

カーナビゲーションのための地理空間情報の
伝達に関する研究

Studies on Conveying Geospatial Information to Car Navigation Systems

関 口 隆 昭

2021 年 12 月

内容梗概

近年、サイバーフィジカルシステム (CPS) の普及が進んでいる。CPS は、実世界 (フィジカルシステム) においてセンサシステムが収集した情報をサイバー空間上でデジタル技術を活用して解析し、その結果に基づいて実世界を制御する。自動運転システムに代表される自律動作可能なモビリティも CPS の一形態であるが、モビリティの場合、実世界の制御にはリアルタイム性や信頼性が強く求められる。そのため、エッジ側の組込みシステムは単純なセンサシステムとしてではなく、制御に必要な地理空間情報は自身に保持し、自律的に動作可能なシステムとして構成する必要がある。

こうした背景のもと、本研究ではカーナビゲーションのための地理空間情報の伝達について論じる。モビリティへ地理空間情報を伝達する過程には、地理空間情報の収集、構造化、配信、および利用という 4 つのフェーズがある。この各フェーズにおいて、本研究では特に、自律動作するモビリティの適用範囲が高速道路だけでなく一般道や細街路まで拡大する際の課題を明らかにして、課題を解決するための方式を提案する。具体的には、物理空間上の情報をカメラで取得する際にプライバシーを保護する方式、モビリティへの地理空間情報配信を高速化する方式、および、複数のサービスから配信される地理空間情報間の位置参照精度を向上する方式を提案する。

物理空間上の情報をカメラで取得する際にプライバシーを保護する方式に関しては、従来、監視カメラから被写体のプライバシーを保護するために、映像内の人物領域の隠蔽や、被写体によるカメラ制御等を行う技術が提案されている。しかしこれらの技術は被写体のプライバシー保護に有効である一方、本来記録すべき犯罪行為等をも隠蔽してしまうなど、映像の閲覧者側への配慮がなされていない。そこで本研究では、プライバシー保護と映像閲覧の両立を図るため、閲覧者と被写体の関係に基づき被写体ごとに異なるレベルの画像処理をエッジ側で行うことによりプライバシーを保護するシステムを提案する。

モビリティへの地理空間情報配信を高速化する方式に関しては、圧縮データの伸張処理によるナビ性能低下をユーザが感じないように、地図データの多くを占める固定長レコードを対象に高速伸張可能な圧縮方式を提案する。提案方式は、RDBMS で普及しつつある列指向データ圧縮をベースに、組込みシステムのキャッシュ効率化と複数の軽量な符号化方式を利用することで、Zlib 相当の圧縮率と非圧縮時同等のリード性能の実現を図る。

複数のサービスから配信される地理空間情報間の位置参照精度を向上する方式に関しては、カーナビの経路情報を自動運転システムに伝達する機能を対象に、その改善について論

じる．動的位置参照方式の 1 つである **OpenLR** の一致率を，物理データフォーマットと最短経路計算に起因する誤りを削減することにより改善するとともに，変換前後の経路の形状の差異を確認することにより，経路の一致を自動判定する方式を示す．

以上の提案方式により，自律動作可能なモビリティの適用範囲を一般道や細街路に拡大する際の課題を解決し，交通事故の削減，高齢化によるタクシーやトラック等における労働力不足への対応，移動弱者のための移動手手段の確保等の社会課題の解決に貢献できる．

Abstract

Recently cyber-physical systems (CPS) are becoming more popular. CPS acquires information from sensor systems in the real world (physical system), analyzes those data using digital technologies in cyber spaces, and controls the real world based on the analysis results. Autonomous mobilities such as automated driving systems are also one of CPS and require real-time response and reliability. Therefore, it is mandatory to configure the edge-side embedded systems not as simple sensor systems, but as systems which can be operated autonomously by holding geospatial information required for controlling themselves.

In this paper, we describe methods to convey geospatial information to car navigation systems considering those backgrounds. Processes of conveying geospatial information to mobilities are classified into four phases: collection of geospatial information, structuring, distribution, and utilization. In each phase, we show issues when the coverage of autonomous mobilities expands not only to highways but also to local roads. Specifically, we propose a method for protecting privacy when acquiring information in physical space with cameras, a method for fast distribution of geospatial information to mobilities, and a method for improving the accuracy of dynamic location referencing method between geospatial information on multiple services.

Regarding the method for protecting privacy when acquiring information in physical spaces with cameras, many techniques have been proposed to hide sensitive information in video images. While those techniques are useful for protecting privacy, there is some possibility to hide crimes that should be monitored. We propose a system that protects privacy by applying different image processing technologies in edge-side devices based on the relationship between observers and subjects for balancing privacy and awareness.

Regarding the method for fast distribution of geospatial information to mobilities, we propose a fast compression method designed especially for fixed-length data records consisting mostly of map data for users not to feel performance degradation due to the decompression process. The method is based on columnar data compression technology mainly used in RDBMS. We realize Zlib-equivalent compression ratio and high throughput equivalent to that of uncompressed data by considering cache efficiency of

embedded systems and several light-weight coding algorithms.

Regarding the method for improving the accuracy of dynamic location referencing method between geospatial information on multiple services, we describe the improvement for a function which transmits route information provided by car navigation systems to automated driving systems. We improve success rates of OpenLR, one of dynamic location referencing methods, by reducing errors due to the physical data format and shortest-path principal. We propose a method to judge route equivalence automatically by checking geometric dissimilarities between original routes and decoded routes.

The above methods will solve issues when the coverage of autonomous mobilities expands to local roads. It will contribute to solving social issues such as traffic accidents, labor shortages in taxis and trucks and supporting vulnerable road users.

目次

第1章	緒論	1
1.1	本研究の背景と目的	1
1.2	研究の位置づけと研究方針	4
1.3	本論文の構成	8
第2章	基本概念と関連技術	10
2.1	緒言	10
2.2	地理空間情報の収集	12
2.2.1	移動体による測量・計測	12
2.2.2	路側センシング	14
2.2.3	プライバシー保護	16
2.3	地理空間情報の構造化	18
2.3.1	モデリング	18
2.3.2	カーナビ用地図	20
2.3.3	高精度地図	24
2.4	地理空間情報の配信	24
2.4.1	データ圧縮	24
2.4.2	分割・差分更新	27
2.5	地理空間情報の利用	29
2.5.1	車載情報システム	29
2.5.2	位置参照方式	30
2.6	モビリティの適用範囲を一般道に拡大する際の課題	32
2.6.1	物理空間の情報をカメラで取得する際のプライバシー保護	32
2.6.2	モビリティへの地理空間情報配信の高速化	33
2.6.3	複数の地理空間情報間の位置参照精度向上	33
第3章	物理空間の情報をカメラで取得する際のプライバシー保護	35
3.1	緒言	35
3.2	関連研究	36
3.2.1	従来技術	36
3.2.2	OECD8 原則	37

3.2.3	問題点	38
3.3	閲覧者と被写体の関係に基づくプライバシー保護システム	39
3.3.1	提案システムの概要	39
3.3.2	プライバシー保護要求と閲覧要求の調整	40
3.3.3	プロトタイプシステム	45
3.4	評価	47
3.4.1	想定利用環境	47
3.4.2	要求調整に起因する負荷の考察	48
3.4.3	提案システムの有効性確認	49
3.4.4	提案システムにおける法的視点での課題	50
3.5	結語	51
第4章	モビリティへの地理空間情報配信の高速化	52
4.1	緒言	52
4.2	関連研究	53
4.2.1	列指向データ圧縮	53
4.2.2	PAX レイアウト	53
4.3	課題	54
4.3.1	要件	54
4.3.2	課題	55
4.3.3	目標	56
4.4	提案方式	57
4.4.1	提案する列指向データ圧縮方式の概要	57
4.4.2	伸長時のキャッシュレイアウト	58
4.4.3	軽量符号化方式の組合せ	60
4.5	評価	63
4.5.1	圧縮データリード性能	64
4.5.2	キャッシュレイアウトの効果	66
4.5.3	軽量符号化方式の組合せの効果	68
4.6	結語	70
第5章	複数の地理空間情報間の位置参照精度向上	71
5.1	緒言	71
5.2	関連研究	73

5.2.1	Pre-coded Location Referencing	73
5.2.2	Dynamic Location Referencing	73
5.3	課題	74
5.3.1	前提システム	74
5.3.2	課題	75
5.3.3	目標	76
5.4	提案方式	77
5.4.1	提案する経路情報変換方式の概要	77
5.4.2	DLR の一致率向上	78
5.4.3	変換前後の経路の一致判定	81
5.5	評価	83
5.5.1	DLR の一致率の評価	84
5.5.2	一致判定の正解率の評価	86
5.6	結語	89
第 6 章	結論	90
6.1	まとめ	90
6.2	今後の展望	92
	謝辞	94
	参考文献	95
	業績リスト	106

図目次

図 1-1	デジタル地図の市場規模推移	2
図 1-2	モビリティ分野での一般的なシステム構成	3
図 1-3	モビリティに地理空間情報が伝達される流れ	4
図 1-4	研究の位置づけ	7
図 2-1	路上に設置されるカメラの画像例	15
図 2-2	GDF の構成要素	20
図 2-3	KIWI フォーマットデータ構成	21
図 2-4	カーナビ用地図の階層構造とタイルデータ	22
図 2-5	検索データの構造の例	23
図 2-6	カーナビ用地図と高精度地図の差異	24
図 2-7	既存データ圧縮技術の分類	25
図 2-8	既存データ圧縮技術の圧縮率と実行性能	26
図 2-9	分割・差分更新方式の分類	27
図 2-10	分割・差分更新方式の問題	28
図 2-11	車載情報システムの構成例	29
図 2-12	位置参照の問題例	30
図 3-1	カメラに対するプライバシー保護の従来技術	37
図 3-2	閲覧者と被写体の関係に基づくプライバシー保護	39
図 3-3	提案するプライバシー保護システムの概要	40
図 3-4	制御ルールの例	42
図 3-5	プロトタイプシステムの構成	46
図 3-6	プロトタイプシステムの実行例	46
図 3-7	プライバシー保護要求の遅延時間	49
図 4-1	PAX によるデータ配置	54
図 4-2	地図データ圧縮の適用パターン	55
図 4-3	提案する列指向データ圧縮方式のデータ構造	57
図 4-4	提案方式におけるキャッシュ上のデータ配置	60
図 4-5	圧縮率と伸張性能	65
図 4-6	圧縮データリード性能の比較	66

図 4-7	レコード数 M と伸張性能.....	67
図 4-8	各符号化方式の性能比較 (データ A)	69
図 4-9	各符号化方式の性能比較 (データ B)	70
図 5-1	カーナビから自動運転システムへの経路情報の伝達	72
図 5-2	地図データの差異の例.....	72
図 5-3	カーナビ用地図と高精度地図の結合度の分類	75
図 5-4	提案する経路情報変換方式の概要.....	77
図 5-5	OpenLR エンコード・デコード手順.....	79
図 5-6	車線増加地点の例	80
図 5-7	経路一致の判定基準	82
図 5-8	DLR の一致率 (R_1)	85
図 5-9	誤変換の例	86
図 5-10	経路不一致の例.....	86
図 5-11	一致判定の正解率 (R_2)	87
図 5-12	判定誤り地点の例 (Rule 4)	88
図 5-13	判定誤り地点の例 (Rule 3)	88
図 5-14	判定誤り地点の例 (Rule 5)	88

表目次

表 2-1	関連技術.....	11
表 2-2	測量・計測による手法の分類.....	13
表 2-3	OECD ガイドラインの 8 原則.....	17
表 2-4	既存の位置参照方式.....	31
表 3-1	提案システムのプライバシー保護要件.....	41
表 3-2	実行例の制御ルール.....	47
表 3-3	想定利用環境.....	48
表 4-1	セットアソシアティブ方式パラメータ.....	58
表 4-2	列の特性と対応する符号化方式.....	61
表 4-3	提案方式で使用する符号化方式.....	62
表 4-4	評価環境のシステムの仕様.....	63
表 4-5	評価用テストデータ.....	64
表 4-6	ストレージリード時間 (t_u).....	64
表 4-7	圧縮サイズと伸張時間.....	65
表 4-8	圧縮データリード時間 (t_c).....	66
表 4-9	レコード数 M と性能測定結果.....	67
表 4-10	データ A に対する測定結果.....	68
表 4-11	データ B に対する測定結果.....	69
表 5-1	経路の変換結果の定義.....	76
表 5-2	各 LRP に含まれる情報.....	80
表 5-3	評価用地図データ.....	84
表 5-4	OpenLR 改善方式.....	84
表 5-5	OpenLR 改善方式の評価結果.....	85
表 5-6	一致判定基準の実行結果 (データ 3).....	87

第1章 緒論

1.1 本研究の背景と目的

近年、サイバーフィジカルシステム (Cyber Physical System, CPS) [1]の普及が進んでいる。CPS は、実世界 (フィジカルシステム) においてセンサシステムが収集した情報をサイバー空間上でデジタル技術を活用して解析し、その結果に基づいて実世界を制御するものである。CPS の代表例としては、例えば自動運転システムがある[2]。自動運転システムでは、自動車や道路側に設置されたセンサ (路側センサ) が実空間の様々な情報を収集し、デジタル技術を用いて解析した上で、車両の制御を行う。

これまでの CPS の研究では、AI 処理に注目したコンピューティング技術の開発や、クラウド側の AI 等に注目した取り組みが多い。これに対して、エッジ側の組込みシステムが満たすべき要件についての研究は比較的少なく、データがデータセンターではなくネットワークのエッジに格納され処理されるようなアーキテクチャの研究が必要である[3]。前述の自動運転システムに代表されるモビリティの場合、実世界の制御にはリアルタイム性や信頼性が強く求められる。そのため、エッジ側は単純なセンサシステムとして構成するのではなく、実世界の制御に必要な最低限の情報は自身に保持し、ある程度自律的に動作実行可能なシステムとして構成する必要がある。例えば、自動車の周辺にある障害物等を検知するために、現在は LiDAR (Light Detection and Ranging)、ミリ波レーダー、ステレオカメラ等のセンサが用いられている。これらのセンサから得られる情報を処理して周辺環境を認識し、認識した環境が将来どのように変化するかを予測したうえで車両を制御する必要があるが、収集したセンサ情報をサーバに送信して処理するような仕組みではリアルタイム性を確保することが困難なため、これらの一覧の処理はすべてエッジ側で行われる。

このようなモビリティの制御に必要な情報の 1 つとして、デジタル地図がある。自動運転制御の場合、道路上にある白線を認識して制御を行うことが多いが、そもそも白線が存在するか、走行中の道路に右左折専用レーンがあるかどうか等の情報をセンサだけで取得することは困難であるため、あらかじめ高精度な地図データを整備して車両に配信し、センサ情報と地図データを照らし合わせてより正確に環境を認識する。このようなデジタル地図の市場規模は、図 1-1 に示すとおり 2019 年に 61 億 9,000 万米ドルと推定されており、2020 年から 2027 年にかけて、CAGR 13.0%で拡大すると予想されている[4]。デジタル地図の用途としては、主に自動車、軍事関係、モバイルデバイス、エンタープライズソリューション、公共システムがあるが、この中でも特に自動車の占める割合が多い。自動車分野で

は、デジタル地図はこれまでカーナビゲーションシステムや交通情報システム等で使用されているが、今後は自動運転システムの普及に伴い、前述のような自動運転車両の制御に必要な高精度地図の使用が増加する見込みである。

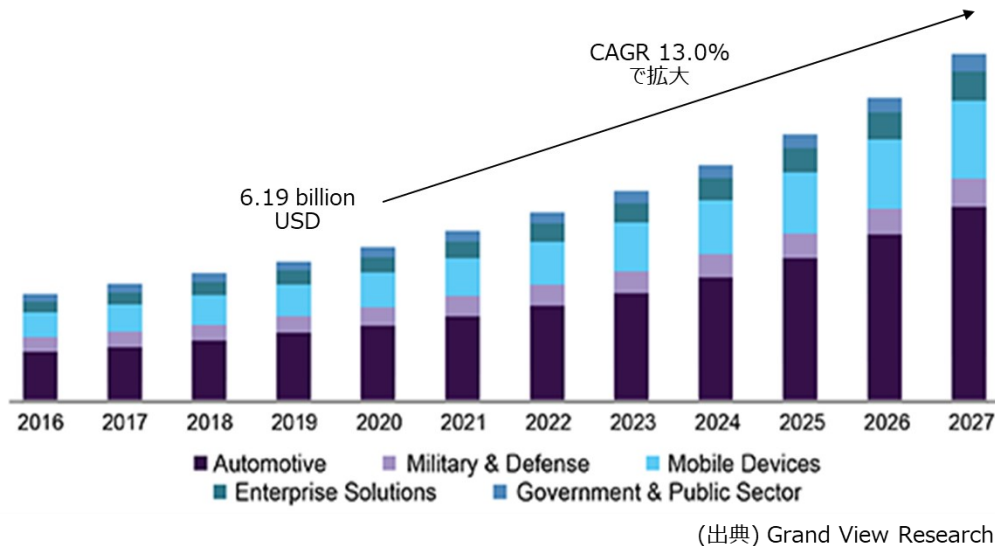


図 1-1 デジタル地図の市場規模推移

図 1-2 に、モビリティ分野での一般的なシステム構成を、デジタル地図に着目して記載する。前述のとおりモビリティ分野ではエッジ側の機能にリアルタイム性が強く求められるため、デジタル地図はクラウド側だけでなく、エッジ側にも搭載されることが多い。一般的なカーナビゲーションシステムの場合、ドライバーに対する道案内は、カーナビゲーションシステムに搭載されたデジタル地図を用いてエッジ側のみで実行する。クラウド側に搭載されるデジタル地図は、渋滞情報の予測、複数の地点を巡回するルートの生成等、コンピューティング能力を必要とするがリアルタイム性はそれほど求められないような処理に用いられる[5][6]。運転支援システムや自動運転システムも同様であり、自動車がセンシングした情報は、自動車に搭載されている地図上にマッピングして解析され、その結果に基づいて車両の制御が行われる。一方で、クラウド側に搭載されるデジタル地図は、車両のセンサーからは見えない広域の情報を管理し、遠方に存在する障害物や事故、渋滞等の情報を先読みして車両に通知するなど、リアルタイム性が比較的求められない処理に用いられる。

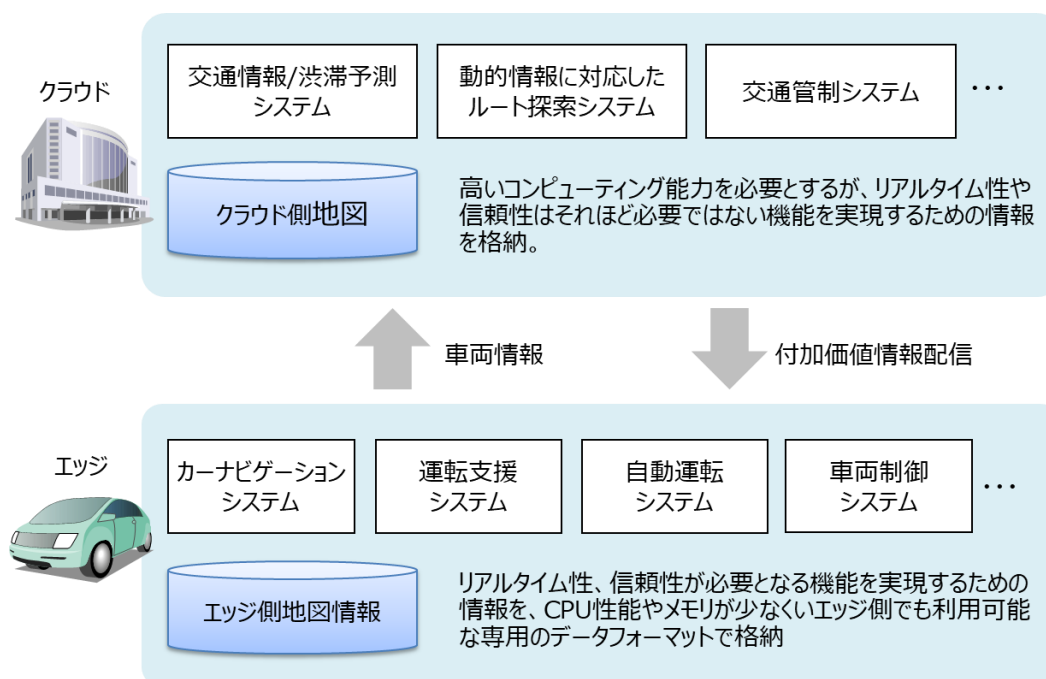


図 1-2 モビリティ分野での一般的なシステム構成

上記のようにクラウドとエッジの両方にデジタル地図を搭載するようにシステムを構成する一方で、実世界では地形が変化したり新しい道路が開通したりするなど、情報が常に変化している。システムが参照するデジタル地図と実世界の情報に差異があると、システムが誤動作するなどの問題が起こりうるため、実世界の変化に応じてシステムが使用するデジタル地図も最新の情報に更新する必要がある。この更新は、道路の建設計画を参照したり、測量車両や路側センサを用いたりすることで実世界の情報を取得し、取得した情報を解析してデジタル地図としてまとめ、これをクラウド側およびエッジ側に伝達することによって行われる（すなわち、カーナビゲーションシステムや自動運転システム等が動作するために必要なデジタル地図を伝達するプロセス自体も、CPS としての側面を持っている）。カーナビゲーションシステムや自動運転システム等が正常に動作するためには、このデジタル地図のエッジ側への伝達が滞りなく行われなければならない。

これらの背景のもと、本研究では、センサで取得した情報やデジタル地図等を含む地理空間情報をカーナビゲーションのために伝達する方法について述べる。特に、モビリティとして自動車システムを対象とし、今後自動運転システム等の自律動作可能なモビリティが必要とされる領域が高速道路だけでなく一般道や細街路へと拡大していく際に問題となる、地理空間情報の元となる実世界の情報をセンシングする際にプライバシーを保護する方法、クラウド側からエッジ側へ一般道を含む膨大な地理空間情報を配信する際の高速な配信方

法、および、配信される複数の地理空間情報の間で位置に関する情報を高精度に共有する方法を提案する。これにより、自律動作可能なモビリティを用いた高度な交通システムを実現することに貢献する。

1.2 研究の位置づけと研究方針

図 1-3 に、モビリティに地理空間情報が伝達される一般的な流れと、その中における本研究の位置づけを示す。地理空間情報の伝達の過程には、主にデータ収集、構造化、配信、および利用の4つのフェーズがある。

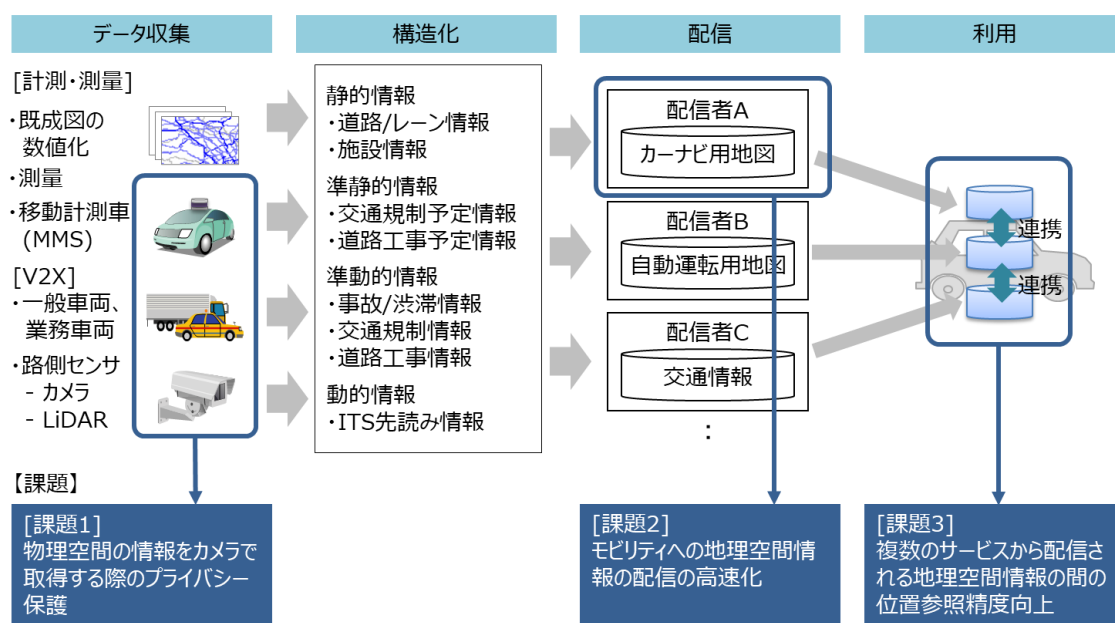


図 1-3 モビリティに地理空間情報が伝達される流れ

データ収集のフェーズでは、実世界の情報の収集が行われる。収集する情報のうち、道路や施設など比較的变化が少ないものは、国や道路管理者が持つ道路や施設の整備計画や既成の図面をもとに電子化したり、実地で測量を行ったりすることにより収集される。測量に関しては、人手による測量作業のほか、航空機から地表を撮影した写真を用いて測量を行う航空写真測量[7]や、専用の移動計測車両を用いて情報を収集する MMS (Mobile Mapping System) [8]の利用が主流になっている。MMS では、GNSS (Global Navigation Satellite System)、カメラ、LiDAR、IMU (Inertial Measurement Unit) 等のセンシングシステムを搭載した車両が道路を走行し、自車の位置を特定しながら道路や周辺の構造物、地形のデ

ータを取得する。一方、収集する情報のうち、道路上の事故や渋滞、天候等、リアルタイムに変化するものについては、交通カメラ等、道路上に設置された路側センサによって収集される。近年では、一般の自動車に搭載されたセンサの情報を収集して活用する取り組みや、路側センサとしてカメラに加えてミリ波レーダーや LiDAR を使用して、遠距離のものを認識したり近距離の情報を高精度に取得したりする取り組みもなされている。

構造化のフェーズでは、上記のように収集された実世界のデータを解析し、収集したデータを相互に紐づけたり、システムが利用可能なように標準化されたデータフォーマットに変換したりして整備する作業を行う。ここで整備される情報に含まれるものとして、自動運転の実現に向けて設立された産学官連携プロジェクトである SIP-adus[9]では、静的情報、準静的情報、準動的情報、動的情報の4つを定義している。静的情報とは、道路や道路上の構造物、恒久的な交通規制等の情報である。これらの静的情報は、測量や GNSS により取得した緯度経度や、カメラで撮影した画像や LiDAR による点群データを用いて、道路の形状や交通標識、路面のペイント等を抽出することにより取得する。準静的情報とは、位置や範囲、属性等が時間と共に変化するが、その変化は事前に計画あるいは予測される情報と定義されている。例えば工事による通行規制や、交通渋滞の予測情報等がこれに該当する。これらの情報は、道路管理者による工事計画を参照したり、路側センサによって取得した過去の情報を統計処理したりすることによって取得される。準動的情報とは、事故情報や交通渋滞情報等、観測時点における実際の状況を示す情報と定義されている。例えば、路側センサ等の情報をもとに道路管理者や警察等の組織が把握した実際の状況等が該当する。最後の動的情報は、対象物の位置が定位置ではなく移動したり、あるいは定位置であっても属性等の更新サイクルが短かったりするものである。例えば車載センサや路側センサで認識する周辺車両や歩行者の情報が該当する。以上の情報の構造化は、従来は主に地図会社毎に異なるデータフォーマットに従って作成されていたが、近年では地理空間情報を扱うシステム間の相互運用性を高めるため、SIP-adus の他、自動車関連の標準化団体が共同で設立した OADF (Open AutoDrive Forum) [10]等のコンソーシアムにおいて標準化の取り組みが進んでいる。

配信のフェーズでは、自動車メーカーや地図会社等のサービス提供者が設置するセンタシステムからモビリティに対して、地理空間情報の配信が行われる。代表的なものは、カーナビゲーションシステムや自動運転システム向けの地図を更新するサービスである。地理空間情報のうち、特に地図データのような静的情報はサイズが非常に大きいため、従来は DVD や SD カード等の媒体を用いてモビリティのユーザに送付したり、ユーザが自動車ディーラーに車両を持ち込んで更新作業を行ったりしている。近年では、モビリティに搭載さ

れる通信システムの通信帯域が大きくなっているため、センタシステムからモビリティに対して直接地図データを配信するシステムも増えている。しかしその場合も、全データの配信には時間がかかるため、変化があった道路のみを更新する方式や、モビリティ周辺の情報だけを配信する方式が実現されている[11]。道路の開通情報等の準静的情報や、交通情報等の準動的情報については、日本の交通情報システムである VICS (Vehicle Information and Communication System) では、路側に設置された光ビーコンや広域のラジオ放送等を利用してデータ通信を行うことで情報を伝えている[12]。近年では、インターネット通信機能を標準装備している自動車(コネクテッドカー)も増えており、より多くの情報をモビリティに配信することが可能になっている。

利用のフェーズでは、センタシステムから配信された地理空間情報を参照して、モビリティのユーザへ情報提供を行ったり、モビリティの制御を行ったりする。例えばカーナビゲーションシステムの場合、自身のセンサで取得した位置情報と地図データをマッチングして走行中の道路を特定する[13]。その上で、地理空間情報を参照して目的地までの経路を探索したり、目的地に到達するまでに必要な右左折等の情報をユーザに案内したりする。自動運転システムの場合も同様に、自身のセンサで取得した位置情報と地図データをマッチングして走行中の道路やレーンを特定した上で、自車の前方や周辺の地図データと他のセンサから取得した情報を参照しながら自動運転制御を行う。

以上が、モビリティに地理空間情報が伝達されるまでの一般的な流れである。この一連の流れのもと、本研究では、自律動作するモビリティの適用範囲が一般道や細街路まで拡大する世界を想定し、その際にデータ収集、配信、および利用の各フェーズで課題となる事項の解決について述べる。図 1-4 に本研究の位置づけを示す。まずデータ収集のフェーズにおいては、カメラを用いて実世界のデータを収集する際のプライバシー保護という課題がある。従来の路側カメラは、基本的に高速道路や幹線道路を対象に、車両の通行量が多く渋滞や事故がよく発生する場所に設置されている。その画像を閲覧する人間は、道路管理者や警察等の公的な組織の構成員である。その一方、今後運転支援システムや自動運転システムを利用可能な範囲を一般道に拡大するためには、一般道上の交差点等、車両から死角になる場所にもカメラ等の路側センサを多数設置して道路状況を監視したり、一般の自動車の車載カメラの情報等も収集したりすることで、自動運転の安全性を確保する必要がある。この際に路側センサのカメラや車載カメラで撮影される画像は公的な組織を介さずに配信される可能性があるため、画像に含まれるプライバシー情報の保護について考える必要がある。この課題に対して本研究では、被写体と閲覧者の関係に応じてプライバシー情報をエッジ側で処理することによりプライバシーを保護する方式を提案する。

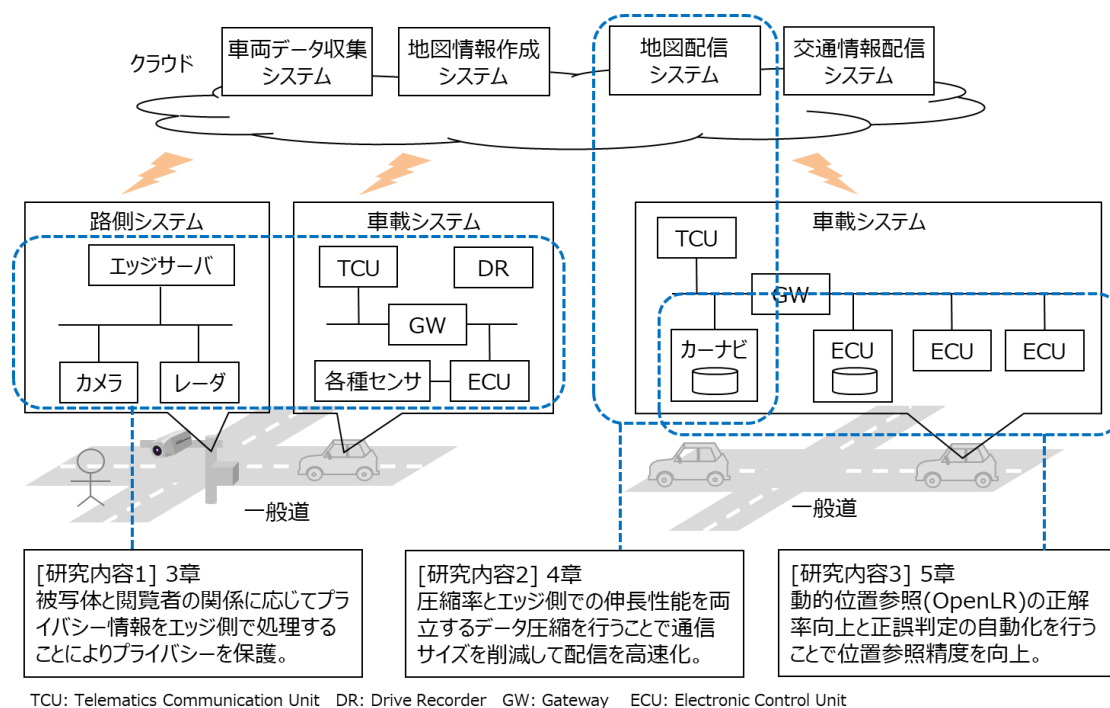


図 1-4 研究の位置づけ

また、配信のフェーズにおいては、地理空間情報、特に巨大な地図データの配信の高速化という課題がある。路側センサや車載カメラ等によって取得した情報をもとにしてクラウド側において渋滞や事故等の事象を把握したとしても、クラウド側が使用している地図データとエッジ側が使用している地図データに差異があると事象が発生している位置を正確に伝達できないため、クラウド側とエッジ側の地図データは常に同一の状態に同期する必要がある。前述のとおり、地理空間情報の中でも特に地図データのサイズは大きく、そのうえ一般道に関する情報も配信しようとするデータサイズはさらに大きくなり、その配信には非常に長い時間が必要になる。この課題に対して本研究では、圧縮率とエッジ側での伸長性能を両立するデータ圧縮を行うことで通信サイズを削減して配信を高速化する方式を提案する。

最後に、利用のフェーズにおいては、複数のサービスから配信される地理空間情報の間の位置参照精度の向上という課題がある。例えば、カーナビゲーションシステムを用いて目的地までの経路を探索し、その経路に沿って自動運転を行うシステムを考える。この時、カーナビゲーションシステムは、カーナビゲーションシステム専用で作成された地図データを参照して経路を探索する。一方で自動運転システムは、自動運転システム専用で作成された高精度地図を参照して車両の制御を行う。それぞれの地図データはデータ構造や収録して

いるコンテンツが異なるため、カーナビゲーションシステム用の地図データを用いて作成した経路を、自動運転システムが使用する地図データ上の経路に変換する必要がある。これを実現するアプローチとして、走行する範囲が高速道路や幹線道路に限られる場合は、それぞれの地図において道路を構成するリンクに共通の ID を設定し、ID を参照して一方の地図データで作成された経路を他方の地図データ上の経路に変換することが可能である。しかし、一般道や細街路も含めると道路を構成するリンク数は膨大なものとなり、すべてのリンクに対して共通の ID を整備することは、ID を維持管理するコストを考慮すると困難である。この課題に対して本研究では、共通の ID に依存しない位置参照方式として、動的な位置参照方式の 1 つである OpenLR¹[14]について述べたうえで、OpenLR の一致率向上と正誤判定の自動化を行うことで位置参照精度を向上する方式を提案する。

本研究では、以上の提案により、自律動作可能なモビリティが必要とされる領域が高速道路だけでなく一般道や細街路へと拡大していく中で、地理空間情報をモビリティへ滞りなく伝達可能なシステムの実現を目指す。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を述べる。本論文は 6 章で構成され、各章の内容は以下のとおりである。

1 章では緒論として、本研究を行うに至った背景と目的、および本研究の位置づけと研究方針、そして全体の構成について説明する。

2 章では、本研究における基本概念と従来研究について述べる。基本概念は、本研究の前提となる、地理空間情報をモビリティに伝達する際のデータ収集、構造化、配信、利用の各フェーズに関連する技術や関連研究について述べる。

3 章では、データ収集時のプライバシー保護に関する課題の解決について論じる。具体的には、映像内の人物領域の隠蔽やカメラ制御を行うことでプライバシー保護を図る従来の方式の問題点を述べたうえで、映像の閲覧者と被写体の関係に基づき被写体ごとに異なるレベルの保護を行うシステムを提案する。プロトタイプシステムの設計および実装を行い、提案システムで必要な被写体の同定処理を行うための通信遅延を評価することで、特定の利用形態のもとでの提案システムの有効性を確認する。

4 章では、地理空間情報配信の高速化に関する課題の解決について論じる。具体的には、地図データの多くの領域を占める固定長のデータレコードを対象に、エッジ側で高速に伸長可能なデータ圧縮方式を提案する。提案方式は、RDBMS (Relational Database

¹ OpenLR は TomTom 社の商標です。

Management System) で普及しつつある列指向データ圧縮をベースに、エッジ側システムの CPU キャッシュ効率化と複数の軽量な符号化方式を用いて圧縮を行うことで、既存の圧縮方式である Zlib[15]相当の圧縮率と、非圧縮時と同等のリード時間を達成できる伸張性能の実現を図ったものである。提案方式をカーナビゲーションシステムに実装し、特定のデータに対する上記性能の実現性を確認する。

5章では、複数のサービスから配信される地理空間情報の間の位置参照精度の向上に関する課題の解決について論じる。具体的には、カーナビゲーションシステムで設定した目的地まで自動運転で案内するシステムを対象に、動的位置参照方式の OpenLR を用いてカーナビゲーションシステムの経路を自動運転システム用の経路に変換する。この時、OpenLR の物理データフォーマットと最短経路計算に起因する誤りを削減することにより位置参照の一致率を改善するとともに、変換前後のそれぞれの経路の差異を確認することにより経路の一致を自動判定することを図る。提案方式を実装し、特定の地図データを用いて評価することで、提案方式の実現性を確認する。

6章では、3章から5章の各章の実験で得られた結論と、カーナビゲーションのための地理空間情報の伝達に関する今後の展望について述べる。

第2章 基本概念と関連技術

2.1 緒言

本章では、本研究における基本概念と従来研究として、本研究の前提となる関連技術について述べる。その上で、自律動作するモビリティの適用範囲を高速道路だけでなく一般道や細街路まで拡大する際に課題となる事項を述べる。

モビリティにおける地理空間情報の活用は、主に 1980 年代のカーナビゲーションシステム（以降、カーナビ）の開発から始まる。当時のカーナビは、ジャイロセンサと距離センサのみを用いて推定した自車位置を、透明なシートに印刷した地図上に表示するというものである。その後、1990 年代に GPS (Global Positioning System) を利用することが可能になり、同時に地図の電子化も行われたことで、カーナビ用に構造化された地図データを電子媒体から読み込み、GPS 等のセンサ情報と地図データを照らし合わせて自車の位置を推定するとともに、地図データを利用して目的地までの経路を計算して案内するという現在の基本方式が確立する。同時に VICS による交通情報の配信が始まり、VICS リンクと呼ばれる位置参照情報を整備することで、渋滞や事故等の事象がカーナビの地図データの上のどの位置で発生しているのかを特定する方式が確立する。2000 年代には通信機能を搭載したカーナビが開発され、ネットワークを介した地図データの配信が実現される。同時に車両制御システムも情報化が進み、カーナビと車両制御システムが接続して、地図データからわかる前方の道路形状等を参照して車両の制御を行うナビ協調制御システムが出現する。このような、地理空間情報を利用する車両制御は、ADAS (Advanced Driver Assistance System)、自動運転システムへと進化し、現在に至っている。

現在、カーナビゲーションへ地理空間情報を伝達するために使用、研究されている関連技術を、地理空間情報の収集、構造化、配信、利用の各フェーズに分けて述べる。表 2-1 に関連技術の一覧を示す。地理空間情報の収集に関する技術としては、従来から行われている人手での測量のほか、移動体による測量、計測技術や、道路上に設置したセンサによる路側センシング、およびこれらのセンシング技術が普及することによるプライバシーの問題を解決するための技術がある。地理空間情報の構造化に関する技術としては、収集したデータを情報システムが利用可能なように整備するモデリング技術、および整備された地図データをもとにして作成される、カーナビゲーション用の地図データを格納する地図フォーマットや、自動運転用の地図データ（高精度地図）を格納するための地図フォーマット等がある。地理空間情報の配信フェーズに関する技術としては、移動体で利用可能な限られた通信帯

域を使用して情報を配信するためのデータ圧縮技術や、地理空間情報を分割して配信したり、既に配信済の情報からの差分だけを抽出して配信したりする技術がある。地理空間情報の利用に関する技術としては、車載ネットワークを介してカーナビを含む ECU (Electronic Control Unit) が相互に接続された車載情報システム、および車載情報システムが様々な情報ソースから入手した異なる地理空間情報を結合して利用する際に必要となる、位置参照方式がある。

以降で、それぞれの技術について詳細を述べる。

表 2-1 関連技術

分類	中分類	小分類
データ収集	移動体による測量・計測	航空写真測量, MMS 一般車両のセンサからのデータ収集
	路側センシング	車両感知器・交通カメラ, 交通事故記録装置 インフラ協調システム
	プライバシー保護	OECD ガイドライン, データ保護規制 監視カメラのプライバシー保護技術
構造化	モデリング	GDF, DIGEST, OpenDRIVE, INSPIRE, OpenStreetMap, IFC, CityGML
	カーナビ用地図	KIWI フォーマット NDS フォーマット
	高精度地図	NDS AutoDrive COI フォーマット
配信	データ圧縮	ユニバーサル圧縮 (辞書/文脈モデル, 符号化) 地図データの特徴をふまえたデータ圧縮
	分割・差分更新	全更新, 部分更新 差分更新 (タイル単位更新, 道路単位更新)
利用	車載情報システム	カーナビゲーションシステム 運転支援/自動運転システム
	位置参照方式	静的位置参照 (Pre-coded Location Referencing) 動的位置参照 (Dynamic Location Referencing)

2.2 地理空間情報の収集

2.2.1 移動体による測量・計測

地理空間情報の収集に関する技術について、航空機や自動車等の移動体によって測量や計測を行う技術、道路に設置した路側センサによって情報を収集する路側センシング、およびこれらの技術で実世界の情報を取得する際のプライバシー保護という 3 つの観点で分けて述べる。


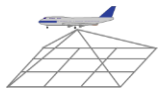


まず移動体による測量や計測について述べる。表 2-2 に測量や計測による手法の分類を示す。従来、道路等の静的な情報は、人手による実地での測量によって収集されている。これは測量用の器具を用いて対象の地物を直接計測するものであり、データ収集のために非常に多くのコストを要する。そのため近年では、1.2 節で述べたように、航空写真測量や MMS の使用が進んでいる。航空写真測量とは、移動する航空機に搭載されたカメラから地表を撮影して測量を行うものである。航空機に高精度の GNSS と IMU を搭載して自機的位置と方位角度を計測可能にしたうえで、2 箇所の撮影位置から地表がオーバーラップするように 2 枚の写真を撮影することで、三角測量の原理により地表面の三次元的位置を計測することができる。航空写真測量は人手による現地での測量と比較して 1 度に広域の測量を行うことが可能であるが、障害物等があつて空中から見えない部分是对応できないことと、航空機を頻繁に飛行させることはコスト的に難しいため、更新頻度に限界があるという問題がある。

一方の MMS は、専用の計測車両を用いて道路を走行しながら測量を行うものである。車両に高精度の GNSS と IMU を搭載することで車両の正確な位置や姿勢を計測可能にしたうえで、LiDAR やカメラを用いて自車周辺の情報を取得する。MMS は、航空写真測量のように上空の障害物に左右されずに道路の情報を取得することが可能であり、また航空写真ではわからない道路上の標識や走行レーンの情報も取得可能である。しかし、広範囲の情報を取得するためにはすべての道路を走行する必要がある。また、MMS は高価なセンサを必要とするため導入できる計測車両の台数に限界があり、航空写真測量と同様に更新の頻度が限られるという問題がある。

そのため、専用の計測車両ではない、一般に走行する車両を用いて情報を収集する研究も行われている。近年では、自動ブレーキ、レーン逸脱検知等の運転支援機能や、高速道路限定での自動運転機能等を搭載した車両が増えており、これらの車両に搭載されたセンサの情報を収集する取り組みが増えている。例えばタクシー車両に搭載したドライブレコーダの情報からダイナミックマップを生成する技術の検討を行うための実証実験[16]、衛星画像

や一般車両に搭載された情報から高精度地図を作成する技術の実証実験[17], 安価なセンサを用いた計測機器をタクシー車両に搭載して高精度な三次元地図を作成する技術の実証実験[18]等が行われている。このように一般の車両を用いて情報を収集する場合, 各車両が共通の仕様に基づいて情報を収集する必要があるため, 収集のための仕様の標準化が必要である。そのため, 地図ベンダ大手の HERE は, 自動車のセンサデータから地図データを作成するために必要となる情報を収集する仕様案を発表している[19]。この仕様案は, EU (欧州連合) における官民合同の ITS 推進組織である ERTICO (European Road Transport Telematics Implementation Coordination Organization) に引き継がれ, 多数の自動車メーカーや地図ベンダが参加して業界標準の仕様 SENSORIS (Sensor Interface Specification) の策定が進められている[20]。

表 2-2 測量・計測による手法の分類

#	収集方法	メリット	デメリット
1	平板測量 	・高精度	・測量作業に長時間を要する
2	航空写真測量 	・広域の情報を一度に取得可能	・空中から見えない場所は計測困難 ・頻繁に飛ばせない
3	移動計測車両 (MMS) 	・道路の情報を高精度に取得可能	・センサが高価なため, 導入可能な台数が限られる
4	業務車両・一般車両 	・低コスト ・潜在的に多数の車両を利用可能	・比較的精度が低い ・データ収集仕様の標準化が必要

上記のようにして収集したデータは, GNSS やジャイロ等のセンサ情報, カメラによる撮影画像, LiDAR によって取得された三次元点群データ等であり, そのままでは情報の精度が低いため精度を向上する必要がある。文献[21]では, 一般的に利用可能な汎用の GPS や車載カメラの画像をもとにして, 複数時刻の衛星情報を集めて衛星数を疑似的に増加させることにより高精度な情報を収集する研究を行っている。そのほかに, 単眼ドライブレコ

ーダによる撮影画像や GPS 情報を用いて三角測量により周辺地物の位置推定を行う研究 [22]や、こうした三角測量による推定結果に統計処理を加えることで推定精度を向上させる研究が行われている [23]。また、これらの GNSS の情報を高精度化する研究に加え、LiDAR 等によるセンシング結果をもとに自己位置推定と環境地図生成を同時に行う SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) を使って位置の精度を向上する方式の研究 [24]も進められている。文献[25]では、MMS による計測結果をもとに高精度地図を作成する際、複数の計測結果を合わせた際に発生する可能性がある位置ずれの有無を自動で評価する手法について取り組んでいる。

このようにして情報の精度を向上した上で、さらに、カメラによる撮影映像や LiDAR による点群データ等から意味のある情報を抽出する必要がある。このような情報の抽出は、従来は地図データの開発者等が人手で行っているが、収集する情報が増えるにつれてこの作業のコストは膨大なものとなるため、コンピュータによって自動で抽出して、その結果を人が目視で確認、承認することによる省力化する取り組みがなされている。例えば Deep Learning を用いた画像認識によりカメラ画像から交通標識を自動で認識する技術 [26][27][28]や、同様に画像認識により路面の状況を認識する技術[29][30]の研究が行われている。また、交通標識や路面の状況のほかにも道路上の地物には様々なものが考えられるため、道路の維持管理業務を対象として地物の識別のために必要な指標を検討し、それをもとにして機械学習を用いて点群データから地物を自動で識別する研究[31]が行われている。

2.2.2 路側センシング

前述のような計測、測量によって収集する静的な情報に加えて、モビリティに配信すべき地理空間情報には、交通渋滞等の広域の道路の現況や、見通しの悪い交差点等、自車からは死角となる範囲の情報、周辺の歩行者の情報等の動的な情報がある。これらの情報は、道路上に設置された路側センサや、前述のように一般の車両に搭載されている車載センサによって取得される。

路側センサは、情報の取得目的に応じて様々なセンサが使用されている。まず、道路の渋滞情報に関しては、道路上に設置された車両感知器や監視カメラを用いて情報が収集されている。車両感知器は、車両の通過を検出するための設備であり、電磁誘導等を利用した車両検出用設備を道路下に埋設する方式や、超音波センサを道路の上方または側方に設置する方式がある。このような車両感知器により通行している車両の台数をカウントすることが可能になるとともに、一定の距離をおいて 2 つの車両感知器を設置することにより、そ

の区間の車両の通過時間を推定することが可能となる。監視カメラを用いる場合は、カメラによって撮影した通過車両の画像からナンバープレート情報を抽出し、同じ車両が次にカメラが設置してある地点を通過するまでの時間を測定することで、対象車両がその区間を通過するのに要した時間を正確に測定できる。車両感知器は、渋滞情報の取得にとって必須である一方、道路に埋設したり道路の情報または側方に設置したりするために多くのコストが必要なため、設置されている道路は限定的である。そのため、低コストで一般道に多数設置するため、安価な汎用の音響マイクや振動センサを用いて車両を感知する手法が研究されている[32][33]。

監視カメラについては、渋滞情報を取得する目的以外に、道路の現況を確認するためにも設置される。例えば監視カメラによって撮影された画像を交通管制センタの管制員が目視で確認したり、コンピュータで画像処理を行ったりすることにより、渋滞や事故の発生を判断する。また、監視カメラは災害発生時や異常気象時の路面状況の監視のために設置されることもある。このようなカメラの撮影映像は、警察や道路管理を行う公的機関の職員によって確認されるほか、Web を介して一般にも公開されている[34]。

上記のほかに、交通事故防止や事故後の原因調査のために、一部の交差点では専用の交通事故記録装置が設置される。日本において導入されている TAAMS (Traffic Accident Auto Memory System) [35]は、監視カメラで交差点内を常時撮影し、音響マイクによって異常な環境音や衝突音を検知した際に、前後の数秒間の撮影映像を保存するものである。TAAMS による撮影映像は、交通事故の原因を示す証拠として有効であることが裁判で認定されているなど有用な情報である一方、設置のためのコストが高いため、設置されている場所は全国で約 1 千箇所の事故多発交差点に留まっている。図 2-1 に、道路上に設置されるカメラの撮影画像の例を示す。



画像ソース: 国土交通省



画像ソース: 警察白書(平成20年)

図 2-1 路上に設置されるカメラの画像例

以上のような現在既に道路上に設置されている路側センサに加え、ADAS や自動運転システムの普及に向けて、車載センサでは認識できない死角の状況を取得するために路側センサを設置して、これらの路側センサから得られるカメラ映像やミリ波レーダーの情報を参照して車両の制御を行うインフラ協調システムの取り組みも進んでいる。このような路側センサで道路上の障害物や周辺車両の情報を取得することにより、自動運転車両等の安全性を向上することが可能となる。路側センサとして使用されるセンサには前述のカメラやミリ波レーダーが用いられるほか、近年では、より高精度な情報を取得するために LiDAR を用いる研究が行われている[36]。これらの取得した情報は、DSRC (Dedicated Short Range Communication) [37]等の路車間・車車間通信システムを用いて車両やセンサシステムへ送信されるほか、近年では、セルラー通信技術を路車間・車車間通信に応用した C-V2X (Cellular-V2X) の研究が行われている[38]。

2.2.3 プライバシー保護

以上のように移動体や路側センサによる実世界の情報の取得が増加するのに伴い、センサが取得する映像等に含まれるプライバシー情報について検討する必要がある。特に監視カメラの映像の場合、映像自体に個人を特定可能な情報が多く含まれているため問題になるほか、映像をコンピュータで処理して抽出した個人情報漏洩することで問題になることもある。例えば前者の問題としては、住民が設置した監視カメラのアクセス管理が適切になされず、Web を介して誰でも閲覧可能になっているケースが多々あり、そのような監視カメラをネットワーク上で探索して公開している Web サイトが知られている[39]。後者の問題の例としては、自動車ナンバー自動読取装置 (N システム) によって取得した情報が Winny を介して流出した事例がある[40]。

こうした、情報通信技術の進歩や普及により発生するプライバシー問題への対応については、経済協力開発機構 (OECD) が 1980 年に採択した「プライバシー保護と個人データの国際流通についてのガイドラインに関する理事会勧告」(OECD プライバシーガイドライン) [41]において、基本原則が定められている (表 2-3)。OECD プライバシーガイドラインは、日本を含む各国の個人情報保護法制の基本的な考え方となっており、2013 年には、1980 年に策定した基本原則を維持しつつ、加盟国がプライバシー保護の執行に責任を持つ機関 (プライバシー執行機関) を設置することを義務付けたり、プライバシーフレームワーク間の相互運用を促進すべきと勧告したりする等の新たな項目を追加する改正を行って

る[42]. OECD プライバシーガイドラインの他に、近年では 2018 年に欧州で制定された一般データ保護規制 (GDPR, General Data Protection Regulation) [43]や、2020 年に米国カリフォルニア州で制定された消費者プライバシー法 (CCPA, California Consumer Privacy Act) [44]といった法規制が定められており、日本の個人情報保護法もこうした最新動向を踏まえつつ 2020 年に改正が行われている。

表 2-3 OECD ガイドラインの 8 原則

原則	説明
収集制限の原則	個人データは、適法・公正な手段により、かつ情報主体に通知または同意を得て収集されるべきである。
データ内容の原則	収集するデータは、利用目的に沿ったもので、かつ、正確・完全・最新であるべきである。
目的明確化の原則	収集目的を明確にし、データ利用は収集目的に合致するべきである。
利用制限の原則	データ主体の同意がある場合や法律の規定による場合を除いて、収集したデータを目的以外に利用してはならない。
安全保護の原則	合理的安全保護措置により、紛失・破壊・使用・修正・開示等から保護すべきである。
公開の原則	データ収集の実施方針等を公開し、データの存在、利用目的、管理者等を明示するべきである。
個人参加の原則	データ主体に対して、自己に関するデータの所在及び内容を確認させ、または意義申立を保証するべきである。
責任の原則	データ管理者は諸原則実施の責任を有する。

モビリティに関するデータのプライバシー保護に関しては、OECD プライバシーガイドラインをふまえて、車両から位置情報等を含むプローブ情報を収集するシステムを対象とするプライバシー保護の基本原則や、プローブ情報の収集や生成処理におけるプライバシー保護の評価基準に関して、ISO で標準化が行われている[45][46][47]。また、各国の政府や業界団体において、ネットワークに接続された自動車（コネクテッドカー）の情報を対象としたプライバシー保護原則の決議等が行われており、2017 年には各国のプライバシー執行機関が集まるプライバシーコミッショナー会議において、コネクテッドカーのデータ保

護に関する決議が行われている[48].

路側センサに関しては、主に監視カメラに含まれるプライバシー情報の保護について議論がなされている。監視カメラに対するプライバシーのガイドラインとして、2004年に東京都杉並区において、全国初の防犯カメラ規制条例である「杉並区防犯カメラの設置及び利用に関する条例」[49]が制定されている。近年では、2018年にIoT推進コンソーシアム、総務省、および経済産業省が「カメラ画像利活用ガイドブック ver2.0」[50]をまとめており、いくつかの利活用シーンを想定してプライバシー保護について検討している。それらの利用シーンのうちモビリティに関連する利活用シーンとしては、タクシー事業者やバス事業者が車両に設置するカメラで画像を取得し、これを地図データの更新等に活用する際にプライバシーの観点で配慮すべき事項を記載している。ここで配慮すべき事項としては、情報の運用体制構築、撮影していることの車両内外への通知等のほか、個人を特定できないように人物領域を処理すること、地図会社へのデータ提供後に直ちに削除することなどが挙げられている。

以上のような法規制やガイドライン等の策定が進む一方で、監視カメラのプライバシーの問題に対する技術的な取り組みもいくつか行われているが、カメラ映像が捉える実世界の様子を、プライバシー情報を全く混入させることなく流通させることは本質的に難しい問題であり、技術的な枠組みの構築が必要である。角所らは、センサによる実世界情報を流通させる上で、カメラ以外のセンサと比べてなぜカメラだけがプライバシーの問題を多く含むのかを情報の粒度の観点から論じたうえで、プライバシーの問題を生じにくく、かつ有用性のあるアプローチと、カメラで道路状況を把握する場合における実現例を示している[51]。干川らは、センサによる個人の見守りサービス等を対象に、クラウド上のサーバへ情報を集約するシステムに存在するプライバシーの問題を論じ、エッジ側でデータ処理を行うことで不要な情報の集約を抑止するアーキテクチャについて述べている[52]。

2.3 地理空間情報の構造化

2.3.1 モデリング

前節で述べた技術によって収集されたデータは、情報システムが利用可能なように構造化する必要がある。すなわち、収集した位置に関する情報と地物の情報を結合したり、道路と交通標識（交通規制）等、複数の地物間の関係を付与したりするなどの処理を行って、モビリティが利用しやすい情報に加工する。このような位置に関する情報が付随したデータは地理空間情報と呼ばれており、日本では地理空間情報活用推進基本法の第二条において

以下のように定義されている[53].

- 一 空間上の特定の地点又は区域の位置を示す情報（当該情報に係る時点に関する情報を含む．以下「位置情報」という．）
- 二 前号の情報に関連付けられた情報

地理空間情報としての構造化に際しては，様々な地物の位置や地物同士の関係性等をどのような形式でモデリングするかが重要であり，情報を様々なシステムで利用可能とするために各種の標準的なデータ構造が議論されている．

地理空間データの構造は，おおきく分けてベクタ形式とラスタ形式に分類できる．ベクタ形式は，地物を点，線，および面で表現したうえで，それぞれの地物が持つ属性等を人間や機械が解釈できる形式で記述するものである．ベクタ形式の代表的な方式として，ISOで標準化されているGDF（Geographic Data Files）[54]がある．GDFは，人間や自動車のナビゲーションを行うために必要な地理空間情報を表現する方式として，現在最も使用されている方式である．図2-2に，GDFで記述する地理空間情報の要素の概要を示す．GDFで記述する要素は，地物のデータ（Feature），地物の形状のデータ（Geometry），地物の属性のデータ（Attribute），地物同士の関係を示すデータ（Relation）に分けられる．形状のデータには点（Node），線（Edge），および面（Face）の3種類が存在し，点は1つの座標（Coordinate）で構成され，線は両端点と中間の形状を示す複数の座標で構成され，面は複数の線で構成される．座標は緯度，経度，および高度の組合せである．地物のデータは，点，線，および面の各形状に対応してPoint，Line，Areaの3種類のFeatureが定義されており，さらにこれらのFeatureの組み合わせによって表現されるComplex Featureが定義されている．例えば，施設の場所を示す情報はPoint Feature，道路はLine Feature，緑地や建物の敷地等を表現する情報はArea Featureとなる．属性のデータとは，道路の制限速度や車線数，道路幅等，地物に関連付く情報のことである．地物同士の関係とは，例えば施設（Point Feature）の出入りに面している道路（Line Feature），ある道路（Line Feature）に並走している道路（Line Feature）等，複数のFeature同士の関係のことである．

地理空間情報を表現する方式としては，GDFの他に，これまで様々な方式が提案されている．例えば，軍事分野では，地理情報の交換を目的として策定されたDIGEST（Digital Geographic Information Exchange Standard）[55]が策定されている．交通シミュレーションの分野では，シミュレーションに必要となる道路ネットワークを記述することを目的としてOpenDRIVE（Open Dynamic Road Information for Vehicle Environment）[56]が策定されている．また，道路だけでなく，鉄道や水路等も含むマルチモーダルな移動をサポートするために策定が進められているINSPIRE[57]や，マルチモーダルな移動を含む都市

全体の詳細な情報を表現することを目的とした CityGML[58][59], LandInfra[60]等の取り組みが進んでいる。その他, 地物のなかでも特に建物に関して, 建物を構成するドア, 窓, および壁等のオブジェクトを表現する方法を策定した IFC (Industry Foundation Classes) [61], ユーザ自身の手によって自由に使えるオープンデータの地図データを作成することを目的とした OpenStreetMap[62]が広く利用されている。

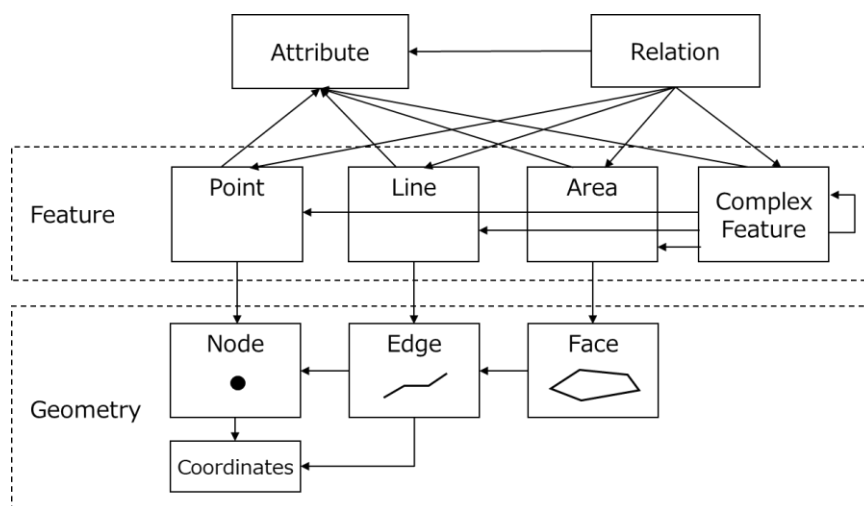


図 2-2 GDF の構成要素

2.3.2 カーナビ用地図

上記の GDF 等のデータ形式は, 様々な地物の情報を表現可能な標準の形式を定義し, 様々なシステムで情報を共通的に利用可能とすることを主な目的としているため, テキスト形式や XML 等, 可読性の高い形式で表現することが多い。そのため, 通常はエッジ側のシステムでこれらの形式をそのまま利用することは困難であり, エッジ側のシステムに特化した専用のデータフォーマットに変換されて使用される。

カーナビで用いられる地図データ (カーナビ用地図) は, カーナビの性能やストレージのサイズをふまえたうえで, 人間 (ドライバー) に対する道案内を効果的にできるように, GDF フォーマットで表現されたデータをナビゲーション専用のデータフォーマットに変換したものである。この専用のデータフォーマットは, ほとんどはカーナビメーカーが独自のノウハウで自社専用のものを定義しているが, これを標準化しようという取り組みもある。標準のフォーマットの代表的なものとしては, 日本のカーナビ関連各社が中心になって標準化した KIWI フォーマット[63][64][65]と, 欧州を中心に標準化が行われている NDS

(Navigation Data Standard) [66]がある。KIWI フォーマットは JIS 化されており、日本産業標準調査会の Web サイトから誰でも自由にフォーマットの内容を閲覧することが可能である。一方の NDS は、フォーマットの詳細は非公開であり、NDS Association の会員以外は閲覧できない。KIWI フォーマットと NDS フォーマットの内容は大きく異なり、また KIWI フォーマットの中でも多数の派生フォーマットが存在する。

カーナビ用地図に収録される情報について以下で述べる。図 2-3 に、KIWI フォーマットのデータ構成を示す。KIWI フォーマットや NDS フォーマット等、使用するフォーマットによって用語やデータ構成は大きく異なるが、カーナビにとって必要なコンテンツや、以降で述べるような概念レベルの内容は、カーナビ用地図の分野においてほぼ共通に用いられる考え方である。

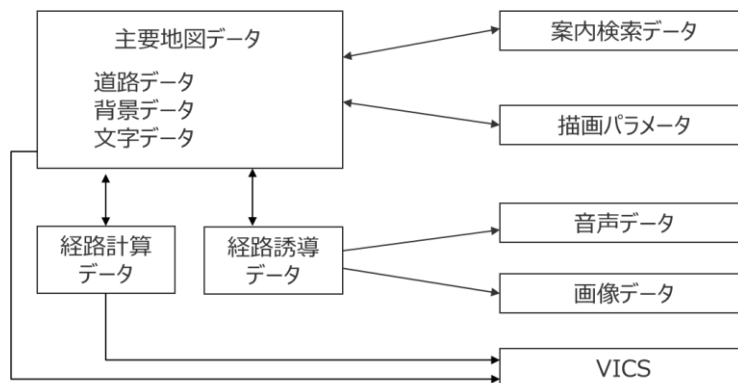


図 2-3 KIWI フォーマットデータ構成

図 2-3 に記載したデータのうち、主要地図データは地図表示、自車位置推定（ロケータ）等、ナビの主要な機能によって参照されるデータであり、経路計算データは目的地までの経路を探索するためのデータである。図 2-4 に、主要地図データおよび経路計算データの概要を示す。これらのデータは、地図を一定の矩形の単位で区切って作成されており、この矩形は、フォーマットに応じてパーセル、メッシュ、タイル等と呼ばれている（以降、本論文ではタイルで統一する）。また、これらのデータは階層構造（レベルと呼ばれる）を持っており、あるレベルの 1 つのタイルは下位のレベルの複数のタイルに対応し、下位のレベルのタイルほど詳細な情報を持つようになっている。これらはほとんどのカーナビ用地図で共通に用いられる概念であるが、タイルをどのような単位で作成するか、1 つのタイルが下位の何枚のタイルに対応するか、作成されるレベルの数やタイルを示す ID の振り方等は、フォーマットによって大きく異なる。

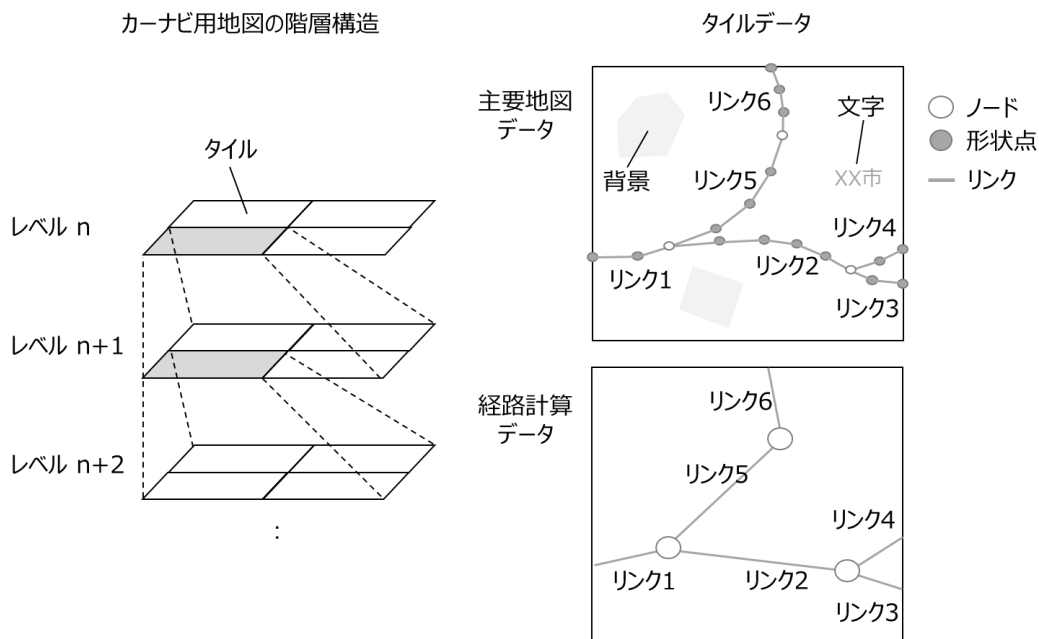


図 2-4 カーナビ用地図の階層構造とタイルデータ

主要地図データには、主に道路データ、背景データ、文字データが含まれる。道路データは、実世界の道路ネットワークを表すものであり、ノードとリンクからなるグラフ構造のデータになっている。ノードは、交差点や分岐点、あるいは制限速度等、道路の属性が変化する場所に作成する。また、主要地図データの場合、地図を表示するためにリンクの詳細な形状をあらわす形状点を含む。形状点は座標だけを持つものであり、一般的にノードとは呼ばれない。背景データは建物や湖、河川等を表現するもので、点、線、および面によるデータが存在する。文字データは地名や道路名称等の文字列である。背景データや文字データは、ドライバーが運転しながら情報を効果的に認識するために収録方法や表示方法が最適化されている。

経路計算データは、カーナビのようなエッジ側の端末性能で、広大な道路ネットワークを対象にした最短経路計算を、交通規制等の各種の制約を考慮しながら高速に実行することに特化したデータである。主要地図データと同様にノードとリンクからなるグラフ構造のデータであるが、形状点のような経路計算に不要な情報は含まず、最短経路計算を行うために各リンクの通過コストのデータを持つ。最短経路計算は Dijkstra のアルゴリズム[67]等をベースに、図 2-4 に記載した階層構造を利用しながら実行される。

経路誘導データは、次の分岐方向等をドライバーに案内するためのデータである。主要地図データや経路計算用データと同様にタイルで区切られているが、一般的に階層構造では

ない。交差点に進入する際のレーンの増減等のデータを持っているほか、ガイド音声等の音声データや、交差点の拡大画像等の画像データを持ち、状況に応じてこれらのデータの表示や再生を行いながらドライバーに対する道案内を実行する。

カーナビ用地図には、上記のほかに、目的地となる施設や住所を探すための案内検索データ（検索データ）が含まれる。図 2-5 に検索データの例を示す。検索データは、主に検索木（インデックス）と実データから構成される。検索木は、カーナビの画面からの名称入力に対応する木構造のデータであり、文字と、その文字が入力された場合の次の文字の情報等を格納した固定長レコードの並びである。例えば図の場合、ドライバーが「AAB」と入力した場合、該当するデータは実データの 2 行目から始まることを示している。カーナビのような組込みシステムで性能を出すためにこのようなデータ構造が用いられているが、近年ではカーナビのハードウェアも比較的性能が高くなっているため、一般的な RDBMS を用いて検索データを作成することも多い。

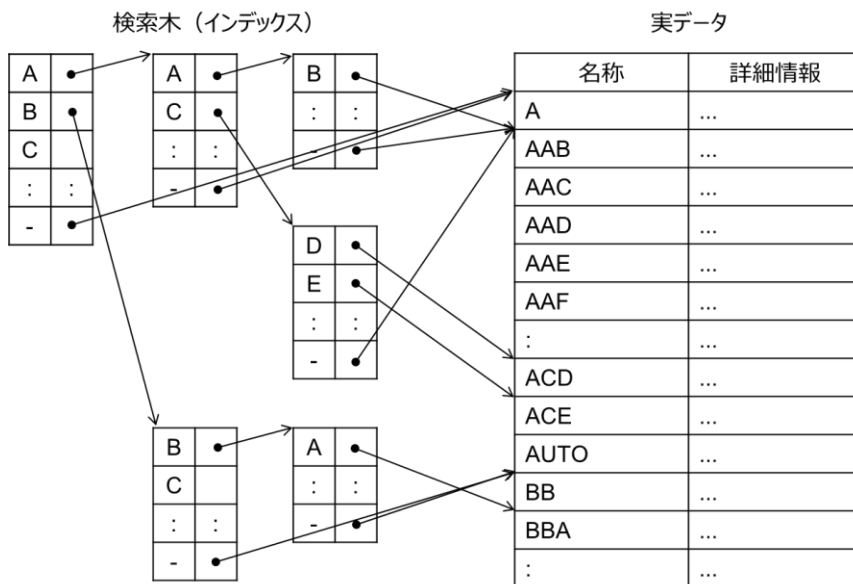


図 2-5 検索データの構造の例

VICS データは、交通情報システムの VICS から配信される交通情報が、カーナビ用地図に含まれる道路上のどの位置の情報であるかを判断するための位置参照用データである。通常、VICS リンク ID とカーナビ用地図内の道路を対応付けるテーブルが格納されている。なお、欧州の場合は、VICS ではなく RDS-TMC (Radio Data System – Traffic Message Channel) [68] の情報とカーナビ用地図内の道路を対応付けるための位置参照用データが格納される。

2.3.3 高精度地図

高精度地図は、自動運転システムや運転支援システム用に作成される、カーナビ用地図よりも詳細なデータである。カーナビ用地図と同様にノードとリンクからなるグラフ構造のデータであるが、レーンレベルの詳細度を持っている。前述のようにカーナビ用地図が交差点をノードとし、交差点の間を結ぶ道路をリンクとすることに対し、高精度地図は一般的に、道路の分岐が始まる場所等、道路の物理構造が変化する地点をノードとして、道路上に存在する各レーンをリンクとする。図 2-6 に双方の地図データの差異の具体例を示す。カーナビ用地図では通常は分岐点には1つのノードが生成される一方で、高精度地図のノードは分岐点への進入地点および退出地点に作成され、ノード間のリンクは進入地点と退出地点を接続するように作成される。

高精度地図のデータフォーマットとしては、前述の NDS Association において標準化が進められているほか[69]、GDF をベースにして、レーンレベルの道路表現を記述可能なように拡張する取り組みがなされている[70][71]。

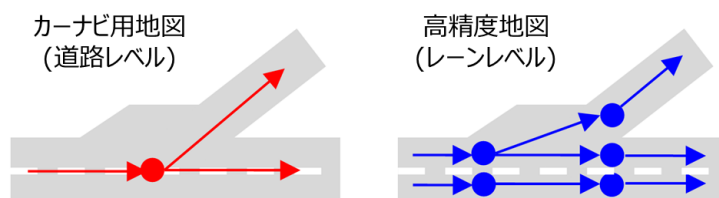


図 2-6 カーナビ用地図と高精度地図の差異

2.4 地理空間情報の配信

2.4.1 データ圧縮

前節で作成されたカーナビ用地図や高精度地図等の地理空間情報は、インターネット通信等を利用してエッジ側に配信される。この配信の過程では、地理空間情報の中でも特に地図データは一般的にデータサイズが非常に大きいため、移動体で利用可能な限られた通信帯域を使用してどのように配信するかが課題となる。そのためのアプローチとしては、大きくデータ圧縮と分割・差分配信がある。本項ではまず、データ圧縮について述べる。

地図データを圧縮するための方式は、おおきく分けて、(1)入力データとして特定のデー

タフォーマットを前提としない方式（ユニバーサル圧縮）と、(2)地理空間情報の特徴をふまえた圧縮方式の2つに分類できる。

(1) ユニバーサル圧縮

図 2-7 に、既存のユニバーサル圧縮方式の分類を示す。既存の方式は、大きく辞書モデルと文脈モデルと呼ばれる2種類の方式に分類され、さらに符号化を行う方式の差異によって細かく分類される。まず、現在一般に広く普及している技術は辞書モデルである。辞書モデルは、入力データに含まれる共通のデータ列を「辞書」としてメモリ上に構築し、入力データを辞書内の位置で置き換えることによりデータの圧縮を図る方式である。この辞書モデルに基づく方式として代表的なものは、LZ77 と LZ78 である[72]。現在一般によく使用されている ZIP[73]や GZIP[74], Zlib[15]といったデータ圧縮ソフトウェアは、主に利用する圧縮方式として LZ77 をベースとするモデル化とハフマン符号を組み合わせたアルゴリズムである deflate[75]を実装したものである。

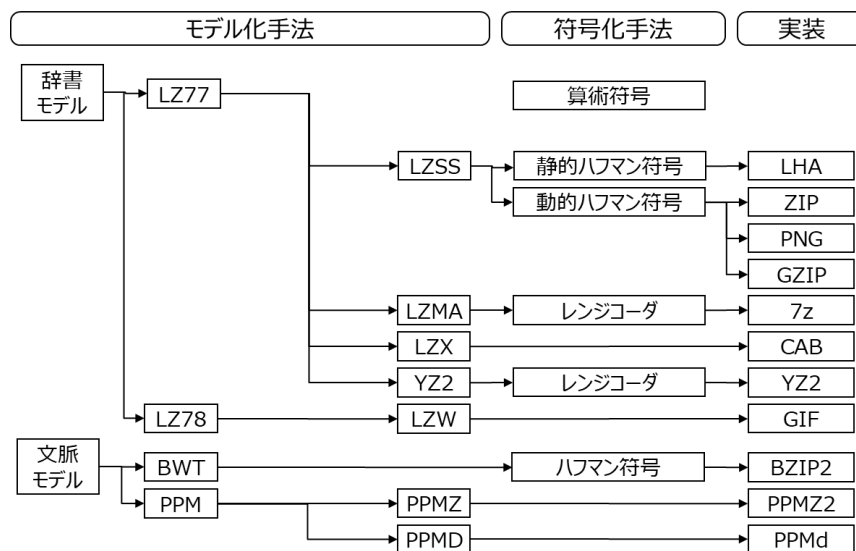


図 2-7 既存データ圧縮技術の分類

一方の文脈モデルは、入力データの部分的なデータ列を参照し、あるデータ列が出現した際の次のデータの出現確率を「文脈」としてメモリ上に構築することによりデータの圧縮を図るものである。例えば、テキストデータが「th」と出現した場合、一般的な英文では次に「e」（すなわち「the」）が出現する可能性が比較的高い。このような文脈に応じた文字の出現確率の偏りを利用することにより、圧縮率を向上することが可能となる。文脈モデルの代

代表的な技術としては BWT[76]と PPM[77]の 2 種類の方式がある。BWT を実装した代表的なソフトウェアとしては BZIP2[78]があり、PPM を実装したソフトウェアとしては PPMd[79]がある。このようにモデル化がなされたあとのデータに対して、ハフマン符号[80]や、算術符号を改良したレンジコーダ等の方式を用いて符号化を行った結果が、最終的な圧縮データとなる。

上記の各技術の性能は入力データに依存するが、一般的に、圧縮率と実行速度はトレードオフの関係にある。図 2-8 に、データ圧縮技術の評価用として一般に公開されているデータ[81]を用いた性能評価結果の例を示す。文脈モデルを用いる圧縮技術は一般的に高い圧縮率を示し、特にテキストデータにおいてはその傾向が顕著である。一方、実行速度に関しては辞書モデルのほうが総じて早い。圧縮率に優れている文脈モデルの PPMd の実行速度は、他の方式と比較して大幅に遅い。

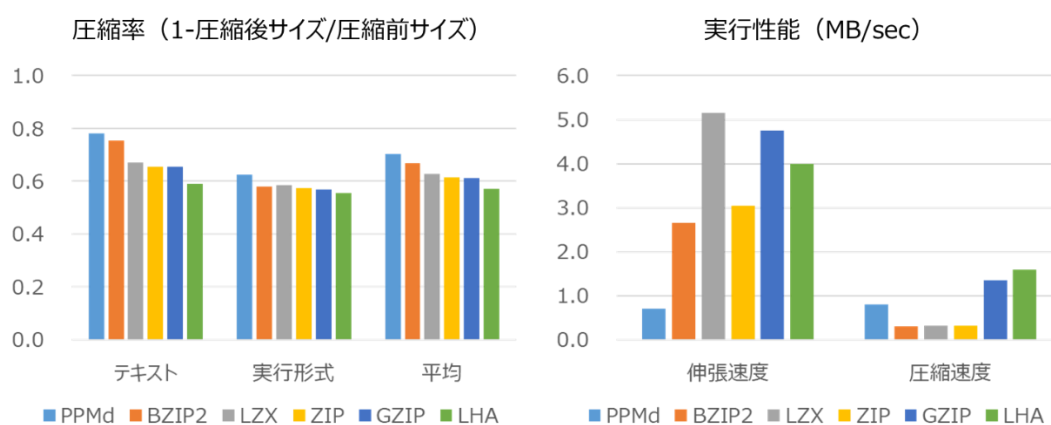


図 2-8 既存データ圧縮技術の圧縮率と実行性能

(2) 地理空間情報の特徴をふまえたデータ圧縮

上記のユニバーサル圧縮に対して、入力データが地理空間情報であることを前提にしたデータ圧縮方式の研究もなされている。地理空間情報には位置（緯度、経度、高度）に関する情報が多く含まれており、かつ、これらの値は高精度な情報を格納する必要があるため、位置に関する情報のデータサイズを削減する取り組みが多くなされている。地図データの場合は、前述の形状点の座標を示すデータサイズが大きくなるため、形状点のサイズを削減することを目的とした取り組みが多い。

足立らは、交通情報システムで用いられる車両からのプローブ情報に含まれる形状点列に着目し、ロッキー圧縮の考え方で、多少情報は欠落するが走行した道路の特定には支障がないように形状点列を圧縮する方式を提案している[82]。Koegel 等は、車車間通信におけ

る軌道データを削減するため、形状点列からなる軌道データをクロソイド曲線や3次スプライン曲線等によって置換することで、実用上不用な形状点を間引く方式を提案している[83]。Reimer や折原等は、概略化した行政の境界線やデフォルメした道路地図を作成する用途において、境界線や道路の形状をベジェ曲線化する方式を提案している[84][85]。その他に、地図データを対象としたものではないが、Vishen 等はロボットの軌道のデータ等を対象にして、GPS で取得した形状点列をベジェ曲線や Biarc により補間する手法について研究を行っている[86]。

2.4.2 分割・差分更新

地図データのサイズは非常に大きいため、前項で述べたデータ圧縮を用いてデータサイズを削減したとしても、圧縮後のデータサイズも依然として大きい。そのため、データを分割して配信したり、前回配信したデータからの差分データのみを抽出して配信したりする方式が研究されている。

図 2-9 に、分割・差分更新方式の分類を示す。まず全更新 (Full update) は、分割や差分の抽出等を行わず、地図データを格納しているデータベースの全体をそのまま新しいデータベースに差し替える更新方式である。この方式は、地図データを記録している SD カード等のメディアをカーナビから取り外し、PC を用いて新しいデータを書き込むといった旧来のやり方で用いられ、自動車の販売店に地図データの更新作業を依頼したりする際に使用される。部分更新 (Partial update) は、州や県などの単位で地図データベースを分割して作成し、地図データを更新する際には、ユーザの居住する県など、特定のデータベースのみを差し替える方式である。差分更新 (Incremental update, Differential update) は、新旧の地図データベースの差分データを抽出し、差分のデータだけを配信して更新する方式である。例えば、古い地図データと比較して何かしら変化があったタイルや、検索データや音声データ等の一部を更新するために使用する。

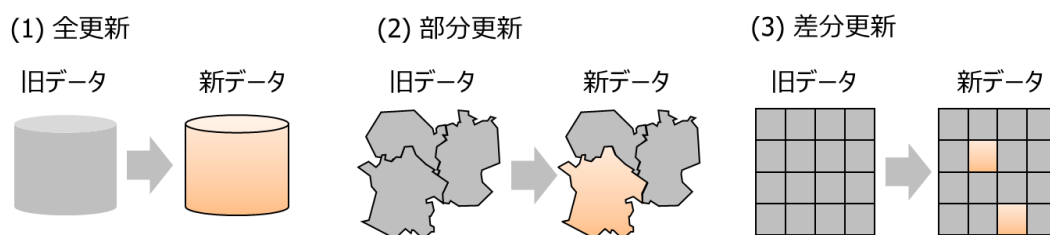


図 2-9 分割・差分更新方式の分類

全更新については、地図データベース全体を差し替えるため、更新データを配信するための運用以外には、技術的な課題は特に存在しない。一方、部分更新および差分更新については、更新によって新旧データの境界を跨る道路が断絶してしまうため、そのような道路をどのように接続するかが課題となる。図 2-10 は、分割・差分更新の問題について2つの例を示したものである。図の左側の例は、更新によって道路が断絶することを示す例である。前述のとおり、地図データに含まれる道路データは、一般的にタイルで区切られて作成されている。そのためタイルの境界では、一方のタイルのリンクが他方のタイルのどのリンクと接続するかを、リンク ID 等の情報を用いて指定している。そのようなデータ構造になっている都合上、例えば一方のタイルだけを更新してタイル内のリンク ID に変化があった場合、更新されていないタイルからは、接続先のリンクがどれであるかがわからなくなる。一方、図の右側の例は、更新によって不適切な経路を作成してしまう例である。例えば新規の高速道路等が開通した際、対象の高速道路が存在する複数のタイルの一部だけが更新されると、実際には道路があるにも関わらず、不自然な経路を作成する可能性がある。

上記のような分割・差分更新の問題に対して、浅原等は、道路接続の整合性を保持したまま更新可能な最小データ単位について検討を行い、変化のあった道路のみを更新可能な方式を提案している[87]。その他、様々な方式が提案されているが、複雑な道路ネットワークの接続関係を保ちつつ分割・差分更新を行うことはコストがかかるため、廉価品のカーナビ等では依然として全更新方式で配信することも多い。

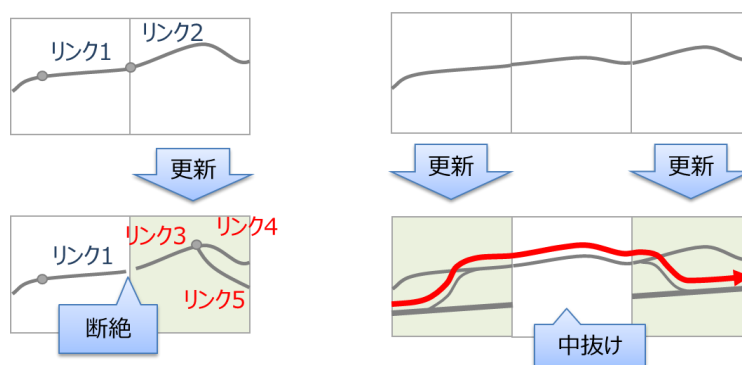


図 2-10 分割・差分更新方式の問題

2.5 地理空間情報の利用

2.5.1 車載情報システム

地理空間情報のモビリティへの伝達に関して、最後にエッジ側に配信された情報の利用に関連する技術について述べる。

まず図 2-11 に、情報を利用するエッジ側のシステムとして、自動車の情報システム（車載情報システム）の一般的な構成の例を示す。車載情報システムは、カーナビや TCU（Telematics Communication Unit）、車両制御用の ECU 等、用途の異なる多数のデバイスが相互に連携して自動車全体の機能を実現する、分散型のシステムである。

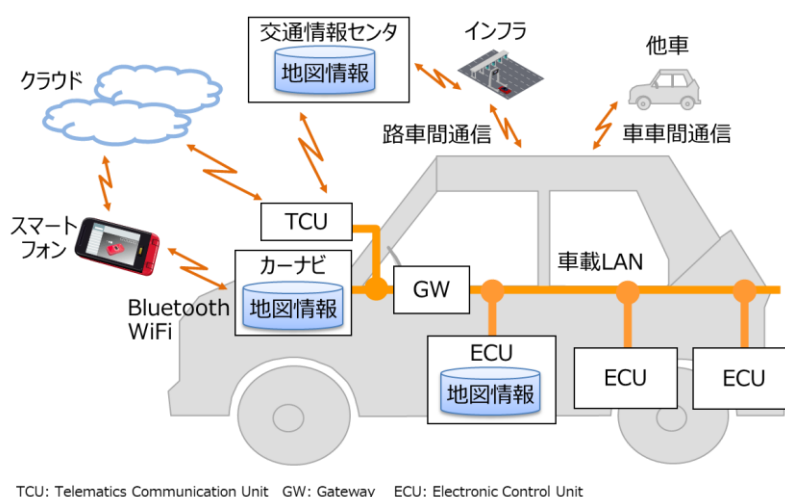


図 2-11 車載情報システムの構成例

地理空間情報は、それぞれの情報の用途に応じて異なるデバイスによって処理される。例えばカーナビには、2.3.2 項で述べたカーナビ用地図が搭載され、この情報を参照して地図の表示や経路計算、ドライバーに対する道案内等が行われる。自動運転システムや運転支援システムの場合、2.3.3 項で述べた高精度地図が車両制御用の ECU に搭載され、高精度なレーン情報等を参照して自動車の制御を行う。渋滞等の交通情報を利用する場合、交通情報センターからは、カーナビ用地図とも高精度地図とも異なる形式の地図データをもとに作成された渋滞や事故等の発生位置や内容を示す情報が配信され、カーナビの画面に表示されたり、配信された情報を参照して渋滞を避ける経路を計算したり、自動運転システムに対して障害物の存在を通知したりする。

2.5.2 位置参照方式

以上のように、車載情報システムでは、用途が異なる複数の地理空間情報が利用される。そのため、複数のデバイスが連携して 1 つの機能を実現するような場合には、異なる地理空間情報を用いる機能の間で、地理空間情報が示す位置を正確に交換することが課題となる。たとえば交通情報センタから配信された渋滞情報をふまえて目的地までの最短経路を計算したり、カーナビで設定した目的地までの経路に従って自動運転を行ったりする機能を実現する場合、ある機能から別の機能に対して、地理空間情報が示す位置を正確に伝達しないと、システムが誤動作することになる。このような、ある地理空間情報をもとに作成した情報を、ノードやリンクが異なる別の地理空間情報の上にマッピングする処理は、位置参照方式と呼ばれている。

図 2-12 に、位置参照方式の代表的な問題の例を示す。図の左側の例は、地図データ A と地図データ B で、地図メーカーが整備した道路の位置が微妙に異なるため、ある同一の座標（例では北緯 35 度、東経 135 度）が示す位置が各々の地図で異なることになってしまう例である（地図データ A では二番目の分岐点、地図データ B では一番目の分岐点となる）。また、図の右側の例は、経年変化で道路（交差点）が新設された場合に、それまで単一のリンクとして構成されていた区間（ID0）が、2 つのリンク（ID1 と ID2）に分割される例である。このように位置を示す ID が変わってしまうと、例えば ID0 の位置で渋滞が発生しているという情報を配信しても、情報を受信した側ではそれがどの場所の情報であるかがわからなくなる。このように地図データが異なる場合、単純に座標や道路の ID を使用するだけでは位置を正しく伝達できないため、位置を正確に伝達可能な位置参照方式を実現することが重要となる。

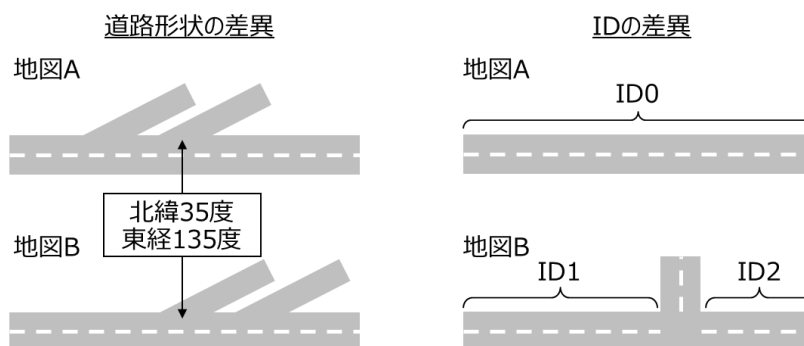


図 2-12 位置参照の問題例

表 2-4 に、これまでに検討されている代表的な位置参照方式を示す。位置参照方式は、大きく静的な位置参照方式 (Pre-coded Location Referencing Method) [88]と、動的な位置参照方式 (Dynamic Location Referencing Method) [89]に分類できる。Pre-coded Location Referencing Method は、実世界の位置を示す標準の ID を整備し、この共通の ID と各地図データに含まれるリンク ID 等との対応関係をあらかじめ定義しておく方式である。一般的に、この対応関係はテーブル等の対応表を整備することによって実現される。例えば前述の VICS の場合、高速道路や主要な幹線道に対して VICS リンク ID と呼ばれる ID が整備されており、この VICS リンク ID とカーナビ用地図に含まれるリンク ID の対応関係をデータとして持つことにより、交通情報センタから配信される渋滞や事故の情報が地図上のどこを示すかを識別可能となる。Pre-coded Location Referencing Method は、正確に位置を交換することができる一方で、実世界の道路が変化した際には変換テーブルをメンテナンスする必要があり、そのために多くのコストがかかる。そのため、例えば VICS の場合、VICS センタから配信される情報を利用可能な範囲は、高速道路や主要な幹線道に限られている。

表 2-4 既存の位置参照方式

分類	例	メリット	デメリット
Pre-coded Location Referencing	VICS[12] RDS-TMC[68]	高精度（整備に誤りがなければ誤りはない）	ID 整備のコストが大きい ため、特定の道路のみでのみ利用可能
	区間 ID[90]	高精度 地図の経年変化に対する 耐久性が高い	同上
Dynamic Location Referencing	AGORA-C[91] OpenLR[14]	ID の整備が不要	座標や属性に基づく推 定のため、精度が低い

一方の Dynamic Location Referencing Method は、上記のような変換テーブルを持たずに、座標や道路の種別等の道路の特徴を示す情報を配信して、その情報をもとに情報の受信側の地図データにおいて類似する道路を探す方式である。Dynamic Location Referencing Method は、共通の ID を整備する必要がないため低コストで運用可能な点がメリットであ

一方で、類似する道路を探す処理が必要であるという点と、位置情報の伝達精度が、情報の交換を行うそれぞれの機能が利用する地理空間情報の間の差異の大きさに依存してしまうという問題がある。

位置参照方式に関しては、これまでに前述の交通情報配信で用いられる VICS や RDS-TMC、交通情報に限らず汎用的に利用可能な方式として提案された AGORA-C や OpenLR など様々な方式が提案されているが、時間に応じて変遷していく実世界を表現する地理空間情報の本質的な問題により、低コストで精度を保証可能な方式が確立されておらず、継続して様々な取り組みがなされている。

2.6 モビリティの適用範囲を一般道に拡大する際の課題

以上で述べた、本研究の前提である関連研究や技術をふまえた上で、本研究が取り組む課題について述べる。本研究では、自律動作するモビリティの適用範囲が一般道や細街路まで拡大する世界を想定し、その際にデータ収集、配信、および利用の各フェーズにおいて課題となることの解決に取り組む。具体的には、以降で述べる3つの課題に取り組む。

2.6.1 物理空間の情報をカメラで取得する際のプライバシー保護

2.2 節で述べたように、地理空間情報を作成するためのデータを収集する路側センサや車載センサが増加することに伴い、センサが取得する情報に含まれるプライバシーの保護が課題となる。特に、自律動作するモビリティの適用範囲を高速道路だけでなく一般道や細街路に拡大する場合、一般道上の交差点など多くの地点に路側センサを設置したり、一般道を走行する通常の自動車によってセンシングしたりすることが行われ、これらの空間は住民の生活空間と重なるため、プライバシーの問題はより大きくなる。

前述のとおり、法規制の観点では、OECD のプライバシーガイドラインを始めとして、プライバシーの保護に関する各国の決議等がなされている。しかし、特にプライバシー情報が含まれやすい監視カメラに関しては、具体的にどのような技術的枠組みによってプライバシーを保護すれば良いかは現在でも明らかになっていない。映像に含まれる人物領域を隠蔽する技術や、住民など監視カメラの被写体が監視カメラをコントロールすることを可能にする技術の研究等も行われているが、監視カメラを設置する本来の目的である、実世界の情報を取得して流通させることとのトレードオフをどのように解決するかは、本質的に難しい問題である。

そこで、本研究では、この問題に対する先行研究をふまえたうえで、プライバシーの保護

と監視カメラによる撮影の目的の両立を図るため、監視カメラ映像の閲覧者と被写体の関係に基づいて異なるレベルの画像処理をエッジ側で実行することによりプライバシーを保護するシステムを提案する。提案システムのプロトタイプを実装し、被写体の情報を監視カメラ側に通知して画像処理がなされるまでの遅延を評価することで、提案システムの実現性を評価する。

2.6.2 モビリティへの地理空間情報配信の高速化

2.4節で述べたように、地理空間情報を配信するうえで、データサイズを削減することが大きな課題である。さらに、自律動作するモビリティの適用範囲を高速道路だけでなく一般道や細街路に拡大する場合、一般道に関する情報も配信する必要が発生し、データサイズはさらに大きくなってしまう。

前述のとおり、これまで、一般的なユニバーサル圧縮を用いてデータサイズを削減する取り組みがなされているほか、地図データの中でも特に道路の形状データ等、座標を含むデータのサイズが大きいことに着目してデータ圧縮を行う技術の提案がなされている。しかし地図データには、道路の形状データ以外にも、例えば移動の出発地や目的地となる施設のデータや、目的地等を音声で指定するための音声認識用のデータ等も含まれ、一般的にこれらのデータサイズは道路データよりも大きい。これらのデータは、固定長のレコードが並んでいる、データベースに類似する形式のデータである。このような形式のデータを圧縮する技術に関しては、データベースの分野においていくつか研究がなされているが、エッジ端末のような組み込みシステムでの利用を想定してなされた研究は少ない。

そこで本研究では、先行研究をふまえ、データベースの分野で普及しつつある列指向データ圧縮の考え方をもとに、組み込みシステムを対象にしてCPUのキャッシュ効率化と複数の軽量な符号化方式を利用することで、データの圧縮率と伸張性能の両立を図る方式を提案し、提案方式をカーナビに実装して実現性の評価を行う。

2.6.3 複数の地理空間情報間の位置参照精度向上

2.5節で述べたように、異なる地理空間情報を用いるシステムの間で位置情報を正確に伝達するためには、地図上の位置を示す共通のIDを整備することによって位置の伝達を行う方式（Pre-coded Location Referencing Method）と、位置の座標やその地点の属性等をもとにして類似する地点を推定する方式（Dynamic Location Referencing Method）がある。これらの方式を利用して、それぞれのシステムが参照する位置を一致させることが必要で

ある。このうち **Pre-coded Location Referencing Method** は、実世界の変化に応じて共通の **ID** を整備する必要がある、多大なコストが必要である。特に自律動作可能なモビリティの適用範囲を高速道路だけでなく一般道や細街路に拡大する場合、地上に存在するすべての道路に対して共通の **ID** を整備することは、**ID** をメンテナンスするコストの観点で実現が困難である。

そこで本研究では、先行研究をふまえ、**Dynamic Location Referencing Method** の1つである **OpenLR** をベースにして、一方の地理空間情報を用いて作成された経路を他方の地理空間情報上の経路に変換する際の経路の一致率を改善するとともに、変換前後の経路の形状の差異を確認することによって一致を自動判定する方式を提案し、特定の地図データを用いた際の性能を評価することにより、提案方式の実現性を評価する。

第3章 物理空間の情報をカメラで取得する際のプライバシー保護

3.1 緒言

2.6.1 項では、自律動作するモビリティの適用範囲を高速道路だけでなく一般道や細街路に拡大する際、実世界の情報を取得して流通させることとプライバシー保護のトレードオフをどのように解決するかが課題であることを述べた。本章では、この課題に対し、街頭に設置される防犯カメラを対象にして、カメラ映像の閲覧者と被写体の関係に基づいて異なるレベルの画像処理をエッジ側で実行することによってプライバシーを保護する手法について論じる。

近年、コンピュータシステムの性能向上や個人情報を利用するサービスの増加により、様々なプライバシーの問題が提起されている。たとえばユーザに付随する RFID (Radio Frequency Identification) を読み取ることによって個人のプロフィールを検索したり、監視カメラによって被写体のプライバシーを侵害したりすることなどが問題になっている。

こうしたプライバシーの問題に対しては、2.2.3 項で述べたように、OECD (Organization for Economic Cooperation and Development : 経済協力開発機構) が 1980 年に採択したプライバシーガイドラインをはじめとして、様々な取り組みがなされている。特にユビキタス環境を想定した研究として Langheinrich による研究があり、プライバシーに関連する情報を収集する際の通知機能等を備えたシステムの提案がなされている[92]。そのほかにも、本人識別可能な情報を隠蔽して匿名性を確保したり、ユーザが利用しているサービスを特定困難にしたりするための研究がさかんである[93][94]。

しかしこれらの研究は、情報を保護したい側にとって有効である一方、情報を要求する側にとっては必ずしも有効ではない。監視カメラのプライバシー問題の場合、被写体のプライバシーを保護するための技術開発が多数なされている一方、監視カメラの設置者や閲覧者等、監視行為による現場の安全確保を期待されている人物への配慮がなされているとはいえない状況である。

こうした状況に対し、やおよろずプロジェクト[95]では、将来のユビキタス情報社会において想定される様々な課題に対して、文理融合アプローチによる取り組みについて述べている。特に監視カメラのプライバシー問題は、法制度・倫理面での問題と技術的な取り組み状況の乖離が大きい。そのため、我々は法律の専門家の支援を受けつつ監視カメラのプライバシーの問題について取り組み、プライバシー保護のためにシステムが実行すべき処理は被写体と閲覧者の関係に応じて変化すると考えて検討を進めている[96][97][98]。この例と

して、街頭に設置された防犯カメラの撮影映像を近隣の住民へ公開し、どのような撮影がなされているか、自分の子供が安全に遊んでいるか等を確認できる監視システムをあげることができる。このような監視システムでは、治安維持に責任を持つ公的機関が閲覧する場合は詳細な映像を閲覧可能とすべきである一方、住民が単に撮影映像を見たい場合は全体をぼかした映像で十分であり、不必要な詳細映像を見せるべきではない。同様に、子供の安全確認が目的の場合はその閲覧者の子供のみを表示するほうが好ましいといえる。

本研究では、このような被写体と閲覧者の関係に基づいて適切なプライバシー保護を実行するシステムを提案し、システムの試作により提案手法の有効性を確認した結果について述べる。

3.2 関連研究

3.2.1 従来技術

カメラ撮影時のプライバシー保護を目的とした技術では、Hudson らによる研究をはじめとして、プライバシーと認識度 (Awareness) の調整が主要な課題とされている[99]。すなわち、プライバシー保護のために撮影映像内の情報を隠蔽する処理と、現場の情報をより良く認識するために詳細な撮影映像を配信する処理とはトレードオフの関係にあり、両者の間に何らかの調整が必要となる。

この課題を解決するためのアプローチは、図 3-1 にあがる 2 つの手法に分類できる。まず 1 つめの手法は、人物領域や特定の矩形等、映像内の特定の領域のみを隠蔽し他の領域は表示するものである。特に、隠蔽すべき情報として代表的なものである人物領域に関しては、背景推定法をベースとする手法[100]、頭部や顔領域検出をベースとする手法[101]、サーマルビジョン等のセンサ情報を活用した手法[102]等の各種のアプローチが提案されている。

2 つめの手法はユーザの明示的な指示や現場の状況に応じて実行すべきプライバシー保護を決定するものである。たとえば Zhao ら[103]、Boyle ら[104]、Neustaedter ら[105]は、モザイクやぼかし等、映像の粒度を変える各種の画像処理のうちプライバシー保護に最も有効な画像処理は何かについての評価実験を行い、画像処理のみでは有効なプライバシー保護は図れないとして、ジェスチャや音声による指示でカメラの視点を制御するシステムを提案している。

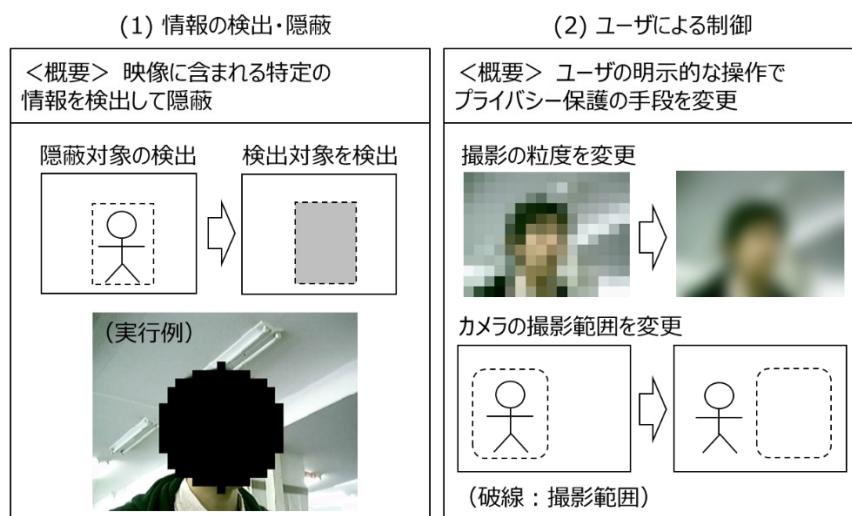


図 3-1 カメラに対するプライバシー保護の従来技術

また、プライバシー保護を直接目的としたものではないが、撮影映像内における被写体の個人同定を目的とした研究が行われている。たとえば赤外線タグや RFID 等のセンサ情報と撮影映像内の人物領域とを照合して、各々の領域が誰であるかを特定する研究がある [106][107]。

3.2.2 OECD8 原則

以上のような技術が提案されている一方、日本を含めた各国のプライバシー保護の考え方の基礎として、OECD よりプライバシー保護に関する 8 つの原則が提示されている。この 8 原則のうち、本研究で主に検討する 2 つの原則を以下にあげる。

収集制限の原則 個人データは、適法・公正な手段により、かつ情報主体に通知または同意を得て収集されるべきである。

利用制限の原則 個人データは、同意がある場合や、法令による場合を除いて、明確化された目的以外に使用されるべきではない。

これらの原則を 3.1 節で述べた街頭防犯カメラの例にあてはめて考えると、監視カメラへのシステム要件として次のものがあると我々は考えている。

まず収集制限の原則によると、映像内の複数の人物に対して一概に隠蔽処理を施すのではなく、撮影への同意がある人物は表示し、同意がない人物は隠蔽できることが望ましい。ここで同意の有無は、多くの場合、誰がその映像を見ているかによって異なると考えられる。たとえば家族が見る場合は同意するし、無関係の第三者が見るのであれば同意しないとい

うことが想定できる。

次に利用制限の原則によると、利用目的に必要な情報のみを閲覧者に見せる必要がある。この点、監視カメラは「何かあったときに備えてすべてを撮影する」という曖昧な目的を持っており、具体的な撮影目的を提示することが難しい。そこで、情報システムとしては閲覧者や閲覧場所等の客観的条件によって閲覧可能な情報を制限する仕組みが有用だと考えられる。特に街頭カメラの場合、自治体や警察等の公的な機関が、安全確認を目的として特定の閲覧端末から見る場合は完全な映像を、近隣の居住者が単に混雑度を確認するために見る場合はぼかした映像を表示することが望ましい。

以上をふまえ、監視カメラに対するプライバシー保護のためには、被写体ごとの同意の有無と閲覧者の閲覧目的に応じて配信映像を変化させることが望ましいと考えられる。

3.2.3 問題点

ここで従来技術を振り返ると、以下のような問題がある。たとえば文献[99]等のように人体を検出・隠蔽するのみの技術では、被写体の同意の有無をシステムに反映できない。また、文献[105]等のように同意の有無によるカメラ制御を可能にするシステムは、たとえば「公的機関は完全な映像を閲覧可能とする」という要件に対応できない。

こうした従来技術の問題をカバーするため、本研究では、被写体の同意の有無と閲覧者の閲覧目的に応じて適切な画像処理を選択・実行し、映像内のプライバシー情報をフィルタリングするシステムを提案する。3.3節で提案するシステムでは、被写体からのプライバシー保護要求と閲覧者の閲覧要求を取得し、撮影映像内の被写体ごとに異なる保護レベルを適用する。ここで、提案システムでは画像認識による人物の検出結果と、被写体が保持する携帯機器から送信される位置情報のマッチングによって個人同定することを想定している。

このようなシステムを有効に機能させるためには次の2つの問題がある。

- (1) センシング技術の精度：同定を正しく行うためには、基礎となる各センサの精度が重要である。たとえば既存の位置測位技術では比較的高精度である超音波センサを用いても10cm程度の誤差が発生しうる[108]。
- (2) センサ情報の遅延：位置情報と画像認識結果の同定を行う際には位置情報の遅延が問題となる。たとえば情報の通知に1秒の遅延があると、一般的な歩行者速度(1m/s)から考えて1mの誤差が生じるため、センサの精度がいかにも高くても同定が困難となる。

上記の問題に対し、提案システムでは後者の遅延が特に問題となる。この理由は、提案シ

システムは従来の個人同定のみを行うシステムと異なり、被写体・閲覧者双方の要求の処理、および要求に基づく撮影映像の加工・配信処理を行うものであるため、これらの処理負荷にともなう遅延が無視できない値になるからである。

以上をふまえ本研究では、提案システムの有効性を確認するため、双方の要求に応じて映像を加工・配信するシステムの詳細について述べ、プロトタイプシステムによる遅延時間の測定結果を報告する。

3.3 閲覧者と被写体の関係に基づくプライバシー保護システム

3.3.1 提案システムの概要

図 3-2 は、提案システムの考え方を示したものである。提案システムでは、被写体のプライバシー保護と閲覧者の閲覧目的の両立を図るため、被写体と閲覧者の双方からそれぞれプライバシー保護要求（以下、保護要求とする）と映像閲覧要求（以下、閲覧要求とする）を受ける。そして、両者の要求に基づき、適切な画像処理やカメラ制御等のプライバシーを保護する機能（以下、フィルタと呼ぶ）を実行する。そしてフィルタ実行後の映像を閲覧者へ配信するとともに、被写体が任意で実行可能なフィルタに関する情報を通知する。なお、フィルタの例としては、たとえば 3.2.1 項で概観した従来技術による人物隠蔽処理等を想定している。

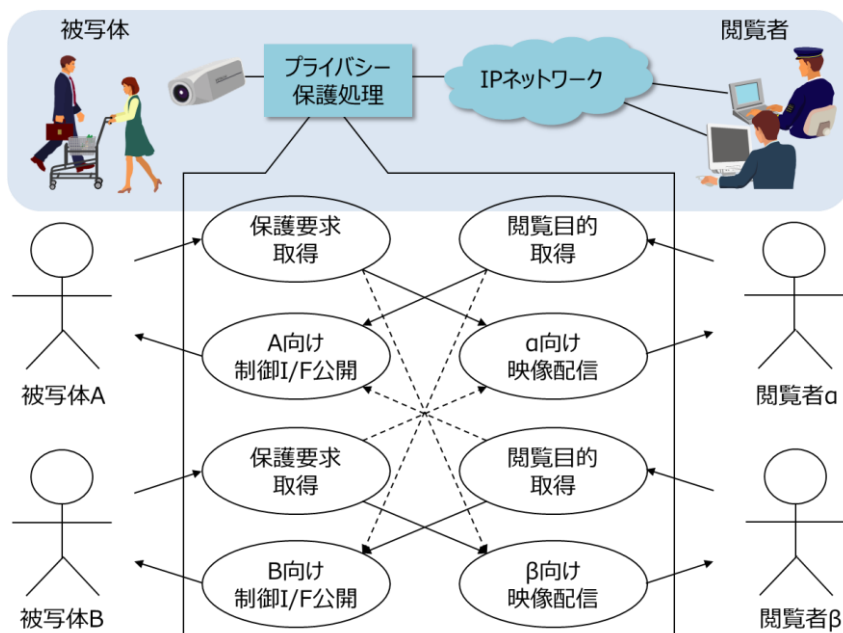


図 3-2 閲覧者と被写体の関係に基づくプライバシー保護

図 3-3 は提案システムの構成を示したものである。図は、1 台の定点カメラによる被写体の撮影映像を、閲覧者が閲覧端末から見ている様子を示している。このシステムにおいて映像情報のフィルタリングは以下の手順でなされる。まず、携帯端末では定期的に位置情報を測位しており、この測位結果を含む保護要求をカメラサーバへ送信する。この送信は、ユーザが携帯端末で明示的な操作を行うか、あるいは無線 LAN の電波強度が一定の閾値以上になった際に自動的になされる。保護要求を受信したカメラサーバでは、3.3.2 項で述べる方法に従って実行するフィルタを決定するとともに、画像認識結果と受信した位置情報に基づく個人同定処理を行い、各被写体に対して適切なフィルタを適用する。

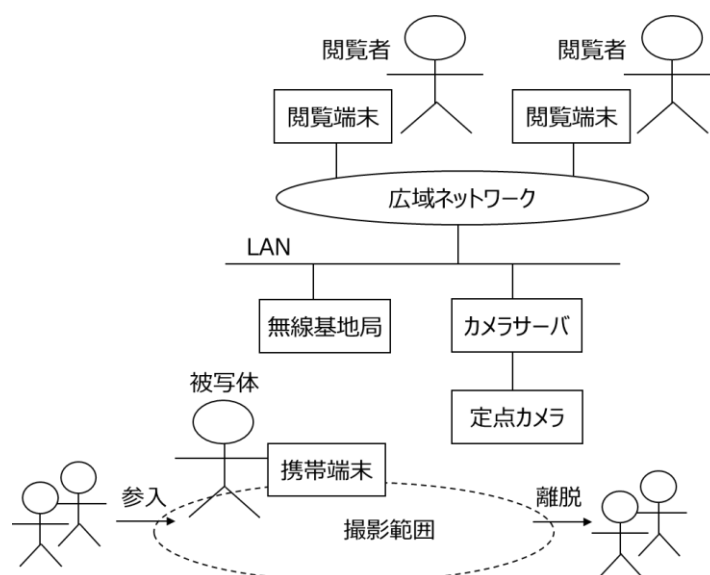


図 3-3 提案するプライバシー保護システムの概要

3.3.2 プライバシー保護要求と閲覧要求の調整

(1) 要求の記述形式

提案システムは、被写体と閲覧者の相反する要求を調整するため、双方の要求を一定の書式のルール（以下、制御ルール）として記述し、被写体と閲覧者の関係によって適切なルールを選択し実行するものとした。

表 3-1 は、本研究で提案するシステムのシステム要件として想定するものである。表にあげた要件には、大きく分けて、No.1 から No.5 に示す被写体の同意の有無を反映する要件と、No.6 から No.11 に示す閲覧目的を反映する要件とがある。

この閲覧者側の要求と被写体側の要求の記述として、それぞれ、閲覧者側の要求を示す制御ルール（閲覧者側ルール）および被写体側の要求を示す制御ルール（被写体側ルール）を考える。閲覧者側ルールは、どのような場合に撮影・閲覧されるのかを被写体が把握できるようにするため、カメラサーバに静的に設定されて外部から参照可能とする。一方、被写体側ルールは、撮影に対する同意の有無等、個々の被写体ごとに異なる要求を記述するため、被写体が保持する携帯端末に設定する。携帯端末に設定されたルールは、保護要求に含められて近隣のカメラサーバへ通知される。

表 3-1 提案システムのプライバシー保護要件

No.	想定要件	
1	下記の「公共安全確認」以外の撮影目的において、以下の要件を満たすこと	
2	- 撮影に対する非同意者を隠蔽すること	
3	- 同意の付与は閲覧者ごとに設定可能であること	
4	- その他、隠蔽領域を設定可能であること	
5	- 隠蔽する度合い（モザイク粒度等）を設定可能であること	
6	以下に示す撮影目的に応じて異なる処理を行うこと	
7	公共安全確認	映像の全領域を表示すること
8	半公共性を有する安全確認	犯罪行為を検知するため、顔領域以外は表示すること
9	解析評価（動線・流量解析）	人物領域を隠蔽すること
10	雰囲気確認	全体をぼかすこと
11	設備の異常監視	監視対象設備は表示すること

この制御ルールに記載する情報について以下に述べる。まず、閲覧者側ルールには、表 3-1 の No.7 から No.11 に示す各閲覧目的を示す情報と、その閲覧目的を達成するうえで必ずしも必要ない撮影情報（以下、隠蔽許容情報とする）を記載する。前者の閲覧目的を示す情報は、「安全確認」「雰囲気確認」といった言葉をそのまま用いて記述することも考えられるが、誰にどのような撮影映像が提供されるかを被写体が理解可能とするため、提案システムでは閲覧者・閲覧場所・閲覧時刻の組合せによって記述する。一方、被写体側ルールには、撮影への同意の有無を記載する。この同意の有無は、同意を与える閲覧者・閲覧場所・閲覧時刻の組合せと、同意の度合い、すなわち隠蔽処理を要求する情報（以下、隠蔽要求情報と

する)を記載する。

閲覧者側ルールに記載する隠蔽許容情報と、被写体側ルールに記載する隠蔽要求情報は、領域および隠蔽方法によって指定する。ここで領域は、表 3-1 の要件より人体領域、頭部領域、および指定領域のいずれかを記載し、隠蔽方法はマスク処理とモザイク処理のいずれかを記載する。

以上より、双方の制御ルールには以下の項目を記載する。なお、下記の記載項目のうち、閲覧者 ID・被写体 ID における記号“*”と“—”は、それぞれ 1 人でも人物がいる状態、および人物が誰も存在しない状態を意味する。また、括弧内に記載している項目名は、以降で述べる(2)でのアルゴリズム表記に利用するものである。

- (a) 閲覧者 ID (browser) : 閲覧者を示す ID, “*”, “—”のいずれかを記載する。
- (b) 被写体 ID (subject) : 被写体を示す ID, “*”, “—”のいずれかを記載する。
- (c) パラメータ (param) : 閲覧場所, 閲覧時刻を記載する。
- (d) フィルタ (filter) : 隠蔽許容情報または隠蔽要求情報を記載する。

図 3-4 は、制御ルールの例を示したものであり、閲覧者 *b* が被写体 *s* を自宅から閲覧する際は被写体 *s* にモザイク処理を実行することを示している。

```
<rule subject="被写体 s" browser="閲覧者 b">  
  <param key="閲覧場所" value="自宅" />  
  <filter name="モザイク" />  
</rule>
```

図 3-4 制御ルールの例

(2) 制御ルールの選択手順

以下に、被写体側ルールと閲覧者側ルールを参照して、実行する制御ルールを選択する手順について述べる。

この手順においては、どのような制御ルールが選択されるかを被写体が事前に把握・制御できることがプライバシー保護の観点から必要である。そのため、提案システムでは双方の要求に対する曖昧な折衷案を選択するのではなく、要求の衝突があった際には閲覧者側の要求を優先して実行し、被写体へは携帯端末を通じて警告を通知する。閲覧者側を優先する理由は、先に述べたように特定の用途では監視システムとして実用性を優先させる必要があると考えるからである。この考えのもと、公的な機関は全領域を閲覧する要求を行える一方で一般の住民は全体がぼかされた映像を要求することしかできない等、閲覧者と被写体

の関係を考慮したシステムの運用を行う前提のうえで、閲覧者側の要求を優先する。

以下はこの調整手順を記載したものであり、閲覧者側ルール集合 R_b 、および被写体側ルール集合 R_s から、被写体 s と閲覧者 b の組合せに対して実行する制御ルール集合 R を決定する処理を示している。

制御ルールの調整処理

Step.1

$R'_s := \emptyset$

for each r **in** R_s **do**

if ($r.subject = s$ **or** $r.subject = *$) **and**
 $(r.browser = b$ **or** $r.browser = *)$ **then**

Add(R'_s, r)

$R'_b := \emptyset$

for each r **in** R_b **do**

if ($r.subject = s$ **or** $r.subject = *$) **and**
 $(r.browser = b$ **or** $r.browser = *)$ **then**

Add(R'_b, r)

Step.2

for each $r1$ **in** R'_s **do**

for each $r2$ **in** R'_b **do**

if $r1.filter > r2.filter$ **then**

Delete($R'_s, r1$)

Step.3

$R := R'_s$

for each $r1$ **in** R'_s **do**

for each $r2$ **in** R'_b **do**

if $r1.subject = r2.subject$ **and**

$r1.browser = r2.browser$ **and**

$r1.filter < r2.filter$ **then**

Delete($R, r1$)

Add($R, r2$)

上記の手順の実行内容について以下に説明する．まず Step.1 では， R_s と R_b から被写体 s ・閲覧者 b に関連するルールを抽出し，それぞれ R'_s と R'_b としている．なお，閲覧者 b に関連する比較処理では閲覧場所および閲覧時刻を含めた比較を行うが，本研究では省略している．

Step.2 は，被写体と閲覧者双方のルールに衝突があったときの処理であり， R'_s と R'_b 内のルールを相互に比較し，衝突するルールがあれば R'_s 側のルールを削除している．ここでルールが衝突するとは，閲覧者が許容するレベル以上の保護を被写体が要求した場合であり， R'_s 内のルールで指定された隠蔽要求情報が R'_b 内のルールで指定された隠蔽許容情報の一部を包含する場合である．

Step.3 は，画像処理効率化のための処理である．この手順では，被写体 ID と閲覧者 ID の組合せが同一のルールがあり，かつ R'_b 内のルールで指定された隠蔽許容情報が R'_s 内のルールで指定された隠蔽要求情報を完全に包含する場合は， R'_b 内のルールのみを選択している．

(3) フィルタの実行手順

上記(2)の手順は，システム上に存在する被写体および閲覧者の全組合せに対して実行する必要がある．すなわち，被写体あるいは閲覧者に変化が発生するごとに，実行される制御ルールは変化する．

この手順では，ルールが変更される瞬間に被写体が無制限に閲覧されることを防止するため，変更後の状態に基づく制御ルールを実行してから，変更前の状態に基づく制御ルールを停止することが必要となる．

以下に，被写体 s の参入時 (s からの保護要求受信時)， s の離脱時，閲覧者 b の参入時，および b の離脱時におけるフィルタの実行手順を示す．ここで B は現在映像を閲覧している閲覧者の集合であり， S は現在撮影範囲内に存在する被写体の集合である．また，サブルーチン $\text{Run}(s, b)$ は，被写体 s および閲覧者 b の組合せに対して(2)の手順で決定される制御ルールの集合 R を実行するものであり，同様にサブルーチン $\text{Stop}(s, b)$ は R を停止するものである．

被写体 s 参入時

```
if  $B = \emptyset$  then  $\text{Run}(s, -)$   
else for each  $b \in B$  do  $\text{Run}(s, b)$   
if  $S = \emptyset$  then  $\text{Stop}(-, b)$ 
```


被写体 s 離脱時

```

if  $S = \{s\}$  then Run( $-$ ,  $b$ )
if  $B = \emptyset$  then Stop( $-$ ,  $b$ )
else for each  $b \in B$  do Stop( $s$ ,  $b$ )

```

閲覧者 b 参入時

```

if  $S = \emptyset$  then Run( $-$ ,  $b$ )
else for each  $s \in S$  do Run( $s$ ,  $b$ )
if  $B = \emptyset$  then Stop( $s$ ,  $-$ )

```

閲覧者 b 離脱時

```

if  $B = \{b\}$  then Run( $s$ ,  $-$ )
if  $S = \emptyset$  then Stop( $s$ ,  $-$ )
else for each  $s \in S$  do Stop( $s$ ,  $b$ )

```

たとえば被写体 s 参入時には、閲覧者が存在しない場合は s のみによって定まる R を実行し、閲覧者が存在する場合は各閲覧者 b によって定まる R を実行してから、 s 参入前に実行していた R を停止する。

3.3.3 プロトタイプシステム

以上で述べた提案システムのプロトタイプを構築した。図 3-5 にシステムの構成を示す。このプロトタイプシステムは、100Base-T Ethernet²上にカメラサーバ、および閲覧端末 (PC) を設置し、また、802.11b 無線 LAN を介して携帯端末 (PDA) を設置している。そのほかに、3.4 節での評価用に PC および RFID リーダを設置している。

プロトタイプシステムの動作は、3.3.1 項で述べたとおりである。なお、撮影映像は JPEG/RTP 方式によって配信され、映像を閲覧する際は、閲覧者は Web ブラウザを用いてカメラサーバへ閲覧者 ID および認証情報を送信し、映像の閲覧のみが可能な専用ソフトウェア (Java³アプレット) をダウンロードして閲覧する。また、撮影された映像は加工処理を施す前の状態でカメラサーバへ一定時間記録され、第三者が持ち出せないようにアクセス制限が施されている。

以上のプロトタイプシステムの実行例として、3.1 節で述べた街頭防犯カメラを想定した

² Ethernet は XEROX 社の商標です。

³ Java は Sun Microsystems 社の商標です。

ものを図 3-6 に示す。また、図に示した 3 つの実行画面に相当する提案システムの動作を
表 3-2 に示す。

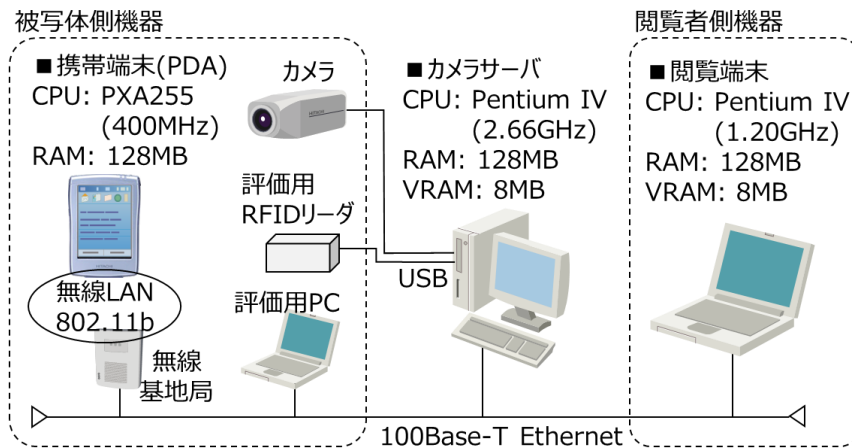


図 3-5 プロトタイプシステムの構成



図 3-6 プロトタイプシステムの実行例

まず、図 3-6 の左上の画面は、警備員が犯罪行為の検知を目的として監視する際の閲覧映像を示したものである。これは表 3-2 の No.1 によって顔（頭部領域）のみに対する隠蔽

処理が実行された結果である。同様に、右上の画面は、近隣住民が撮影範囲の雰囲気確認を目的として見る際の映像を示したものであり、表 3-2 の No.2 によって撮影領域全体への隠蔽処理が施されている。左下の画面は、保守業者が街頭設備の監視を行う際の映像を示したものである。この画面では、表 3-2 の No.3 によって住民の要求を反映した人体領域の隠蔽処理がなされているが、保守業者が監視を行うべき領域（矩形）で示した部分は表示されている。なお、右下の画面は、被写体（住民）が持つ携帯端末の画面を示したものであり、撮影映像の静止画と、被写体が任意で指定可能なフィルタを表示している。

表 3-2 実行例の制御ルール

No.	被写体	閲覧者	フィルタ
1	近隣住民	警備員（犯罪検知）	顔以外を表示
2	近隣住民	近隣住民（雰囲気確認）	全体を隠蔽
3	近隣住民	保守業者（設備監視）	指定領域を表示
	近隣住民	*	人体領域を隠蔽

3.4 評価

前述のプロトタイプを用いて提案方式の評価を行った。なお、本来は提案方式によってプライバシーを保護できているのかどうかを評価するべきだが、同一の画像処理であってもプライバシーを保護できていると受け取るかどうかは人によって様々であり、再現性のある評価を行うことが難しいため、本研究では提案方式による処理の負荷と通信遅延を考察することにより、機能としての実現性があることを確認した。

3.4.1 想定利用環境

評価実験に先立ち、提案システムが有効である利用環境についての考察を以下に述べる。表 3-3 は、一般的な市販の監視カメラの利用環境を示したものであり、カメラによる撮影可能距離を 20m、人間の歩行速度を 1m/s とした場合の、歩行者通行量に対する撮影範囲内の瞬間被写体数、および撮影映像の横方向 1m あたりの平均人数（密度）を試算したものである。なお、提案システムの利用場所は監視カメラの設置が進んでいる繁華街と公園を想定し、歩行者通行量は、繁華街については文献[109]に記載の渋谷センター街の値を、公園については文献[110]に記載の日比谷公園の値を参考に設定した。

表より、歩行者通行量が 10,000(人/時)である繁華街においては、横幅 1m あたりの被写

体数が 2.77(人/m)である。この値は、既存技術によって撮影映像内の各々の被写体の個人同定を行うにはきわめて困難な値であるため、本研究での評価の対象外とする。一方で、公園における値は 0.138(人/m)であり、この値は、従来研究[106]において位置測位精度が約 30cm の場合に 1m ほど離れている 2 人を同定可能であることをふまえると、個人同定が十分可能な値であると考えられる。そこで以下では、公園に相当する環境での提案手法の有効性について評価する。

ここで、位置測位自体の誤差については、3.2.3 項で紹介したように従来研究でおよそ 10cm の精度を達成できると考えられるため、以降の評価に際しては提案手法の影響による位置情報の誤差がおよそ 20cm に収まることを確認する。20cm の誤差は、歩行者速度を 1m/s とすると 200msec の遅延に相当する。

表 3-3 想定利用環境

比較項目	単位	繁華街	公園
通行量	(人/時)	10,000	500
被写体数	(人)	55.4	2.76
密度	(人/m)	2.77	0.138

3.4.2 要求調整に起因する負荷の考察

まず、3.3.2 項で述べた提案システムの要求調整処理に起因する影響について考察する。

提案システムでは、被写体が参入・離脱するごとに、もしくは閲覧者が閲覧を開始・停止するごとに、3.3.2 項の(3)で示した手順が実行され、そのステップ数は、被写体参入時における閲覧者数を N_b とすると $O(N_b)$ である。

この各ステップで 3.3.2 項の(2)で示したアルゴリズムが実行され、そのステップ数は、 R_s, R'_s, R_b, R'_b の要素数をそれぞれ $n_{rs}, n_{rs}; n_{rb}, n_{rb}$ とすると、 $O(n_{rs})+O(n_{rb})+O(n_{rs}n_{rb})$ である。この値は N_b に依存しないことから、被写体 s の参入時に発生する要求調整処理のステップ数は $O(N_b)$ である。同様に被写体離脱時のステップ数も $O(N_b)$ である。また、閲覧者の参入・離脱時のステップ数も、その時点での被写体の数を N_s とすると、同様の考察により $O(N_s)$ となる。

以上のオーダ計算に対して、表 3-3 より、 N_s はおよそ 2.7 人であるから、閲覧者が変化する際の負荷の影響はほとんどない。一方、 N_b についてはこうした制限がないため被写体の参入・離脱による負荷の影響は N_b の増加に応じて大きくなる。そこで、提案システムで

は同時にシステムを利用可能な閲覧者数を一定数に制限するものとする。

3.4.3 提案システムの有効性確認

以上の考察をふまえ、提案手法が位置情報の到達遅延へ与える影響について 3.3.3 項のプロトタイプシステムを用いた実験により確認した。実験では、以下にあげる各々のイベント発生から、カメラサーバでフィルタが呼び出されるまでの要求遅延時間を測定した。

- (a) 携帯端末での保護要求送出
- (b) PC での保護要求送出
- (c) RFID リーダを制御するプログラムでのタグ検出

ここで各イベントは、表 3-3 での公園での歩行者通行量を模擬して、発生率 500(件/時)により等間隔で発生させた。また、これらの値を評価するために、PC とサーバ間の Ping 応答 (ICMP エコー) 時間を測定した。

図 3-7 に、要求遅延時間の測定値 (縦軸) と映像の配信ビットレート (横軸) の関係を示す。なお図に示す測定値は、連続する 10 回の測定値の平均値を算出したものである。

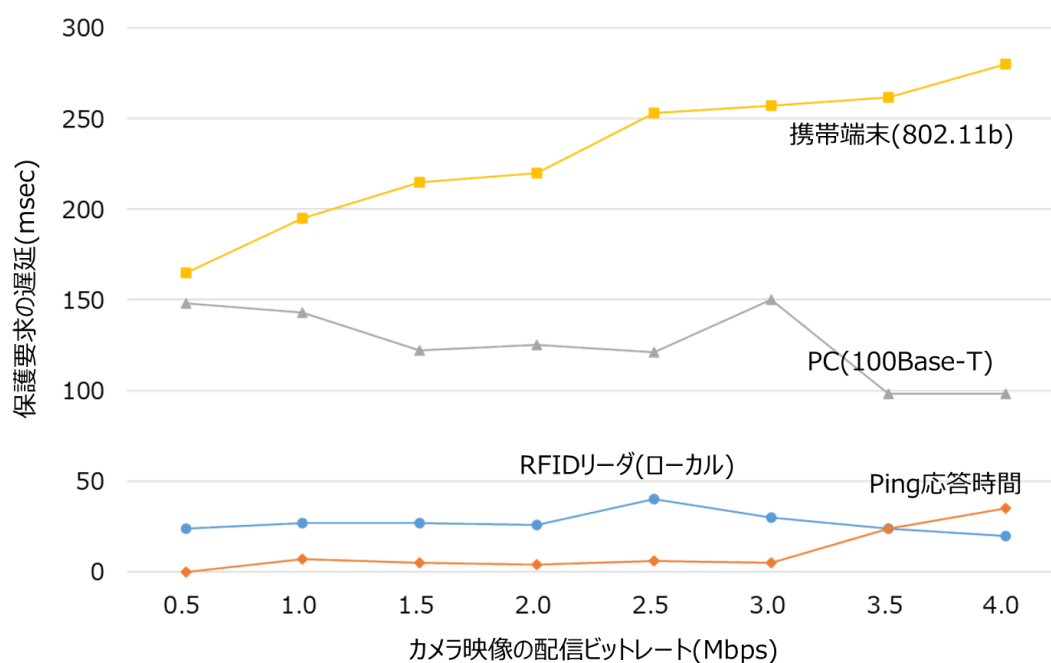


図 3-7 プライバシー保護要求の遅延時間

図より、携帯端末からの要求遅延が映像配信ビットレートの増加に合わせて大きくなる一方、PCからの要求遅延は増加しない。この違いは各々の利用する通信帯域にあると考えられ、携帯端末においても十分な帯域を利用可能になれば、要求遅延はおよそ 150msec になると考えられる。これは歩行者速度 1m/s に照らし合わせて考えると 15cm の誤差となる。この値は、表 3-3 に示した公園での利用においては個人同定が可能な範囲の誤差であることから、提案システムは有効であるといえる。

なお、RFID リーダによる測定結果から、ネットワーク通信に依存しない処理（3.3.2 項で述べた要求調整処理を含む）の遅延はおよそ 20msec である。また、Ping 応答時間の測定結果から LAN 上の通信遅延はきわめて少ない。したがって遅延時間 150msec の大半はカメラサーバ上で発生している通信遅延であり、これは主に映像配信処理の影響であると考えられる。到達遅延の低減が必要な場合はこの点の対策が必要となる。

3.4.4 提案システムにおける法的視点での課題

プライバシーの課題は技術的アプローチのみで解決できるものではなく、法律の専門家を含めた議論が不可欠である。3.1 節で言及したやおよそプロジェクトにおいて、Murakami らのグループは法律の専門家としてユビキタス環境における監視カメラ向けのプライバシーガイドラインについて検討を行っている[111]。本項では、提案システムの考え方について同グループでヒアリングを実施した結果得られた意見を示す。

まず提案システムの考え方については、カメラの設置場所、たとえばパブリックな場所やプライベートな場所によって処理が変わることはあるかもしれないが、被写体によって処理が変わるかどうか、すなわち個人によって保証されるプライバシー権が異なるかどうかについては一概にいけないとの指摘を得ている。

また、撮影に対する通知・同意取得に関するさらなる検討が必要であるとの指摘を得ている。たとえば、提案システムには肖像権の問題があり、同意なくカメラ撮影することの問題はもとより、撮影映像において顔にモザイクをかけるなどの処理を行うことの可否から議論が必要である。

また、撮影映像を配信する際の二次配信を防止するため、提案システムでは閲覧端末側での情報の蓄積を防止する機能も含めて検討している。しかし、この点に関しては、肖像権、プライバシー保護、著作権管理は法的に別の問題であるため、技術的にも混同しないほうが好ましいとの指摘を得ている。

3.5 結語

本章では、カメラ撮影に対するプライバシーの問題について、被写体のプライバシー保護と監視カメラの閲覧目的の両立を図るため、被写体と閲覧者の関係によって適切なプライバシー保護を行うシステムの提案を行った。提案システムは被写体・閲覧者からそれぞれプライバシーの保護要求と映像の閲覧要求を受信し、双方の要求を示す制御ルールに従って画像処理やカメラ制御を実行する。この提案システムのプロトタイプを試作することによりシステムの有効性の確認を行った。

提案システムには、いくつかの課題が残されている。まず、本研究では触れなかった映像内における被写体の個人同定処理の精度向上がある。本章では、監視カメラの設置場所として歩行者が少ない公園等を想定し、被写体が保持する携帯端末などの位置情報を用いて個人同定を行うことを前提にして評価を行ったが、提案方式を交差点や道路周辺など、歩行者が密集する可能性がある場所で利用する場合は適用が困難である。近年では、機械学習技術の進化によりカメラ画像から人物追跡を行う研究も多数なされており[112]、今後はこのような画像認識ベースの方式もふまえて検討を行う必要があると考えられる。そして、3.4.4項であげた法制度面での課題に対して、法律の専門家と連携した取り組みが引き続き必要である。また、提案方式ではプライバシーを保護するために被写体が位置情報を送信する必要があるが、これによって、位置情報をシステムの運用者から保護する必要があるという新たな課題が発生する。被写体が明示的に位置情報を送るという操作は不自然であり、実際の利用に即した改善が必要である。また、本研究で述べた制御ルールは被写体や閲覧者の権限しか考慮しておらず、各被写体が持つプライバシーに対する感覚等を考慮した柔軟な処理はできない。例えば文献[113]では被写体と閲覧者の関係に基づいた段階的な視覚的抽象化によってプライバシーを柔軟に保護可能としている。

今後、上記のような取り組みをふまえ、引き続き監視カメラに対するプライバシーを保護可能な技術的枠組みの構築を進めていく必要がある。

第4章 モビリティへの地理空間情報配信の高速化

4.1 緒言

2.6.2 項では、モビリティへ地理空間情報を配信するうえで、データサイズを削減することが課題であり、特に自律動作するモビリティの適用範囲を高速道路だけでなく一般道や細街路に拡大する場合、一般道に関する情報も配信する必要が発生し、データサイズはさらに大きくなってしまふことについて述べた。本章では、この課題に対し、データベースの分野で普及しつつある列指向データ圧縮の考え方をもとに、カーナビとナビゲーション用の地図データを対象にして、CPU のキャッシュ効率化と複数の軽量な符号化方式を利用することでデータの圧縮率と伸張性能の両立を図る方式について論じる。

近年、カーナビゲーションシステム用地図データの鮮度や精度に対する要求が高まっている。スマートフォンの地図アプリではユーザが特に意識しなくても常に最新地図を利用可能であり、これと同等のことが、CPU 性能やメモリなどのリソースにおいてスマートフォンよりも劣っていることが多いカーナビにも求められている。またクラウド上の様々な地図サービスとカーナビの連携が進む中、カーナビの地図データが古いと適切な案内を行えないことも多い。さらに近年では自動車の制御にカーナビの地図データを活用することも検討されており、データの鮮度や精度がいっそう重要になっている。

このような要求に対し、従来のカーナビは内部のストレージに格納している地図データを更新しにくいという問題がある。主な理由は地図データのサイズであり、数 GB ある地図データを 4G 等の無線通信でダウンロードして更新することは、更新時間や通信費の点でユーザの負担が大きいからである。そのため現在は、地図データを更新するために SD カード等の記録メディアをカーナビから取り外して自宅の PC で書き換えたり、販売店に更新作業を依頼したりするなどの手段がとられている。

本章では、地図データの更新を容易化するための取り組みの一環として、カーナビ内部のストレージに格納している地図データの圧縮方式について述べる。高速に伸張可能な方式で地図データを圧縮することにより、最新地図データのダウンロード時間やストレージ使用量の削減が可能になり、また、圧縮によって空いた領域に従来よりも高精度なデータを格納することが可能になる。本研究で提案する方式は、RDBMS 等で普及しつつある列指向データ圧縮をベースに、地図データの多くを占める固定長レコードを圧縮する際の圧縮率と伸張性能の向上を図ったものである。

4.2 関連研究

4.2.1 列指向データ圧縮

圧縮対象とするデータが RDB のように行と列の二次元の構造を有する場合、列毎に圧縮すると入力データの系列に特徴が現れるため圧縮率を向上できることが知られている[114]. このように列毎に圧縮する方式は列指向データ圧縮と呼ばれている.

列指向データ圧縮に関する従来の取り組みとして C-Store[115]がある. Abadi らは C-Store を対象に列指向データ圧縮とクエリ性能の最適化に組み込み、列の特性に応じて符号化方式を切り替える方式について述べている[116]. C-Store ではランレングス符号、辞書符号、ビットベクタ符号、LZ 符号[72]の4種類を評価した結果、ランレングス符号等の軽量の符号化を用いた場合の性能が良いとしている.

また、郡らはデータウェアハウス向け RDBMS への列指向データ圧縮技術の適用に組み込み、ランレングス符号、インデックス符号、差分符号を組み合わせた RID 符号を開発している[117]. RID 符号は、伸張性能を確保するために上記の軽量の符号のみの組合せによって実現しており、また、対象データを一度走査し、列の特性に応じてインデックス符号のビット長や差分符号の適用有無を切り替えることにより高い圧縮率を達成している.

4.2.2 PAX レイアウト

前述のように、列指向でデータを圧縮することにより特定の列のみを参照するクエリの性能を向上できる一方、すべての列を参照する処理の場合、例えばレコード 1 行を伸張するような場合は、列毎に圧縮されたすべてのデータを伸張してデータを取り出す必要があるため逆に性能が低下する. このような列指向でデータを処理する際のトレードオフに関連する取り組みとして、RDBMS 向けのデータ配置モデルである PAX (Partition Attributes Across) が知られている[118][119]. PAX 自体はデータ圧縮に関するものではないが、本研究で提案する方式と関係するため、ここで説明する.

RDBMS のデータをストレージに記録する際のモデルとして、レコード順にデータを記録する NSM (N-ary Storage Model) と、列毎にデータを分割して記録する DSM (Decomposition Storage Model) がある[120][121]. 検索クエリが参照する列は数個のみであることが多いため DSM のほうが良い性能を示すことが多いが、DSM は参照する列が多くなると性能が低下する. PAX はこのトレードオフに対する提案であり、DSM のようにレコードを列毎に分割して格納しつつ、メモリ上のデータリード用のバッファ (RDBMS デ

ータファイルのページサイズに相当) にすべての列が収まるように、データを一定のレコード数で分割して格納する (図 4-1)。これによって、例えば特定の列のみを参照するクエリを高速化しつつ、多くの列を参照するクエリについても性能低下を抑えている。

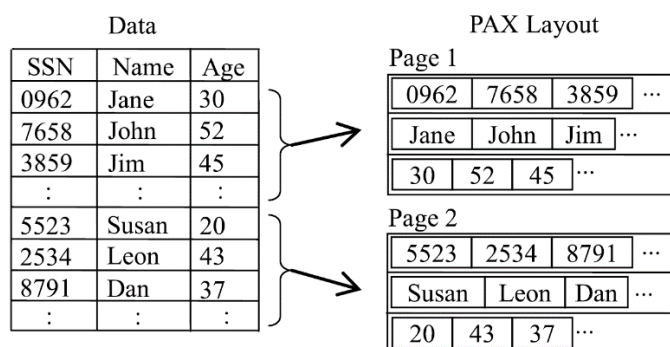


図 4-1 PAX によるデータ配置

4.3 課題

4.3.1 要件

列指向データ圧縮を用いて地図データを高速伸張可能なように圧縮することを考える。

図 4-2 に、地図データ更新システムをデータ圧縮の観点で分類したものを示す。

図に記載した分類のうち、(A)は地図データを更新する処理の過程で圧縮データを伸張する方式である。この場合、データ圧縮の主な目的は通信サイズの削減であり、高い圧縮率が求められる。また、データ圧縮に加え、地図データの差分のみを配信することでサイズを削減する手法も用いられる[87]。(B)はストレージに地図データを圧縮したまま格納し、アプリケーション実行中に逐次データを伸張する方式である。この場合、圧縮データの伸張処理に伴うナビ性能の低下をユーザーが感じないようにすることが重要であり、高い伸張性能が求められる。(C)はアプリケーション実行時に直接配信サーバから地図データを取得する方式であり、通信環境の影響を大きく受けるため、適用する地図データの範囲等、データ圧縮以外の検討も必要である。

上記の分類のうち、従来はナビ性能を確保するために(A)を採用することが多いが、常に最新のデータを利用可能な(C)の実現を視野に、本研究ではまず(B)を対象として検討する。そのためナビ性能の低下をユーザーが感じないように圧縮データを高速に伸張可能とすることを優先し、その上で可能な限り圧縮率を高めることを図る。

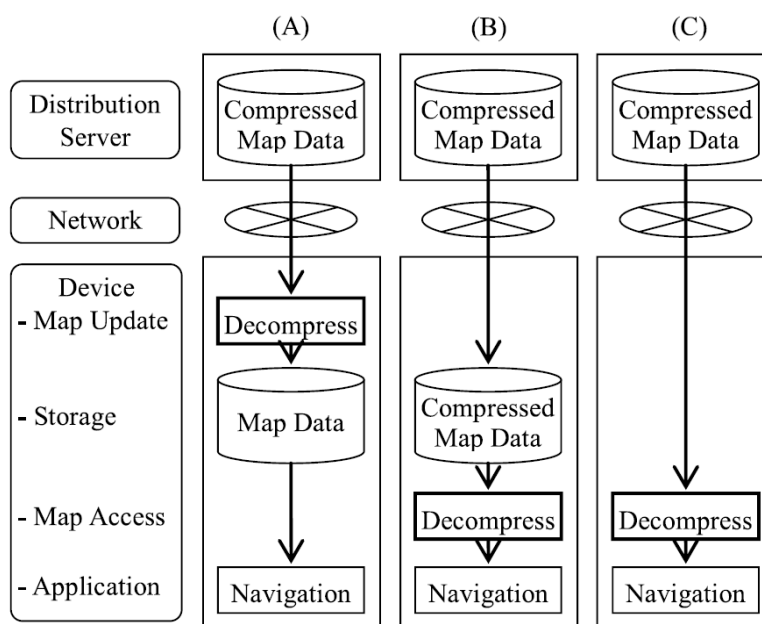


図 4-2 地図データ圧縮の適用パターン

4.3.2 課題

上記の要件に対して、関連研究をふまえ、本研究で解決する課題を以下に記載する。

(1) 列指向圧縮データを伸張する際のキャッシュ効率

RDB における列指向データ圧縮の基本的な考えは、特定の列のみを参照するクエリが多いため、列毎に圧縮を行うことで性能を向上可能な点である。一方、カーナビ用の地図データの場合、ナビ性能を確保するためにデータベースを設計する時点で機能毎にテーブルが分割され、各機能はレコードのすべての列を参照することが多い。また、同時に参照されるレコードがなるべく近い位置に格納されるような工夫もなされる。そのためクラスタのような一定のまとまりでリードするほうが良い性能を示し、圧縮データの伸張もすべての列を伸張する処理が基本となる。

すべての列を伸張する場合、4.2.2 項で述べた PAX のようにキャッシュ上にデータを配置することで伸張処理の高速化を図れる。しかし PAX はデータ圧縮を想定したモデルではないため、入出力データ（圧縮前後のデータ）や復号用のワーク領域を考慮したデータ配置を考える必要がある。

(2) 軽量符号の組合せによる性能向上

前述した関連研究では、複数の符号化方式を組合せ、列毎の特性に応じて適切な方式を選択することで性能向上を図っている。本研究も基本的に同様のアプローチとするが、あらゆる

るデータに対して伸張性能と圧縮率を両立可能な方式は存在しないという問題がある。

例えば Abadi らによる取り組みでは、ランレングス符号等の軽量符号以外、例えばハフマン符号は RDB の性能を維持する上で採用困難だったとしている。また、郡らは、RID 符号は高い圧縮効果を示すが、数値データ等、十分な効果を得られない一部のデータが圧縮後データサイズの大半を占める問題が残るという考察を示している。

この問題に対し、本研究ではユーザが性能低下を感じないことを目標にし、圧縮対象のテーブルを参照する各機能の性能要件に応じて、使用する符号化方式を選択する方式を考える。例えばナビ画面に表示する情報を格納しているテーブルの場合、多少復号性能が悪くても、画面の表示に必要な 1 回のリードサイズが十分に小さくリード時間の増加が数百ミリ秒程度に収まれば、ユーザは性能低下を感じないと考えられる。そのため本研究では、伸張処理に必要なワーク領域がキャッシュメモリのサイズを超えるような低速な符号化方式を除き、関連研究では採用していないハフマン符号等の比較的低速な符号も含めてより多くの軽量な符号化方式を採用したうえで、圧縮対象のテーブルに応じて使用する方式を選択することにより、伸張性能と圧縮率を高めることを検討する。

4.3.3 目標

以上をふまえ、本研究の目標を以下に記載する。ストレージからデータをリードする性能を d_s [MB/sec]、圧縮前のデータサイズを s_u [MB]、圧縮後のデータサイズを s_c [MB]、圧縮率 r を $1 - s_c / s_u$ とする。また、圧縮データの伸張時間を t [sec] としたとき、伸張性能 d_c を s_u / t [MB/sec] とする。この時、データを圧縮しない場合のリード時間は式(4-1)になる。

$$t_u = \frac{s_u}{d_s} \quad (4-1)$$

一方、データを圧縮した場合のリード時間は、伸張時間を含めると式(4-2)になる。

$$t_c = (1-r) \frac{s_u}{d_s} + \frac{s_u}{d_c} \quad (4-2)$$

ユーザにナビ性能の低下を感じさせないため、 t_c が数百ミリ秒を超えるような場合は t_u と t_c を同程度にしつつ、一般的な圧縮方式と同等以上の圧縮率 r の達成を目標とする。な

お、一般的な圧縮方式として、OSS の汎用圧縮ライブラリである Zlib (deflate) [15]との比較を行う。

4.4 提案方式

4.4.1 提案する列指向データ圧縮方式の概要

本項では、提案方式の詳細を述べる。まず、提案方式による圧縮データの構造を図 4-3 に示す。図の左側は提案方式が対象とする入力データ（圧縮前のデータ）の構造と圧縮処理の流れを示しており、図の右側は圧縮後のデータ構造を示している。提案方式は、固定長のレコード (1 レコードのサイズを N バイトとする) が並んだデータを対象とするものであり、入力データ全体を複数のブロックに分割してブロック毎に圧縮を行う。各ブロックは M 個のレコードを含んでおり、 M の値はシステムが使用する SoC のキャッシュ仕様を考慮して決定する (4.4.2 項で詳細を述べる)。

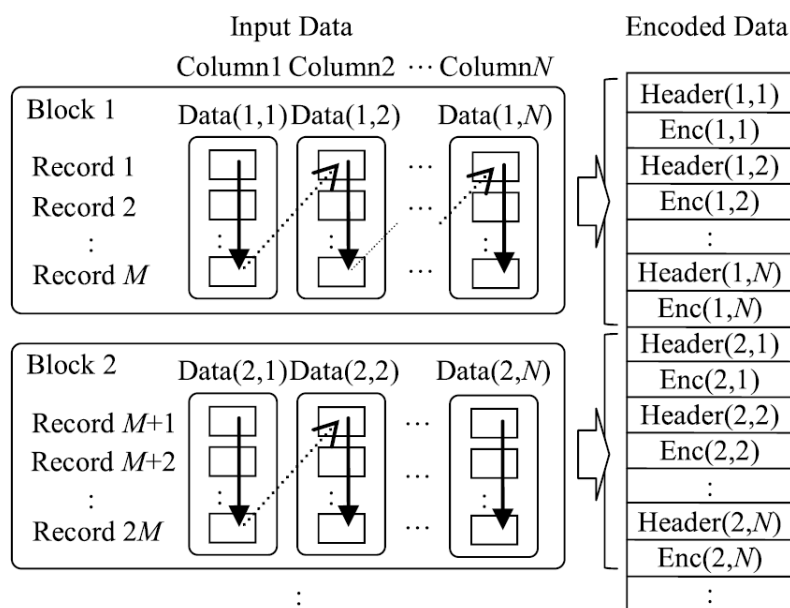


図 4-3 提案する列指向データ圧縮方式のデータ構造

各ブロック内では、レコードを構成する各バイトデータを列として考え、列毎に符号化を行う。例えばブロック 1 の列 1 の符号化では、各レコードの 1 バイト目の値を、レコード 1 から M の順に参照して符号化する。図では、この入力データを **Data**(ブロック番号,列番号)、これを符号化したデータを **Enc**(ブロック番号,列番号)と表記している。この符号化を

行う際に使用する方式は、複数の符号化方式の中から、圧縮後のサイズが最も小さくなる方式を選択して行う（4.4.3 項で詳細を述べる）。選択された符号化方式は列毎のヘッダ領域（Header）に格納する。各ヘッダは1バイトであり、そのうち4ビットを符号化方式の識別子として、残り4ビットを方式毎のパラメータとして使用する。

復号処理は上記と逆の手順となる。すなわち、圧縮後のデータに対し、ヘッダ1バイトをリードして符号化方式を特定し、ヘッダ以降に続く圧縮データから M バイトを復号する処理を繰り返す。

4.4.2 伸長時のキャッシュレイアウト

上記手順のうち、各ブロックに含まれるレコード数 M の値について述べる。列指向で圧縮されたデータの伸張を高速に行うため、PAX を参考に入出力データや復号用ワーク領域を考慮したキャッシュのデータ配置を考える。

提案方式は、近年の一般的な方式であるセットアソシアティブによるキャッシュを対象とする。表 4-1 にセットアソシアティブ方式のパラメータを示す。なお、以降ではウェイ数 w を4以上とし、このうち入力データが使用するウェイ数を w_s 、出力データが使用するウェイ数を w_d 、復号用ワーク領域が使用するウェイ数を w_t とする。

表 4-1 セットアソシアティブ方式パラメータ

項目	パラメータ
ラインサイズ	2^b [byte] (オフセットサイズ: b [bit])
エントリ数	2^a (インデックスサイズ: a [bit])
ウェイ数	$w (\geq 4)$
置換方式	LRU または FIFO

表 4-1 に示すパラメータの場合、サイズ 2^{a+b} ごとのメモリ空間で同じエントリを利用できるのは w 個である。そのため $w \times 2^{a+b}$ より広い範囲で等間隔にメモリを参照する処理を繰り返すとキャッシュミスヒットが発生し始め、 $2w \times 2^{a+b}$ を超えるとキャッシュを完全に外すことになる。

一方、圧縮データを列毎に分割されたデータに復号後、これをレコード順に並んだデータに復元する処理は、基本的に以下となる。ここで配列 src および $dest$ はそれぞれ列毎のデータ（入力データ）、およびレコード順に並んだデータ（出力データ）の格納領域であり、

変数 t および u の初期値は 0 である。

```

for  $i := 1$  to  $N$  step 1 do
   $u := i$ ;
  for  $j := 1$  to  $M$  step 1 do
     $dest[u] := src[t]$ ;
     $t := t + 1$ ;  $u := u + N$ ;

```

上記の処理はサイズ $M \times N$ のメモリ空間において等間隔でメモリを参照するため、キャッシュミスヒットを回避するためには式(4-3)が成立する必要がある。

$$M \cdot N \leq w_d \cdot 2^{a+b} \quad (4-3)$$

次に式(4-3)における w_d について考察する。上記処理の内側ループにおいて出力データ格納領域に相当するすべてのラインが参照される一方、入力データは 1 バイトずつリードされ、リード済の入力データを格納しているラインはその後参照されない。よって置換方式が LRU の場合は、新たな入力データを DRAM からリードする際に置き換わるラインは既にリード済の入力データであり、 w_s は基本的に 1 になる。一方、置換方式が FIFO の場合、出力データ格納領域の参照アドレスが等間隔になっており使用エントリが分散されるため、出力データ格納領域が置き換え対象になることが多い。そのため、 w_t が 1 以上の場合において w_d を 2 以上とすると、1 ウェイ分の入力データのリード後は出力データ格納領域のスラッシングが発生する可能性があるため、 $w_d = 1$ となるように M を設定する必要がある。以上から、式(4-3)はキャッシュの置換方式に応じて式(4-4)または式(4-5)になる。

$$M \leq \frac{1}{N} (w - 1 - w_t) 2^{a+b} \quad (\text{LRU の場合}) \quad (4-4)$$

$$M \leq \frac{1}{N} 2^{a+b} \quad (\text{FIFO の場合}) \quad (4-5)$$

上記のように M を制限した場合における、キャッシュ上のデータ配置を図 4-4 に示す。図は 4 ウェイセットアソシアティブ (ラインサイズ 16 バイト, 256 エントリ, 置換方式

LRU) のキャッシュで、1 レコード 16 バイトのデータを処理する場合の例である。提案方式では、ワーク領域 (work area) が 1 ウェイ相当の空間を超えない符号化方式のみを利用することとし、1 ウェイを入力データのリード用 (src), 残りを出力データのライト用 (dest) と考える。

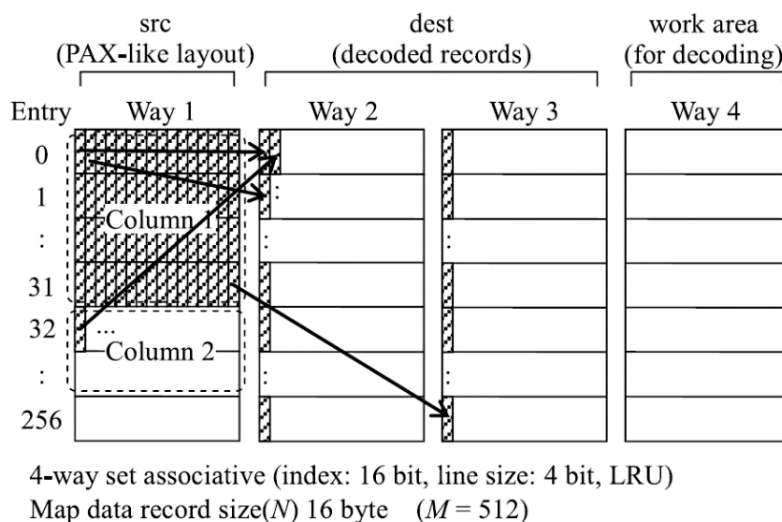


図 4-4 提案方式におけるキャッシュ上のデータ配置

4.4.3 軽量符号化方式の組合せ

次に、複数の符号化方式を用いて各列のデータを符号化する処理について述べる。符号化に際しては、提案方式のように列毎の特徴を利用する場合、圧縮率を上げるためには各列の記号の確率分布などのモデルを事前に用意することが有効である。しかしその場合、伸張時にモデルをキャッシュに読み込む時間が必要になり、また伸張後のデータによってキャッシュ上のモデルが上書きされた場合にキャッシュミスヒットが発生する。そのため提案方式では、事前のモデルを必要とせず、かつワーク領域が 1 ウェイ相当の空間を越えない軽量な符号化方式のみを使用するものとし、以降で述べる複数の符号化方式のうち、圧縮後のサイズが最も小さくなる符号化方式を選択する。なお、いずれの方式も圧縮前よりサイズが小さくならない場合、圧縮せずにデータを格納する。

表 4-2 は、本研究で想定する列毎の特性と、それぞれの特性に対して効果的と考えられる符号化方式を記載したものである。列の特性は、同一記号の連続性、出現する記号数、記号の出現頻度に関する確率分布の有無、および頻出記号の有無の 4 つの観点で分類している。各符号化方式の概要は以下である (括弧内は以降で用いる各符号の表記である)。

表 4-2 列の特性と対応する符号化方式

連続性	記号数	分布	頻出	対応方式
あり	—	—	—	ランレングス符号
なし	少ない	—	—	固定長符号
		あり	—	アルファ/ライス符号
	多い	なし	あり	エスケープ符号
		なし	なし	最小冗長符号 (CHC)

(1) ランレングス符号 (RLE)

同一記号の繰り返しを記号と長さの組で置換する。

(2) 固定長符号 (FF)

各記号に固定長の符号を割り当てる。出現する記号の数を x としたとき、1つの記号の符号長は $\text{ceil}(\log x)$ となる。本方式は x が 16 以下の場合のみ有効となる。

(3) アルファ符号 (unary, 単進符号) (A)

記号が意味する整数値を「0」の個数で表現し、区切りに「1」を出力する。例えば「123」は「010010001」となる。記号の出現頻度に小さい数値を中心にした確率分布がある場合に有効である。

(4) ライス符号[122] (RICE)

記号が意味する整数値を 2^k で割った商 p と剰余 q を求め、 p のアルファ符号と q の下位 k ビットを出力する。例えば $k=2$ の場合の「4」は、 p のアルファ符号「01」と q の下位 k ビット「00」を結合した「0100」になる。アルファ符号と同様に出現頻度に小さい数値を中心にした確率分布がある場合に有効であり、 k を大きくすると分布が緩やかになる。提案方式では列毎に k を 1 から 8 の範囲で変化させ、圧縮後のサイズが最も小さくなる k を採用する。

(5) エスケープ符号 (ESC)

最頻出記号を「0」で符号化し、それ以外の記号はエスケープとして「1」を出力し、続けて記号の 8 ビット値をそのまま出力する。特定の記号が頻出し、かつ他の記号も数回出現するような列用に用意する。

(6) Canonical Huffman Code[123] (CHC)

特に特性がない場合はハフマン符号 (最小冗長符号) を用いる。なお、通常のハフマン符

号はハフマン木用のワーク領域が必要になるため、ハフマン木を用いずに表引きのみで処理可能な **Canonical Huffman Code** を用いる。

また、上記の符号化方式に対して、以下の処理を組み合わせる符号化を行う。

(7) 差分符号

記号を数値と考え、隣接する記号間の差分を符号化する。差分を計算することで表 4-2 に記載した特性が現れる列に有効と考えられる。

(8) 記号表

記号の一覧（記号表）を出現頻度順に出力した上で表内のインデックスを符号化する。圧縮データに記号表を含むため、出現記号の数が少ない場合に有効と考えられる。

表 4-3 に提案方式で使用する符号化の一覧を記載する。表において「○」は提案方式で使用することを示し、「－」はその組合せはないことを示している。例えば固定長符号 (FF) と CHC は記号表を必ず出力する。「×」は、組合せとしてはありうるが、本研究で評価の対象としたデータでは大きな効果がなかったため、コードサイズを削減するため使用していないことを意味する。

表 4-3 提案方式で使用する符号化方式

符号化方式	組合せ方式 (表記)		
	なし	差分符号	記号表
ランレングス符号	○(RLE1)	×	×
固定長符号	－	×	○(FF3)
エスケープ符号	○(ESC1)	○(ESC2)	○(ESC3)
アルファ符号	×	○(A2)	○(A3)
ライス符号	×	×	○(RICE3)
CHC	－	×	○(CHC3)
非圧縮	○(COPY)	－	－

さらに、以上の符号化方式から圧縮後のサイズが最も小さくなる方式を選択する際、圧縮対象のテーブルに応じて高速な符号化方式のみを使用するか、低速な符号化方式も併用するかを使い分ける。どちらとするかは、アプリケーションが対象テーブルからデータをリードする際の最大リードサイズを基準にして、手動で設定する。

この基準とする最大リードサイズの値については、以下のように考える。圧縮データリー

ド時間の最小値 $\min(t_c)$ が 100 ミリ秒を越える場合、可能な限りナビ性能の低下を感じさせないため、伸張性能を重視して高速な符号化方式のみを用いる。一方、 $\min(t_c)$ が 100 ミリ秒以下となる場合は、低速な符号化方式も併用して圧縮率の向上を図る。式(4-2)において t_c は $r = 1$ 、かつ d_c が最大の場合に最小となるため、 d_c がストレージリード性能 d_s を超えることは困難であると仮定すると、 $\min(t_c) = s_u / d_s$ である。よって、圧縮前のデータサイズ $s_u \geq d_s \times 0.1$ [sec] となる場合は高速な符号化方式のみを使用し、それ以外は低速な符号化方式も併用して圧縮を行う。なお、提案方式ではバイト単位のデータ処理で実装可能な RLE1, FF3 (および COPY) を高速な符号化方式とする。

4.5 評価

提案手法をカーナビに実装し、地図データの中でも特にデータサイズが大きく、かつ固定長レコードの並びで構成されている 2 種類のデータに対して性能評価を行った。表 4-4 に評価に用いたシステムの仕様を記載する。

表 4-4 評価環境のシステムの仕様

項目		仕様
SoC		ルネサス社製 SH4 (R8A77710BDA01BGV)
キャッシュ	方式	4-way set associative
	ラインサイズ	32byte (オフセット 5bit)
	エントリ数	256 (インデックス 8bit)
	置換方式	LRU
ストレージ(HDD)		東芝製 MK4050GAC

表 4-5 に評価に使用したデータを記載する。データ A は音声認識用のデータであり、認識可能な単語の辞書や音素の並び等を格納している。このデータは音声認識の文法を記載した入力ファイルを音声認識機能のベンダが提供するツールでコンパイルしたものであり、コンパイル後のデータはデータベースのような明示的な列を持っているわけではない。しかし、4 バイト毎や 16 バイト毎に 1 バイトの値の列が複数ある構造として見た時、先頭バイトは常に同じ値、第 2 バイトは数種類の値しか出現しないなど、同じ値が出現する頻度が高いデータになっている。これを 16 バイトの固定長レコードの並びとして評価を行った。データ B は施設検索用のデータであり、ユーザが入力した名称に該当する施設の一覧を格

納している。データの構造は 24 バイトのレコードの並びになっており、各レコードには、施設が存在する地域やレストラン等の施設の種別を示すコード、施設名称や電話番号等の実データの格納位置を示す情報等が所定のフォーマットで格納されている。このデータを作成する際、カーナビでの検索処理を高速化するために同じコードを持つレコードはなるべく纏めて配置するなどの処理を行うため、データを列方向に見たときに同じ値が並ぶことが多いという特徴が存在する。なお、音声認識用データおよび施設検索性データには、実際のカーナビの地図データ内に存在する複数のファイルの中から、ファイルサイズ（格納しているレコード数）が最大のファイルを使用した。

表 4-5 評価用テストデータ

データ	ファイル サイズ [byte]	N [byte]	最大リード サイズ [KB]	備考
A	147,931,135	16	65,536	音声認識データ
B	42,916,896	24	468	施設検索性データ

また、予備評価として、評価環境のストレージから上記データをリードした時間 (t_u) を測定した結果を表 4-6 に示す。なおストレージは HDD であり、HDD の設定やリード処理の入出力単位等は以降の評価でも同様である。

表 4-6 ストレージリード時間 (t_u)

データ	リード時間(t_u) [msec]	リード性能(d_s) [MB/sec]
A	6,073	23.23
B	1,670	24.50

4.5.1 圧縮データリード性能

まず、提案方式による圧縮率と伸張性能、および評価環境における圧縮データリード性能の評価結果を示す。評価に際し、データ A は一度にリードするサイズが最大 64 [MB] であり、 $d_s \times 0.1$ [sec] = 2.323 [MB] を超えるため、高速な符号化方式 (RLE1, FF3, COPY) のみを用いて圧縮を行った。一方、データ B は、一度にリードするサイズが最大 468 [KB] であり、 $d_s \times 0.1$ [sec] = 2.450 [MB] 以下であるため、低速な符号化方式も併用して表 4-3 に記載したすべての符号化方式を用いて圧縮を行った。また、いずれの場合も復号用ワーク領域

$w_t = 1$ と考え、ブロック内のレコード数 M は、式(4-4)から $M = 1,024$ (データ A) および $M = 682$ (データ B) とした。

$$M \leq \frac{1}{16}(4 - 1 - 1)2^{8+5} = 1024 \quad (\text{データ A})$$

$$M \leq \frac{1}{24}(4 - 1 - 1)2^{8+5} = 682.66\dots \quad (\text{データ B})$$

表 4-7 と図 4-5 に圧縮率と伸張性能の評価結果を記載する。データ A は、Zlib とほぼ同様の圧縮率で約 8 倍の伸張性能になった。データ B は圧縮率と伸張性能のいずれも Zlib を上回ったが伸張性能は Zlib の約 2 倍に留まった。

表 4-7 圧縮サイズと伸張時間

データ	提案方式		Zlib	
	圧縮サイズ [byte]	伸張時間 [msec]	圧縮サイズ [byte]	伸張時間 [msec]
A	68,006,979	2,460	60,725,032	20,063
B	7,257,963	1,920	9,968,208	3,970

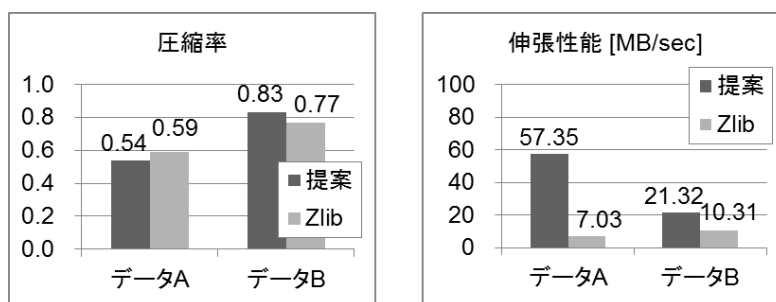


図 4-5 圧縮率と伸張性能

表 4-8 は、それぞれの方式による圧縮データをリードした時間 (t_r) を測定した結果である。この時間にはリード処理に伴う各種のオーバーヘッドも含まれている。この結果と、非圧縮時のリード性能 (表 4-6) を比較した結果を図 4-6 に示す。データ A について、提案方式は非圧縮時とほぼ同等の性能になった。データ B については、提案方式でも非圧縮時

の性能に及んでいないが、1回のリードサイズが最大でも468 [KB]であるため画面表示に要する時間の増加は最大 $468 \div 16.84 = \text{約 } 28$ ミリ秒程度であり、ナビ性能の低下を感じるほどではないと思われる。以上の結果から、データAとBについては、提案方式は4.3.3項の目標を達成していると言える。

表 4-8 圧縮データリード時間 (t_c)

データ	提案方式		Zlib	
	リード時間 (t_c) [msec]	リード性能 [MB/sec]	リード時間 (t_c) [msec]	リード性能 [MB/sec]
A	6,330	22.29	24,323	5.80
B	2,430	16.84	4,870	8.40

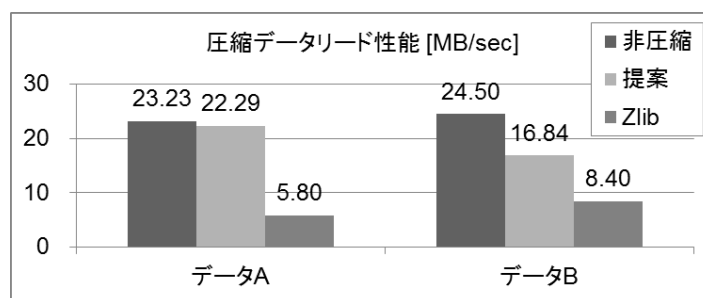


図 4-6 圧縮データリード性能の比較

4.5.2 キャッシュレイアウトの効果

以降、4.4節で述べた手法の効果を確認する。まず、4.4.2項の検討結果について、ブロック内のレコード数 M が式(4-4)を満たさないと性能低下することを確認する。この確認を行うため、データAをRLE1で圧縮したデータを用いて、レコード数 M と伸張性能の関係を測定した。

レコード数 M について、RLE1はワーク領域をほとんど必要としないため $w_t = 0$ として考えると、表4-4に示したキャッシュを用いて1レコード16バイトのデータを圧縮する際の M の上限は、式(4-4)から1,536である。この値の近辺における伸張性能の変化を確認するため $M = 896$ から2,048の範囲で測定を実施した。また、レコード数上限を考慮しない場合の性能として、キャッシュを完全に外す $M = 4,096$ の場合を測定した。表4-9と図4-7に結果を示す。

表 4-9 レコード数 M と性能測定結果

M	伸張時間 [msec]	圧縮後サイズ [byte]
896	6,353	83,520,108
1024	6,540	83,478,748
1152	6,643	83,497,460
1280	6,633	83,479,296
1408	6,736	83,466,156
1536	6,783	83,457,816
1664	7,166	83,465,340
1792	7,320	83,457,740
1920	7,903	83,464,940
2048	8,276	83,435,688
:	:	:
4096	31,356	83,127,464

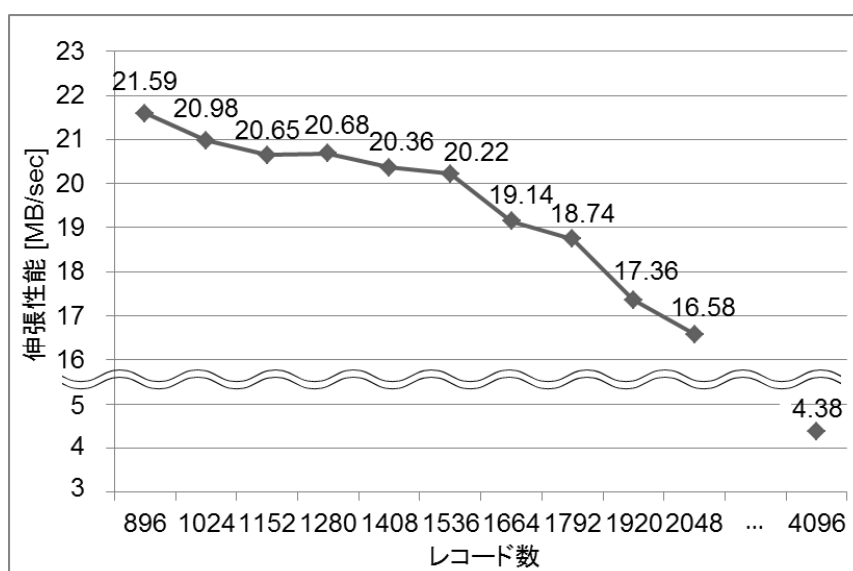


図 4-7 レコード数 M と伸張性能

図 4-7 が示すように、レコード数 M の増加に応じて伸張性能が低下し、特に $M=1,536$ を超えた時点から性能低下が著しくなる。 $M=4,096$ の場合は、 $M=1,536$ の場合と比較し

て約 4.6 倍の伸張時間になった。なお、 $M = 1,536$ 未満の範囲においても M に応じて性能が低下している。伸張以外の処理によってキャッシュの置き換えが発生しているためと思われるため、 M は式(4-4)を上限として、圧縮率に影響を与えない範囲で可能な限り小さくしたほうが良いといえる。

なお、本来は 4.5.1 項と同様の条件で、 $w_t = 1$ として、データ A およびデータ B に対してそれぞれ $M=1,024$ (データ A) および $M=682$ (データ B) を超えた時点から伸張性能が低下することを確認すべきであるが、本研究では実施できていない。この理由は、4.4.2 項の検討結果 (式(4-4)) はキャッシュのウェイ毎に入出力データ格納領域と復号用ワーク領域を使い分ける前提で検討した結果である一方、ソフトウェアでキャッシュをそのように完全に制御することは困難だったためである。復号用ワーク領域として使用することを想定したウェイも入出力データの格納に使用されうるため、 M の値は使用する符号化方式 (復号用ワーク領域の実際の使用サイズ) によって変動する。そのため、本研究では $w_t = 0$ として考えられる条件で測定を行った。

4.5.3 軽量符号化方式の組合せの効果

次に 4.4.3 項の検討結果について確認する。表 4-10 は、データ A を処理する際に各符号化方式で処理したサイズ、圧縮後のサイズ、および伸張時間を測定した結果である。なお、処理したサイズが大きいほど、その方式が圧縮率の向上に有効であったことを意味する。たとえば表 4-10 の 1 行目は、約 51 [MB] のデータに対して RLE1 が選択されて圧縮サイズが約 25 [MB] になり、伸張に 973 ミリ秒を要したことを意味する。表 4-10 の 3 行目が示すように圧縮効果が無かったデータ (COPY) が多くあり、圧縮率が Zlib と同程度に留まった要因になっている。また、図 4-8 は、表 4-10 の測定結果をもとに計算した各符号化方式の圧縮率および伸張性能を示したものである。RLE1 と FF3 の両方とも高い伸張性能を示している。また、FF3 の圧縮率が高く、圧縮データのリード時間が短縮されたことが伸張性能向上に寄与している。つまり提案方式の性能は各列で出現する記号数に大きく依存する。

表 4-10 データ A に対する測定結果

方式	処理サイズ [byte]	圧縮サイズ [byte]	伸張時間 [msec]
RLE1	51,955,712	25,219,144	973
FF3	64,608,256	11,420,667	1076
COPY	31,367,168	31,367,168	410

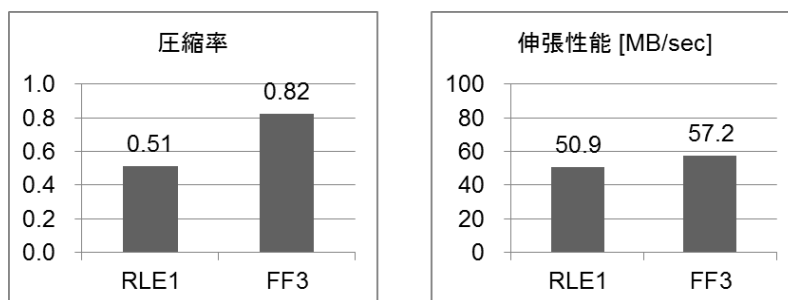


図 4-8 各符号化方式の性能比較 (データ A)

表 4-11 は、データ B の場合の測定結果である。また、図 4-9 は、表 4-11 の測定結果をもとに計算した圧縮率および伸張性能を示したものである。RLE1 および FF3 とそれ以外の方式で伸張性能に大きな差がある。この理由は、RLE1 と FF3 はバイト単位のデータ処理で実装しているのに対し、その他の方式はビット単位のデータ処理を行っているためと思われる。

表 4-11 データ B に対する測定結果

方式	処理サイズ [byte]	圧縮サイズ [byte]	伸張時間 [msec]
RLE1	1,185,998	153,301	30
FF3	27,367,978	79,018	390
ESC1	51,150	43,142	10
ESC2	3,862,166	2,576,437	333
ESC3	1,829,806	388,560	110
A1	929,566	235,138	146
A2	2,671,394	547,213	240
RICE3	1,376,958	1,219,984	243
CHC	2,758,690	1,131,980	350
COPY	883,190	883,190	16

以上の結果から、RLE1 および FF3 では圧縮効果がないデータ、すなわち表 4-2 に記載した連続性や記号数の特徴を持つ列が少ないデータに対して、本研究で評価した符号化方式は圧縮率の観点では有効だが伸張性能は十分とは言えない。この点について、たとえば施

設検索用データでは一般的に施設の種別や地域を示す値が同一のレコードが連続する等の
 特長を有するため目標を達成しているが、より多様なデータに対応するためには、高速かつ
 ワーク領域が1ウェイに収まる別の符号化方式が必要になる。

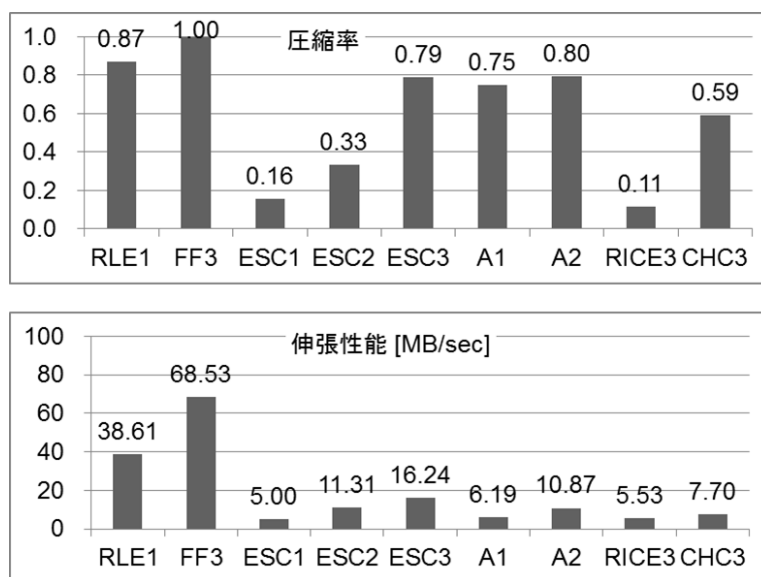


図 4-9 各符号化方式の性能比較 (データ B)

4.6 結語

本章では、地図更新を容易化するための取り組みの一環として、カーナビのストレージに格納している地図データの圧縮方式について述べた。圧縮データの伸張処理によるナビ性能低下をユーザが感じないように、列指向データ圧縮をベースにキャッシュの効率化と複数の軽量な符号化方式を利用することで、Zlib 相当の圧縮率と非圧縮時同等のリード性能の実現を図った。提案方式を実装して評価した結果、特定のデータに対する上記性能の実現性を確認した。

今後、カーナビはスマートフォンや通信ユニットを介してネットワークに常時接続する動きが進むと考えられる。地理空間情報の配信に関しては、引き続き、データ更新に必要なストレージ容量や通信サイズを削減しつつ、地図自動更新等、常時接続環境を活かした配信手法の実現が必要である。

第5章 複数の地理空間情報間の位置参照精度向上

5.1 緒言

2.6.3 項では、異なる地理空間情報を用いるシステムの間で位置情報を正確に伝達するためには、地図上の位置を示す共通の ID を整備したり、位置の座標や属性等をもとに類似地点を推定したりする必要があることを述べた。特に自律動作可能なモビリティの適用範囲を一般道や細街路に拡大する場合、前者の ID を整備する方式はコストの問題があるため、後者の類似地点を推定する方式が重要であることを述べた。本章では、この課題に対し、カーナビと自動運転システムの連携を対象にして、一方のシステムで作成した経路を他方のシステムでの経路に変換する際の経路の一致率を改善するとともに、変換前後の経路の形状の差異を確認することによって経路の一致を自動判定する方式を論じる。

近年、カーナビと自動運転システムの連携が進みつつある。例えば、カーナビで設定した経路に沿って自動で走行し、目的地まで自動でユーザを案内するシステムの実現が求められている。このようなシステムを実現するため、カーナビの経路情報を自動運転システムに伝達する方式について述べる。

図 5-1 に本研究で対象とするアプリケーションの概要を示す。図は、ユーザからの目的地の入力を受けて、ナビゲーション用の地図データ（以降、カーナビ用地図）を参照して経路を計算し、それを自動運転用の高精度地図上の経路に変換し、この経路と高精度地図を参照して自動運転の進行方向を制御する一連の流れを記載したものである。カーナビ用地図は基本的に経路を計算して運転者を案内するためのデータである一方、高精度地図は車両の制御のためのデータであり経路計算用のデータは含まれないため、カーナビの経路に沿って自動運転を行うためには上記のような経路の変換処理が必要になる。

カーナビ用地図と高精度地図は、どちらも道路を複数のリンクで表現しており、各リンクには ID が振られている。但し双方の地図データで ID に関連性は無く、同じ道路を表現する ID が同一とは限らない。経路はリンクの ID の並びで表現されており、図は、カーナビ用地図上の Link 1, Link 3 で示される経路が、高精度地図上の Link 3, Link 1, Link 2 を含む経路に変換される様子を示している。

上記の変換処理は、双方の地図データに何も差異がなければ問題はない。しかし、地図会社毎に地図の整備仕様（道路の採択基準や、道路に付与する属性、形状等）は異なり、また整備時期によって道路の状況も変わるため、一般的に異なる地図データには何らかの差異が存在する。図 5-2 に、整備時期が異なる 2 つの地図データにおける差異の例を示す。図

の左側は整備時期が新しい地図であり、図の右側は古い地図である。双方の地図データは、道路の形状が異なる場所や、一方には存在しない道路が新設されている場所がある。このような差異が原因でリンクの選択を誤るとカーナビの経路とは異なる方向に車両が進行する可能性があるため、この変換を正確に行うことが重要となる。

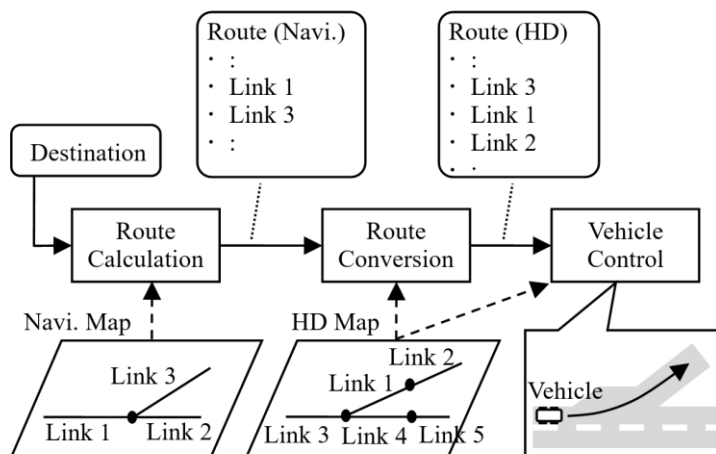


図 5-1 カーナビから自動運転システムへの経路情報の伝達

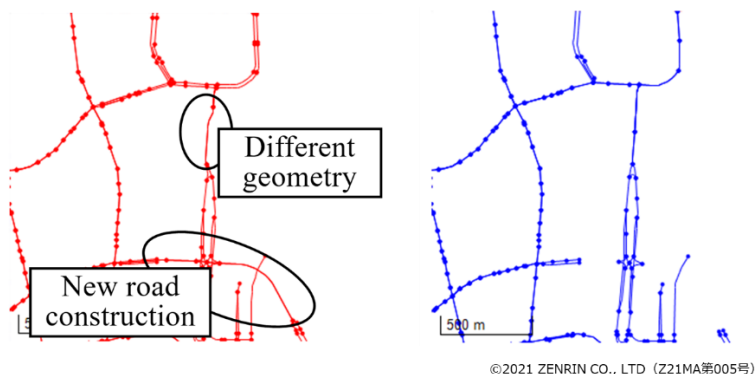


図 5-2 地図データの差異の例

本章では、2.5.2 項で述べた Dynamic Location Referencing (以降、DLR) の 1 つである OpenLR におけるライン方位角のビット長拡大と最短経路選択処理に起因する誤りの削減により変換前後の経路の一致率を向上する方式について述べる。また、変換前後の経路の形状を一定の基準で比較することにより一致を自動判定する手法を提案する。従来の位置参照方式では交通情報配信を対象に一致率 95%程度が目標とされているが、上記アプリケーションでは誤変換は安全に関わるため、一致率および一致判定の正解率を 100%に近付けることを目標とする。

5.2 関連研究

5.2.1 Pre-coded Location Referencing

地図データには5.1節に記載したような差異があるため、ある地図データ上での位置（対象の交差点や経路等）を緯度経度のような絶対座標を用いて伝達すると、受け手の地図データ上では誤った交差点や経路を示す可能性がある。この誤りを抑止し、異なる地図データを用いるシステム間で正確に位置を伝達する技術を位置参照方式と呼ぶ。

位置参照方式は、2.5.2項で述べたように、大きく Pre-coded Location Referencing と Dynamic Location Referencing（以降、DLR）に分けられる。前者は、地図データを構成するリンク等に共通のIDを付与する方式であり、VICS、RDS-TMC等が実用化されている。この方式は正確に位置を示すことが可能な一方、道路の新設等、地図が変化した際にIDを整備するコストの問題がある。そのため近年では、経年変化が少ない交差点等の地点にIDを振り、その地点からの相対的な道程を用いて位置を示す区間ID方式[124]の標準化とID整備が進められている。また、高精度地図での利用を想定して、レーンレベルでの位置参照を可能とする方式についても研究が行われている[125]。

5.2.2 Dynamic Location Referencing

一方のDLRは、位置情報を送信する側の地図データ上での座標や属性をもとに受信側の地図データ上で類似する地点を推定する方式であり、これまでにAGORA-C[91]、OpenLR[14]が実用化されている。DLRはIDの管理が不要である一方、送信側の地図データ上での位置と、受信側の地図上で推定した位置の一致率が地図データの差異に応じて低下するという問題がある。欧州プロジェクトROSSATE（2008～2010）において各国地図を用いて行った評価では、AGORA-CやOpenLRの一致率は使用する地図データに応じて60%から90%程度とされている[126]。近年では、OpenLRが少ない通信量で正確な位置を伝達することを目標としているのに対し、道路の形状データも受信側へ送信する前提で、地図の形状マッチングにより一致率を高める研究がなされている[127]。この結果では、特定の地図の組み合わせにおいて一致率99.7%を達成している。また、一致率に加えて、文献[128]では、DLRの結果の正誤は人間が地図を見ないと判断が難しく、自動で評価を行う仕組みが必要という問題に言及している。

DLRについてはROSSATEの後継プロジェクトであるTN-ITS（2013/6～）[129]等で継

続検討されているが、任意の地図の組合せに対して一致率 100%を達成する方式や自動評価の仕組みは実現されていない。

5.3 課題

5.3.1 前提システム

以上の関連研究をふまえ、本研究で前提とするシステムと課題を述べる。まず、カーナビで経路を設定して自動運転を行うためのアプローチとして、経路計算をカーナビ用地図と高精度地図のどちらを参照して行うかという観点があり、本研究ではカーナビ用地図を用いて計算した経路を高精度地図上に変換するアプローチを取る。高精度地図を用いて経路を計算するアプローチもあるが、経路計算に必要な各リンクのコスト値や規制情報（時間/曜日規制，車両規制等）は必ずしもレーンレベルである必要はなく、一方で経路計算時間はノードが多いほど増加するためである。

図 5-3 は、カーナビ用地図上の経路を高精度地図上の経路に変換するアプローチを取った上で、カーナビ用地図と高精度地図の結合度の観点でシステムを分類したものである。図の(a)は、双方の地図が密に結合しているケースであり、各地図を同一の地図会社が同時期に整備する場合を想定したものである。この場合、カーナビ用地図の各リンクと高精度地図のレーン情報の対応関係が明確なため、位置参照を行わなくても経路を正確に変換できる。2.3.3 項で述べた **NDS Association** で標準化されているデータ形式では、この方式をサポートしている。(b)は、双方の地図が疎結合のケースであり、各地図を異なる地図会社が提供する場合を想定したものである。この場合、カーナビ用地図の各リンクと高精度地図のレーン情報の対応関係が明確ではないため、**DLR** を行ってカーナビ用地図上の経路を高精度地図上の経路に変換する必要がある。(c)は、前述した **VICS** や区間 **ID** 方式のように、地図上の地点に付与された共通の **ID** を介して各地図を結合する方式であり、各地図を同一の地図会社が提供するが、整備時期が異なる場合を想定したものである（付与する **ID** が標準化されている場合は異なる会社から提供される場合も含む）。この場合、共通の **ID** を基準にして経路を変換することが可能だが、適用可能な範囲は **ID** を整備済の地域に限定される。

上記の分類に対し、(a)、(c)に関しては基本的には地図開発時に双方の地図を結合可能である。ただし、(a)に関しては同一の地図会社でも各地図を整備するサイクルや作成部門が異なる場合は実現が難しく、また(c)に関しては **ID** を整備するためのコストの問題がある。そこで本研究では、**ID** が整備されていない地域を対象に(b)の場合の解決方法を提案する。(b)に関しては、それぞれの地図会社から提供された地図を結合してから車両に配信するこ

とも考えられるが、そのようにすると数ヶ月ほど地図のリリースが遅れるため、本研究では疎結合のまま最新地図をカーナビに配信し、経路の変換が必要になった際にカーナビ上で動的に結合するシステムを前提として検討を行う。

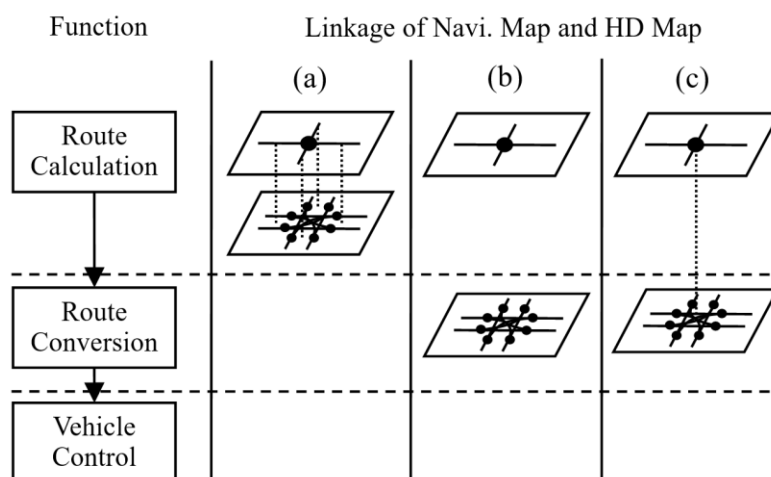


図 5-3 カーナビ用地図と高精度地図の結合度の分類

5.3.2 課題

上記(b)の場合、DLR を行ってカーナビ用地図上の経路を高精度地図上の経路に変換する。そのため、双方の地図データに 5.1 節で記載したような差異が多数存在すると DLR の一致率は低下する。この問題に対し、任意の地図の組合せに対して一致率 100%を達成することは困難なため、本研究では以下の 2 つのアプローチで検討を行う。

(1) DLR の一致率向上

一致率の低下要因には、地図データの整備仕様や整備時期の差異に起因するものと、DLR のロジックに起因するものがあると考えられる。そこでまず、整備仕様と整備時期が同一の地図を対象にして、仕様およびサンプル実装が公開されている OpenLR をベースに、OpenLR のロジック上の問題を改善することにより一致率を向上する。

(2) 変換前後の経路の一致判定

整備仕様や整備時期の差異による一致率の低下に対しては、一致率 100%を達成することは困難である。そこで本研究では、整備仕様や整備時期が異なる場合に双方の地図データに起こりうる基本的な変化をふまえて一定の基準を定義し、この基準に従って変換前後の経路の形状を比較することにより一致を自動で判定することを図る。

5.3.3 目標

以上をふまえ本研究の目標を記載する。目標の定義に際し、まず変換結果を表 5-1 のように分類する。これは、位置参照の成否（高精度地図上の経路に変換できたか）、プログラムによる一致判定の結果、および実際の結果（人間による目視確認結果）の観点で変換結果を分類したものである。

表 5-1 経路の変換結果の定義

分類	位置参照	一致判定結果	実際の結果
A	成功	一致	一致
B			不一致
C		不一致	不一致
D			一致
E	失敗	対応する道路なし	道路なし
F			道路あり
G		対応する道路の有無不明	道路あり
H			道路なし

表 5-1 の分類のうち、A は、位置参照が成功し、変換前後の経路を一致と判定し、目視確認でも一致している場合である。この場合は特に問題はない。一方 B は、一致と判定したが、この判定処理に誤りがあり実際には一致していない場合である。C は、不一致と判定し、実際に一致していない場合である。D は、不一致と判定したが、実際には一致している場合である。E から H は、DLR に失敗して、対応する経路が出力されない場合である。E と H は、対応する道路が実際にはない場合であり、別経路を探す処理は必要になるが位置参照方式としては問題ない。一方 F と G は対応する道路が実際には存在する場合である。

変換した経路の正誤をこのように分類した上で、カーナビで生成した経路の総数を S とし、その変換結果を表 5-1 に従って分類した数をそれぞれ $S_A, S_B \dots S_H$ とする。このとき課題(1)に関して、位置参照に成功した経路の総数に対する、位置参照が成功して実際に経路が一致している A と D の合計の比率を DLR の一致率 R_1 とする (式(5-1))。双方の地図データの整備仕様と整備時期が同一であればこの値を 100% に近付けることを目標とする。

$$R_1 = \frac{S_A + S_D}{S_A + S_B + S_C + S_D} \quad (5-1)$$

次に課題(2)に関して、一致判定の結果と実際の結果が合致している比率を一致判定の正解率 R_2 とする (式(5-2))。整備仕様と整備時期が異なる場合でもこの値を 100% に近付けることを目標とする。

$$R_2 = \frac{S_A + S_C + S_E + S_G}{S} \quad (5-2)$$

5.4 提案方式

5.4.1 提案する経路情報変換方式の概要

本節では、提案方式の詳細を述べる。図 5-4 は、カーナビ用地図上の経路を高精度地図上の経路に変換して、高精度地図と合わせて自動運転制御用の ECU に提供するシステムを示している。提案方式では、カーナビ用地図を用いて経路を計算後、OpenLR によって経路を変換する (5.4.2 項で詳細を述べる)。その後、変換前後の経路形状を一定の基準に従って比較して一致を確認する (5.4.3 項で詳細を述べる)。位置参照に成功し、かつ経路に不一致がなければ、経路を車両に送信する。

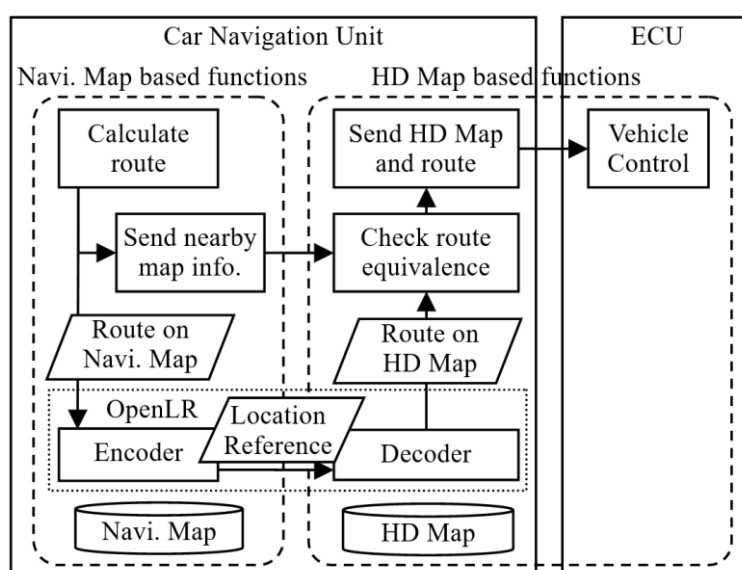


図 5-4 提案する経路情報変換方式の概要

なお、上記方式には、経路に不一致がある場合は自動運転を行えない問題や、高精度地図の情報を経路計算に反映できない問題が残っているが、本研究では検討できていない。前者について、不一致がある場合はカーナビ用地図と高精度地図の整備時期を比較して新しい地図上の経路を選択する方式も考えられるが、地図の整備サイクルに応じてカーナビ用地図のほうが新しい場所と高精度地図のほうが新しい場所の混在がありうるため、新旧を単純に比較することは難しい。後者については、高精度地図に含まれるレーンレベルの接続情報をカーナビ用地図に取り込む開発や、ダイナミックマップの情報（高精度地図と関連付けて保持される）を提案方式とは逆方向の位置参照を行って経路計算に反映する手段が必要になる。

5.4.2 DLR の一致率向上

上記手順のうち、OpenLR を用いて経路を変換する際の一致率向上について述べる。OpenLR は TomTom 社が開発した位置参照方式であり、最短経路計算を用いることでエンコーダとデコーダ間の通信サイズを大幅に削減可能にした方式である。OpenLR によって伝達したい経路（伝達経路）をエンコードおよびデコードする手順の概要を以下に記載する。図 5-5 に手順の実行例を記載する。

エンコード手順

- (1) 伝達経路の始点および終点に対応する LRP (Location Reference Point) を生成する。
- (2) 生成した 2 つの LRP 間の最短経路を計算する。
- (3) 上記の最短経路が伝達経路を含んでいなければ、差異がある地点に新たに LRP を生成して(2)に戻る。最短経路が伝達経路を含めば、生成した LRP を出力する。

デコード手順

- (1) LRP が示す座標の近傍に存在し、LRP が示す属性と類似する属性を持つリンクを候補として選択する。
- (2) 連続する 2 つの LRP に関して、選択されたリンク間の最短経路をそれぞれ計算する。
- (3) で計算したそれぞれの最短経路を連結した経路を位置参照結果として出力する。

表 5-2 に各 LRP に含まれる情報と、バイナリ形式で LRP を出力する際の各項目のサイズを示す。LRP に含まれる情報のうち、座標およびライン属性はデコード手順(1)において候補リンクを選択する際の指標として用いられる。ライン属性のうち、FRC は道路の機能レベル（高速道路、細街路等）を示す属性、FOW は道路の物理的な態様（本線、側線等）

を示す属性, BEAR はリンクの方位を示す属性である. 経路属性はデコード手順(2)で最短経路を計算する際の制約条件であり, LFR CNP は経路を構成する各リンクの FRC のうち最下位の値, DNP は経路の長さである. なお, OpenLR 仕様ではバイナリ形式の他に XML で出力することも可能で, その場合は表 5-2 に記載したデータサイズの制限はなくなる. 図 5-4 に示す構成では経路の変換 (LRP の伝達) はカーナビ内部で閉じて行われるため通信サイズは重視されないが, 高精度地図をカーナビとは別の装置に格納して, LRP を通信経路で伝達する構成も可能とするため, 本研究ではバイナリ形式を対象に検討した上で, 経路を正しく伝達するために必要な最小限の拡張を行う.

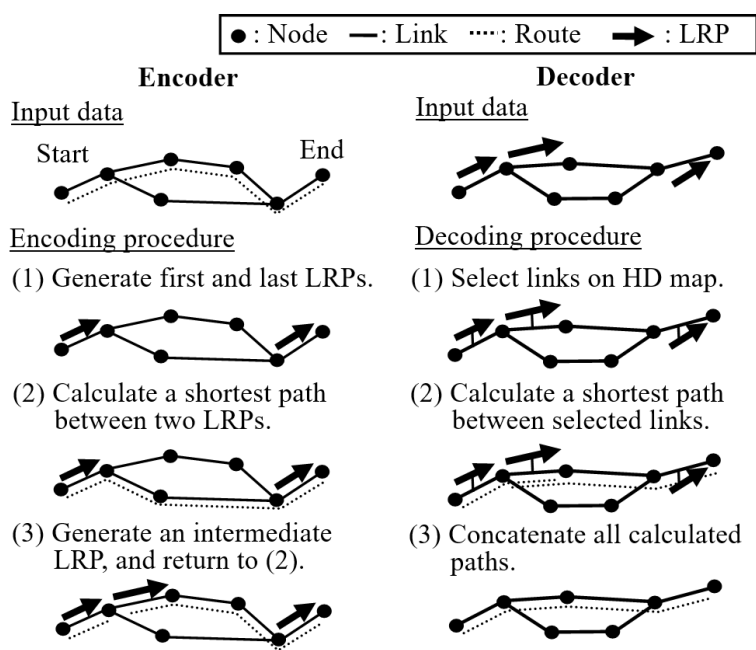


図 5-5 OpenLR エンコード・デコード手順

以上の仕様に対して, 整備仕様と整備時期が同一である場合に経路を正しく伝達できない要因を考察する. この要因としては, デコード手順(1)でリンクの選択を誤る場合と, デコード手順(2)で最短経路の選択を誤る場合がある.

まず前者について, 整備仕様と整備時期が同一であれば, 一方の地図に存在する道路は, 必ずもう一方の地図にも存在するといえる. よって, リンクを選択を誤るケースは, LRP に合致するリンクが 2 つ以上存在して正解を 1 つに絞れない場合である. これに対して現実世界では, 高架道路を除けば, 同一形状の複数の道路が地表上の同じ場所に存在することはないため, 上記の問題が起きる条件は, バイナリ形式で LRP を出力し, かつ道路の情報を表 5-2 のサイズで表現した際に精度が足りず, 同一の値に丸められてしまう場合である.

表 5-2 に記載した項目のうち、座標については OpenLR 仕様に従って算出される 24 bit 値の解像度は約 2.4m であり問題は少ない。一方、ライン属性のうち BEAR については、5 bit の場合は全方位を 2^5 区画 (1 区画 11.25°) で表現することになる。現実世界で考えると、例えば本線と並走する側線への分岐点では各分岐道路の方位の差が小さいため、 11.25° 単位では正確に道路を特定できない場合がありうる。BEAR に必要なビット長を、図 5-6 のように車線が増加する地点を例に考える。道路構造に関する基準[130], [131]を参考に 1 車線の幅を 3.5m, 設計速度 80km/h の地方道における本線シフト区間長を 85m とすると、分岐地点の角度 θ は約 2.358° になる。そのため少なくとも 8 bit (1 区画約 1.41°) は必要と思われる。

表 5-2 各 LRP に含まれる情報

分類	項目	サイズ
座標 (Coordinates)	Latitude	24 bit
	Longitude	24 bit
ライン属性 (Line Attributes)	FRC (Functional Road Class)	3 bit
	FOW (Form of Way)	3 bit
	BEAR (Road Bearing)	5 bit
経路属性 (Path Attributes)	LFRCNP (Lowest FRC to Next Point)	3 bit
	DNP (Distance to Next Point)	8 bit

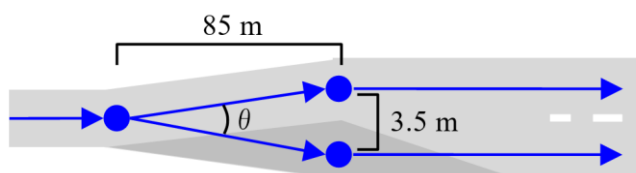


図 5-6 車線増加地点の例

次に後者の、最短経路の選択を誤る場合について考察する。最短経路計算を用いることによりエンコーダとデコーダ間の通信サイズを削減可能だが、この影響については文献[128]でも詳細な評価が必要とされている。この点について Dijkstra のアルゴリズムを例に考えると、同一のネットワークトポロジに対して最短経路計算の結果が異なる要因は、重みが同一である経路が複数存在し、かつどの経路も前述の LFRCNP と DNP による条件を満たす

ため、最短経路として選ばれる経路が実装依存になっている場合である。例えばリンクの重みを距離とした時、本線に並走する側線が存在し、その本線と側線の分岐から合流までの距離が同一の場合はこのようなことが起こりうる。よって提案方式では、得られた最短経路上にリンク属性が異なる道路への分岐がある場合、LRP を出力して進行方向を明示する。

5.4.3 変換前後の経路の一致判定

次に、双方の経路の不一致を検出する処理について述べる。提案方式では、一定の基準を定義して双方の経路が一致しているかを自動で判定することを図る。

まず以降の基準で用いる記号を定義する。地図上の点 a と点 b の距離を $d(a, b)$ 、経路 L 上の点の集合を Q_L とした時、経路 E と経路 D の形状の差異（以降、形状差異） $G_1(E, D)$ を式(5-3)のように定義する。なお、 $d_1(a, L)$ は点 a と経路 L 上の最近傍点の距離である。

$$G_1(E, D) = \max(\max\{d_1(a, D); a \in Q_E\}, \max\{d_1(a, E); a \in Q_D\}) \quad (5-3)$$

$$d_1(a, L) = \min\{d(a, b); b \in Q_L\}$$

同様に、経路 L 上の分岐点の集合を B_L とした時、経路 E と経路 D の分岐点の差異（以降、分岐差異） $G_2(E, D)$ を式(5-4)のように定義する。なお、 $d_2(a, L)$ は地図上の点 a と経路 L 上の分岐点のうち最も近い分岐点との距離である。

$$G_2(E, D) = \max(\max\{d_2(a, D); a \in B_E\}, \max\{d_2(a, E); a \in B_D\}) \quad (5-4)$$

$$d_2(a, L) = \min\{d(a, b); b \in B_L\}$$

以降、一致判定の基準を記載する。一致判定の基準として、以下の 6 つを定義する（図 5-7）。位置参照に成功した場合（表 5-1 の分類 A から D）、まず基準 1 の判定を行い、条件を満たせば経路が一致していると判定する。基準 1 の条件を満たさない場合、条件を満たさない経路上の全地点について基準 2 から基準 5 の判定を行い、全地点について一致していると判断できれば、経路は一致していると判定する。いずれかの地点で一致と判断できなければ経路は不一致と判定する。一方、位置参照に失敗した場合（表 5-1 の分類 E から H）は、基準 6 により道路有無の判定を行う。

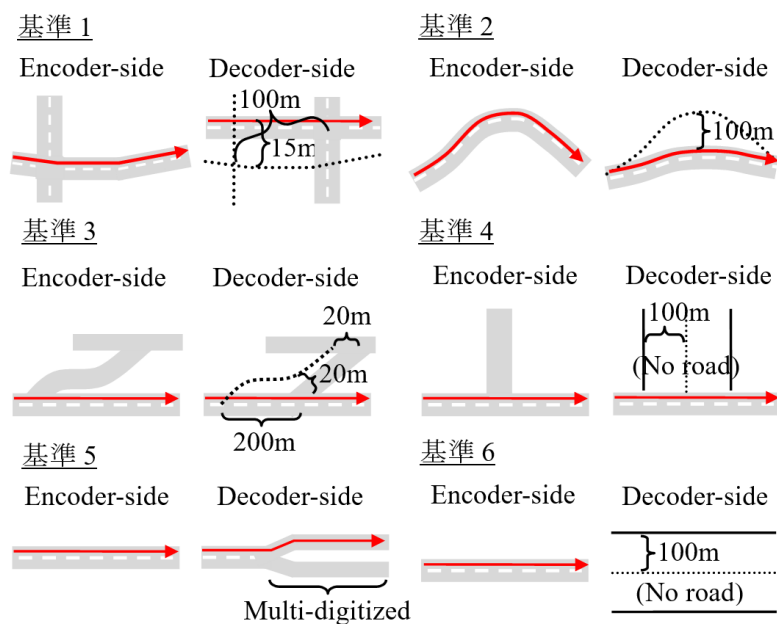


図 5-7 経路一致の判定基準

基準 1：基本判定

次の 2 つの条件を両方とも満たす場合、一致と判定する。

(1) $G_1(E, D) < 15\text{m}$

形状差異が 15m 未満であれば同一の道路と考える。閾値 15m は、高速道路の本線と側線（各 2 車線）を例に、以下のように考えた値である。道路構造令[130]を参考に 1 車線の幅を 3.5m, 左路肩 2.5m, 右路肩 1.25m とすると、本線と側線は $3.5 \times 2 + 2.5 + 1.25 = 10.75\text{m}$ 離れている。これに中間の構造物や空間等があることを考慮して 15m とした。

(2) $G_2(E, D) < 100\text{m}$

分岐差異が 100m 未満であれば経路上の分岐点に差異はないと考える。閾値 100m は、文献[131]において交差点の間隔は 200m 以上とすることが望ましいとされている点をふまえて設定した値である。

基準 2：道路形状変化

整備仕様の差異により、形状差異が基準 1 の閾値 15m 以上変化する場合がある。そのため、次の条件をすべて満たす場合、形状差異が 15m 以上でも一致と判定する。

(1) $G_1(E, D) < 100\text{m}$

形状差異が 100m 未満であれば整備仕様による差異と考える。閾値 100m は、交差点（1 街区）の間隔を前述の 200m と考えて設定した値である。

(2) 道路の属性 (FRC, FOW) が双方の経路で一致.

(3) 双方の経路の間に他の類似する道路が存在しない.

基準 3 : 分岐位置変化

整備仕様の差異により, 分岐差異が基準 1 の閾値 100m 以上変化する場合がある. そのため, 次の条件をすべて満たす場合, 分岐差異が 100m 以上でも一致と判定する.

(1) $G_2(E, D) < 200\text{m}$

分岐差異が 200m 未満であれば整備仕様による差異と考える. 閾値 200m は, 分岐専用車線がある Y 字分岐を例に, 基準 1 の閾値 100m に分岐専用車線の長さ (仮に交差点間隔の半分 100m とする) を加えた値である (分岐専用車線区間のどこを分岐点とするか整備仕様次第である).

(2) それぞれの分岐点から始まる道路 (分岐道路) の形状を比較し, 分岐道路の形状差異が 20m 未満, あるいは分岐道路の終端が同一の交差点である (同一の交差点か否かは距離が 20m 以内かどうかで判定する). 閾値 20m は, 基準 1 の閾値 15m に分岐専用車線の幅 3.5m と導流帯 (ゼブラゾーン) の幅を考慮して設定した.

基準 4 : 分岐道路の新設/廃止

経路沿いの道路に接続する道路が新設あるいは廃止された場合, 一方の地図のみに分岐点が存在することになる. そのため, 一方の地図のみに存在する分岐道路の近傍 100m 未満にもう一方の地図上で道路が存在しない場合, 分岐差異が 200m 以上でも一致と判定する. 閾値 100m は, 前述の交差点の間隔 200m をふまえて設定した.

基準 5 : 二条化

一方の地図では 1 つのリンクで表現している道路を, もう一方の地図では上りと下りを別リンクで表現する場合がある (二条化). 二条化の始点または終点の分岐点 (一方の地図にのみ存在する) が要因で分岐差異が 200m 以上になった場合は, 分岐差異が 200m 以上でも一致と判定する.

基準 6 : 道路新設/廃止

伝達経路の近傍 100m 未満の範囲に, もう一方の地図上で道路が存在しない場合, 対応する道路はないと判定する. 閾値 100m は基準 4 と同様の考え方で設定した.

5.5 評価

提案方式を実装し, 実際のカーナビ用地図を使用して評価を行った. 評価に用いた地図データと範囲 (東京近郊) を表 5-3 に記載する. 評価は, 高速道路と一般道路を対象にそれぞれ

れ無作為に 100 個のテスト用経路（経路長約 10km）を作成し、これをデータ 1 上でエンコードし、データ 2 およびデータ 3 上でデコードすることにより行った。データ 2 を用いた評価は整備仕様と整備時期が同一の場合の評価であり、データ 3 を用いた評価は整備時期が異なる場合の評価である。なお、データ 2 およびデータ 3 は、適正に評価できる高精度地図を入手困難だったためカーナビ用地図を用いたが、一致率を低下させる要因は実際の高精度地図でもあてはまると考えられる。

なお、評価で使用した OpenLR は、TomTom 社が公開している OpenLR Version 1.5 仕様[132]に従って著者らが実装したものである。

表 5-3 評価用地図データ

データ	地図提供者	データ形式	データ作成日
1	A 社	B 社形式	2014 年 12 月
2	A 社	C 社形式	2014 年 12 月
3	A 社	B 社形式	2010 年 12 月

5.5.1 DLR の一致率の評価

まず、DLR の一致率について評価した結果を示す。エンコードおよびデコードは、5.4.2 項で述べた内容をふまえて表 5-4 に示す 3 つの方式で行い、変換結果を目視確認して表 5-1 の分類に従って集計した。表 5-5 に結果を、図 5-8 にこの結果から求まる一致率 (式(5-1)) を示す。高速道路と一般道の両者とも、方式 3 によりデータ 2 の場合は 100%になったが、データ 3 の場合は一般道路で 92%にとどまった。図 5-9 に正しく変換できなかった例を記載する。データ 1 とデータ 3 で経路が異なっており、原因は、差異がある区間の経路長がほぼ同一のため異なる最短経路を選択したためであった。提案方式では分岐道路の属性が異なる場合のみ LRP を出力したため、一般道路における同一属性の道路同士の交差点でこのような誤りが発生した。

表 5-4 OpenLR 改善方式

方式	説明
1	標準の OpenLR 仕様
2	属性が異なる道路への分岐がある場合 LRP を出力
3	方式 2 に加え、方位のサイズを 8 bit に拡大

表 5-5 OpenLR 改善方式の評価結果

対象	地図	方式	A	B	C	D	E	F	G	H
高速 道路	データ 2	1	87	13	0	0	0	0	0	0
		2	96	3	0	0	0	0	1	0
		3	100	0	0	0	0	0	0	0
	データ 3	1	78	6	0	3	13	0	0	0
		2	79	4	0	3	13	0	1	0
		3	84	0	0	3	13	0	0	0
一般 道路	データ 2	1	100	0	0	0	0	0	0	0
		2	100	0	0	0	0	0	0	0
		3	100	0	0	0	0	0	0	0
	データ 3	1	84	0	10	6	0	0	0	0
		2	86	0	8	6	0	0	0	0
		3	86	0	8	6	0	0	0	0

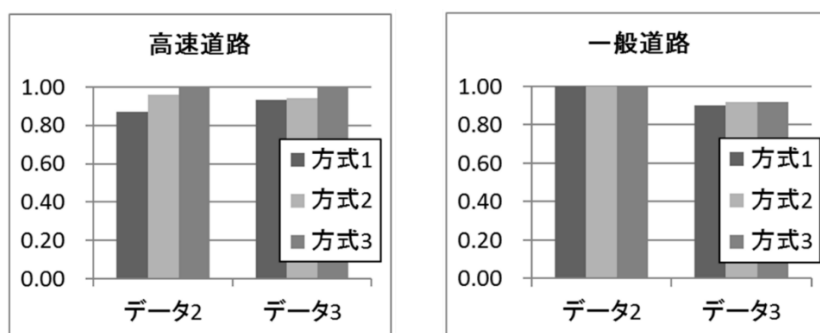


図 5-8 DLR の一致率 (R_1)

以降、表 5-5 の結果の詳細を記載する。高速道路については、データ 2 に関して 1 行目 (方式 1) で 13 件が分類 B (位置参照に成功したが実際には不一致) になった。図 5-10 左側に不一致の例を示す。データ 1 での経路は高速道路の本線であるのに対し、データ 2 での経路は、本線に並走する、サービスエリアへ進入する側線になっている。この原因は、本線と側線の経路長がほぼ同一であり、異なる最短経路を選択したためである。

2 行目 (方式 2) において分類 B は 3 件になったが、これは方式 2 により上記 13 件が分

類 A になった一方、新たに別の 3 件が分類 B, 1 件が分類 G になった結果である。この原因は、方式 2 によって新たに追加された LRP に対応するリンクを選択する際に誤ったものであった。図 5-10 右側に例を示す。この地点では、方式 1 では LRP は出力されなかったが、方式 2 により LRP が追加され、かつ方位の差が小さかったためリンクの選択を誤った。

3 行目 (方式 3) は、方位のサイズを 8 bit に拡大することで上記の 3 件が修正されたことを示している。以降の分類 B の件数の変化についても上記と同様の理由であった。

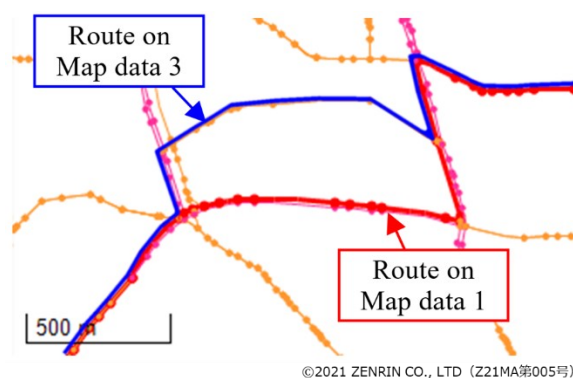


図 5-9 誤変換の例

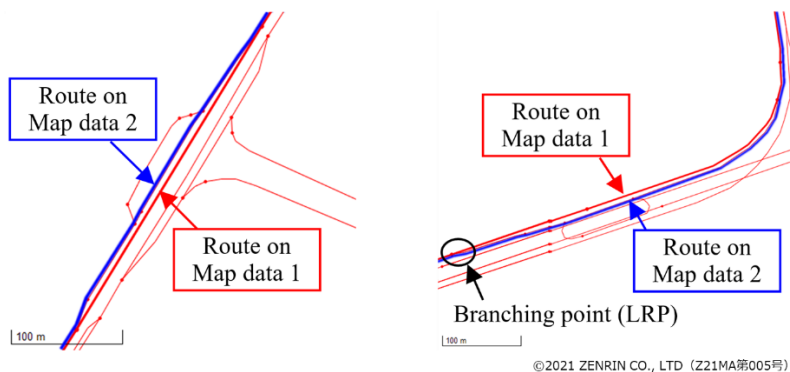


図 5-10 経路不一致の例

5.5.2 一致判定の正解率の評価

次に、変換前後の経路の一致判定に関する評価結果を記載する。図 5-11 は、表 5-5 の方式 3 での結果から求まる一致判定の正解率 (式(5-2)) を示したものである。データ 3 に関して、5.4.3 項の基準では判定を誤るケースが存在した。

表 5-6 に、変換前後の経路で差異がある地点に関して、各基準 (基本判定である基準 1 を除く) が実行された回数と、正しく判定した数、判定を誤った数を集計した結果を示す。な

お, いずれの誤りも, 不一致と判定したが実際には経路は一致 (分類 D) であった.

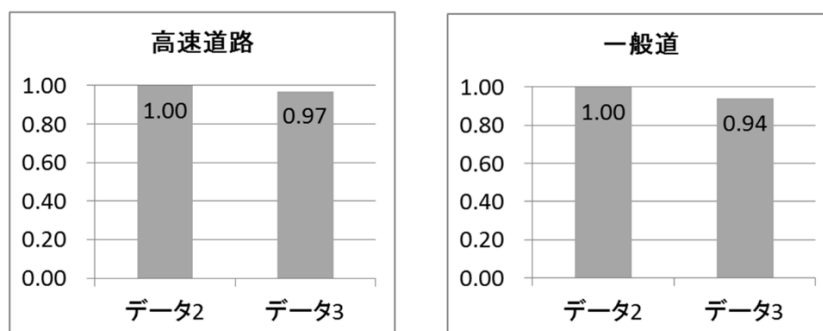


図 5-11 一致判定の正解率 (R₂)

表 5-6 一致判定基準の実行結果 (データ 3)

対象	基準	実行回数	正解数	誤り数
高速 道路	基準 2	5	5	0
	基準 3	0	0	0
	基準 4	5	3	2
	基準 5	0	0	0
	基準 6	13	13	0
一般 道路	基準 2	8	8	0
	基準 3	9	8	1
	基準 4	7	5	2
	基準 5	84	81	3
	基準 6	1	1	0

高速道路を対象にした評価ではおおむね正しく判定したが, 基準 4 で 2 件の誤りがあった. 図 5-12 に判定を誤った例を示す. 図の左側はデータ 1 での経路を, 右側はデータ 3 での経路を示したものである. 図中の丸で示した地点に新しい連絡線への分岐があり, 基準 4 によって新設道路への分岐と判断するべきところを, 閾値 100m 内に他の連絡線があるため基準 4 に記載した処理では新設道路と判断できず, 実際には経路は一致しているが不一致と判定した.

一般道路を対象にした評価では, 基準 3, 基準 4, 基準 5 で誤りがあった. 基準 3 の 1 件

の誤りの発生地点を図 5-13 に示す。図の左側の丸で示した分岐点と同一座標にデータ 3 のノードはあるが、このノードは進入するリンクが 2 本、退出するリンクが 1 本であり分岐ではないため、閾値 200m 未満の距離に存在する別のノード（図の右側の丸で示す）を対応する分岐点として選択してしまい、双方の分岐道路を比較した結果、不一致と判定した。基準 4 の 2 件の誤りは、高速道路の場合と同様に分岐道路近傍の閾値 100m 内に道路が存在したため判定を誤ったものであった。基準 5 の 3 件の誤りは、図 5-14 の丸で示したような交差点（二条化道路との交差点）で発生しており、経路に対応する道路自体は二条化されていないため基準 5 に記載した処理では正しく判定できず、不一致と判定した。

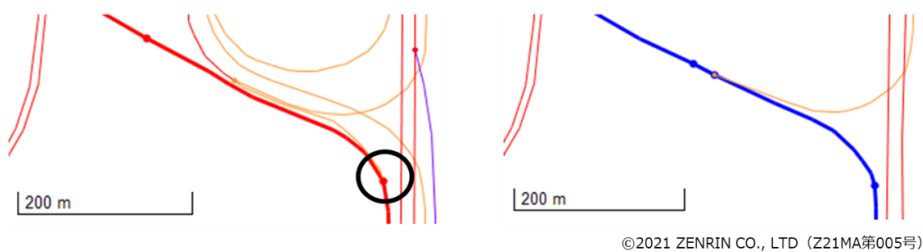


図 5-12 判定誤り地点の例 (Rule 4)

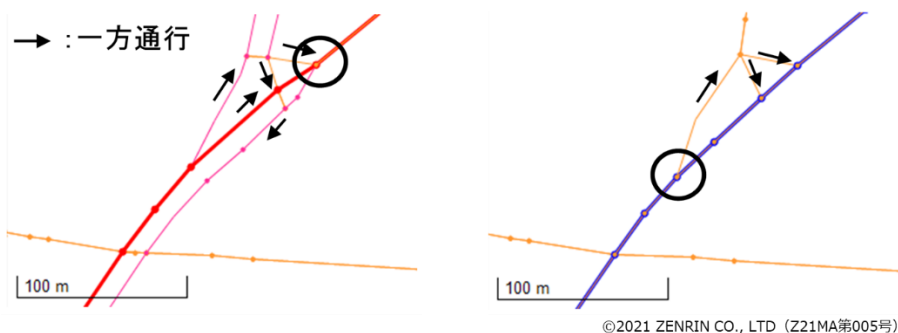


図 5-13 判定誤り地点の例 (Rule 3)

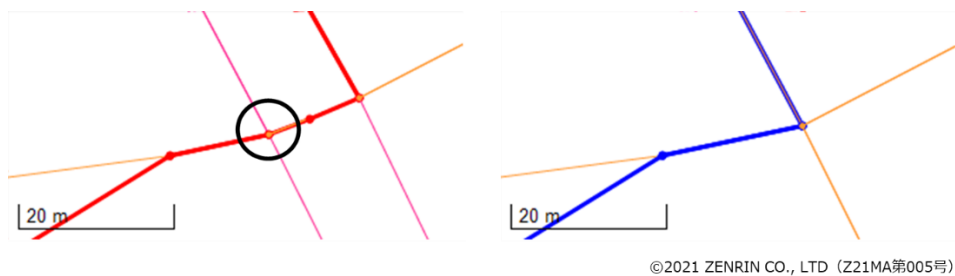


図 5-14 判定誤り地点の例 (Rule 5)

以上の結果から、提案方式による一致判定はある程度有効であるが、特に一般道路において精度良く判定するためには、本研究で記載した基準よりもいっそう複雑なロジックが必要になると考えられる。特に基準4については、新設道路への分岐か否かを一律に閾値100m内の道路有無で判断している点に問題があった。道路構造令等を参考にして設定した値をベースとして、道路種別や周辺の道路状況に応じて幅を変化させる等、改善の余地があると思われる。

5.6 結語

本章では、カーナビと自動運転システムが異なる地図データを使用している場合に、カーナビの経路情報を自動運転システムに伝達する方式について述べた。位置参照方式の1つであるOpenLRをベースにカーナビ用地図上の経路と高精度地図上の経路の一致率を向上するとともに、変換前後の経路の一致を判定することで車両へ誤った経路を出力することの抑止を図った。提案方式を実装して評価した結果、一致率については双方の地図データの整備仕様と整備時期が同一であれば100%に近付けられる見込みを得た。変換前後の経路の一致判定については、双方の地図データの整備時期が異なる場合であってもある程度判定できる見込みを得たが、精度を向上するためには本研究で記載した基準よりもいっそう複雑なロジックが必要である。

今後、一層の精度向上を進めるとともに、評価の手法についても考慮する必要がある。提案方式では単純に変換前後の経路が一致しているかどうかのみを評価の指標としているが、実際の応用では、異なる方向へ向かう分岐点において分岐方向を間違える場合と、すぐに再合流して元の道路に戻れる地点で間違える場合とでは、システムへの影響度が異なる。このような影響度の違いを考慮した上で評価を行う方式の検討が必要である。さらに、今後は本章で述べた経路情報の伝達に限らず、システム間で高精度な自車位置やレーンレベルの情報交換が進むと考えられる。高精度地図の整備状況等をふまえ、提案方式の改善や地図データ更新による双方のデータの同期等の技術開発に組んでいく必要がある。

第6章 結論

6.1 まとめ

本論文では、カーナビゲーションのための地理空間情報の伝達を目的として、特に、自律動作可能なモビリティの適用範囲が高速道路だけでなく一般道や細街路へも拡大する世界を想定し、その際に課題となる、物理空間上の情報をカメラで取得する際にプライバシーを保護する方式、モビリティへの地理空間情報配信を高速化する方式、および、複数のサービスから配信される地理空間情報の間の位置参照精度を向上する方式を提案した。

1章では、普及が進んでいる CPS の動向と、自動運転システムに代表されるモビリティに関して、実世界の制御にリアルタイム性や信頼性が強く要求されるため、クラウド側とエッジ側の両方にデジタル地図を搭載し、エッジ側を自律的に動作可能なシステムとして構成する必要があることを示した。そのうえで、モビリティに地理空間情報が伝達される一般的な流れとして、データ収集、構造化、配信、および利用の4つのフェーズがあることを述べ、本研究の目的を、自律動作するモビリティの適用範囲が一般道や細街路まで拡大する際の地理空間情報の伝達とした。その際の課題として、自動車や路側センサを用いてデータを収集する際のプライバシー保護、地理空間情報の配信の高速化、および複数のサービスから配信される地理空間情報の間の位置参照精度の向上という課題を挙げ、これらを解決するアプローチを示した。

2章では、地理空間情報をモビリティに伝達する際のデータ収集、構造化、配信、利用の各フェーズに関する関連研究および技術を整理した。データ収集に関しては、移動体による計測や測量技術、道路上に設置されたセンサによる路側センシングに関する技術を示すとともに、これらの情報を取得する際のプライバシー保護に関する規制や技術の動向について示した。地理空間情報の構造化に関しては、まず、地理空間情報をコンピュータが扱うデータとして表現するための技術を示し、モビリティにおいて一般的に用いられる GDF フォーマットを例にその概念を示した。そのうえで、カーナビゲーションシステムで用いられるカーナビ用地図、および運転支援システムや自動運転システムで用いられる高精度地図について示した。地理空間情報の配信に関しては、地図データのサイズを削減するためのデータ圧縮技術や、地図データを地域等によって分割して配信する技術、差分データのみを配信する技術について述べた。地理空間情報の利用に関しては、異なる地理空間情報を用いるシステム間で位置を正確に伝達するための位置参照技術について、Pre-coded Location Referencing Method と Dynamic Location Referencing Method があることを述べた。そ

のうえで、自律動作可能なモビリティの適用範囲を高速道路だけでなく一般道や細街路まで拡大する際の課題をまとめた。

3章では、街頭カメラを対象に、カメラ映像の閲覧者や被写体等の情報に基づいて、映像に含まれるプライバシー情報をフィルタリングするシステムを提案した。提案に際して、監視カメラから被写体のプライバシーを保護するためには、映像内の人物領域の隠蔽や、被写体によるカメラ制御等を行うだけでは不十分であり、映像の閲覧者側への配慮も必要であることを示した。そのうえで、プライバシーの保護と映像閲覧の両立を図るために、閲覧者と被写体の関係に基づいて、被写体ごとに異なるレベルの保護を行うシステムを提案した。提案システムでは映像内の被写体の同定処理が課題であり、この処理の実現に影響を与える被写体情報の通信遅延に関してプロトタイプシステム上で評価することにより、特定の利用形態のもとでの提案システムの有効性を確認した。

4章では、カーナビのストレージに格納している地図データの圧縮方式について述べた。年々高まる地図データの鮮度に対する要求に対し、データ更新を容易に行うために地図データのサイズを削減する必要があることを述べ、圧縮データの伸張処理によるナビ性能低下をユーザが感じないようにするため、地図データの多くを占める固定長レコードを対象にして高速伸張可能な圧縮方式を提案した。具体的には、RDBMSで普及しつつある列指向データ圧縮をベースに、組み込みシステムで用いられるCPUを対象にしてキャッシュ効率化と軽量の符号化方式を利用することにより、Zlib相当の圧縮率と、非圧縮時同等のリード性能実現を図った。提案方式をカーナビに実装することにより、地図データに含まれる特定のデータにおいて上記の性能の実現性を確認した。

5章では、カーナビの経路情報を自動運転システムに伝達する方式について述べた。カーナビで設定した目的地まで自動運転で案内するシステムを実現するため、カーナビと自動運転システムが異なる地図データを使用している場合に、それぞれの地図データ間で経路を正しく変換する方式を提案した。具体的には、動的位置参照方式の1つであるOpenLRを対象に、OpenLRが規定する物理データフォーマットと最短経路計算に起因して発生する誤りを削減することで変換前後の経路の一致率を改善するとともに、一定の基準を定めて変換前後の経路の形状の差異を評価することにより、経路が一致していることを自動で判定することを図った。提案方式を実装し、特定の地図データを用いて評価することで、提案方式の実現性を確認した。

以上のように、本論文では、カーナビゲーションのために地理空間情報を伝達する際の各フェーズにおいて、自律動作可能なモビリティの適用範囲を一般道や細街路へ拡大する際の課題について取り組み、それぞれ提案方式を実装することにより実現性を確認した。交通

事故の削減、高齢化によるタクシーやトラック等における労働力不足への対応、高齢者など移動弱者のための移動手段の確保等、多くの社会課題の解決のために、自律動作可能なモビリティに対する期待は今後ますます高まると考えられる。本研究の成果は、こうした期待を実現するために有用であると考えられる。

6.2 今後の展望

本論文では、カーナビゲーションへの地理空間情報の伝達に関して、データ収集時のプライバシー保護、地理空間情報の配信の高速化、および複数のサービスから配信される地理空間情報の間の位置参照精度の向上について述べた。これらの結果は自律動作するモビリティの適用範囲を一般道や細街路へ拡大するために資すると考える一方、現在および今後の情報通信技術の進化をふまえた検討が引き続き必要である。

例えば、3章で取り上げた物理空間上の情報をカメラで取得する際のプライバシー保護においては、本論文では被写体が持つ携帯端末から位置情報を送出して個人の同定を行った上でプライバシー保護を行う方式を提案した。これに対して、近年の Deep Learning 等の機械学習やエッジコンピューティング等の技術により、公共スペースに設置された監視カメラ画像の顔領域から犯罪者等の特定の個人を識別することも技術的に可能になりつつある。このような技術の進化をふまえた上で、提案方式のように各被写体の要求に応じてプライバシーを保護するために位置情報や顔画像などのプライバシー情報を収集することのあり方について、さらに検討を進める必要がある。

4章で取り上げたモビリティへの地理空間情報の配信の高速化においては、本論文ではサイズが大きい地図情報をエッジ側で高速伸張可能なデータ圧縮方式について述べた。これに対して、5G、V2X等の通信技術の進化によりモビリティと配信サーバの間で利用可能な通信帯域やリアルタイム性が高まり、それに応じて、これまで信頼性やリアルタイム性の観点でエッジ側に保持していた地理空間情報は、必要なデータをオンデマンドでクラウドから取得する方式が徐々に主流になると考えられる。このような技術の普及を前提とした上での最適な地理空間情報の配信方式の検討が引き続き必要である。

5章で取り上げた複数のサービスから配信される地理空間情報の間の位置参照精度向上においては、本論文では自動車システムで用いられる複数の地理空間情報間での位置参照精度向上について述べた。この課題はエッジ側の複数のデバイスが異なる地理空間情報を用いていることに起因するものであり、将来、地理空間情報が重要なインフラとして整備され、各デバイスがクラウド上にある共通の地理空間情報を参照可能になることが望ましい。

そのためには、情報を共通化する範囲、共通化することが困難な領域での位置参照の方法などをシステム全体の観点で検討した上で、位置参照の精度を高めていく必要がある。

このような個別の改善を進めつつ、地理空間情報の伝達全体のあり方についても検討が必要である。1章で述べた通り、CPSとしての観点から、自動運転システム等のCPSが動作するために必要な地理空間情報の伝達自体も、CPSとしての側面を持っている。路側センサやモビリティによってデータを収集し、地理空間情報としてモビリティへ配信して実世界で利用するまでの一連のフェーズを継続的に繰り返すことにより、高度に自動化されたモビリティ社会を実現することが可能となる。こうした社会の実現に際して、地理空間情報の伝達の観点からは、実世界に存在するものの不確定性が課題となる。すなわち、実世界の道路ネットワークや標識等の地物、道路上で発生する渋滞や事故等の事象には様々なものがあり、また時間の経過に応じて常に新しい地物や事象が出現して変化し続けるため、人間が介在せずにこれらの変化に追従可能なシステムを実現することが今後の大きな課題である。この課題に対しては、Graph Neural Network[133][134][135][136]等、グラフ構造のデータを機械学習可能な技術を適用し、地理空間情報が持つ意味そのものをコンピュータが理解可能にすることが必要であると考えられる。

さらに、自動運転など高い安全性が要求されるCPSにおいて地理空間情報の利用が進むにつれて、地理空間情報自体の安全性をどのように保証するかが課題となる。自動車の安全性については、これまでに機能安全規格ISO 26262[137]が確立しており、ハードウェアおよびソフトウェアの障害に対して安全を確保している。しかし、地理空間情報のように、情報の作成過程で人的エラーや機械学習による誤りが入り込む余地のある情報を利用する際の安全性について、これを保証する技術はまだ確立していない。この問題に対する1つの方向性としては、ISO 26262を補う規格として公開されているISO/PAS 21448 (SOTIF)[138]のように、予見可能なエラーをふまえて安全性へのリスクを低減することが考えられる。ただし、ISO/PAS 21448が想定する予見可能なユーザの誤操作等とは異なり、地理空間情報は実世界の変化に応じて常に変化するものであり、かつ事前には定義できない地物や事象が常に発生するという本質的な問題がある。実世界とのギャップを可能な限り短時間で解消しつつ、正確な地理空間情報の収集や、エラーを防ぐための情報管理の仕組み、情報のセキュリティ等を考慮した情報基盤の構築が必要になると考えられる。

今後は、このような検討を進めることで、より多くの地理空間情報をモビリティへ伝達するための研究を進めていく。

謝辞

本研究を行い本論文の執筆するにあたり，非常に多くの方に多大なるご支援ご指導をいただきました．心より御礼申し上げます．

本論文は，著者が京都大学大学院情報学研究科知能情報学専攻博士後期課程および株式会社日立製作所システム開発研究所および横浜研究所に在籍中の研究成果をまとめたものです．本研究を進め，本論文を執筆するにあたりまして，指導教員である岡部寿男教授には多大なるご指導をいただき，深く感謝申し上げます．また，副査である知能情報学専攻 森信介教授，社会情報学専攻 吉川正俊教授には，審査を通じて本論文へのご指導をいただき，深く感謝申し上げます．知能情報学専攻 宮崎修一准教授，小谷大佑助教をはじめとする岡部研究室の皆様には，本論文に関する研究について研究会等を通じてご助言をいただき感謝申し上げます．

株式会社日立製作所および日立オートモティブシステムズ株式会社（現日立 Astemo 株式会社），クラリオン株式会社（現フォルシアクラリオン・エレクトロニクス株式会社）の職場の皆様には，本論文執筆のきっかけを与えてくださるとともに，研究の指針や技術課題に関して適切なお助言・ご指導をいただくとともに，論文執筆活動をさまざまな面でサポートいただき深く感謝申し上げます．

第 3 章の内容は，文部科学省科学技術振興調整費により実施した「横断的科学的によるユビキタス情報社会の研究」の成果の一部です．関係者のご協力に感謝致します．

最後に，本論文の執筆にあたり，常に応援し支えてくれた家族に心より感謝します．

参考文献

- [1] Rawung, R. H. and Putrada, A. G.: Cyber physical system: Paper survey, 2014 International Conference on ICT For Smart Society (ICISS), pp. 273-278, (2014).
- [2] 日本学術会議, 自動運転のあるべき将来に向けて—学术界から見た現状理解— (2017), available from <<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-t246-1.pdf>>.
- [3] 丸山宏, エッジ・ヘビー・データとそのアーキテクチャ - ビッグデータ時代の IT アーキテクチャ, 情報管理, Vol. 56, No. 5 (2013).
- [4] Digital Map Market Size, Share & Trends Analysis Report By Type (GIS, LiDAR, Aerial Photography, Digital Orthophotography), By Usage, By Services, By End Use, By Region, And Segment Forecasts, 2020 – 2027, Grand View Research, Inc. (2020).
- [5] Jin, X., Nakamura, M., Tetsuo, S., and Sugimoto, H.: Hybrid Navigation System That Combines Cloud and On-Board Computing, SAE Technical paper 2018-01-0022 (2018).
- [6] Navigation Data Standard (NDS) e.V.: NDS.Live: The New Generation of Map Data Format, Navigation Data Standard (2019), available from <<https://nds-association.org/nds-live-the-new-generation-of-map-data-format/>>. (2021年8月確認)
- [7] 林孝, 測量用航空機「くにかぜ III」の概要と役割, 国土地理院時報, No. 120 (2010).
- [8] Ishikawa, K., Takiguchi, J., Amano, Y., and Hashizume, T.: A Mobile Mapping System for road data capture based on 3D road model, Proc. 2006 IEEE International Conference on Control Applications, pp. 638-643 (2006).
- [9] SIP-adus, 自動運転(システムとサービスの拡張) SIP-adus Innovation of Automated Driving for Universal Services, available from <<https://www.sip-adus.go.jp>>. (2021年8月確認)
- [10] Open AutoDrive Forum, available from <<https://www.openautodrive.org/>>. (2021年8月確認)
- [11] 伊藤大輔, 谷崎正明, 嶋田茂: 地図データの更新に対応した組込みデータベースのデータ配置方式, 信学技報, Vol. 106, No. 149, DE2006-68, pp. 107-111 (2006).
- [12] 一般財団法人 道路交通情報通信システム(VICS)センター,

- available from <<https://www.vics.or.jp/>>. (2021 年 8 月確認)
- [13] 宮下浩一, 寺田努, 田中宏平, 西尾章治郎: 目的予測型カーナビゲーションシステムのためのマップマッチング手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 1, pp. 75-86 (2009).
- [14] OpenLR Association,
available from <<http://www.openlr.org/>>. (2021 年 8 月確認)
- [15] RFC1950 - ZLIB Compressed Data Format Specification version 3.3, IETF. (1996).
- [16] トヨタ自動車株式会社, KDDI 株式会社, 一般社団法人東京ハイヤー・タクシー協会: トヨタと KDDI, 東京ハイヤー・タクシー協会と共同で, 「つながるタクシー」から取得する大容量の走行データ通信・活用の実証実験を開始 (2017),
available from <<https://global.toyota/jp/detail/16559407>>. (2021 年 8 月確認)
- [17] トヨタ自動車株式会社: TRI-AD, 自動運転用一般道高精度地図生成の実証実験に成功 - 精度向上に向け, さらなるパートナー連携 - (2020),
available from <<https://global.toyota/jp/newsroom/corporate/31898852.html>>. (2021 年 8 月確認)
- [18] 株式会社マップフォー: 「事業用車両を活用して作成した高精度三次元地図データの自動運転への活用に向けた実証事業」の実施について (2020),
available from <<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000002.000062080.html>>. (2021 年 8 月確認)
- [19] HERE Technologies: Vehicle Sensor Data Interface Specification (2015),
available from <<https://silo.tips/download/vehicle-sensor-data-cloud-ingestion-interface-specification-v202-here-licensed-u>>. (2021 年 8 月確認)
- [20] SENSORIS (Sensor Interface Specification),
available from <<https://sensoris.org/>>. (2021 年 8 月確認)
- [21] 小島祥子, 石田皓之, 寺本英二, 村瀬洋: 汎用 GPS と車載カメラデータ収集による高精度地図生成手法の提案 - 複数時刻の衛星情報を用いた精度向上, 情報処理学会論文誌, Vol. 54, No. 1, pp. 103-115 (2013).
- [22] 小山浩, 柴田泰秀: 自動走行におけるダイナミックマップ整備, システム制御情報学会解説記事, Vol. 60, No. 11, pp. 463-468 (2016).
- [23] 林亜紀, 横畑夕貴, 秦崇洋, 森皓平, 尾花和昭: 道路地図自動生成に向けた周辺地物の位置推定技術, 自動車技術会論文集, Vol. 52, No. 2, pp. 72-79 (2021).
- [24] 小島祥子, 高橋新, 二宮芳樹: 汎用 GPS と車載レーザレーダを用いた高精度自車両位置推定, 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 1, pp. 64-74 (2009).

- [25] 村上貴哉, 橘川雄樹, 竹内栄二郎, 二宮芳樹, 目黒淳一: 自動運転に適用する三次元点群の評価に関する研究 (位置ずれの検出のための三次元点群の評価指標の提案), 日本機械学会論文集, Vol. 86, No. 892 (2020).
- [26] Ellahyani, A., Ansari, M., and Jaafari, I.: Traffic sign detection and recognition based on random forests, *Applied Soft Computing*, Vol. 46, Issue C, pp. 805-815 (2016).
- [27] Zhu, Z., Liang, D., Zhang, S., Huang, X., Li, B., and Hu, S.: Traffic-Sign Detection and Classification in the Wild, 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 2110-2118 (2016).
- [28] Tabernik, D. and Skocaj, D.: Deep Learning for Large-Scale Traffic-Sign Detection and Recognition, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 21, No. 4, pp. 1427-1440 (2020).
- [29] Wang, H., Sun, Y., and Liu, M.: Self-Supervised Drivable Area and Road Anomaly Segmentation Using RGB-D Data for Robotic Wheelchairs, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 4, No. 4 (2019).
- [30] Arya, D., Maeda, H., Ghosh, S. K., Toshniwal, D., Mraz, A., Kashiyama, T., and Sekimoto, Y.: Transfer Learning-based Road Damage Detection for Multiple Countries, *ArXiv* (2020).
- [31] 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).
- [32] 石田繁巳, 三村晃平, LIU Song, 田頭茂明, 福田晃: 路側設置マイクロフォンによる車両カウントシステム, *情報処理学会論文誌*, Vol. 58, No. 1, pp. 89-98 (2017).
- [33] 吉田誠, 大黒智貴, 日月伸也, 森山由美子, 武島儀忠, 近藤裕介, 秋山真哉, 諏訪博彦, 安本慶一: 路側設置振動センサによる交通量推定システムの検討, *情報処理学会 第28回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集*, pp. 106-113 (2020).
- [34] 国土交通省, 各地方整備局の取組 全国のライブカメラ,
available from <<https://www.mlit.go.jp/road/bosai/LIVEcamera.html>>. (2021年8月確認)
- [35] 林一久, 北村暁晴, 堅多達也, 芝山直, 東口昌司, 上山勝他: 交差点における交通事故記録装置の開発: デジタル記録型 TAAMS, *自動車技術会論文集*, Vol. 34, No. 2, pp. 131-136 (2003).

- [36] Xu, H., Tian, Z., Wu, J., Liu, H., and Zhao, J.: HIGH-RESOLUTION MICRO TRAFFIC DATA FROM ROADSIDE LIDAR SENSORS FOR CONNECTED-VEHICLES AND NEW TRAFFIC APPLICATIONS, SOLARIS Consortium (2018).
- [37] 電波産業会: 狭域通信(DSRC)システム (ARIB STD-T75) (2001).
- [38] 瀬川洋介, 上野高明, 大岸智彦, 小花貞夫, 湯素華: Cellular-V2X を用いたリアルタイム情報共有と配信のための無線リソースの効率的なスケジューリング法の提案, 情報処理学会 マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2176 論文集, pp. 1079-1087 (2020).
- [39] Insecam – Live cameras directory,
available from <<http://www.insecam.org/>>. (2021 年 7 月確認)
- [40] Response: Winny で流出, N システムが記録した 10 万台の情報 (2006),
available from <<https://response.jp/article/2006/03/20/80395.html>>. (2021 年 7 月確認)
- [41] OECD: OECD Recommendation Concerning Guidelines Governing the Protection of Privacy and Transborder Flows of Personal Data, adopted by the Council of the OECD of 23 September 1980 (OECD Privacy Guidelines) (1980).
- [42] 堀部政男, 新保史生, JIPDEC (野村至): プライバシー保護と個人データの国際流通についてのガイドラインに関する理事会勧告 (2013) (仮訳), 一般財団法人日本情報経済社会推進協会(JIPDEC) (2014).
- [43] European Union: General Data Protection Regulation (GDPR) (2016),
available from <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0679>>.
- [44] State of California: California Consumer Privacy Act of 2018 (2018),
available from <<https://www.oag.ca.gov/privacy/ccpa>>.
- [45] ISO 24100:2010 Intelligent transport systems – Basic principles for personal data protection in probe vehicle information services (2010).
- [46] ISO 16461:2018 Intelligent transport systems – Criteria for privacy and integrity protection in probe vehicle information systems (2018).
- [47] 伊藤寛: 自動車関連のデータ収集を巡る標準化動向, JARI Research Journal (2016).
- [48] Resolution on Data Protection in Automated and Connected Vehicles, 39th International Conference of Data Protection and Privacy Commissioners (ICDPPC) Hong Kong (2017).

- [49] 東京都杉並区: 杉並区防犯カメラの設置及び利用に関する条例 (平成 16 年 3 月 19 日 条例第 17 号) (2004).
- [50] IoT 推進コンソーシアム, 総務省, 経済産業省: カメラ画像利活用ガイドブック ver2.0, (2018),
available from <https://www.soumu.go.jp/main_content/000542668.pdf>. (2021 年 8 月確認)
- [51] 角所考, 満上育久, 美濃導彦: カメラ映像におけるプライバシー対処のためのアプローチ, 人口知能学会誌, Vol. 24, No. 2 (2009).
- [52] 干川尚人, 下馬場朋禄, 伊藤智義: 地産地消型アーキテクチャによるセンサネットワークデータのプライバシー保護, 情報処理学会論文誌, Vol. 59, No. 12, pp. 2180-2190, 2018.
- [53] 地理空間情報活用推進基本法, 平成 19 年法律第 63 号 (2007).
- [54] ISO 14825:2011 Intelligent transport systems – Geographic Data Files (GDF) – GDF5.0 (2011).
- [55] Digital Geographic Information Working Group (DGIWG): The Digital Geographic Information Exchange Standard (DIGEST) Part 2 Theoretical Model, Exchange Structure and Encapsulation Specifications Edition 2.1 (2000).
- [56] Association for Standardization of Automation and Measuring Systems (ASAM) e.V.: ASAM OpenDRIVE – Open Dynamic Road Information for Vehicle Environment, Version 1.6 (2020).
- [57] INSPIRE Thematic Working Group Transport Networks: D2.8.I.7 Data Specification on Transport Networks – Technical Guidelines Version 3.2 (2014).
- [58] Labetski, A., Gerwen, S., Tamminga, G., Ledoux, H., Stoter, J.: A Proposal for an Improved Transportation Model in CityGML, ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLII-4/W10, pp. 89-96 (2018).
- [59] Beil, C. and Kolbe, T. H.: Combined Modelling of Multiple Transportation Infrastructure within 3D City Models and Its Implementation in CityGML 3.0, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Vol. VI-4/W1-2020, pp. 29-36 (2020).
- [60] Gruler, H. C., Stubkjaer, E., Axelsson, P., Wikstrom, L.: OGC® Land and Infrastructure Conceptual Model Standard (LandInfra), OGC 15-111 (2016).
- [61] ISO 16739-1:2018 Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the

- construction and facility management industries (2018).
- [62] Haklay, M. and Weber, P.: OpenStreetMap: User-Generated Street Maps, IEEE Pervasive Computing, Vol. 7, No. 4, pp. 12-18 (2008).
- [63] 日本工業規格: 自動車カーナビゲーションシステム用地図データ格納フォーマット, JIS D0810 (2004).
- [64] 藤本英俊: カーナビ用地図データフォーマット KIWI, デンソーテクニカルレビュー, Vol. 6, No. 1 (2001).
- [65] 臼井真人, 福山薫: カーナビゲーション用フォーマット・KIWI フォーマットのデータ更新技術, 地理情報システム学会講演論文集, Vol. 16, pp. 227-230 (2007)..
- [66] Navigation Data Standard (NDS) e.V.: Navigation Data Standard (NDS) The worldwide standard for map data in automotive eco-systems, available from <<http://www.nds-association.org/>>. (2021年8月確認)
- [67] Edsger, W. and Dijkstra, A.: Note on Two Problems in Connexion with Graphs, Numerische Mathematik, Vol. 1, No. 1, pp. 269-271 (1959).
- [68] ISO 14819-1:2021 Intelligent transport systems – Traffic and travel information messages via traffic message coding – Part 1: Coding protocol for Radio Data System – Traffic Message Channel (RDS-TMC) using ALERT-C (2021).
- [69] Navigation Data Standard (NDS) e.V.: NDS Open Lane Model 1.0 (2016), available from <<http://openlanemodel.org/>>. (2021年8月確認)
- [70] 渡辺陽介, 高木建太郎, 手嶋茂晴, 二宮芳樹, 佐藤健哉, 高田広章: 協調型運転支援のための交通社会ダイナミックマップの提案, 第7回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム, pp. 1-8 (2015).
- [71] 名古屋大学 COI 高精度地図フォーマット仕様書 Version 1.01 (2017), available from <http://www.nces.i.nagoya-u.ac.jp/dm2/COImap_20170906.pdf>.
- [72] Ziv, J. and Lempel, A., A Universal Algorithm for Sequential Data Compression, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 23, No. 3, pp. 337-343 (1977).
- [73] PKWARE Inc.: .ZIP File Format Specification version 6.3.9 (2020), available from <<https://pkware.cachefly.net/webdocs/casestudies/APPNOTE.TXT>>.
- [74] RFC 1952 - GZIP file format specification version 4.3 (1996).
- [75] RFC 1951 - DEFLATE Compressed Data Format Specification version 1.3 (1996).
- [76] Burrows, M., and Wheeler, D.: A Block-Sorting Lossless Data Compression Algorithm (1994).

- [77] Bell, T., Cleary, J., and Witten, I.: Data compression using adaptive coding and partial string matching, *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 32, No. 4, pp. 396-402 (1984).
- [78] bzip2, available from <<http://www.bzip.org/>>. (2021年8月確認)
- [79] Shkarin, D.: PPM: one step to practicality, *Proceedings DCC 2002. Data Compression Conference*, pp. 202-211 (2002).
- [80] Huffman, D.: A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes, *Proceedings of the Institute of Radio Engineers (IRE)*, Vol. 40, No. 9, pp. 1098-1101 (1962).
- [81] Compression.ca: Archive Comparison Test, available from <<http://compression.ca/>>. (2021年7月確認)
- [82] 足立晋哉, 新倉聡, 田島昭幸: プローブデータの圧縮方式の研究--プローブデータのロッシ-圧縮アルゴリズム, *電子情報通信学会技術研究報告*, Vol. 104, No. 762, pp. 13-18 (2005).
- [83] Koegel, M., Kiess, W., Kerper, M., and Mauve, M.: Compact Vehicular Trajectory Encoding, *2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1-5 (2011).
- [84] Reimer, A. and Volk, C.: An approach for using cubic Bézier curves for schematizations of categorical maps, *15th Workshop of the ICA commission on Generalization and Multiple Representation, Istanbul* (2012).
- [85] 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, *情報処理学会 組込みシステムシンポジウム 2014 論文集*, pp. 69-74 (2014).
- [86] Vishen, R., Silaghi, M, and Denzinger, J.: GPS Data Interpolation: Bezier Vs. Biarcs for Tracing Vehicle Trajectory, *ICCSA 2015*, pp. 197-208 (2015).
- [87] 浅原彰規, 谷崎正明, 嶋田茂, 森岡道雄: 道路の接続性を保障したテレマティクスサービスのための地図差分更新方式, *情報処理学会論文誌*, Vol. 49, No. 1, pp. 221-232 (2008).
- [88] ISO 17572-2:2018 Intelligent transport systems (ITS) - Location referencing for geographic databases - Part 2: Pre-coded location references (pre-coded profile) (2018).
- [89] ISO 17572-3:2015 Intelligent transport systems (ITS) - Location referencing for

- geographic databases - Part 3: Dynamic location references (dynamic profile) (2015).
- [90] 日本デジタル道路地図協会, 道路の区間 ID テーブル標準 Ver1.2 (2015).
- [91] ISO 17572-3:2015 Intelligent transport systems (ITS)-Location referencing for geographic databases—Part 3: Dynamic location references (dynamic profile) (AGORA-C) (2015).
- [92] Langheinrich, M.: A Privacy Awareness System for Ubiquitous Computing Environments, Proc. 4th International Conference on Ubiquitous Computing, pp. 237-245 (2002).
- [93] Jendricke, U. and tom Markotten, D.G.: Usability Meets Security - The Identity - Manager as Your Personal Security Assistant for the Internet, Proc. 16th Annual Computer Security Applications Conference, pp. 344 (2000).
- [94] Pfitzmann, A. and Kohntopp, M.: Anonymity, Unobservability, and Pseudonymity - A Proposal for Terminology, Workshop on Design Issues in Anonymity and Unobservability, pp. 1-9 (2001).
- [95] Funabashi, M., Homma, K., and Sasaki, T.: Introduction to the Yaoyorozu Project, SICE Annual Conference 2003, pp. 1332-1335 (2003).
- [96] Kawamichi, H., Sekiguchi, T., Sameshima, S., Morikawa, H., and Takashio, K.: Opportunities and Issues Relating to Middleware Technologies for Context-aware Services (2), SICE Annual Conference 2004, pp. 2704-2708 (2004).
- [97] Sameshima, S., Kawamichi, H., Kato, H., Sekiguchi, T., Morikawa, H., Takashio, K. and Tokuda, H.: Opportunities and Issues Relating to Middleware Technologies for Context-aware Services, 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 5667-5672 (2004).
- [98] Sekiguchi, T. and Kato, H.: Privacy Assuring Video-Based Monitoring System Considering Browsing Purposes, IEEE/IPSJ International Symposium on Applications and the Internet Workshops, pp. 464-467 (2005).
- [99] Hudson, S. E. and Smith, I. E.: Techniques for Addressing Fundamental Privacy and Disruption Tradeoffs in Awareness Support Systems, Proc. 1996 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work, pp. 248-257 (1996).
- [100] 島井博行, 三島健稔, 栗田多喜夫, 梅山伸二: 移動物体検出のためのロバスト統計を用いた適応的な背景推定法, 画像の認識理解シンポジウム (MIRU2000) 講演論文集, Vol. II, pp. 391-396 (2000).

- [101] 馬場功淳, 大橋健, 乃万司, 松尾英明, 江島俊朗: HeadFinder : フレーム間差分をベースにした人物追跡, 画像センシングシンポジウム講演論文集, pp. 329-334 (2000).
- [102] Yasuda, K., Naemura, T., and Harashima, H.: Thermo-Key: Human Region Segmentation from Video, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 24, No. 1, pp. 26-30 (2004).
- [103] Zhao, Q. A. and Stasko, J. T.: Evaluating Image Filtering Based Techniques in Media Space Applications, Proc. 1998 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work, pp. 11-18 (1998).
- [104] Boyle, M., Edwards, C. and Greenberg, S.: The Effects of Filtered Video on Awareness and Privacy, Proc. 2000 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work, pp. 1-10 (2000).
- [105] Neustaedter, C. and Greenberg, S.: The Design of a Context-Aware Home Media Space for Balancing Privacy and Awareness, Proc. 5th International Conference on Ubiquitous Computing, pp. 297-314 (2003).
- [106] 岡本直樹: RFID とカメラによる位置検出・個人同定システム, 修士論文, 大阪工業大学 (2005).
- [107] 坂田宗之: ALTAIR: アクティブ IR タグを用いた複数ユーザ位置同定システム, 修士論文, 奈良先端科学技術大学院大学 (2003).
- [108] Fukuju, Y., Minami, M., Morikawa, H., and Aoyama, T.: DOLPHIN: An Autonomous In-door Positioning System in Ubiquitous Computing Environment, IEEE Workshop on Software Technologies for Future Embedded Systems (WSTFES2003), pp. 53-56 (2003).
- [109] 産業労働局: 東京都における繁華街利用実態調査報告書 (2001).
- [110] 石黒伯和: 来園目的を考慮した公園内通行量の予測シミュレーションモデル, 修士論文, 早稲田大学 (2004).
- [111] Murakami, Y.: Privacy Issues in the Ubiquitous Information Society and Law in Japan, 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (2004).
- [112] 池田佳弘, 柳沢豊, 岸野泰恵, 水谷伸, 白井良成, 須山敬之, 松村耕平, 野間春生: 自動監視システムのための CNN の分散処理による送信データ量削減手法, 情報処理学会 マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2019 論文集, pp. 71-78 (2019).
- [113] 知野見健太, 李光鎮, 中嶋大介, 新田直子, 伊藤義道, 馬場口登, PriSurv : プラ

イバシー保護機能を有する映像サーベイランスシステム, 情報処理学会論文誌 コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 1, No. 2, pp.152-162 (2008).

- [114] B. R. Iyer and D. Wilhite: Data Compression Support in Databases, In Proceedings of the 20th International Conference on Very Large Data Bases (VLDB), pp. 695-704 (1994).
- [115] Stonebraker, M., Abadi, D. J., Batkin, A., Chen, X., Cherniack, M., Ferreira, M., Lau, E., Lin, A., Madden, S., O'Neil, E. J., O'Neil, P. E., Rasin, A., Tran, N., and Zdonik, S. B.: C-Store: A column-oriented DBMS, In Proceedings of the 31st International Conference on Very Large Data Bases (VLDB), pp. 553-564 (2005).
- [116] Abadi, D. J., Madden, S. R., and Ferreira, M. C.: Integrating Compression and Execution in Column-oriented Database Systems, In Proceedings of the 2006 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, pp. 671-682 (2006).
- [117] 郡光則: データウェアハウス向け高性能データ圧縮方式, 情報処理学会論文誌, Vol. 47, No. SIG13, pp. 58-73 (2006).
- [118] Ailamaki, A., DeWitt, D. J., Hill, M. D., and Skounakis, M.: Weaving Relations for Cache Performance, In Proceedings of the 27th International Conference on Very Large Data Bases (VLDB), pp. 169-180 (2001).
- [119] Zhang, H., Chen, G., Ooi, B. C., Tan, K., Zhang, M.: In-Memory Big Data Management and Processing: A Survey, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, pp. 1920-1948 (2015).
- [120] Ramakrishnan, R. and Gehrke, J.: Database Management Systems, McGraw-Hill, 2 edition (2000).
- [121] Copeland, G. P. and Khoshafian, S. F.: A Decomposition Storage Model, In Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, pp. 268-279 (1985).
- [122] Rice, R. F. and Plaunt, J. R.: Adaptive Variable-Length Coding for Efficient Compression of Spacecraft Television Data, IEEE Transactions on Communications, Vol. 16, No. 9, pp. 889-897 (1971).
- [123] Witten, I. H., Moffat, A., and Bell, T. C.: Managing Gigabytes: Compressing and Indexing Documents and Images, Morgan Kaufmann (1999).
- [124] 今井龍一, 中條覚, 松山満昭, 重高浩一, 石田稔, 浜田隆彦: 道路関連情報の流通のための位置参照方式に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol. 69, No.

- 1, pp. 34-46 (2013).
- [125] 中條覚, 柴崎亮介: レーンレベルの位置参照方式具体化へ向けて, 第 13 回 ITS シンポジウム (2015).
- [126] Schützle, R. and Frank, J.: ROSSATE D5.4 Aggregated test report including detailed test reports version 1.0 (2010).
- [127] Ebdndt, R., Touko Tcheumadjeu, L. C.: An approach to geometry-based dynamic location referencing, *European Transport Research Review*, Vol. 9, No. 38 (2017).
- [128] Schutzle, R.: Validation of “Location Referencing”-Methods, University of Stuttgart (2012),
available from <<https://sciencedocbox.com/Geography/116528173-Validation-of-location-referencing-methods.html>>. (2021 年 9 月確認)
- [129] Transport Network ITS Spatial Data (TN-ITS), available from <<http://tn-its.eu>>.
- [130] 道路構造令 (改正平成 23 年 12 月 26 日 政令 424 号) (2011).
- [131] 愛知県建設部: 道路構造の手引き (2011).
- [132] TomTom, OpenLR™ White Paper Version 1.5 revision 2 (2012).
- [133] Sperduti, A. and Starita, A.: Supervised neural networks for the classification of structures, *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 8, No. 3, pp. 714-735 (1997).
- [134] Micheli, A.: Neural network for graphs: A contextual constructive approach, *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 20, No. 3, pp. 498–511 (2009).
- [135] Bruna, J., Zaremba, W., Szlam, A., and LeCun, Y.: Spectral networks and locally connected networks on graphs, *International Conference on Learning Representations (ICLR2014)* (2014).
- [136] Kipf, T. N. and Welling, M., Semi-supervised classification with graph convolutional networks, *International Conference on Learning Representations (ICLR2017)* (2017).
- [137] ISO 26262-1:2018: Road vehicles – Functional safety – Part 1: Vocabulary (2018).
- [138] ISO/PAS 21448:2019 Road vehicles – Safety of the intended functionality (2019).

業績リスト

1. 査読付きの学術論文誌

1.1. 本論文に関わる論文

関口隆昭, 加藤博光, カメラ映像における閲覧者と被写体の関係に基づくプライバシー保護システムの提案と評価, 情報処理学会論文誌, Vol. 47(8), pp. 2660-2668, Aug. 2006

関口隆昭, 永井靖, 名越末男, 正嶋博, 福永良一, 車載地図更新向け列指向データ圧縮の高速化, 情報処理学会論文誌(CDS), Vol.7(1), pp.1-9, Jan. 2017

関口隆昭, 丸三徳, 尾崎友哉, 天谷真一, カーナビ連携車両制御のための経路情報変換の高精度化, 情報処理学会論文誌(CDS), Vol.8(2), pp.56-65, May. 2018

1.2. その他の論文

山本秀典, 鮫嶋茂稔, 関口隆昭, 加藤博光, 由良淳一, 高汐一紀, 環境適応サービスを狙いとしたミドルウェア相互接続の一方式, 電気学会論文誌C, Vol. 128(8), pp. 1327-1332, Aug. 2008

丸三徳, 関口隆昭, 林新, 天谷真一, 車両のレーン変更を考慮した経路探索方式, 情報処理学会論文誌(CDS), Vol.8(2), pp.66-73, May. 2018

2. 査読付きの国際会議

2.1. 本論文に関わる査読付き国際会議

Takaaki Sekiguchi, Hiromitsu Kato, Privacy Assuring Video-based Monitoring System with consideration of Browsing Purposes, International Symposium on Applications, and the Internet Workshops (SAINT 2005), pp. 464-467, Jan. 2005

2.2. その他の査読付き国際会議

Takaaki Sekiguchi, Youichi Koyama, Kenji Fujikawa, Yasuo Okabe, Kazuo Iwama, Hierarchical path QoS on a QoS-based multicast protocol SRSVP, Proc. 2002 Workshop on High Performance Switching and Routing (HPSR 2002), May 2002.

Hiroaki Kawamichi, Takaaki Sekiguchi, Shigetoshi Sameshima, Hiroyuki Morikawa, Kazunori Takashio, Opportunities and Issues Relating to Middleware Technologies for Context-aware Services (2), Proceedings of SICE Annual Conference 2004 (SICE2004), pp. 2704-2708, Aug. 2004

Shigetoshi Sameshima, Hiroaki Kawamichi, Hiromitsu Kato, Takaaki Sekiguchi, Hiroyuki Morikawa, Kazunori Takashio, Hideyuki Tokuda, Opportunities and Issues Relating to Middleware Technologies for Context-aware Services, Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC2004), pp. 5667-5672, Oct. 2004

Hidenori Yamamoto, Shigetoshi Sameshima, Takaaki Sekiguchi, Hiromitsu Kato, Hiroyuki Morikawa, Tomonori Aoyama, Junichi Yura, Kazunori Takashio, Hideyuki Tokuda, Service Interoperability by Middleware Technologies for Context-aware Service, Proceedings of SICE Annual Conference 2005 (SICE2005), pp. 783-787, Aug. 2005

3. 査読のない国内会議（研究会など）

3.1. 本論文に関わる口頭発表

関口隆昭, 永井靖, 名越末男, 正嶋博, 福永良一, 車載地図更新向け列指向データ圧縮の高速化, 情報処理学会研究報告コンシューマ・デバイス & システム(CDS), 7(1),1-9 (2017-01-26)

関口隆昭, 丸三徳, 尾崎友哉, 天谷真一, カーナビ連携車両制御のための経路情報変換の高速信頼化, 情報処理学会研究報告コンシューマ・デバイス & システム(CDS), 2017-CDS-20(12),1-8

3.2. その他の口頭発表

関口隆昭, 藤川賢治, 岡部寿男, 岩間一雄, QoS 保証マルチキャストプロトコル SRSVP における階層化 PathQoS, 第 102 回 マルチメディア通信と分散処理研究会 (DPS 研究会), Mar. 2001

関口隆昭, 福本恭, 三熊亜弓, 古谷雅年, 通信品質を考慮したプラント監視データ転送プロトコルの開発, 平成 14 年電気学会全国大会論文集, pp. 384-385, Mar. 2002.

関口隆昭, 福本恭, 三熊亜弓, 通信品質を考慮したインターネット経由の遠隔監視, 全国水道研究発表会講演集, Vol. 53, pp. 534-535, April 2002

関口隆昭, 加藤博光, 大久保訓, 宮尾健, 広域監視制御システムのための適応型高信頼通信手法, 平成 15 年電気学会全国大会論文集, pp. 447-448, Mar. 2003

関口隆昭, 加藤博光, 河野克己, 大久保訓, 宮尾健, 美浦直太, 広域システム統合を想定した上水道 Web 監視制御システムの提案, EICA 環境システム計測制御学会, vol.8(2), pp.33-36, Sep. 2003

山本秀典, 関口隆昭, 加藤博光, 鮫嶋茂稔, 門田昌哉, 由良淳一, 高汐一紀, 徳田英幸, 異種ミドルウェア間連携を実現するユビキタス情報プラットフォームの研究, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2005) シンポジウム論文集, Vol.2005(6), pp. 673-676, Jul. 2005

段清柱, 清水淳史, 関口隆昭, トリガベース音声対話システムのアーキテクチャ提案, 第 13 回情報科学技術フォーラム (FIT2014) 講演論文集, Vol.13(1), pp. 211-212, Aug. 2014

近藤明宏, 松本貴士, 関口隆昭, 阿部憲幸, スマートフォン連携カーナビゲーションシステムのブラウザ活用による走行規制技術の開発, 第 13 回情報科学技術フォーラム (FIT2014) 講演論文集, Vol.13(1), pp. 189-190, Aug. 2014

丸三徳, 関口隆昭, 林新, 天谷真一, 車両のレーン変更を考慮した経路探索方式, 情報処理学会研究報告コンシューマ・デバイス & システム(CDS), 2017-CDS-20(11),1-7

4. 技術資料

関口隆昭, カメラ監視とプライバシー保護の両立を図るシステム, 月刊自動認識 6月号, 日本工業出版, 2006