

車車間通信を用いた測域センサ情報の共有にもとづく 前方車両群の相対位置把握

藤田 敦^{1,a)} 山口 弘純^{1,b)} 東野 輝夫^{1,c)} 高井 峰生^{1,2,d)}

概要：本稿では、各車両が測域センサにより検出した周辺車両への相対距離と方向の情報を、車車間通信により、視界外の広範囲（前方広範囲）の周辺車両と共有し、複数車両の位置関係を適切に把握することで、自車両の測域センサのみでは検出できない前方広範囲の車両群の位置関係を正しく把握する手法を提案する。提案手法では、測域センサから得られる車両間の高精度な相対位置の情報を活用し、車車間通信で得られる通信相手車両の速度データから求めた車両間の位置情報をマッチングさせることで、送信元車両の正確な車両相対位置を特定する。これにより、測域センサや車載器を搭載しない車両を含めた車両の位置特定が可能となる。交通流シミュレータと実走行実験から得たデータによるシミュレーション実験により、マッチングの精度について評価し、提案手法のアルゴリズムを適用することで90%を超える車両を正しく特定できることを示した。

1. はじめに

近年、国内外において自動運転システムに注目が集まっており、その実現が目前に迫ってきている。我が国では、加速・操舵・制御のすべてを基本的にシステムが担う準自動運転システムの2020年代における試用開始を目標とした技術開発が進められており、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の自動走行システム研究開発計画 [1] の中では、ITSを活用した先読み情報生成の技術開発と実証実験が主要テーマの1つに挙げられている。

また、測域センサやミリ波レーダ、車載カメラの高性能化により、周辺車両への距離情報などを高精度に取得することが可能になってきている ([2], [3])。このため、自動運転システムの実現に先立つ形で、車載デバイスから収集可能な各種情報を統合することで周辺の状況をリアルタイムに判断し、手動運転車両の安全運転を支援する先進安全技術が実用化されている。例えば、自動ブレーキやクルーズコントロールといった運転制御を自動で行うシステムを搭載した車両の普及が進んでいる ([4], [5])。このような先

進安全技術は、自律的に周辺の車両や歩行者の存在を検知できる点で安全運転の支援に資することになり、車載デバイスの搭載率は今後飛躍的に普及すると考えられている。その一方で、車載デバイスの検出範囲を超えた周辺認識には課題を残している。車両単体による自律的な周辺認識にはその認識範囲に限界があることは明らかであるため、車両間協調により周辺を走行する車両と位置情報などを共有することで、周辺の状況や将来の移動先の交通情報をあらかじめ取得し、安全運転支援に役立てる試みも行われている。しかし、それらは前方車両の急ブレーキ情報などを後方車両に通知するといった Cooperative Collision Warning (CCW) [6] の枠組みに留まっており、自車前方に存在する車両群がどのような位置関係で走行しているかといった自車周辺の詳細な情報を提供できるものではない。自車前方の車両群の正確な存在と車両間の位置関係が正確に把握できれば、自車両のみならず、後方の自動運転車両や手動運転車両（ドライバー）の運転意思決定（例えば、レーン選択や速度制御）に大きく寄与できると考えられるが、車車間通信による車両情報の配信機能を有さない車両が多数存在する過渡期において、そのような協調的状況把握は容易でない。

本稿では、SIPの自動走行システム研究開発計画 [1] の中で定義されている準自動走行が可能な自動運転レベル2およびレベル3の機能を搭載する車両の普及期を想定環境とする。この想定のもと、レーザやミリ波レーダなどの測域センサを搭載するいくつかの車両（先進車両）が検出し

¹ 大阪大学 大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University

² カリフォルニア大学ロサンゼルス校
Computer Science Department, University of California,
Los Angeles

a) a-fujita@ist.osaka-u.ac.jp

b) h-yamagu@ist.osaka-u.ac.jp

c) higashino@ist.osaka-u.ac.jp

d) takai@ist.osaka-u.ac.jp

た車両の相対位置情報を車車間通信可能車両と共有し、これらの情報を適切に合成することで、自車両の車載デバイスの検出能力のみでは把握できない前方広範囲の車両の存在と車両間の位置関係を把握するための手法を提案する。車車間通信により送られる他車両からの情報を用いることにより、自車両の見通し範囲外の車両（トラックの影に隠れてデバイスの検出範囲内にあるが見通せない前方車両など）の存在も正しく認識した上で、自車前方に存在する車両の位置特定ができるようになる。

レーザやミリ波レーダを用いた測域センサの誤差は一般的に小さいことから、本手法では、自車両が検出した周辺他車両への相対位置は高精度であると仮定する。一方、自車両の位置精度に関して、GPS から取得した車両位置は必ずしも正確であるとは限らず、車載ハードウェア情報や地図情報を利用するマップマッチング手法により精度向上が図られているものの、測域センサの検出精度に比べると誤差が大きく、自車両の現在位置を車線レベルで推定することは難しい。このため、複数車両から送られる GPS 位置情報を合成する場合には、位置誤差が原因となり誤った周辺認識をしてしまうおそれがある（例えば本来、自車と同一車線に存在する車両を他車線に存在すると認識するなど）。これに対し、提案手法では車車間通信で送信可能な速度情報を利用し、一定時間範囲での自車両とメッセージ送信車両との相対位置の「変化」を計算する。同時に測域センサにより特定の車両を継続して検出し、その検出車両の距離情報を有している場合、距離情報の変化と相対位置の変化の類似性を求め、通信相手車両と自車の測域センサによる検出車両が同一車両であるか否かを判定するマッチング処理を行う。このマッチングにより車両間の正確な相対位置関係を把握する。そして、把握した位置関係にもとづき、車両が測域センサで検出した周辺車両情報を合成することで、前方車両群の形成につなげる。なお、GPS はこのような一連の処理において、マッチング対象車両の候補数を絞り込む効率化のみに利用するようにしており、GPS の位置誤差が周辺認識の精度に影響を与えないメリットがある。このように、測域センサによる距離情報と車車間通信により取得する周辺車両の速度情報を基準に自車の周辺認識状況を構築し、前方車両群の車線レベルでの正確な相対位置把握を行う。

交通流シミュレータで生成した車両のモビリティデータと実験車両の走行により取得した車両間の相対位置データを用いて、提案手法のマッチングアルゴリズムの精度検証を行った。その結果、マッチングの所用時間が 3.0 秒程度の場合、90% を超える確率で適切に通信相手車両の特定ができることを示した。

2. 関連研究

2.1 周辺車両認識技術

測域センサや車載カメラを利用することで周辺車両の認識割合を向上するための手法が研究されている ([2], [3], [7])。Burlet ら [2] はミリ波レーダと車載カメラのデータを統合し、自車両の周辺状況を検出する手法を提案しており、実験車両の走行実験により有効性を評価している。これらの手法は、自車周辺に存在する車両の存在把握に利用できるものの、車車間通信による搭載車両間での情報共有は考慮されていない。また、車両間協調による周辺認識を目的とした研究として、Zardosht ら [8] は車載カメラにより検出した車両の位置情報を複数車両間で共有し、特定の車両をトラッキングするアプローチを示し、シミュレーション実験によりその有効性や課題を述べている。この方法では交差点周辺の見通しの悪い環境や交通量の多い道路など、単一車両の車載カメラだけでは継続したトラッキングが困難となる環境においても、他車両が検出した対象車両の位置情報を利用することで間接的にトラッキングを継続できるが、位置誤差などに起因する車両の誤認識の発生に関しては考察されていない。また、Amini ら [9] は GPS 位置に依存しない携帯端末を用いた協調位置追跡手法を、車車間通信環境において適用する場合の問題点を指摘している。これらの周辺車両認識技術は車載器非搭載の車両を想定していない手法が多数であり、普及期における適用可能性の点で課題を残している。

2.2 協調 ITS

直接把握できない広域の情報取得などを目的として、車両間協調による安全運転支援が検討されており、Connected Vehicle [10] の概念が提唱されている。路車間通信、車車間通信、歩車間通信やプローブカー技術を想定環境やアプリケーションに応じて適切に使い分け、多種多様な車両情報や交通情報をそれらを必要とする車両に提供することが目的である。Ericsson 社は Connected Vehicle Cloud とよぶサービス [11] の中で、車両に接続した端末を介して車両情報や走行履歴をクラウド上に集約し、車両ネットワークの構築を行う仕組みを提供している。クラウド上に集約した情報は、自動車ディーラー、修理業者、サポートセンターなどの様々な機関において利用することができる。

また、従来の地図に含まれる道路などの静的情報に、事故などのイベント情報や車両モビリティなどの動的情報を付加し、様々な道路情報を統合して生成する地図データベース (ダイナミックマップ) の開発が進められている [12]。さらに、近年、様々な分野で関心の高い深層学習などの人工知能技術を応用したアプリケーションについても研究報告がなされている [13]。このようなシステムやアプリケー

ションはクラウドやサーバと通信することで情報を取得することが一般的であるが、提案手法は各車両が自車周辺を走行する車両との情報を交換、共有することで周辺認識を行う分散協調手法である。各車両が構築した周辺認識状況は、前述のダイナミックマップのシステムに提供するなどの利活用が期待できる。

一方、自動運転技術の一つである隊列走行システムに関しても研究が進んでいる。Bernardoら [14] は、隊列車両をノードとする動的ネットワークのトポロジーが構成されていると捉え、安定な隊列を維持するための分散制御プロトコルを提案している。プロトコルでは時変の通信遅延の発生を考慮し車両相互の位置関係や送信パケットの特性を解析することで、各車両がパケットの送信間隔や送信レートを制御するモデルを構築している。隊列走行を実現するためのシステムの多くは、効率的な運送の実現を目的として4、5台程度のトラックが同一車線や隊列走行用の専用車線を走行することが想定しているが [15]、提案手法ではトラックに限らない一般車両を認識の対象とし、複数車線にまたがる車両群の形成を目指している。

3. 提案手法の概要

3.1 想定環境

本稿では、準自動走行システムが実用化されており、内閣府 SIP の自動運転システム研究開発計画 [1] などで定義されている自動運転レベル2およびレベル3の機能を有する車両の普及期を想定している。そして、高速道路や幹線道路のような比較的交通量の多い道路を走行する車両が、車両の前側面に装着した測域センサにより検出領域内の車両を検出し、相対位置（相対距離と方向）を取得するものとする。さらに、車車間通信を介して、それらの相対位置情報を自車両の状態（現在の位置や速度などの基本データ）と併せて共有することを想定する。

以降、測域センサと車車間通信機器（DSRC/WAVE 機器）をともに搭載する車両を**先進車両**、それ以外の車両をすべて**従来車両**とよぶ。なお、測域センサのみを搭載する車両はセンサの検出領域内の車両を認識できるが、通信機器を保持しないため、他の先進車両から送られる車両情報を利用した周辺認識を行えない。また、車車間通信機器のみを搭載する車両は自車両の情報しか通信範囲内の車両に送信することができないため、従来車両を含む周辺車両の存在認識を行えない。このことから本稿ではこれらの車両も従来車両として扱う。

先進車両は測域センサの一定間隔でのスキャンにより検出領域内の車両を検出し、センサ装着位置と検出車両との間の相対位置を保持し更新する。測域センサの検出能力は、市販の車載用センサの性能や筆者らの研究グループで実施した実車両の走行実験（5.2節）において取得したデータをふまえ、最大検出距離を50m、スキャン角度を前方120

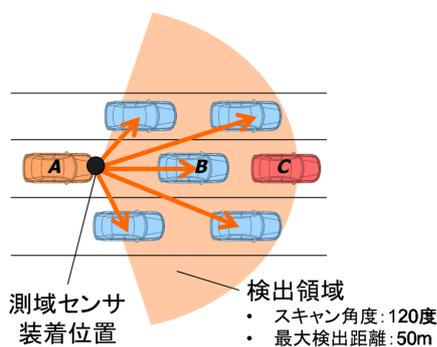


図1 先進車両 A の測域センサによる前方スキャンのイメージ

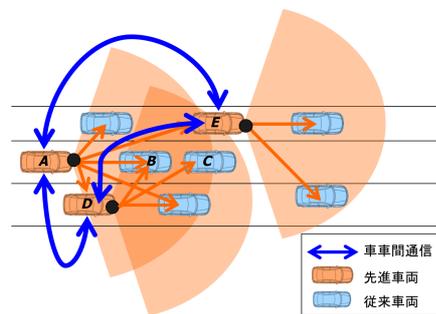


図2 先進車両間 (A, D, E) でのメッセージ交換と共有

度とする。なお、ある車両の検出の障害となる他車両が存在する場合、同車両は検出できない。図1のような状況では、先進車両 A は5台の青色車両を検出できるが、赤色車両 C は車両 B が見通しの障害となるため検出されない。

また、先進車両は自車両を含めた認識車両の相対位置情報を1つのメッセージとして、一定の間隔 ($T_{interval}$) ごとに車車間通信を介して送信し、先進車両間で共有する。図2のような状況では、先進車両 A は先進車両 D および先進車両 E からメッセージを受信し、メッセージの送信車両を正確に特定できた場合、車両 A の見通しの範囲外である車両 C の存在を（車両 D からのメッセージにより）認識可能である。

3.2 通信プロトコル

車車間通信プロトコルとして WAVE/IEEE802.11p [16], [17] を想定し、最大通信可能距離は300mとする。また、メッセージセットは SAE J2735 [18] を採用する。SAE J2735 における Basic Safety Message (BSM) は、アプリケーション側から送信する任意のデータを格納できる領域が用意されているため、この領域に測域センサで検出した車両の相対位置情報を含める。自車両の位置情報（緯度、経度）は、それぞれ4バイトのデータとして送信することが定められていることから、これに準拠して、測域センサにより検出した車両の情報は、自車両の位置を原点と

表 1 $d_t \in LRS(A, k)$ の属性 (k : 被検出車両の車両 ID)

属性	表記	備考
相対位置	$(x(k, t), y(k, t))$	LRS 装着位置を原点とする
方向	$\theta(k, t)$	自車両の進行方向を 0 度とする

する 2次元ベクトル (8 バイトのデータ) として BSM に含める。BSM の送信間隔 ($T_{interval}$) は標準仕様で 0.1 秒に定められているが、プライバシー保護の観点から車両 ID のような BSM の送信元車両を直接特定できるデータは送信しない。このため、図 2 のような認識を行う場合には、BSM の送信元車両を正確に特定する必要がある。この方法について 3.4 節で述べる。

3.3 レーザーレンジセンサによる車両検出とデータ生成

Google などの自動運転車両に用いられているレーザーレンジセンサ (LRS) は、光でスキャンをすることで検出物までの距離を測定する 2次元走査型の光距離センサであり、長距離、広視野の広範囲にわたるスキャンが可能である [19]。市販のレーザーレンジセンサの測距精度はおおむね誤差 5cm 以下であり、正確な相対距離を求めることができる。本稿では、先進車両に装着した測域センサをレーザーレンジセンサとする。また、本稿の想定では、同一車線の車両はオクルージョンの発生により高々 1 台しか検出できないが、他車線の車両は見通しの状況によっては最大 4, 5 台程度まで検出可能である。搭載車両は各自、検出車両ごとに車両 ID を付与し、スキャン結果を表 1 にあげる 2 組の属性を持つデータ d_t (t はスキャン実行時間) として保持する。以降、レーザーレンジセンサで検出した車両を**被検出車両**とよび、車両 A が検出し、 $ID=k$ を付与したデータの時系列を $LRS(A, k)$ として表す (式 (1))。

$$LRS(A, k) = \{d_{t_0}, d_{t_1}, d_{t_2}, \dots, d_{t_n}\} \quad (1)$$

なお、レーザーレンジセンサのスキャン間隔は $T_{interval}$ とし、ある時刻 t_n において車両 k を継続して検出できているかは、 $T_{interval}$ 前の $LRS(A, k)$ の要素 $d_{t_{n-1}}$ の相対位置と t_n の相対位置を比較し、それらの位置の変化量が微小であるかどうかで判定する。微小である場合は、車両 k を継続検出できているとして d_{t_n} を新しく生成する。これは、 $T_{interval}$ 間に車両 k の相対位置は大きく変化しないと考えられるためである。ただし、周囲車両の影に入るなどして、一時的にセンサの見通し範囲外となる可能性もある。短時間 (1 秒程度) 見通しの範囲外となる場合は、その間の動きをこれまでの観測結果から予測し補完を行い、再び検出可能となった時点でデータを更新する。このような判定方法により対応する車両 k の要素が存在しない場合は、新規車両の検出とみなし既存 ID と競合しない ID として k' を付与し $LRS(A, k')$ を生成する。

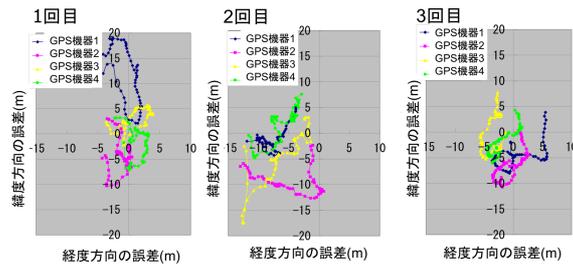


図 3 GPS 測位誤差を調べる走行実験の結果 (往路)

3.4 メッセージ送信車両特定のためのマッチング処理

3.2 節で述べたように、車車間通信を介して共有するメッセージ (BSM) を自車の周辺認識の構築や更新を実行する場合、送信元車両を特定する必要があるが、メッセージには車両 ID などの車両を直接特定できるデータを含んでいない。提案手法では GPS 位置や速度のデータを利用することで特定を行う。

ナイーブな方法としては、送信元車両の位置情報を基準に車両特定を行う方法が考えられる。このとき、位置情報が高精度であれば正確に特定できる可能性が高いが、位置誤差が大きい場合 (本来は自車前方の同一車線の車両から送信されたメッセージを、隣接車線の車両から送信されたメッセージであると認識してしまうといった) 誤認識が起りうる。車両の現在地情報を取得する方法としては一般に GPS が広く用いられるが、マルチパスとよばれる建物などの障害物に反射した信号などの様々な要因により、その位置精度は十分でない場合がある [20]。そのため、速度計や加速度センサなどのハードウェア情報や地図情報を併用することで位置の補正を行うシステムの開発や実用化がなされており一定の精度改善がみられているが、車線レベルで車両や車列の存在を正確に把握するには課題が多い。図 3 は、筆者らの研究グループが実施した GPS 測位誤差データ取得のための走行実験の結果である。実験車両の車内に 4 台の GPS 機器を設置して、大阪府道 2 号線の約 1km にわたる道路 (片側 3 車線道路)^{*1} の中央車線を走行し、3 回往復分のデータを収集した。走行実験中は可能な限り等速で走行し、走行時の車両位置の真値は、車載カメラの映像と Google マップから実験開始地点と終了地点の座標を取得し、その間を等速で移動したものとして計算を行っている。そして、真値と GPS 測位データの差分を誤差として算出した。なお、GPS 測位データの補正は行っていない。図 3 から GPS 位置にはランダムな誤差が含まれることがわかる。特にモノレールの駅の真下を走行する場合に誤差が増大するなど、GPS 測位誤差は走行環境に大きく依存することを確認している。

従って、提案手法では、GPS 測位による位置情報をメッセージ送信車両の特定には直接利用せず、送信車両のおお

^{*1} 大阪モノレール山田駅付近から西へ約 1km の区間

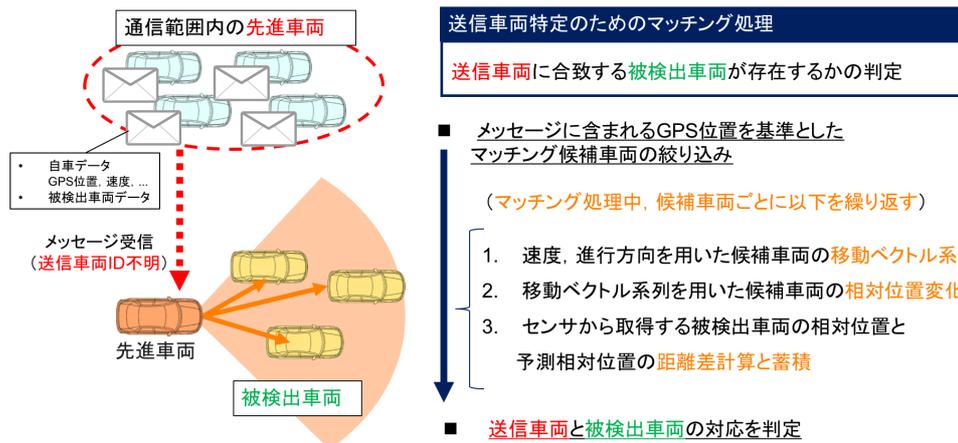


図 4 提案手法におけるマッチング処理の概要

よその存在領域を把握するための補助的な情報として利用することで、位置精度が送信車両の特定に影響を及ぼさないようにする。これに対して、被検出車両の距離情報と車車間通信メッセージに含まれる速度情報が比較的正確に取得できることから、提案手法ではこれらのデータを併用することで送信車両の特定を行う。具体的には、自車と送信車両の速度データから、自車両を基準とした送信車両の移動量を一定期間にわたり予測し、この移動量に合致する相対位置を有する被検出車両の中に存在するか否かを識別するマッチング処理を行い、送信車両と被検出車両の対応組を探索する。そして、自車両の相対位置を基準として前方領域の車両の相対位置関係を把握する。

図4にマッチング処理の概要を示す。まず、車車間通信により受信したメッセージに含まれるGPS位置情報を基準として、マッチング対象車両(「候補車両」とよぶ)を絞り込む。車車間通信により自車周辺の最大300m程度に存在する車両からメッセージを受信するが、これらには被検出車両の存在領域とは明らかに異なる領域に存在する車両からのメッセージが含まれる可能性が高い。このため、このような車両をあらかじめ候補車両から除外することでマッチング処理を効率化することが目的である。候補車両の絞り込みの後は、各候補車両に対してメッセージ内の速度データを用いて、一定の期間におよぶ候補車両への相対位置変化をベクトル系列のデータとして計算する。そして、マッチング処理開始時の自車の相対位置にこのベクトル系列のデータを組み合わせることで、相対位置変化を予測する。さらに、レーザーレンジセンサから取得する検出ステップごとの被検出車両の相対位置との距離差を計算し、一定期間蓄積する。これらの計算をすべての候補車両に対して行い、蓄積した距離差を基準とし送信車両と被検出車両の対応関係(対応組)を見つける。

4. 速度情報と相対位置情報を併用したマッチングアルゴリズム

本章では、3.4節で述べたマッチング処理のアルゴリズムについて述べる。

4.1 GPS位置にもとづく候補車両の絞り込み

先進車両の位置はGPSの測位により取得するが、その位置には一定の誤差が含まれるとしているため、メッセージ送信車両の特定においてGPS位置を直接利用せず、マッチング処理においてマッチングの候補車両(被検出車両に該当すると考えられるメッセージ送信車両)の絞り込みのために利用する。例えば、先進車両は、自車前方にレーザーレンジセンサを装着しているため、前方の検出領域内に存在する車両のみが被検出車両になりうる(図1)。このため、メッセージに含まれるGPS位置が明らかに自車の後方域を示し後方車両からのメッセージであると判定できる場合は、同車両をマッチングの候補車両から除外し、候補車両を検出領域内、またはその周囲に存在すると推定される車両に制限する。

レーザーレンジセンサの検出領域を D とし、 $D = \{R, \Phi\}$ と定める。ただし、先進車両のレーザーレンジセンサ装着位置を原点とし、 R は最大検出距離、 Φ はスキャン角をそれぞれ表す(本稿では $R = 50[m]$ 、 $\Phi = 120[deg]$ とする)。これに対し、候補車両の存在領域を $D_{Matching}$ とし、 $D_{Matching} = \{R + \Delta r, \Phi + \Delta \phi\}$ と定める。 Δr 、 $\Delta \phi$ はそれぞれGPS位置誤差を考慮して、 D の境界付近に存在する車両を候補車両から誤って除外しないようにするためのパラメータであり、 $D \subset D_{Matching}$ を満たす。メッセージ内のGPS位置(緯度、経度)を自車両の位置を基準とする2次元座標($\hat{x}_{GPS}(t)$, $\hat{y}_{GPS}(t)$)に変換した後、これが式(2)を満たす場合には候補車両とし、満たさない場合には候補車両から除外する。

$$(\hat{x}_{GPS}(t), \hat{y}_{GPS}(t)) \in D_{Matching} \quad (2)$$

4.2 速度データにもとづく候補車両の移動ベクトル系列の算出

以降の説明では、先進車両 A の通信範囲内に先進車両 B が存在し、 A は B からのメッセージを継続して受信しているとする。このとき、 A はこのメッセージの送信車両の ID を定め (X とする)、メッセージに含まれる X の速度 $v_X(t)$ と X の進行方向 $\theta_X(t)$ をそれぞれ保持する (t はメッセージの受信時刻を表す)。なお、 $\theta_X(t)$ は、ステアリングの状態など自車両の内部ネットワーク (ECU や CAN) のデータにより正確に推定でき、その推定値を $\theta_X(t)$ としてメッセージに含めて送信すると仮定している。このとき、短時間 (メッセージ送信間隔 $T_{interval}=0.1[s]$) の車両 X の移動量を式 (3) により計算する。また、自車両の車速 $v_A(t)$ と進行方向 $\theta_A(t)$ は既知であるため、自車両 A の移動量も式 (3) に従い同様に計算する。

$$\begin{aligned} (\Delta x_X(t), \Delta y_X(t)) & \quad (3) \\ & = (v_X(t) \cos(\theta_X(t)), v_X(t) \sin(\theta_X(t))) \end{aligned}$$

そして、これらの差分を取り $T_{interval}$ 間の移動ベクトル $Mov_{A,X}(t)$ を計算する (式 (4))。

$$\begin{aligned} Mov_{A,X}(t) & = (\Delta x_{A,X}(t), \Delta y_{A,X}(t)) \quad (4) \\ & = (\Delta x_X(t) - \Delta x_A(t), \Delta y_X(t) - \Delta y_A(t)) \end{aligned}$$

これは、 A からみた X の相対位置の予測値であり、マッチング処理の開始時間から終了時間まで繰り返し求めることで、移動ベクトルの系列 $\bigcup_{t \in (T_{start}, T_{end})} Mov_{A,X}(t)$ を算出する。なお、 T_{start} はマッチング処理の開始時間、 T_{end} は終了時間をそれぞれ表す。また、これらの差分をマッチング処理の遅延時間と定義し、 $T_{Matching}$ とする。

4.3 候補車両の相対位置変化の予測

$T_{Matching}$ 間の移動ベクトル $Mov_{AX}(t)$ の系列を、ある特定の被検出車両 (以降、 I とする) の T_{start} における相対位置に連結することで、メッセージ送信車両 X と被検出車両 I が合致する、つまり同一の車両であるとみなした場合の $T_{Matching}$ 間の相対位置変化の予測値を順に算出する (式 (5))、 $(x_I(X, T_{start}), y_I(X, T_{start}))$ が初期値。

$$\begin{aligned} (x_I(X, t), y_I(X, t)) & \quad (5) \\ & = (x_I(X, T_{start}) + \Delta x_{A,X}(t), y_I(X, T_{start}) + \Delta y_{A,X}(t)) \\ & \quad (T_{start} < t \leq T_{end}) \end{aligned}$$

4.4 センサから取得する相対位置と予測相対位置の距離差計算

先進車両 A は相対位置変化の予測値の計算と同時に、レーザーレンジセンサにより車両 I の相対位置 (座標) を

取得しているため、その相対位置と式 (5) の相対位置変化の座標との間の距離を計算し、これを変化予測の誤差 $e_I(X, t)$ として保持する。そして、 $e_I(X, t)$ を $T_{Matching}$ にわたって蓄積する。これにより候補車両 B と被検出車両 I が同一車両であると仮定した場合の予測累積誤差を算出する (式 (6))。

$$error_I(X) = \sum_{t \in (T_{start}, T_{end})} e_I(X, t) \quad (6)$$

先進車両 A は、ここまで説明した各過程をすべての候補車両に対して実行し、予測累積誤差 $e_I(X, t)$ をそれぞれ算出する。そして、 $e_I(X, t)$ が最も小さくなる車両 X^* を見つけ (式 (7))、 $error_I(X^*)$ がマッチングアルゴリズムで許容する誤差値の範囲内にある場合、候補車両 X^* と被検出車両 I は同一車両であると判定する。これによりメッセージ送信車両を特定したことになる。

$$X^* = \arg \min error_I(X) \quad (7)$$

5. マッチングアルゴリズムの性能検証

提案手法の評価のための予備実験として、交通流シミュレータにより生成した車両のモビリティデータと実車両の走行により取得した実データに対して、マッチングアルゴリズムを適用し精度検証を行った。本検証の実験環境を図 5 に示す。先進車両 A において、被検出車両 $Target$ の相対位置がレーザーレンジセンサのスキャンにより把握できている前提のもと、 A の通信範囲内の先進車両 ($Target$, $A \sim H$) からそれぞれ送信されるメッセージに含まれる速度と進行方向の各データを入力としてマッチングアルゴリズムを実行し、車両 $Target$ を正しく特定できるかを評価した。本検証では 3 分間のモビリティデータを利用し、その間、繰り返しマッチングアルゴリズムを実行する。なお、マッチング処理の遅延時間 $T_{matching}$ は 1.0[s], 3.0[s], 5.0[s] の 3 つの設定で評価し、各受信メッセージに含まれる GPS 位置には、実車両位置 (真値) に対して平均 5.0[m], 分散 1.0 の正規分布に従う誤差を与えている。さらに、4.1 節で述べた候補車両の絞り込みにおける存在領域 $D_{Matching}$ のパラメータをそれぞれ、 $\Delta r = 10[m]$, $\Delta \phi = 10[deg]$ に設定した。

以降、説明中の「 $Target \leftrightarrow X$ 」の表記は、複数回のマッチングアルゴリズムの実行において、車両 $Target$ の相対位置に対して、車両 X からの速度と進行方向のデータから予測した相対位置がマッチした割合 (正解率) を表す。例えば、マッチングアルゴリズムを 100 回実行し、そのうちの 20 回で車両 A にマッチした場合、 $X \leftrightarrow A = 20\%$ である。

5.1 交通流シミュレータのデータを用いた実験

ミクロ交通流シミュレータ VISSIM[21] を用いて生成し

表 2 交通流シミュレータのデータを用いたシミュレーションの結果: $Target \leftrightarrow X$
($X = Target$ が正解組)

$T_{matching}$	$X = Target$	$X = A$	$X = B$	$X = C$	$X = D$	$X = E$	$X = F$	$X = G$	$X = H$
1.0[s]	84.4%	4.5%	1.7%	4.5%	0.1%	1.7%	2.2%	0.0%	0.0%
3.0[s]	93.0%	0.7%	2.2%	2.2%	0.0%	0.7%	1.2%	0.0%	0.0%
5.0[s]	97.9%	0.7%	0.7%	0.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

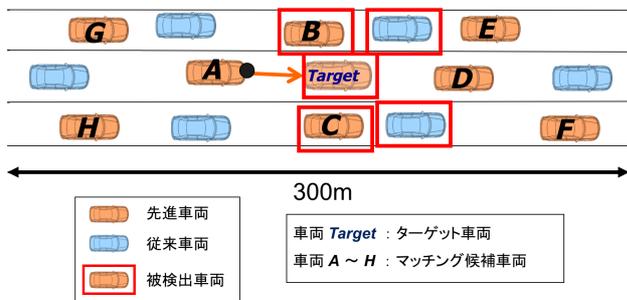


図 5 性能検証の実験環境



(a) 車両への LRS の装着 (b) OBD-II 機器

図 8 走行実験環境

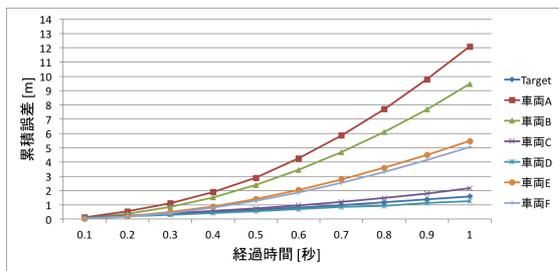


図 6 累積誤差の時間推移 ($T_{Matching}=1.0[s]$)

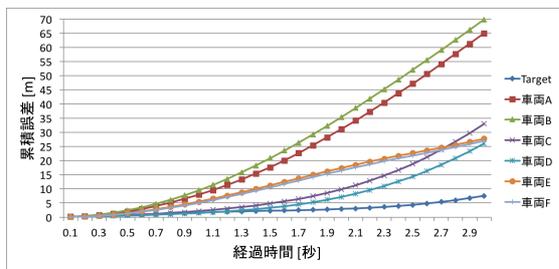


図 7 累積誤差の時間推移 ($T_{Matching}=3.0[s]$)

た車両のモビリティデータにもとづいて、マッチングアルゴリズムの精度を検証した。その結果を表 2 に示す。

$T_{matching} = 1.0[s]$ の場合、正解組の $Target \leftrightarrow Target$ となる割合は 84.4%にとどまっている。これは 1 秒程度の短い期間であれば、車両 $Target$ と相関の高い動きをする他車両が存在する可能性が高いためである。本実験の車両モビリティデータを分析すると速度変化が類似している車両が存在しており、マッチングアルゴリズムで生成する移動ベクトル系列が類似するため、 $Target$ 以外の車両にマッチしていることを確認できた。例えば、累積誤差の時間推移 (図 6) をみると 1 秒経過時において、車両 D の累積誤

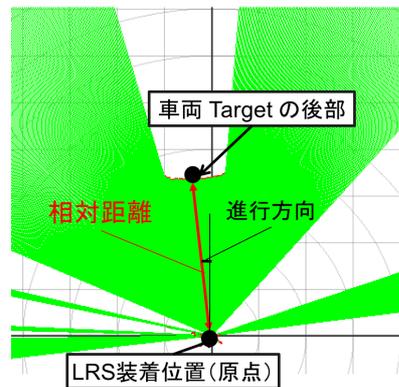


図 9 LRS スキャンデータのスナップショット

差が最も小さいため、 D にマッチする結果となっている。しかし、 $T_{matching}$ を大きく設定した場合 (図 7)、 $Target$ 以外の誤差が増大している一方、 $Target$ の累積誤差が最も小さくなっていることがわかり、 $T_{matching} = 3.0[s]$ の場合、 $Target \leftrightarrow Target = 93.0\%$ 、 $T_{matching} = 5.0[s]$ の場合、 $Target \leftrightarrow Target = 97.9\%$ である。なお、図 6 と図 7 においてマッチングの開始時刻 T_{Start} は同時刻にそろえて比較している。さらに、表 2 から $Target \leftrightarrow G$ と $Target \leftrightarrow H$ はともに 0.0%であるが、車両 G, H は GPS 位置による絞り込みによりマッチングの候補車両から除外できている。

5.2 実走行データを用いた実験

次に、実車両の走行により取得したデータを利用してマッチング精度を検証した。図 5 の車両 A に相当する車両の前方バンパー付近に北陽電機社製のレーザーレンジセンサである UTM-30LX[19] を装着した (図 8(a))。そして、図 5 の車両 $Target$ に相当する車両を車両 A が追隨走

表 3 実走行データを用いたシミュレーションの結果: $Target \leftrightarrow X$ ($X = Target$ が正解組)

$T_{matching}$	$X = Target$	$X = A$	$X = B$	$X = C$	$X = D$	$X = E$	$X = F$	$X = G$	$X = H$
1.0[s]	74.5%	3.5%	7.3%	2.8%	2.6%	5.2%	4.1%	0.0%	0.0%
3.0[s]	82.4%	4.4%	4.4%	0.7%	0.0%	3.6%	3.6%	0.0%	0.0%
5.0[s]	94.2%	4.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.5%	0.0%	0.0%

行し^{*2}, 10分程度のスキャン結果(相対位置情報)を取得した。スキャンによりセンサの装着位置からみた車両 $Target$ の後部を検出し, 中央部分を基準に相対距離と方向を求める検出データから相対距離を求めた(図9)。本実験では, 車両 $Target$, 車両 A の双方に OBD-II^{*3} 機器を接続し(図8(b)), BluetoothによりAndroid端末上に走行時の車速を収集した。なお, データ収集レートは10Hzとした。そして, 本実験で取得したデータを加えて, 5.1節と同等の条件で検証を行った。その結果を表3に示す。

$T_{matching} = 1.0[s]$ の場合, 正解組の $Target \leftrightarrow Target$ となる割合は, 74.5%に留まっているが, これは, 5.1節のシミュレーションと同様の理由である。 $T_{matching} = 3.0[s]$ の場合, $Target \leftrightarrow Target = 82.4\%$, $T_{matching} = 5.0[s]$ の場合, $Target \leftrightarrow Target = 94.2\%$ である。しかし, これらの値は表2と比較するといずれも低くなっていることが確認できるが, 以下でその理由を考察する。まず, OBD-II機器で取得する車速のデータは1バイトのバイナリデータ(単位 km/h)であり整数値であるため, 十分な精度での車速が得られているとはいえない。シミュレーション実験と同一条件にするために, 10Hzでデータを取得しているが, 走行実験のデータログを確認すると車速が変動する間隔は平均して約1Hzであることがわかった。このため, 実速度の変化を正しく追従できないことが一因であると考えている。このような場合は, より長時間にわたるマッチングを適用する必要があるため, 遅延時間と精度のトレードオフを考慮し, 適切なマッチング時間や回数を選択することが必要になる。

本稿では, マッチングアルゴリズムの精度検証を目的とし, 特定の車両 $Target$ へのマッチング性能について評価を行った。今後は提案手法の有効性を明らかにするため, 想定環境としている交通量の多い道路環境に限らずカーブ付近や交差点などの様々な環境において評価を行い, 有効性を示していきたいと考えている。

6. まとめと今後の課題

本稿では, 各車両が測域センサにより検出した周辺車両への相対位置の情報を, 車車間通信を介して自車両の視界外の広範囲(前方広範囲)の周辺車両と共有し, 複数車両の互いの位置関係を適切に把握することで, 自車両の測域センサのみでは検出できない前方広範囲の車両群の位置関

係を正確に把握する手法を提案した。提案手法では, 自車両のセンサでの検出車両に通信相手車両が含まれるかどうかを判定するために, 測域センサから得られる車両間の高精度な相対位置情報を活用し, 車車間通信で得られる通信相手車両の速度から計算した車両間の位置情報をマッチングさせることで, メッセージの送信元車両の正確な車両相対位置を特定する。これにより, 測域センサや車載器を搭載しない車両を含めた周辺車両の相対位置把握が可能になる。交通流シミュレータで生成した車両のモビリティデータと実走行により取得した車両間の相対位置のデータを用いて, 提案手法におけるマッチング処理の精度検証のためのシミュレーション実験を行った。シミュレーションの結果, マッチングの所用時間を3秒程度に設定した場合, 90%を超える確率で送信元車両の車両相対位置を特定できることを示した。

今後の課題として, マッチングアルゴリズムの高度化と効率化を考えている。提案手法では, 先進車両の速度情報から予測した車両間の位置情報にもとづいてマッチングを実行しているが, メッセージ送信車両の速度変化が互いに異なることを前提としたマッチングアルゴリズムである。しかし, 隊列走行のように自車の前方車両に追従して走行する場合は, 速度制御が自動化されていることから正確にマッチングできないことが考えられる。また, 渋滞車列の中では車両の速度変化の相関が高く短時間では自車の周辺状況が大きく変化しないため, マッチング処理を実行するメリットが限定される可能性もある。さらに, 厳密には通信遅延によりリアルタイムの速度を取得することができないため, 通信遅延の影響を考慮した計算式に改善する必要がある。従って, このような点を詳細に検討し, アルゴリズムを高度化する予定である。また, 現在は通信プロトコルの設計や評価が十分にできていないため, プロトコルの詳細を設計したうえで, 通信シミュレータ上にプロトコルとマッチングアルゴリズムを実装し, 通信性能の観点からも評価を行っていく。

加えて, ITSアプリケーションや提唱されている安全運転支援シナリオなどに対し, 提案手法を応用する方法について検討を進めていきたい。道路の渋滞や道路規制の情報については, 現在でも路車間通信を利用することで, リアルタイムにある程度の情報を取得することは可能である。しかし, より局所的かつ詳細な道路情報を取得することは難しい。例えば, 将来の移動先付近に, 駐車場への入庫待ちの車列があり, その車列に接近する車両が事前に車線交

^{*2} 大阪大学 吹田キャンパス内の学内道路を走行した。

^{*3} 車内ネットワーク(CAN)を流れるデータを取得できる。

更に迫られるような場面を想定する。このとき、車列の横を通り過ぎる車両が車列の存在を測域センサで検出し、その検出情報を後続車両に送信する。そして、この車列エリアに接近している車両が、受信したメッセージに含まれる位置関係を適切に把握することで、的確な運転行動を行える可能性がある。このようなシナリオの構築と提案手法の適用方法について検討する。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 26220001 および 15H02690 の助成を受けたものです。ここにお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部：内閣府 SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) 自動走行システム 研究開発計画, http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/6_jidousoukou.pdf (参照: 2016/8/31) .
- [2] Burtle, J. and Dalla Fontana, M.: Robust and efficient multi-object detection and tracking for vehicle perception systems using radar and camera sensor fusion, *IET and ITS Conference on Road Transport Information and Control (RTIC 2012)*, pp. 1–6 (2012).
- [3] Sivaraman, S. and Trivedi, M.: Vehicle Detection by Independent Parts for Urban Driver Assistance, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 14, No. 4, pp. 1597–1608 (2013).
- [4] トヨタ自動車株式会社: Toyota Safety Sense P, http://toyota.jp/technology/safety/toyota_safety_sense_p (参照: 2016/8/31) .
- [5] 日産自動車株式会社: 安全技術紹介 (クルマでの取り組み), <http://www.nissan-global.com/JP/SAFETY/INTRODUCTION> (参照: 2016/8/31) .
- [6] Sengupta, R., Rezaei, S., Shladover, S. E., Cody, D., Dicke, S. and Krishnan, H.: Cooperative Collision Warning Systems: Concept Definition and Experimental Implementation, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 11, No. 3, pp. 143–155 (2007).
- [7] Folster, F. and Rohling, H.: Data association and tracking for automotive radar networks, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 6, No. 4, pp. 370–377 (2005).
- [8] Zardosht, B., Beauchemin, S. and Bauer, M.: An in-vehicle tracking method using vehicular ad-hoc networks with a vision-based system, *Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2014)*, pp. 3022–3029 (2014).
- [9] Amini, A., Vaghefi, R., de la Garza, J. and Buehrer, R.: GPS-free cooperative mobile tracking with the application in vehicular networks, *Proc. IEEE 11th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC 2014)*, pp. 1–6 (2014).
- [10] Lu, N., Cheng, N., Zhang, N., Shen, X. and Mark, J.: Connected Vehicles: Solutions and Challenges, *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 1, No. 4, pp. 289–299 (2014).
- [11] Ericsson: Ericsson Connected Vehicle Cloud, <http://www.ericsson.com/ourportfolio/null/connected-vehicle-cloud> (参照: 2016/8/31) .
- [12] 渡辺陽介, 高木建太郎, 手嶋茂晴, 二宮芳樹, 佐藤健哉, 高田広章: 協調型運転支援のための交通社会ダイナミックマップの提案, 第7回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM2015), pp. 1–8 (2015).
- [13] Kumar, A., Kumar, T. R., Schufele, B., Sawade, O. and Radusch, I.: Indoor Localization of Vehicles Using Deep Learning, *Proc. 3rd International Workshop on Smart Vehicles: Connectivity Technologies and ITS Applications (SmartVehicles 2016)*, pp. 1–6 (2016).
- [14] di Bernardo, M., Salvi, A. and Santini, S.: Distributed Consensus Strategy for Platooning of Vehicles in the Presence of Time-Varying Heterogeneous Communication Delays, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 16, No. 1, pp. 102–112 (2015).
- [15] 青木啓二: 自動運転・隊列走行の実現に向けて-自動運転技術の開発状況について-, *情報処理 Vol.54 No.4*, pp. 303–309 (2013).
- [16] Wu, X., Subramanian, S., Guha, R., White, R., Li, J., Lu, K., Bucceri, A. and Zhang, T.: Vehicular Communications Using DSRC: Challenges, Enhancements, and Evolution, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 31, No. 9, pp. 399–408 (2013).
- [17] IEEE Computer Society: IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments (2010).
- [18] Kenney, J.: Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 99, No. 7, pp. 1162–1182 (2011).
- [19] 北陽電機株式会社: 測域センサ UTM-30LX, <http://www.hokuyo-aut.co.jp/search/single.php?serial=21> (参照: 2016/8/31) .
- [20] Meguro, J., Murata, T., Takiguchi, J., Amano, Y. and Hashizume, T.: GPS multipath mitigation for urban area using omnidirectional infrared camera, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 22–30 (2009).
- [21] PTV Group: PTV VISSIM 5.40, <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-uk/products/ptv-vissim> (参照: 2016/8/31) .