

RFID を活用した ITS プラットフォーム構成と その応用に関する研究

富樫 宏謙

博士(情報学)

総合研究大学院大学
複合科学研究科
情報学専攻

平成 24 年度
(2012)

2012 年 9 月

本論文は総合研究大学院大学 複合科学研究科 情報学専攻
5 年一貫制課程 博士論文審査会にて発表した博士論文である

博士論文 審査委員:

山田 茂樹(主査)	国立情報学研究所／総合研究大学院大学
米田 友洋	国立情報学研究所／総合研究大学院大学
計 宇生	国立情報学研究所／総合研究大学院大学
鯉渕 道紘	国立情報学研究所／総合研究大学院大学
田 学軍	愛知県立大学大学院 情報システム専攻

Construction of ITS platform based on RFID
and its applications

Hiroaki TOGASHI

DOCTOR OF PHILOSOPHY

Department of Informatics,
School of Multidisciplinary Sciences,
The Graduate University for Advanced Studies(SOKENDAI)

2012

September 2012

This paper is presented in evaluation for the doctoral thesis
(The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI),
Department of Informatics)

Judging committee of Doctoral Thesis

Shigeki Yamada (committee chairman)	National Institute of Informatics/ The Graduate University for Advanced Studies
Tomohiro Yoneda	National Institute of Informatics/ The Graduate University for Advanced Studies
Yusheng Ji	National Institute of Informatics/ The Graduate University for Advanced Studies
Michihiro Koibuchi	National Institute of Informatics/ The Graduate University for Advanced Studies
Xuejun Tian	Faculty of Information Science and Technology, Aichi Prefectural University

論文要旨

現在、安全・安心な道路交通環境の実現を目的として様々な ITS(Intelligent Transportation System)関連システムが開発・研究されている。具体的には、VICS(Vehicle Information and Communication System)を用いた渋滞情報システムや ITS スポットサービスによる情報提供、レーダを用いた衝突防止システムや車載のカメラを用いたレーンキープアシストシステムなどが存在し、これらのシステムは実用的ないし実用に近いレベルにある。一方で、各サービスが独立した機器により実装されているため、新たなシステムの利用には新たな機器を車載することが必要となっている。各種のサービスを独立した機器により実現・検討している現状は新たなサービスの実用化に対する阻害要因となっている。

こうした現状に対し、各種のサービスにおいて利用されている機器の機能について考えると、その多くは共通していることから、一定の基本機能を持つプラットフォームを構築できると考えた。このプラットフォームを活用して様々なサービスを提供することでサービスを普及しやすくするとともに、新たな多種のサービスの出現が期待できる。プラットフォームが備えるべき機能は路側機器の個体識別、データ通信、測距、車両の状態取得などが挙げられ、このうち、車両の状態取得については車載のセンサを用いるのが適当である。その他の基本機能は路側機器により実現することになるが、路側機器の要求条件をさらに検討すると、これらを一つの機器で実現可能な機器のうち、高密度に路側に配置可能な機器は RFID(Radio Frequency Identification)等に絞られ、機器の大きさや費用対効果について検討することで、提案プラットフォームでは RFID を採用している。さらにアクティブ型 RFID を利用することで車両から情報を取得する際の「質問⇒応答」といったプロセスを省略でき電波の有効活用が可能である。また、アクティブ型 RFID の一種であるマルチホップ RFID を利用することでより広い範囲への情報提供・収集が可能となる。こうした点から、提案手法ではマルチホップ RFID を活用して ITS プラットフォームを構築する。

また、各種のアプリケーションをプラットフォーム上で実装するにあたっては、アプリケーション固有の課題の解決や、既の実現され得ているアプリケーションを提案プラットフォーム上へ移植するための検討を行うことが必要であ

る。本研究では ITS 関連システムのうち、レーンキープアシストシステムと、情報収集・提供サービスについてこれらの課題を検討することにより、提案プラットフォームの実現可能性とその実用化に際した課題を検討する。

プラットフォームの機能に関連して、本論文では路側 RFID を利用した位置推定手法として、以下のアルゴリズム的特徴を持つ手法を提案した。

1) 推定精度の向上を実現するため、提案手法では各 RFID の組み合わせに対し、それらを結んだ直線を RFID の位置と RFID-アンテナ間の距離に基づいて内分または外分する点(内外分点)を利用している。2) 複数の内外分点を次数の異なる重みづけ関数により統合し、重みづけ次数の増加による統合結果の収束をもとに各アンテナの位置を推定する。この重みづけにおいて、車両の近くに位置する RFID から求められた内外分点に、より大きなウェイトを与えている。

屋外の道路環境にて位置推定実験を行った結果、提案手法は RFID を道路の両側に 0.5m 間隔で配置し、アンテナを 8 本車載することで誤差の平均値を 0.7m に抑えられる事が判明した。車線方向の誤差に着目することで、提案手法は移動中の車両において車線の認識が可能であると結論付けられた。

また、プラットフォーム上で実装されるアプリケーションとして、本稿ではレーンキープアシストシステムとマルチホップ RFID を活用した情報収集・提供システムについて検討した。レーンキープアシストシステムについては、RFID を用いた環境に適用できる既存の動作モデルが存在しないため、新たな動作モデルを提案した。レーンキープアシストシステムは車両と RFID の距離から路肩との接近度合いを求め、接近度合いをいくつかの段階に分類することで適切な操作を起動し、車線からの逸脱を防止する。提案したレーンキープアシストシステムについてシミュレーションによる評価を行った結果、レーンキープアシストシステム自体は、支援操作がシステムにより自動的に起動される場合において、適切な動作をすることが確認された。同時に、実用的には RFID の通信距離向上や距離計測精度の向上が課題であることも明らかとなった。

また、従来の RFID システムで課題となっていた通信距離不足に対応するためマルチホップ RFID を活用した情報提供システムについて検討した。マルチホップ RFID を活用することでサーバ・クライアントシステムを必要としないプローブ情報の収集と提供が可能になると考えられる。このように提案システムの応用シーンについて検討を行うことで、マルチホップ RFID を活用した情報提供システムは有用性の高い事が明らかとなった。

これらのことより、RFIDを活用してITSプラットフォームを構築することの実現可能性、特にアプリケーションの実装可能性が明らかになった。同時に、提案プラットフォームの活用により、既存のサービスと比較してアプリケーションの有用性の向上が期待される。

RFIDを活用したITSプラットフォームを実用化する際の課題はいくつか挙げられるが、主な点はRFIDを活用した位置推定精度の向上とRFIDの情報通信速度の向上である。しかし、Zigbeeの現状を考えればRFIDの通信速度も数100kbpsまでは達成可能であるし、マルチホップRFIDの特性を活用し、RFIDが相互に実際の電波状況や受信強度を観測することで測位精度も向上が期待できる。また、提案プラットフォームの展開可能性について検討することで、本論文で検討した以外のサービスや、歩行者など自動車以外の利用についても実現可能性のあることが判明した。したがって、提案プラットフォームは大きな可能性を持っていると結論付けた。

Abstract

Currently, many systems related to ITS (Intelligent Transportation System) are studied aiming to achieve safety and comfortable transportation. Some of them are ready for practical use or already put to practical use. For example, congestion information providing system using VICS (Vehicle Information and Communication System), information providing system using ITS spot service, clash avoidance system using radar, lane keeping assistance using vision system etc.. However, they are using purpose-built equipments and car owner should purchase another set of equipments whenever he or she wants to install new systems. This situation disturbs new services to be ready for practical use.

Against this situation, we are considering to install a single set of equipments and implements several services utilizing this platform. We consider that this platform makes it easy to adopt newly appeared services or helps ITS related system to be widely used. By considering basic function utilized in several services, some of them are common among each other and they can be merged to single platform and the platform should equip basic functions such that (a) identification of roadside equipment, (b) data communication, (c) distance measurement, and (d) obtainment of vehicle status (vehicular velocity, movement etc.). Among these basic functions, obtainment of vehicle status should be achieved by utilizing on-car sensors. For other basic functions, it should be achieved by road-side equipments, and road-side equipments should be small and cost effective, in order to be easy to place in high density. RFID (Radio Frequency IDentification) is the one example that achieves the required functions for road-side equipments. Active type RFID based data retrieval can omit "Request and reply" and data congestion can be reduced. Moreover, multi hop RFID can overcome the problem of communication distance. Therefore, this research aims to achieve road-side platform based on multi-hop RFIDs.

We should also consider issues related to implementing several applications on the proposed platform, or specific issues related to the

applications. Among several ITS related systems, this paper considers about Lane Keeping Assistance Systems and information providing / collection systems, aiming to discuss feasibility of the proposed platform and its issues related to be ready for actual use.

For the required function of the proposed platform, new position estimation scheme based on RFIDs is considered. It equips a position estimation algorithm for moving vehicles based on RFIDs placed on roadsides and lane boundaries, and multiple on-car RFID receiver antennas. To achieve higher level of location accuracy, the algorithm proposes two novel ideas: (1) compute pair-wise estimations of on-car antennas using the RSSI of all pairs of received RFID signals, and (2) use a dynamic weighting function to assign higher weights to the positions estimated based on RFIDs closer to the receiver antennas. The results obtained from our field experiments indicate that the proposed method achieved 0.7-meter localization accuracy for the position estimation when RFIDs were placed at 0.5-meter intervals and a vehicle has 8-antennas. Analysis of localization accuracy in road-width direction revealed that the proposed method allows a moving vehicle to recognize which lane it is in.

This paper discuss about applications based on the proposed platform. For example, we consider about LKAS(Lane Keeping Assistance System) based on RFIDs. Since existing vehicular operating model cannot be applied to the proposed platform, a new LKAS is proposed, and it was evaluated through computer simulation. Results of the computer simulation revealed that the proposed system was practical, in case that supporting operation is automatically launched by the LKAS. However, some improvements related to RFID schemes are required for practical use

Another consideration is about information providing system utilizing Multi-Hop RFID scheme. A Multi-Hop RFID scheme enables information provision systems provide “probe information” since they can exchange their information with each other at every hop. Although some problems remain to be considered, the proposed system is advantageous in several ways; It can provide traffic congestion information in real time without requiring a large server-client

system.

These results revealed that proposed platform has enough feasibility and several applications can be implemented based on this platform, and usability of applications can be improved compared to the existing services.

Some issues to be solved before practical use of RFID based ITS platform and major ones are improvement of localization accuracy and communication speed. However, communication speed of RFIDs can be increased to some hundred kbps, by considering current performance of Zigbee. Localization accuracy can also be improved by utilizing multi-hop RFIDs in such a way that they can observe actual radio wave conditions (or received signal strength) between each other. Moreover, we found that several systems other than we considered in this paper can also be implemented on proposed platform and this platform can be used not only by vehicle, but also pedestrians etc.. Therefore, we conclude that this platform has large extensibility.

目次

1	はじめに	1
1.1	研究分野の概況.....	1
1.2	プラットフォーム化のアプローチ	2
1.2.1	基本機能の抽出と統合可能性の検討	2
1.2.2	「プラットフォーム」化の課題	3
1.2.3	プラットフォーム構成手法の検討.....	3
1.2.4	ハードウェア的なプラットフォームの検討	5
1.3	アプリケーションの課題とプラットフォーム上での実装	6
1.4	本論文の構成	7
2	関連研究・技術.....	8
2.1	ITS プラットフォーム	8
2.1.1	ITS プラットフォームに関する検討の現状.....	8
2.2	RFID	9
2.2.1	RFID の近似技術	10
2.3	提案プラットフォームに関する技術・研究.....	10
2.3.1	プラットフォームの基本・応用機能に関する事例.....	10
2.3.1.A	ITS 関連機器の個体識別機能	10
2.3.1.B	ITS における情報提供・収集	11
2.3.1.C	測距機能	11
2.3.1.D	車両の状態取得.....	12
2.3.1.D.(I)	自身の移動を観測する手法.....	12
2.3.1.D.(II)	他者の移動を観測する手法.....	13
2.3.2	応用機能に関する事例.....	13
2.3.2.A	測位機能	13
2.3.2.A.(I)	単独測位	13
2.3.2.A.(II)	参照測位	15
2.3.2.A.(III)	第三者測位.....	16
2.3.3	プラットフォーム上で実装するアプリケーションに関する事例.....	16
2.3.3.A	レーンキープアシストシステムの現状.....	16
3	ITS プラットフォームの検討	18

3.1	プラットフォームの要求機能	18
3.2	提案プラットフォームの概要	19
3.3	アクティブ型 RFID を利用する利点と課題	20
3.4	RFID 配置手法の検討	21
3.4.1	車上・路側への配置機器による分類	21
3.4.2	平面上での配置による分類	23
3.4.3	鉛直方向における配置による分類.....	25
3.4.4	提案プラットフォームにて適用する手法.....	26
3.5	提案手法のコスト	27
3.6	まとめ.....	27
4	RFID による位置推定.....	29
4.1	要求条件	29
4.1.1	位置推定精度.....	29
4.1.1.A	走行車線の識別.....	29
4.1.1.B	立体交差での走行経路の識別	29
4.1.1.C	車両の制御.....	29
4.1.2	制約条件	30
4.2	関連手法と提案手法の関連性	31
4.3	提案する位置推定手法.....	33
4.3.1	位置推定手法の特徴	33
4.3.2	位置推定手法の実現手法	34
4.4	位置推定手法のアルゴリズム	35
4.4.1	相対速度を利用した車両位置の固定	38
4.4.2	2つの RFID による内外分点の決定	39
4.4.3	内外分点群からのアンテナ位置の推定.....	40
4.4.4	アンテナ位置からの車両中心位置の推定	41
4.4.5	車両の移動ベクトルを利用した推定結果の補正	42
4.5	屋外環境における実験と評価	43
4.5.1	実験の実施手法	43
4.6	提案手法の評価.....	45
4.7	既存手法との比較	49
4.7.1	移動体を対象とした既存手法との比較.....	49

4.7.2	重み付け手法による比較.....	52
4.7.3	次元数による比較.....	54
4.8	評価結果からの考察.....	54
4.8.1	受信する RFID の数, または車載アンテナ数の増加による改善	54
4.8.2	RFID-アンテナ間の距離と受信強度に関する検討.....	56
4.9	まとめ.....	58
5	レーンキープアシストシステム.....	60
5.1	提案手法の動作対象条件.....	61
5.2	提案システムの実現手法.....	61
5.3	制御段階の設定.....	62
5.3.1	ステアリング操作による車両動作モデル.....	63
5.3.2	ブレーキ操作による車両動作モデル.....	63
5.3.3	ステアリング操作とブレーキ操作の組合せによる車両動作モデル	63
5.4	パラメータの設定.....	65
5.4.1	ステアリング操作のパラメータ.....	65
5.4.2	ブレーキ操作のパラメータ.....	66
5.4.3	航跡指示モデルへのパラメータの組み込み.....	66
5.4.4	航跡指示モデルからの制御レベル判定条件の抽出.....	67
5.5	レーンキープアシストシステムのシミュレーション.....	70
5.5.1	評価実施項目.....	70
5.5.2	評価概要.....	71
5.5.2.A	各変数に対するシステムが成立するための範囲.....	71
5.5.2.A.(I)	シミュレーションにより得られた各変数の範囲.....	71
5.5.2.A.(II)	各変数の範囲に対する考察.....	71
5.5.2.B	道路形状による「実際の軌跡」の評価と考察.....	72
5.5.2.B.(I)	直線道路.....	72
5.5.2.B.(II)	車線変更(図 5.7 参照).....	72
5.5.2.B.(III)	交差点の左折(図 5.8 参照).....	72
5.5.2.B.(IV)	単一の曲線.....	73
5.5.2.B.(V)	連続する曲線(図 5.9 参照).....	73
5.6	歩行者(移動する対象)衝突回避システムへの拡張.....	74

5.7	まとめ	77
6	マルチホップ RFID を活用した情報提供・収集システム	79
6.1	情報提供システムにおいて扱われる情報の分類整理	79
6.2	情報提供・収集システムの概要	80
6.3	利用する機器とデータ交換	81
6.4	情報提供・収集システムの応用事例	82
6.4.1	歩行者，車両に対する注意喚起情報の提供	82
6.4.2	信号現示情報の提供	83
6.4.3	渋滞情報の収集と提供	85
6.4.4	緊急車両接近情報の提供	86
6.5	課題と対策例	87
6.5.1	情報の利用に関する共通的な課題	87
6.5.2	セキュリティについての課題	88
6.5.3	通信容量の課題	89
6.5.4	応用シーン特有の課題	94
6.5.4.A	歩行者，車両に対する注意喚起情報の提供	94
6.5.4.B	信号現示情報の提供	94
6.5.4.C	渋滞情報の収集と提供	95
6.5.4.D	緊急車両接近情報の提供	96
6.6	まとめ	97
7	結論	98
7.1	本研究の成果	98
7.2	今後の課題	100
7.2.1	プラットフォームとしての課題	100
7.2.1.A	RFID の性能に関する課題	100
7.2.1.A.(I)	データ通信に関する課題	100
7.2.1.A.(II)	測距機能に関する課題	100
7.2.1.B	RFID の利用に関する課題	100
7.2.1.B.(I)	利用するタグの種類に関する検討	100
7.2.1.B.(II)	利用する基本機能に関する検討	101
7.2.1.C	RFID の導入・保守に関する課題	102
7.2.1.C.(I)	RFID 設置手法に関する課題	102

7.2.1.C.(II)	RFID に関する費用負担の課題	102
7.2.2	応用機能・アプリケーションの課題	103
7.2.2.A	位置推定機能に関する課題.....	103
7.2.2.B	レーンキープアシストシステムに関する課題	104
7.2.2.C	情報収集・提供システムに関する課題.....	104
7.3	RFID の今後の動向	104
7.4	ITS プラットフォームの展開可能性.....	105
7.4.1	料金收受システム.....	105
7.4.2	車両の状態を用いた給油・充電の効率化	106
7.4.3	自動車(一般車両)以外への展開	106

図目次

図 3.1 本研究の関連機器, 基本機能とサブシステム	20
図 3.2 車上式概念図	22
図 3.3 地上式概念図	22
図 3.4 中央式概念図	24
図 3.5 境界式概念図	24
図 3.6 路面式概念図	25
図 3.7 空中式概念図	25
図 4.1 相対速度を利用した RFID 位置の固定	38
図 4.2 RFID の配置位置と内外分点	39
図 4.3 内外分点と推定した受信機位置の関係	41
図 4.4 推定したアンテナ位置と候補点, 車両推定位置との関係	42
図 4.5 走行コースの位置図	44
図 4.6 道路形状と配置間隔による位置推定誤差の比較	45
図 4.7 配置間隔ごとの位置推定誤差の比較(アンテナ本数=4 本)	46
図 4.8 車線方向の位置推定誤差	47
図 4.9 位置計算間隔の差による位置推定誤差の比較	48
図 4.10 提案手法と既存手法による, 位置推定誤差の比較	51
図 4.11 重みづけ手法による, 位置推定誤差の比較 (位置計算間隔=1 秒)	53
図 4.12 RFID 受信数と位置推定誤差の関係	55
図 4.13 RFID 配置間隔と受信 RFID 数の関係	56
図 4.14 車載アンテナ数と位置推定精度の関係	56
図 4.15 推定距離上限と位置推定精度の関係	57
図 5.1 提案システムにおける接近度合い判定の概念図	60
図 5.2 制御レベルの遷移モデル	63
図 5.3 ステアリング操作による車両動作モデル	64
図 5.4 組み合わせ操作による車両動作モデル	64
図 5.5 判定条件パラメータの概念図	67
図 5.6 $v=40(\text{km/h})$ における各制御レベルの変位グラフ	68
図 5.7 シナリオ:車線変更の実行結果(概念図)	72

図 5.8 シナリオ:交差点の左折の実行結果(概念図)	73
図 5.9 シナリオ:連続する曲線の実行結果(概念図)	74
図 5.10 簡素化モデルによる歩行者挙動の予測	75
図 5.11 ミクروسケールモデルによる歩行者挙動の予測	76
図 5.12 メソスケールモデルによる歩行者挙動の予測	76
図 6.1 提案システムにおける情報提供のイメージ	80
図 6.2 提案システムに関連する機器配置	81
図 6.3 注意喚起情報の提供(歩行者, 対向車等の存在)	83
図 6.4 信号現示情報の提供	84
図 6.5 渋滞情報の収集と提供	85
図 6.6 緊急車両接近情報の提供	86
図 6.7 車両の位置・走行経路と有用な情報の存在範囲	87
図 6.8 想定する道路環境	90
図 6.9 容量を求める通信の概念図	90
図 6.10 方位情報, 地名情報を用いた信号表示情報の提供	94
図 6.11 RFID の通信範囲と書き込まれる車両存在情報の量	95
図 6.12 緊急車両の走行経路情報の提供	96

表目次

表 1.1	プラットフォーム構成手法の比較	5
表 4.1	提案手法の仮想コード	37
表 4.2	車載機器一覧	43
表 4.3	走行コース概要.....	44
表 4.4	パラメータ一覧.....	44
表 4.5	手法ごとの位置推定誤差(位置推定間隔=1 秒)	50
表 4.6	受信強度と推定距離の関係	57
表 5.1	LKAS シミュレーションにて使用するパラメータの範囲	70
表 6.1	更新頻度による情報群の分類	79
表 6.2	通信容量の検討に用いたパラメータ	90

略語一覽

CPU	Central Processing Unit
DGPS	Differential GPS
DME	Distance Measuring Equipment
DSRC	Dedicated Short Range Communication
ETC	Electronic Toll Collection system
GPS	Global Positioning System
IEEE	the Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITS	Intelligent Transportation System
LAN	Local Area Network
LED	Light Emitting Diode
LKAS	Lane Keeping Assistance System
MIMO	Multiple Input Multiple Output
PPP	Precise Point Positioning
R/W	Reader and Writer
RFID	Radio Frequency IDentification
RSSI	Received Signal Strength Indication
ToA	Time of Arrival
VICS	Vehicle Information and Communication System
Wi-Fi	Wireless Fidelity
XML	eXtensible Markup Language

1 はじめに

1.1 研究分野の概況

本研究の対象分野である ITS とは、情報技術を様々な交通シーンに適用することで、より安全、便利な環境の実現を目標としたシステム(群)、およびその研究・開発分野である。現在、様々な ITS 関連システム^[1]が開発・研究されており、VICS^[2]を用いた渋滞情報提供システムや ITS スポットサービスによる情報提供^[3]、レーダを用いた衝突防止システム^[4]や車載のカメラを用いたレーンキープアシストシステム^[5]などが挙げられる。これらのシステムは実用化済み、ないし実用に近いレベルにあるものの、各サービスが独立した機器により実装されているため、新たなシステムの利用には新たな機器を車載することが必要となっている。

この現状について考えると、車両ユーザーとしてはサービスが追加/更新されるごとに車載機器の買い替え、ないし買い足しが必要であり、この費用負担が原因で新しいサービスの普及には時間を要している。インフラの提供者としては、新たな路側機器の導入ごとに実証実験に加え、導入後は路側に設置した機器の保守も行うことが必要なため、現実的には限られた種類の路側機器しか導入できない。サービスの提供者としては新たな機器を用いたサービスの普及に時間を要していることが利便性、収益性の両面における課題となっている。その上、サービスの提供者は路側機器の実証実験にも関与することが必要であり、新たなサービスの研究費用も高価となっている。したがって、各種のサービスを独立した機器により実現・検討している現状は新たなサービスの実用化に対する阻害要因となっており、何らかの形での統合が望ましいと考えられる。

ITS に関連したシステムは、車両制御を行うシステム(衝突防止システム、レーンキープアシストシステム etc.)と情報伝達を行うシステム(渋滞情報提供システム、ITS スポットサービス etc.)に大別される。これらのうち本研究では、車両制御を行うシステムのうち、レーンキープアシストシステムを、情報伝達を行うシステムのうち、情報収集・提供サービスを事例として検討することにより、提案プラットフォームの実現可能性とその実用化に際した課題を検討する。

1.2 プラットフォーム化のアプローチ

1.2.1 基本機能の抽出と統合可能性の検討

各種のサービスにおいて利用されている機器の機能について考えると、その多くは共通していることが判明した。例えば、レーンキープアシストシステムは(1)道路形状の認識、(2)車速、進行方向など車両の状態取得、そして(3)測位ないし測距、以上の3つが主要な機能であるし、渋滞情報提供システムでは(4)路側機器の個体識別、および(5)車両の存在認識が主要な機能である。

これら機能のうち、(1)道路形状の認識は(a)路側機器の個体を識別し、それらの位置関係を取得することで実現可能であるし、(3)測位においても(a)路側機器の個体識別によりその設置位置を取得し、測位計算を行うことができる。

(5)車両の存在認識も路側機器と車載機器間での(b)データ通信により実現可能である。(c)測距にはいくつか手法があるが、電波を利用する機器であればRSSIを用いることで実現可能である。

(d)車両の状態取得について考えると、車両の移動などは車両外部からの観測も可能であるが、ジャイロセンサや加速度センサなどを車載することで容易に、かつ外部からの観測と比較して高精度に取得することが可能である。また、燃料計など車両内部の状態把握は、基本的には車両外部からは観測できず、車両内部のセンサの利用が唯一の手段であるといえる。したがって、車両の状態取得は車載のセンサの利用が適当である。

これらのことより、(a)路側機器の個体識別、(b)データ通信、(c)測距、(d)車両の状態取得といった機能が各種のITSサービスを実現するために必要な機能であり、基本機能として位置づけられる。これらを一つのパッケージに統合し、これを用いて多くのサービスを実装することでサービスの普及しやすい環境が整備され、多種の新たなサービスの出現が期待できる。また、(1)道路形状の認識、(3)測位、(5)車両の存在認識といった機能は基本機能の組み合わせ、ないし応用により実現可能なため、プラットフォームの応用機能と位置づけられる。これらのうち(3)測位については多くのアプリケーションで利用されることから、本論文において詳細な検討を行い、その他については利用するアプリケーションの中で適宜検討する。

1.2.2 「プラットフォーム」化の課題

一般的に、アプリケーションが動作するために必要な機能(機能群)を備えたソフトウェア(ミドルウェア)またはハードウェアをプラットフォームと呼ぶ。これらは利用する機器に依存せず、ソフトウェアが主体となっている手法と、特定の機器を組み合わせて構成するハードウェアが主体となる手法に大別される。本論文では、前者をミドルウェア的なプラットフォームと呼び、後者をハードウェア的なプラットフォームと呼ぶ。

ITS 関連システムにおいて、基本的な機能の統合によるプラットフォーム化に関する研究はほとんど行われていないのが現状である。原因として、一つの機器で測距とデータ通信を同時に行うことの難しさが考えられる。例えば、Wi-Fi^[6]機器を利用するとこれらを同時に実現できるが、電波干渉の問題で設置可能数が限定されるため、高精度(誤差 0.1m 程度)な位置推定は実現困難である。

もう一つの原因として、高精度な測位/測距と高速・大容量のデータ通信が独立した機器ではあるものの、既の実現されていることが挙げられる。具体的には、軍事用 GPS^[7]は既に 1m 程度の測位精度を実現しており、Wi-Fi を用いたデータ通信は 100Mbps 程度の通信が実用化されている。一方で、GPS は市街地では精度が劣化する、トンネルなどでは利用できないといった特性が存在し、測位に要する時間も長い^{*1}が課題である。Wi-Fi は電波混雑の影響で通信容量を削減する努力が行われているのが実状であるため、現在の高機能な機器によって各サービスを統合することは環境的に難しいと考えられる。

しかし、前出の基本機能をもつ機器を用いることでこうした課題を解決したプラットフォームの構成は実現可能である。一例をあげると、RFID はタグの ID およびタグ内に格納された情報を電波によりやり取りする技術であり、データ通信と受信強度による測距を行うことが可能である。こうした機器はいくつか存在しており、いずれかの機器を用いることで ITS 関連システムを実装可能なプラットフォームが構成できると考えられる。

1.2.3 プラットフォーム構成手法の検討

実用化までの費用と時間について考えると、ミドルウェア的なプラットフォ

^{*1} GPS による測位では、衛星の軌道データを認識している状況でも 1.5 秒程度の時間を位置推定に要する^[8]。

一ムは既に一定の性能を持ち、普及した機器を利用することが多いため比較的短期間で、導入当初から安価に利用することが可能である。一方、**ハードウェア的なプラットフォーム**は必ずしも普及品のみで構成されないため、実用化当初は導入費用が高くなりやすい。また、利用する機器の性能を実用段階に到達させるための研究・開発期間が必要となる場合もあるため、実現には時間を要することが考えられる。

導入後の保守・機器更新の観点では、両手法ともに既に利用する機器の普及がある程度進んだ段階であるため、利用する機器の絶対数がコストの決定要因となると考えられる。したがって、**ミドルウェア的なプラットフォーム**、**ハードウェア的なプラットフォーム**の間に大きな差は存在しないといえる。

既存サービスの移行について考えると、**ミドルウェア的なプラットフォーム**は規模の小さい修正のみでサービスを移植することが可能である。これに対し、**ハードウェア的なプラットフォーム**ではサービスを異なるハードウェア上で動作するように移植するため、規模の大きい修正が必要となり相応のコストが発生すると考えられる。したがって、**ハードウェア的なプラットフォームの実現**にはプラットフォームへの移植により高精度な位置推定を利用できるなど、移植によるメリットをサービス事業者に提供することが必要である。

利用する機器の種類に着目して検討すると、**ミドルウェア的なプラットフォーム**は普及品の変化に適応しやすい点がメリットであり、使用する車載機器、路側機器の種類は時々的情勢に応じて変化する可能性がある。よって、車両ユーザー、道路管理者はこの変化に応じて異なる種類の機器を導入することが必要となる。これに対し、**ハードウェア的なプラットフォーム**では利用する機器の種類が基本的には変化しない。したがって、車両ユーザー、道路管理者はプラットフォームの導入時に購入した機器と同じ種類の機器を利用し続けることが可能である。このため、路側機器や車載機器の安定的な供給が期待できる。

技術発展への貢献を考えると、**ミドルウェア的なプラットフォーム**は実用期間の延長による各機器の性能向上は期待できるが、導入時点で既に一定以上の性能を持つ機器により構成するため、導入に際しての技術開発はあまり発生しない。対して、**ハードウェア的なプラットフォーム**は導入に際して、既に実現されている性能とプラットフォームとして要求される性能の差を埋めることを

目的とした技術研究の発生頻度が比較的高い。したがって、導入に際しての技術開発が発生しやすく、この成果を他の分野への応用することも期待できる。また、実用期間の延長による機器の性能向上はミドルウェア的なプラットフォームの場合と同様に期待できる。

これらをまとめたのが表 1.1 である。本論文では導入後の機器種類の継続性と、技術発展の貢献にメリットの高いハードウェア的なプラットフォームを構成する手法について検討する。

表 1.1 プラットフォーム構成手法の比較

	ミドルウェア的手法	ハードウェア的手法
実用化までの費用	普及品のため安価	導入初期は高価
実用化までの期間	比較的短期間	研究・開発が必要なため 長期化しやすい
導入後のコスト	機器の絶対数に依存するため同等	
既存サービスの移行	小規模な修正のみ	修正規模は大きくなりやすい
利用機器の種類	変化しやすい	基本的には、同一
技術発展への貢献	導入のための技術開発は 基本的に行わない	導入時点で開発した技術を 他分野に応用可能
性能の向上	実用期間の延長による機器の性能向上が期待できる	

1.2.4 ハードウェア的なプラットフォームの検討

ハードウェア的なプラットフォームを構成するにあたり、利用する機器について検討を行う。ここで、プラットフォームを構成する機器の要求条件は(a)路側機器の個体識別、(b)小-中容量(データ 1 件当たり数 kB 以内)^{*2}のデータ通信、(c)測距、(d)車両の状態取得であり、車載のセンサにより(d)車両の状態取得を、路側機器により(a)路側機器の個体識別、(b)小-中容量のデータ通信、(c)測距といった機能を実現する。路側機器の条件についてさらに検討すると、位置推定などでは高密度に機器を配置する場合がありますと考えられるため、比較的安価

^{*2} 車両への情報収集・提供などを主な用途とするため、やりとりされる情報はバイナリデータないしテキストデータを対象としている。

で路側に配置しやすいことが望ましい。前述のように RFID はプラットフォームを構成可能な機器で、配置に関する要件も満たしているが、同様に測位/測距とデータ通信などを同時に行うことのできる機器はいくつか存在している。中でも Zigbee^[9]は RFID と近似した技術であるが、通信速度は数 100kbps～1Mbps を、通信範囲は 100m 程度をそれぞれ実現しており、現状では RFID よりも高性能である。しかし、規格に着目するとアクティブ型 RFID, Zigbee はいずれも IEEE 802.15.4 系列の規格であるため互換性が高く、両者はほぼ同一のものであるとみなすことができる。したがって、本研究では「RFID を活用した ITS プラットフォーム」として検討を行う。

1.3 アプリケーションの課題とプラットフォーム上での実装

プラットフォームの実用化に際しては、各種のアプリケーションについてその固有の課題を解決することや、アプリケーションをプラットフォーム上で実装する際の課題についての検討が必要である。このため、本論文では車両の制御を行うシステムのうちレーンキープアシストシステムについて、また提案プラットフォームを用いた情報提供・収集システムについてそれぞれ検討を行っている。

レーンキープアシストシステムについて述べると、その大部分は画像認識により実現されており、いずれも視界不良時には動作が困難になるといった課題を抱えている。この課題の解決には画像によらない手法の採用が有効であるが、そのために用いられる機器はレーンキープアシスト専用の設備となりやすく、ユーザーへの普及は難しいと考えられる。本機能を提案プラットフォーム上で実装することにより視界不良の課題と、ユーザーへの普及といった課題の双方が解決できると期待できる。しかし、既に存在しているレーンキープアシストの動作モデルは利用する機器の特性に大きく依存しているため、提案プラットフォーム上への移植は困難である。したがって、提案プラットフォームを用いてレーンキープアシストシステムを実現するためには、新たな動作モデルを構築することが必要である。

ITS に関連した情報提供・収集システムについて述べると、渋滞情報の提供

に用いられる VICS^[2]がすでに実用化されており、DSRC^[10]を用いた ITS スポットサービス^[3]、路車間通信や車車間通信^[11]による情報提供などが研究段階にある。このうち、VICS は情報送信専用のシステムであり、車両からの情報収集には利用できない。ITS スポットサービスは DSRC を用いるため、車両はスポット付近でしか情報を取得せず、路側機が高価なため高密度に配置した利用方法には不向きである、車車間通信は隣接する車両が存在しなければデータ交換ができないというように利用可能な箇所に制約が存在している。また、路車間通信は路側機器が高価なため高密度での配置は困難であるし、車車間通信、路車間通信ともに規格としては Wi-Fi と近似しているため、電波干渉の課題も Wi-Fi と同様に懸念される。提案プラットフォームでは、RFID を路側に高密度に設置することで道路全体をカバーしている。費用的には現時点では 1 個数千円程度であるが、測距/測位やデータ通信を一つの機器で実現できるため、費用対効果は高い*3といえる。

1.4 本論文の構成

以降の構成は以下の通りである。まず、2 章において本研究の要素技術と関連する研究の現況について俯瞰する。3 章では提案プラットフォームの構成について、物理的配置や設置費用などの検討を行い、4 章において RFID を用いた位置推定手法を検討する。4 章で位置推定手法の検討を行うことで、プラットフォームの路側機器に要求される機能が一通りそろったことになる。これを前提に、プラットフォームの応用事例として車両制御システム、情報提供システムの応用システムについて検討を行うことで提案プラットフォームにおける各種アプリケーションの実現可能性を検討する。本論文では、5 章にてレーンキープアシストシステムについて、6 章ではマルチホップ RFID を用いた情報の収集・提供システムについて利用シーンをもとにした検討を行う。7 章にて本研究の成果と課題を整理するとともに、提案プラットフォームのさらなる展開可能性について言及して本論文の総括とする。

*3 例えば、太陽電池を用い、LED により発光する道路鋌の単価は 27000 円である^[12]。

2 関連研究・技術

本章では、はじめに ITS プラットフォーム、RFID といった本研究に関連する主要な技術の概説と提案プラットフォームの基本機能とその応用機能、その上で実装される各アプリケーションの現状について俯瞰する。

2.1 ITS プラットフォーム

ITS に限らず、アプリケーション(応用システム)を動作させるために必要な機能群を実装したソフトウェアまたはハードウェアを一般的にはプラットフォームと呼ぶ。こうしたプラットフォームはその構成手法により、ハードウェアに依存せずソフトウェア(ミドルウェア)を主体とするミドルウェア的なプラットフォームと、利用するハードウェアを特定し、その機能により実現するハードウェア的なプラットフォームに大別される。

また、本論文で検討している ITS プラットフォームは、前述のような ITS 関連システムを動作させるために必要な機能群を実装したソフトウェアまたはハードウェアを示した語である。

2.1.1 ITS プラットフォームに関する検討の現状

ITS において情報提供や測位を行うためのプラットフォームを提案した研究は国内外でほとんど行われていないのが現状である。EUPITS^[3]は ITS プラットフォームについて検討している事例で、その時期に普及している、比較的安価な機器をプラットフォームに組み込むことを目標としたミドルウェア的なプラットフォームの研究例である。ミドルウェア的なプラットフォームは普及品の変化に適応しやすい点がメリットであるが、使用する機器を追加・変更するたびにプラットフォームへの組み込み作業が発生する点が課題である。これに対し、本研究でも検討しているハードウェア的なプラットフォームはプラットフォームを構成する機器を明確に定義している。このためハードウェア的なプラットフォームを採用することで不足している性能を実現するための研究意識に明確な目的付けが可能となり、ミドルウェア的なプラットフォームと比較して技術発展への貢献度は高いと考えられる。また、ハードウェア的なプラットフォームは利用する機器の種類が一定であるため、特に車載機器の種類はほと

んど変更されないと考えられる。したがって、実用化の際には車載機器の普及や安定的な供給が期待できる。

2.2 RFID

RFID^{[14][15]}は測位とデータ通信を同時に行える機器である。RFID タグ内に記憶できるのは ID(個体識別番号)に加え数 KB 程度であるが、データの送受信は可能である。また、アクティブ型 RFID は一定間隔で情報を発信するため、車両側からの問い合わせ動作を省略でき、高密度で配置してタグから情報を送出する用途に適している。一方で、現状での通信速度は最大でも 100kbs 程度であるため、大容量のデータについてはインターネットアクセスなどを利用してタグの ID から検索・取得することも検討すべきである。

また、RFID は電波を利用した機器であるため RSSI を用いた位置推定が可能である。ToA による位置推定などと比較すると位置推定精度は劣るものの、タグの配置数を増やすことで位置推定精度の向上は期待できる。

RFID は主に動作の方式と使用する周波数により以下のように分類される。動作の方式では、読み取り側からの電波をエネルギーとして動作するパッシブ型、バッテリーを内蔵し読み取り側からの電波に応答して電波を発信するセミパッシブ型、バッテリーを内蔵し自発的に電波を発信するアクティブ型に、使用する周波数では 125kHz~135kHz を使用する LF 帯, 13.56MHz を使用する HF 帯, 860MHz~960MHz を使用する UHF 帯, 2.5GHz を使用するミリ波にそれぞれ分類される。

これらの RFID のうち、現在、通信距離を長く取れるのは UHF 帯の RFID であり、パッシブ型でも 10m 程度の通信距離を持つが、湿度などの条件により通信距離が変化しやすいのが課題である。一方、HF 帯の RFID は電波の透過性が高く水中でも読み取ることが可能であるが、通信距離はパッシブ型の場合で 1m 程度、アクティブ型でも数十 m である。

また、アクティブ型 RFID のうち、マルチホップ通信を可能としているものを特に「マルチホップ RFID」と呼ぶ。これらのタグにおいて、タグに格納された情報はバケツリレー方式により相互に交換される。この特性を利用することで、従来課題となっていた通信距離不足を解消することが可能である。バケツ

リレーによる情報交換は特にプローブ情報の交換に適しており、さらに RFID システム単体での情報提供・収集が可能となる。

2.2.1 RFID の近似技術

RFID と近似した技術として、Zigbee^[9], Bluetooth^[16]等が挙げられる。Zigbee は CPU やメモリを搭載したノードであり、通信速度は数 100kbps, 通信範囲は 100m 程度と RFID より高機能であるが、その分価格も RFID より高い。Bluetooth は通信機器のみであり、独立したノードとしては利用できない。通信速度は 1Mbps が実現されるなど高速であり、通信範囲も 100m 程度と広い。

Zigbee と RFID をさらに詳細に比較すると、Zigbee の規格は IEEE 802.15.4-2003 に基づくものであり、アクティブ型 RFID の規格は IEEE 802.15.4f に基づくものである。このように俯瞰すると、Zigbee と RFID の違いは現在実装されている機能の差であり、これが価格の差にも反映されていることになる。Zigbee で一般的なマルチホップ通信やセンサ付きのノードといった機能も一部のアクティブ型 RFID には実装されており、これらはほぼ同一であるとみなすことができる。

2.3 提案プラットフォームに関する技術・研究

2.3.1 プラットフォームの基本・応用機能に関する事例

2.3.1.A ITS 関連機器の個体識別機能

ここでは、個体識別機能について主に ITS にて利用されている機器について現状を述べる。

現在、主に ITS にて用いられている通信機器は VICS^[2]機器、DSRC^[10]機器、であり、研究途上にあるものとしては路車間通信機器、車車間通信機器などが挙げられる。このうち、VICS の路側機器は個体を識別できない。

この他の ITS 関連機器としてはカーナビゲーションシステムなどに用いられる GPS^[7]、衝突回避に用いられるレーダ^[17]が挙げられるが、GPS では衛星の個体識別はできるものの受信機の識別は難しく、またレーダは反射対象の個体を識別することができない。

その他の機器について述べると、インターネットアクセスに用いられる Wi-Fi^[6]機器は DSRC 機器、車車間・路車間通信機器と同様に、互いの個体を識

別することが可能である。

2.3.1.B ITSにおける情報提供・収集

ITS に関しては、さまざまな情報収集・提供システムが検討されており、そのうちいくつかはすでに実用化されている、ないし実用に近いレベルに存在している。

VICS^[2]を用いた情報提供システムはすでに実用化され、各種のカーナビゲーションシステムで利用されているが、VICS は放送型の通信システムであり車両からの情報を収集する目的には利用できない。また、データフォーマットについて考えると、VICS のデータフォーマットはバイナリ列であるため、XML^[18]のように構造化されたテキストデータと比較すると新たなサービスで利用するための拡張は困難である。

ITS スポットサービス^[3]は DSRC を用いて車両に情報を提供するサービスであるが、情報を送受信できる車両はスポット付近に存在する車両に限定される。DSRC の通信速度は 1Mbps 程度と高速であるが、路側機器が高価なため多くの数を設置することは難しい。

車車間通信^[11]は車両が相互に情報をやり取りする通信形態である。したがって、自車の付近に車両のいない状況では他車を介した情報の取得ができない。路車間通信^[11]は車両と路側機器の間で情報をやり取りする通信形態である。付近に車両の存在しない状況でも路側機器から情報を取得することが可能であるが、利用には路側インフラの設置が必要である。よって、導入コストは車車間通信よりも路車間通信の方が高価である。

路車間通信、車車間通信の規格化については、両者とも DSRC を中心とした検討が行われている。既に国内では実験用のガイドラインが策定されており、路車間通信と車車間通信の共用化についても検討されている。国際的な規格化^[19]については現在 Car-2-Car Communication consortium^[20]による VSC International workshop^[21]を中心に検討中であり、IEEE802.11p + IEEE 1609 が有力である。

2.3.1.C 測距機能

ITS に関連した測距機器として、代表的な機器は衝突回避に用いられるレー

ダ^[17]等である。レーダの測位精度は数 cm 単位と非常に高精度であるが、反射対象が存在しなければ距離を測定できない。

ITSに限らず広く用いられている機器として、Wi-Fi^[6]機器や DSRC^[10]機器では ToA ないし RSSI を用いて測距が可能である。RSSI は周辺的环境条件により変化しやすいため、測距精度は ToA による手法の方が RSSI による手法よりも高い。ToA による測距は送信側と受信側で時刻の同期ができなければ正確な測位はできないが、RSSI による測距は電波を利用する機器であれば利用可能である。したがって、RFID や VICS 等でも RSSI による測距が可能である。

2.3.1.D 車両の状態取得

車両およびカーナビゲーションシステムには各種のセンサが搭載されており、車速、進行方向等にとどまらず各種の状態を把握することが可能となっている。また、車両内部には制御に必要なセンサ(エンジン回転数センサやステアリング角度センサなど)も搭載されているが、これらのうち、ほとんどは車両外部からの観測は困難であり、車両の外部から観察できるものは車両の移動などに限定される。本章では、車両(移動体)の移動を観測する手法についてさらに詳説する。

車両(移動体)の移動ベクトルの観測は主にジャイロセンサや加速度センサ、レーザスキャナ、車載カメラ等を用いて実現されている。中でもジャイロセンサ、加速度センサは比較的安価であり、計測誤差はジャイロセンサが概ね 0.001 deg/sec 以内^[22]、加速度センサが 0.05m/s² 以内^[23]と性能的にも高度である。また、移動ベクトルを認識する手法では自身の移動を観測する手法と他者の移動を観測する手法に大別される。

2.3.1.D.(I) 自身の移動を観測する手法

自身の移動を観測する手法として、ジャイロセンサを利用した事例^[24]では自律航法(Dead Reckoning Navigation)により車両の移動ベクトルを推定し、位置推定結果を補正している。加速度センサを利用した事例^[25]でも自律航法を用いており、歩行者の移動の観測を可能としている。ジャイロセンサや加速度センサを用いた自律航法はカーナビゲーションシステムに実装されるなど広く普及している手法であるが、航続距離が延びるに従って推定誤差が大きくなる点が課題である。これに対し、GPS^[26]や可視光通信^[27]により提供される位置情報

を用いて移動ベクトルの推定誤差を改善する手法が存在する。

自律航法以外の手法として、レーザスキャナを用いた事例^[28]では目標物との距離データ系列を用いて車両の移動ベクトルを観測している。

2.3.1.D.(II) 他者の移動を観測する手法

他者の移動を観測する手法は主に車載カメラを用いており、ステレオカメラをロボットに搭載した事例^[29]では歩行者の移動を観測することで追従走行を実現しているが、視界不良時に利用できない点が課題である。RFIDを用いた手法^[30]も存在し、車載のアンテナによりRFIDを持つ歩行者の移動方向を推定しているが、正しく移動を観測できる範囲は車両の進行方向±10度の範囲に限られる。

2.3.2 応用機能に関する事例

2.3.2.A 測位機能

車両の位置を推定する測位機能は主に測距機能と個体識別機能を用いることで実現でき、車両の移動を観測することで推定精度が向上できる。ここでは、車両に限らず物体の位置を推定する測位についての事例を述べる。

物体の位置推定にはGPSやWi-Fi、セルラシステム、DME^{*4}^[31]、さらにRFIDなど様々な機器が利用されている。測位方式としては自身の位置を単独で測位する「単独測位」、基準点・参照点を用いて自身の位置を測位する「参照測位」、基地局などが他者の位置を測位する「第三者測位」に大別される。本章では、主にToA、RSSIなどにより求めた距離を用いて位置推定を行う手法^{*5}の既存研究を紹介する。

2.3.2.A.(I) 単独測位

GPS単独測位^[32]はGPSにおける基本的な測位手法であり、ToAにより求めた衛星との距離を利用して三辺測量^[33]により対象の位置を推定する。改良型PPP^[32]はこれを改良する手法であるが、距離観測において対流圏遅延や電離層

*4 DMEは主に航空用の装置で、パルス信号が航空機とDME地上局の間を往復する時間により航空機と地上局の距離を測定している

*5 これらの手法はRange-based手法のうちLateration手法に分類され、そのうちRSSIにより求めた距離を用いる手法はAttenuation手法とも呼ばれる

の影響を取り除くことで誤差を改善しているため、不確実な誤差の生じる RSSI を用いた距離推定に対する同様の改良は困難である。また、GPS は測位に要する時間が長い点も課題であり、衛星の軌道データを認識している状況でも 1.5 秒程度、衛星の軌道データを取得してから測位する場合には 30 秒以上^[8]の時間が測位に必要である。

精度の高い DME を用いた事例^[34]では三辺測量を基本とした位置推定手法を提案し、飛行体による位置推定実験を行っている。実験結果としては水平方向の誤差に対して鉛直方向の誤差のバイアスが大きく、高さ方向において高い推定精度が要求される事例では無視できない値となっている。提案手法のように機器を多数配置することで数の効果によるバイアスの改善は期待できるが、水平方向に対して高さ方向の推定誤差が大きくなる傾向は残るため、立体交差において車両の位置する道路を誤判断する課題は残る。

MIMO セルラシステムを用いた手法^[35]では複数のアンテナを持つ基地局と複数のアンテナを持つ移動局の間の ToA によりノード間の距離を推定し、移動局の位置推定を行っている。通信範囲が 1.5km 程度の環境で数 m レベルの位置推定精度が得られているが、位置推定において移動局上のアンテナの位置関係を考慮していないなど改良の余地は残されている。

Wi-Fi の受信強度を用いた事例として PlaceEngine^[36]が挙げられる。PlaceEngine ではノード位置と距離の逆数を用いた重みづけにより対象の位置を推定しているが、同時に受信データの分布に着目して利用するノードを絞り込むことで位置推定精度を向上している。さらに、過去の位置推定に用いた受信データを蓄積し、これを位置推定に利用することで推定誤差を改善している。一方で、過去の位置推定回数が少ない箇所では誤差が大きくなるため、通過台数の少ない箇所での位置推定精度は低くなり、車両の制御に必要な推定精度が得られないと予想される。

RFID を利用した手法も存在し、ROCRSSI^[37]や動くロボットを対象とした事例^[38]、パッシブタグを利用した事例^[39]が存在する。ROCRSSI では gridscan^{*6}を用いて位置推定を行っている。Lim らによる動くロボットを対象とした事例で

*6 位置推定を行う領域をあらかじめいくつかの格子状領域(grid)に分割し、実際の受信状況から物体がどの grid に位置するかを推定する手法である

は、ロボットに搭載された受信機と床面に配置したパッシブ型のタグを用い、取得した RFID の配置された位置の最大値と最小値の平均をとることでロボットの位置を推定している。物体の移動速度や移動方向を求めるために位置推定を行っているため、位置推定の段階では物体の移動を考慮していない。位置推定精度はタグを 0.1m 間隔で三角格子状に置いた環境で誤差が最小 0.009m、四角格子状に 0.1m ごとに置いた環境での誤差の平均値は約 0.02m である。

Moeni による Passive タグを利用した事例は、床面に格子状に配置されたパッシブ型のタグを用いて、取得した RFID の設置された位置の重心を求めることで受信機の位置推定を行う手法である。位置推定を行う対象は低速で移動する物体であることから移動の考慮は特にされておらず、位置推定精度はタグを 0.6m または 0.3m ごとに四角格子状で配置した環境で、誤差の平均値が約 0.2m である。

2.3.2.A.(II) 参照測位

GPS 相対測位^[32]は求める点と基準点での搬送波の位相を観測し、未知の点と基準点を結ぶ 3 次元ベクトルを求め、未知点の位置推定を行う手法である。これを改良した手法が DGPS^[32]であり、基準点からの距離や、距離を補正するための情報を参照することで未知点での推定精度を向上している。したがって、DGPS の利用には常時接続環境が必要であり、トンネル内などでの利用は難しい。

地上から疑似的に GPS 信号を送信するシュードライト^[40]を活用した手法も DGPS 測位を応用した手法である。シュードライトを空港に設置して実験した結果では高さ方向の誤差が改善され、測位結果の 95%は高さ方向の誤差が 2m 以下であった。一方で、市街地での利用においてはマルチパス、シュードライト信号の干渉などによる測位精度の悪化が課題である。

RFID を用いた手法も多く存在し、それらは受信機に対して位置が固定されたタグを参照点として利用している。位置推定アルゴリズムに着目すると SSDV^[41]は最小二乗法を利用した手法であり、LANDMARC^[42]やそれを 3 次元空間に拡張した 3-D LANDMARC^[43]は k 近傍法(k-nearest neighbor 法)を利用した手法である。

2.3.2.A.(III) 第三者測位

物体の位置検出や追跡目的では他者の位置を測位する手法が多く見られており、赤外線センサや画像センサ、レーダ機器、RFIDなどが利用されている。赤外線センサ^[44]や画像センサ^[45]を用いた手法は物体の追跡が主目的であるため、位置推定精度は数 m 程度である。赤外線センサや画像センサは遮蔽に弱く、センサ機器と対象物の間に遮蔽物が存在すると位置推定は行えない。

レーダネットワーク^[46]のようにレーダを利用した手法は精度の高い測距と位置推定が可能であるが、得られる結果はレーダ機器を基準とした相対位置であるため、絶対位置への座標変換にはレーダ機器または対象物の絶対位置が既知であることが必要である。またレーダにはIDのような機能がないため、対象物の位置や形状は認識できても個体を識別することはできない。

RFIDを活用した手法にも詳細な位置推定を行う事例が存在し、その多くは参照タグを用いて実現している。RADAR^[47]やPRM/KF^[48]は最小二乗法に基づいた手法であり、参照タグの受信強度と未知点における受信強度から未知点の座標を求めている。ECOLOLOCATION^[49]は実際に観測したデータとタグの位置関係を利用する手法で、これらの情報とあらかじめ定義された車両移動経路の順序木を比較することで物体の位置推定を行っている。

2.3.3 プラットフォーム上で実装するアプリケーションに関する事例

ここでは、提案プラットフォームを用いて実装するシステムに関して、既存の技術と関連研究について述べる。本論文ではレーンキープアシストシステムと情報提供・収集システムについて検討しているが、このうち情報提供・収集システムに関する事例については、2.3.1.B章「ITSにおける情報提供・収集」において紹介した内容と重複するため、そちらを参照されたい。

2.3.3.A レーンキープアシストシステムの現状

レーンキープアシストシステムの動作方式は以下の3通りの手法に大別され、それぞれの概略を述べると以下のとおりである。

「警告送出機能」・・・路肩・車線境界への接近度合いに応じて運転者へ警告を送出するが、システムは車両の操作に関与しない。

「操作支援機能」・・・路肩・車線境界への接近度合いに応じて運転者へ警告を送出する。これを受けた運転者の操作をトリガとして、システムにおいて支援操作を起動する。

「自動操作機能」・・・路肩・車線境界への接近度合いに応じてシステムが自動的に支援操作を起動する。

これらのレーンキープアシストシステムにおいて、現在もっとも研究が進んでいるのは画像認識による警告送出機能^[50]や自動操作機能^{[51][52][53]}である。しかし、視界不良などの原因により白線を認識できなければレーンキープアシストは有効に機能することができないのが課題である。こうした問題を解決すべくレーンマーカー^[54]等画像によらない方法も研究されているが、レーンキープアシスト専用の設備という側面が強く、特にドライバーへの普及には動機として乏しいため実用化されていないのが現状である。多種のアプリケーションに適用できる RFID の活用によりこうした弱点を克服できるが、RFID を活用した操作支援システムは倉庫など限られた範囲での利用にとどまっている^[55]など本格的な実用化には至っていないのが現状である。また、各種のレーンキープアシストシステムは利用する機器の特性に依存したモデル構築を行っているため、提案プラットフォームに適用することは困難である。したがって、提案プラットフォーム上でレーンキープアシストシステムを実装するためには新たな制御/判断モデルの構築が必要である。

3 ITS プラットフォームの検討

本章では、ITS プラットフォームを構築するにあたり、要求される機能と実現するための機器について検討を行う。冒頭でも述べたように、提案プラットフォームは RFID を活用して実装している。

3.1 プラットフォームの要求機能

本論文で扱う応用例について考えると、レーンキープアシスト機能においては測距機能と車速など車両の状態を把握する機能が実現には重要な機能である。情報提供システムとしては車両相互、もしくは車両と路側機器間のデータ通信機能が重要な機能である。また、取得した情報を車両側で選別するためには車両の位置推定機能と進行方向など車両の状態を把握する機能が必要であり、位置推定の実現には測距機能と路側に設置された機器の個体識別機能が重要な機能である。

総括すると、プラットフォームが備えるべき基本機能は以下の通りであると考えられる。

- (a) 測距機能
- (b) 個体識別機能
- (c) 小-中容量のデータ通信機能(車車間 or 路車間)
- (d) 車両の状態(車速、進行方向など)を認識する機能

これらのうち、(d)車両の状態を認識する機能については路側の機器で実現する手法も考えられるが、車載のセンサを利用したほうが安価かつ高性能であるため、これを用いて実現することが妥当であると考えられる。

(a),(b),(c)について検討すると、現在 ITS 関連システムで主に利用されている機器は GPS, DSRC, Wi-Fi などが挙げられる。DSRC は通信距離が短いため長距離でのデータ通信への利用は困難である。この課題の対応には DSRC 路側機器を高密度に配置し、路側機同士でデータ交換を行うことが考えられるが、DSRC 路側機は高価なため道路全体に高密度で配置する利用方法は実用的でない。Wi-Fi は通信距離も 100m 程度は実現されており、高速なデータ通信が可能である。測距・測位にも利用可能であり測位精度は 1m 程度であるが、高精度

な位置推定には位置局と移動局での時刻同期や蓄積された受信状況の参照が必要であり、測位計算は数秒程度を要しているためリアルタイムな位置推定の実現は困難、GPS は位置推定専用の機器であり、数 m 程度の測位精度を実現しているが利用できる個所に制約が存在する。したがって、GPS 単独では ITS プラットフォームを構築することは困難である。路車間通信は規格的に Wi-Fi と近似しているため、電波干渉の問題が同様に懸念される。また、路側機器も RFID と比較して高価であるため路側に高密度で機器を配置することは困難である。

(a),(b),(c)の機能を実現できる機器について検討すると、位置推定などでは高密度に機器を配置する必要があると考えられるため、比較的安価で路側に配置しやすい機器でプラットフォームを構築することが望ましい。こうした点を考慮し、提案プラットフォームでは RFID を活用してプラットフォームを構築する。RFID は機器のサイズが小さいため高密度での配置には適しているし、様々な基本機能を 1 つの機器で実現できるため費用対効果は高いと考えられる。さらに、アクティブ型 RFID は RFID タグに格納されたデータを取得する際に受信機からの問い合わせ操作が必要ないため、情報通信の輻輳を軽減できる。また、アクティブ型 RFID の一種であるマルチホップ RFID の活用によりタグ内の情報更新を、受信機においてよりリアルタイムに認識することが可能である。こうした点から、提案プラットフォームではマルチホップ RFID を路側の機器として利用する。

3.2 提案プラットフォームの概要

提案プラットフォームの構成機器とその機能は以下の通りである。

A) マルチホップ RFID

- ・受信強度を用いた測距/測位機能
- ・タグに格納された ID による個体識別機能
- ・タグへの読み取り、書き込みによるデータ通信機能
- ・マルチホップ通信機能

B) 車載のセンサ

- ・センサデータを用いた、車速、進行方向など車両の状態取得

ここで、データ通信機能について考えると RFID 相互間でやり取りできる

情報容量は現状では 100kpbs 程度でありさほど大きくない。したがって、特に大容量のデータ通信については Wi-Fi などインターネットアクセス機器を利用することも実用的には考慮すべきである。

これらの基本機能を利用することで、例えば以下のような応用機能やアプリケーションが実装可能である。

- a) 受信強度による測距機能と ID により取得されるタグの配置位置、車速を用いた車両の位置推定(応用機能)
- b) マルチホップ通信と個体識別機能、推定した車両位置を用いた情報提供・収集システム(アプリケーション)
- c) 車両の推定位置と車速、ID により取得される道路形状を用いたレーンキープアシストシステム(アプリケーション)

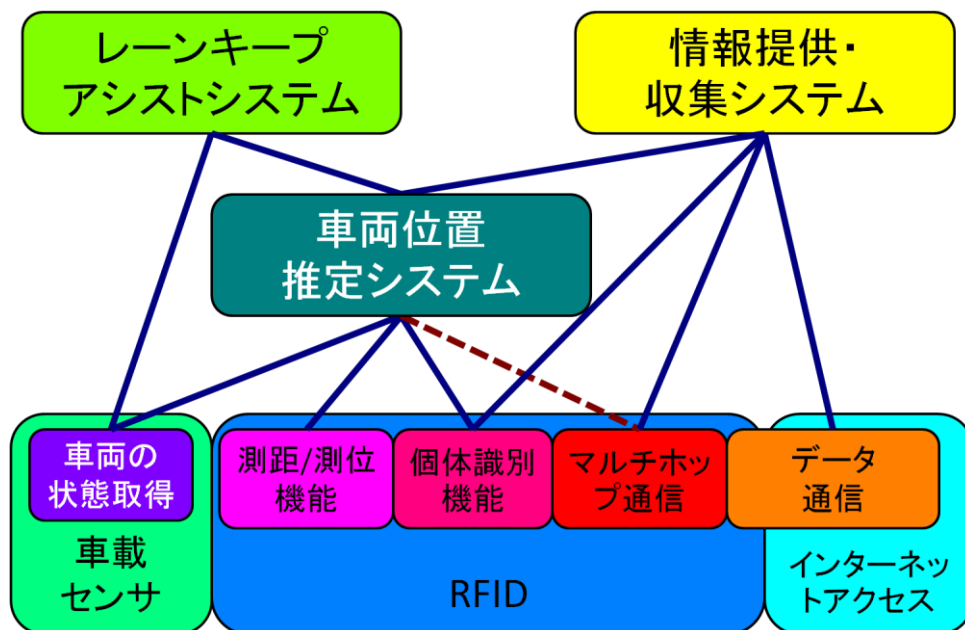


図 3.1 本研究の関連機器、基本機能とサブシステム

基本機能と応用機能、アプリケーションの関連構造を示したものが図 3.1 であり、4 章以降ではそれぞれの応用機能・アプリケーションについて検討を行う。

3.3 アクティブ型 RFID を利用する利点と課題

アクティブ型 RFID をプラットフォームとして用いる利点として、何もしなくてもタグが情報を送出する点が挙げられる。これにより質問-応答というプロ

セスを省くことができるため、輻輳の軽減が期待できる。同時に、独立して情報を発信することでも衝突の軽減が期待できる。さらに、マルチホップ RFID を利用すると通信距離の制限を克服することができる。同時に、マルチホップ RFID を活用することで RFID タグ内の情報更新をバケツリレーにより伝達することが可能となり、車両により速く情報更新があったことを通知できる。

アクティブ型 RFID をプラットフォームとして用いる際の課題は通信速度が 100kbps 程度と比較的低い事である。したがって、容量の大きい情報の送受信は実現が難しいと考えられる。しかし、送出する情報を ID 等に限定し、大容量のデータはインターネットまたは車載の記憶領域から取得することでこの課題は克服可能である。また、位置推定は RSSI を用いた手法に限られるため ToA 等の手法と比較すると精度が劣るが、タグを高密度に配置することで測位精度の向上が期待できる。

3.4 RFID 配置手法の検討

RFID を利用したプラットフォームの構築について、はじめに利用する機器の配置などについて検討を行う。RFID タグ/リーダの配置手法は以下の 3 軸により分類できる。

- (a) 車上・路側への配置機器による分類
- (b) 平面上での配置による分類
- (c) 鉛直方向における配置による分類

3.4.1 車上・路側への配置機器による分類

車上・路側への機器配置形態により、RFID をベースとする位置検出方式は以下の 2 方式に大分することができる。

車上式 (図 3.2):車載された RFID を路上のリーダが読み取り、位置情報を ID と一致する車両に送信することで車両が自車の位置を認識する方式

地上式 (図 3.3):車載されたリーダが路面の RFID を読み取り、自車の位置を認識する方式

車上式の場合、図 3.2 のように車上に「RFID」「ドライバーに提供する位置情報の受信装置」が、路側に「リーダ」「各車の位置を把握するサーバ」、さらに「位置情報を車両に送信するための装置」が必要となる。ここで得られた位

位置情報を車載の機器に記憶することでカーナビゲーションシステムとの連携などに活用することができる。車上に特別な受信装置を設けずに RFID・リーダ間の通信のみで実装する方法もあるが、アクセス制御が複雑となるため、実現は困難である。

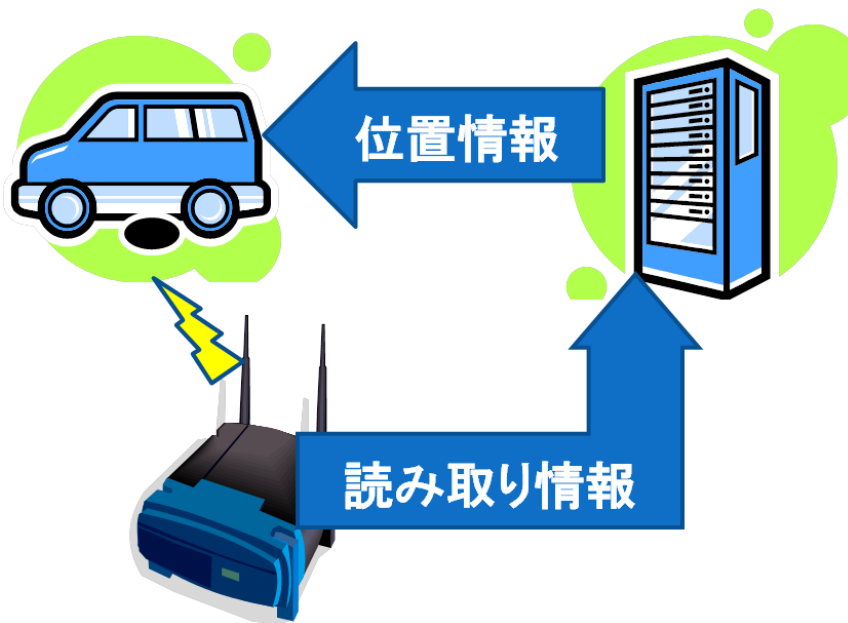


図 3.2 車上式の概念図



図 3.3 地上式の概念図

これに対し、地上式の場合は図 3.3 のように車上に「リーダ」が、路側に「RFID」が必要となる。路側の RFID に記憶された位置情報を読み込むことで自車の位置を把握し、車上で記憶することでカーナビとの連携などに活用する。受信し

た ID をカーナビで位置情報に変換する方法も考えられるが、ID 情報と位置情報の変換機能を持つソフトウェアの導入と、RFID の交換に対応するためのデータ更新機能の提供が必要となる。

RFID を読み取ってからドライバーが位置情報を得るまでのレスポンスタイムについて通信ホップ数を基にして比較すると車上式は RFID・リーダ・サーバ・受信装置の 3 ホップであるのに対し、地上式では RFID・リーダ間の 1 ホップとなり有利であることは概念図からも推測されたとおりである。

3.4.2 平面上での配置による分類

路側への RFID の配置は、平面上での配置による分類により以下の 2 方式に大分することができる。

中央式 (図 3.4):RFID を各レーンの中央に配置する方式

境界式 (図 3.5):RFID を各レーンの境界に配置する方式

中央式では、図 3.4 からも想像できるように読み取った RFID が車両の位置するレーンと直結している。計算処理により車両の位置するレーンを推定しなくてよいため、それによる誤差を考慮することなく実システムの設計・運用が可能である。ただし、RFID の読み取りに失敗するとその地点では車両の位置するレーンは把握できないということになるため、読み取り精度がシステムの成否を支配することとなる。

これに対して境界式では読み取った RFID は各レーン境界を示す情報とリンクしている。このため、車両の位置するレーンを推定するために計算処理が必要であり、また推定しやすくなるような RFID の配置・通信範囲の設計が必要である。これらを行っても計算による誤差は残ってしまう(誤差を実運用上の許容範囲に収める、ということは可能だと思われる)。通信範囲の設計によっては取得できる RFID の数が変動するのでケース・バイ・ケースでの最適な推定法の検討も必要となる。

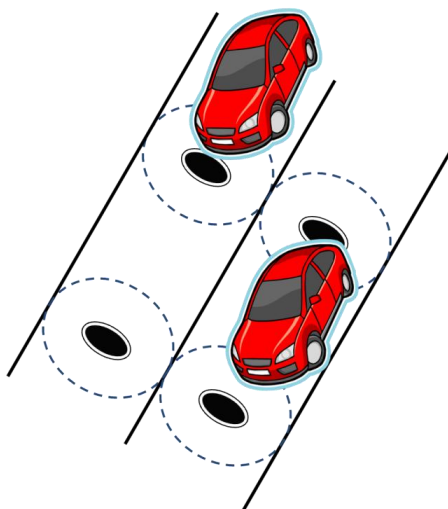


図 3.4 中央式の概念図

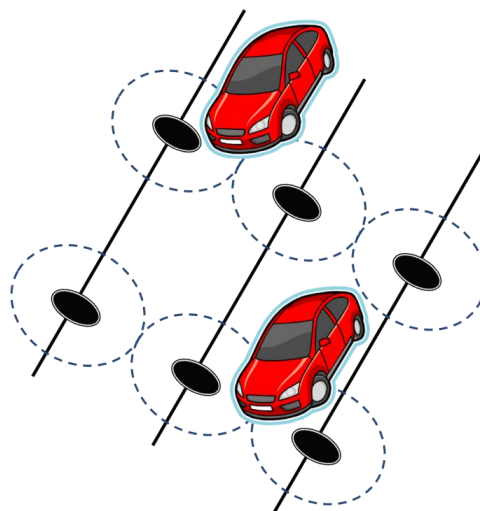


図 3.5 境界式の概念図

3.4.3 鉛直方向における配置による分類

3.4.2 項と同様に、鉛直方向における配置によっても分類することができる。

路面式(図 3.6):RFID を路面(車両の足元)に配置する方式

空中式(図 3.7):RFID を空中(車両の上空)に配置する方式

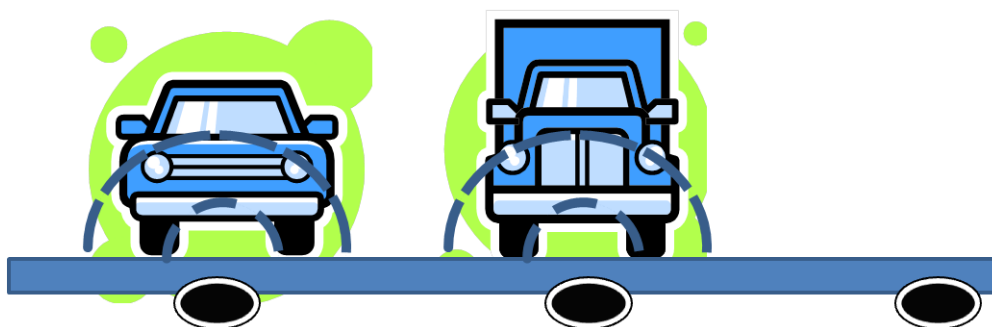


図 3.6 路面式の概念図

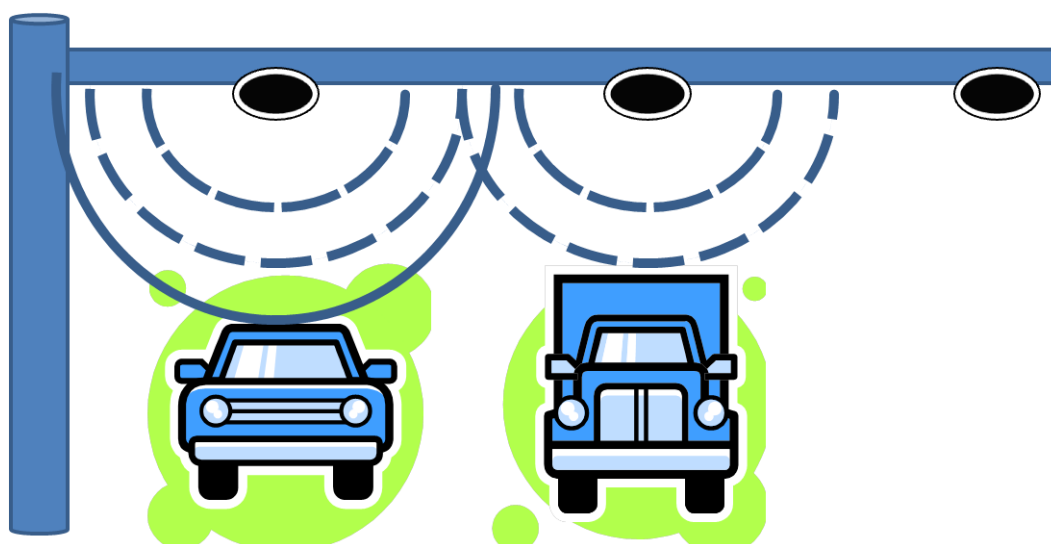


図 3.7 空中式の概念図

路面式では、図 3.6 から推測できる通りリーダ・RFID 間の距離が車種による影響を受けにくいこと、また車種による影響がレーン幅に対して小さいこと、この 2 点が特徴である。つまり、通信範囲の設計において車種の違いがレーン幅という条件により吸収されていると考えることができ、その結果 RFID の読み取り性能は車種によらないと考えることが可能である。

対して、空中式ではリーダ・RFID 間の距離が車種により影響を受け、しかもその影響がレーン幅に対して無視できない量となる点が問題である。車高の低

い車両では 1 つの RFID のみを取得するが、車高の高い車両では隣接するレーンの RFID も取得するため複数の RFID を取得する、というケースが考えられる。よってこうした差を通信範囲の設計に組み込むこと、またこの差により読み取り精度にも差が出ることを前提とする必要がある。

設置について考慮すると、路面式では地中に埋め込むことになるため、舗装工事の手順において RFID を復旧するという手順の追加が必要になる。同様に考えると配線を埋め込むことは困難であり、路面式においてはアクティブ型の RFID、RFID リーダの設置は難しいといえる。マンホールのように路面にスペースを確保して設置することも考えられるが、いずれにしても道路工事、舗装工事との兼ね合いを考慮することが必要である。

対して、空中式では RFID を空中に吊るためのポールなどの設備が必要となるが、それを設置してしまえば路面の状況に影響されずに運用することが可能である。また、アクティブ型の RFID の設置、RFID リーダの設置についてもポールに配線を収容することが可能なので実現が容易である。空中式の方が設置できる機器の自由度は高いといえる。

3.4.4 提案プラットフォームにて適用する手法

提案プラットフォームにおいては、車両が自律的に位置推定や情報取得を行うことが必要であると考えられる。したがって、車上式により機器の配置を行うことが適当である。

想定される応用事例について考えると、路肩や車線境界からの距離を取得することでレーンキープなどへの応用可能性が広がると考えられる。よって、路肩や車線境界にタグを配置する境界式を提案プラットフォームでは採用する。

RFID の設置について考えると、1m 程度の間隔でタグを配置する事例にも対応することが必要であると考えられる。よって、空中式による配置は 1m おきに空中にポールなどの設備を用意することが必要となるため、実用的には困難である。

3.5 提案手法のコスト

提案手法の機器配置手法の検討に続き、実際に機器などを配置する際のコストについて検討する。本章では、1km の延長があり、片側 2 車線(計 4 車線)の道路において、RFID を 1m 間隔に配置した場合の費用について、人件費などのコストを除いた機器自体の費用を検討する。現在、1 つの RFID タグの価格はおよそ 1000-2000 円程度であるから、RFID を導入する際のコストは 1000 万円程度である。この費用は土地代を除いた道路建設費のおよそ 1%程度^[56]である。

RFID の保守に要するコストについて考えるにあたり、さらに以下のように仮定する。1) RFID の内蔵バッテリーは使い切りのタイプ(100 円程度)で、寿命は 1 年である。2) RFID の寿命は 5 年である。すると、年間で約 5000 個のバッテリー交換と約 1000 個の RFID 交換^{*7}が必要となり、毎年 300 万円程度の保守費用がかかることになる。検討例の道路の舗装を補修する際には 1.5 億円程度が必要となる^[57]ため、この費用は道路保守費用の 2%程度となる。よって、RFID の導入、保守により発生する機器導入のコストは、道路の建設、保守に要する費用と比較すれば十分小さく、同時に施工することで実現可能が高いと考えられる。

車載の受信機について考えると、無線 LAN ルータで実装するようなアクセス制御が不要であるため、複数のアンテナを実装したとしても市販の無線 LAN ルータと同等の価格(1 万円程度)が実現できると予想できる。この価格は車両ユーザーの購入しやすい価格であり、普及に際して大きな支障とはならないと考えられる。

3.6 まとめ

本章では、提案プラットフォームの機器構成と、その物理的配置について検討を行った。提案プラットフォームはアクティブ型(マルチホップ)RFID と車載のセンサにより構成され、ITS 関連システムにおいて必須となっているデータ通信、測距、路側機の個体識別および車両の状態把握といった機能を実現している。物理的配置を検討した結果、車両が自律的に情報を収集するためには車上式による機器配置が必要であることが判明した。路側 RFID の配置について

*7 1 日あたりで考えると、毎日 14 個のバッテリー交換と 3 個の RFID 交換を行うことになる。

考えると、多種のアプリケーションでの応用を考えると車線境界への配置が、多種の車両での利用と高密度な配置での利用を考えると路面への配置がそれぞれ適当であると判明した。

実際の導入費用について延長が 1km、車線数が片側 2 車線ずつ(計 4 車線)の道路を事例に検討した結果、路側 RFID の導入費用、保守費用ともに道路の建設・保守費と比較して十分小さい事が判明した。車載機の価格も無線 LAN ルータ並みの価格の実現が期待できることから、提案プラットフォームの導入・保守費用は実用可能な値であると考えられる。

4 RFID による位置推定

現在、GPS を用いた位置推定手法が広く利用されているが、道路空間での利用を考えると立体交差などでは車両の位置する道路を正しく認識できない、トンネルなどでは位置推定自体行えないといった課題が存在する。GPS によらない手法も検討されているが、道路空間全体に適用可能かつ一定以上の精度を持つ手法は実現されていない。こうした課題の解決には位置推定に利用する機器を道路上に多数配置して推定精度の改善と利用可能範囲の拡大を行う手法が考えられるが、低価格でサイズの小さな機器でなければ実用的には困難である。RFID はサイズが小さいため物理的には多数配置する用途に適している。価格はアクティブ型 RFID で 1 個数千円程度であるが、ID 番号の活用により位置推定以外の用途にも利用できるため測位専用の機器と比較すると費用対効果は高い。こうした点に着目し、本論文では路側に設置したアクティブ型 RFID を用いた位置推定手法を提案する。

4.1 要求条件

4.1.1 位置推定精度

4.1.1.A 走行車線の識別

車両の走行している車線を識別するためには車線幅の半分程度が必要な推定精度と考えられる。したがって、標準的な車線幅(約 3m) の道路では 1.5m が達成すべき推定精度となる。

4.1.1.B 立体交差での走行経路の識別

立体交差など高さ方向に複数の道路が存在する環境で、車両の走行経路を識別するためには下の道路面から上の道路面までの距離の半分程度が高さ方向で必要な推定精度である。下の道路面から上の道路面までの高さは低いものでも 3m 程度であるため、1.5m 程度の高さ方向の推定精度が必要となる。

4.1.1.C 車両の制御

レーンキープアシストなど車両の制御を行うシステムについて、正常な制御

に必要な位置推定精度は明確に規定されていないため、以下のように 10 の整数乗を基準に精度目標を検討した。標準的な車線幅(約 3m) の道路中央を車幅 1.5m の車両が走行している場合、車両と路肩ないし車線境界までの距離は左右とも約 0.75m である。この環境では推定誤差が $10^0\text{m}=1\text{m}$ 以上存在すると車両の車線逸脱や路肩との接触を正しく認識できないため、車両の制御に必要な精度は $10^{-1}\text{m}=0.1\text{m}$ となる。

4.1.2 制約条件

道路空間において、RFID を利用して位置推定を行う際には以下のような制約条件が挙げられる。

(制約-1) 車両を対象とするため、その移動を考慮することが必要である。

提案手法はアクティブ型 RFID を利用するため、それらの電波の受信時刻はそれぞれ独立であり、移動する車両が電波を受信する位置もそれぞれ異なる。推定した車両の位置はある一つの時刻での値であるため、車両の移動を考慮しつつ時刻をそろえる手法の検討が必要である。

(制約-2) 道路は公共の空間であるため、RFID の配置箇所が制約される。

道路空間に設置される機器は RFID 以外にも存在するため、必ずしも RFID を自由に配置することはできない。このため、格子状に設置する一般的な場合と比べると位置推定に利用できる RFID の数が少なくなり、位置推定精度の悪化が予想される。したがって格子状の配置を前提とした手法をそのまま適用するのではなく、アルゴリズム面での改良などを行い精度の悪化を抑えることが必要である。

(制約-3) さまざまな道路構造に適応することが必要である。

道路空間を対象とすると、トンネル、勾配の変化する区間、立体交差などにおいても位置推定精度が大きく悪化しないことが必要となる。トンネルなどでは外部からの電波が届きにくいいため、推定精度の向上にはトンネル内に設置できる機器の利用が必要である。

勾配の変化する箇所において、車両の位置する平面を位置推定前に認識することは困難である。固定した平面を前提とする手法や平面上への投影を伴う手法では、車両の位置する面を正しく認識できないと誤差が大きくなると考えられるため、推定計算において平面を利用しない手法

を検討すべきである。

立体交差においては車両が位置する道路を正しく識別することが必要であり、4.1.1 章にて述べたような高さ方向の推定精度が要求される。

4.2 関連手法と提案手法の関連性

移動の観測に利用する機器のうち、最も普及しているものはジャイロセンサ^[24]や加速度センサ^[25]であり、これらはセンサを車載するだけで利用可能である。レーザ^[28]は路側に目標物を設置することが必要であり、目標物と車両の間に遮蔽物が存在すると利用できないため、道路全体での利用や複数台の車両が存在する条件での利用は難しい。車載カメラ^[29]は視界不良に弱く、夜間・悪天候といった条件では利用が困難である。RFID を用いた手法^[30]では対象物の移動を正しく観測できる範囲が狭いため、真横などに位置する対象物の移動観測には利用できない。よって、多様な環境での利用を考えるとジャイロセンサや加速度センサの利用が適当であり、現状ではジャイロセンサと加速度センサが 1 つのパッケージに実装されたジャイロ/加速度センサが安価で市販されていることから、提案手法ではジャイロ/加速度センサを利用している。

移動の観測手法に着目すると、自律航法は様々な機器に利用できる手法である。航続距離が延びることで誤差が蓄積する点が課題だが、この誤差は位置情報などを併用^{[26][27]}することにより改善できるため自律航法の有用性は高いといえる。また車両は速度の変化が多いため、自律航法の中でも角速度と速度を中心に求める手法^[24]よりも加速度^[25]を中心に求める手法の方が適している。これ以外の自身の移動を観測する手法や他者の移動を観測する手法は利用する機器の特性への依存度が高いため、アルゴリズムを異なる機器と組み合わせることは難しい。提案手法では自身の移動を観測する手法のうち、加速度を中心に求める方式の自律航法により車両の移動ベクトルを求めている。

位置推定に利用する機器に着目すると、GPS^[32]はトンネル内では利用できない点が課題である。シュードライト^[40]はトンネル内でも利用できるが、マルチパスや信号の干渉で測位精度が悪化する。航空用 DME^[34]を用いた手法は高さ方向の誤差が大きくなりやすいため、立体交差では正しく走行経路を認識できない。さらに GPS 衛星やシュードライト、DME 機器は高価なため、設置数の増

加による推定精度の改善は困難である。Wi-Fi^[36]やセルラシステム^[35]は価格的には高密度で配置できるものの、電波干渉の問題があるため数 m 間隔での配置は実用的ではない。赤外線センサや^[44] 画像センサ^[45]は遮蔽物が存在すると基本的には位置推定が行えないため、複数台の車両が存在する環境での利用には不向きである。レーダ^[46]を用いて推定される位置は相対位置であり、絶対位置の取得には座標変換が必要だが、レーダは反射物の個体を識別できないため単独測位では絶対位置の取得が困難である。RFID は単独測位、参照測位、相対測位いずれの手法でも利用でき、アクティブ型でも数千円と比較的安価である。またアクティブ型 RFID は自発的に電波を発信するため干渉が発生しにくく、数 m 間隔での配置が可能である。したがって、配置箇所の制約内であれば推定精度の改善を目的として配置間隔を調整することが容易なため、提案手法ではアクティブ型 RFID を採用する。

位置推定の方式について考えると、車両が移動する環境では車両に対して固定的な位置のタグは存在しないため、RFID による参照測位^{[41][42][43]}の応用は難しい。また、基準点において電波などの観測を必要とする手法^{[32][40]}は基準点の設置費用が高く、基準点を自由に増やすことは難しい。第三者測位のうち詳細な位置を推定する手法^{[47][48]}も受信機に対して固定的な位置の参照点を利用しているため、移動する車両が自身の位置を測位する目的での応用は困難である。ゆえに移動する車両で利用しやすく、高い推定精度が期待できる手法は単独測位であり、提案手法ではこれを採用する。

位置推定に利用するデータに注目すると、正確と思われる受信データの比率は位置推定を行う箇所によって異なるため、固定的な k 近傍法^{[42][43]}を用いたデータの絞り込みでは必ずしも推定精度を向上できない。受信状況も気象条件や道路の混雑度により変化するため、事前に計測した受信データ^{[37][42][43]}や蓄積した受信データ^[36]を参照する手法は全ての場合において有効性が高いとは限らない。あらかじめ定義した移動の順序木を利用する手法^[49]は位置推定の対象範囲が広がると順序木が複雑になりすぎるため、道路全体での応用は困難である。よって、道路環境で移動体の位置推定に有用なデータは実際の受信データのように位置推定時に計測するデータや、各機器の配置位置のようにほとんど変化しないデータに限定される。提案手法では実際の受信データ、ジャイロ/加速度

センサの計測値と RFID や車載アンテナの配置位置を用いて位置推定を行う。

位置推定精度については、RFID を用いた既存手法^{[38][39][42]}等で 1m 以内の位置推定誤差が実現されている。しかし RFID の配置に具体的な制約条件のある環境での検証は行われていないため、道路環境で同等の推定精度が実現できるかは未知である。高さ方向の精度に着目すると、三辺測量を基本とした手法^{[32][34]}では水平方向の誤差と比較して高さ方向の誤差が大きくなる傾向があり、立体交差などでは車両の位置する道路を正しく認識できない場合がある。RFID の位置など路面(付近)に存在する点と、重み付け関数を用いた位置推定手法^{[38][39]}では、RFID を設置した面の付近を中心に位置計算が行われるため、高さ方向の誤差が生じにくい。提案手法で用いる内外分点は路面付近に存在する点であり、これに重みづけを行って位置推定を行うため高さ方向の誤差が抑制できる。

このように俯瞰すると、移動する車両に適用でき、道路空間全体で利用可能な既存手法は少なく、Lim らによる事例^[38]や、Moeeni による事例^[39]などに絞られる。これらの手法はパッシブ型のタグを用い、低速で移動する物体を対象とした手法であるため、アクティブ型タグを利用し、車両を対象とする場合には受信時刻の差による車両位置の変化を考慮する必要がある。位置推定アルゴリズム自体も簡素であるが、RFID を格子状で高密度に配置した環境では高い推定精度を実現している。提案手法はこれらの手法に対し、アルゴリズム面の改良と車両の移動への対応を行うことで 2.2 章の制約条件の下で高い推定精度の実現を目指す。

4.3 提案する位置推定手法

4.3.1 位置推定手法の特徴

4.1 章でまとめた要求条件と 4.2 章でまとめた関連研究の現状に対し、提案手法は以下の特徴によりこれらを解決する。

(特徴-1) 内外分点の利用

提案手法では RFID の各組み合わせに対し内外分点を求め、これを位置推定に利用している。PlaceEngine^[36]のような重みづけ平均では誤差が大きくなりすぎると考え、RFID - アンテナ間の距離をより考慮した内外分点を用いることで精度を向上する手法を提案する(制約-2 への対応)。本手法は GPS^[32]

と比較して計算負荷が小さく、車載可能な計算機器でも十分利用可能であると考えられる。

また内外分点は RFID を結んだ直線上に位置するため、特定の平面に依存しない位置推定が実現できる(制約-3 への対応)。

(特徴-2) 次数の異なる重み付け関数の利用

提案手法では複数の内外分点を次数の異なる重みづけ関数により統合し、重みづけ次数の増加による統合結果の収束をもとにアンテナの位置を推定する。この重みづけにおいて、車両の近くに位置する RFID により求められた内外分点に、より大きなウェイトを与えており、重みづけ関数の次数を増加させることで車両から遠い RFID により求められた内外分点が次第に除外される。提案手法での絞り込みは固定的な条件を用いないため、 k 近傍法のように固定的な条件を用いる手法と比較して精度の高い絞り込みが可能である。

(特徴-3) 車両の移動を考慮

提案手法ではジャイロ/加速度センサから得られるデータから車両の移動ベクトルを推定し、これを用いて車両の移動を考慮した位置推定を実現する(制約-1 への対応)。対象が車両であり加減速の多い環境であるため、自律航法のうち加速度を中心に求める手法により移動ベクトルを推定している。

この移動ベクトルを用いて受信時刻の差による車両位置のずれの補正と、位置推定結果の補正を行っている。車両の移動ベクトルを重視して最終的な位置推定結果を求める手法は多くみられるが、移動ベクトルは航続距離の延長により誤差が累積するため、位置情報による補正などで誤差を削減する必要がある。これに対し、提案手法では RFID による位置推定とセンサにより求まる移動ベクトルの精度を同程度として扱うことで相互補完を行い、最終的な推定結果に反映している。

(特徴-4) 複数のアンテナを車載

提案手法では車両には複数のアンテナを設置し、これらの位置関係を基に車両の位置推定を行っている。車載したアンテナの数を増加させることで、推定精度の向上が期待できる。

4.3.2 位置推定手法の実現手法

提案する車両位置推定は、以下の手順により実現する。まず、路側や車線境

界に RFID を一定間隔で配置する。この配置間隔を短くすることで位置推定精度の向上が期待できる。提案手法で用いる固定的データは RFID の ID 番号と設置された箇所(緯度・経度・標高)の対応のみで、車上のシステムに格納する。この情報を用いて、受信した RFID の ID 番号から RFID の設置箇所(緯度・経度・標高)を取り出し、位置推定に利用する。このように設置した RFID から定期的に発信される電波の受信強度は、車載の複数のアンテナにより観測される。この受信強度を利用してアンテナ-RFID 間の距離を推定し、この距離を用いて車両位置の推定を行う。車両の移動ベクトルはジャイロ/加速度センサにより得られた加速度を中心に求めている。計測値はセンサ座標系での値であるため、重力加速度の方向の参照を中心にこれを測地座標系での値に変換し、変換後の加速度を積分することで移動ベクトルを求めている。

4.4 位置推定手法のアルゴリズム

提案手法をコード化したものが表 4.1 であり、各ステップの概要は以下の通りである。はじめに、ある基準時刻により車両位置の推定を行うため、車両の移動ベクトルを用いて RFID の位置を仮想的に移動し、車両の位置を基準時刻での位置に固定する。各 RFID の組み合わせに対する内外分点は 2 つの RFID の位置と、それぞれの RFID からアンテナまでの距離を用いて求める。各アンテナの位置は複数の内外分点を次数の異なる重みづけ関数により統合し、統合結果の変化をもとに動的に推定する。この動的重みづけにおいて、推定した距離の短い RFID から得られた内外分点には大きいウェイトが与えられ、重みづけ関数の次数を増加させることで距離の大きい RFID により得られた内外分点は次第に除外される。車両の中心位置はアンテナの推定位置と、それらの位置関係を利用して推定し、車両の移動ベクトルを用いて補正する。補正後の値が提案手法における車両位置の推定結果である。

以降では、必要に応じて以下の点・ベクトルを用いて提案手法のアルゴリズムを説明する。これらの点・ベクトルは測地座標系に基づく 3 次元座標で表現される。

ベクトルの基準となる原点: O

時刻 t_{n-1} から時刻 t_n の間に車両(移動体)が移動したベクトル: $\overrightarrow{v(t_{n-1}, t_n)}$

h 番目の RFID($RFID_h$)の, 実際に設置された位置: Q_h

i 番目の受信アンテナの位置: X_i (実際の位置), $X'_i(m)$ (推定位置, m は重みづけ関数の次数)

時刻 t における車両中心の位置: C_t (実際の位置), C'_t (推定位置),

C''_t (推定位置 C'_t を, 移動ベクトルをもとに補正した位置)

表 4.1 提案手法の仮想コード

```

1:   送信タグの ID から, RFID の設置されている位置座標を求める
2:   受信時刻と計算基準時刻の差分に応じ, 車両の移動ベクトルを利用して
   RFID の設置されている位置座標を仮想的に移動する
3:   for(int r=0;r< 車載された受信アンテナの数;r++) {
   //アンテナごとに実行する処理
4:   while(受信データから 2 つを選んだ組み合わせを全て行う){
5:     受信強度から RFID-アンテナ間の距離を求める
6:     求めた距離と RFID の位置から内外分点を求める
7:     ” 距離 A” , ” 距離 B” =RFID-アンテナ間の距離
8:   }
9:   重みづけ関数の次数=0
10:  while(求めたアンテナ位置が収束するまで){
   //実用的には計算時間を位置推定計算の間隔以内に収めるため,
   //次数の上限設定などが必要である
11:   ウェイト=(”距離 A”×”距離 B”)の -(重みづけ関数の次数)乗
12:   ウェイトの正規化(ウェイト=ウェイト/ウェイトの総和)
13:   求めた内外分点を, 設定したウェイトで統合することにより
   受信アンテナの位置座標を計算する
14:   重みづけ関数の次数を加算
15:   }
16: }
17: 全ての受信アンテナの位置座標を用いて車両中心位置を計算する
18: 前回の推定位置と観測した車両の移動ベクトルを用いて
   求めた車両中心位置を補正する
   //推定結果がない場合は、前回位置+移動を返す?
19: 補正された車両中心位置を { 緯度, 経度, 標高 } の形式で返す

```


4.4.1 相対速度を利用した車両位置の固定

アクティブ型の RFID を用いたシステムでは各 RFID の電波発信時刻が異なるため、車両が移動する場合には RFID からの電波を受信する位置も図 4.1(a)のようにそれぞれ異なる。ここで相対速度を利用し、図 4.1(b)のように車両の代わりに Q_1, Q_2 に設置された RFID をそれぞれ P_1, P_2 へ仮想的に移動させることで、 Y の位置を位置計算の基準時刻 t_0 での位置に固定できる。これを点 Q_h に設置された RFID からの電波を車両で受信した時刻が t_h だと一般化すると、移動後の点 P_h は車両の移動ベクトルを用いて式(1)のように求められる。

$$\overrightarrow{OP_h} = \overrightarrow{OQ_h} - \overrightarrow{v(s_h, t_n)} \quad (4-1)$$

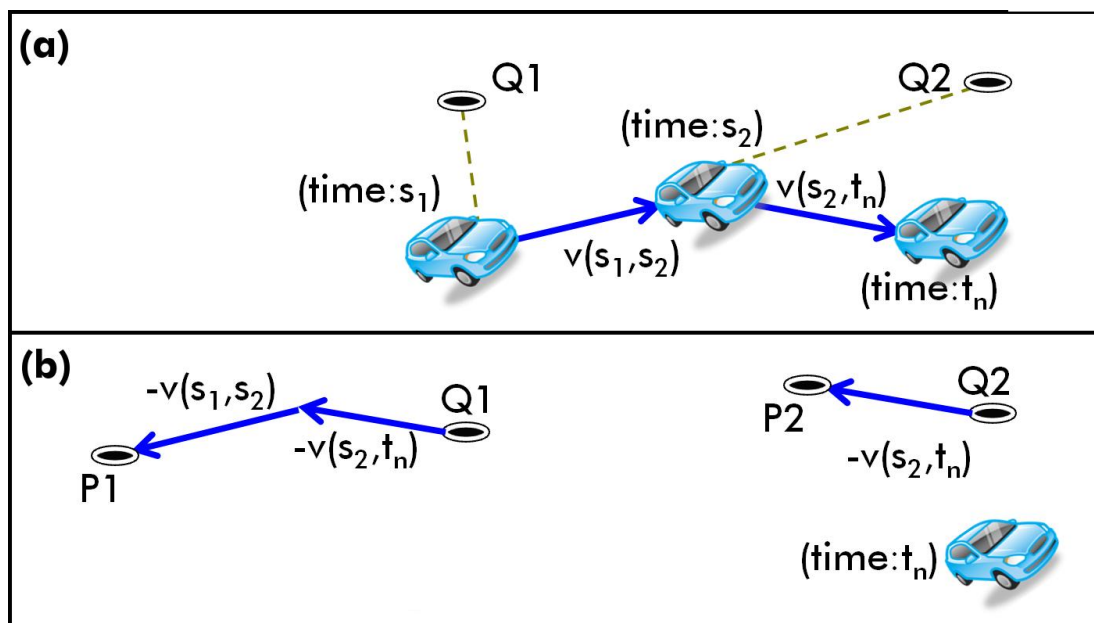


図 4.1 相対速度を利用した RFID 位置の固定

提案手法では点 Q_h に設置された RFID を点 P_h に仮想的に平行移動し、移動後の点 P_h を用いて各過程におけるモデル構築を行う。

移動ベクトルはジャイロ/加速度センサにより得られる加速度、角速度から推定する。具体的には、加速度の値を重力加速度の方向や角速度を参照*8することで、センサ座標系から測地座標系に基づく座標での値に変換し、変換後の加速

*8 水平方向の回転のみ角速度を用いて座標変換している

度を積分して移動ベクトルを求める。

センサにより得られる値は細かく振動したり，異常値を観測することがあるため，ジャイロ/加速度センサのデータを式(2)に示すフィルタを通すことにより安定化した値を利用する．時刻 u_n ^{*9}におけるジャイロ/加速度センサデータの測地座標系での読み取り値 $D(u_n)$ とフィルタ後の値 $D'(u_n)$ の関係は式(2)の通りで，係数 $k(0 < k < 1)$ は評価を行う際のパラメータとしている．

$$D'(u_n) = \begin{cases} D(u_n) & \text{if } (n = 0) \\ k \cdot D(u_n) - (1 - k)D(u_{n-1}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4-2)$$

4.4.2 2つの RFID による内外分点の決定

提案手法では，観測した受信強度と自由空間損失の公式^[58]を変形した式(3)を用いて図 4.2 における P_1A, P_1B, P_2A, P_2B の各距離を推定する．ここで $r(1)$ は予備実験などにより得られた値を与えるものとし，本稿では -70dBm とする．

$$d = 10^{\left(\frac{r(1) - r(d)}{20}\right)} \quad (4-3)$$

(\because d : 求める距離(m), $r(d)$: 観測した受信強度(dBm),
 $r(1)$: 距離 1m の受信強度(dBm))

図 4.2 において，線分 P_1A と P_1B ，線分 P_2A と P_2B はそれぞれ直線 P_1P_2 に関して対称である．ゆえに，点 A, 点 B は直線 P_1P_2 について対称であり，これは直線 P_1P_2 を含むすべての平面上で成立する．したがって，点 A, B の中点 W は常に

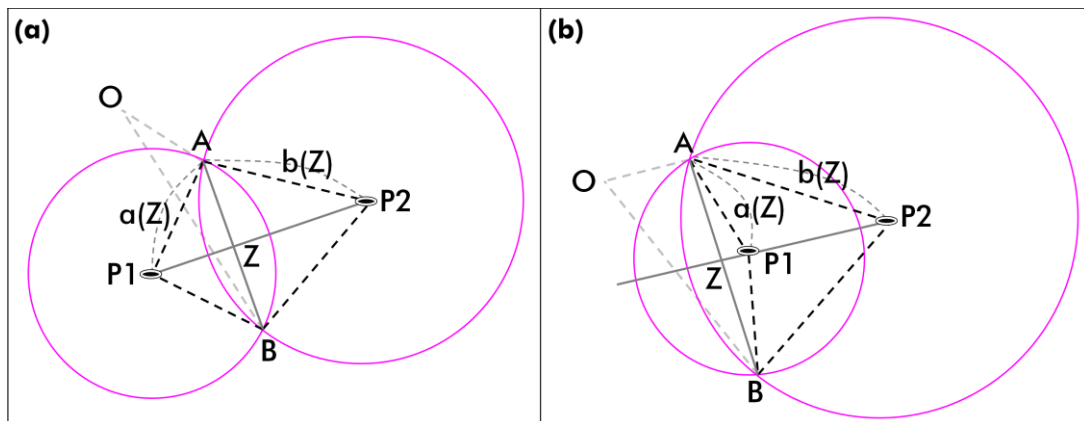


図 4.2 RFID の配置位置と内外分点

*9 $u_n - u_{n-1}$ はセンサの計測間隔である

直線 P_1P_2 上に存在し、直線 P_1P_2 を含む任意の平面上で計算可能である。この性質に着目し、提案手法では中点 W を求める内外分点 Z としており、以下の式により求める。

$$\overrightarrow{OZ} = \begin{cases} \frac{\left| \overrightarrow{P_2Z} \cdot \overrightarrow{OP_1} \right| + \left| \overrightarrow{P_1Z} \cdot \overrightarrow{OP_2} \right|}{\left| \overrightarrow{P_1P_2} \right|} & \text{if } (\cos \angle AP_1P_2 \geq 0) \wedge (\cos \angle AP_2P_1 \geq 0) \\ \frac{\left| \overrightarrow{P_2Z} \cdot \overrightarrow{OP_1} \right| - \left| \overrightarrow{P_1Z} \cdot \overrightarrow{OP_2} \right|}{\left| \overrightarrow{P_1P_2} \right|} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4-4)$$

4.4.3 内外分点群からのアンテナ位置の推定

4.4.2 章にて求めた内外分点について考えると、全ての内外分点 $Z_i (Z_i \in S, i=1,2,\dots)$ は図 4.2 のように 2 つの RFID とアンテナ間の距離 $a(Z_i)$, $b(Z_i)$ によって求まる。これらの距離 $a(Z_i)$, $b(Z_i)$ が小さい内外分点は求めるアンテナの位置 X に近い点であるため、 $a(Z_i)$, $b(Z_i)$ のより近い内外分点により大きいウェイトを与えることでこれらを統合し、アンテナの位置を推定することを考える。すると、点 Z_i に対するウェイトは重みづけ関数の次数 m を用いて $(a(Z_i) \cdot b(Z_i))^{(-m)}$ となり、これをウェイトの総和が 1 になるように正規化することで式(7)のようにアンテナの位置 $X'(m)$ が推定できる。

$$\overrightarrow{OX'(m)} = \frac{\sum_{i=1}^{|Z|} \left\{ (a(Z_i) \cdot b(Z_i))^{(-m)} \cdot \overrightarrow{OZ_i} \right\}}{\sum_{i=1}^{|Z|} (a(Z_i) \cdot b(Z_i))^{(-m)}} = \sum_{i=1}^{|Z|} \left\{ w(Z_i) \cdot \overrightarrow{OZ_i} \right\} \quad (4-5)$$

式(5)より、次数 m の増加により受信強度から求めた距離の誤差を丸められると期待できる。また、 m の増加によりの収束する位置は $(a(Z_i) \cdot b(Z_i))$ の値が小さく、かつ近似したいいくつかの内外分点(図 4.3 の Z_1, \dots, Z_6 を統合した点(図 4.3 の平均値: G)である。

これらの点は例えば図 4.3 のような位置関係にあり、平均値 G と正確なアンテナ位置 X は近似した点であると推測できる。よって、提案手法では平均値 G を推定したアンテナ位置 X' とする。さらに、式(7)に複数の数値例を代入するこ

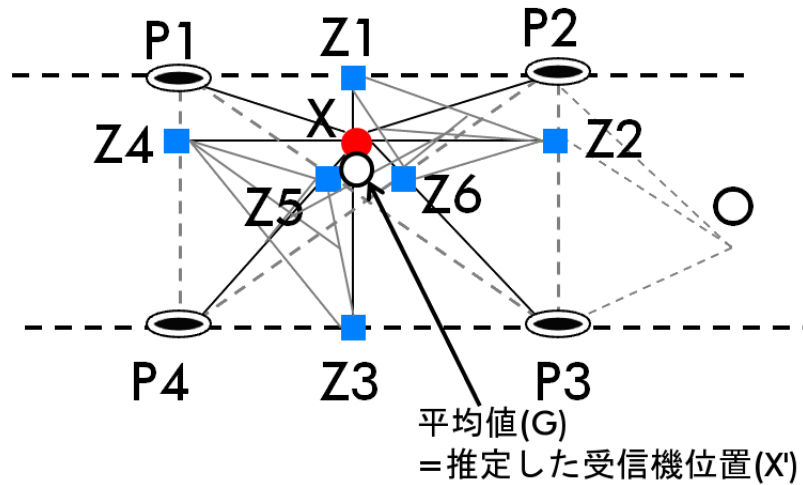


図 4.3 内外分点と推定した受信機位置の関係

とで, m の増加により $w(Z_i)^{*10}$ が漸近的に収束する傾向を確認した. よっての収束は漸近的であると推定し, 提案手法ではあらかじめ設定した閾値を下回るまで m の値を増加させている^{*11}. 位置推定精度の最終目標は $0.1m$ であるから, この $1/10$ である $0.01m$ を閾値とする.

4.4.4 アンテナ位置からの車両中心位置の推定

4.4.3 章において推定したアンテナの位置 X'_1, X'_2, \dots , 実際のアンテナの位置 X_1, X_2, \dots と実際の車両中心位置 C の位置は, 図 4.4 のような関係にある. ここで X'_1, X'_2 について考えると, 推定したアンテナ位置 X'_1 から車幅方向(X'_1C)に平行に引いた直線, X'_2 から車長方向(X'_2C)に平行に引いた直線, X'_1, X'_2 の中点 M' から対角線方向(MC)に平行に引いた直線, これらの 3 直線がなす三角形 $\triangle E_{1,2}F_{1,2}G_{1,2}$ の平均値 $N_{1,2}$ (以降ではこれを候補点と呼ぶ)が, 推定したアンテナ位置 X'_1, X'_2 により推定される車両中心位置となる.

$$\overrightarrow{ON_{1,2}} = \frac{1}{3}\overrightarrow{OE_{1,2}} + \frac{1}{3}\overrightarrow{OF_{1,2}} + \frac{1}{3}\overrightarrow{OG_{1,2}} \quad (4-6)$$

$$(\because M'G_{1,2} // MC, X'_1G_{1,2} // X_1C)$$

^{*10}この $w(Z_i)$ は, 各 Z_i に対するウェイトをその総和が 1 になるよう正規化したものである

^{*11} 実用的には計算時間を位置推定計算の間隔以内にするため, 次数 m の上限の設定などが必要である

この候補点 N を 4.4.3 章で位置が推定できた全てのアンテナの組み合わせに対して求め、それらの平均値(幾何重心)を時刻 t における車両中心の推定位置 C_t とする。

$$\overrightarrow{OC'_t} = \sum_{i=1}^{|X'|} \sum_{j=i+1}^{|X'|} \frac{\overrightarrow{ON_{i,j}}}{0.5|X'|(|X'|-1)} \quad (4-7)$$

($\because |X'| = \text{車載アンテナの総数}$)

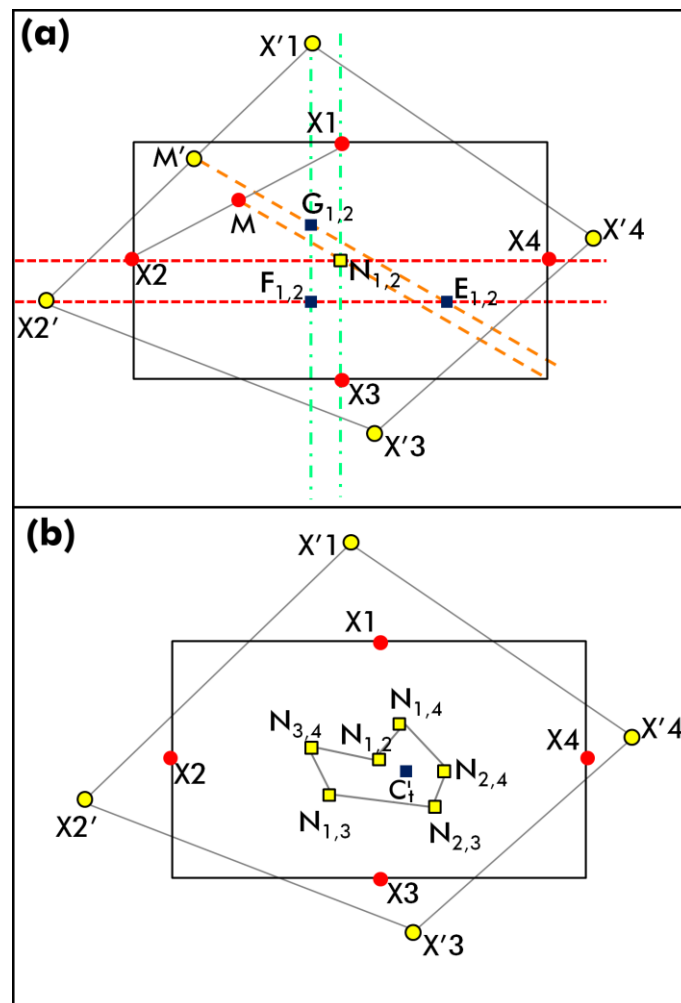


図 4.4 推定したアンテナ位置と候補点, 車両推定位置との関係

4.4.5 車両の移動ベクトルを利用した推定結果の補正

4.4.4 章で推定した車両中心位置 C_t を車両の移動ベクトルを用いて補正する。提案手法では補正前の推定位置 C_t と移動ベクトルを相互に補完するため、それ

ぞれの精度を同等であると扱って推定位置を補正する。したがって、時刻: t_{n+1} における補正後の推定位置: $C''_{t_{n+1}}$ は時刻: t_n における位置推定結果: C''_{t_n} を用いて以下の漸化式により求められる。

$$\overrightarrow{OC''_{t_0}} = \overrightarrow{OC'_{t_0}} \quad (\because v(t_0, t_0) = (0, 0, 0)) \quad (4-8)$$

$$\overrightarrow{OC''_{t_n}} = \frac{\overrightarrow{OC'_{t_n}} + (\overrightarrow{OC''_{t_{n-1}}} + v(t_{n-1}, t_n))}{2} \quad (4-9)$$

提案手法では、 $\overrightarrow{OC''_{t_n}}$ が時刻 t_n における最終的な位置推定結果である。

4.5 屋外環境における実験と評価

4.5.1 実験の実施手法

提案手法の評価にあたり、車両の両側面に設置した web カメラと道路上に設置された計測用テープを用いて路肩からの距離を計測し、この距離をもとに実際の車両位置 C_t を把握する。この C_t と、補正後の車両推定位置 C''_t の差を位置推定誤差とし、この数値にて評価を行う。また、誤差の平均値はデータの両端に位置する数値を除いて求めている。これは車両全体が RFID の設置された領域に到達する前の推定結果であり、位置推定を行うには不十分な環境で得られたデータだからである。

本実験に使用した機材を表 4.2 に示す。屋外実験を行った場所は総合研究大学院大学葉山キャンパスであり、図 4.5、表 4.3 に示す道路で実施した。評価に利用したパラメータの値は表 4.4*¹²の通りである。このうち、位置計算間隔は何秒おきに位置推定の計算を実行するかを示す値である。

表 4.2 車載機器一覧

RFID タグ/受信機システム	NTT-AT 社 NIRE-Type2
ジャイロ/加速度センサ	ZMP 社 e-nuvo IMU-Z Lite
web カメラ	Buffalo 社 BSW20KM02HBK

*¹² RFID 個数の都合により、RFID の配置間隔に応じて距離を変更している

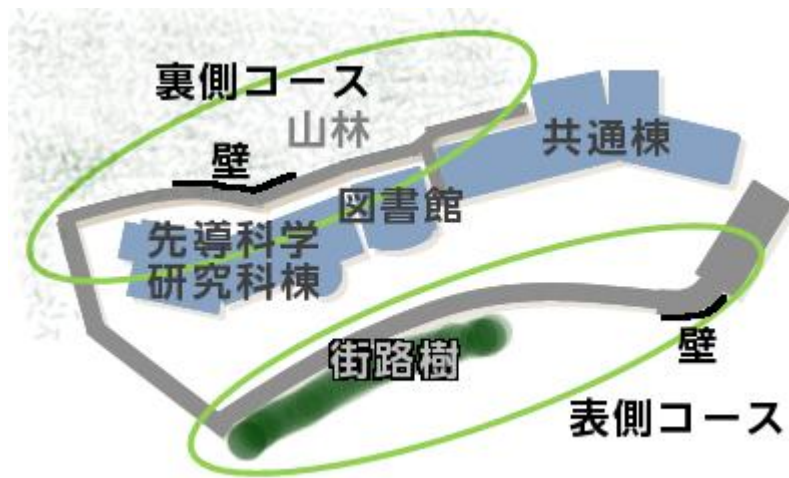


図 4.5 走行コースの位置図

表 4.3 走行コース概要

	裏側コース	表側コース
形状	直線	曲線
道路幅	約 3.75m	約 5m
最高走行速度	約 30km/h	約 35km/h
走行距離	約 40-60m	約 45-60m

表 4.4 パラメーター一覧

道路形状 (図 4.5 参照)	表側コース, 裏側コース
RFID 配置間隔 (路側両側に配置)	0.25, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20(m)
位置計算間隔 ($t_n - t_{n-1}$)	0.5, 1, 2, 3(sec.)
車載アンテナ数	4 本(車両の角), 8 本(車両の角, 各辺の中央)
フィルタ係数 k	0.01, 0.05, 0.1, 0.3
データ取得間隔 ($u_n - u_{n-1}$)	1/30(sec.) (固定)
電波発信間隔	3(sec.) (固定)
RFID の通信距離	最大 40(m) (固定)

4.6 提案手法の評価

図 4.6 に道路形状ごとの推定精度を、図 4.7 に配置間隔ごとの時系列データをそれぞれ示す。図 4.7 の横軸は時刻であり、車両の走行位置を実験開始からの経過時間により表した値である。これらの図より、配置間隔が 2m 以下の場合でも位置推定誤差の最大値が 4-6m と大きい値を示す例が発見された。

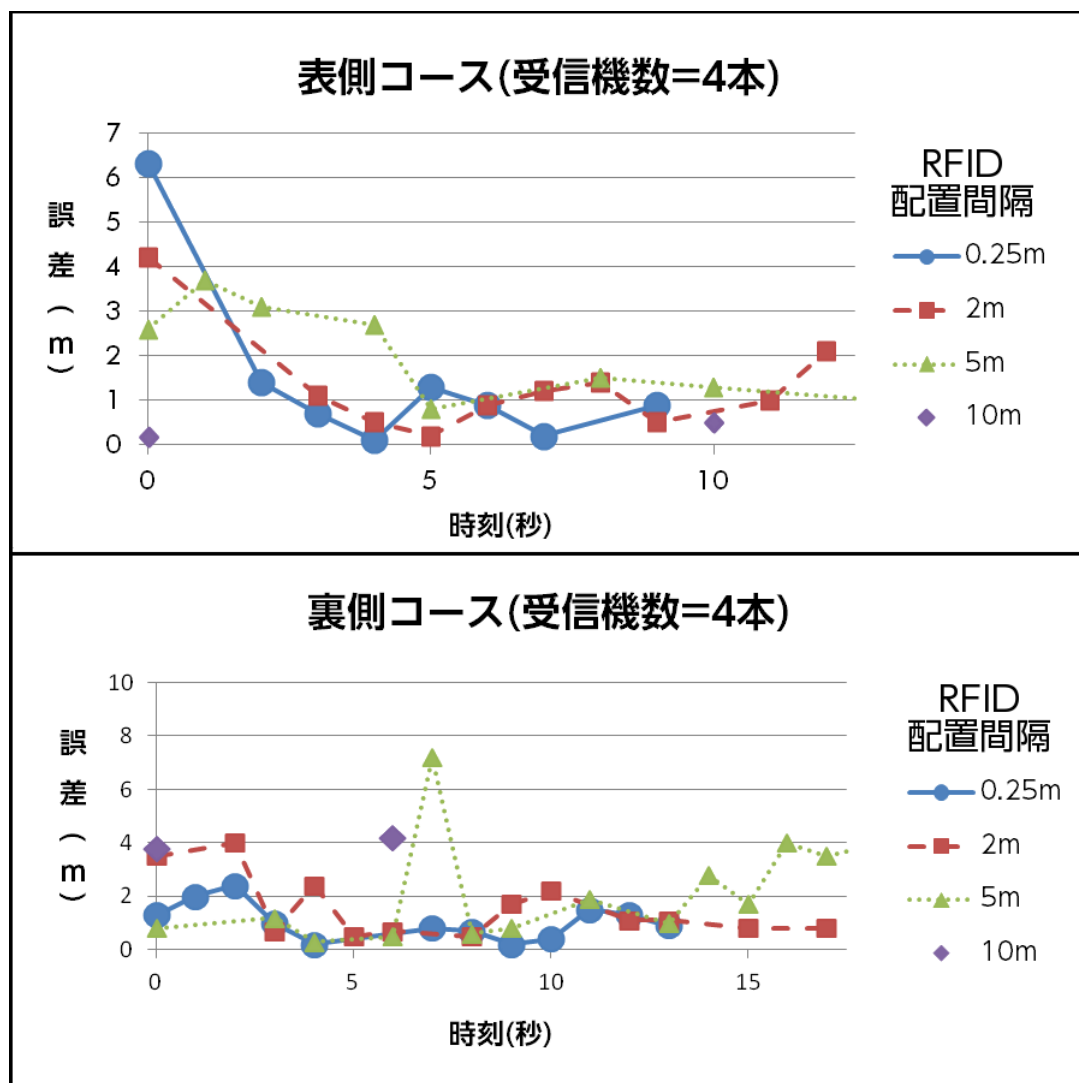


図 4.6 道路形状と配置間隔による位置推定誤差の比較
(位置計算間隔=1 秒)

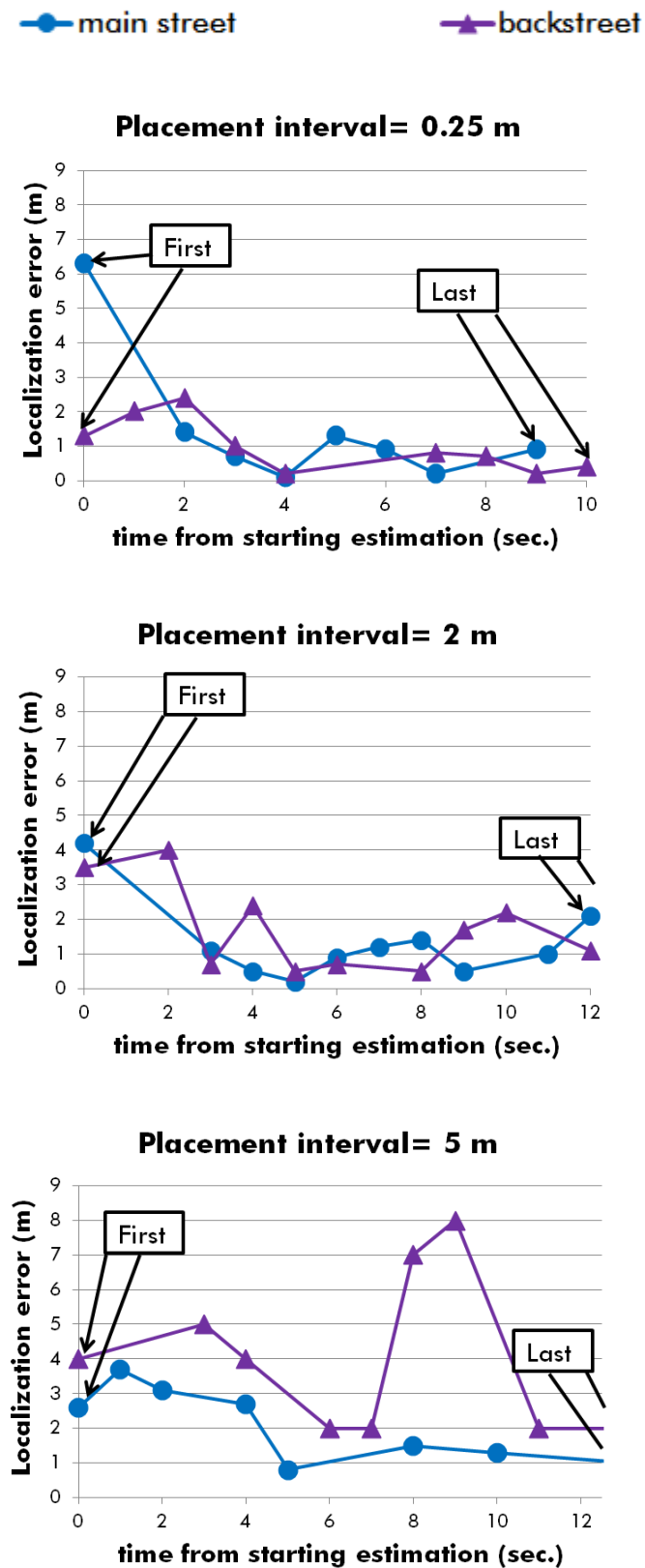


図 4.7 配置間隔ごとの位置推定誤差の比較(アンテナ本数=4 本)

車線方向の誤差を分析した結果が図 4.8 であり、車載アンテナ数が 8 本、RFID 配置間隔が 1m 以内の場合において、第 3 四分点は全てのコースで 1.5m 程度(車線幅の半分以内)であった。裏側コースにおいて、RFID を 0.5m 間隔で配置した場合には最大で 2.4m 車線方向の誤差が存在しているが、受信データを RSSI により求めた距離をもとに絞り込む^{*13}ことでこの値を 1.7m(車線幅の半分程度)に

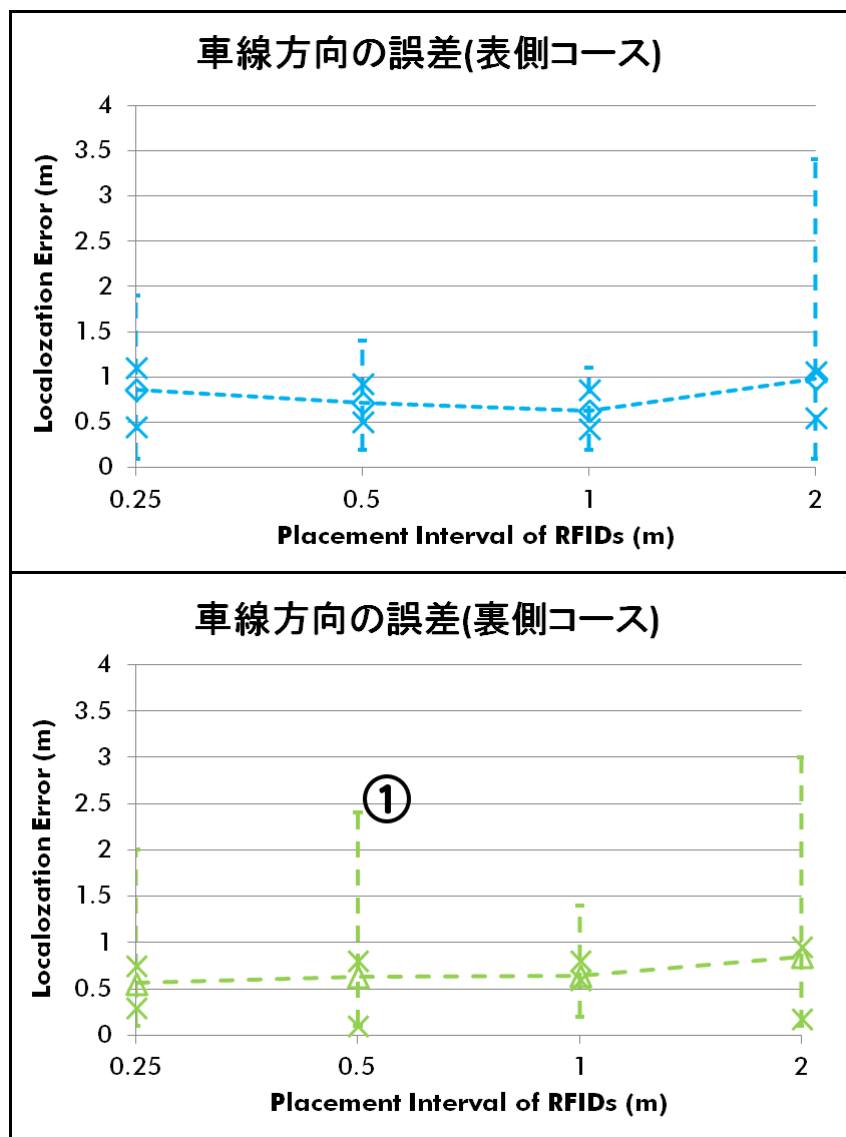


図 4.8 車線方向の位置推定誤差

(位置計算間隔=1 秒、アンテナ本数=8 本、“×” は四分点を示す)

^{*13}具体的には、RSSI から推定した距離が 40m を超えるデータを位置推定から排除した

改善できた。また、これ以外の RFID 配置間隔が 1m 以内のケースでは、誤差の最大値は各コースの車線幅*¹⁴の半分以内であった。よって、提案手法は車両が走行する車線の推定が概ね可能であると結論付けた。

高さ方向の誤差は RFID を 5m 以内の間隔で配置した場合において全て 1m 以内であり、車両の走行経路を識別するために必要な精度を達成している。

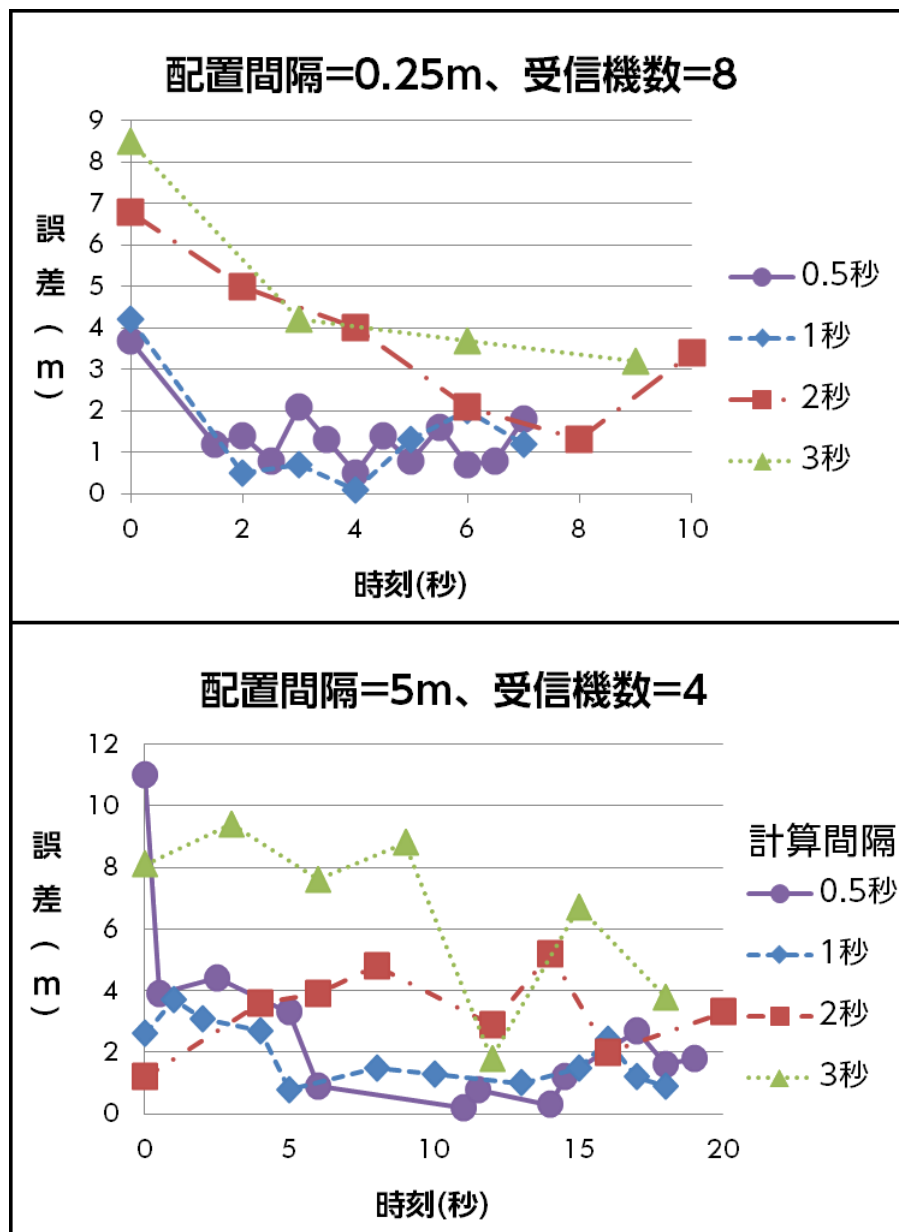


図 4.9 位置計算間隔の差による位置推定誤差の比較

*¹⁴表側コースの車線幅は 5m 程度、裏側コースの車線幅は 3.5m 程度である

図 4.9 は位置計算間隔と位置推定誤差の関係を示したもので、位置計算間隔を短くすると推定精度が高くなった。位置推定との相互補完により軽減されているものの、移動ベクトルの推定誤差が計算間隔の延長により増大する傾向は残っていることが原因と考えられる。一方で、位置計算間隔を短くすると 1 回の位置推定において取得するタグの数が少なくなるため、位置推定が行えないケースも増加する。具体的には、配置間隔が 5m の場合、位置計算間隔を 1 秒から 0.5 秒に縮めることで位置推定が行えないケースが大きく増加した。同様に、RFID の配置間隔が 10m の場合では計算間隔が 2 秒を、配置間隔が 20m の場合では計算間隔が 3 秒を下回ると位置推定が行えないケースが大きく増加した。

受信したタグの個数と提案手法の PC/AT 互換機^{*15}における計算時間との間に相関性は見られず、位置計算に要した時間の最大値は 80 ミリ秒、平均値は約 20 ミリ秒であった。位置計算の間に車両が進む距離は車速 100km/h でも最大 2.2m 程度であり、リアルタイムな位置推定が概ね実現できた。

4.7 既存手法との比較

提案手法の推定精度の特性を明らかにするため、既存の位置推定手法との比較や、既存の重み付け手法との比較、さらにアルゴリズムが対象とする次元数に着目した評価を行った。

4.7.1 移動体を対象とした既存手法との比較

4.2 章で述べたように、提案手法は Moeni による事例(表 4.5, 図 4.10 では「既存 1」と表記)や Lim らによる事例(表 4.5, 図 4.10 では「既存 2」と表記)を発展させた内容である。したがって、これらの手法と比較することで提案手法での改良効果が観測できるため、同様の環境で既存手法の位置推定誤差を評価した。パラメータは提案手法における位置推定において使用したものと同一であり、実装は既存手法のアルゴリズムを、提案アルゴリズムのうち 4.4.2 章-4.4.5 章にて述べた計算過程と入れ替えることにより行った。

*15 OS は windows7(64bit) を、CPU は AMD Athlon64 X2 (2.6GHz, Dual-core)を、メモリは 4GB をそれぞれ搭載している

表 4.5 手法ごとの位置推定誤差(位置推定間隔=1 秒)

	配置間隔=0.25m		
	最小値	平均値	最大値
提案手法	0.1m	0.9m	4.2m
既存 1	0.2m	1.4m	2.4m
既存 2	0.2m	3.0m	4.8m

	配置間隔=2m		
	最小値	平均値	最大値
提案手法	0.2m	1.0m	4.0m
既存 1	0.4m	2.3m	5.5m
既存 2	0.4m	3.3m	10m

	配置間隔=5m		
	最小値	平均値	最大値
提案手法	0.7m	1.8m	3.7m
既存 1	0.8m	2.6m	5.5m
既存 2	2.1m	3.1m	5.5m

凡例： -▲- 既存1 -■- 既存2 -◆- 提案手法

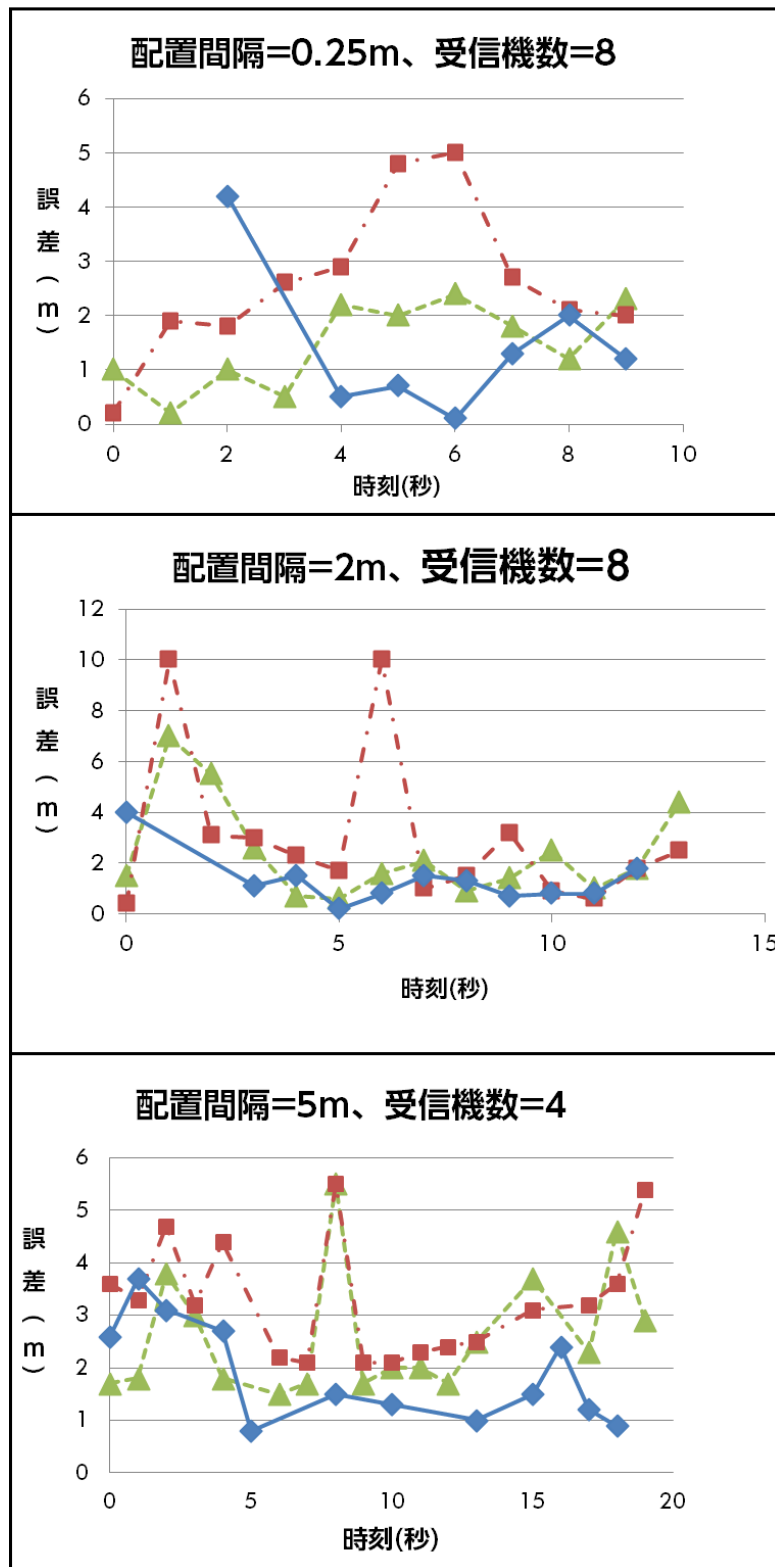


図 4.10 提案手法と既存手法による，位置推定誤差の比較
(位置推定間隔=1 秒)

結果は表 4.5, ならびに図 4.10*¹⁶の通りであり, 本実験にて得られた既存手法の位置推定誤差は, それぞれの文献^{[38][39]}で示された誤差を RFID の配置間隔に応じて線形拡大した値と近似している. よって提案手法の採用によって Moeeni の事例に対しては平均値として約 31%-55%の誤差を, Lim らの事例に対しては約 40%-70%程度の誤差をそれぞれ削減したと判明した.

4.7.2 重み付け手法による比較

位置推定に用いるウェイトを動的(重みづけ関数の次数 m の値を固定しない)としていることは提案手法の特徴の一つである. そこで, 次数 m の値による位置推定精度を評価することで固定的な重み付け手法との比較を行う. ここで, 一般的に用いられている m の値として, $m=0$ と $m=2$ のケースで比較する. $m=0$ のケースは Moeeni による手法^[39]のように位置の単純平均を求める手法である. $m=2$ のケースは k 近傍法に基づいた手法等で用いられている手法であり*¹⁷, 同時に受信強度と距離の関係性*¹⁸にも従った手法である.

評価結果は図 4.11 に示す通りである. 「 m =固定せず」は提案手法の値であり, 誤差の値は他の手法とほぼ同じか, より小さい値を取ることがほとんどであった. その上で, 提案手法にて用いた重みづけ手法により, 位置推定精度が $0.5m-1m$ 程度改善されている箇所も存在している. このため, 提案手法の重み付け手法は, 他の重み付け手法と比較して誤差の最小値を改善する効果があると確認できた.

*¹⁶ 配置間隔が $0.25m$ のケースにおいて, 提案手法は時刻 0, 時刻 1 における位置推定はできていない

*¹⁷ 例えば, LANDMARC^[42]においては受信強度をもとに位置を求める対象と参照タグとの間の距離を推定し, この距離を 2 次の重みづけ関数により重みづけをしている

*¹⁸ 一般的に, 受信電界強度(V/m) は距離 (メートル) の二乗に反比例して減衰する^[58]

凡例： ◆ m=0 ■ m=1 ▲ m=2 ● 提案手法

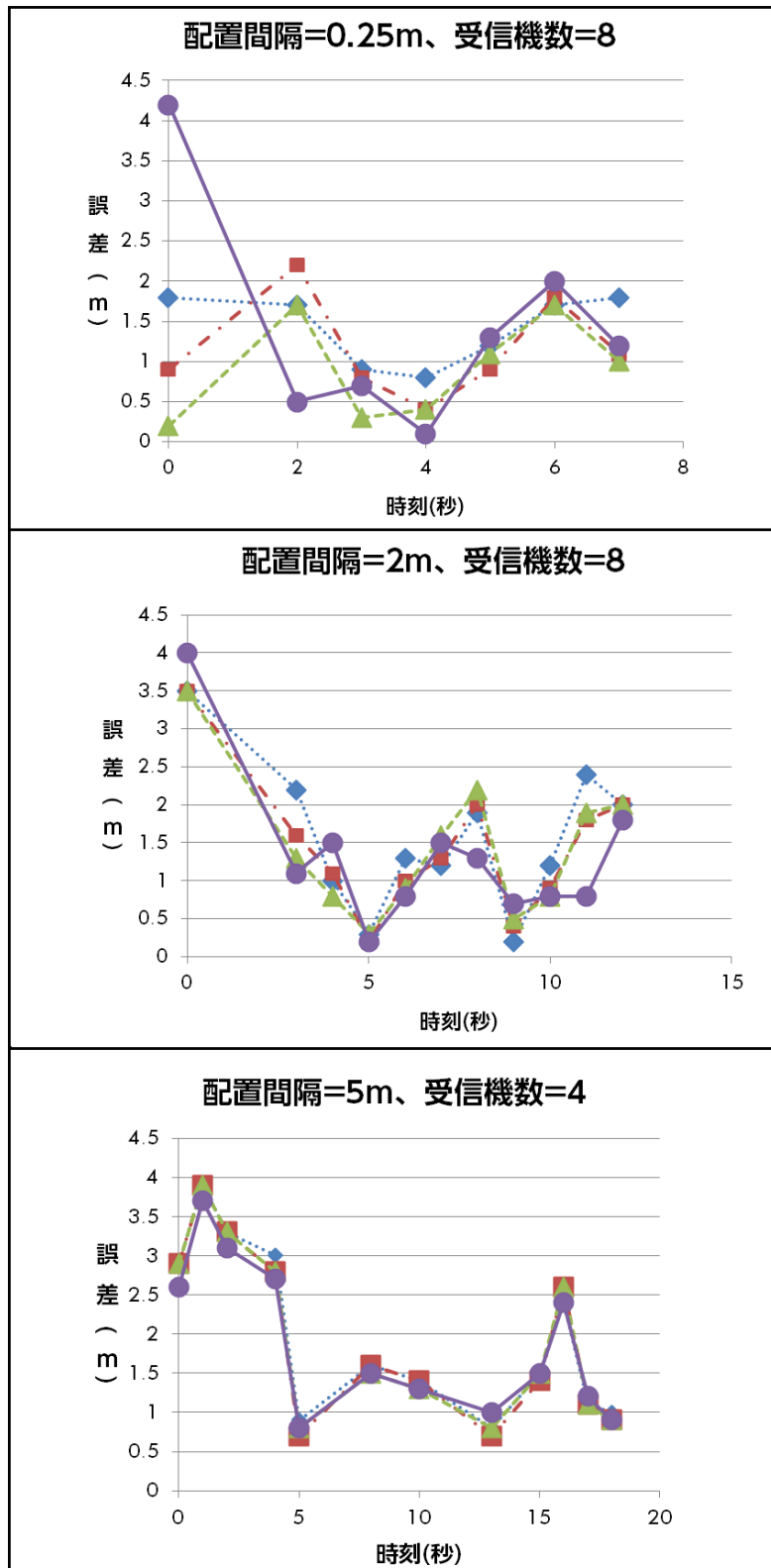


図 4.11 重みづけ手法による，位置推定誤差の比較 (位置計算間隔=1 秒)

4.7.3 次元数による比較

提案手法は3次元を前提として提案された手法であり、2次元を前提とした手法とは位置推定精度の特性が異なると考えられる。そこで、提案手法を基に、1)推定した距離を2次元空間での値とみなす、2)位置計算において高さ方向の成分を考慮しない、などの修正を行った「平面化アルゴリズム」との比較を行った。

一様な平面においては、道路勾配の存在する箇所でも両者の間に大きな位置推定精度の差は見られなかった。道路勾配の変化する地点では平面化アルゴリズムの方が位置推定誤差が大きくなる傾向があり、提案手法によって推定精度が1.5m以上改善された箇所も存在した。したがって、提案手法のように平面に依存しない手法を構築することで、高さに変化する環境での位置推定精度を改善できると判定した。

4.8 評価結果からの考察

前項までで述べた結果では、例えば RFID を 0.5m の間隔で配置した環境において、位置推定誤差の平均値はおよそ 0.7m であった。車線方向の誤差を分析することで、提案手法は車両が走行している車線の認識が概ね可能であると判明した。一方で、レーンキープアシストのように制御を行うシステムのための必要条件である 10cm 程度の誤差については未達成のため、位置推定手法の更なる改良が必要である。

主な検討対象として以下の事項が挙げられる。

- 1) 受信する RFID の数、または車載アンテナ数の増加による改善
- 2) RFID-アンテナ間の距離と受信強度に関する検討
- 3) アルゴリズム面での改善

これらのうち、本章では 1),2)について検討を行う。

4.8.1 受信する RFID の数、または車載アンテナ数の増加による改善

図 4.12 に受信 RFID 数と位置推定誤差の関係を示す。この図より、RFID の受信数が増加することで位置推定精度が向上する傾向が見られ、RFID 受信数が 20 以上の場合には位置推定誤差のほとんどが 1.0m 以下に収まることが判明した。

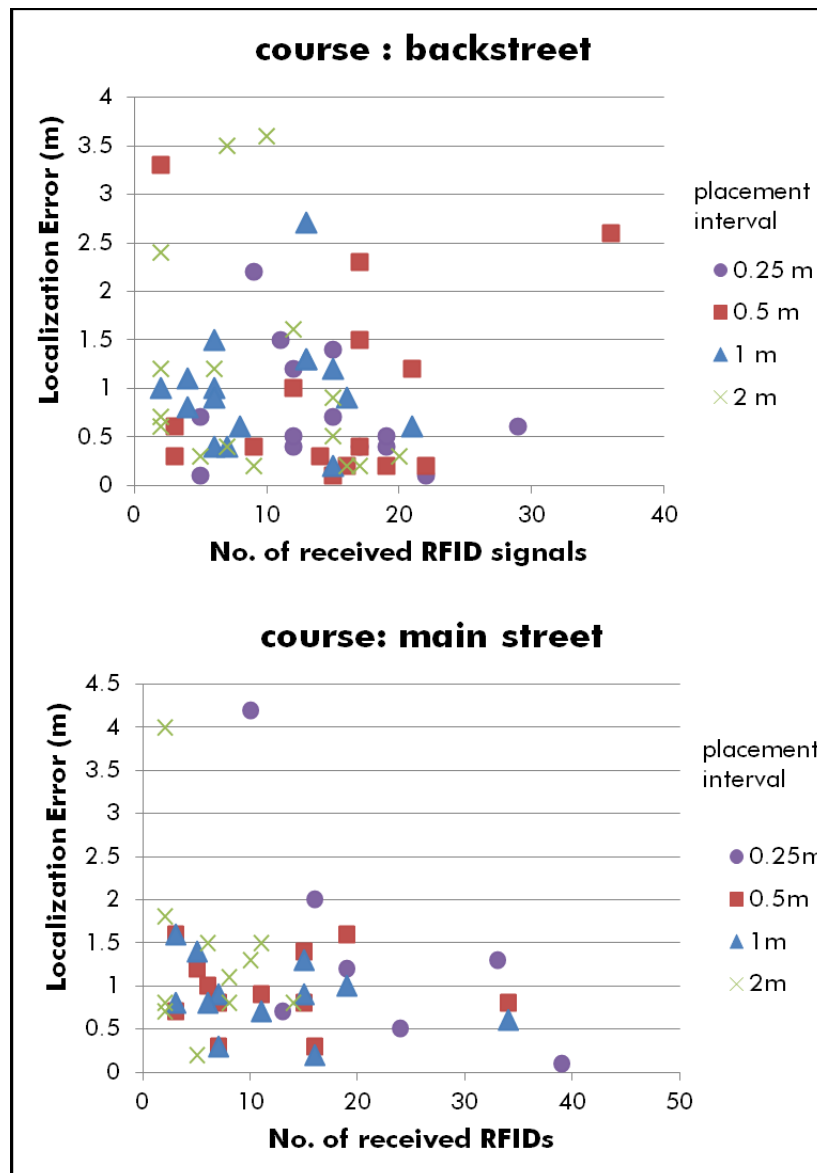


図 4.12 RFID 受信数と位置推定誤差の関係

RFID の受信数と RFID の配置間隔の関係性を分析したものが図 4.13 であり、RFID の配置間隔を縮小しても RFID の受信数の増加には限界があることが判明した。最大の受信数は 33 個程度、第一四分点は 10 個程度が上限であると考えられる。

図 4.14 に車載アンテナ数と位置推定精度の関係を示す。車載アンテナ数が増加することで位置推定精度は改善し、アンテナ数を 4 本から 8 本に変更することで位置推定精度が 30%程度向上した。同時に、0.1m の位置推定精度を得るた

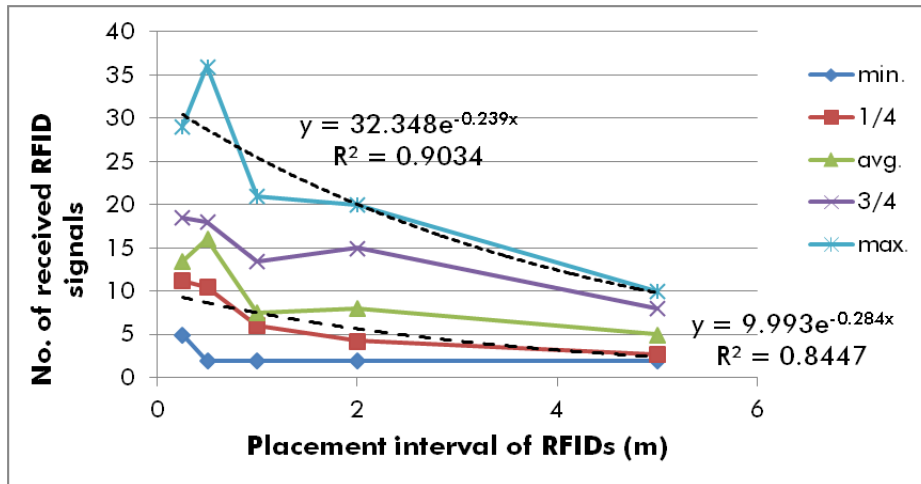


図 4.13 RFID 配置間隔と受信 RFID 数の関係

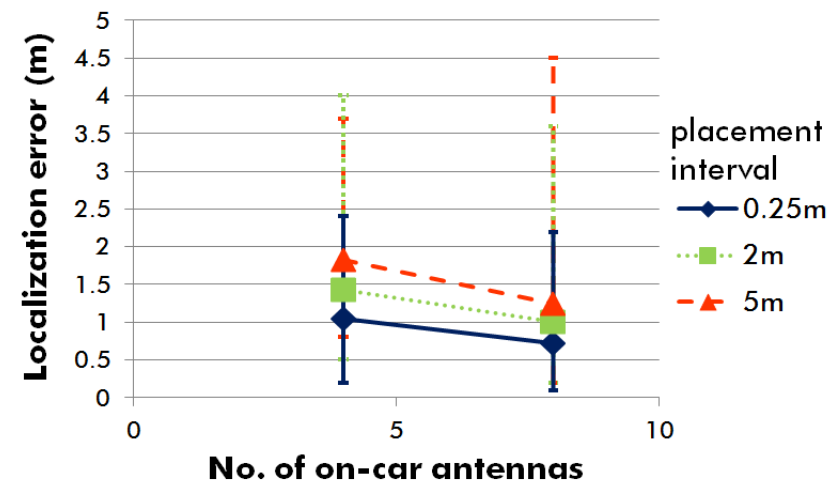


図 4.14 車載アンテナ数と位置推定精度の関係

めには、推定精度が線形的に向上すると仮定しても、少なくとも 15 本のアンテナを車載することが必要であることが判明した。

4.8.2 RFID-アンテナ間の距離と受信強度に関する検討

受信強度と式(3)により得られる推定距離の関係は表 4.6 の通りである。この表より、1dB の変化が推定距離に及ぼす影響はアンテナ-RFID 観の距離が長くなるに従って大きくなることが判明した。ゆえに、推定距離を基に位置推定に利用するデータを絞り込むことで推定精度が改善すると推測できる。

表 4.6 受信強度と推定距離の関係

±0dB		+1dB	
RSSI(dB)	推定距離(m)	RSSI(dB)	推定距離(m)
-110	100	-109	89.1
-100	31.6	-99	28.2
-90	10.0	-89	8.91
-80	3.16	-79	2.82
-70	1.00	-69	0.89

利用するデータの推定距離上限と位置推定精度の関係を図 4.15 に示す. この図より, RFID の配置間隔が短い場合には推定距離に上限を設定することで位置推定精度が改善され, 特に誤差の最大値の削減効果があることが判明した. RFID の配置間隔が 0.25m の場合に, 上限を 30m に設定することで誤差を 0.1m 削減している. 一方で, RFID の配置間隔が長い場合には位置推定精度は悪化しており, 推定距離に上限を設定することで位置推定に利用する RFID が減少することが原因であると考えられる.

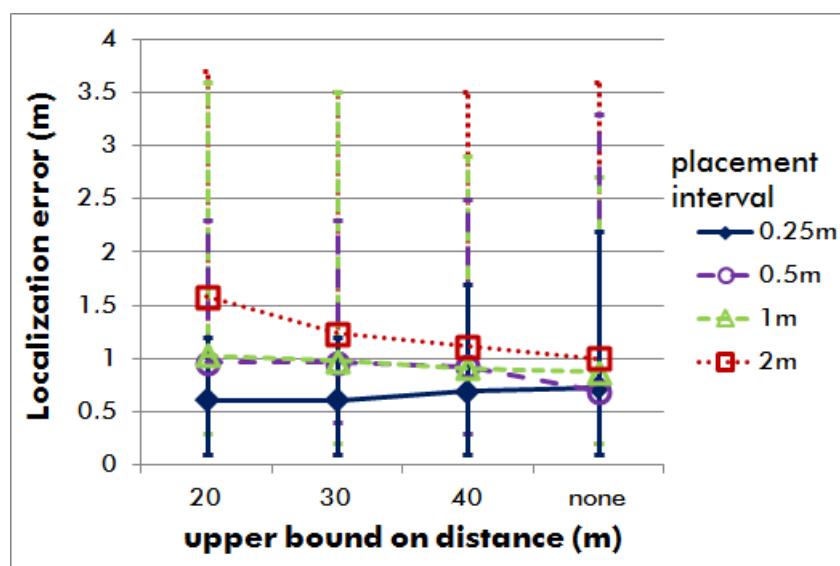


図 4.15 推定距離上限と位置推定精度の関係

4.9 まとめ

本章では、RFID を用いて移動する車両の位置を推定する手法について検討を行った。提案手法のアルゴリズム面での特徴は以下の通りである。

- a) 推定精度の向上と 3 次元空間での位置推定を実現するため、提案手法では各 RFID の組み合わせに対し、それらを結んだ直線を RFID の位置と RFID - アンテナ間の距離に基づいて内分または外分する点（内外分点）を利用している。
- b) 複数の内外分点を次数の異なる重みづけ関数により統合し、重みづけ次数の増加による統合結果の収束をもとに各アンテナの位置を推定する。この重みづけにおいて、車両の近くに位置する RFID から求められた内外分点に、より大きなウェイトを与えている。

屋外の道路環境にて提案手法の位置推定実験を行った結果、RFID を 0.5m の間隔で配置し、車両にアンテナを 8 本設置した環境において、位置推定誤差の平均値を 0.7m に抑えることができた。さらに車線方向の誤差を分析することで、提案手法は車両の走行している車線を認識することが概ね可能であると判明した。既存手法との比較では、提案手法は 31%(0.5m)-70%(2.3m) 程度位置推定誤差を改善したと判明した。同様に、重み付け手法に着目した比較においても、提案手法で用いた重みづけは推定精度の向上に一定の効果があることが確認できた。

一方で、車両制御のための目標値とした 0.1m の精度については実現できていない。特に、提案手法では自由空間損失の基本式のみを用いて RFID-受信アンテナ間の距離を求めているため、電波環境の変化によりこの距離推定の誤差が表 4.6 でも検討したように大きくなっていることが原因であると考えられる。提案プラットフォームはマルチホップ RFID を活用しているため、RFID 相互間でのデータ交換時に受信強度を観測することで、RFID の設置された箇所における電波環境を把握することが可能である。これを用いることで、より位置推定を行う際の受信強度と距離の関係性を正確に投影することができ、測位精度の向上につながると考えられる。また、提案手法においては図 4.7 や図 4.10 にも見られるように位置推定結果の得られないケースも存在している。これは単独

の測位結果が常に得られることを前提としていることが原因であり，単独の測位結果が得られなかった場合には前回の測位結果と車両の移動ベクトルを用いて位置推定を行うことで常に推定結果が得られると考えられる．

5 レーンキープアシストシステム

本章では提案プラットフォームで利用可能なレーンキープアシストシステムについて検討する。理想的には、RFID ないし類似した機器により実装されたレーンキープアシストモデルを用いて提案プラットフォーム上で評価を行うべきであるが、関連研究の章でも述べたように既存のレーンキープアシストシステムモデルは利用する機器の特性に大きく依存しているため、提案プラットフォームへの適用は困難である。したがって、本章ではレーンキープアシスト機能について RFID の活用を目的として基礎的な力学に基づいた航跡指示モデルを構築し、プラットフォームでの利用可能性を評価する。

ここで提案するシステムの概要について簡単に述べると以下の通りである。まず、路肩・車線境界にアクティブ型の RFID を連続的に設置し、RFID より定期的に発信される電波を車載のリーダにて観測することで路肩・車線境界と車両との距離を計測する。これに加えて、路肩・車線境界の向きと車両の進行方向の角度差、車速を用いることで図 5.1 のように車両の路肩・車線境界への接近度合いを何段階かに分けて判断する。これらの判断を電波の受信できたすべての RFID に対して行い、最も接近度合いの高い RFID の設置されている路肩・車線境界に対する接近回避のための車両航跡を車両内部の制御機構へ指示する。提案手法において、この指示は加速度や回転半径の値を指示することにより行われる。

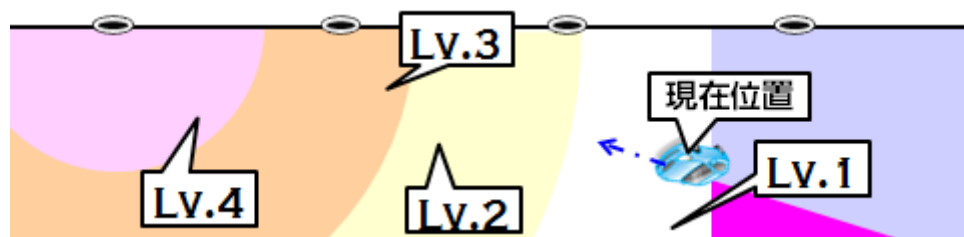


図 5.1 提案システムにおける接近度合い判定の概念図
(一点鎖線は車両の進行方向を示す)

5.1 提案手法の動作対象条件

まず、提案システムにおける動作対象条件を列挙すると以下の通りである。

- 1)RFID はおおよそ一定の間隔*¹⁹で連続的に配置されており、本システムはその配置された区間内において有効なものとする。
- 2) ステアリングのふらつき等車両の特性については存在しないものとして扱う。
- 3) 指示された車両航跡に対する操作は必ず起動することが保障されているものとする。
- 4) 支援操作が起動・動作している間は、運転者による車両操作(加減速・ハンドル操作など)は支援操作の解除を除き無効とする。
- 5) 起動された支援操作を解除することや、故意に路肩・車線境界へ接近するための操作を行うこと(図1における薄青色領域から現在車両位置への到達)については路肩への衝突・車線逸脱回避の保証対象外とする。
- 6) 2) で述べたとおりステアリングのふらつきは存在しないため、路肩・車線境界と平行に走行している車両は道路形状が変化するか、故意に路肩・車線境界へ接近させるための操作を行わない限り路肩・車線境界との角度差を生じない。

5.2 提案システムの実現手法

路肩・車線境界と車両との距離計測については、道路側に設置された RFID から定期的に発信される電波について車載のリーダにおける受信強度を計測することにより行う。また、路肩・車線境界の向きと車両の進行方向の角度差の計測について述べると、路肩・車線境界の向きは設置された RFID 同士的位置関係から導出し、車両の進行方向は車載のジャイロセンサ等により計測する。

このようにして判断された接近度合いに応じて路肩への衝突・車線逸脱回避のための車両航跡の指示をレーンキープアシストシステムから車両へ行う。具体的な車両航跡の指示は車両の回転半径と減速度の値を車両へ指示することにより実現されるものとする。なお、本システムにおいては路肩への衝突・車線

*¹⁹ 実空間で配置する場合、厳密には等間隔になりえないため「おおよそ一定の間隔」としている。また、ランダムな配置については動作検証が困難であるため動作対象条件から除外している

逸脱回避を保障できない場合も存在するが、こうした場合においても路肩への衝突被害軽減のために、また車線逸脱量抑制のために路肩への衝突・車線逸脱回避の場合と同様に航跡指示を行う。

提案手法における制御指示パラメータと制御判断パラメータは以下の通りである。

制御判断パラメータ: 車速(m/s)

車両～路肩・車線境界間の距離(m)

車両進行方向～道路進行方向の角度差(radian)

制御指示パラメータ: 減速度(m/s²)

回転半径(m)

制御判断に利用するパラメータは全て「その瞬間の値」のみを利用しているため、本モデルでの制御判断は以前の判断内容とは関係なく行われる。

5.3 制御段階の設定

提案システムは、以下の操作を組み合わせることで衝突回避のための操作支援を行う。

1.ハンドル操作(大, 小)

2.ブレーキ操作(強, 弱)

できるだけブレーキ操作を行わないことで対応するため、ブレーキ操作よりもハンドル操作が優先するものとする。こうした条件のもとで各操作を組み合わせると、何も制御を行わないものを含めて以下の5段階の制御が可能である。

制御レベル 0…支援操作なし

制御レベル 1…ハンドル操作(小)

制御レベル 2…ハンドル操作(大)

制御レベル 3…ハンドル操作(大) and ブレーキ操作(弱)

制御レベル 4…ハンドル操作(大) and ブレーキ操作(強)

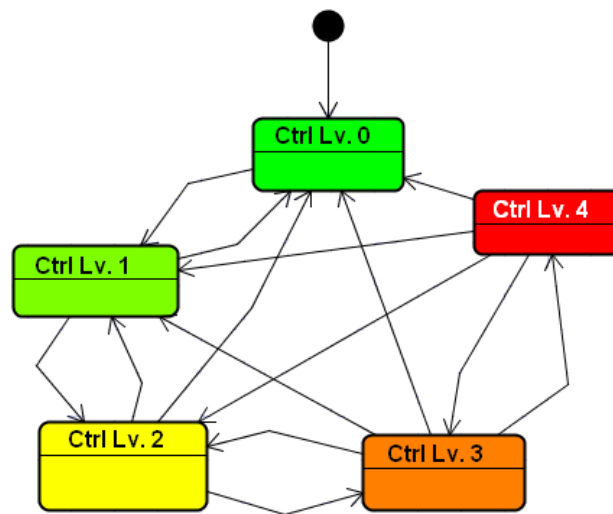


図 5.2 制御レベルの遷移モデル

本項では、ステアリング操作とブレーキ操作それぞれを行った場合の車両動作をモデル化し、それらを組み合わせることで各「制御レベル」における航跡指示モデルを構築する。

5.3.1 ステアリング操作による車両動作モデル

図 5.3 において、速度 $v(\text{m/s})$ 、回転半径 $R_v(\theta) \cdot 1$ の時、 $t(\text{sec})$ の変位 $X(t)$ は以下ようになる。

$$X(t) = R_v(\theta) \{1 - \cos(vt / R_v(\theta))\} \quad (\because R_v(\theta) \phi = vt) \quad (1)$$

5.3.2 ブレーキ操作による車両動作モデル

ステアリング操作をしていない場合、ブレーキ操作による変位 $Y(t)$ は減速度を $a(\text{m/s}^2)$ とおくことで、 $Y(t) = vt - 0.5at^2$ と表すことができる^[59]。

5.3.3 ステアリング操作とブレーキ操作の組合せによる車両動作モデル

最後に、ブレーキ操作とステアリング操作の組合せによる変位を求める。図 5.4 に示す通り速度 $v=v_0$ のときの回転半径を $R_{v_0}(\theta)$ 、減速度を a とする。 t 秒間で走行する距離は $v_0t - 0.5at^2$ であるから、回転した角度 σ (rad.)は、

$$\sigma = \frac{2v_0t - at^2}{2R_{v_0}(\theta)} \quad (5-1)$$

$$(\because R_{v_0}(\theta) \cdot \sigma = v_0t - 0.5at^2)$$

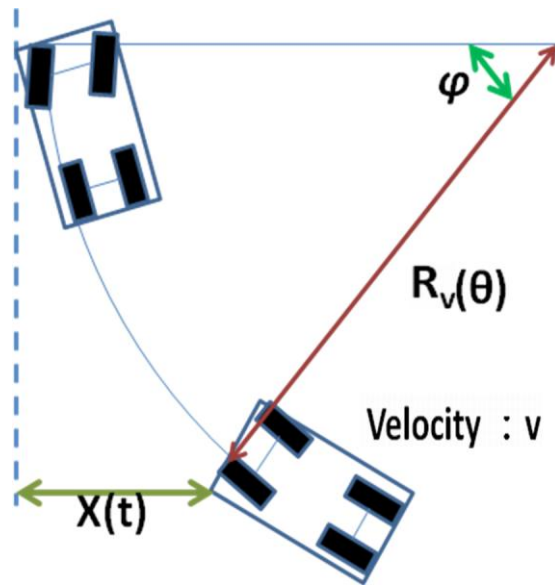


図 5.3 ステアリング操作による車両動作モデル

この場合の t 秒間での変位 $Z(t)$ は、(2)より以下のように表され、この値がステアリングとブレーキを組み合わせたときの変位である。

$$Z(t) = R_{v_0}(\theta) \{1 - \cos(\sigma)\} = R_{v_0}(\theta) \left\{ 1 - \cos \left(\frac{2v_0 t - at^2}{2R_{v_0}(\theta)} \right) \right\} \quad (5-2)$$

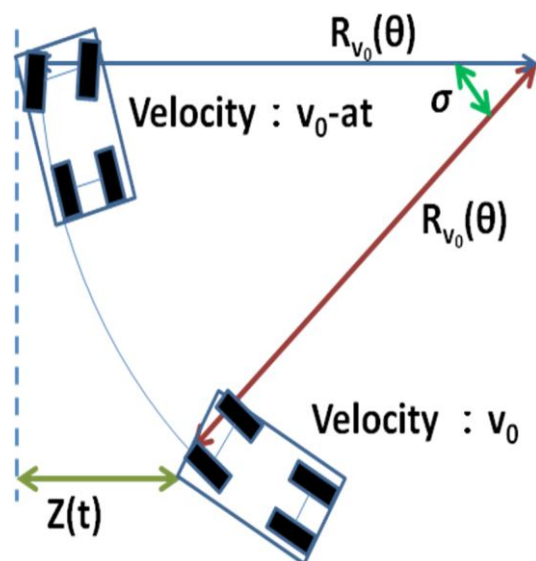


図 5.4 組み合わせ操作による車両動作モデル

5.4 パラメータの設定

以上のように操作支援システムに関連する車両動作をモデル化してきたが、本項は 4.1 における各レベルでの制御による変位を明らかにするため R :車両の回転半径, a :減速度といったパラメータを設定し、実際の航跡指示モデルに組み込んでいく。

5.4.1 ステアリング操作のパラメータ

本論文でのモデルは道路構造令^[60]による最小回転半径の 2 倍を速度 $v(\text{m/s})$ におけるステアリング操作(大)と定義する。また、このときの回転半径を $R_{\text{high},v(\text{km/h})}(\theta)$ とする。

ここで、 t 秒間での変位を $X_{\text{high},v(\text{km/h})}(t)$ とすると、(1)より以下のように表される。

$$X_{\text{high},v(\text{km/h})}(t) = R_{\text{high},v(\text{km/h})}(\theta) \{1 - \cos(vt / R_{\text{high},v(\text{km/h})}(\theta))\} \quad (5-3)$$

また、ステアリング動作(小)の回転半径を以下のように設定する。

$$R_{\text{low},v(\text{km/h})} = 2R_{\text{high},v(\text{km/h})}(\theta) \quad (5-4)$$

このときの変位 $X_{\text{low},v(\text{km/h})}(t)$ は(4)の $X_{\text{high},v(\text{km/h})}(t)$ と同様に求められ、

$$X_{\text{low},v(\text{km/h})}(t) = R_{\text{low},v(\text{km/h})}(\theta) \{1 - \cos(vt / R_{\text{low},v(\text{km/h})}(\theta))\} \quad (5-5)$$

と表すことができる。なお、本パラメータは道路構造令^[60]により定められた曲線半径の制限値を参照して定義している*20ため、どの速度域においても有効なパラメータである。同時に、実際のステアリング操舵角は最も操舵角が大きくなる $v=20(\text{km/h})$ におけるステアリング動作(大)の場合でも高々4度であり、大きな制御量を要求していないことも分かる。

*20 同法令において、最小回転半径は車両に生じる遠心力の限界値により定義されている。本論文でのモデルではこの「最小回転半径」の 2 倍以下の回転半径を要求するステアリング操作は発生しないため、十分実用的で安全な値である。また、同法令にて定義されていない速度に対する「最小回転半径」については、定義されている値より線形近似を行うことで求める。

5.4.2 ブレーキ操作のパラメータ

次に、ブレーキ操作に関してパラメータを設定する。本論文でのモデルでは UNECE におけるプロポーザル資料^[61]、国土交通省による乗用車の制動装置の技術基準^[62]などを参考に、 a_{high} :ブレーキ操作(強)²¹、 a_{low} :ブレーキ操作(弱)における減速度における減速度を以下のように設定する。

$$a_{high} = 3.6(\text{m/s}^2) \quad (5-6)$$

$$a_{low} = 0.5a_{high} = 1.8(\text{m/s}^2) \quad (5-7)$$

5.4.3 航跡指示モデルへのパラメータの組み込み

4.1 項にて定義した各制御レベルの支援操作を考えることにより、ハンドルとブレーキを組み合わせたときの各制御レベルでの変位 $D_{lvx,v(\text{km/h})}(t)$ を以下のように定義する。

$$D_{lv1,v(\text{km/h})}(t) = R_{low,v(\text{km/h})}(\theta) \{1 - \cos(vt / R_{low,v(\text{km/h})}(\theta))\} \quad (5-8)$$

$$D_{lv2,v(\text{km/h})}(t) = R_{high,v(\text{km/h})}(\theta) \{1 - \cos(vt / R_{high,v(\text{km/h})}(\theta))\} \quad (5-9)$$

$$D_{lv3,v(\text{km/h})}(t) = R_{high,v(\text{km/h})}(\theta) \left\{ 1 - \cos \left(\frac{2vt - a_{low}t^2}{2R_{high,v(\text{km/h})}(\theta)} \right) \right\} \quad (5-10)$$

$$D_{lv4,v(\text{km/h})}(t) = R_{high,v(\text{km/h})}(\theta) \left\{ 1 - \cos \left(\frac{2vt - a_{high}t^2}{2R_{high,v(\text{km/h})}(\theta)} \right) \right\} \quad (5-11)$$

上記の各式を用いることにより次節にて述べるように制御レベルの判定条件として利用することができる。

*21 UNECE^[61]において提案された、大型車における緊急ブレーキ表示開始条件: $4.0(\text{m/s}^2)$ を下回る値を採用している。

5.4.4 航跡指示モデルからの制御レベル判定条件の抽出

判定条件として利用する変数を図 5.5 のように定義する。また、単位を含めて再掲すると以下の通りである。

F:路肩までの距離(単位:m)

v:車両の走行速度(単位:km/h)

λ :車両の進行方向(北を 0° として時計回りに計測, 単位:degree)

ϕ :道路の進行方向*22(北を 0° として時計回りに計測, 単位:degree)

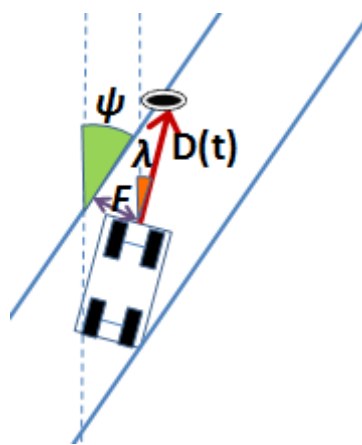


図 5.5 判定条件パラメータの概念図

各制御レベルの境界値を求めるため、上で定義した v, λ, ϕ を用いて $(\phi - \lambda)$ と各レベルでの変位の時刻 t における角度が等しくなる $t_x^{*23}(D_{lv1,v}(km/h))$ の場合であれば、 $v_{t1}/R_{low,v}(km/h)(\theta) = (\phi - \lambda)$ となる t_1 を求める。

ここで求めた時刻 t_x により、現在の速度、角度での各レベルでの制御による変位 $D_{lvx,v}(km/h)(t_x)$ が分かる*24。 $t_x, D_{lvx,v}(km/h)(t_x)$ と RFID までの距離 F を利用することで以下のような制御レベル判定が可能となる。

*22 RFID が設置されている箇所の進行方向である

*23 この状態は現在の車両～路肩・車線境界間の角度が各制御レベルの境界値であることを示す

*24 t_3, t_4 については、 $t_x > 0$ を満たすものうち最小の値をとるものを実際の値として採用する。なぜならば、値の大きいものは一旦停止してから逆走していることを示すからである。また、 t_x の解がない場合は減速により停止するまでの変位を $D_{lvx,v}(km/h)(t_x)$ とする。

$\forall t_x = \infty$ または $\forall t_x < 0$ のとき*25, 制御レベルは 0 である

$F > D_{lv1,v(km/h)}(t_1)$ の時, 制御レベルは 1 となる

$D_{lv1,v(km/h)}(t_1) > F > D_{lv2,v(km/h)}(t_2)$ の時, 制御レベルは 2 となる

$D_{lv2,v(km/h)}(t_2) > F > D_{lv3,v(km/h)}(t_3)$ の時, 制御レベルは 3 となる

$D_{lv3,v(km/h)}(t_3) > F > D_{lv4,v(km/h)}(t_4)$ の時, 制御レベルは 4 となる*26

このようにして, 航跡指示に必要なとなる制御レベルの判定条件を定義するこ

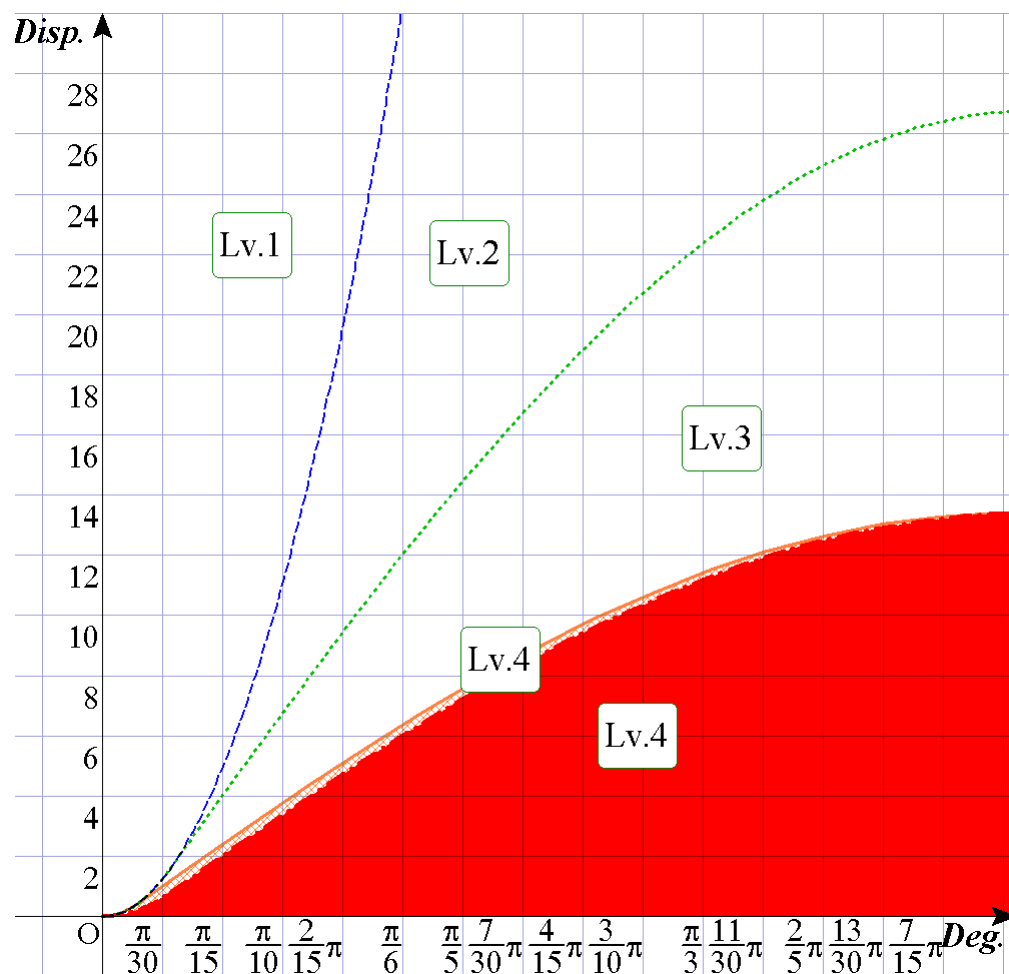


図 5.6 $v=40(\text{km/h})$ における各制御レベルの変位グラフ

(縦軸:路肩との距離(F), 横軸:路肩との角度($\Psi-\lambda$))

*25この状態は路肩・車線境界から遠ざかっているか, 路肩・車線境界に平行に走行していることを示している

*26 $D_{lv4,v(km/h)}(t_4) > F$ の時(図 5 の塗りつぶし領域), 路肩への衝突ないし車線逸脱は不可避な状態であるが, 路肩等との衝突による被害軽減のため制御レベル 4 を指示する。

とができた。

図 5.6 はこれらの境界条件をグラフにしたものの一例($v=40\text{km/h}$ の場合)である。このグラフ上に現在の車両の状態を点(縦軸:F:RFID までの距離,横軸: $(\phi-\lambda)$: 車両と路肩・車線境界間の角度差)として投影することにより制御レベルの判定を行うことができる。

5.5 レーンキープアシストシステムのシミュレーション

このように構築したレーンキープアシストシステムの動作をシミュレーションにより評価した。

5.5.1 評価実施項目

一般道における実用を考慮し、以下の 2 フィールドにおいてシミュレーションによる評価を実施した。

(1)複数車線道路どうしの交差点(レーン幅 3m, 2 車線道路と 3 車線道路の交差点で隅切りは無し)

(2)単一車線の連続する曲線(レーン幅 5m, 曲線半径は 200m,100m,50m の順で緩和曲線は無し)

上記のフィールドにおいて、以下のシナリオを想定したシミュレーションを行った。

- (1)直線道路
- (2)車線変更
- (3)交差点の左折
- (4)単一の曲線
- (5)連続する曲線

また、各パラメータは表 5.1 に示す範囲にて実施している。

表 5.1 LKAS シミュレーションにて使用するパラメータの範囲

車両の開始位置	(シーンによる固定値)
車速	20km/h~60km/h
RFID の通信距離	10m~100m
RFID の電波発信間隔	0.25sec., 0.5sec., 1sec.
RFID の読み取り率	80%, 90%, 100%
RFID の配置間隔	2.5m, 5m, 10m
距離計測精度	0~±20%
反応時間+操作時間	0.5sec., 1sec., 2sec.
角度の計測誤差	± 1degree(固定)

5.5.2 評価概要

5.5.2.A 各変数に対するシステムが成立するための範囲

5.5.2.A.(I) シミュレーションにより得られた各変数の範囲

まず、RFIDに関連した変数について述べると以下の通りである。

通信距離については40m程度、電波発信間隔については0.5sec.、読み取り率については90%程度がそれぞれシステム成立の限界値であり、同時に距離計測精度(誤差)は±20%までであれば正常に路肩への衝突・車線逸脱の回避ができることが判明した。RFIDの配置間隔については、5mの場合と2.5mの場合について大きな差異を観測することができなかった。さらに、反応時間+操作時間は0.5sec.の場合について成功率が高くなっており、ほとんどのケースにおいて路肩への衝突・車線逸脱を防止出来ている。一方で、成功率の高いケースにおいても、道路環境によっては車線方向に最大で2m程度の誤差を観測しているのが現状である。

5.5.2.A.(II) 各変数の範囲に対する考察

RFIDの配置間隔について検討すると、実使用においてはコスト面や電波の輻射なども考慮した結果、5m間隔を採用すべきと考えられる。

さらに、反応時間+操作時間を0.5sec.程度に抑えることが必要であると判明した。自動操作機能であれば操作に0.5秒を使うことができる^{*27}ため、急激な操作を抑えることが可能であることは5.4章にて列挙している各操作の制御量と操作時間の比較より理解できる。一方、運転者の入力を支援操作開始のトリガとした「操作支援機能」の実現は困難であることも判明している^{*28}。最後に、制御判定に要する計算時間について述べると、シミュレーションにおいてはRFIDの通信距離が延長するごとに、またRFIDの配置間隔が狭まるごとに増大してはいるものの、通信距離が40m、配置間隔が5mの環境において数ミリ秒程度にとどまっている。この値を反応時間+操作時間や電波発信間隔と比較するこ

^{*27} 5.1章で述べたように、自動操作機能は接近度合いの判断後、即時に支援操作の起動が開始する。このため、反応時間は0となる。

^{*28} 警告送出機能であれば、危険度の低いレベル(=衝突までに時間的余裕のある段階)での警告を受けて運転者が適切な進路修正を行うことにより実現は可能である。

とにより、制御判定に要する計算時間は無視できる程度の値であることが判明した。

5.5.2.B 道路形状による「実際の軌跡」の評価と考察

5.5.2.B.(I) 直線道路

直線道路においては、各速度において適切な通信距離を設定することで車線の逸脱防止を実現することができた。

5.5.2.B.(II) 車線変更(図 5.7 参照)

車線変更に関しても基本的な評価は直線道路のケースと同様である。本シナリオの特徴的な結果としては、実際に指示した地点とは異なる地点で車線変更している事象を観測したことである。原因としては、平行であるかの判定はするものの「ある RFID に対して幅を寄せる」機能が本 LKAS のモデルには存在しないことが考えられる。

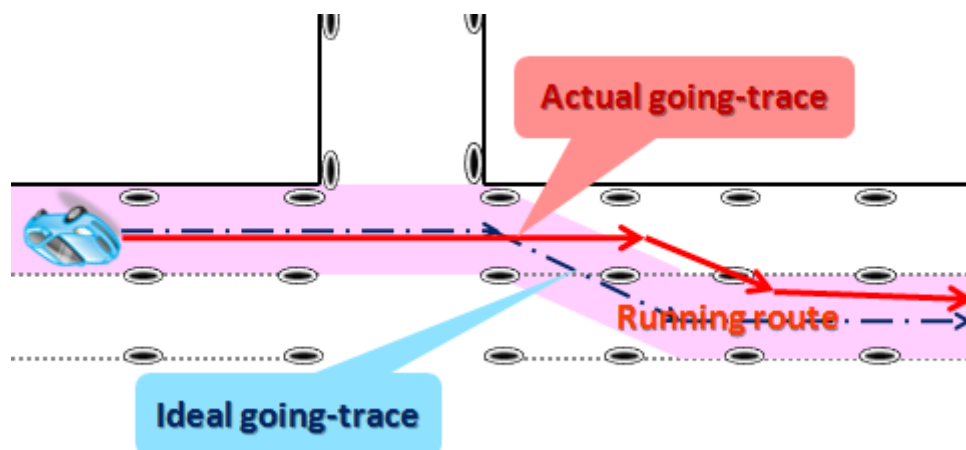


図 5.7 シナリオ:車線変更の実行結果(概念図)

5.5.2.B.(III) 交差点の左折(図 5.8 参照)

左折については、交差点角において指示されたルートより内側へ入り込むケースが多く見られている。原因として、シミュレーション上で定義し走行経路では左折時に必要な回転半径が 2m 程度であり、実際よりも厳しい条件になっていることがあげられる。実際の環境においては交差点の左折であっても 5m 程度の回転半径は確保されるし、交差点の角の隅切りを行うことでさらに大きな回転半径が確保できるため、こうした道路環境の整備により十分に対応可能である。

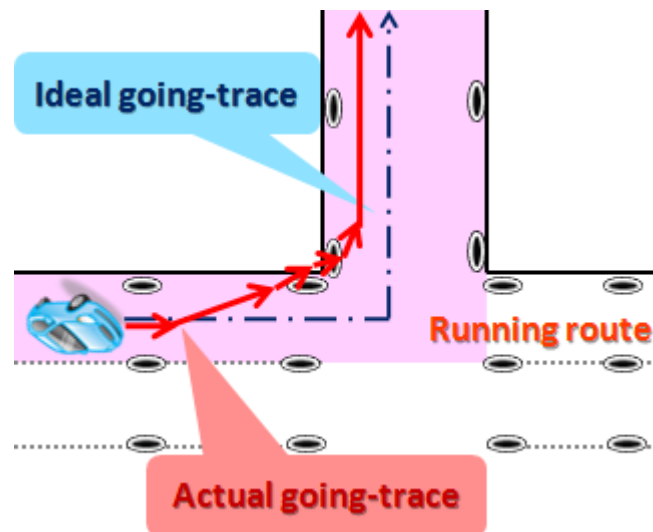


図 5.8 シナリオ:交差点の左折の実行結果(概念図)

5.5.2.B.(IV) 単一の曲線

単一の曲線において、提案手法はほとんどのケースにおいて路肩への衝突を回避することに成功している。

5.5.2.B.(V) 連続する曲線(図 5.9 参照)

連続した曲線においても基本的な挙動は単一の曲線と同様である。ただし、図 5.9 から分かるように曲線と曲線の継ぎ目においては「実際の軌跡」が不安定であり、この個所で衝突回避の成功率が単一の曲線のケースと比べて落ちている。原因としては、曲線と曲線との間に緩和曲線が存在していないことが考えられ、緩和曲線の設置により解決することが可能である。

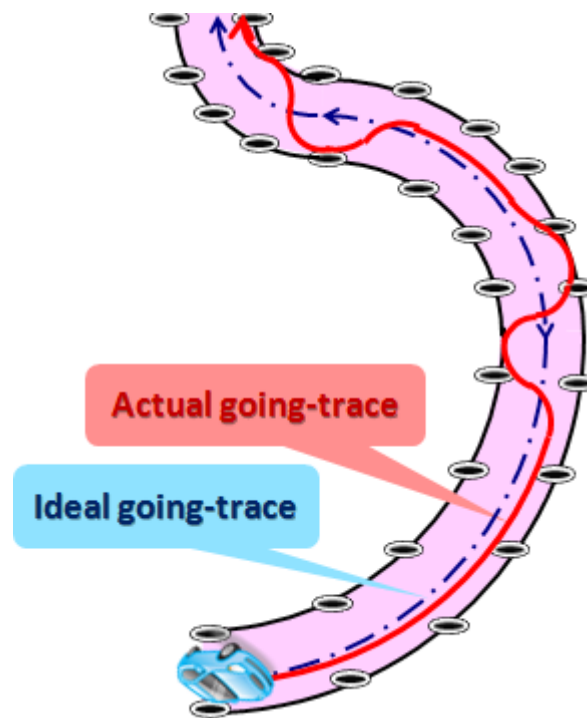


図 5.9 シナリオ:連続する曲線の実行結果(概念図)

5.6 歩行者(移動する対象)衝突回避システムへの拡張

前章までで路肩への衝突を回避するシステムについて検討を行った。本章では、これを移動する対象について拡張することで歩行者など移動する対象と車両との衝突を回避するシステムへの拡張について検討する。手法としては、RFID を歩行者に所持させ、車両と歩行者の距離を受信強度により計測して実現する。

歩行者の移動の予測手法について考えると、常に最悪のケースのみを想定する「簡素化モデル」、歩行者の通路全体をセルに分割し、目的地までの間に歩行者が遷移するセルを推定する「ミクروسケールモデル」^[63]、歩行者の現在位置から目的地までの間に障害物の無い領域を考慮して歩行者の移動を推定する「メソスケールモデル」^[64]等が例として挙げられる。

簡素化モデルにおいて、歩行者は常に最短時間で車両と衝突する(この衝突地点を”最短衝突地点”とする)ように歩行しているものとして移動経路を予測している。簡素化モデルは歩行者と車両の衝突を回避することが目的であるため、歩行者行動の再現性については考慮していない。

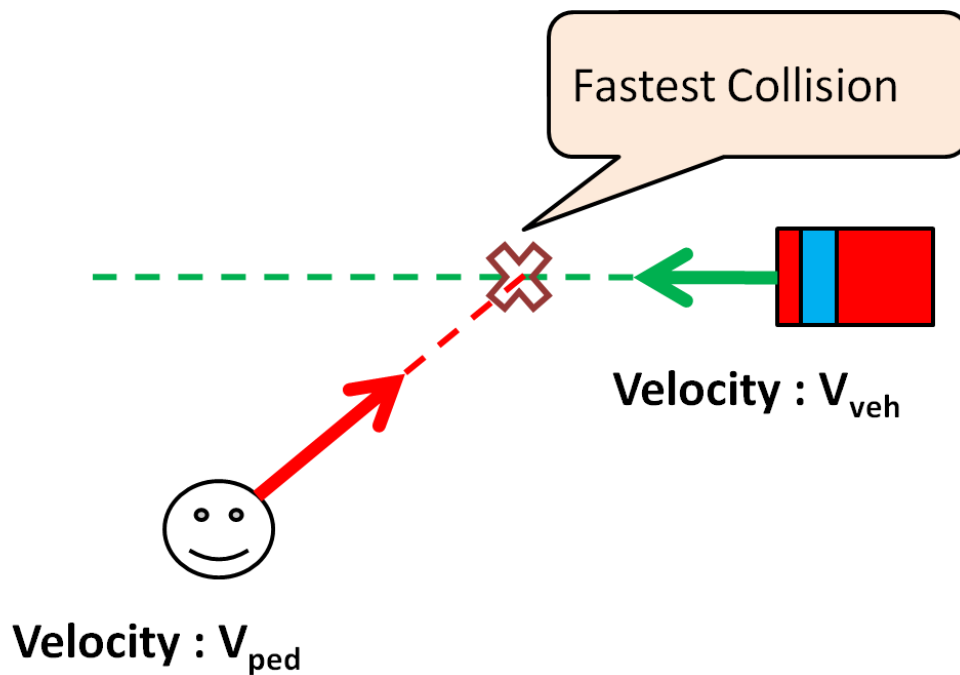


図 5.10 簡素化モデルによる歩行者挙動の予測

ミクروسケールモデルは”step-by-step model”の一種であり、歩行者の次の一步に焦点を置いている。ミクロスケールモデルにおいて、目的地までの経路はセルの集合として表現され、歩行者は確率モデルに従って1セルずつ進む。通常、歩行者の進行方向は8方位として再現され、次に進むセルは9個である(このセルは”確率セル”と呼ばれている)。

メソスケールモデルは、他のモデルに比べて簡素化されたモデルである。メソスケールモデルにおいて、歩行者は円として、目的地は点として再現される。歩行者は他者との衝突を回避しながら目的地に向かうが、この際に”歩行可能領域”(障害物、他の歩行者の存在しないエリア)を考慮して移動を行う。メソスケールモデルでは進行方向の数に制約がないため、ミクロスケールモデルと比較してさらに正確な歩行者行動を再現している。

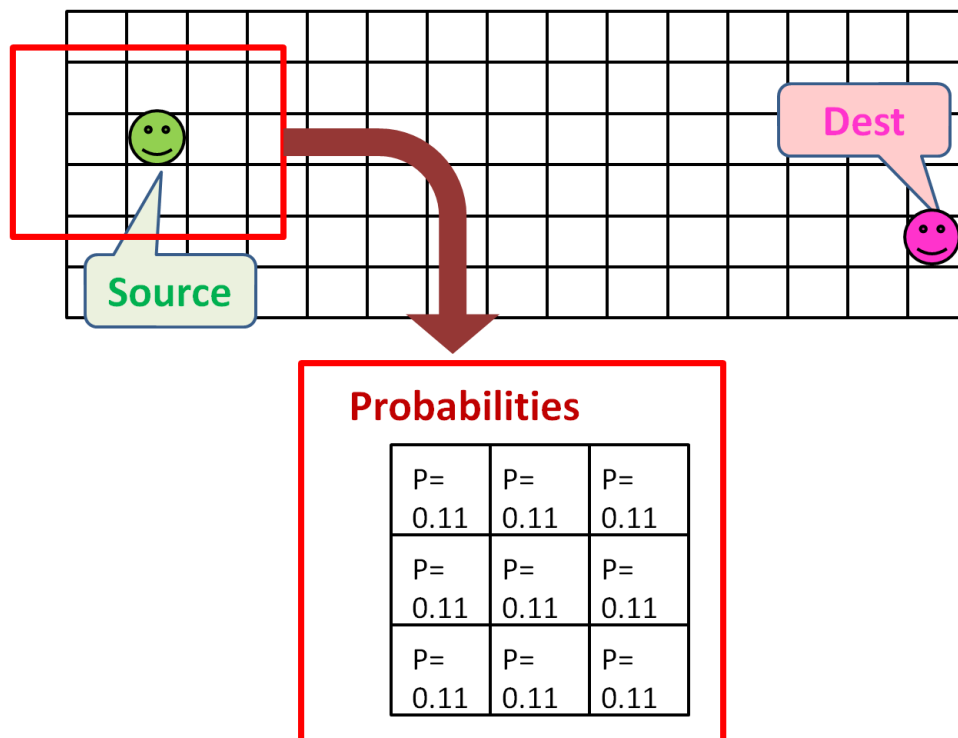


図 5.11 ミクروسケールモデルによる歩行者挙動の予測

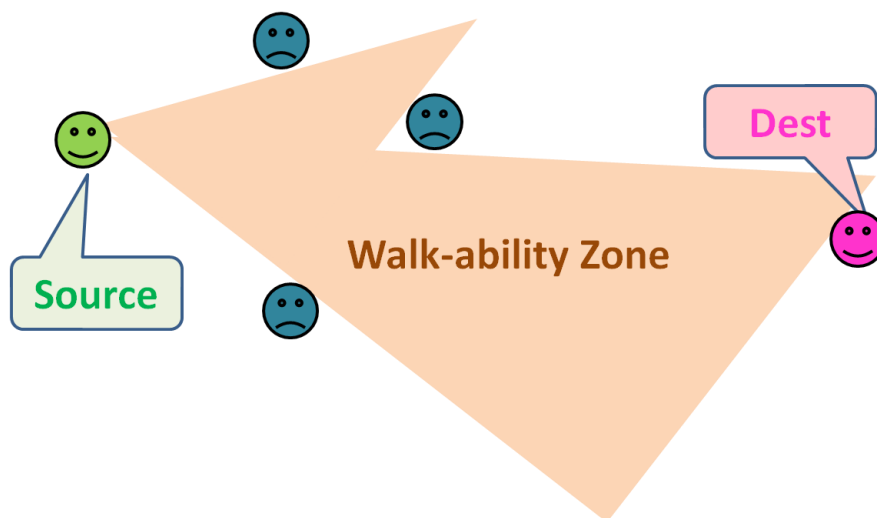


図 5.12 メソスケールモデルによる歩行者挙動の予測

道路空間を対象とすると、多くの歩行者が存在する環境でもリアルタイムな計算を実現することが必要である。したがって、衝突回避のために歩行者行動を予測するモデルとしては簡素化モデルを適用すべきであると考えられる。簡素化モデルは最悪のケースに基づいて回避行動を起こすためほぼすべてのケースにおいて歩行者と車両の衝突を回避することができるが、一方では不要な回避行動を起こすケースが多発する点が課題である。この問題により、歩行者が多数存在する環境では車両は停止ないし低速でしか走行できないという事象が想定される。したがって、歩行者など移動する対象との衝突回避においては「警告の送出」にとどめるのが現時点では実用的であると考えられる。

ミクロスケールモデルやメソスケールモデルを導入するためには、歩行者の所持する RFID から発する電波の強度などを用いて、回避対象とする歩行者の数を絞り込むことが必要である。

5.7 まとめ

本章では RFID を用いたレーンキープアシストシステムについて述べた。制御(航跡指示)モデル自体は簡素なものであるが、利用する機器の特性に依存しないため RFID を用いたプラットフォーム上でなくとも実装可能であるという利点が存在する。評価の結果、RFID の通信距離が 40m 程度、電波発信間隔が 0.5sec.、読み取り率が 90%程度、そして距離計測精度(誤差)が $\pm 20\%$ 程度であればほとんどのケースにおいて路肩への衝突・車線逸脱の回避が実現できると判明した。この要求値のうち、特に距離計測精度については現状の RFID を活用した手法では実現されておらず、手法自体も RSSI を用いるため常に安定した結果を得ることは難しい。したがって、実用的には車両制御を行うシステムよりも警告を送出するシステムの方が有効である。また、後述の情報提供システムにより道路形状の情報を運転者に提供することで車線からの逸脱を防止することも実用的には有効と考えられる。

一方で、本章で提案したレーンキープアシストモデルの車両制御パターンは、何も制御を行わないものを含めてもわずかに 5 通りである。これは制御パラメータ(回転半径, 減速度)のパターン数を抑えていることが原因であり、パターン数の増加によりさらに精密なモデルの構築が可能である。これにより、路肩へ

の衝突や車線逸脱の回避成功率が向上するとともに、レーンキープアシストシステムにより車両の描く軌跡をより理想的な軌跡に近づけることが可能であると考えられる。しかし、本シミュレーションは4章にて検討した位置推定手法とは独立に行われたため、この位置推定手法を用いた条件での検証は今後の課題である。

歩行者など移動する対象との衝突回避システムへの拡張について検討すると、道路空間を対象とすると多くの歩行者が存在する環境でもリアルタイムな計算を実現することが必要である。したがって、計算量の少ないモデルしか実装できず、歩行者行動の予測精度は低下することが懸念される。よって、現時点では警告を送出するシステムとしての実現が適当であると考えられる。

6 マルチホップ RFID を活用した情報提供・ 収集システム

従来の RFID を用いたシステムでは通信距離の制約があるため、例えば 100m 先の情報を取得することは不可能であった。これを解決するため、マルチホップ RFID を活用した情報提供・収集システムを提案する。また、マルチホップ RFID は自身の情報が更新された際に情報を発信することが可能なため、リアルタイムな情報の提供・収集に有効性が高いと考えられる。

6.1 情報提供システムにおいて扱われる情報の分類整理

ITS に関連した情報提供システムにおいて扱われる情報群を更新頻度により分類し、適切な発報方法を定義したものが表 6.1 である。発報の方法について検討すると、RT 情報や QRT 情報など情報更新頻度の高いものは情報更新による発報が、SST 情報や ST 情報のように情報更新頻度の低いものは定期的な発報ないし車載データベースへの格納がそれぞれ適切であると考えられる。

表 6.1 更新頻度による情報群の分類

情報分類	Real-time (RT)	Quasi real-time (QRT)	Inter-mediate (IM)	Semi static (SST)	Static (ST)
更新頻度	～数秒	数秒～数分	数分～数時間	数時間～数日	数日～
実際の情報(例)	1. 歩行者 存在情報 2. 車両 存在情報	信号現示情報	事故発生情報	道路 工事情報	1. 地名情報 2. 規制情報 3. 道路形状
発報方法	情報更新による発報			定期的な発報/ データベース格納	

6.2 情報提供・収集システムの概要

車両への情報提供と RFID 間での情報交換は図 6.1 に示したように行われる。同様に、図 6.2 では情報提供システムに関連する機器の配置を示している。車両と RFID の間における通信は単純である。RFID は自身の ID とともに情報を送信し、車載の R/W は単にその情報を受信するのみである。ここで、RFID が情報を送信する間隔は 6.1 章に示した通りである。ここでは複数種類の情報を扱うことを想定しているため、情報更新による発報がいつ発生するかは不定である。よって、本提案システムでは図 6.1 にもあるように情報更新による発報と定期的な発報の両者を併用している。続いて RFID 同士の通信について述べると、状態変化(信号現示の変化)を検出した R/W により、周囲の RFID へ情報を書き込むこと(情報の更新)が情報送信の起点である。その後、ここで更新された情報はバケツリレーにより交換され、広い範囲への流通が可能となる。RFID 同士の通信においても情報更新による発報と定期的な発報の両者を併用している。

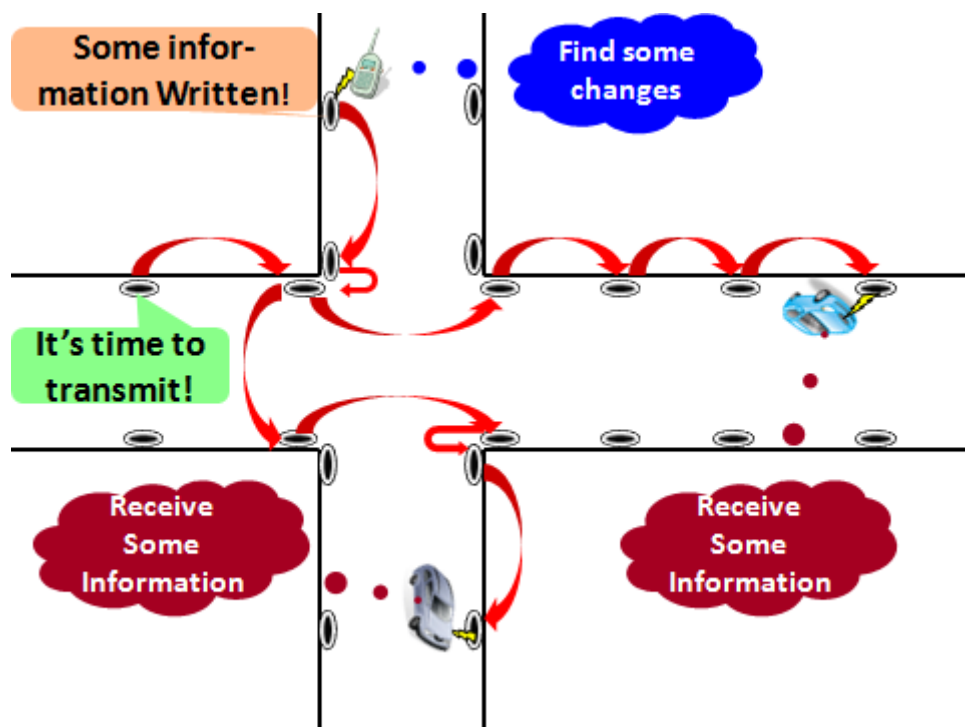


図 6.1 提案システムにおける情報提供のイメージ

6.3 利用する機器とデータ交換

本提案システムでは RFID が路面に、R/W が車両側に設置される方式を採用している。加えて、R/W は情報の発生源にも設置されており、例えば、歩行者の存在情報であれば歩行者に、信号現示情報であれば信号機に R/W が設置されることとなる。これらを図式化したものが図 6.2 であり、RFID 相互間でマルチホップ通信を行うことにより各 RFID に書き込まれた情報をバケツリレー方式で拡散し、車両にいち早く伝達している。

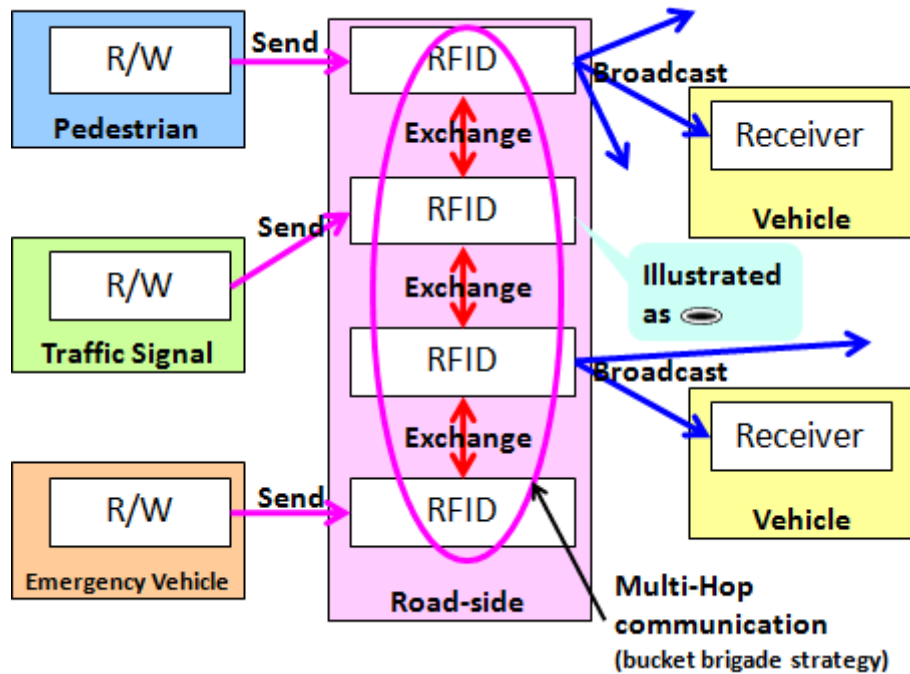


図 6.2 提案システムに関連する機器配置

6.4 情報提供・収集システムの応用事例

本章では提案プラットフォームを用いた情報提供・収集システムについて、表 6.1 にて定義した情報種類のうち、特に RT 情報、QRT 情報と、それらの情報を加工/拡張した情報の提供について、いくつかの応用事例における導入効果や必要なデータ量(ビット列によるデータ量)について検討を行う。

6.4.1 歩行者、車両に対する注意喚起情報の提供

RT 情報の例として、歩行者・車両の存在を認識し、注意喚起情報として提供するケースについて検討する。歩行者、車両に対する注意喚起情報を提供することにより、特に図 6.3 のような見通しの悪い箇所における危険回避を支援している。この事例では、車両の存在情報は他車、歩行者に提供され、歩行者の存在情報は車両に向けて提供されることによりそれぞれ注意喚起を行うものである。提案システムにおける特徴は以下のとおりである

- 1) 歩行者にも R/W を所持させることで、車両だけでなく歩行者に対しても注意喚起が可能である。
- 2) マルチホップ RFID の活用により、簡易なシステム構成が可能である。マルチホップ RFID を利用するため電源供給の問題は残っているものの、RFID の特徴を最大限生かしたシステムであることも特徴である。

車両や歩行者から RFID に書き込まれる情報量は RFID へのアクセス時刻(時:5bit, 分:6bit, 秒:6bit)と、自身が車両、歩行者(もしくはその他)のいずれであるかを示す識別用情報(2bit)程度が最小量であり、これを RFID から送信する際にはさらにタグ番号(通常 32bit^{*29})が付加される。各 ID 番号に対してひもづけられる歩行者・車両検出情報はそれぞれ 1 つに制約することが可能なため、各 RFID が発信する車両・歩行者の検出情報は最小で 70bit であると考えられる。

^{*29} EPC による RFID のデータ仕様^[65]では、これより長い ID の利用も可能となっている

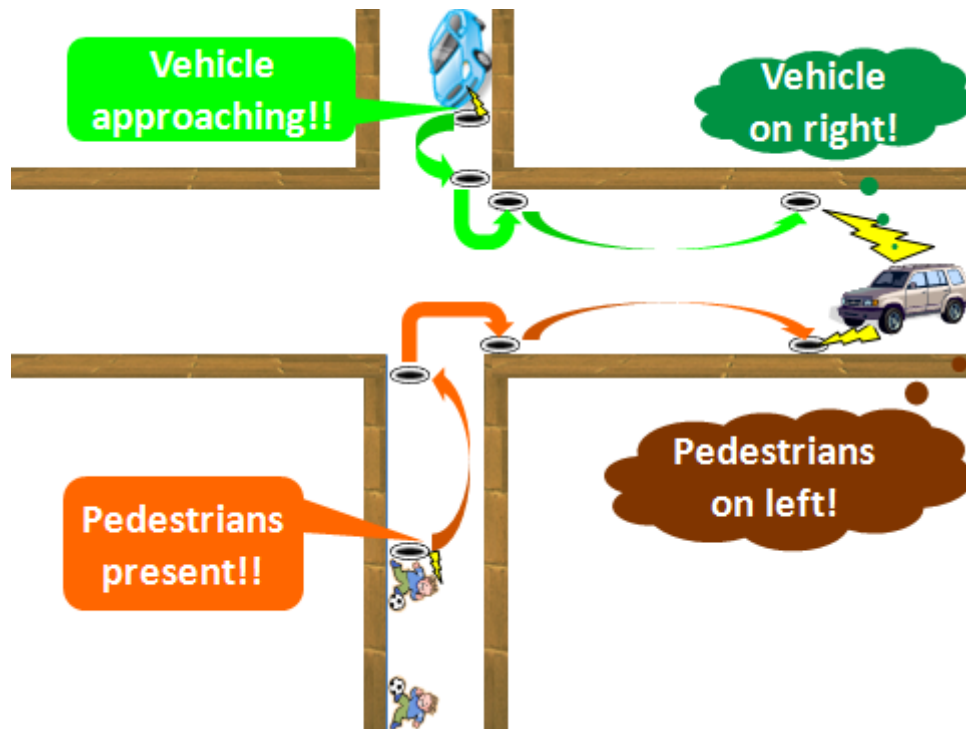


図 6.3 注意喚起情報の提供(歩行者, 対向車等の存在)

6.4.2 信号現示情報の提供

QRT 情報の例として, 信号現示情報の提供について検討する. 運転者が意図する進路に該当している信号現示がいずれであるかかの判断を補助するため, 提案システムでは, 図 6.4 のように車上で受信した信号現示情報とナビゲーションで指示されたルートを照合することで, どの信号現示が意図する進路に該当しているかをナビゲーション上に表示する手法を提案する. マルチホップ RFID の活用により RFID の通信範囲外にある情報も収集・提供可能なことから, 本事例においてもマルチホップ RFID の活用で通信距離の課題は解消されている.

信号機から RFID に書き込まれる情報量について検討すると、交差点を識別するために必要な ID(34bit)*³⁰, 各方向の信号現示(赤, 黄, 青, 時差青:2bit)×交差点の方向数(最大 8:3bit), そして書き込み時刻(時:5bit, 分:6bit, 秒: 6bit)の 67bit 程度が最小量であり, これを RFID から送信する際にはさらにタグ番号(32bit)が付加される. 各 RFID(ID 番号)に対してひも付けられる信号現示情報の数に制限はないため, RFID 一つあたりの信号現示情報のデータ量は固定的でない.

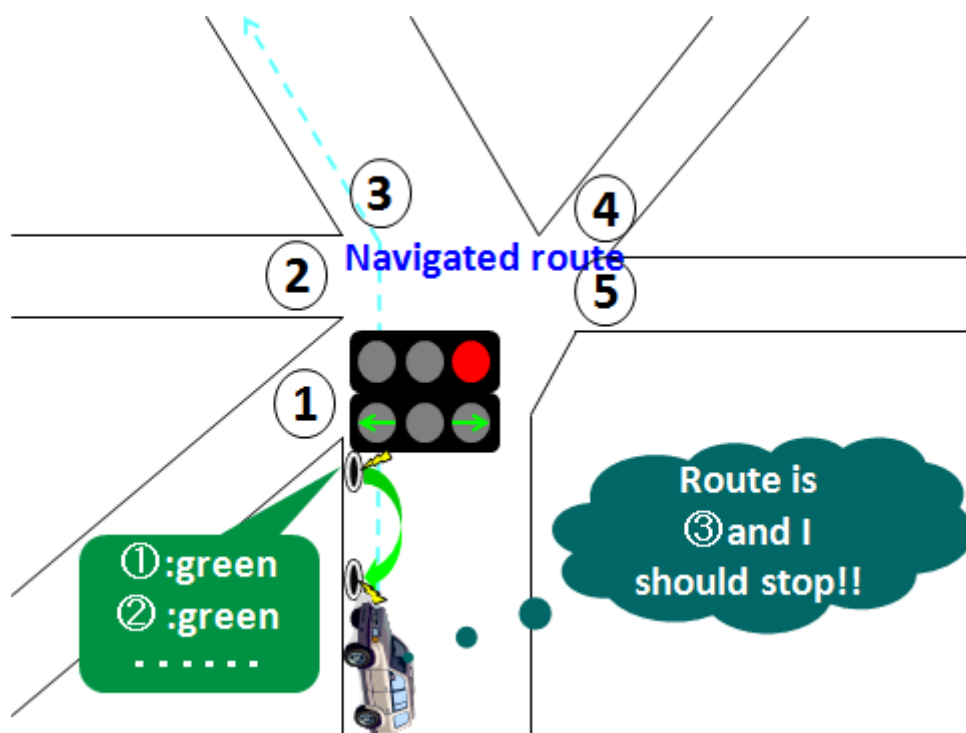


図 6.4 信号現示情報の提供

*³⁰ 交差点 ID のデータ量は交通調査基本区間標準・基本交差点標準^[66]の「基本交差点番号」の桁数に準拠している

6.4.3 渋滞情報の収集と提供

車両の存在情報を応用した事例として、図 6.5 のように渋滞情報の収集と提供を行うことが考えられる。マルチホップ RFID の特性により、リアルタイムに渋滞情報の収集と提供を行うことが可能であることから、運転者に対してルートの変更など渋滞回避を提案することができる。提供される渋滞情報も計測地点は RFID ごとであるから精度の高い情報であるし、他の情報(信号現示情報、交通規制情報など)と組み合わせることで渋滞の原因を把握することも可能である。

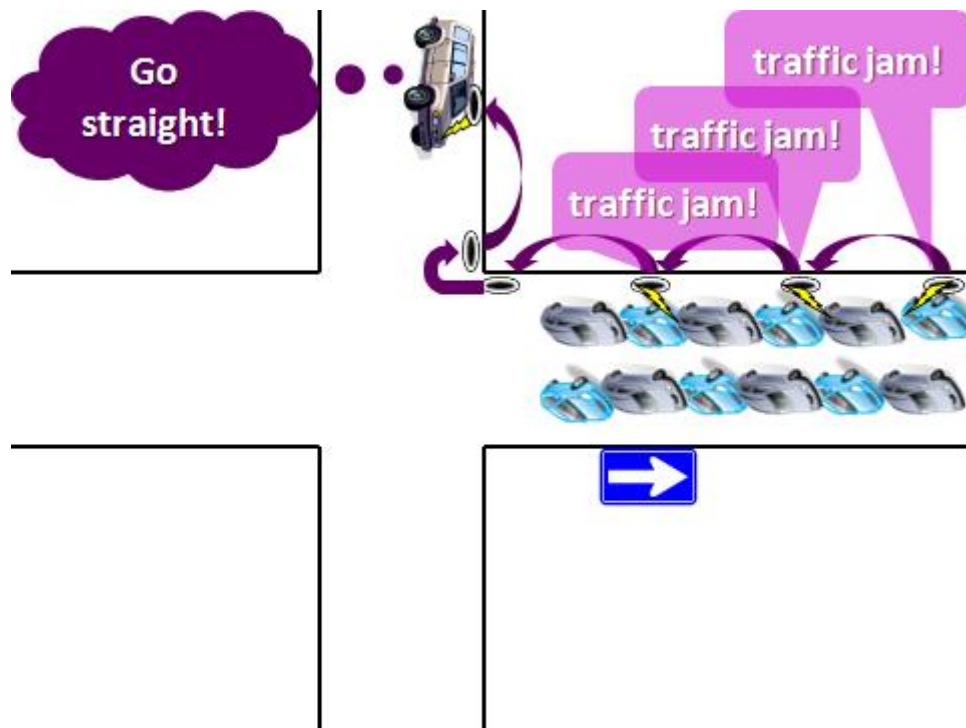


図 6.5 渋滞情報の収集と提供

渋滞情報は車両の存在状況により提供されるため、やり取りされるデータ量は「車両・歩行者の検出情報」と同様であり、各 RFID に対して最小 70bit であると考えられる。

6.4.4 緊急車両接近情報の提供

車両の存在情報を拡張することで、図 6.6 のように、運転者から視認できない場合やサイレンを聴取できない状況でも緊急車両の接近情報を提供することが可能である。これにより、緊急車両としては右左折後の走行レーンを確保することが可能であるし、一般の運転者としても緊急車両が接近しているかどうかを判断しやすくなるため不要な回避行動を削減することが可能である。

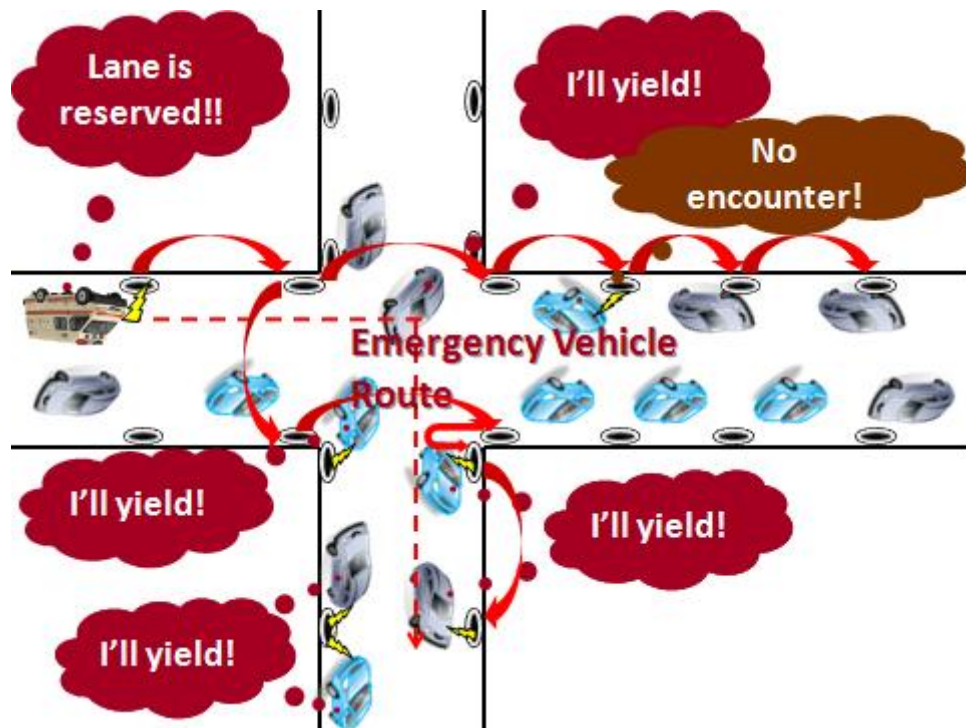


図 6.6 緊急車両接近情報の提供

緊急車両の接近情報について、緊急車両から RFID に送信される情報は緊急車両の種別情報(警察, 消防, 救急 etc.:3bit)と RFID への書き込み時刻(時:5bit, 分:6bit, 秒:6bit)の 20bit が必要量と考えられ、これを RFID から送信する際にはさらにタグ番号(32bit)が付加される。各 RFID(ID 番号)に対してひも付けられる緊急車両接近情報の数に制限はないため、RFID 一つあたりの緊急車両接近情報のデータ量は固定的でない。また、緊急車両の接近情報に走行経路情報を追加することでこのデータ量はさらに増加する。

6.5 課題と対策例

6.5.1 情報の利用に関する共通的な課題

提案システムに関連して、大まかに述べれば3つの課題が挙げられる。1つめは各 RFID が車両の左右どちらの側面に位置しているかの認識方法である。解決策として、提案システム中に各 RFID の位置と ID をプロットした RFID マップを搭載することである。車両において車両の進行方向と速度を認識すること

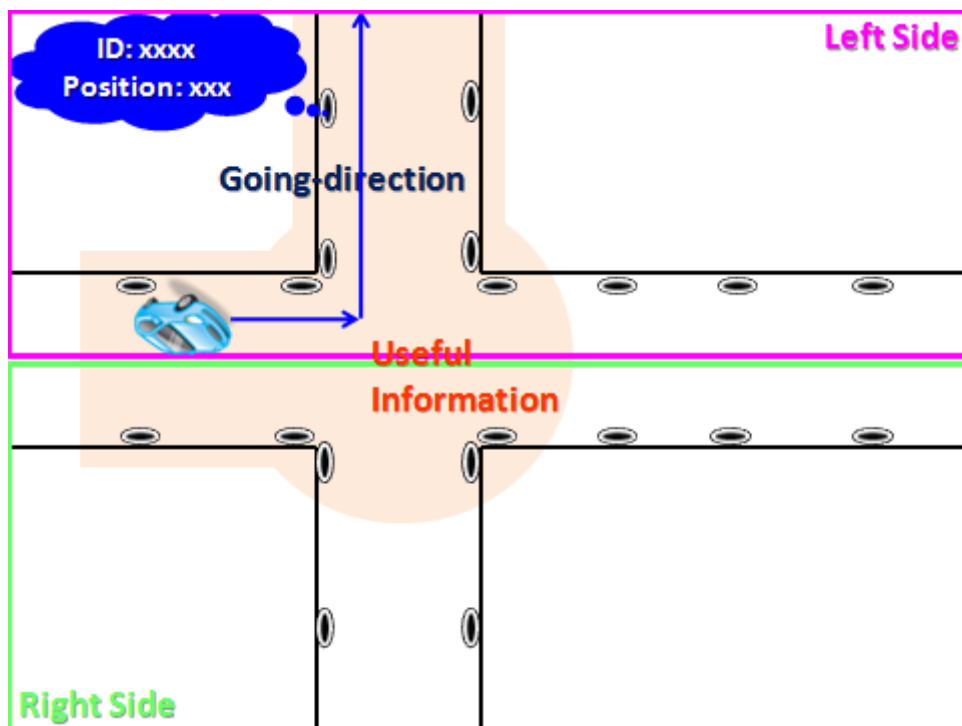


図 6.7 車両の位置・走行経路と有用な情報の存在範囲

ができるため、これらの情報と RFID マップにより各 RFID が車両の左右どの側面に位置しているかを推定することができる。RFID マップの更新には課題が残るものの、この課題はカーナビゲーションシステムにおける地図の更新と同じものとして扱うことができる。

次の課題は各車両に対する有用な情報の選択である。マルチホップ RFID 自体にはどの RFID と情報を交換すべきかの制約は存在しないし、仮にそうした制約が存在したとしてもどの情報が有用であるかは車両によって異なるため適切な制約条件を定義することは不可能である。ゆえに、どの情報がその車両に

とって有用であるかは各車両において選択することが必要であり、前出の RFID マップを利用することでこの選択を容易とできる。

最後の課題は複数の R/W がある 1 つの RFID に対して書き込みを行おうとした場合に起こる輻輳への対応である。この課題はアクティブ型 RFID 全般の課題であるが、とりうる対策として例えば R/W が書き込む前にどの RFID に対して書き込みを行うかを指定するという手法である。この手法により、指定されなかった RFID は R/W からの書き込み信号を受信しても無視することが可能であるし、R/W が RFID の指定に失敗した場合にはその RFID への書き込みは行われぬ、という処理を実装することも可能である。

6.5.2 セキュリティについての課題

提案プラットフォームによる情報収集において、全ての車両ユーザーが各種の情報を送信することが可能である。このため、正確な情報の提供には成りすましや偽装による不正な情報の混入を防止することが必要であり、情報の特性に応じた検討が必要となる。例えば、緊急車両の接近情報のように重要な情報については優先通行の悪用につながるため、破られにくい認証方式(ソフトウェアトークン^[67]、電子証明書^[68]etc.)を用いるなど強固な対策が必要である。一方で、歩行者や(一般)車両の接近情報などは単に存在情報としてしか提供されないため、不正な情報が混入されても影響は限定的だといえる。このように、偽装の影響の少ない情報についてはメモリオーバーフローの回避といった基本事項の検討のみで十分と考えられる。

プライバシーの観点からは、意図しないユーザーからの追跡を避けるために車両や歩行者から収集した情報は匿名化情報^{*31}としてやり取りすることが必要である。特に、車両や歩行者に関連付けられた ID については例えば車両や歩行者の持つリーダから RFID へ情報送信を要求する時のみに利用し、渋滞情報や接近情報の提供や RFID 相互間でのデータ交換においては利用しない、というように利用範囲を最小化する検討が必要である。

*31 次世代高信頼・省エネ型 IT 基盤技術開発事業の一環として、行動情報の匿名化プラットフォームについて検討が行われている^[69]

6.5.3 通信容量の課題

RFID の通信速度は数十 kbps 程度であるため、取り扱うデータの容量についての検討が必要である。ここでは、利用する情報の種類をもとに、バイナリ列により情報送信した場合のデータ量を検討する。

ここでは、市街地での利用を想定したプラットフォームが備えるべき転送容量を概算するため、図 6.8 のような道路を例として、R/W から RFID に書き込まれる情報量(図 6.9 の①)と RFID から発信される情報量(図 6.9 の②)について検討を行った。また、この検討に用いたパラメータは

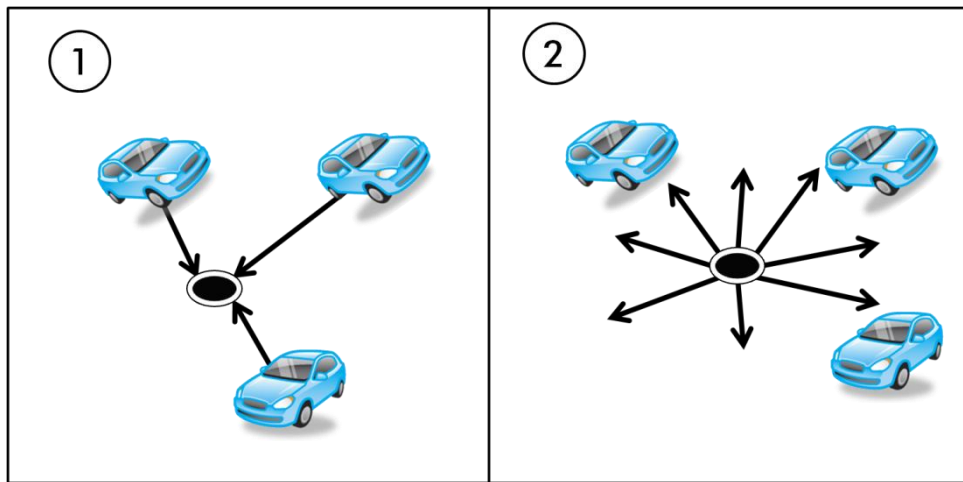


図 6.9 容量を求める通信の概念図

表 6.2 の通りである。

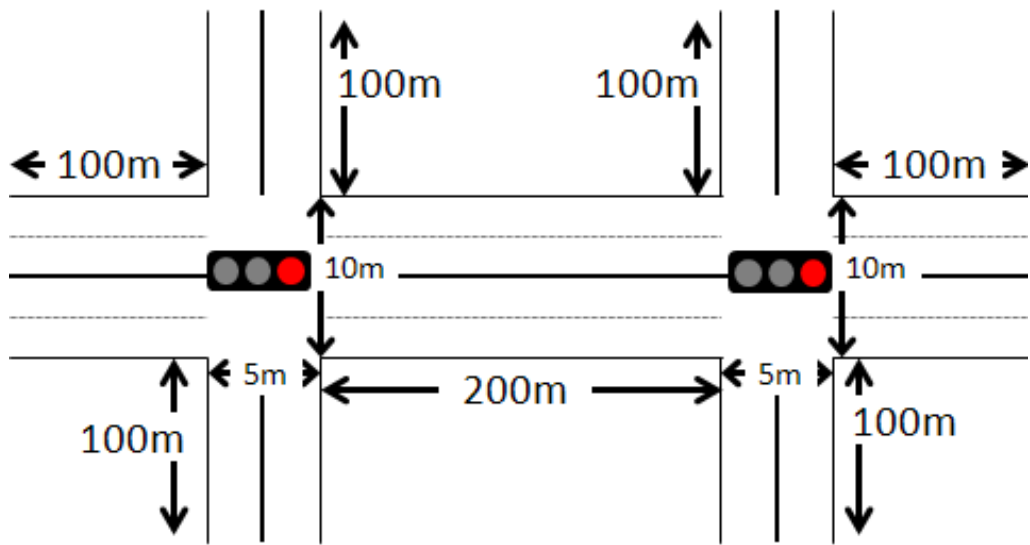


図 6.8 想定する道路環境

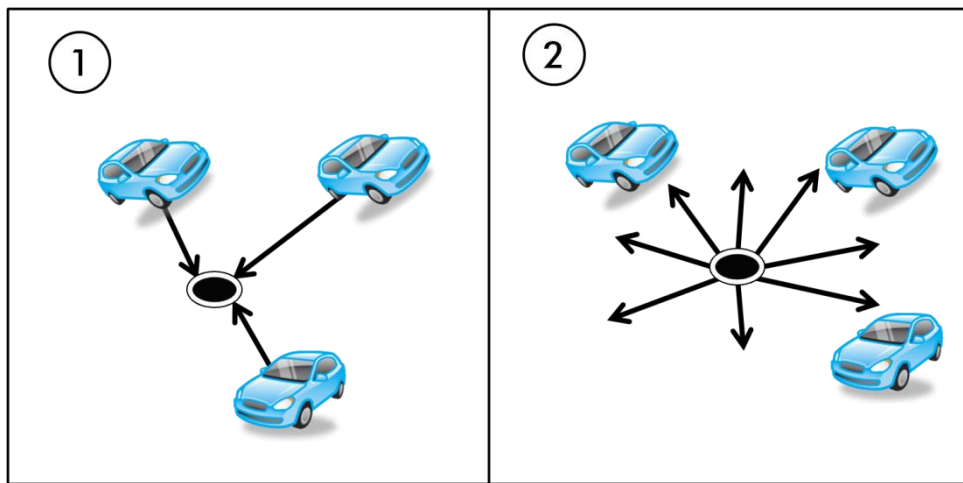


図 6.9 容量を求める通信の概念図

表 6.2 通信容量の検討に用いたパラメータ

RFID の配置間隔		1m
RFID の通信距離		40m
RFID の配置箇所		路肩, 車線境界
RFID からの情報送信	情報更新時	更新のあった情報のみ
	1 秒ごとの送信	タグ内の全情報

RFID のメモリ容量		1kbit(ID:32bit)を含む
情報の生成頻度	車両接近情報	車両が RFID の横を通過すること
	信号現示情報	30sec.
情報量	タグ ID	32bit
	車両接近情報	19bit
	信号現示情報	67bit
車両の長さ		5m
車両の走行間隔	水平方向	5m
	垂直方向	0m
車両の走行速度	水平方向	36km/h(10m/s)
	垂直方向	停止(0km/h)
車線数	水平方向	片側 2 車線(計 4 車線)
	垂直方向	片側 1 車線(計 2 車線)

以上より， RFID に書き込まれる 1 秒あたりの情報量は以下のように求められる．まず，車両接近情報のデータ量は 19bit であり，各車両が 1 秒あたりに書き込むデータの件数は 10 件である．水平方向を走行している車両の数は 1640 台であるから，1 秒あたりに RFID に書き込まれるデータ量の総和は，

$$19 \times 10 \times 410 \times 4 = 311600(\text{bit}) = 311.6(\text{kbit}) \quad (6-1)$$

次に，信号現示情報のデータ量は 67bit であり，各信号機は 30 秒おきにコンデータを近接する RFID に対して書き込む．したがって，各信号機が書き込む RFID の数は信号機 1 台あたり 12 個であるから，1 秒あたりに RFID に書き込まれるデータ量の総和は，

$$67 \times 2 \times 12 \times 2 \div 30 = 107.2(\text{bit}) \quad (6-2)$$

(6-1)，(6-2)より，1 秒あたりに RFID に書き込まれる全データ量の総和は，

$$311600 + 107.2 = 311707.2(\text{bit}) = \text{約 } 311.7(\text{kbit}) \quad (6-3)$$

RFID から送信される情報は更新されたデータの送信と，定期的に発信されるタグ内の全データが存在する．まず，更新されたデータの送信は書き込まれたデータに加えて自身の ID が含まれるから，車両接近情報の更新により送信されるデータ量の総和は，

$$(19+32) \times 10 \times 410 \times 4 = 836400(\text{bit}) = 836.4(\text{kbit}) \quad (6-4)$$

同様に、信号現示情報の更新により送信されるデータ量の総和は、

$$(67+32) \times 2 \times 12 \times 2 \div 30 = 158.4(\text{bit}) \quad (6-5)$$

したがって、RFID から各情報の更新により送信される全データ量の総和は、

$$836400 + 158.4 = 836558.4(\text{bit}) = \text{約 } 836.6(\text{kbit}) \quad (6-6)$$

次に、RFID から定期的に発信されるデータ量はタグ 1 個あたり 1kbit である。

ここで、図 6.8 の道路に設置されたタグの総数は以下のように求められる。

$$\begin{aligned} & (100+5+200+5+100) \times 5 + (100+10+100) \times 4 + (100+10+100) \times 4 \\ & = 2560(\text{個}) \end{aligned} \quad (6-7)$$

したがって、全 RFID から定期的に発信されるデータ量の総和は、

$$2560 \times 1(\text{kbit}) = 2560(\text{kbit}) \quad (6-8)$$

(6-6)、(6-8)より、RFID が 1 秒あたりに送信するデータ量の総和は、

$$836.6 + 2560 = 3396.6(\text{kbit}) \quad (6-9)$$

RFID が送信するデータ量、RFID が R/W から書き込まれるデータ量が求まったところで、RFID の必要な転送容量について検討する。まず、道路全体の面積は以下のように求められる。

$$\begin{aligned} & (100+200+100) \times 10 + (100+100+100+100) \times 5 + 10 \times 5 \times 2 \\ & = 6100(\text{m}^2) \end{aligned} \quad (6-10)$$

また、RFID の通信範囲は以下のように求められる。

$$40 \times 40 \times 3.14 = 5024(\text{m}^2) \quad (6-11)$$

したがって、RFID から送信するデータ、R/W から RFID に書き込まれるデータともに道路全体で一様に分布しているとすると、1 つの RFID の通信範囲に存在するデータ量は、それぞれ以下のように求められる。

R/W から RFID に書き込まれるデータ量:

$$311707.2 \times 5024 \div 6100 = \text{約 } 256724(\text{bit}) = \text{約 } 256.7(\text{kbit}) \quad (6-12)$$

RFID から送信するデータ量:

$$3396.6 \times 5024 \div 6100 = \text{約 } 2797.5(\text{kbit}) \quad (6-13)$$

(6-12)、(6-13)は 1 秒あたりのデータ量であるから、想定した環境において必要となる RFID の受信速度と送信速度は以下の通りである。

必要な RFID の受信速度:256.7(kbit/s)

必要な RFID の送信速度: 2797.5(kbit/s)

現状の RFID の通信速度は一般的に 100kbps 程度であるから、必要となる受信速度、送信速度の両者に対して不足している。ここで、受信速度について検討すると、(6-1)と(6-2)の比較により、車両接近情報が受信容量の大部分を占めていることが判明した。本検討において、車両接近情報は 1 秒間に 10 個の RFID に対して書き込まれていることから、この書き込みを毎秒 1 回に制約することで必要となる受信容量は 1/10 程度に削減可能と推測でき、現状の RFID の通信速度でも利用可能な範囲に収まると考えられる。

また、送信速度は必要となる値と比較して大きく不足しているが、(6-6)と(6-8)の比較により、必要となる送信容量のうち RFID から定期的に発信されるデータが全容量のおよそ 3/4 を占めていることが判明した。したがって、定期的に発信されるデータの容量の圧縮や、定期的にデータを発信するタグの数自体を削減することで、必要となる RFID の送信速度不足を低減することが可能である。

6.5.4 応用シーン特有の課題

6.5.4.A 歩行者，車両に対する注意喚起情報の提供

注意喚起情報の提供に関しては，その情報が車両の左右いずれの側に存在するかを判断する必要がある。この課題に対しては，6.5.1 章で述べた「各車両に対する有用な情報の選択」とほぼ同じ手法で対策を行うことが可能である。

6.5.4.B 信号現示情報の提供

ナビゲーションシステムの経路指示によらず，車両が走行している場合に信号現示情報を提供する手法の検討が必要である。図 6.10 のように方位情報や地名情報を付加して信号表示情報を運転者に提供することで，ナビゲーションシステムの経路情報が利用できない場合でも信号現示情報を提供し，運転者が必要な情報を選択することが可能である。このうち，方位情報は 16 方位による表現の場合，データ量は 4bit が追加される。地名情報は長さが不定であるため追加されるデータ量も不定である。

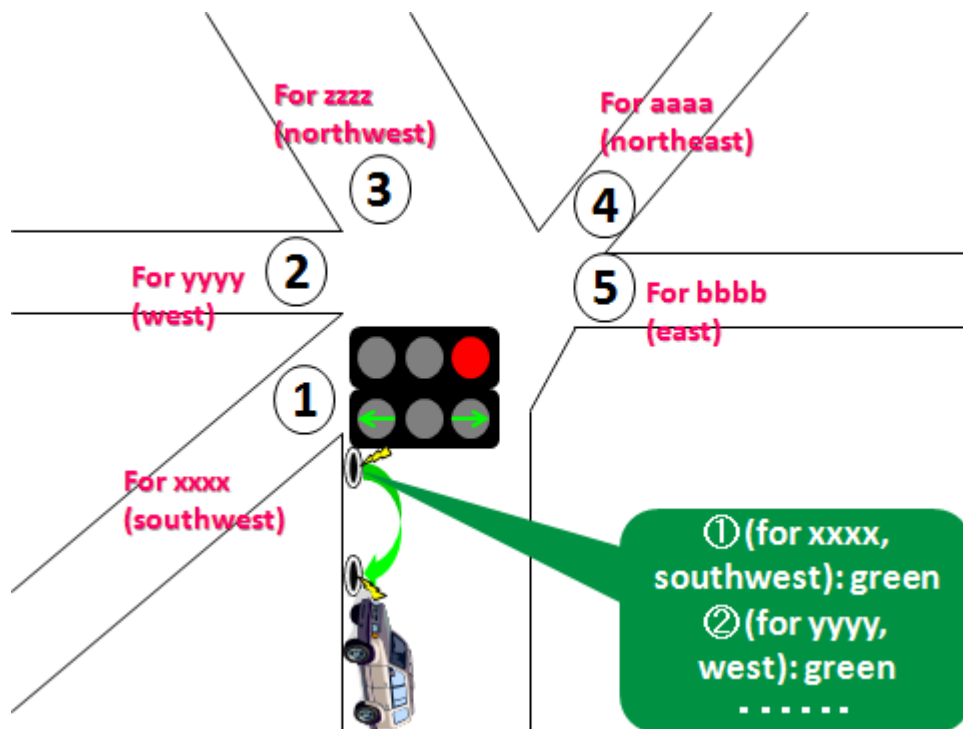


図 6.10 方位情報，地名情報を用いた信号表示情報の提供

6.5.4.C 渋滞情報の収集と提供

渋滞情報の収集における課題として、信号待ちなどで停止している車両が多く存在している状態を渋滞として誤認識すると問題が挙げられる。提案システムでは車両の存在のみを認識しているため、渋滞の発生している原因や正確な渋滞状況の把握には信号現示情報など車両の存在状況以外の情報との連携が必要である。

また、提案手法は各 RFID から受信した車両の存在状況をもとに、車上で渋滞状況を認識するため、車両の台数が増えることで提供される情報量が増加する点も課題である。車両から RFID へアクセスする頻度が 1 秒であるとする、図 6.11 のように RFID の通信範囲内には 4 台程度の車両が同時に存在することが考えられる。したがって、毎秒 4 台の車両の存在情報がタグに書き込まれることとなる。この事象への対策としては、各 RFID に書き込める車両存在情報を 1 つに限定し、車両がタグにアクセスするたびに情報が更新されるようにすることが考えられる。各タグに書き込まれる情報が 1 つであっても、周囲に存在するタグに書き込まれた車両の存在情報を取り込むことで道路の混雑度合い



図 6.11 RFID の通信範囲と書き込まれる車両存在情報の量

は十分認識可能である。

6.5.4.D 緊急車両接近情報の提供

ここでは緊急車両の接近情報に関連して、緊急車両が自分の車両に接近しているのか否かを認識する手法を考える。一つの手法としては緊急車両の接近情報に対してどこで右左折を行うかを付加し、緊急車両の走行経路情報を提供することが考えられる。提案手法では RFID を用いた情報の収集と提供を行うため、右左折を行う箇所は RFID の ID により表現することが適当と考えられる。したがって、この情報の付加には右左折箇所 1 箇所につき、その交差点の識別番号(34bit)と進行方向(3bit)の合計 37bit が必要であると考えられる。

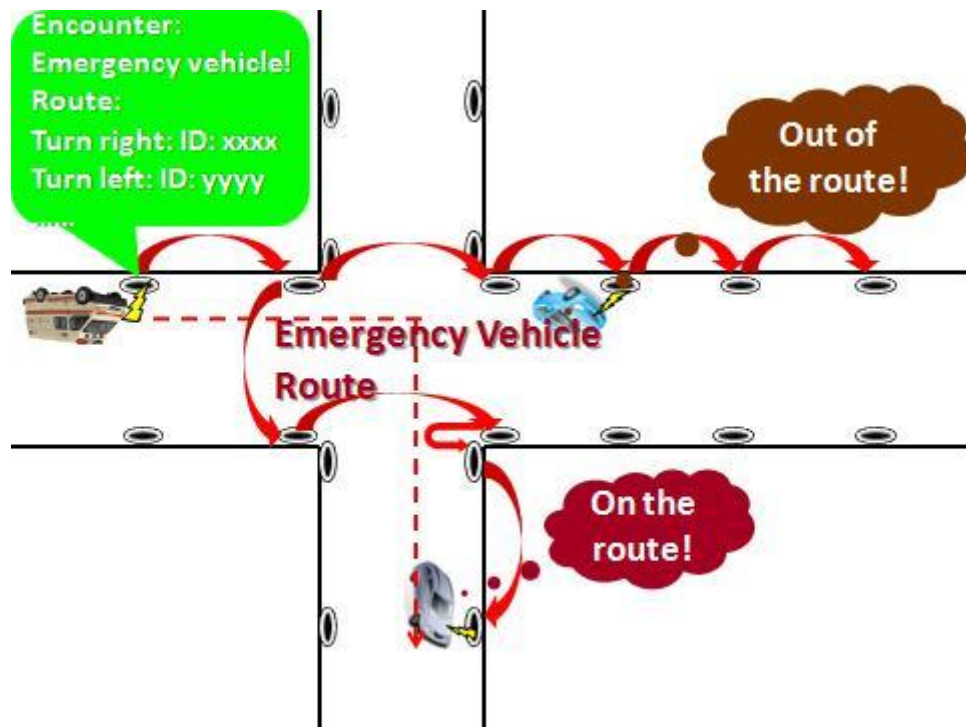


図 6.12 緊急車両の走行経路情報の提供

6.6 まとめ

本章では、RFID を活用した情報提供と収集を行うシステムについて検討を行った。マルチホップ RFID を活用することで現状の ITS 関連システムと比較してリアルタイムで、きめの細かい情報の提供と収集が実現可能と考えられる。特に、マルチホップ RFID は自身へのアクセスを認識し、情報の更新があったことをブロードキャストできるため、リアルタイム性の向上には有効であるといえる。

いくつかの事例をもとにした検討を行うことで提案手法の有用性を確認することができたが、同時に実現のための課題も共通的な課題、適用シーン固有の課題の両者において、複数存在しているのが現状である。特に、現在の RFID の通信速度は、各種の情報を広範囲に、短時間で伝達するためには不足しているのが実状であり、データ量(特に RFID 相互間での情報交換)の圧縮、外部サーバの活用、さらには RFID 自体の性能向上といった対策が必要と考えられる。また、本文で述べた課題については文中で述べた対策案以外にも有効な手法があると考えられる。

また、情報提供・収集システムの対象とする情報は本章で述べた事例にとどまらないため、特に送受信されるデータのフォーマットを定義する際にはさらに多くの事例についての検討が必要である。

7 結論

7.1 本研究の成果

本論文では、各種の ITS 関連システムの普及速度の向上と、新たなサービスの出現環境を整備するため、ITS において必要な機能を統合した「プラットフォーム」の構成について検討した。ITS 関連サービスは多数存在するものの、利用している機能は共通したものが多いためプラットフォーム化による統合が可能と考えられる。こうしたプラットフォームは、その構成手法によりハードウェアを主体とした「ハードウェア」的なプラットフォームとソフトウェア(ミドルウェア)が主体となる「ミドルウェア」的なプラットフォームに大別されるが、「ハードウェア」的なプラットフォームは採用をの導入に際して使用する機器の技術発展にも貢献できることから、本研究では「ハードウェア」的なプラットフォームを構成する手法について検討した。

既存の ITS 関連アプリケーションについて検討した結果、提案プラットフォームに要求される基本機能は(a)路側機器の個体識別、(b)データ通信、(c)測距、(d)車両の状態取得である。これらのうち、(d)車両の状態取得については車載のセンサを利用することで高精度に取得できるため、路側機器により実現すべき機能は(a),(b),(c)の各機能である。これらを一つの機器で実現可能な機器のうち、高密度に路側に配置可能な機器は RFID 等に絞られ、機器の大きさや費用対効果について検討することで、提案プラットフォームでは RFID を活用している。特にアクティブ型 RFID は情報の取得において輻輳を抑制する効果があり、さらにその一種であるマルチホップ RFID はタグ内の情報が更新されたことをバケツリレーにより通知できるため、リアルタイムな情報提供には有効性が高いといえる。このようにしてマルチホップ RFID を主として活用し構築されたプラットフォームは費用においても実現可能な価格であると判明した。

プラットフォームの応用機能のうち、高精度な測位(位置推定)は各種のアプリケーション実現のために重要な機能である。位置推定の対象が道路を走行する車両であり、既存手法の採用では精度の高い位置推定精度を実現できないことから、本研究では新たなアルゴリズムの検討を行った。提案アルゴリズムの特

徴は以下の通りである。a) 推定精度の向上と 3 次元空間での位置推定を実現するため、提案手法では各 RFID の組み合わせに対し、それらを結んだ直線を RFID の位置と RFID - アンテナ間の距離に基づいて内分または外分する点(内外分点)を利用している。b) 複数の内外分点を次数の異なる重みづけ関数により統合し、重みづけ次数の増加による統合結果の収束をもとに各アンテナの位置を推定する。この重みづけにおいて、車両の近くに位置する RFID から求められた内外分点に、より大きなウェイトを与えている。屋外実験の結果より、RFID を高密度に配置することで本アルゴリズムは車線認識できるレベルを実現した。

また、本論文では提案プラットフォーム上で実装するアプリケーションとしてレーンキープアシストシステムと、情報収集・提供サービスについて検討することにより、提案プラットフォームの実現可能性とその実用化に際した課題を検討した。

レーンキープアシストシステムに関する検討においては、RFID を利用した環境に適用可能な制御モデルが存在していないため、簡素ではあるが新たな制御判定モデルを提案した。シミュレーション評価により、このレーンキープアシストシステムは各種の道路形状において車線からの逸脱を回避することに成功し、RFID を用いたレーンキープアシストシステムには実現可能性があることを示すことができた。

情報提供と収集についてはマルチホップ RFID の活用を主とした検討を行った。各種の応用シーンについて検討を行い、現状のシステムと比較して有用性の高い事が判明した。特に、マルチホップ RFID は自身へのアクセスを認識し、情報の更新があったことをブロードキャストできるため、リアルタイム性の向上には有効であるといえる。

以上のことより、RFID を活用して ITS プラットフォームを構築することの有効性、特にアプリケーションの実装が可能であると判明した。同時に、提案プラットフォームの活用により既存のサービスと比較して有用性の向上が期待される。

7.2 今後の課題

7.2.1 プラットフォームとしての課題

7.2.1.A RFID の性能に関する課題

7.2.1.A.(I) データ通信に関する課題

RFID を利用したプラットフォームにおいて、特にマルチホップによるタグ内のデータ交換においてはタグに格納できるデータ量に見合った通信速度が必ずしも実現されていない点が課題である。RFID が定期的にタグ内の情報を送信する環境では、例えばタグ内の情報量を 1 秒で送受信^[70]できるような通信速度の実現が必要である。しかし、現状の RFID システムでやり取りできる情報量は 100kbps 程度であるため、大容量の情報の送受信においては別途インターネットアクセス回線を用意する必要がある。また、渋滞情報の収集・提供において検討したように RFID に書き込む情報量を制約することで情報提供、交換の効率を向上させる余地があると考えられる。

7.2.1.A.(II) 測距機能に関する課題

RFID による測距は RSSI を用いており、電波環境により RSSI の測定結果が左右されるため安定した精度を得るのは困難である。位置推定アルゴリズムの改良によりこの課題をある程度は克服できるが、現在得られている測位精度では高精度(0.1m 精度の測位 etc.)で、信頼性の高い測位を必要とするアプリケーションの実現は困難であり、安全性の指標^[71]を参照することで、特に高い安全性・信頼性を要求するシステムへの適用には性能不足であると判明した。したがって、例えば後述のレーンキープアシストシステムにおいては運転者への警告システムとしての実現が適当である。

7.2.1.B RFID の利用に関する課題

7.2.1.B.(I) 利用するタグの種類に関する検討

提案プラットフォームはマルチホップ RFID を一定の間隔に配置することで実現しているが、情報提供・収集に必要な配置間隔と測位に必要な配置間隔は異なるため、必ずしもすべてのタグにマルチホップ機能を搭載することは必要でないと考えられる。したがって、ID のみを発信するアクティブ型のタグと

RFID 同士で情報の交換を行うためのマルチホップタグを併用することで、RFID の導入費用を抑えることが可能であると考えられる。例えば、マルチホップ RFID の通信距離が 40m^{*32}、通信の成功率が 80%^{*33}と仮定した場合、プラットフォーム全体での通信成功率を 99%にするためには 10m 程度が適当な配置間隔となる。一方で、高精度な位置推定には 1m 以内の配置間隔が必要であるため、残りのタグを ID 送信のみ可能なアクティブ型 RFID にすることで設置費用の削減とデータ混雑の抑制が可能である。

7.2.1.B.(II) 利用する基本機能に関する検討

本論文では RSSI による測距と ID による個体認識の両者を利用する手法を提案したが、測距は単体で利用するには精度が低く、位置推定アルゴリズムとの組み合わせによる精度の向上が必須であるのが現状である。また、マルチホップ通信による情報交換についても、現時点ではタグ容量の増加に応じた通信速度を実現できていないため、実用的には利用困難であるのが実状である。これに対して、ID を中心とした利用手法を検討することで、現状の RFID の性能でも実現可能なプラットフォームを提供する手法も考えられる。ID のみの利用に限定することで通信容量が削減でき、現状の RFID の通信速度でも十分実用可能になると考えられる。一方で、RFID の ID 番号と各種のデータをひも付けたデータベースの設置と、リアルタイムな情報提供の両立についての検討が必要である。また、ID のみを利用した位置推定手法は高い精度を実現していない点も解決すべき課題となる。

また、6.5.3 章でも述べたように全ての RFID がタグ内のデータを定期的を送信する環境では、特にマルチホップ通信の負荷により通信混雑が発生しやすい。したがって、前章でも検討したように全てのタグがマルチホップ通信を行うのではなく、RFID の通信範囲を考慮して、適当な間隔のタグをマルチホップタグとし、その他のタグは単純に ID のみを送信するアクティブタグを採用することも合理的だと考えられる。

*32 4.5 章で述べた位置推定実験に用いたタグの通信距離を参考としている

*33 「小電力を用いる自営系移動通信の利活用・高度化方策に係る技術的条件」[72]における検討に用いられた呼損率(20%)を参考としている

7.2.1.C RFIDの導入・保守に関する課題

7.2.1.C.(I) RFID設置手法に関する課題

導入や保守に関して、本論文では実際に設置するための手法については検討を行っていない。提案プラットフォームは路面に RFID を設置する手法を採用しているため、何らかの手段で RFID を被覆し、通行する車両の衝撃を受けないような工夫が必要である。RFID は電波を利用した機器であるため金属部品による被覆はすべきでなく、強度の高い樹脂による被覆が適当であると考えられる。少し用途は異なるが、太陽光パネルを道路に埋め込む Solar Roadway^[73]というプロジェクトが存在しており、この設置手法は路面への RFID 設置にも応用可能であると考えられる。

電源供給の観点では、提案プラットフォームでは RFID を路面に設置するため、ケーブルによる電源供給も可能である。外部から電力を供給する^[74]ことにより、バッテリー交換の費用が不要となり、保守費用の削減につながると考えられる。

7.2.1.C.(II) RFIDに関する費用負担の課題

プラットフォームの導入・保守に関するコストについては 3.5 章にて述べた通りであるが、ここでは費用負担の主体を中心に検討する。まず、車載機器についてはカーナビゲーションシステムと同様に車両ユーザーが購入/設置するのが適当であると考えられる。現状では、RFID リーダライタの価格は数万円程度^{*34}であるが、量産化によってさらに価格は下落すると予想できる。したがって、車載機器の負担については絶対額がさほど大きくならないと考えられる。サービスの範囲や有効性の拡大によって受け入れられる可能性が高いことは、ETC 車載機の普及状況^[76]からも推測できる。

路側 RFID の設置については道路管理者が行うため、高速道路などでは通行料金の一部から、一般道路では重量税など自動車に関連する税金から拠出されると考えられる。基本的な合意形成については ITS スポットサービス^[3]に利用する路側機器の設置過程と同様であるが、設置範囲が広いことから段階的に導入

*34 例えば、SkyeTek 社製品の RFID リーダライタ、SkyReader70^[75]の価格は 40000 円程度である。

するなど、より導入効果の明確になる手法の検討が必要である。

各サービスの提供者の負担としては、特に既存サービスの提供者は各種のサービスを提案プラットフォーム上に移植するための作業が必要となる。この作業は携帯ネットワークやGPSを用いたサービスが普及している現状では一見難しく思われるが、より高精度な位置推定の必要なサービスは実現されていない。この点に着目すると、提案プラットフォームが高精度な位置推定を提供することで、各サービスの移植に伴う負担が高機能化に必要なコストとして受け入れられると考えられる。

また導入過程において、機器仕様やデータフォーマット等の統一などが不可欠である。こうした点については、VICS^[2]、ETC^[77]、ITS スポットサービス^[3]等の導入過程や、ITS に関するロードマップ^[78]等が参考になると考えられる。

7.2.2 応用機能・アプリケーションの課題

提案プラットフォームにおける応用機能・アプリケーションは発展途上であるため、例えば以下のような課題が存在する。

7.2.2.A 位置推定機能に関する課題

提案プラットフォームにより実現された位置推定精度は 0.6m 程度が現状での最高精度であるため、制御目的に必要な 0.1m 程度の推定精度は実現されていない。更なる位置推定精度の向上には提案手法のように固定された、単純な関数によって RSSI から推定距離を求めるのではなく、実際の電波環境をより反映した距離の推定手法が必要である。しかし、提案手法ではマルチホップ RFID を活用しているため RFID タグが相互に受信強度を観測することは可能である。マルチホップの特性を位置推定にも取り込むことによって、さらに位置推定精度は改善すると期待される。

また、提案手法は常に単独の位置推定結果が得られることを前提として構成されている。提案手法において、位置推定には前回の測位結果と車両の移動を用いているものの、単独の位置推定結果が得られないケースでは推定結果が得られていない。単独の位置推定結果が得られないケースにおいては位置推定には前回の測位結果と車両の移動のみで推定結果を返すことにより、推定結果の得られない問題を解決することが可能である。

7.2.2.B レーンキープアシストシステムに関する課題

レーンキープアシストシステムにおいては、概ね車線からの逸脱を回避できているが、必要な距離推定精度など、逸脱回避を成功させるために必要な条件が若干シビアであると考えられる。例えば、必要な距離推定精度は 20%以内であり、この測距精度での計測を 0.5 秒おきに行うことが必要となっている。したがって、現状では車両の自動制御には利用できず、警告の表示が適当な動作であると考えられる。しかし、今後の技術発展により必要な要求条件を常に満たし、車両内部の制御も確実に実行されることが保証されれば車両の自動制御を行うことが可能である。

また、提案したレーンキープアシストシステムは簡素な段階設定により実現されているため、この段階設定をより細かく設定することで要求される条件の緩和が見込まれ、さらに自然な航跡で車線からの逸脱回避が実現できると考えられる。また、提案した位置推定手法の誤差特性を検討したシミュレーション評価は未実施のため、こうした評価も今後の課題である。

7.2.2.C 情報収集・提供システムに関する課題

マルチホップを利用した情報収集・提供システムにおいて、本稿で検討した応用シーン例はごく限られた内容であるため、実際の応用においてはさらに多様なシーンの検討が必要である。

また、扱う情報の多様化と RFID タグ容量の増大により、特に RFID 相互間でやり取りされる情報量がさらに増加することが考えられる。前述のように RFID 相互間でのデータのやり取りは転送容量の大部分を占めることから、データ通信の課題でも検討したように、容量の削減ないし通信速度自体の向上が必要になると考えられる。

7.3 RFID の今後の動向

前出の課題の解決に関連して、RFID の今後の動向について検討する。現在のアクティブ型 RFID において実現されている性能は最大でも通信速度が 100kbit/s、通信距離は 100m 程度、メモリ容量は 32kByte(=256kbit)程度^[79]である。しかし、現状では RFID の導入が試験段階から実用段階に発展している^[80]

ため、通信速度の高速化^[81]を含めた機器の高機能化^{[74][82]}と、(特にパッシブ型 RFID においては)低価格化^[83]がしばらくの間同時並行的に進むと予想できる。また、アクティブ RFID の規格が IEEE に承認(IEEE 802.15.4f^[84])されたことから、特にアクティブ RFID においてこの傾向はさらに加速すると考えられる。現状では通信速度の不足が課題となっているが、近似技術の現状^[85]を参照すると 1Mbps 程度は実現可能であると考えられる。したがって、RFID 自体の性能向上や計算アルゴリズムの改良、データ交換手法の改良により大部分の課題は改善されると考えられる。

7.4 ITS プラットフォームの展開可能性

総括として、本論文で扱った事例以外の ITS プラットフォームの展開可能性について述べる。ここで述べた可能性はごく一部であり、本論文で検討した機能の拡張にすぎない事例も含まれている。

7.4.1 料金收受システム

現在、DSRC を用いた ETC^[77]によって高速道路などの料金收受が実用化されている。このシステムでは通信範囲を制限した DSRC を用いることで、車両に対して入口料金所では入口情報の提供を、出口料金所では車両から入口情報を送信することでそれに対応した料金情報を計算し、利用料金の決済を行っている。

これを提案プラットフォーム上で検討すると、入口情報の提供は料金所付近に設置したタグの読み取りにより実現可能である。出口における料金情報はタグ内への格納が困難であるが、利用料金自体は入口料金所の情報と出口料金所の情報から取得・計算することが可能である。実際の決済については手法の検討が必要であるが、決済に必要なデータは提案プラットフォームを利用することで揃えることが可能なため実現可能性は高いといえる。提案プラットフォームの利用により、現在の ETC システムで必要となっている通行ゲートを省略することが可能である。よって、通行ゲートの誤りによる通行の混乱(急な車線変更や指定箇所以外での後退など)の解消や、それに伴う渋滞・事故の発生の削減が期待できる。また、出入口の設置スペースは車両の通路のみを必要とするため、これまで出入口の設置できなかった、利便性の高い箇所に入出口を設置す

ることも可能である。

7.4.2 車両の状態を用いた給油・充電の効率化

車両の利用において給油や充電は必須であり，時期によっては給油待ちの渋滞が発生する，さらにはガソリンスタンドの在庫が局所的に不足する，といった状況もまれに発生している．また，電気自動車の充電スタンド数は現状ではさほど多くないため，場合によってはバッテリー残量に余裕のある車両には少し遠方の充電スタンドを利用するように提案するシステムの構築も必要になると考えられる．

提案プラットフォームでは車両の状態把握と車両の位置推定機能を持つため，どこのガソリンスタンド，どこの充電スタンドまで車両が走行可能であるかを推定することが可能である．こうして求めた走行可能距離と，ガソリンスタンドの在庫・混雑状況や充電スタンドの空き状況を組み合わせることにより，ガソリンスタンドや充電スタンドの利用の最適化を支援することが可能である．特に，提案プラットフォームは局所的な渋滞の認識に適しているため，ガソリンスタンド付近の給油待ち渋滞を認識することが可能である．この情報を提供することで給油待ち渋滞の解消が期待できる．

7.4.3 自動車(一般車両)以外への展開

本論文では主に自動車およびその運転者に着目して応用事例の検討を行った．しかしながら，道路を利用する主体は自動車だけではなく，歩行者や自転車なども存在するし，また一口に自動車といっても一般車とバス，トラックでは応用シーンも異なると考えられる．提案プラットフォームは基本的には RFID 受信機を所持していれば利用可能なため，歩行者や自転車における利用も可能である．提供すべき情報は利用主体により異なるものと共通的に利用できるものが存在し，例えば他車の接近情報については 6.4.1 章でも述べたように歩行者や自動車，さらには自転車においても共通した利用が可能である．特に，自転車においては後方からの車両の接近を認識することが難しく，これを認識できないことが自転車-自動車事故の発生する原因ともなっている．提案プラットフォームが必要とする機器は基本的には RFID の R/W と各種のセンサのみであるから，車載機器のサイズを小さくすることが可能である．例えばスマートフォン等と持ち運びの容易な機器と組み合わせることにより，自転車ユーザーや歩行

者に車両の接近情報を提供することが可能であり，こうした事故の予防につながると思われる。

また，利用主体固有の機能としては例えば路線バスにおいて，右左折箇所などで注意喚起することにより経路誤りを防止するシステムや，トラックドライバーに対して各集配箇所の荷物の有無を情報提供し，集配経路を効率化するシステムなどが考えられる。こうした機能は利用主体の要求条件に沿った検討が必要であるため，様々な利用主体との意見交換が必要な分野である。提案プラットフォームの検討に限らず，ITS 利用者にはさまざまな主体・環境が存在するため，今後広い視野での研究を行っていきたいと考えている。

謝辞

本論文の作成と研究の遂行にあたり、5年という長期間にわたり、根気強くご指導を頂いた総合研究大学院大学/国立情報学研究所の山田茂樹教授に心より感謝いたします。また、中間発表、予備審査といった機会においてご意見、ご助言頂いた総合研究大学院大学/国立情報学研究所の米田友洋教授、計宇生教授、鯉淵道紘准教授、愛知県立大学 情報システム専攻の田学軍准教授、ならびに国立情報学研究所の中村素典特任教授にこの場を借りて感謝の念を表します。

ニュージャージー工科大学 コンピュータサイエンス専攻の Cristian Borcea 准教授には、特に RFID を活用した位置推定の研究において、英語論文の作成とプレゼンテーションに多くの儀指導を頂きました。この場を借りて深謝いたします。芝浦工業大学工学部の上岡英史教授には本研究に関連して数度にわたりご討論、ご指導頂いたことを感謝いたします。

また、本研究を通して、多くの研究関係者との交流を持つことができました。会津にて開催された合同夏合宿の折には早稲田大学大学院 国際情報通信研究科の田中良明教授、芝浦工業大学 電子情報システム学科の三好匠教授、ならびに各研究室の皆様には本研究に関して貴重なご意見を頂きました。この場を借りて感謝の念を表します。愛知県立大学の田 研究室を訪問させて頂いた折には田准教授をはじめ、愛知県立大学 情報システム専攻の井手口哲夫教授、同 奥田隆史教授にも本研究に関連したご意見を頂き、田 研究室の皆様とも意見交換を行うことができました。各位にはこの場を借りて感謝いたします。

もちろん、総合研究大学院大学/国立情報学研究所 山田茂樹研究室の方々もこの研究に大きく役立ったと思います。特に Anika Aziz さん、Frazana Yasmeen さんとは同期入学だったこともあり、講義など一緒になる機会も多く、研究活動の励みとなりました。お二人をはじめ、皆さんには深謝いたします。

本研究の遂行にあたり、各方面から多くのご支援を頂きました。秘書として研究活動を支援して頂いた平岩三奈さん、松岡みずきさんにはこの場を借りて深謝いたします。また、教育・支援チームの皆様をはじめとした国立情報学研究所のスタッフの方々には学生生活を通して、またリサーチアシスタントして色々とお世話になりました。この場を借りて感謝の意を表します。

本研究において、総合研究大学 葉山キャンパスの敷地を利用した屋外実験を

数次にわたり実施させて頂きました。窓口となって頂き、敷地の利用許可を頂いた総務課の皆様をはじめ、葉山キャンパスの皆様にお礼申し上げます。また、実験に利用した機器に関して、ヤトロ電子の皆様、NTT アドバンステクノロジーの皆様、システムウィング的那須様には色々のご相談をさせて頂きました。ときには難しい依頼であったにもかかわらずご対応頂いたことを感謝いたします。

振り返ると、学部時代に経験した交通に関する研究や、高校時代に関心を持ったプログラミングなどが本研究の下地になっていると思います。こうした時期に出会った方々を代表して、現在も交流のある慶應義塾大学 JRE プロジェクト関連の方々、栄光学園高等学校 49 期生の皆さんにこの場を借りて深謝いたします。

最後に、大学院生としての生活を支援してくれた家族にこの場を借りて感謝の意を表します。

発表文献

査読ありジャーナル論文

[i] 富樫宏謙, 山田茂樹, 内外分点と動的な重み付け手法を用いた移動車両向け位置推定手法, 情報処理学会論文誌, Vol.53(7), ISSN: 1882-7764 , pp. 1891-1904 , Jul. 15, 2012

査読あり国際発表

[ii] Hiroaki Togashi, Shigeki Yamada, Extensibility of vehicle-to-roadside system to vehicle-to-pedestrian system using RFIDs, 2009 IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces, and Measurements Systems (VECIMS 2009) Proceedings, ISBN: 978-1-4244-3809-9, pp.220-225, HongKong, China, May 11-13, 2009

[iii] Hiroaki Togashi, Shigeki Yamada, Preliminary study on vehicle-to-roadside system using RFIDs for detecting road shoulders, Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IEEE/IV 2009), ISBN: 978-1-4244-3504-3, pp.1148-1154, Xi'an Shaanxi, China, Jun. 3-5, 2009

[iv] Hiroaki Togashi, Shigeki Yamada, Simulation to evaluate the feasibility of Lane Keeping Assist System(LKAS) utilizing RFIDs, Proceedings of 2010 IRAST International Congress on Computer Applications and Computational Science (CACCS 2010), ISBN: 978-981-08-6846-8, pp.648-653, Singapore, Singapore, Dec. 4-6, 2010

[v] Hiroaki Togashi, Shigeki Yamada, An Information provision system based on a Multi-Hop RFID scheme for ITS (Intelligent Transportation System), Proceedings of 2010 IEEE Conference on Open Systems (ICOS 2010), ISBN:978-1-4244-9191-9, pp.97-102, Kuala Lumpur, Malaysia, Dec. 5-7, 2010

[vi] Hiroaki Togashi, Cristian Borcea, Shigeki Yamada, Lane recognition for moving vehicles using multiple on-car RFID receiver antennas - Algorithm and its experimental results, Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IEEE IV'12), ISBN:978-1-4673-2118-1, pp.975-981, Alcalá de Henares, Spain, Jun. 3-7, 2012

その他発表

[vii] 富樫宏謙, 山田茂樹, RFID を活用した自車位置検出に関する考察 (A-17. ITS,一般セッション) A-17-17 Detection of Car's Location with RFID(A-17. ITS), 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2008年_基礎・境界, 社団法人電子情報通信学会, ISSN:1349-1369, pp.328,Kitakyushu, Japan, Mar 5, 2008

[viii] 富樫宏謙, 山田茂樹, RFID を活用した自車位置検出に関する考察と応用事例の検討(セッション 2), Study on Detection of Car's Location using RFIDs and Examination of its Applications, 情報処理学会研究報告. ITS, [高度交通システム] 2008(57), ISSN : 09196072, pp. 55-61, Tokyo, Japan, Jun. 13, 2008

[ix] 富樫宏謙, 山田茂樹, RFID を活用した路肩・歩行者の検出に関する考察, Consideration about detection of pedestrian and shoulder using RFID, Proceedings of 第7回 ITS シンポジウム, ISBN: 978-4-9901438-7-9, pp.43-48, Narashino, Japan, Dec. 4-5,2008

[x] 富樫宏謙, 山田茂樹, RFID の特性を活用した距離計測実験 (ITS), Experiment of distance measurement utilizing the characteristics of RFIDs, 電子情報通信学会技術研究報告 109(459), 電子情報通信学会, ISSN : 09135685, pp.47-52, Kyoto, Japan, Mar. 9, 2010

[xi] 富樫宏謙, 山田茂樹, マルチホップ RFID を活用した ITS 情報提供システム,電子情報通信学会2010 ソサイエティ大会, AS-3-2, ISSN:13490144, pp.S27-S28 ,Osaka, Japan, Sep. 14-17, 2010

[xii] 富樫宏謙, 山田茂樹, 内外分点と動的重み付けを用いた RFID による
車両位置推定手法, 情報処理学会第 74 回全国大会, Nagoya, Japan,
pp.3-33 - 3-34, Mar. 6-8, 2012

参考文献

- [1] 三栄書房, Motor Fan illustrated vol.9, 2007, pp76-77
- [2] 財団法人道路交通情報システムセンター, VICS, Available:
<http://www.vics.or.jp/>
- [3] 国土交通省道路局交通管理課高度道路交通システム (ITS) 推進室, ITS
スポットサービス, Available:
http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/spot_dsrc/index.html
- [4] メルセデスベンツ, Radar Safety Package, Available:
<http://special.mercedes-benz.co.jp/safety/>
- [5] 定野温, レーンキープサポートシステムの紹介, Motor Ring No.15,
Available: <http://www.jsae.or.jp/~dat1/mr/motor15/mr200227.pdf>
- [6] Wi-Fi alliance, <http://www.wi-fi.org/>
- [7] B. ホフマン, E. ヴァスレ, H. リヒテンエツガ共著, 西 修二郎 訳,
GNSS のすべて—GPS, グロナス, ガリレオ, 古今書院, 2010.
- [8] GPSDGPS, GPS ロガー比較一覧 pdf, Available:
http://www.gpsdgps.com/download/GPSlogger_List.pdf
- [9] Zigbee alliance, Available: <http://www.Zigbee.org/>
- [10] DSRC システム研究会, ITS インフォメーションシャワー—DSRC システム
のすべて, クリエイト・クルーズ, 2000
- [11] 松下温, 屋代智之, ITS と情報通信技術, 裳華房, 2003
- [12] 国土交通省 新技術情報システム, ソーラウイング, 2007, Available:
<http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/NewIndex.asp>
- [13] 長谷川孝明, ITS プラットフォーム "EUPITS" -具体化に向けて-, 情
報処理学会研究報告. ITS, 2003(89), pp.73-78, 2003
- [14] 大見孝吉, よくわかる RFID—電子タグのすべて, オーム社, 2008
- [15] M. Brown, E. Zeisel, and R. Sabella, "Exam Cram RFID+", Que
Publishing,2006.
- [16] Bluetooth Technology Web Site, Available:
<http://www.bluetooth.com/>

-
- [17] 吉田孝, 改訂 レーダ技術, 電子情報通信学会, 1996
- [18] W3C consortium, XML Technology, Available:
<http://www.w3.org/standards/xml/>
- [19] 天野肇, 安全運転支援に関する海外の動向, 標準化活動における課題等,
Available: [http:// www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/its/dai5/siryou2.pdf](http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/its/dai5/siryou2.pdf)
- [20] Car-2-Car Communication consortium, <http://www.car-to-car.org/>
- [21] VSC International workshop, Available:
<http://www.car-to-car.org/index.php?id=42>
- [22] ST Microelectronics, L3G4200D, Available:
http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00265057.pdf
- [23] Analog devices, ADXL345, Available:
http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL345.pdf
- [24] 森信一郎, 沢田健介, 肥田一生, 峰野博史, 水野忠則, 光ビーコンを使用した連続自車位置推定方式, 情報処理学会論文誌, Vol.52-1, pp.233-243, 2011
- [25] 上坂大輔, 村松茂樹, 岩本健嗣, 横山浩之, 手に保持されたセンサを用いた歩行者向けデッドレコニング手法の提案, 情報処理学会論文誌, Vol.52,pp.558-570, 2011
- [26] 神原誠之, 横矢直和, RTK-GPS と慣性航法装置を併用したハイブリッドセンサによる屋外型拡張現実感, 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, Vol.104, pp.37-42, 2005
- [27] 辻英美子, 春山真一郎, 中川正雄, 可視光通信による位置情報を用いた車載用慣性航法型測位, 電子情報通信学会技術研究報告. ITS, Vol.107, pp.23-28, 2008
- [28] 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, pp.64-74, 2009

-
- [29] 佐竹純二, 三浦純, 移動ロボット制御のための人物シルエットの重なりを考慮した複数人物追跡, 情報処理学会研究報告. CVIM, Vol.2010, pp.1-8, 2010
- [30] 野場敏裕, 小川恭孝, 西村寿彦, 大鐘武雄, 田中誠, 佐々木邦彦, 車載アレーアンテナによる歩行者方向推定に関する基礎的考察, 電子情報通信学会技術研究報告. A・P, アンテナ・伝播, Vol.109, pp.177-182, 2009
- [31] 加藤昭英, 航空電子装備上巻, 日本航空技術協会, 1985
- [32] B. ホフマン, H. モーリッツ, 物理測地学, シュプリンガー・フェアクラーク, 2006
- [33] 大嶋太市, 測量学基礎編, 共立出版, 2009
- [34] D.E. Manolakis, "Efficient Solution and Performance Analysis of 3-D Position Estimation by Trilateration", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol.32, pp.1239-1248, 1996
- [35] 藪 智文, 原 晋介, MIMO セルラシステムにおける TOA に基づいた位置推定の性能評価, 電子情報通信学会技術研究報告. WBS, ワイドバンドシステム, Vol.10, pp.37-42, 2009
- [36] 暦本純一, 塩野崎敦, 末吉隆彦, PlaceEngine-実世界集合知に基づくWiFi 位置情報基盤, インタ-ネットコンファレンス論文集, pp.95-104, 2006.
- [37] C. Liu, K. Wu, and T. He, "Sensor localization with Ring Overlapping based on Comparison of Received Signal Strength Indicator", 2004 IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, pp.516-518, 2004
- [38] H. Lim, B. Choi, and J. Lee, "An Efficient Localization Algorithm for Mobile Robots based on RFID System", SICE-ICASE International Joint Conference 2006, pp.5945-5950, 2006.
- [39] F. Moeeni, "A Passive RFID Location Sensing", 12th World Multi Conference on Systemics", 2008

-
- [40] 福島荘之介, 齊藤真二, 藤井直樹, 須賀秀一, 角田寛人, 空港シェードライトの性能評価, 電子情報通信学会技術研究報告. SANE, Vol.102, pp.1-6, 2002
- [41] J. Zhan, H. Liu, and B. Huang, "A New Algorithm of Mobile Node Localization Based on RSSI, Wireless Engineering and Technology", Vol.2, pp.112-117, 2011
- [42] L. M. Ni, Y. Liu, Y. C. Lau, and A. P. Patil, "LANDMARC: Indoor Location Sensing Using Active RFID", Wireless Networks, Vol.10, pp.701-710, 2004
- [43] M. A. Khan, and V. K. Antiwal, "Location Estimation Technique using Extended 3-D LANDMARC Algorithm for Passive RFID Tag", 2009 IEEE International Advance Computing Conference 2009 (IACC 2009), pp.249-253, 2009
- [44] 本田誠一, 福井健一, 森山甲一, 栗原聡, 沼尾正行, 赤外線センサーネットワークによる人物追跡, 人工知能学会全国大会論文集, pp.2A3-2, 2006
- [45] 森田真司, 山澤一誠, 寺沢征彦, 横矢直和, 全方位画像センサを用いたネットワーク対応型遠隔監視システム, 電子情報通信学会論文誌. D-II, Vol.88, pp.846-875, 2005
- [46] 水谷友治, 羽多野裕之, 桑原義彦, レーダネットワークにおける受信機配置の検討, 電子情報通信学会技術研究報告. ITS, Vol.109, pp.251-256, 2010
- [47] P. Bahl, and V. N. Padmanabhan, "RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system", Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2000). Proceedings. IEEE, Vol.2, pp.775-784, 2000
- [48] A. Bekkali, H. Sanson, M. Matsumoto, "RFID Indoor Positioning based on Probabilistic RFID Map and Kalman Filtering", Third IEEE

International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob 2007), p.21, 2007

[49] K. Yedavalli, B. Krishnamachari, S. Ravula, and B. Srinivasan, "Ecolocation: a sequence based technique for RF localization in wireless sensor networks", IPSN '05 Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks, 2005

[50] 加藤晋,津川定之, 自動車運転時におけるビジョンに基づく車線逸脱の検出と警告, 日本機械学会論文集. C編, vol.67, pp.2928-2936,2001

[51] 菅沼直樹, 泉田 啓, 藤原直史, 1-315 ステレオビジョンと動的輪郭モデルを用いた走行レーン検出, インテリジェントシステム・シンポジウム講演論文集, Vol.12, pp.197-200, 2002

[52] V. Cerone, A. Chinu and D. Regruto, "Experimental results in vision-based lane keeping for highway vehicles," Proceedings of the American Control Conference 2002, Vol.2, pp.869– 874, 2002.

[53] Shing-Jen Wu, Hsin-Han Chiang, Jau-Woei Perng, Tsu-Tian Lee, and Chao-Jung Chen, "The automated lane-keeping design for an intelligent vehicle," IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2005 Proceedings, pp.508–513, 2005.

[54] 吾田洋一, 浅野基樹, 電磁誘導方式による車線逸脱防止装置の開発(その 2) 実車実験編, 北海道開発土木研究所月報, Vol.582, No.582, pp.4-12(2001/11).

[55] Douglas et al., " Navigation system for automatic guided vehicle," United States Patent, No. 6049745, 2000.

[56] 横浜市道路局, 公共事業事前評価調書都市計画道路環状 3 号線整備事業 (汲沢・中田地区, 中田地区), Available:

<http://www.city.yokohama.lg.jp/doro/plan/jigyohyouka/download/kan3-2.pdf>

- [57] 横浜市役所, 横浜市報調達公告版: 西区平沼一丁目地内舗装補修工事, Vol.32, pp.42, Available:
http://keiyaku.city.yokohama.lg.jp/epco/keiyaku/choutatsukoukoku/23.6.14_choutatsu.pdf
- [58] 松本欣二, 電波工学入門, 朝倉書店, 1969
- [59] 藤原邦男, 物理学序論としての力学, 東京大学出版会, 1984
- [60] 国土交通省, 道路構造令第15条. 昭和45年10月29日政令第320号, 最終改正:平成15年7月24日政令第321号
- [61] UNECE, "REPORT OF THE WORKING PARTY ON BRAKES AND RUNNING GEAR (GRRF) ON ITS FIFTY-NINTH SESSION", Available:
<http://www.unece.org/trans/doc/2006/wp29grrf/ECE-TRANS-WP29-GRRF-59e.pdf>, 2006
- [62] 国土交通省, 道路運送車両の保安基準の細目を定める告示 <第三節> 第212条, Available:
http://www.mlit.go.jp/jidosha/kijyun/saimokukokuji/saikoku_212_00.pdf, 2006
- [63] 山本剛大, 大貝彰, 桶野俊介, メソ・ミクروسケール行動を考慮した中心市街地歩行者行動エージェントベースモデル(その2) ミクروسケール行動のモデリングとシミュレーション, 日本建築学会2002年度大会(北陸)学術講演梗概集 計画系, pp.629-630, 2002
- [64] 和田剛, スクランブル交差点における歩行挙動モデルとシミュレーション 東京工業大学 修士論文, 2001
- [65] EPC Global, "GS1 EPC Tag Data Standard 1.6," 2011, Available:
http://www.gs1.org/gsmp/kc/epcglobal/tds/tds_1_6-RatifiedStd-20110922.pdf
- [66] 国土交通省 国土技術政策総合研究所, 交通調査基本区間標準・基本交差点標準, 2012, Available:
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryounn/tnn/tnn0666.htm>
- [67] EMC ジャパン, RSA SecureID Authenticators, Available:
http://www.rsa.com/japan/pdf/products/SID/SID_DS-J.pdf
- [68] International Telecommunication Union, "ITU-T Recommendation X.509," 2008, Available:

[http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-X.509-200811-I!
!PDF-E&type=items](http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-X.509-200811-I!PDF-E&type=items)

[69] 日立コンサルティング, 行動情報活用型クラウドサービス振興のためのデータ匿名化プラットフォーム技術開発事業 事業報告書, 2011, Available:

http://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/cloud/2010/04.pdf

[70] 富士通フロンテック, TagFront アクティブタグ, Available:

<http://www.frontech.fujitsu.com/downloads/services/products/rfid/downloads/activetag.pdf>

[71] 阿部 威郎, AHS の信頼性設計法の提案, 電子情報通信学会技術研究報告. FTS, 電子情報通信学会, Vol.98(101), pp.17-22, 1998

[72] 情報通信審議会 情報通信技術分科会 小電力無線システム委員会, 小電力を用いる自営系移動通信の利活用・高度化方策に係る技術的条件(案), 2008, Available:

[http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/
shoden/pdf/080310_1_3-4.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/shoden/pdf/080310_1_3-4.pdf)

[73] Solar Roadways, "Solar Roadway – A Real Solution," Available:

<http://solarroadways.com/index.html>

[74] Claire Swedberg, "KCF Technologies to Launch Energy-Harvesting Wireless Sensors," RFID Journal, 2011, Available:

<http://www.rfidjournal.com/article/view/9052>

[75] skyetek, "SkyeReader SR70," Available:

[http://www.skyetek.com/Portals/0/Documents/Products/SkyeReader%20SR
70.pdf](http://www.skyetek.com/Portals/0/Documents/Products/SkyeReader%20SR70.pdf)

[76] 国土交通省, ETC の利用状況, 2012, Available:

<http://www.mlit.go.jp/road/yuryo/riyou.pdf>

[77] ETC 総合情報ポータルサイト, Available: <http://www.go-etc.jp/>

[78] 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部, ITS に関するロードマップ, 2011, Available: http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/pdf/110803_its.pdf

[79] GAO RFID Inc., "Product Overview -UHF Long-Range Active RFID Tag," Available: <http://www.gaorfid.com/RFID-PDF/137003.pdf>

[80] Mark Roberti, "More Industries Approach the RFID Inflection Point," RFID Journal, 2012, Available:

<http://www.rfidjournal.com/article/articleview/9413>

[81] Claire Swedberg, "New Active RFID System Strives to Eliminate the 'Overhead'," RFID Journal, 2010, Available:

<http://www.rfidjournal.com/article/view/7678>

[82] Mary Catherine O'Connor, "Ultracapacitor Offers 75-Foot Read Range for Passive Tags," RFID Journal, 2011, Available:

<http://www.rfidjournal.com/article/view/8565>

[83] Claire Swedberg, "Tageos Makes RFID Inlays on Paper, Eliminating Plastic Substrate," RFID Journal, 2011, Available:

<http://www.rfidjournal.com/article/articleview/8287>

[84] IEEE Standards Association, "IEEE STANDARD 802.15.4f-2012," 2012

[85]Radio Pulse , CH0900, Available:

http://www.wirelessdesign.jp/img/zigbeeradiopulse/dev/wj_ch0900.jpg