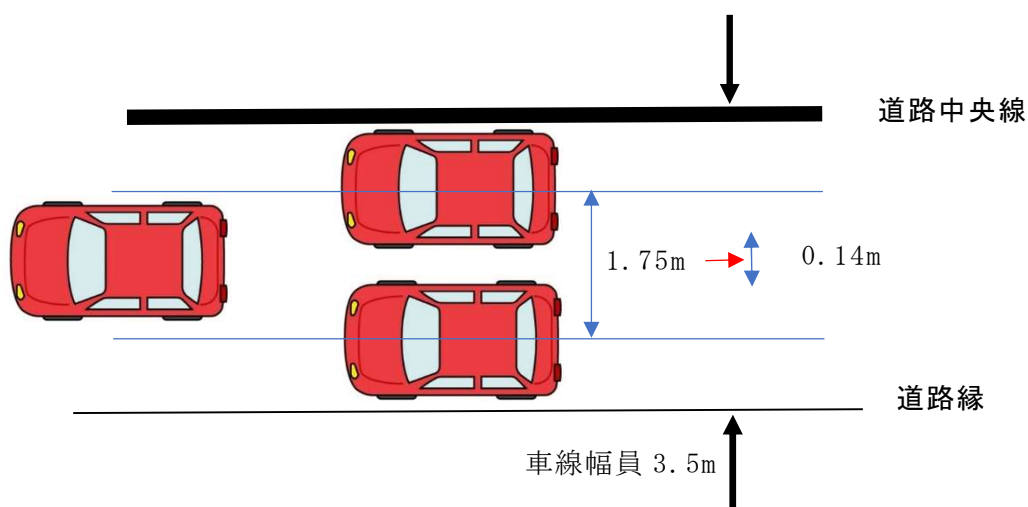


図 46 道路におけるバイアスのイメージ

【8-8】高精度三次元地図に求められる精度

自動運転で利用する車線リンクの必要となる精度については想定する車両速度や道路構造等も含めて考察する必要がある。

高速道路などは幅員も十分にあり，車道中央線や車線境界線が標示されている．図 47 は「図解よくわかる衛星測位と位置情報」に記載されていた高速道路のイメージ図に研究対象路線の最小幅員を加筆し，筆者が修正したものである．高速道路においては車線幅 3.5m，車両幅 1.8m，車線の真中を真値とすると 0.85m のマージンに対しておよそ 99% の信頼性を想定すると約 3 分の 1 の 0.3m 程度の精度が必要となる．

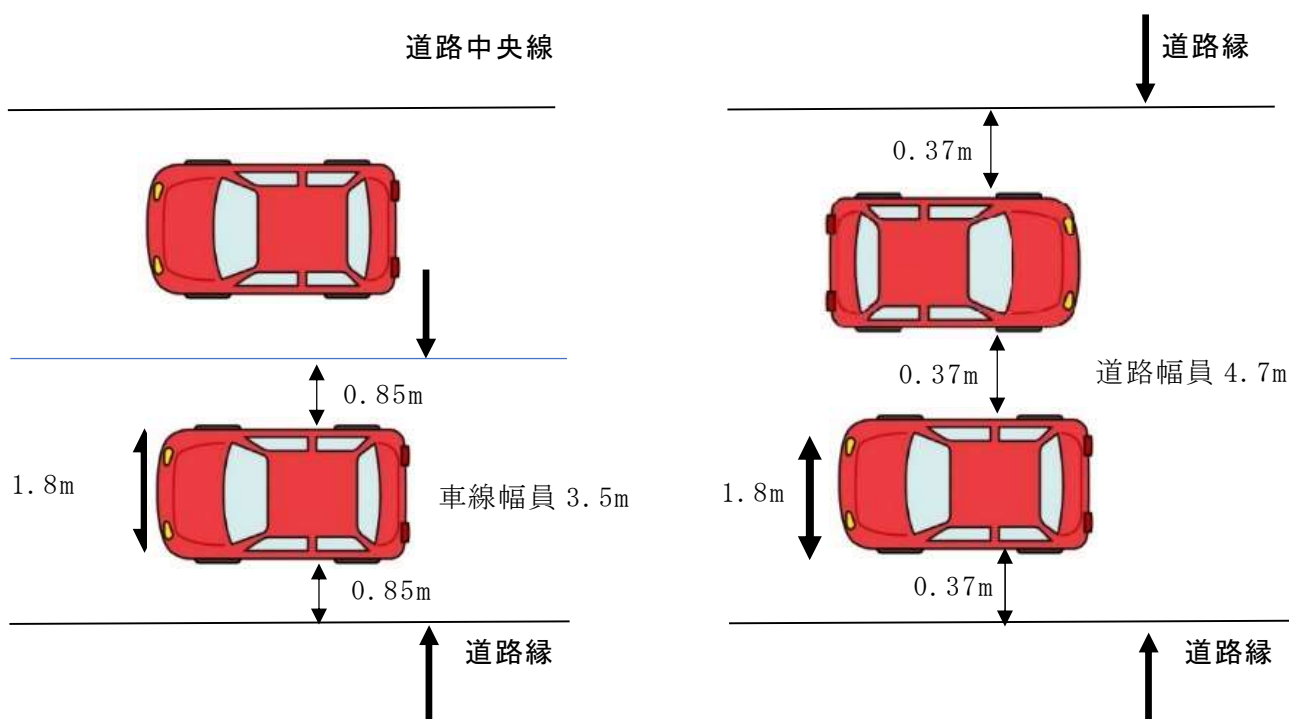


図 47 道路幅員狭隘区間における車両緩衝区間のイメージ

本研究の対象路線は県道であるが，道路台帳上の最小幅員は 4.7m となっている．最小幅員付近には中央線の標示はなく，車両幅 1.8m を想定し，すれ違いをする場合は路肩縁と道路中心部分を均等に 3 分の 1 とすると 0.37m のマージンしか確保できない．前述の条件で 99% の信頼性を想定し，約 3 分の 1 とすると 0.12m 程度の精度となってしまふ．すれ違いを認めなければ 1.45m のマージンを確保でき，0.48m 程度の精度となる．

交通量が少なく，制限速度も遅い区間では車線リンクの地図情報レベルを下げることや交通規制等の変更等を検討することも重要である．従って，自動運転に必要な高精度三次元地図に求められる精度は想定速度，幅員等を考慮し，細分化して検討していく必要があると考える．

高精度三次元地図において狭隘な道路区間は車線リンクを道路中心部に寄せてデータ化する仕様となっている。本研究では真データを高精度三次元地図の車線リンクにしているが、狭隘な区間や工事による規制区間等についてはプローブデータの方が実際の走行軌跡を正確に反映している場合がある。

キネマティック測位を利用して取得した GNSS アンテナにおける測位は理論上、数 cm 程度の精度を有している。交差点等を除く、比較的直線的な箇所は区間の 70% 程度であり、高精度三次元地図とプローブデータの較差の平均値が 0.14m となっていた。

作業規程の準則では地図情報レベル 500 の水平位置の標準偏差が 0.25m、地図情報レベル 1000 が 0.70m となっている。本研究結果の標準偏差が 0.56m であるから、地図情報レベル 500 は満たさないが、地図情報レベル 1000 以上に位置づけられる。研究区間は限定的であるが、較差が少なくなれば、車線リンクをプローブデータで補える可能性は高い。自転車、駐車車両などの追い越しにより、プローブデータと車線リンクの較差が大きくなった区間は場所や日時を特定することは困難であるが、交差点や幅員狭隘区間は明確化していることから、別の手段によりプローブデータの精度を向上させることも可能であると考えられる。また、プローブデータの蓄積を増やし、統計的に処理することにより補正することも考えられる。

久保田ら [8] がプローブデータを用いてネットワーク道路地図の位置ずれの自動補正の開発において、研究対象区域内の車道リンク 258 区間、ノード 194 点の内、検証点は 28 点のノードでの誤差は RMSE で 3m 程度と報告している。本研究結果では往復 20 km 区間 1327 点を検証していることから、サンプリングのスケールも異なっている。久保田らが利用したプローブデータは単独測位を利用していることから数 m の誤差を想定しているものであり、本研究で利用したキネマティック測位によるプローブデータは、単独測位に比較して、大きく改善されている。

渡辺ら [71] は車線リンクを点群情報やカメラ画像から生成する方法について研究を行っている。今井ら [72] は将来高精度プローブデータの取得が可能となると考えて、様々なユースケースを想定し交通分析を行っている。

類似研究でもプローブデータや車線リンク等の研究が行われているが、キネマティック測位を利用して収集したプローブデータと仮想地物である車線リンクと比較検証した事例はない。本研究ではキネマティック測位を利用して収集したプローブデータの位置精度を車線リンクとの較差を分析することによりが示すことができた。

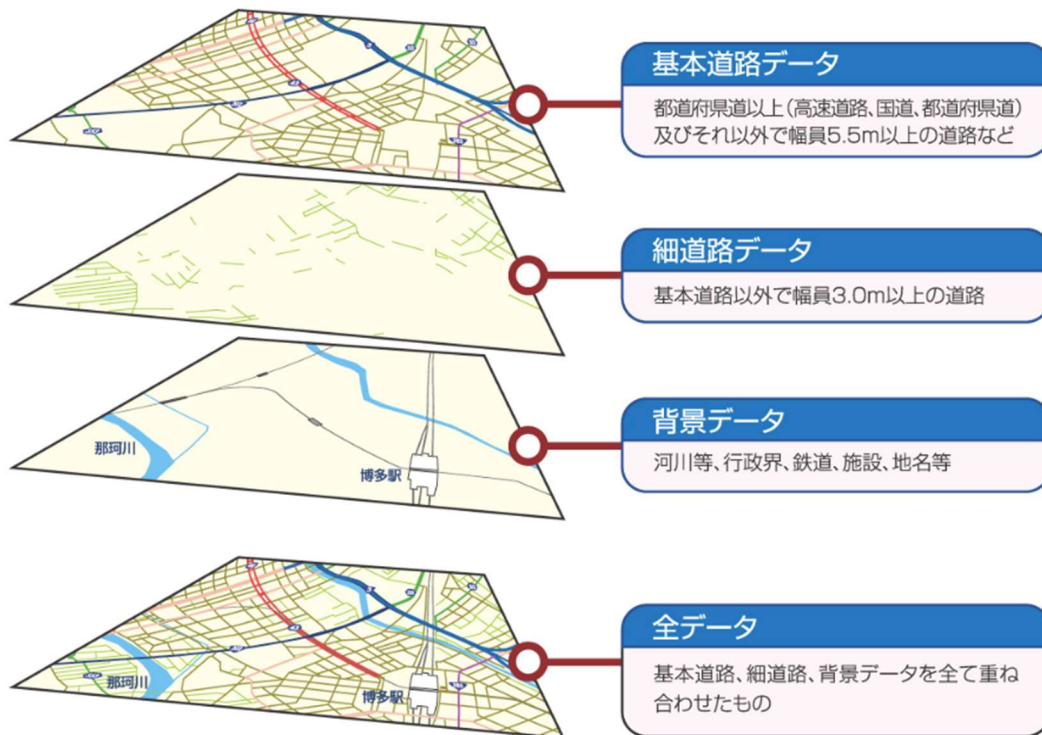
【第9章】プローブデータを利用したネットワーク道路地図の検証

【9-1】一般財団法人日本デジタル道路地図協会 (DRM 協会)

道路が安全かつ快適に利用されるためには、道路自体の整備・管理に加え、様々な情報サービスが必要である。道路管理者から提供される基本的な情報に加え、各種団体や企業等からの情報を付加することが重要である。

DRM 協会は、カーナビゲーションへのニーズが高まる中で、1988年8月に設立された。DRM 協会が提供する DRM-DB は道路ネットワーク構造となっている。当初は地図情報レベル 50000 地形図を利用し、DRM-DB を整備していたが、市場拡大や販売競争の激化に伴い、データの精度向上が求められ、測量法に基づいて整備された地図情報レベル 25000 を利用した DRM-DB の整備が 1995 年度に完了した。加えて、都市計画区域を中心に地図情報レベル 2500 基盤地図情報による位置精度の向上を 2011 年から 2016 年にかけて実施している。

DRM-DB はノードとリンクの組み合わせで構成されている。ノードは交差点や構造変化点等であり、リンクはノード間を連結する線分である。対象となる道路は高速道路、都市高速、国道、主要地方道、一般都道府県道、政令市市道等である。図 48 に示すように道路データは基本道路データ（都道府県道または 5.5m 以上幅員）と細道路データ（基本道



出典：一般財団法人日本デジタル道路地図協会ホームページ

図 48 デジタル道路地図 (DRM-DB) の構成

路データを補完する幅員 3.0m～5.5m) で構成されている[73]。本研究では DRM-DB を DRM 協会から借用し、基本道路データと細道路データを車道リンクとして取り扱うものとする。

【9-2】DRM-DB の利用

1996 年には道路交通情報通信システム (VICS) サービスが開始され、道路渋滞や事故、規制等の情報が提供されるようになった。これらの位置を特定するために、DRM-DB が利用されることになり、経路探索が適切に実施され、目的地までの所要時間精度が飛躍的に向上した。その他、特殊車両の通行許可の手続きや交通事故の分析、道路交通センサスにも DRM-DB は利用されている[74]。

【9-3】国際的な活動

高度交通システム (Intelligent Transport Systems. 以下、ITS という.) については各国において自動車、通信、道路インフラ等様々な分野で研究開発が実施されている。カーナビゲーションを含むデジタル道路地図は ITS を支える重要な技術である。

ISO TC204 WG3 (ITS database technology)において我が国はリーダ国となっており、DRM 協会は国内における受入団体となっている[75][76]。

以降より、DRM-DB をネットワーク道路地図と表記する。

【9-4】ネットワーク道路地図

ネットワーク道路地図はカーナビゲーション等のデータとして広く普及している。また、都市計画や交通解析等のために車両の数や速度等をネットワーク道路地図に紐づけたプローブデータを提供している企業等も複数ある。プローブデータの元となる車両位置や各種情報の収取方法はカーナビゲーション、ドライブレコーダー、衝突防止警報補助装置等がある。ETC2.0 は路側機がないと取得ができないが、路側機は高速道路に 1700、国道に 1900 程度整備されている。ゼンリンデータコム株式会社では Honda 車両から通信モジュールを通して収集しているデータを道路ネットワーク地図の車道リンクに紐づけてデータを収集している[77][78]。住友電工システムソリューション株式会社は、Honda 車両からの情報に基づき統計処理を行い、ネットワーク道路地図を利用して、プローブデータを提供している[79]。これらのデータはネットワーク道路地図に紐づけて、車道リンクごとに交通量や加速度などのデータを提供している。

ネットワーク道路地図は地方整備局等、都道府県、政令指定都市、市町村、高速道路会社、道路関係公社など全国の道路管理者の資料と新刊地図(基盤地図情報)により毎年データの更新を行っている。都道府県道以上の基幹的な道路では、バイパスや新設道路など新たに整備される道路等について、供用開始の 2 年前に道路管理者から工事図面等資料

の提供を受けてデータ化している。すなわち、道路管理者から提供されている供用開始前の現存しない道路情報も提供されている[3]。

本章ではネットワーク道路地図の車道リンクに着目する。車道リンクは車線リンクと同様に仮想地物に分類される。本章でも前章と同様な手法により、プローブデータと車道リンクの較差を分析する。

プローブデータと車道リンクの較差が少なければ、図 49 に示した道路ネットワーク地図を更新する際に利用することが期待できる。

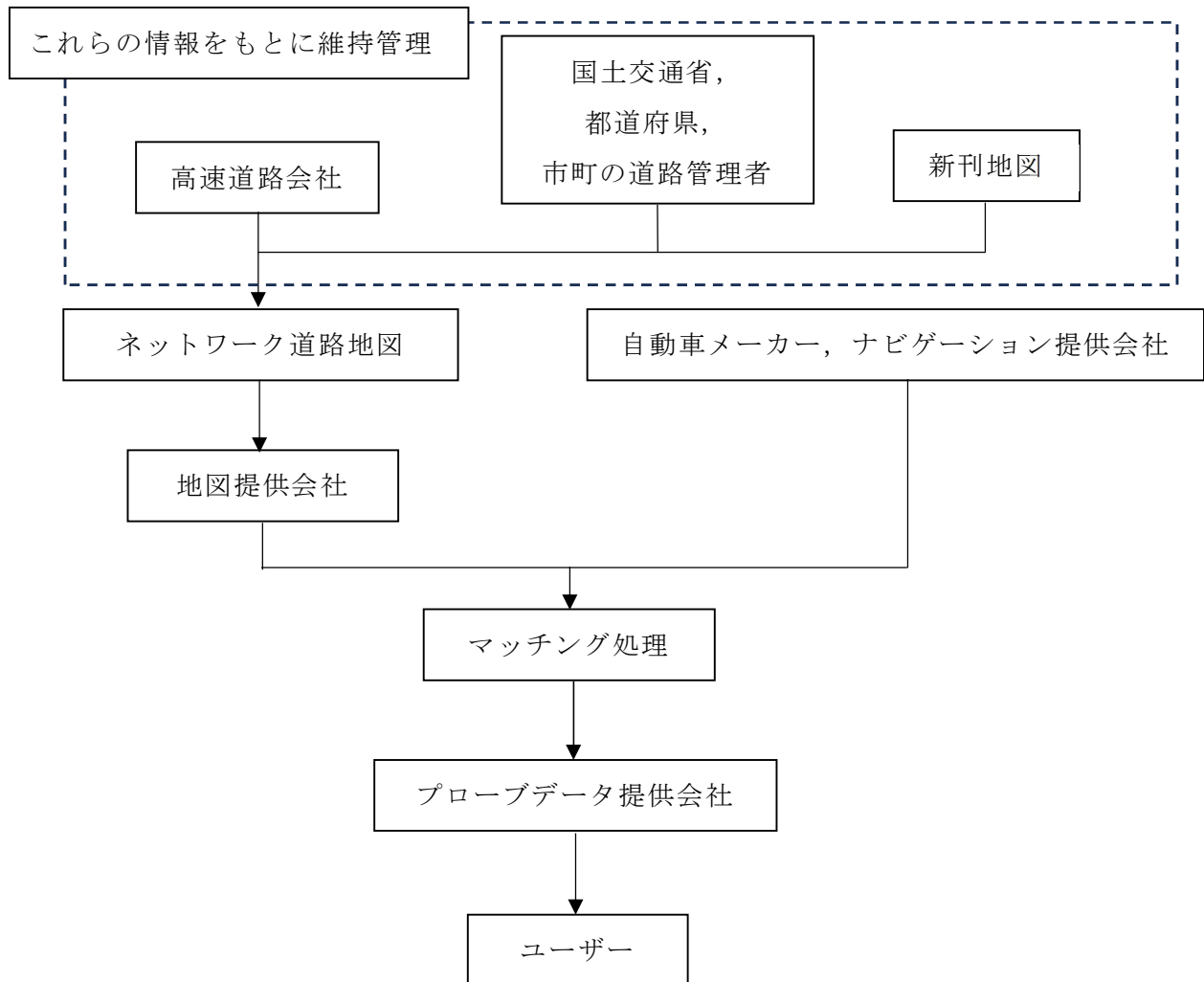


図 49 プローブデータ作成工程とデータの流れ

【9-5】広範囲データの収集

小原ら[80]は加古川市と藤沢市において公用車にスマートフォンを設置し、プローブデータを収集することにより、ネットワーク道路地図のカバー率を算出し、公用車の稼働状況から最適な公用車の運行管理について研究を行っている。加古川市で171台、藤沢市で129台の公用車を利用し、1年間のデータを収集した結果、両市とも95%以上のカバー率があったと報告している。加古川市の道路延長は1,093 km[81]、藤沢市の道路延長は1,319 km[82]となっていることから、概ね公用車1台当たり8.04 kmをカバーしたことになる。両市の95%以上のカバー率を目標とした場合、浜松市の道路延長は8,500 km[83]であることから1年間で実現するには約1,000台の公用車に設置するか、両市の公用車の平均である150台に設置した場合は6年程度の期間が必要となる。本研究はプローブデータの位置精度に着目していることから研究目的は異なっているが、市内全域をデータ化するうえで、参考になる研究である。

本研究ではネットワーク道路地図を浜松市内全域にて借用したので、大量のデータを収集して分析することを試みた。より多くのデータを収集し、分析することにより研究結果のスケラビリティについても検討ができる。

但し、GNSS アンテナを車両内に設置するため、衛星測位の電波受信の低下が懸念され、受信機のバイアスが大きくなる可能性がある。また、複数人のドライバーが運行するのでバイアスが大きくなる可能性もある。

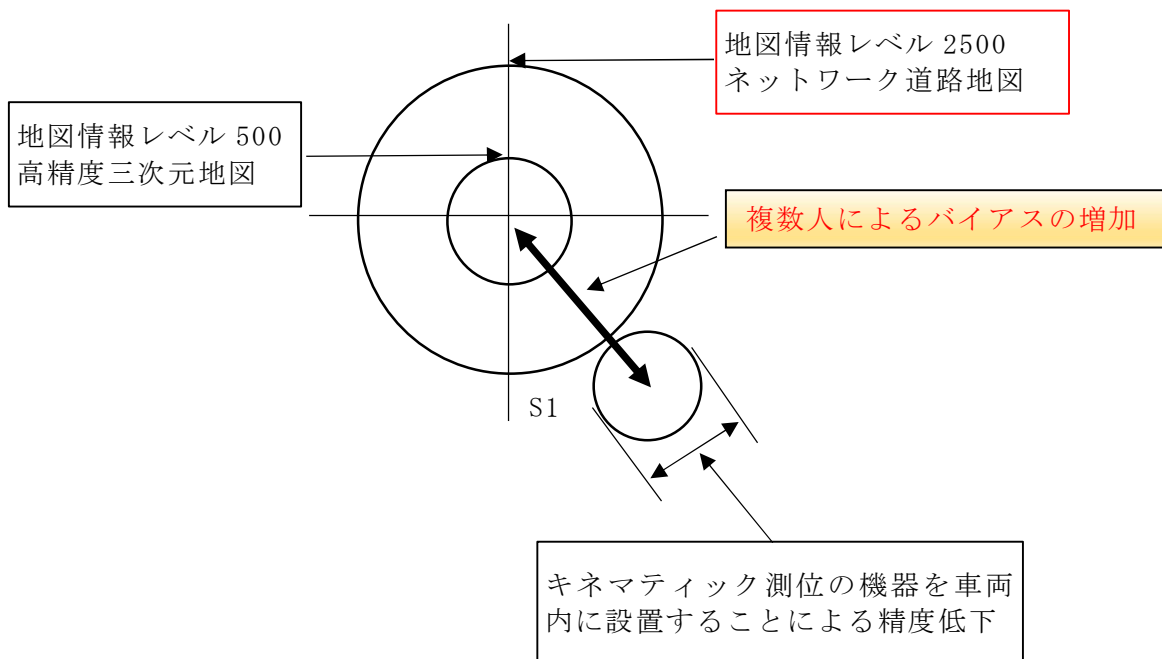


図 50 地図情報レベル 2500 を想定したバイアス

大量のデータを収集するために、市内の自動車教習所に協力を依頼し、受講生の送迎車両 4 台に GNSS ロガーを設置した。車外に GNSS アンテナを設置することが望ましいが、ケーブル断線や運行上のトラブル等を考慮して、断念した。従って、本研究では図 51 に示すように社内ダッシュボードに設置した。



図 51 GNSS アンテナ設置状況

各送迎車は市内中心部を1日平均100 km程度走行しており、およそ3ヵ月間に収集した走行距離は全車両で延べ2万 km程度である。

RTKLIBにより分析したところ、常時5機程度以上の人工衛星電波をとらえていたが、極めてFix率が低かった。

図52、図53、図54、図55はGNSSロガーを設置した各送迎車のGNSS信号の受信数をまとめたものである。GNSSロガーは1秒間に1つの信号を収集しており、収集したデータをエポックという。本研究では地理情報システムにて解析しており、後述するポイント数と同意義である。

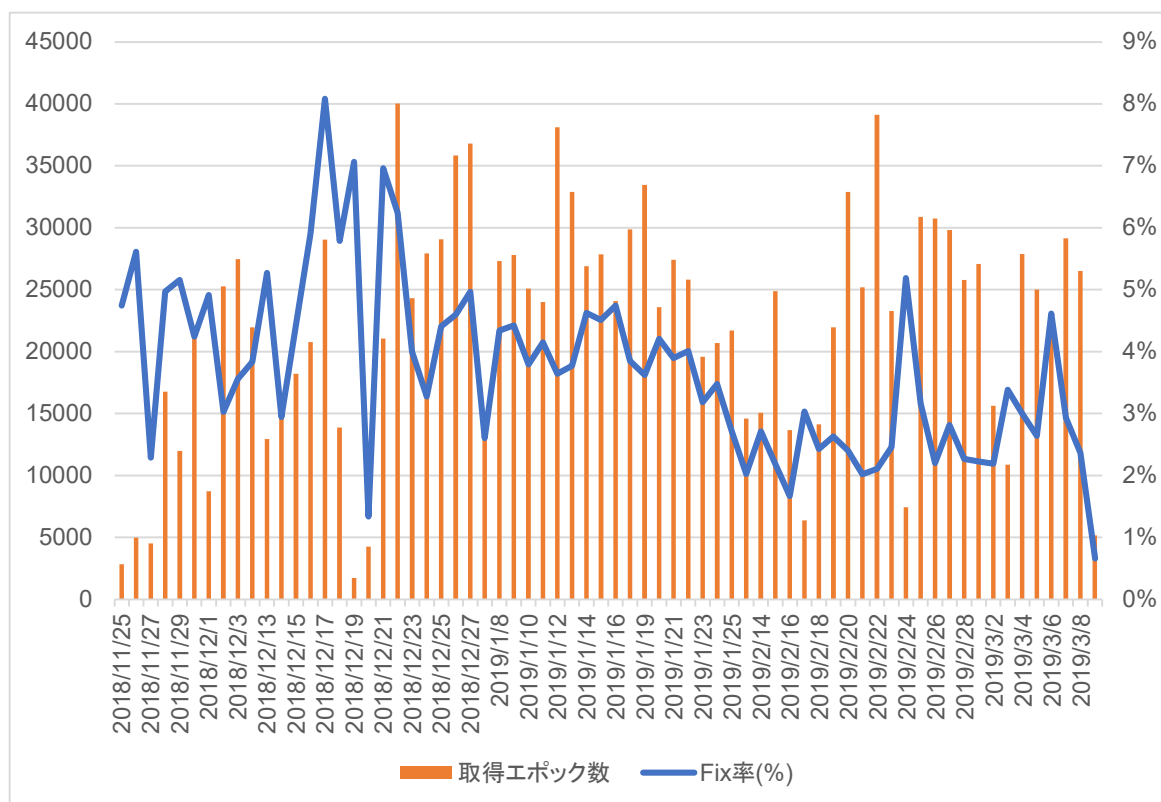


図 52 1号車日単位取得エポック数

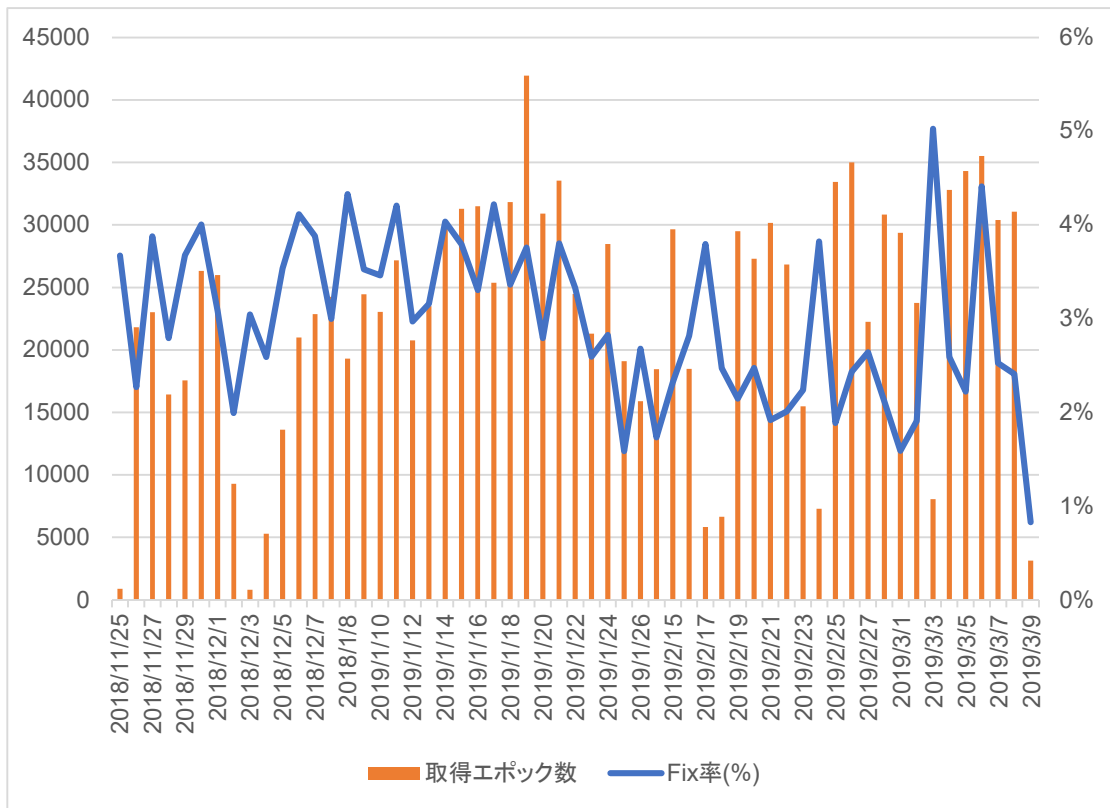


図 53 2号車日単位取得エポック数

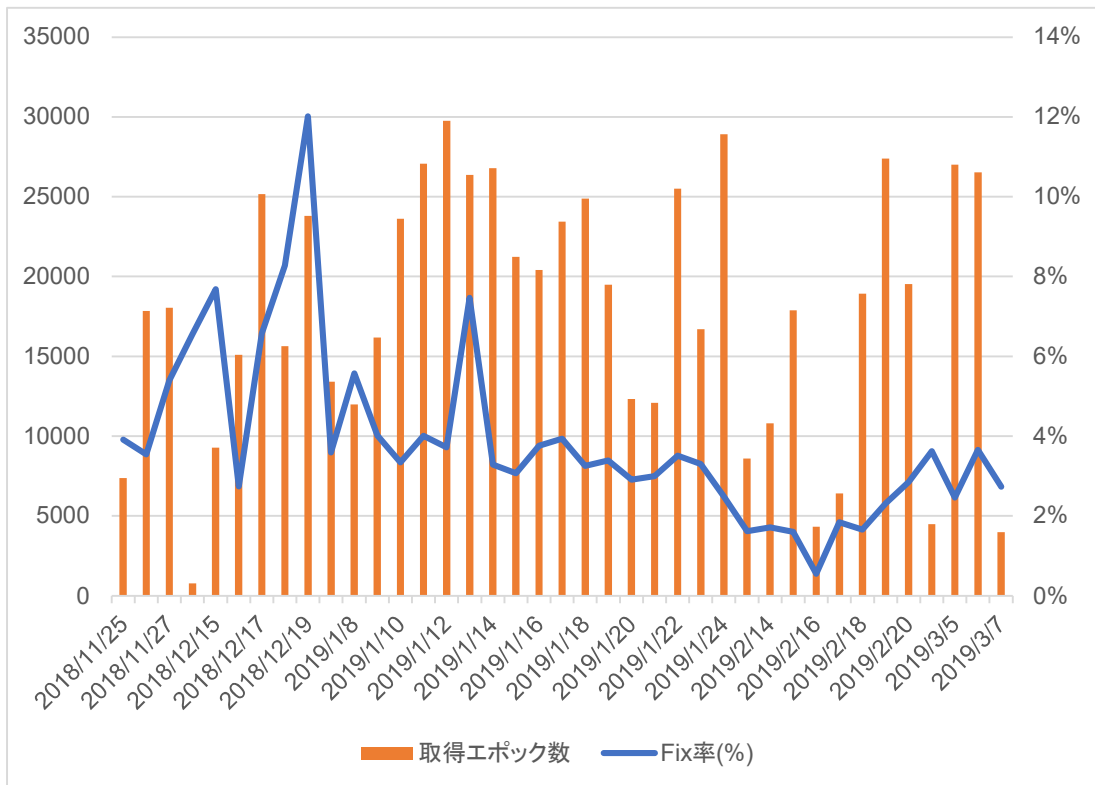


図 54 3号車日単位取得エポック数

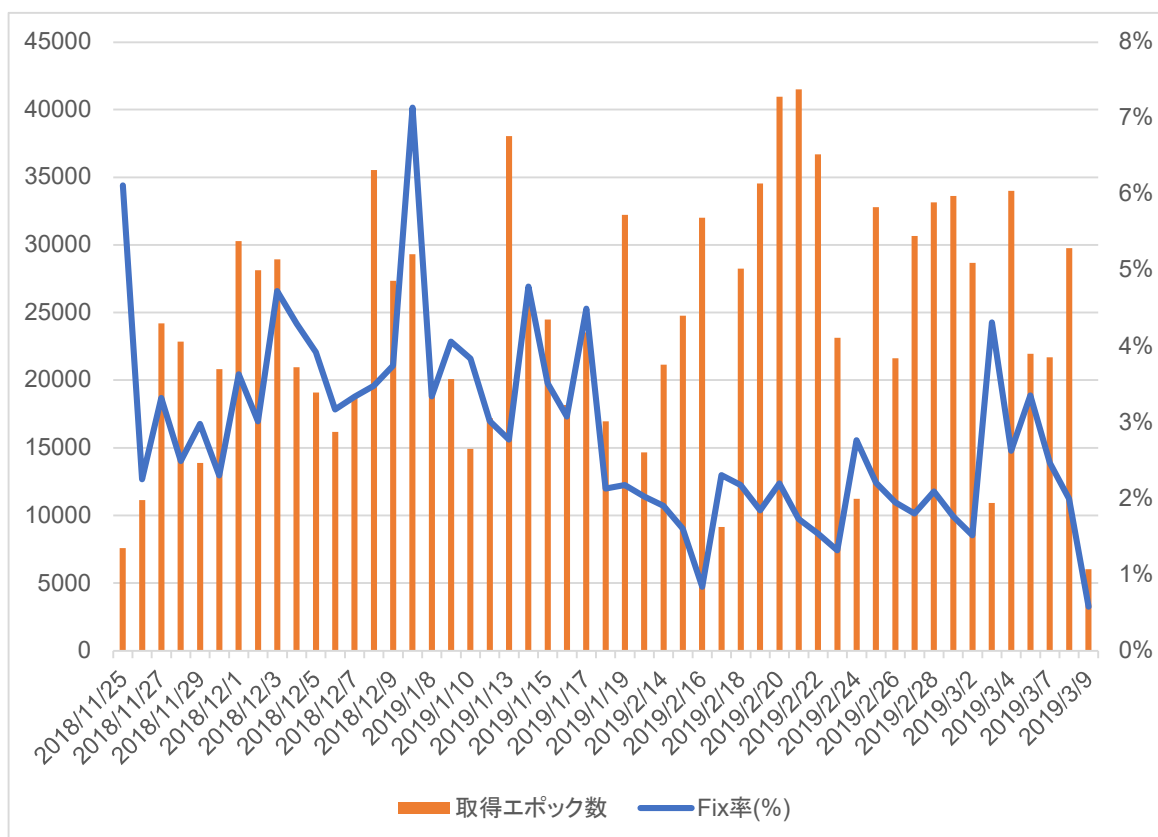


図 55 4号車日単位取得エポック数

表 10 は各車両の稼働日数と Fix 率を示したものである。Fix 率は平均して、3.4%と極めて低い割合であった。

表 10 各車両（各ロガー）の稼働日数と Fix 率

車両番号	稼働期間（稼働日数）	Fix 率
1号車	2018年11月25日～2019年3月8日(68日)	3.8%
2号車	2018年11月25日～2019年3月9日(57日)	3.0%
3号車	2018年11月25日～2019年3月7日(39日)	3.9%
4号車	2018年11月25日～2019年3月9日(51日)	2.9%

衛星測位を実施するには4つの衛星を補足することが必要であるが、図 56 に示すように GNSS アンテナを車両内前方のダッシュボードに設置したため自車両のルーフにより4つ以上の良好な衛星電波を受信することが困難となり、衛星からの受信が前方に偏ったため、Fix 率が著しく低下したと考えられる。

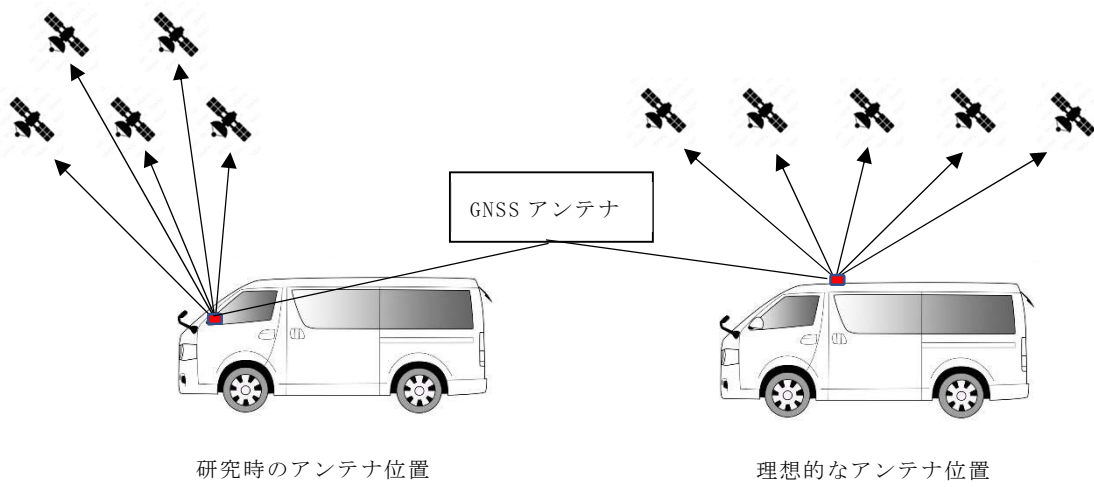


図 56 GNSS アンテナの設置位置と測位衛星の位置

全プローブデータを表示する背景地図が判読できなくなるため、1号車の Fix したプローブデータのみを表示した例を図 57 に示す。

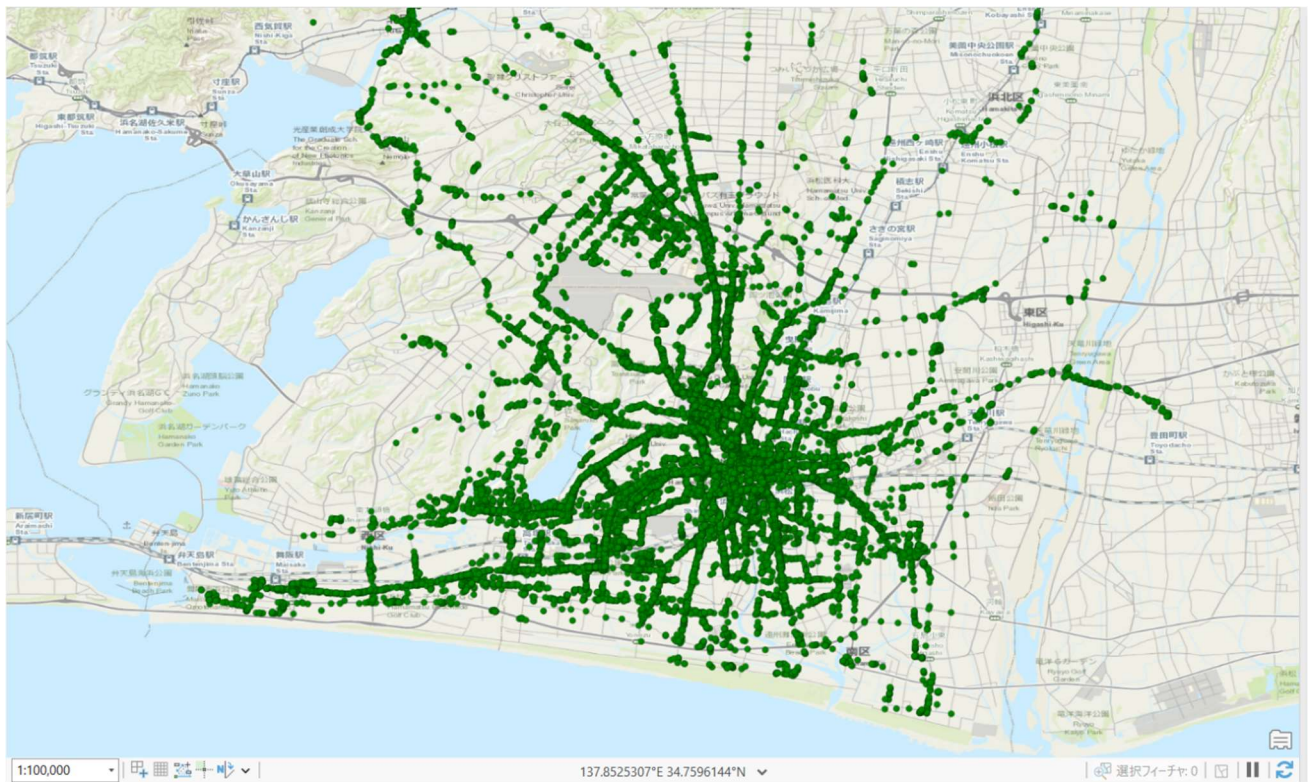


図 57 収集した高精度プローブデータ

図 58 は全送迎車のプローブデータを表示し、市街地の一部を拡大したものである。図 59 は Fix したプローブデータを表示したものである。

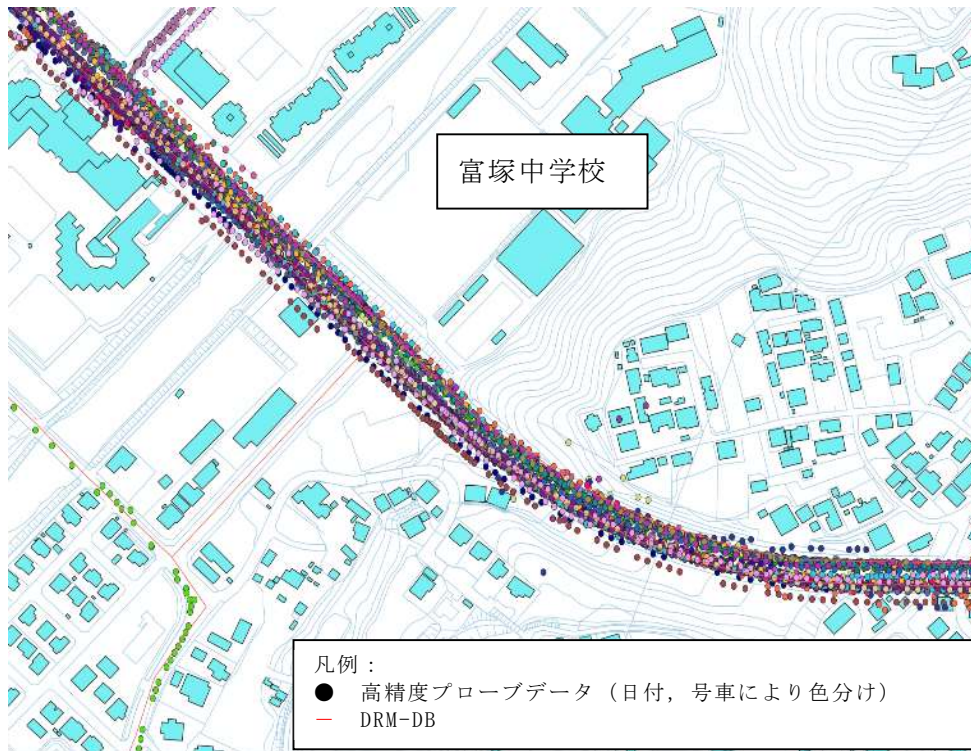


図 58 高精度プローブデータと DRM-DB 表示例 (全データ)

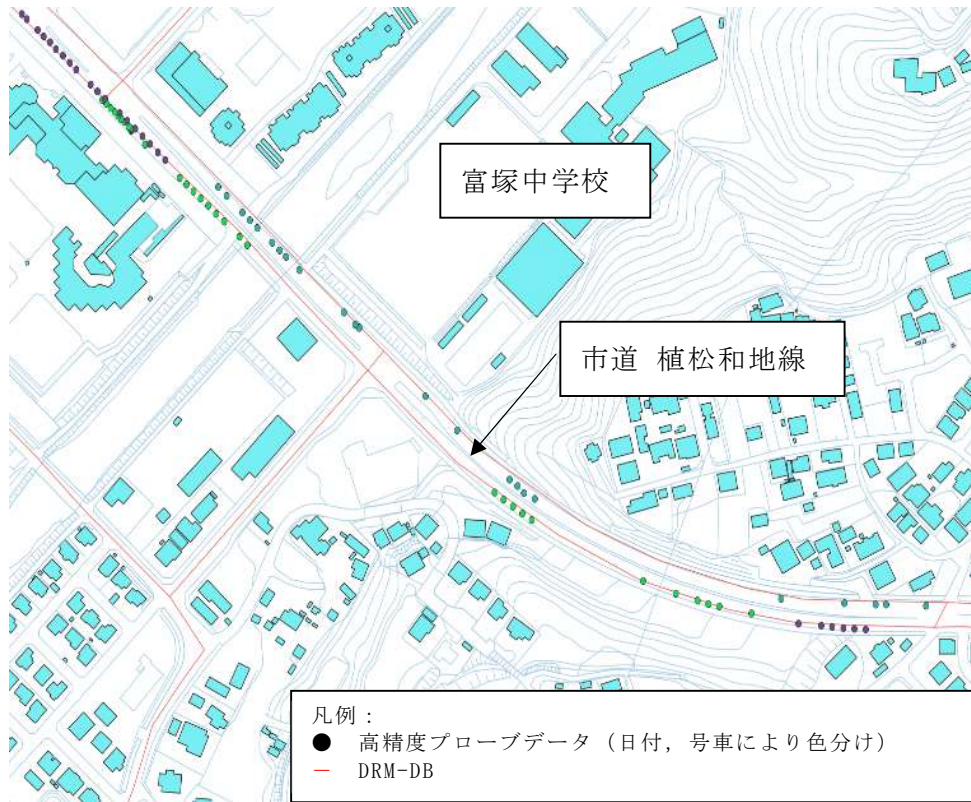


図 59 高精度プローブデータと DRM-DB 表示例 (Fix 解のみ)

図 59 から明らかなように、Fix したプローブデータは車道リンクの近傍に位置している。一方で、数十 m にわたり、未収集の区間も存在している。

【9-6】取得結果

図 58, 図 59 に示したように、富塚中学校付近の市道 植松和地線は片側 2 車線道路となっており、東から西に進行している車両は第一車両通行帯を走行し、西から東へ進行している車両は第二車両通行帯を走行していることが推察される。

前述したように Fix したプローブデータと DRM-DB の較差は定性的に少ない。表 2 に示したように地図情報レベル 2500 では水平位置の位置精度が 1.75m 以内となっている。地図情報レベル 2500 で表現されている地図情報を cm 単位で補正することは現実的でない。しかし、車線規制により、1.75m を超えるような変化があれば、プローブデータと車道リンクとの比較により道路環境における変化を察知することが可能となる。複数車両の走行軌跡を 3 ヶ月程度収集した結果であることから、データの収集期間を延長もしくは車両の数を増やすことにより、数十 m の未収集区間を補完することができる可能性が高い。従って、長期間に渡りデータを収集できればプローブデータを利用したネットワーク道路地図の検証及び改善への適応可能性が高まると考えられる。

当初の目的通り、大量のデータを収集することは可能となったが、本研究の目的である線形上の道路データを検証するためには連続したプローブデータが必要である。

【9-7】供用開始直後の道路区間での収集

大量のデータは広範を俯瞰し、パターンやトレンド等を得るために有効である。一方で、区域を限定したデータは、特定の問題を解決するための具体的な発見をするためには有効である。そこで、区間を限定して再度プローブデータを収集することにした。ネットワーク道路地図は全国を対象としたデータを自動車やスマートフォンのナビゲーション向けに提供している。また、道路更新のみのデータも提供されている[84]。道路更新のみのデータ利用者もいることから、図 49 に示した地図作成会社で独自に作成した道路地図を更新する際に参照していることが推察される。

前述したように、都市計画区域内のネットワーク道路地図は地図情報レベル 2500 基盤地図情報をもとに修正されていることが公表されている。また、その更新手法は新刊地図（基盤地図情報）と全国の道路管理者から収取した道路の設計図面に基づき実施されていることも公表されている。全国を対象とした道路の新設及び区域変更等の情報を事前に入手し、提供していることがネットワーク道路地図の大きな特徴である。

一般的に、道路の詳細設計時における図面は地図情報レベル 500 以上の精度となっている[85]。地図情報レベル 2500 を参照して作成した図面は地図情報レベル 2500 以上の精度を期待することは困難であるが、新規に供用開始区間となった道路についてはデータ更新時に地図情報レベル 500 程度の図面を利用していることから、地図情報レベル 2500 以上の精度になっている可能性がある。

研究対象を単純にボリュームにより絞り、小規模化したデータとするのではなく、地図情報レベルが改善されている可能性がある区域を対象として公表値以上の正確度が期待できる区間を研究対象とすることは重要であると考えた。また、ネットワーク道路地図の提供している道路区間は約 102 万kmとなっている。「道路統計年報 2022」によると 2019 年の全国の道路延長は 2,817,812 km、2020 年は 2,821,252 km となっており、3,440 km 伸びている[86]。

研究対象を絞り込むことによって、延長 3000 km 程度の新規道路区間に対して、適用する可能性ができると考えた。

そこで、供用開始直後の路線を研究対象とすることにした。

【9-8】対象路線

図 60 に示す道路供用直後の都市計画道路：下石田葵西線（以下、対象路線という。）を研究の対象路線とした。

対象路線は浜松市の市街地北部を東西に横断している。延長約 340m の上島工区が 2019 年 1 月に供用を開始し、2018 年に供用開始した鉄道東側の路線約 1,100m と合わせて約 1,440m 区間が全面開通した。

対象路線と南北に交差している遠州鉄道は、2013 年に対象路線の交差部等において慢性的な渋滞を解消するために鉄道高架化事業を実施している[87]。

この路線を対象にして、筆者所有の小型乗用車を利用して車外に GNSS アンテナを設置し、Fix 率を改善し、ネットワーク道路地図の位置精度の検証を再度試みる。

図 61 は研究対象路線を、2019 年 3 月 30 日 13 時頃に対象路線を筆者が所有する小型乗用車 Honda フリードにて 1 往復走行し取得したものである。アンテナはルーフ幅 140 cm の中心、ルーフ前方より 50 cm 後方に設置した。

ロガーシステムの受信機が受信する測位衛星数は常時 24~30 捕捉していたが、マルチパスの影響を避けるため、30 度のマスク処理を実施した。これによりプロブデータ計算に使用する測位衛星数は 12~15 となった。東から西へ走行時収集したプロブデータは 765 ポイント、Fix 解は 757 ポイント、Float 解は 8 ポイントであった。西から東へ走行時収集したプロブデータは 475 ポイントで、Fix 解は 440 ポイント、Float 解は 35 ポイントであった。Float 解は枠内に多く集中していた。



図 60 研究対象路線

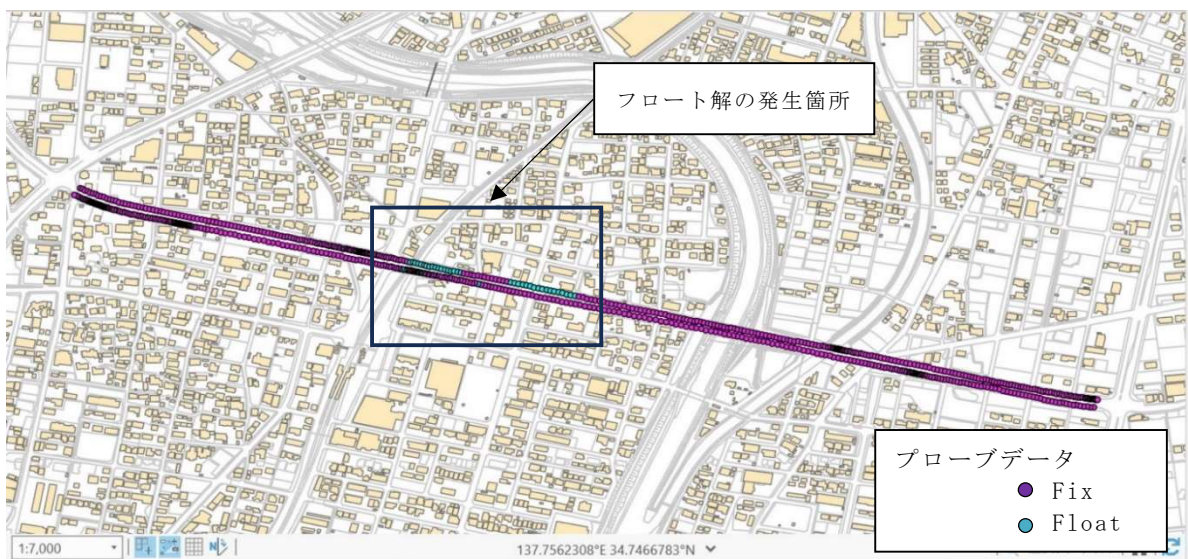


図 61 データ取得区間におけるプローブデータ

図 62 は Float 解が集中していた箇所を拡大し，現地を確認したものである．遠州鉄道の高架付近と交差点に電線が集中している付近で多く発生し，当該区間以外では全て Fix 解を得た．また，区域を限定することにより，測位衛星の電波状況の悪くなる箇所を確認することができた．

目黒ら[88]によると高圧電線によるパルスノイズの影響より電線や鉄塔によるマルチパスがもたらす影響が大きいとしている．鉄道及び道路の高架下は地図等での確認が容易で，電波状況の劣化を想定できる．しかし，電線などの集中箇所については現地に行かないと確認が困難である．



図 62 Float 解の発生場所

【9-9】検証手法

第一車両通行帯を走行し、プローブデータを収集し、道路ネットワーク地図の精度向上可能性箇所の抽出を試みる。浜松市の道路台帳現況平面図を参照したところ、対象路線の直線部分における標準的な車線幅員は 3.5m となっていた通行帯の幅員は 3.5m と想定した。片側二車線道路であれば、車線境界線に車道リンクが接近していると考えられる。図 63 に示すように、車両は車線中央を走行すると想定すると、実走車両の中心（プローブデータ）は車線境界線より 1.75m 離れているはずである。

そこで、車道リンクを走行方向に向かって左側に 1.75m 平行移動したラインを自動生成させる。このラインとプローブデータを比較して較差を求める。車道リンクの形状を維持したまま平行移動しているため、本研究では以降、生成したデータを車道リンクと同じものとして表現する。

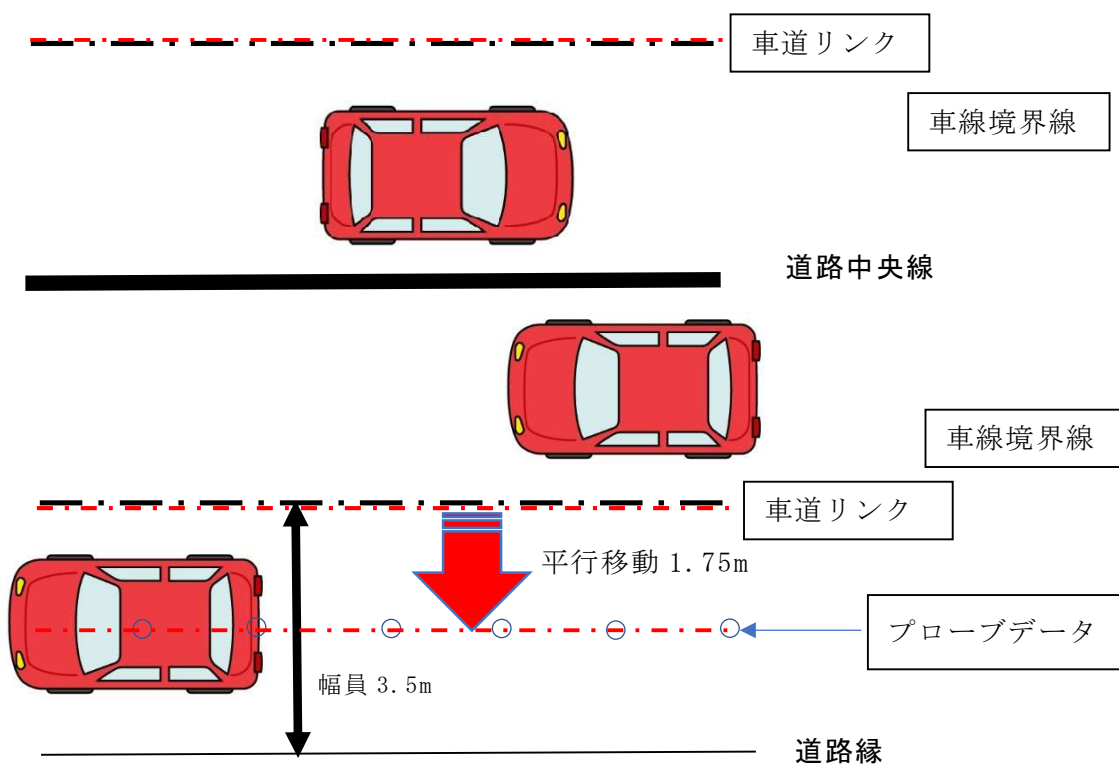


図 63 検証方法

【9-10】地理情報システムによる処理手順と結果

地理情報システムを利用して空間解析を行う。

- ① 車道リンクのライン情報を進行方向に対して、その形状を維持したまま、左側に 1.75m 平行移動した線を新しく自動生成する。
- ② 生成した車道リンクとプローブデータを空間的に重ね合わせる。

- ③ プローブデータから鉛直方向に最も近い車道リンクの座標値をプローブデータの属性情報として新たに生成する。
- ④ プローブデータの属性に新しく生成した近傍の車道リンクの座標値とプローブデータが持つ座標値を比較することにより，プローブデータと生成したラインとの較差を求めることができる。

図 64 は地理情報システムを用いて車道リンクから進行方向に対して左側に 1.75m 平行移動させた線を生成したものである。

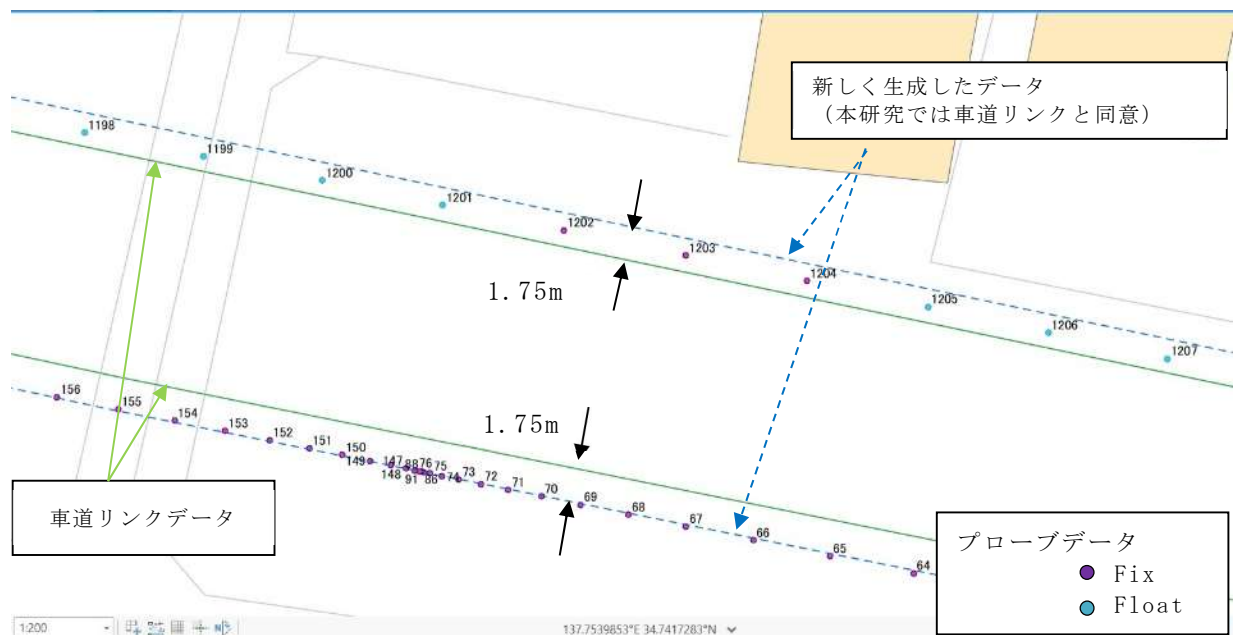


図 64 検証用データ生成イメージ

図 65 は東から西方向に第一車両通行帯を走行し，図 66 は西から東方向に第一車両通行帯を走行したプローブデータと車道リンクの較差を横軸に，縦軸には較差毎のプローブデータのポイント数を集計したものである。

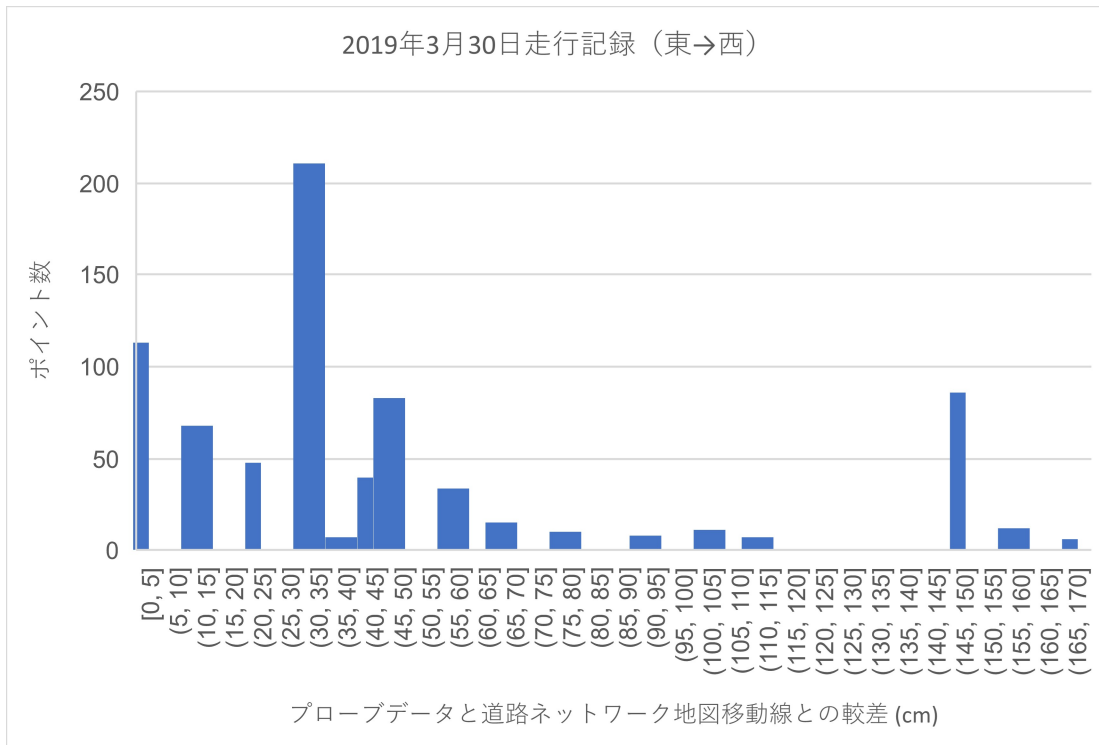


図 65 プローブデータと道路ネットワーク地図の較差毎ポイント数（東→西）

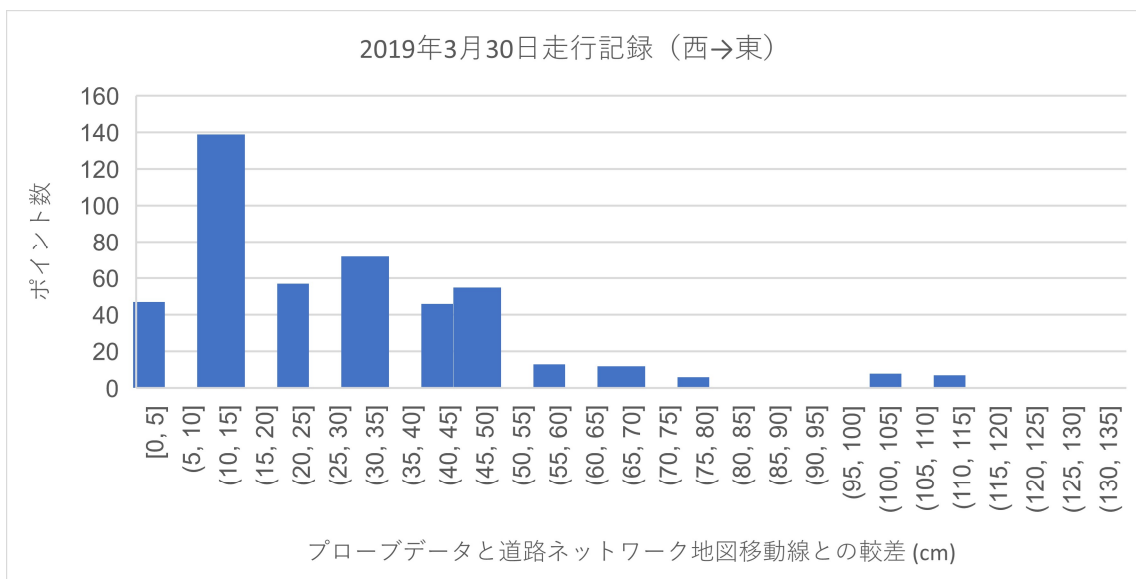


図 66 プローブデータと道路ネットワーク地図の較差毎ポイント数（西→東）

図 65 に示すように較差 145cm~150cm 付近にポイント数が多くなっている。該当箇所を確認したところ、東から西に進行するコースで、図 67 に示すように新しく生成した車道リンクとプローブデータが車線半分程度の 1.62m 程度左側に位置している。

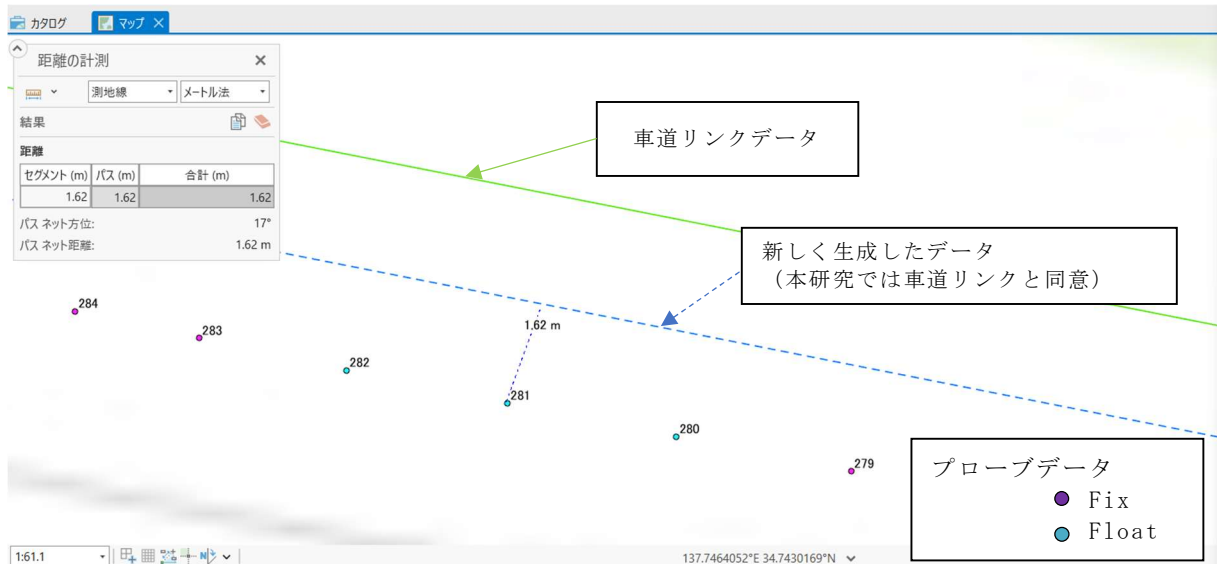


図 67 遠州鉄道高架下交差点付近のプローブデータと車道リンクの較差が大きい区間

図 68 に示すように信号待ちにより、車両が停車することによりポイント数が 80 程度増大している。

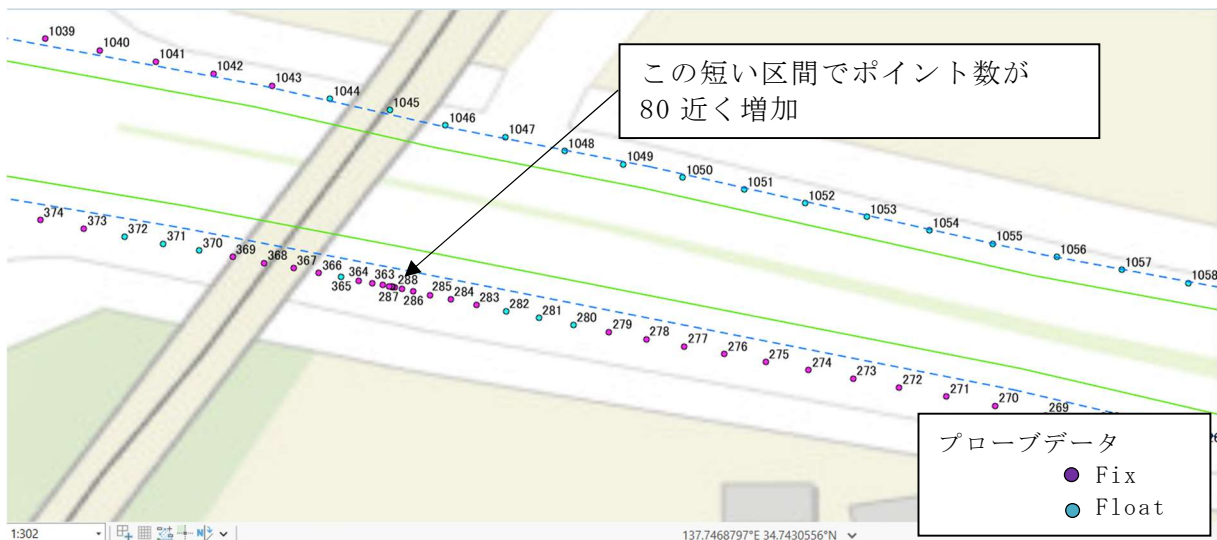


図 68 信号待ちによるポイント数の拡大

図 69 に示すように Google Maps を利用して航空写真で確認したところ、遠州鉄道高架下の大きな交差点付近であり、道路幅員が広くなり、交差点内が 3 車線となっている。筆者の運転する車両は左側の直線左折レーンに信号待ちにて停車したものと考えられる。



図 69 遠州鉄道高架下付近交差点の航空写真

【9-11】緩衝領域生成による車道リンクの検証

研究対象区間では交差点手前にて、2車線から3車線に車線が増加する箇所が複数ある。車道リンクを1.75m平行移動したラインを発生させプローブデータとの較差を検証した場合、車両が左折車線を走行する場合は、平行移動した車道リンクとの較差が拡大する。さらに、信号待ち等により、ポイント数が増加する場合がある。道路構造上の問題であり、較差の拡大を回避することは困難である。

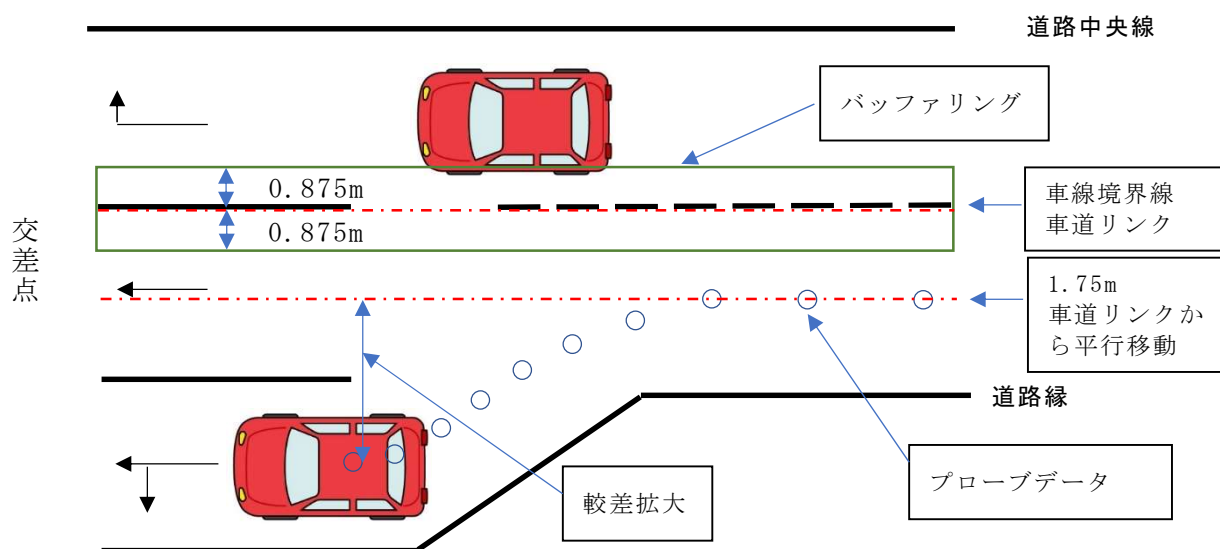


図 70 車道リンクから生成したバッファを利用して検証する場合のイメージ

図 70 に示すように、車道リンクの精度向上を目的として以下の処理を試みる。

車道リンクから地図情報レベル 2500 の水平位置の標準偏差である 1.75m の 1/2 となる 0.875m の範囲内にはプローブデータが存在しないものと仮定する。存在していれば、原因は運転操作によるものか、車道リンクの誤差によるものである。そこで、地理情報システムを利用して、車道リンクから 0.875m の緩衝領域を自動生成（バッファリング）して、プローブデータとオーバーレイによる処理を行った。

バッファ内にプローブデータが含まれる場合は、図 71 に示すように運転操作によりプローブデータが車道リンクに近づいた場合か、図 72 に示すように車道リンクの誤差により、車道リンクがプローブデータに近づく場合が考えられる。

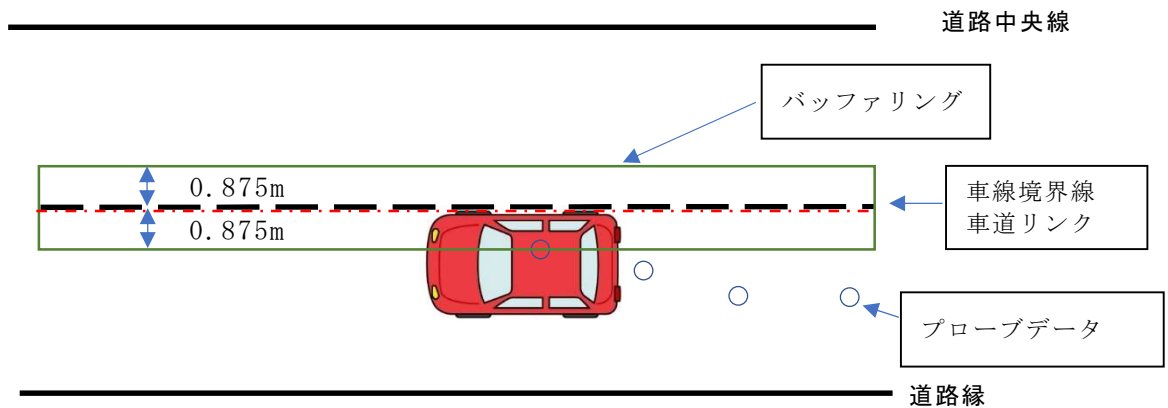


図 71 プローブデータが車道リンクに近づく場合

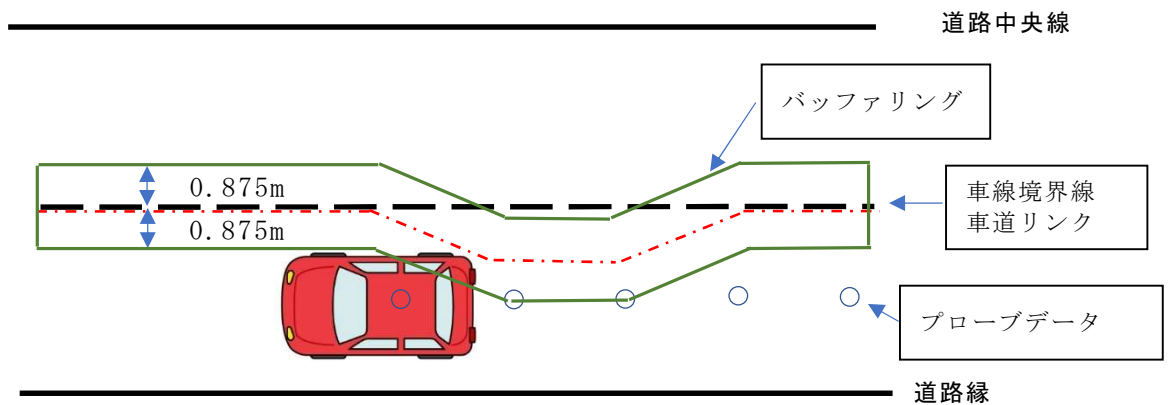


図 72 車道リンクがプローブデータに近づく場合

【9-12】地理情報システムによる処理手順と結果

地理情報システムを利用して空間解析を行う。

- ① 車道リンクのライン情報から 0.875m のバッファを新しく自動生成する。
- ② 生成したバッファとプローブデータを空間的に重ね合わせる。
- ③ バッファ内のプローブデータを抽出する。

発生させたバッファ内に存在するプローブデータは図 73 図 73 に示すように、西から東への走行プローブデータ 1191 から 1215 までの区間（1202 から 1204 の 3 ポイントを除く）のみであった。道路構造を把握する為に、GoogleMap の画像を重ね合わせた。西から東への交差点侵入前で二車線から三車線となっているのが確認できる。東から西方向も同様に二車線から三車線の構造となっている。

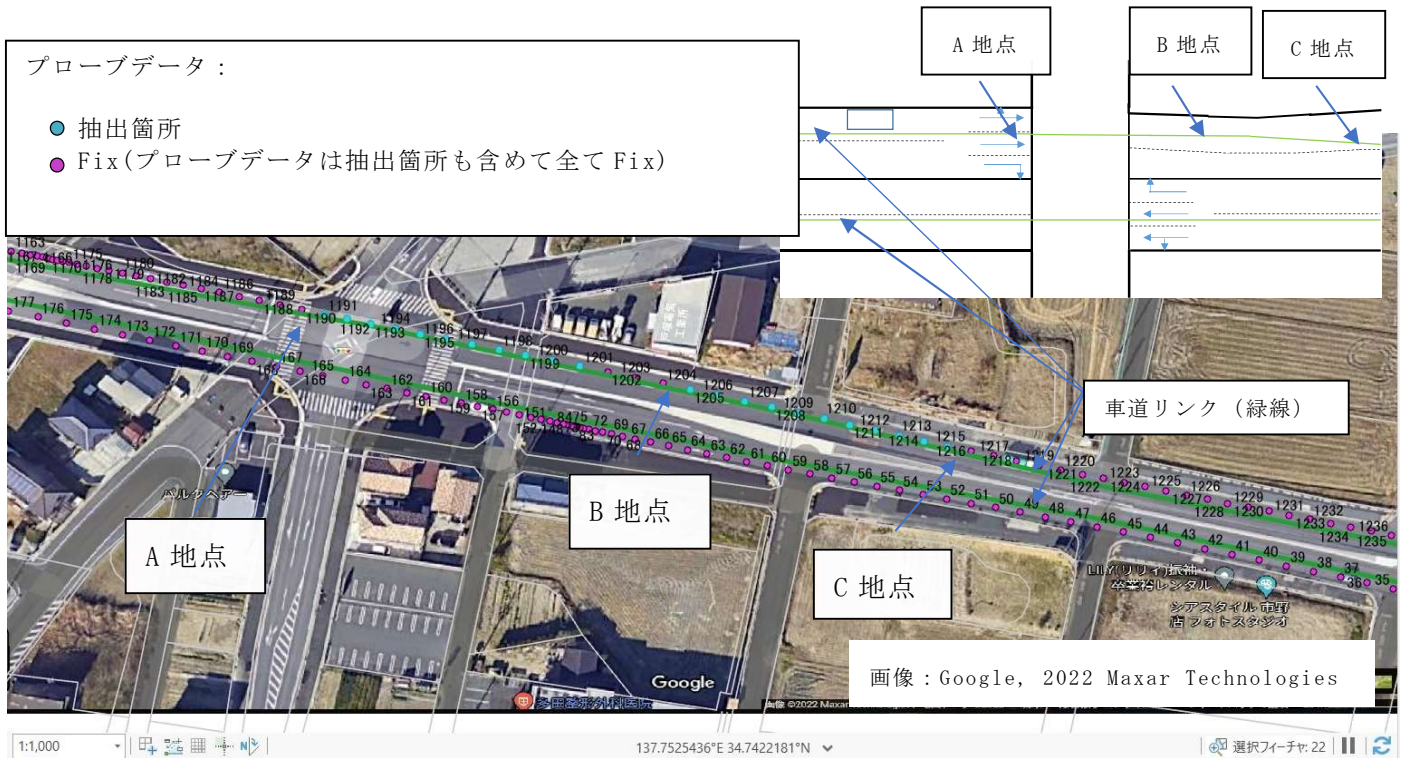


図 73 車道リンクの誤差検出箇所

A 地点では車道リンクが車線境界線から進行方向に対して左に徐々にプロットされ、第一車両通行帯の内側に入り始めている。B 地点から C 地点にかけて第一通行帯の内側から車線境界線に近づいて、本来の位置に戻っているのが確認できる。従って、対象路線往復距離約 2,880m 区間において、プローブデータ 1191 から 1215 区間（約 124m）における車道リンクは誤差が大きい可能性がある。

図 74 は A 地点より B 地点方向を撮影し、筆者が図 73 を参考にして、フリーハンドにて車道リンクと車線境界線を加筆したものである。車道リンクが右側に位置して、車線境界線に近づいていけば、該当区間の精度は向上している。

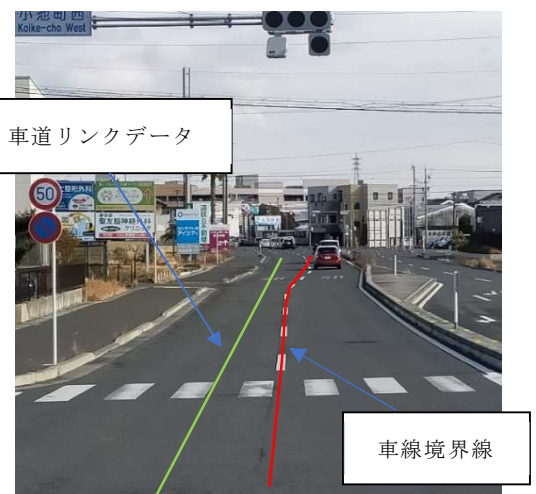


図 74 A 地点より C 地点を望む

この処理では、前述した 3 車線区間において左折車線の車両と車道リンクの較差が大きい場合は、該当区間車道リンクの精度を検証することはできない。しかし、一部区間でも精度を向上することができれば、車道リンク全体の精度を向上することができる。

【9-13】車道リンクの検証

検証においては「品質の要求，評価及び報告のための規則 2019(令和元)年7月 国土交通省国土地理院」(以下，新地理院規則という.)を参照した[89].

なお，高精度三次元地図との検証時に採用した「国土地理院技術資料 A・1-No.306 品質の要求，評価及び報告のための規則 Ver.1.0 2005(平成17)年1月(初版) 2007(平成19)年3月(一部改訂) 国土交通省国土地理院」[68]は本研究期間中に算出方法が変更となった.

$$\text{標準偏差} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (xi - Xi)^2 + (yi - Yi)^2}{n}}$$

xi : データ集合内の検査対象のデータの位置の X 座標

yi : データ集合内の検査対象のデータの位置の Y 座標

Xi : より正確度の高いデータの位置の X 座標

Yi : より正確度の高いデータの位置の Y 座標

n : サンプル数

地図情報レベル 2500 の水平位置の標準偏差は 1.75m 以内とされている. キネマティック測位により，Fix 解を得た測位データは cm 級の精度を有している.

収集したプローブデータは 96.5 % (1197/1240) Fix している. そこで，より正確度の高いデータをプローブデータと仮定する.

図 63 に示したように，車道リンクから進行方向に対して左側 1.75m に平行移動したラインを自動生成させ新たに検証用の車道リンクを作成した. 車道リンクから最短距離のプローブデータを抽出して，新地理院規則による標準偏差を算出することにより，車道リンクデータを検証する. 取りまとめた結果が表 11 である.

表 11 プローブデータの集計

	総数	Fix 解のみ	Float 解のみ	Fix/総数 (%)
西→東				
ポイント数	475	440	35	92.6%
平均較差 (m)	0.27	0.28	0.19	
標準偏差 (m)	0.40	0.41	0.25	
東→西				
ポイント数	765	757	8	99.0%
平均較差 (m)	0.43	0.42	1.28	
標準偏差 (m)	0.66	0.66	1.57	
合計				
ポイント数	1240	1197	43	96.5%
平均較差 (m)	0.35	0.35	0.73	
標準偏差 (m)	0.53	0.53	0.91	

本研究対象路線は都市計画道路であり，研究対象とした区間は約 1.4 km であった．交差点付近では 2 車線から 3 車線に車線数が増加する箇所があった．車両が最も左側の車線に進入したため，想定した較差より車線半分の距離の較差が認められる箇所が発生した．さらに，信号待ちにより，車両が移動していないのに，較差の大きいエポック数が増加した．

検証結果では車道リンクとプローブデータにおける水平位置の標準偏差が 0.53m となった．研究対象の道路区間は都市計画区域内であり，ネットワーク道路地図の都市計画区域内の地図情報レベルは 2500 となっている．作業規程の準則によると，地図情報レベル 2500 の水平位置の標準偏差は 1.75m 以内，地図情報レベル 1000 における水平位置の標準偏差は 0.7m となっている．従って，研究対象区間においては公表している地図情報レベル 2500 を上回る地図情報レベル 1000 程度の精度を有している可能性がある．

【9-14】想定される大量プローブデータ取得時のバイアス

ネットワーク道路地図の車道リンク検証のために、大量のプローブデータ取得を試みた。当初仮定したバイアスは図 50 を想定してプローブデータを収集したが、Fix 率が低いため、区間の検証が困難となった。

結果として、図 75 に示すように、地図情報レベル 2500 の位置精度を超えるプローブデータが多数発生したと考えている。

また、GNSS アンテナを車内に設置したことが原因の 1 つであるが、マルチパスによる影響や個人のバイアス等が含まれ、原因を特定することが困難であった。

しかし、大量のプローブデータを収集したことによる課題や定性的ではあるが、ネットワーク道路地図とプローブデータの較差等を把握することができた。

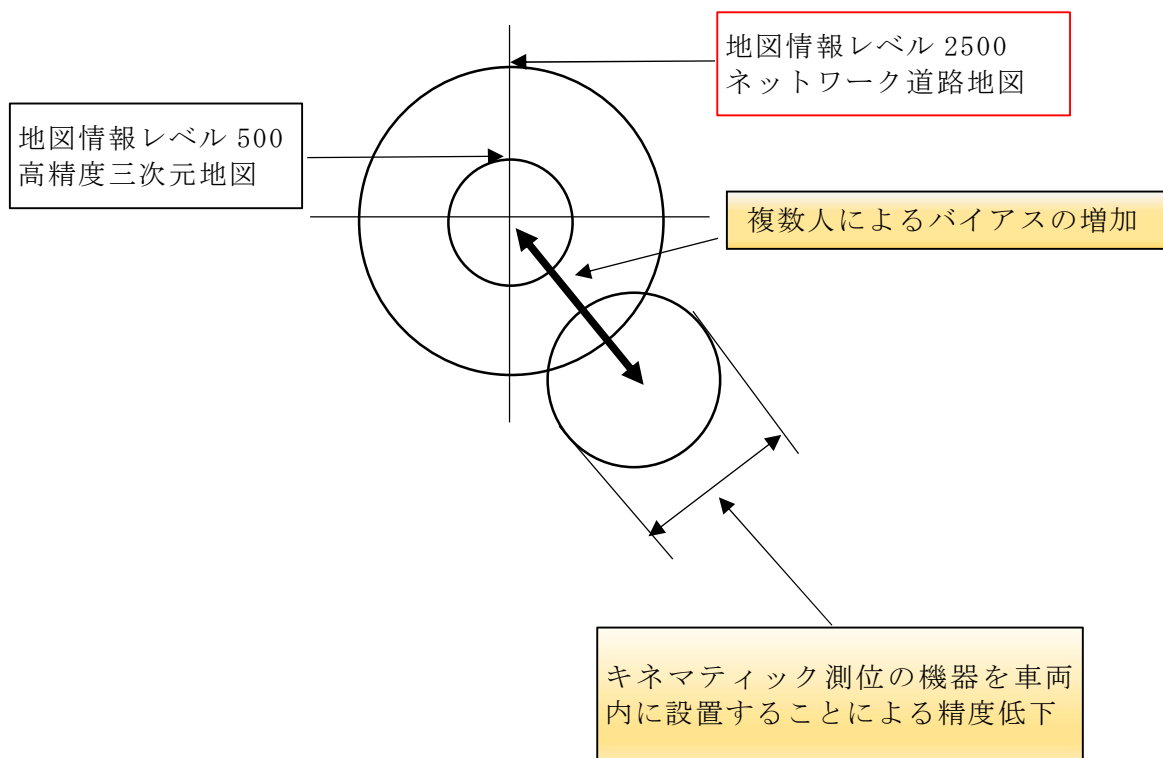


図 75 大量のプローブデータ取得時のバイアス

【9-15】想定される都市計画道路でのバイアス

大量のデータを取得することにより、バイアスが増加したことから、区域を限定して車道リンクのプローブデータの検証を行った。高精度三次元地図の車線リンクとプローブデータの検証結果から一般道におけるバイアスは0.14mとなった。新設道路において道路管理者から地図情報レベル500程度の設計図面を収集して、車道リンクを更新していることから、該当区間は地図情報レベル2500を上回っている可能性が高い。そこで、道路の供用開始直後の区間に対して検証を実施した。

本研究では、水平位置の標準偏差1.75mを許容している車道リンクと0.14mのバイアス値を持つプローブデータを比較して、より正確度の高いデータをプローブデータと設定している。検証結果は図76に示すようにプローブデータと車道リンクの平均較差が0.35mとなった。

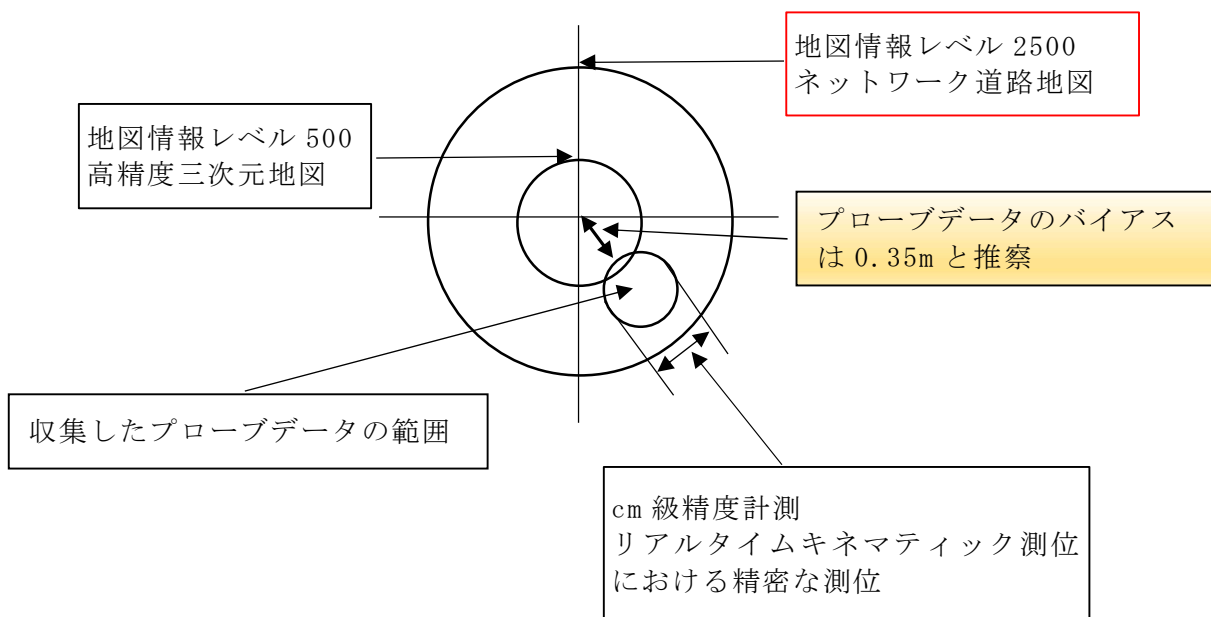


図 76 供用開始直後の都市計画道路におけるプローブデータ取得時のバイアス

【第 10 章】結論

【10-1】とりまとめ

本研究では、高精度三次元地図における仮想地物の車線リンクとキネマティック測位技術を利用したプローブデータの較差を定量化することができた。

具体的には高精度三次元地図が貸与された研究区間 10 km（往復 20 km）区間において、交差点及び道路幅員等道路構造上特定が容易で較差が大きくなる箇所を除いた 72%区間では、プローブデータと車線リンクの較差は 0.15m となった。さらに、道路上の障害物を回避するための運転操作による較差等道路環境による影響を排除した区間は 70%で、較差は 0.14m、水平位置の標準偏差は 0.56m となった。この区間におけるプローブデータは国土交通省の作業規程の準則に照らし合わせると、地図情報レベル 1000 程度となる。

また、ネットワーク道路地図における仮想地物である車道リンクとの較差を検証した。都市計画区域内の供用開始直後の都市計画道路において、水平位置の標準偏差は 0.53m となった。ネットワーク道路地図の都市計画区域内の地図情報レベルは 2500 と公表されており、その水平位置の標準偏差は 1.75m となっている。従って、本研究結果では、ネットワーク道路地図の車道リンクは、研究対象区間において、公表値以上の精度を有している可能性が高く、その精度は地図情報レベル 1000 程度と考えられる。

また、本研究のアプローチは、従来のサンプリングによる検証手法と比較して、連続したプローブデータを利用して実施するという視点でもユニークである。連続したデータを検査対象に適用し、較差の大きい箇所を地図上に展開することで、改良すべき区間を限定することができる。

プローブデータと車線リンクや車道リンクの較差が少なくなり、その区間の割合が増えることにより、プローブデータで置き換えることが可能になると考えられる。車線リンクとプローブデータの較差による水平位置の標準偏差が 0.25m となれば地図情報レベル 500 となり、車線リンクをプローブデータで代替できる可能性が高まる。

研究対象とした供用開始直後の車道リンクについては公表している地図情報レベル 1000 程度が期待できる。しかし、交差点付近などの車線数を変更する箇所において、車両軌跡が変化するため、車道リンクとプローブデータの較差が大きくなるが、地図情報レベル 2500 における水平位置の標準偏差 1.75m 以内には収まっている。

【10-2】考察

自動運転時代にはキネマティック測位を利用した精度の高いプローブデータが大量に発生する。車線リンクを生成して、車道リンクや周辺の地図情報に拡充して利用されることが想定される。地理情報システムを利用して、大量のデータから正確性の高いデータを抽出することにより、車線リンクや車道リンクの自動生成が可能となると考えられる。

本研究環境ではキネマティック測位を利用したプローブデータは地図情報レベル 1000 程度となっており、プローブデータ以外の入力ソースを利用することにより、位置精度を向上させることが可能となる。

上瀧ら[90]の研究によると地図情報レベル 25000 の道路地図を航空画像にマッチングすることにより、約 5m から 10m の RMS 誤差を約 2m から 3m の RMS 誤差まで低減することができたとの報告がある。

さらに、本研究では、衛星測位技術を利用したプローブデータを利用することを前提に行ったが、バイアスが想定した較差を超える箇所等については除外している。これらの区域については、他の手段によりデータを作成することが必要である。

現時点では高精度三次元地図は地図情報レベル 500 程度とされているが、道路構造や車両の想定速度により、地図情報レベルを変更することも考えられる。浜松市で道路管理のために利用している道路台帳現況平面図では、合併前の旧浜松市では地図情報レベル 500 の平面図を利用しているが、一部の周辺市町では地図情報レベル 1000 を利用していた。合併後も浜松市の一部では地図情報レベル 1000 の道路台帳現況平面図がある。従って、高精度三次元地図が地図情報レベル 1000 で作成される場合、もしくは、地物の一部が 1000 レベルになる可能性はある。

本研究で利用した衛星測位技術は広義の意味でリモートセンシングといえる。航空写真測量や光学衛星を利用したものも地上測量と比較して、リモートセンシングに分類される。リモートセンシングは一度に広域の情報を入手し、利用することが最大の利点である。

また、航空写真や衛星画像から道路を抽出して自動的に高精度な地図情報を生成する仕組みができれば、ネットワーク道路地図の更新に利用される可能性があると考えられる。

Gellert Mattyus ら[91]は自動運転における道路網の重要性を認識し、航空写真から 25cm のピクセルを生成し、75%の道路網を抽出している。また、Favyen Bastani ら[92]も航空写真から 60cm ピクセルを生成し、5%の誤差率で道路を検出している。西村ら[93]は空撮画像により車両移動方向を把握し、衛星画像に展開して広範囲の車両移動方向の可視化について研究し、従来手法より 41.4%向上させている。

これらのことから、高分解能人工衛星を利用し、自動車車両を自動的に認識し、車両の中心位置を求めることにより、本研究結果と同等の成果を得られる可能性がある。

近年では高分解能人工衛星の地上分解能も向上している。だいち 3 号は地上分解能が 0.8m である[94]。仮に作業規程の準則の水平位置の標準偏差に照らすと、地図情報レベ

ル1000となり，本研究結果と同等の位置精度が期待できる．また，Maxar Technologies社が運用する光学衛星の分解能は0.3mと言われている[95]．

将来，これらの高分解能人工衛星を利用して図化を行うことができる可能性は高い．

一方で，トンネルなどの障壁がある場合は航空写真や衛星画像を利用した車線リンクの取得が困難である．このような場所では衛星測位による位置把握も困難となるが，プローブデータは衛星測位以外にもジャイロセンサーや車両速度等のデータから位置を特定することができる．本研究では取り扱わなかったが，トンネル区間における精度検証も今後の課題として考えられる．

また，本研究にて利用した衛星測位は都市部において高層建物によるマルチパスの影響を受けやすい．

国土交通省は三次元都市モデルを整備する PLATEAU プロジェクトを推進している[96]．

PLATEAU プロジェクトにおいても名古屋大学及び国立研究開発法人産業技術総合研究所を中心に三次元都市モデルを用いて，廉価な光学カメラ画像から自己位置推定を行う実証実験が行われている[97]．測位衛星の精度低下につながるマルチパスの影響を受けやすい都市部において，このような自己位置推定には有効な手段となり，この技術を利用すれば，車線リンクの自動生成も可能となると考えられる．

自動運転の普及には様々な空間情報が必要となり，周辺分野における技術開発及び研究が一層進むことが期待される．

謝辞

本論文は筆者が静岡大学大学院自然科学系教育部在籍中の研究成果を取りまとめたものであります。同大学大学院情報学領域准教授木谷友哉先生には指導教官として多大なるご指導とご助言を賜りました。長期履修により6年間に渡り、研究の発表や展示会への参加等様々な機会を頂きました。ここに深謝致します。

お忙しい中、本論文審査をお受け戴き、様々なご助言及びご指導を頂きました。

審査委員長同大学大学院情報学領域教授佐治斉先生、審査委員同大学大学院情報学領域教授竹内勇剛先生、審査委員同大学大学院工学領域教授守田智先生に深謝致します。

一般財団法人日本デジタル道路地図協会より、研究に必要となるデジタル道路地図を貸与頂きました。また、2018年及び2019年に研究助成に採択頂き、多大なる支援を頂きました。ここに深謝致します。

一般財団法人生涯学習開発財団より、博士号取得支援事業にて選考され支援を頂きました。ここに深謝致します。

有限株式会社上池自動車学校にはプローブデータ収集にあたり、多大なる支援を頂きました。ここに深謝致します。

浜松市役所より、研究に必要となる高精度三次元地図を貸与頂きました。ここに深謝致します。

研究室にて、6年間に渡り、事務手続き等を献身的に支援して下さった小野田悦子様
に深謝致します。

研究当初に実験を手伝って頂いた安藤隆史君、仲秋喬介君、研究終盤に助言を頂いた瀬川佳祐君、長谷川丈君及び木谷研究室で共に学んだ仲間
に深謝致します。

最後に、仕事と学業に時間を割き、迷惑をかけた家族、妻 愛及び長男 康介に深謝
致します。

【参照文献等】

- [1] Sonja Heikkilä, “Mobility as a Service – A Proposal for Action for the Public Administration Case Helsinki,” master’s thesis of Aalto University, pp.1-94, 2014.
- [2] 浜松市産業部産業振興課：
<https://www.city.hamamatsu.shizuoka.jp/sangyoshinko/shinsangyo/kouseidochizu.html> (参照 2024-2-10)
- [3] 一般財団法人日本デジタル道路地図協会：
<https://www.drm.jp/database/structure/>(参照 2024-2-10)
- [4] 小澤正, 吉田光伸, “モバイルマッピングシステム (MMS) の進化,” 三菱電機技報, vol. 90, no. 2, pp. 51-54, 2016.
- [5] 島嘉宏, 富樫健司, 千葉洋平, “モバイルマッピングシステム (MMS) によるレーザ計測性能評価,” 三菱電機技報, vol. 88, no. 2, pp. 50-53. 2014.
- [6] 久保信明, 図解よくわかる 衛星測位と位置情報, 日刊工業新聞社, 2018.
- [7] 国土交通省, 作業規程の準則, 2023.
- [8] 久保田誠也, 須崎純一, 栗木周, “プローブデータを用いたデジタル道路地図位置ずれ自動補正手法の開発,” 交通工学論文集第 3 巻第 2 号(特集号 A), pp. A_44-A_52, 2017.
- [9] 金杉洋, 瀬戸寿一, 関本義秀, 柴崎亮介, “オープンストリートマップ道路データとデジタル道路地図の比較,” GIS-理論と応用, pp. 43-48, 2019.
- [10] 渡辺完弥, 今井龍一, 田中成典, “多様な交通モードのプローブデータの分析に適したデジタル道路地図の生成手法に関する研究,” 土木学会論文集 F3 (土木情報学 Vol. 2 No. 2) 第 3 巻第 2 号(特集号 A), pp. I_231-I_241, 2016.
- [11] Joshua S. Greenfeld, “Matching GPS observations to locations on a digital map,” Transportation Research Board 81st Annual Meeting, pp.1-13, 2002.
- [12] 森博子, “プローブカーデータの分析による燃費予測モデルの構築,” 交通工学論文集第 2 巻第 2 号(特集号 A), pp. A_28-A_36, 2016.
- [13] 萩田賢司, 森健二, “GIS を活用した交通事故分析システムの開発,” 土木計画学講演集, No. 298 pp1-4, 2011.
- [14] 今井龍一, 中村健二, 塚田義典, 土田直之, 山本忍, “ダイナミックマップを用いた道路地物の 3 次元空間の領域生成に関する研究,” 土木学会論文集 F3 (土木情報学) /78 巻 (2022) 2 号, pp. I_93-I_102, 2022.
- [15] Zhibin Bao, Sabir Hossain, Haoxiang Lang, Xianke Lin, “A review of

high-definition map creation methods for autonomous driving,” Engineering Applications of Artificial Intelligence, pp.1-19, 2023.

[16] Gamal Elghazaly, Raphaël Frank, Scott Harvey, Stefan Safk, “High-Definition Maps: Comprehensive Survey, Challenges, and Future Perspectives,” IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems (Volume: 4), pp.527-550, 2023.

[17] F. Tsushima, N. Kishimoto, Y. Okada, W. Che, “CREATION OF HIGH DEFINITION MAP FOR AUTONOMOUS DRIVING,” The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.XLIII-B4-2020, 2020 XXIV ISPRS Congress (2020 edition), pp.415-420, 2020.

[18] 今井龍一, 谷口寿俊, 山田実典, “自動運転用地図・ダイナミックマップ及び道路基盤地図情報の相互変換手法に関する研究,” 土木学会論文集 F3 (土木情報学) /74 巻 (2018) 2 号, pp.I_90-I_101, 2018.

[19] 井川元, 渡辺陽介, 高田広章, “高精度地図データおよび点群データの検索効率化手法,” DEIM Forum 2019 H5-4, pp.1-8, 2019.

[20] Hyunchul Roh, Jinyong Jeong, Younggun Cho, Ayoung Kim, “Accurate Mobile Urban Mapping via Digital Map-Based SLAM,” Sensors 2016, volume 16, issue 8, pp.1-24, 2016.

[21] 赤井直紀, 竹内栄二郎, 山口拓真, モラレス ルイス 洋一, 吉原佑器, 奥田裕之, 鈴木達也, 二宮芳樹, “INS とマルチレイヤー LiDAR を用いた自動運転車両のための高精度自己位置推定,” 自動車技術会論文集/49 巻 (2018) 3 号, pp.675-681, 2018.

[22] 藤間隆生, 石川恭匡, 高橋直樹, 高浜琢, 野中謙一郎, “外界センサと GNSS を融合した Moving Horizon Estimation による地図上の車両位置補正,” 自動車技術会論文集/51 巻 (2020) 4 号, pp.727-732, 2020.

[23] 梅原喜政, 塚田義典, 中村健二, 田中成典, 中畑光貴, “幾何と位相の特徴に基づいた点群データからの道路地物の識別に関する一考察,” 情報処理学会論文誌, Vol.62 No.5, pp.1218-1233, 2021.

[24] 糸氏敏郎, 今野新, 関谷浩孝, “点群データの取得条件と検知可能な路面ポットホールとの関係の基礎分析,” 土木技術資料, Vol.61 No.12, pp.46-49, 2019.

[25] 本間亮平, “高精度道路地図整備と舗装面維持管理のための MMS 点群からの道路情報ベクトルデータ抽出,” 博士論文, 北海道大学, 2023.

[26] 竹内浩太, 武田龍斗, 郭清蓮, 池田凌, 平野魁人, 殿岡武也, “路側認知を特徴とする山道 HD マップ自動作成システム,” 情報処理学会第 84 回全国大会, pp2-381-2-382, 2022.

[27] 松尾和哉, 高木雅, 中田亮太, 森航哉, “高精度ダイナミックマップ作成のための

点群位置合わせを応用した動的物体検知・同定システムに関する検討,” 情報処理学会研究報告, Vol.2021-HCI-195 No.6, pp1-8, 2021.

[28] 盛田彰宏, 黒須秀明, 益子亮太, 下山智央, “ダイナミックマップ作成に用いられる3次元位置情報の防災・減災および社会インフラ管理への活用,” システム制御情報学会 システム/制御/情報/49 巻 (2016) 11 号, pp469-474, 2016.

[29] 齊藤慶一, 細野航平, 藤睿, 佐藤健哉, “車両密度を考慮したエッジサーバの利用によるダイナミックマップシステムの負荷分散方式の検討,” 情報処理学会第84回全国大会, pp3-53-3-54, 2022.

[30] 細野航平, 槇晶彦, 渡辺陽介, 高田広章, 佐藤健哉, “車両走行車線区間に基づくダイナミックマップシステムのエッジサーバ割当方式,” 情報処理学会研究報告 高度交通システムとスマートコミュニティ (ITS), Vol.2020-ITS-80 No.9, pp1-8, 2020.

[31] 杉坂竜亮, 佐藤健哉, “車両走行状況を考慮したダイナミックマップの効率的更新手法,” 2018 年度情報処理学会関西支部 支部大会研究報告, pp1-6, 2018.

[32] 赤間優樹, 後藤厚宏, “ダイナミックマップにおけるプローブデータクレンジングの検討,” 情報処理学会第80回全国大会, pp3-439-3-440, 2018.

[33] Viktor Tihanyi, András Rövid, Viktor Remeli, Zsolt Vincze, Mihály Csonthó, Zsombor Petho, Mátyás Szalai, Balázs Varga, AwsKhalil, Zsolt Szalay, “Towards Cooperative Perception Services for ITS: Digital Twin in the Automotive Edge Cloud,” *ournals Energies* Volume 14 Issue 18, pp.1-26, 2021.

[34] 新村文郷, 小川住雄, 佐治斉, “衛星画像を用いた道路混雑状況の判別,” 画像電子学会誌 第40巻 第6号(2011), pp.1027-1031, 2011.

[35] 上瀧剛, 内村圭一, “ITS 応用のための地図作りの自動化,” 電子情報通信学会基礎・協会ソサイエティ Fundamentals Review Vol.6 No.2, pp.95-1001, 2012.

[36] 大野裕幸, 遠藤涼, 中埜貴元, 篠田昌子, “空中写真を用いた地物抽出性能評価用データセットの構築,” 2019 年度人工知能学会全国大会 (第33回), pp.1-4, 2019.

[37] 岡田成弘, 大前学, “自動運転車の円滑な走行を実現するための 空間情報基盤を介した協調走行に関する研究,” 自動車技術会論文集/47 巻 (2016) 5 号, pp.1197-1204, 2016.

[38] Wei Zhou, Dong Chen, Jun Yan, Zhaojian Li, Huilin Yin, Wanchen Ge, “Multi-agent Reinforcement Learning for Cooperative Lane Changing of Connected and Autonomous Vehicles in Mixed Traffic,” *Autonomous Intelligent Systems*, arXiv:2111.06318v2, pp.1-20, 2024.

[39] 市川博一, 竹之内篤, “車両プローブによる車線別道路交通情報に係る技術開発,” SIP 成果報告書, pp.24-30, 2021.

[40] 横山達也, 白石陽, “交通状況把握のための運転行動の時系列性を考慮した車両挙

動分析手法,” 情報処理学会論文誌, Vol. 60 No. 1, pp. 87-100, 2019.

[41] 米陀佳祐, 三田誠一, ヤン チェンシー, ドー コク フイ, テヘラニ ホセイン, 江川万寿三, 武藤健二, “自動運転システム用のレーンチェンジ経路計画,” 自動車技術会論文集/47 巻 (2016) 1 号, pp. 165-170, 2016.

[42] 久松堯史, 大前学, 原孝介, “一般道での利用を想定した個人適合可能な車線維持支援に関する研究,” 自動車技術会論文集/48 巻 (2017) 3 号, pp. 771-777, 2017.

[43] Mordechai (Muki) Haklay, Patrick WeberHyunchul, “OpenStreetMap: User-Generated Street Maps,” PERVASIVE computing, IEEE CS n 1536-1268, pp. 12-18, 2008.

[44] 早川知道, 伊美裕麻, 伊藤孝行, “日本の OpenStreetMap におけるコミュニティ発展と継続のための分析と課題,” 日本経営工学会論文誌, Vol. 66 No. 4, pp. 317-326, 2016.

[45] 小川圭一, “都市間高速道路における案内標識の表示地名に関する研究,” 交通科学 Vol. 53, No. 2, pp. 16-21, 2022.

[46] 羽倉輝, 宮柱太一, 栗達, 山口琉太, 小野晋太郎, 河合由起子, “交差点事故防止マップ生成のための GSV と OSM に基づくカーブミラー検出の提案,” 情報処理学会第 85 回全国大会, pp483-484, 2023.

[47] 今井龍一, 深田雅之, 重高浩一, “交通データの分析・可視化基盤に関する取り組み,” 交通工学 50 号, pp. 18-21, 2015.

[48] 岩井哲, 川上善嗣, “建物の地震被害調査への GPS と LOG 機能付きカメラの活用,” 広島工業大学紀要研究編, 第 57 巻 pp137-145, 2023.

[49] 国土交通省国土地理院, 品質の要求, 評価及び報告のための規則, 2019.

[50] 坂井丈泰, GPS 技術入門, 東京電機大学出版局, 2003.

[51] 国土交通省国土地理院, 電子基準点とは : https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi_about_GEONET-CORS.html (参照 2023-12-12)

[52] 国土交通省国土地理院, 車載写真レーザ測量システムを用いた三次元点群測量マニュアル (案), 2019.

[53] ダイナミックマップ構築検討コンソーシアム, 地図データ作成要領 (案) Ver 1.0, 2016.

[54] 東京臨海部実証実験コンソーシアム, 自動走行システム向け地図データ仕様への提案 Ver. 1.1 【地図データ作成時におけるガイドライン】, 2021.

[55] ダイナミックマップ構築検討コンソーシアム, 自動走行システム向け地図データ仕様への提案 Ver. 1.1, 2017.

[56] ダイナミックマップ構築検討コンソーシアム, 自動走行システム向け地図データ符号化仕様への提案 (試作データ用符号化仕様) Ver. 1.0, 2017.

[57] 一般財団法人日本デジタル道路地図協会，全国デジタル道路地図データベース標準 DRM 標準フォーマット 21 運用規程世界測地系第 1.6 版，2017.

[58] 一般財団法人日本デジタル道路地図協会，DRM 標準フォーマット 21 第 1.3 版，2012.

[59] 浜松市役所都市整備部都市計画課：
<https://www.city.hamamatsu.shizuoka.jp/toshikei/city/tosike/map/index.html>
(参照 2022-1-31)

[60] 内閣府，みちびき 7 機体制，<https://qzss.go.jp/overview/services/seven-satellite.html>(参照 2023-12-12)

[61] 佐田達典，GPS 測量技術，株式会社オーム社，2003.

[62] Pratap Misara and Per Enge 測位航法学会訳，精説 GPS 基本概念 測位原理信号と受信機，松香堂書店，2010.

[63] hamamatsu-gnss.org：<https://hamamatsu-gnss.org/> (参照 2023-8-8)

[64] 高須知二，RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning：<https://rtklib.com/> (参照 2023-8-8)

[65] ESRI ジャパン株式会社，ArcGIS Pro：
<https://www.esri.com/products/arcgis-pro/> (参照 2024-1-31)

[66] 一般財団法人日本デジタル道路地図協会：
<https://www.drm.jp/database/content/> (参照 2023-8-8)

[67] ダイナミックマッププラットフォーム株式会社，高精度 3 次元地図データ (HD マップ)：
<https://www.dynamic-maps.co.jp/service/hdmap/index.html> (参照 2024-1-31)

[68] 国土交通省国土地理院，国土地理院技術資料 A・1 -No. 306 品質の要求，評価及び報告のための規則 Ver. 1.0，2007.

[69] 国土交通省国土地理院，地理情報標準プロファイル (JPGIS)：
<https://www.gsi.go.jp/GIS/jpgis-jpgidx.html> (参照 2023-12-12)

[70] 中村英夫，清水英範，測量学，技報堂出版株式会社，2001.

[71] 渡辺完弥，今井龍一，田中成典，“車線単位の道路ネットワークデータの効率的な整備手法に関する研究”，土木学会論文集 F3(土木情報学)，Vol. 68，No. 2，PP. I_117-I_126，2012.

[72] 今井龍一，谷口寿俊，田中拓也，“車線単位の道路交通分析に適した大縮尺道路地図の要件に関する基礎的研究”，土木学会論文集 F3 (土木情報学) /73 卷 (2017) 2 号，pp. I_398-I_408，2017.

[73] 一般財団法人日本デジタル道路地図協会：
<https://www.drm.jp/database/content/> (参照 2023-8-8)

- [74] 一般財団法人日本デジタル道路地図協会：
<https://www.drm.jp/database/case/>（参照 2023-8-8）
- [75] 一般財団法人日本デジタル道路地図協会，DRM ニュース 平成 30 年夏号 no. 61，
pp. 2-9，2018.
- [76] 塚田幸広， 畠中秀人， 杉浦孝明，“道路交通政策における ITS の展開に関する国際比較，”運輸政策研究， vol.12， no.2， p.11， 2009.
- [77] 株式会社ゼンリンデータコム， プローブデータの収集方法：
<https://www.zenrin-datacom.net/solution/blog/probedata-commentary>（参照 2024-1-31）
- [78] 株式会社ゼンリンデータコム， 交通分析ソリューションのご紹介， 2024.
- [79] 住友電工システムソリューション株式会社， Traffic Vision プローブデータ & サービス：
https://www.traffic-probe.jp/telematics/tv_probe.html（参照 2024-1-31）
- [80] 小原光暁， 檜山武浩， 関本義秀， 小俣博司，“公用車の長期 GPS データを用いた利用分析と最適化の可能性～はたらく車プロジェクトを通じて～，”交通工学論文集第 4 巻 第 1 号(特集号 A)， pp. A_286-A_293， 2018.
- [81] 加古川市， 加古川市舗装長寿命化修繕計画， 2020.
- [82] 藤沢市， 藤沢市道路ストック白書， 2019.
- [83] 浜松市， 浜松市舗装維持管理ガイドライン， 2018.
- [84] 一般財団法人日本デジタル道路地図協会：
<https://www.drm.jp/database/shipment/>（参照 2024-1-31）
- [85] 国土交通省， 土木設計業務等積算基準， 2023.
- [86] 国土交通省， 道路統計年報 2022， 2022.
- [87] 浜松市役所土木部道路企画課：
https://www.city.hamamatsu.shizuoka.jp/dourokikaku/kaitsu/simoisidaaoinisen_kamijima.html（参照 2023-8-8）
- [88] 目黒淳一， 竹内栄次郎， 鈴木太郎，“ロボティクスにおける GNSS 失敗学，”日本ロボット学会誌 Vol.37 No.7， pp.585-592， 2019.
- [89] 国土交通省国土地理院， 品質の要求， 評価及び報告のための規則， 2019.
- [90] 上瀧剛， 内村圭一， 胡振程，“ネットワーク型 Active Shape Models による道路地図の位置精度の向上，”情報処理学会論文誌， vol.47， no.12， pp.3079-3089， 2006.
- [91] Gell'ert M'attyus， Wenjie Luo， Raquel Urtasun，“DeepRoadMapper: Extracting Road Topology from Aerial Images，”， IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)， pp.3438-3446， 2017.
- [92] Favyen Bastani， Songtao He， Sofiane Abbar， Mohammad Alizadeh， Hari

Balakrishnan, Sanjay Chawla, Sam Madden, David DeWitt, “RoadTracer: Automatic Extraction of Road Networks from Aerial Images,” ICCV 2017 THE COMPUTER VISION FOUNDATION, pp.1-9, 2017.

[93] 西村孝, 藤吉弘亘, “空撮画像と衛星画像のレジストレーションによる道路状況把握のための車両移動方向の可視化,” 情報処理学会研究報告 2009-CVIM-163, pp.129-136, 2008.

[94] 独立行政法人宇宙航空研究開発機構 : <https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/project/alos-3/> (参照 2024-1-31)

[95] さくらインターネット株式会社, Maxar 衛星画像 分解能 40cm 日本国内域 : https://www.tellusxdp.com/ja/catalog/data/maxar_satellite_image_resolution_40cm_area_japan_domestic.html (参照 2024-1-31)

[96] 国土交通省, PLATEAU : <https://www.mlit.go.jp/plateau/> (参照 2024-1-31)

[97] 国土交通省都市局, 自動運転車両の自己位置推定における VPS(Visual Positioning System)活用 Ver2 技術検証レポート, 2023.

【付録】道路台帳

【付-1】道路台帳の現状と研究概要

道路法第 28 条第 1 項に「道路管理者は、その管理する道路の台帳（以下、道路台帳という。）を調整し、これを保管しなければならない。」とある。道路台帳は図面や調書等を総称するものであり、本研究では道路構造物や地形を図面に表現した道路台帳現況平面図を研究対象としている。浜松市では地図情報レベル 500 の道路台帳現況平面図等により道路の情報が管理されており、インターネット等により公開されている。道路台帳の変更修正は道路形状の変更時に作成される道路竣工図等により行われている。

自動運転支援のための高精度三次元地図は地図情報レベル 500 が想定されており、MMS で取得した点群情報や画像情報は公共測量として地図情報レベル 500 の精度が担保されている。高精度の地図情報整備には高額な費用が必要となり、データの高度利用や作成過程に発生した各種情報の有効活用がコスト削減のためには重要である。

そこで、研究の趣旨とは異なるが、MMS にて取得した点群情報や車載カメラの画像情報を利用して、新たに道路台帳現況平面図を作成し、位置精度について検証をする。

MMS を利用して道路台帳現況平面図を作成し、旧道路台帳現況平面図と比較した事例は極めて少ない。すなわち、元となる図面が古いこと、道路に関連する情報のみ更新されていること、光波測距儀を利用した測量経費が安いこと、公共測量における誤差がみとめられていること等を勘案すれば、施設管理のための高精度図面において精度検証のための新旧比較は課題とならないと推察される。

参考までに、浜松市では、ほとんどの地域において、10 年以上前に作成した地形図を背景地図として利用し、道路構造物に関連する情報を更新している。20 年以上前の箇所もあり、元となる図面の作成年度は確認できない。例えば、地形図が更新されるケースは土地区画整理など面的な整備を伴う道路情報の更新がされた場合には比較的新しい、地形図が採用され、合わせて道路に関する情報も更新される。

【付-2】MMS で取得したデータを利用した道路台帳の整備

図 77 で本研究の対象となる道路地図情報について再整理する。

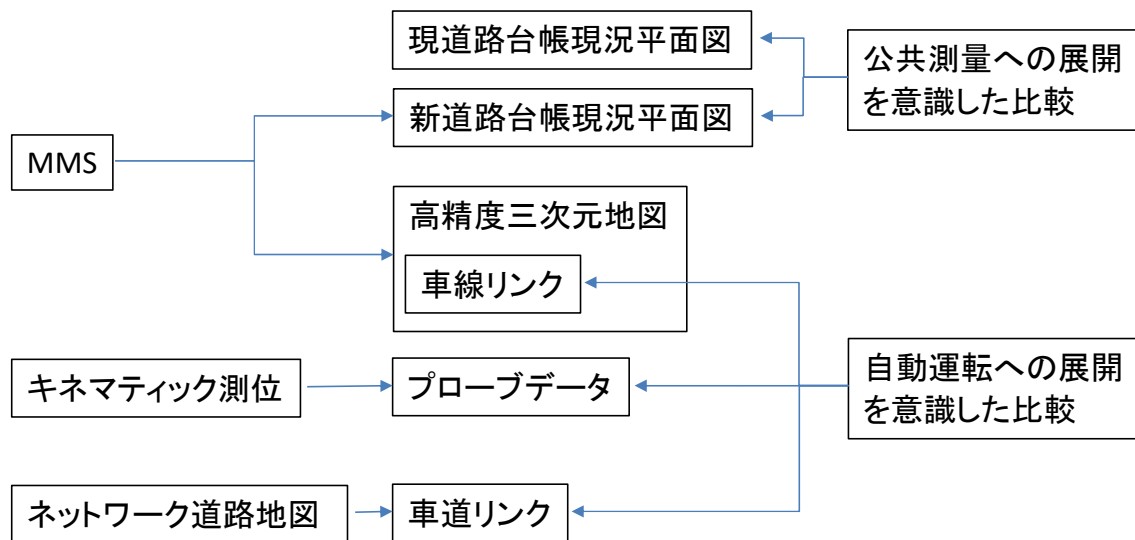


図 77 本研究で利用した道路地図情報

MMS により取得したステレオカメラ画像や点群情報等から道路台帳現況平面図を整備する業務を市内の測量会社である株式会社フジヤマに委託した。株式会社フジヤマは浜松市の道路台帳現況平面図の更新業務を受託している。新道路台帳現況平面図の整備箇所は高精度三次元地図作成範囲内の三か所の交差点付近とした。

MMS にて収集した画像データと点群情報を、図 78 に示すような重畳処理可能なソフトにて読み込む。画像データと点群情報を複合表示し、数値図化により地図情報レベル 500 地形図を作成する。また、図 79 は点群情報（反射輝度表示）のオルソ画像を作成し、CAD ソフト上に展開することにより画像不明瞭部等の補測図化に使用している例である。



画像データと点群データを重畳処理可能なソフトウェアにより図化



図 78 数値図化のイメージ

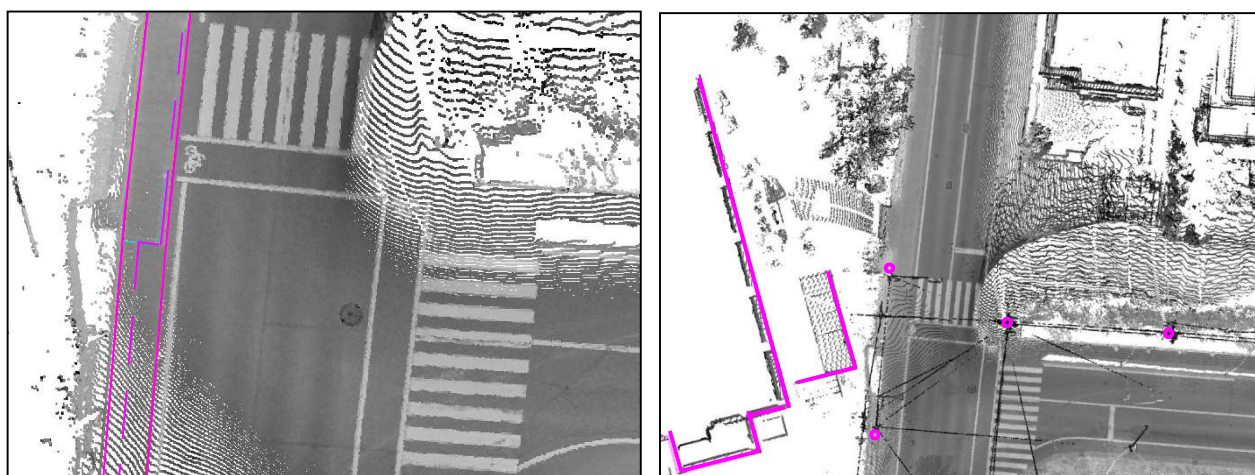


図 79 点群オルソによる補備測量

【付-3】各道路地図情報の比較

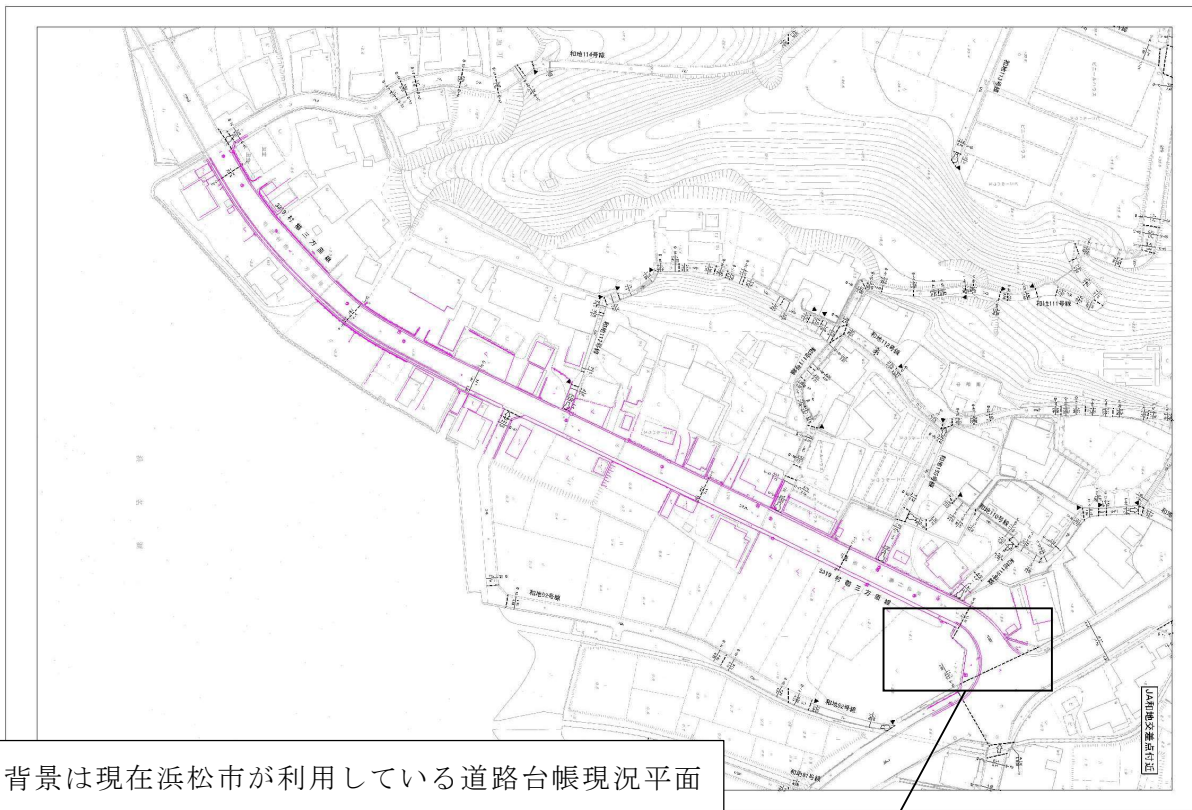
各道路地図を比較することにより、描画された地物の較差を確認する。現道路台帳現況平面図はラスターデータとして取得し、新規に作成した道路台帳現況平面図を重畳している。

【付-3-1】現道路台帳現況平面図と新道路台帳現況平面図

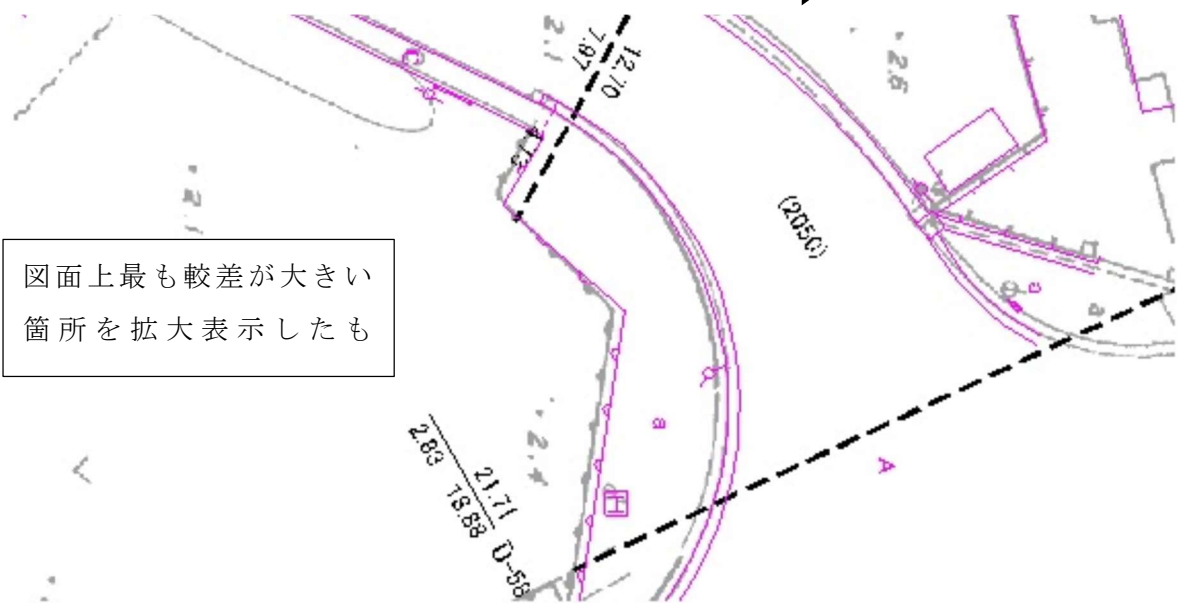
浜松市が保有している現道路台帳現況平面図と点群情報より整備した新道路台帳現況平面図を比較した結果を図 80, 図 81, 図 82 に示す。双方とも測量作業規程に基づき地図情報レベル 500 を保有しているため、高い精度で一致していることが確認できる。各図の下部には最も較差がある箇所を拡大したものであるが、交差点の端部において若干の較差が認められる。目視による判断であるが、全体を確認しても交差点端部の曲線部分において、3 か所に側溝の幅相当である 0.50m 程度の較差が認められた。

いずれも MMS からの計測距離が遠い箇所であり、計測誤差による可能性が高いと考える。人為的な誤差も否定できないが、後述する高精度三次元地図と新道路台帳現況平面図の比較では該当箇所の較差が解消されている高精度三次元地図と新道路台帳現況平面図の図化作業者は別組織で異なっているため、人為的な誤差の可能性は低い。

前述したように浜松市の道路台帳現況平面図の元データは 10 年以上前の地形図を利用し、道路形状の変化のみを更新し、反映させている。MMS による撮影が 2018 年、地図情報レベル 500 の作業規程上の誤差は標準偏差 0.25m であることを考慮すれば十分な精度であると考えられる。

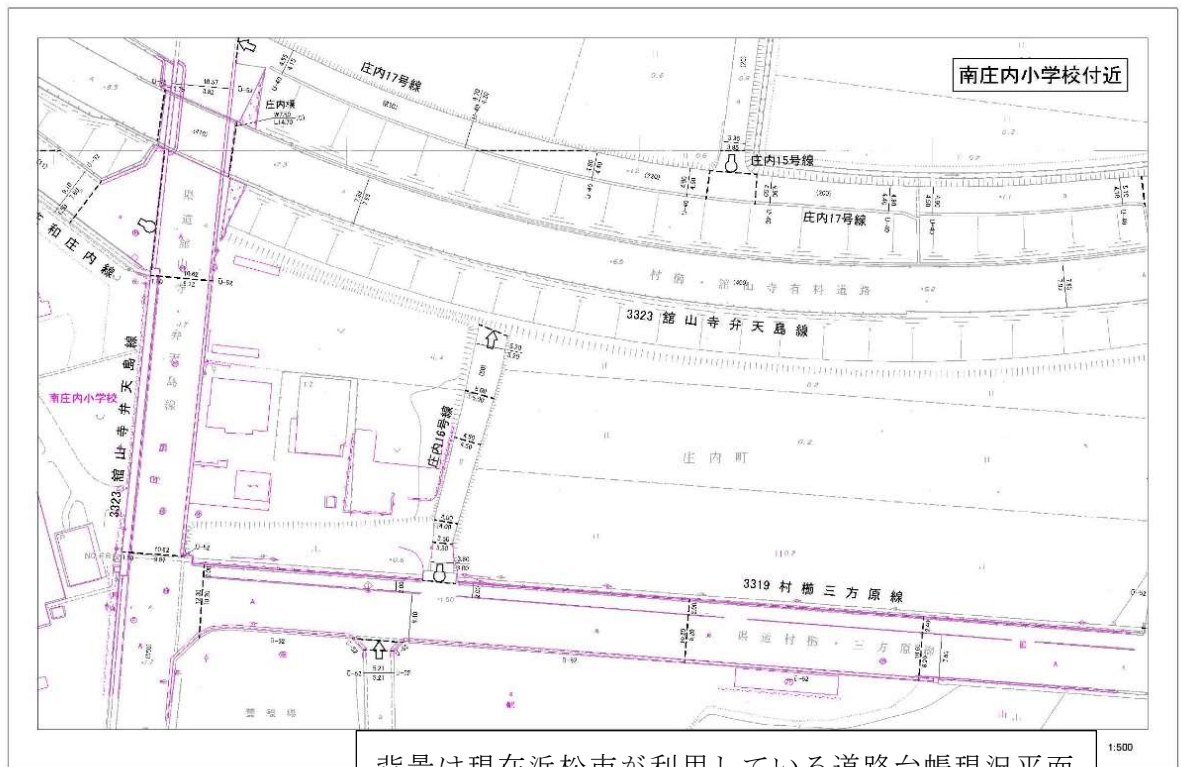


背景は現在浜松市が利用している道路台帳現況平面図，着色部分は本研究にて新規に図化したもの。



図面上最も較差が大きい箇所を拡大表示したも

図 80 JA 和地交差点付近の道路台帳現況平面図

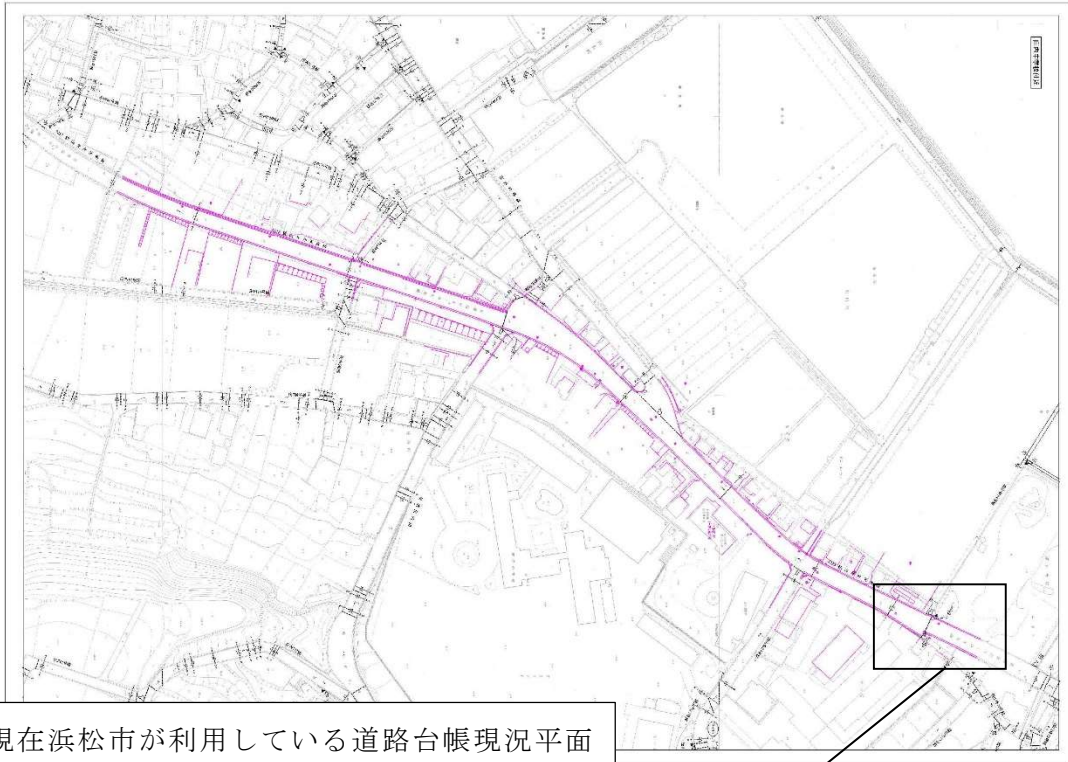


背景は現在浜松市が利用している道路台帳現況平面図，着色部分は本研究にて新規に図化したもの。

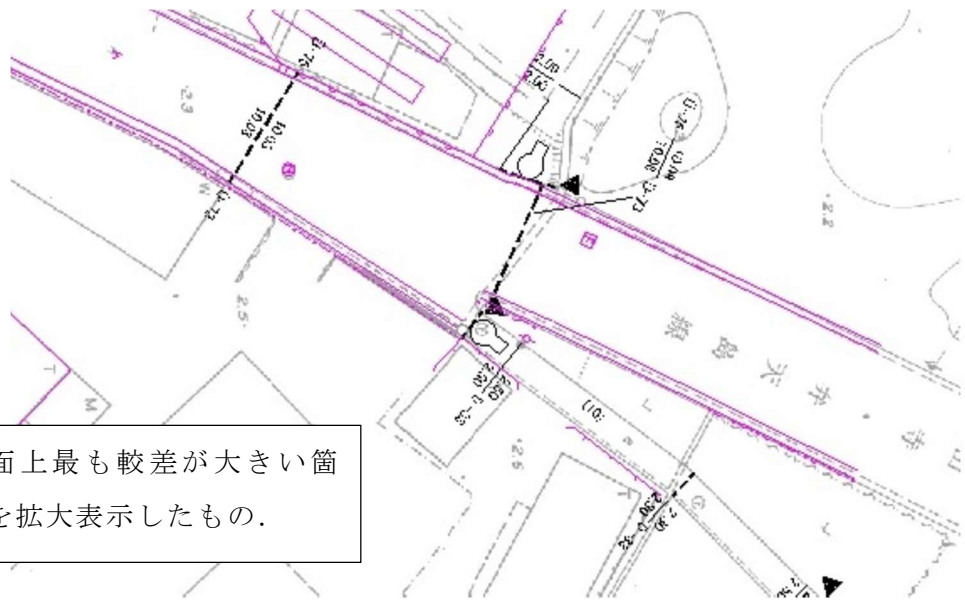


図面上最も較差が大きい箇所を拡大表示したもの。

図 81 南庄内小学校交差点付近の道路台帳現況平面図



背景は現在浜松市が利用している道路台帳現況平面図，着色部分は本研究にて新規に図化したもの。



図面上最も較差が大きい箇所を拡大表示したもの。

図 82 庄内中学校交差点付近の道路台帳現況平面図

【付-3-2】新道路台帳現況平面図と高精度三次元地図

図 83 は新道路台帳現況平面図に高精度三次元地図の車道境界線のみを表示したものである。双方の図面にて取得した地物で比較しやすい項目として車道境界線を比較する。双方の元データはMMSで計測した点群情報等であり、極めて高い精度で一致する。参考までに、図化した業者は異なっている。殆ど較差（0.1m以下で、目視では確認困難）は認められない。目視にて較差が大きいところを抽出しても、0.19m程度である。

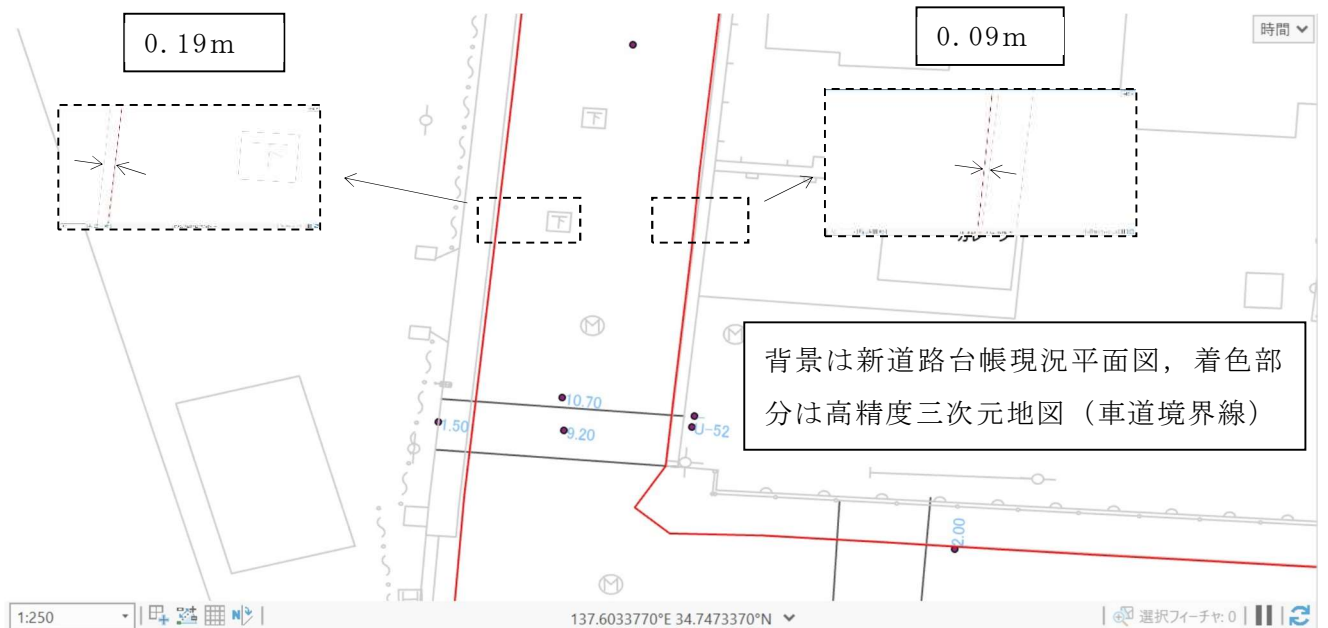


図 83 新道路台帳現況平面図と高精度三次元地図の較差

前述した図 81 の南庄内小学校交差点付近にて較差があった箇所に着目して図 84 に示すように、新道路台帳現況平面図と高精度三次元地図を比較した。図 85 はこれらを重ね合わせ、参考として図 81 の一部を表示したものである。

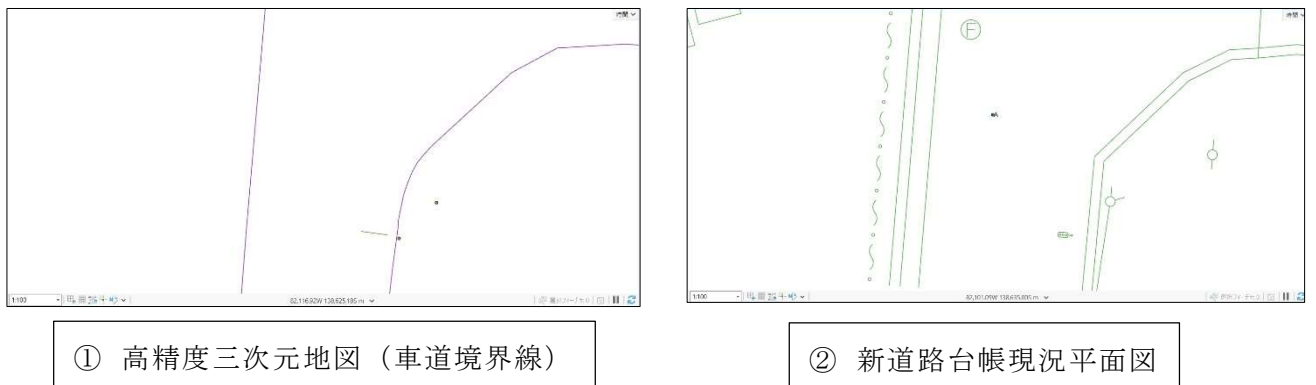


図 84 高精度三次元地図と新道路台帳現況平面図の比較

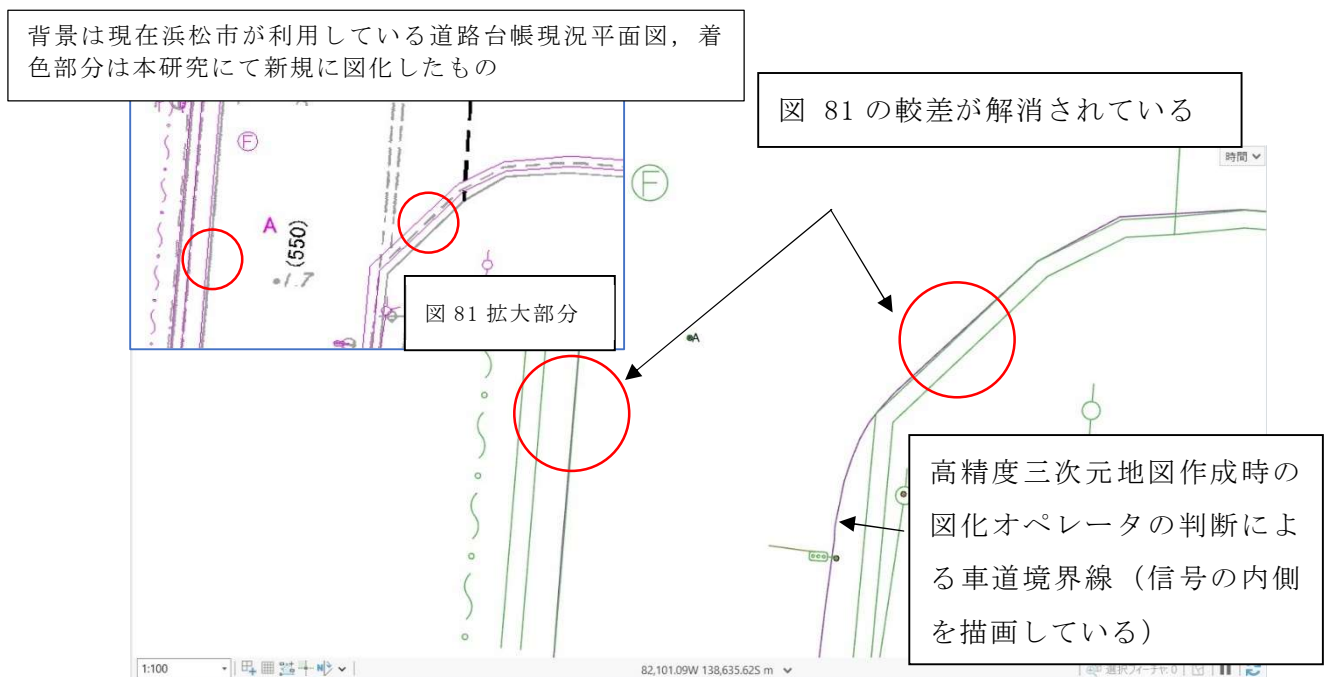


図 85 高精度三次元地図 (車道境界線) と新道路台帳現況平面図の重ね合わせ

図 81 において較差が認められた箇所も新道路台帳と高精度三次元地図では較差が解消されている。図化に利用した MMS 関連のデータが同一であるため一致した可能性が高い。

また、新道路台帳現況平面図と高精度三次元地図を作成した業者は異なっている。図 85 に示すように図化オペレータの判断により、車道境界線が異なっている場合もある。道路台帳現況平面図は道路の構造物を図化しているが、高精度三次元地図の取得基準は自

動車の走行範囲を意識して取得することになっているためである。

【付-3-3】まとめ

自動運転支援のために整備した高精度三次元地図作成時に発生した中間データの有効活用はトータルコストの縮減として重要である。今回の研究ではコスト縮減の1つとしてMMSにて取得したデータを利用して、道路台帳現況平面図を作成した。

例えば、自動運転支援のための高精度三次元地図を民間で整備した場合、MMS取得時に公共測量としての技術基準に適合していないと、行政が管理する台帳等を整備する資料として利用できない可能性がある。

視点を変えると、民間主導で拡大する可能性が高い高精度三次元地図整備に対して、補助金等を提供することにより、公共測量として位置づけ、MMSを用いて取得したデータを行政が利用することも考えられる。

行政等が管理する台帳など図面を作成するためには公共測量としての地図情報レベル500を作成するためのMMS機材を利用する必要がある。本研究で作成した道路台帳現況平面図はこれらの仕様を満たしており、現在浜松市が利用している道路台帳現況平面図と比較しても問題ないと考えられる。

作成年度が異なっており、図化に利用した元データ（航空機とMMS）も異なっていたが、作成された道路台帳現況平面図と浜松市が利用している道路台帳現況平面図は目視による確認であるが、概ね一致していた。

高精度三次元地図を普及するためには、MMSにて取得したデータ等の多目的利用が重要である。