

車両からの電波の長期計測による 路側機の高精度測位方式の提案

戸田 和宏^{1,a)} 湯 素華¹ 小花 貞夫¹

受付日 2018年12月12日, 採録日 2019年5月9日

概要: 歩行者の交通事故削減のため, 歩行者が自分の位置を周辺車両に配信する歩車間通信が注目されている。その際, 歩行者の測位の高精度化が必須である。GPSをはじめとするGNSSおよび準天頂衛星等による衛星測位は, 一般的に使用されるが, 高いビルに囲まれる都市部では測位精度が低下し, 高精度化は難しい。衛星に加えて, 高精度な位置が既知である信号機等の路側機を測位基準点とすることにより, 周辺の歩行者の高精度な測位が可能となると考えられるが, すでに設置された膨大な数の信号機等の路側機は正確な測量がなされておらず, そのままでは基準点とすることはできない。これらの路側機すべての測量には膨大な時間と費用が必要となる。本論文では, 簡易な無線機を路側機に取付け, 安全運転支援のための車車間通信で交換される誤差を含む周辺車両の位置情報と, それを運ぶ無線信号の直接波のみの信号強度を用いて車両と路側機との距離を算出し, それを長期間繰り返すことにより路側機の高精度な測位を行う方式を提案する。シミュレーション評価を行い, 一般的な無線LAN程度の時間分解能(50 ns)を持つ路側機で, 位置誤差平均6 mの車両情報を利用した場合, 測位誤差を72 cmに, また, 時間分解能を1 nsまでに向上させた場合には測位誤差を50 cmに, さらに車両の平均位置誤差が1 mとなった場合には, 測位誤差を1 cmまでに抑制できることを示した。

キーワード: 路側機, 測位, 車車間通信, 直接波, カルマンフィルタ

High-precision Positioning for Roadside Units by Using Vehicular Communication Signals in the Long Term

KAZUHIRO TODA^{1,a)} SUHUA TANG¹ SADAO OBANA¹

Received: December 12, 2018, Accepted: May 9, 2019

Abstract: Pedestrian-to-vehicle communication, in which pedestrians transmit their position information to surrounding vehicles, has attracted much attention recently. Its performance, however, heavily depends on positioning precision of pedestrians. Satellite-based positioning, such as GPS and other GNSS and quasi-zenith satellite system, is generally used for pedestrian positioning, but their performance is much degraded in urban areas with high buildings. It is possible to improve pedestrian positioning, by using roadside units (such as traffic lights) as anchors as well. But positions of roadside units usually are not well measured, and cannot be directly used as anchors, and it takes a huge amount of time and expense to accurately measure positions of all roadside units. In this paper, we propose an efficient method to accurately measure positions of roadside units by using inter-vehicle communication messages that are originally designed for driving safety support system. A simple radio is installed on each roadside unit so as to (1) receive position information (with potential errors) from passing vehicles and (2) measure distances to vehicles by using the signal strength of direct waves. In addition, such measurements are repeated in a long term for high-precision positioning of roadside units. In our simulation, when average positioning error of vehicles is 6 m and time resolution at each roadside unit is 50 ns (same as general wireless LAN card), the positioning error of roadside unit is 72 cm. When the time resolution is improved to 1 ns, the positioning error of roadside unit decreases to 50 cm, and further decreases to 1 cm if the average positioning error of vehicles is decreased to 1 m in the era of autonomous driving.

Keywords: roadside unit, positioning, vehicle-to-vehicle communications, direct wave, Kalman filter

1. はじめに

近年、歩行者が自位置を周囲の車両に配信することで交通事故を防止する歩車間通信 [1] が注目されており、ここでは歩行者の高精度な測位が求められている。また、車両の自動運転の実現には、車両位置の数十 cm レベルの高精度測位が必須である。

現在の一般的な測位手法は、GPS や GLONASS 等の GNSS (Global Navigation Satellite System: 全地球航法衛星システム) だが、都市部においてはビル等の遮蔽の影響で測位に必要な数の衛星からの電波を直接受信することができず、測位できない、または高精度な測位が行えない場合がある。そこで、高精度な位置が既知である信号機等の路側機を測位基準点とすることにより歩行者や車両の測位の高精度化が可能となると考えられる。しかし、すでに設置された 126 万灯 (国内の車両用信号灯器数 [2]) もの膨大な数の信号機は正確な測量がなされておらず、そのまま路側機を取り付けただけでは基準点とすることはできない。また、設置する路側機すべての正確な測量には膨大な時間と費用が必要になる。

本論文では、簡易な無線機を路側機に取付け、安全運転支援のための車車間通信 [1] で交換される位置誤差を含む周辺車両の位置情報と、それを運ぶ無線信号の直接波のみの信号強度を用いて車両と路側機との距離を算出し、それを長期間繰り返すことにより路側機の高精度な測位を行う方法を提案する。また、3D レイトレーシング法を用いたシミュレーションにより、提案方式の有効性を評価・検証する。

以降、2 章では研究背景を述べ、3 章では、提案方式のベースとなる筆者らによる先行方式について述べる。4 章では提案方式を述べ、5 章では提案方式の有効性をシミュレーションにより評価、考察する。6 章では本研究と関連研究との違いを明らかにし、最後に 7 章で結論を述べる。

2. 背景

2.1 車両・歩行者測位の高精度化の必要性

交通事故防止や自動運転の実現には、車両・歩行者測位の高精度化が必須である。2017 年の交通事故による死者数は 3,694 人であり、そのうち歩行者は全体の 36.5% で 1,347 人である [3]。交通手段別死者数は歩行者比率が最大であり、早急な対策が求められている。そこで、車車間通信・歩車間通信を用いた安全運転の支援が注目されている。

車車間通信は、無線通信により周辺の車両どうしがそれぞれの位置・速度等に関する情報や道路状況等の情報を交

換して、運転者に対して安全運転の支援を行うシステムである。すでに、車両どうしの衝突防止のためのシステムが 2015 年秋に実用化され、一部の車種にはシステムが搭載されはじめ、今後も普及が想定される [4]。このシステムでは、700 MHz 帯の電波を使用し、車両の位置情報、速度等の情報を周辺車両に定期的 (100 ms ごと) にブロードキャストする。しかし車両自体の測位誤差が大きい場合には、車両の位置情報を使った安全運転支援システムの動作に問題が生じる可能性がある。現在、GPS に加えマップマッチング、ジャイロセンサや車速パルス信号を利用することで、さらなる車両測位精度の向上が実現され始めている [5], [6], [7]。

一方、歩車間通信 [1] は、歩行者から自身の位置を周辺車両に通知することにより、車両の運転者への注意喚起を可能にするシステムである [8]。ここでも歩行者の測位の正確性が求められる。車両・歩行者の測位誤差が大きい場合、運転者にとって歩行者が危険な位置にいるのかどうかを判断できない。

屋外測位手法は、GPS や GLONASS 等の GNSS を使うものが一般的である。これは、地球上空を周回する衛星の位置と、受信機との距離を利用して、受信機の位置を求める手法である。この手法は、送信時刻と受信時刻の時間差から衛星と受信機間の距離を算出するため、高いビル等の遮蔽物がある場合、電波伝搬経路が変化し測距誤差が生じる、または、電波を受信できず測距できないことがある。衛星による測位精度向上のため、2018 年 11 月より準天頂衛星システム「みちびき」のサービスが開始されたが、都市部では、測位に利用可能な衛星が天頂付近に集中し、天空での衛星の配置に偏りが生じるため、測位精度向上の効果は限定的である。

2.2 路側機高精度測位の必要性

路側機を使った測位手法 [9], [10] が検討されている。路側機を道路に設置し、測位の基準点として測距することで、GNSS が有効でない場所でも高精度な測位が可能となると考えられる。本論文では、「路側機」は「信号機に簡易な無線機を取り付けたもの」であり、自位置を高精度に把握しているものとする。

これらの方式では、路側機の位置は正確とする前提であるが、すでに日本国内に設置された 126 万灯もの膨大な数の信号機の高精度な測量を行うことは、莫大な時間と費用が必要となり、現実的ではない。

3. 提案のベースとなる筆者らの先行研究 [11]

筆者らは、衛星電波のみでは高精度な測位が困難な場所でも、車車間通信の電波も併用して歩行者の測位精度を向上させる手法を先に提案した。マルチパスの影響を受けないように、3.1 節で述べる、車両から受信する電波の RSSI

¹ 電気通信大学大学院情報理工学研究所
Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

a) k.toda@can.lab.uec.ac.jp

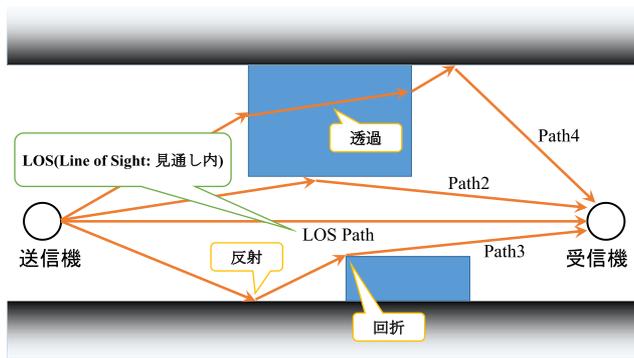


図 1 マルチパス電波伝播

Fig. 1 Multipath radio wave propagation.

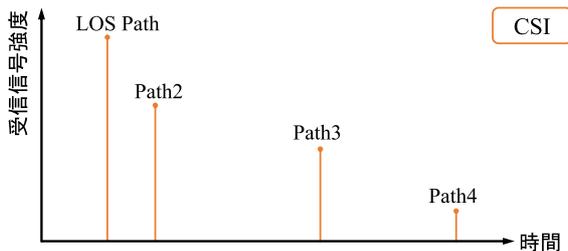


図 2 マルチパス電波伝搬環境下 (図 1) での CSI

Fig. 2 CSI (corresponding to Fig. 1) in multipath radio wave propagation environment.

(Received Signal Strength Indication : 総受信信号強度)ではなく, CSI (Channel State Information : チャネル状態情報) から得られる直接波の信号強度から, 車両と歩行者が持つ携帯端末 (受信機) との距離を算出し, GPS 衛星信号と合わせて歩行者の位置を実時間で求める. この手法では, 前提条件として車両位置は正確としていた.

3.1 RSSI と CSI

RSSI は, LOS (Line of Sight : 見通し内) の電波 (直接波) だけではなく, 反射波や回折波等のマルチパス波も含むすべての波の信号を合成した信号の強度である. 図 1 のような環境では, 直接波だけではなく, マルチパス波の影響を顕著に受けるため, 信号強度が安定しない. このため, 車両と歩行者との間の測距に RSSI を用いると誤差が大きくなる.

一方 CSI は, 無線 LAN や携帯電話の LTE (Long Term Evolution) の通信で使用される変調方式である OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing : 直交周波数分割多重方式) の信号から取得できる情報で, サブキャリア周波数ごとの信号強度や位相を表す [12]. CSI では, 図 2 に示すように時間軸での信号強度を示すことができる. 基本的には, 最初に届く第 1 波の信号強度は建物や地面に反射せず到来した直接波の強度を, また第 2 波以後はマルチパス波の強度を表す.

CSI から得られる直接波の強度は, 受信機が各パスの信号を分離するのに十分な時間分解能を持つ場合, マルチパ

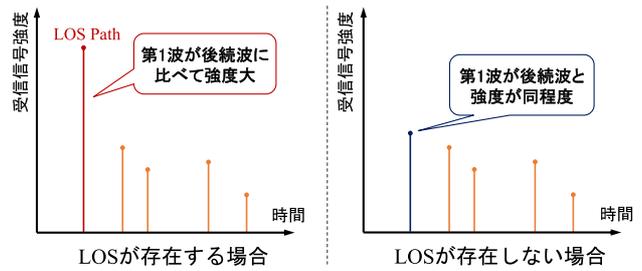


図 3 CSI に基づく直接波の有無判別

Fig. 3 Determination of LOS path presence based on CSI.

ス波の干渉による信号強度の増幅・減衰の影響を受けないため, 信号強度から送受信機間距離を算出する際に生じる誤差が RSSI から算出したときに比べてきわめて小さくなる. 時間分解能は, 受信機が到着する直接波やマルチパス波を区別できる能力を示すもので, 区別可能な最小単位時間で示す. 帯域幅 20 MHz の一般的な無線 LAN 受信機では, 50 ns (5×10^{-8} 秒) 程度である.

ただし, 受信電波に直接波が含まれず, 反射波や回折波のマルチパス波のみからなる場合もあるため, 第 1 波が必ずしも直接波とはならない.

3.2 直接波の有無判別

受信信号には, 直接波とマルチパス波が存在する. マルチパス波を含む電波の信号強度を使った測距は, 電波の干渉による減衰・増幅のほか, 伝播経路長と直線距離が異なるため, 誤差が大きくなる. このため, まず受信した電波に LOS を通る信号が含まれるかどうかを判定し, 含まれる場合にのみ, その第 1 波の信号を測距に利用する.

図 3 に受信電波に LOS が存在する場合としない場合の CSI の特徴的な違いを示す. LOS が存在する場合, 受信電波の第 1 波が直接波であり, 反射波や回折波による信号強度が減衰した後続波に比べて信号強度が著しく強い. 一方, LOS が存在しない場合, 受信電波の第 1 波が反射波または回折波であり, 後続波と同程度に信号強度が減衰して弱い.

このような直接波が存在しない信号を用いて測距すると誤差が大きくなるため, LOS が存在しない場合は測距計算を行わない.

3.3 送受信機間距離の算出

送受信機間距離を線形回帰で算出する方式と, これを改良した SVR (Support Vector machine Regression : サポートベクタマシン回帰) で算出する方式がある.

(1) 線形回帰方式

受信した電波の CSI を用いて直接波の信号強度を求め, 式 (1) に示す直接波の信号強度 L と距離 d の関係から, 定数 a, b を用いて送受信機間距離を計算する.

$$L = a \log_{10} d + b. \quad (1)$$

送受信機間距離が一定値を越えると、直接波と地面からの反射波の信号強度を CSI によって区別できなくなり、直接波と地面反射波が干渉する 2 波モデルとなり、式 (1) が成立しなくなって測距誤差が生じる。これに加え、都市部等の建物が密集する環境ではシャドウイング、マルチパスフェージングの影響で電波伝播がさらに複雑になる。仮想的にいついっさいの物質が存在しないとす自由空間モデルと比べて電波の伝播特性が異なるため、近距離と遠距離を同時に線形回帰でフィッティング（最小二乗法による直線の当てはめ）をするのは難しい。

(2) SVR 方式

SVR を用いて測距する。この方式では、CSI と送受信機間の実距離を与えて学習を行う。学習後に CSI を入力し、算出した送受信機間距離を出力する。

この方式は、非線形な関係でもフィッティングすることができるため、複雑な電波伝搬モデルでも適用可能である。

3.4 先行研究 [11] の方式の課題と路側機測位の必要性

先行研究 [11] の方式では、車両を測位基準点として歩行者の測位を行うが、周辺車両が少ない場合、測位精度が悪化する。

路側機高精度測位は、2.2 節で述べた必要性に加えて、先行研究 [11] の方式の課題解決にも有用であると考えられる。周辺車両の多い場合は 4 章で示す提案方式で路側機位置を求めて歩行者の新たな測位基準点とし、周辺車両の少ない場合は測位基準点とした路側機を併用することで、歩行者が自位置を高精度に算出可能である。

4. 提案方式

本論文では、車車間通信により位置情報に誤差が含まれる車両が発する信号から推定した路車間距離のデータを長期間収集し、カルマンフィルタを用いて路側機の測位を高精度に行う方式を提案する。図 4 に提案方式の概要を示す。車両側で求めた車両位置情報は車両からの無線信号により運ばれるパケットに含まれ、その情報と路側機側でその信号の直接波の強度から求めた車両との距離（路車間距離）とを合わせて路側機の測位を行う。測位では次に示す、

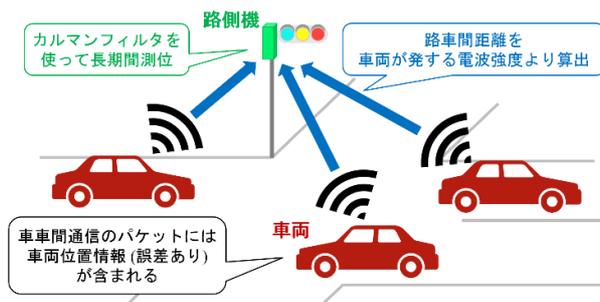


図 4 提案方式の概要

Fig. 4 Outline of proposed method.

4.2 節から 4.4 節の処理を長期間繰り返す。

4.1 前提条件

車両は無線機を搭載して車車間通信により自車両の位置情報を定期的に周辺車両に配信し、路側機は車両からの電波を受信可能であるとする。また、自車両の測位には都市部で GPS を利用した測位で生じる程度の誤差があるものとする。

4.2 路車間距離の算出

3.3 節で述べた先行方式 [11] と同様、線形回帰、または SVR を用いて路車間距離を算出する。

4.3 車両選択

路側機に対して特定の方向に偏った車両群のみを測位基準点とすると、HDOP (Horizontal Dilution of Precision : 水平精度低下率) が大きくなり、路側機に対する車両位置分布が悪いといえる [13], [14]。車両位置分布が悪いと、路側機の測位精度が悪化するため、HDOP が小さくなるように車両を選択する必要がある。実環境で生じやすい信号待ちによる車両位置の偏りを解消した状態で測位計算することで、精度悪化を回避できると考えられる。

路側機位置を \mathbf{x} 、 k 番目の車両位置を \mathbf{R}_k とすると、

$$\mathbf{x} = (x, y, z)^T, \tag{2}$$

$$\mathbf{R}_k = (X_k, Y_k, Z_k)^T, \tag{3}$$

と表される。測位に利用可能な k 番目の車両に対する路車間距離真値を $\rho_k(\mathbf{x})$ とすると、 k 番目の車両から見た路側機の方向ベクトル $\mathbf{e}^k(\mathbf{x})$ と状態変換方向ベクトル \mathbf{H} は、 $\mathbf{x} = (x_i, y_i, z_i)^T$ のとき、次のようになる。ただし、 \mathbf{T} を転置の記号とし、 $\mathbf{e}^k(\mathbf{x})$ は 3 次 \times 1 次の列ベクトル、 \mathbf{H} は n 次 \times 3 次の行列である。

$$\begin{aligned} \mathbf{e}^{kT}(\mathbf{x}) &= [\rho'_k(x), \rho'_k(y), \rho'_k(z)] \\ &= \left[\frac{\partial \rho_k}{\partial x} \Big|_{\substack{x=x_i \\ y=y_i \\ z=z_i}}, \frac{\partial \rho_k}{\partial y} \Big|_{\substack{x=x_i \\ y=y_i \\ z=z_i}}, \frac{\partial \rho_k}{\partial z} \Big|_{\substack{x=x_i \\ y=y_i \\ z=z_i}} \right], \end{aligned} \tag{4}$$

$$\mathbf{H} = [\mathbf{e}^1(\mathbf{x}), \mathbf{e}^2(\mathbf{x}), \dots, \mathbf{e}^n(\mathbf{x})]^T. \tag{5}$$

HDOP は、状態変換方向ベクトル \mathbf{H} を用いて、以下のよう計算できる。

$$\mathbf{A} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}, \tag{6}$$

$$\text{HDOP} = \sqrt{\mathbf{A}_{11} + \mathbf{A}_{22}}. \tag{7}$$

測位計算を行う前に HDOP を算出し、値が大きい場合には、別の車両からの信号受信を待機した後に HDOP 値が小さくなる車両の組合せを求め、測位計算を行う。

車両選択の具体例を表 1 に示す。測位基準点とする車

表 1 車両選択の例

Table 1 An illustration of vehicle selection.

epoch \ 車両	A	B	C	D	E	F	G	H	車両数	HDOP
:										
n	データ蓄積								4	-
n+1	データ蓄積								5	1.5
n+2	データ蓄積								6	1.5
n+3	データ蓄積								7	1.2
n+4	測位計算								8	0.9
:										

測位基準点とする車両5台, HDOP < 1.0 となる車両を選択する場合.
 (観測したepoch) ● → ○ (測位したepoch).
 HDOPは、蓄積した車両データがm台(5台以上)のとき、
 mC₅通りの組合せで算出したHDOPのうち、
 HDOPが最も小さくなる車両5台を選択したときの値を示す。

両を5台, HDOPが1未満となる車両を選択できたときに測位計算を行う場合を考える. 1 epoch (エポック)を車両から電波を受信・測距する時間間隔とし, epoch単位で蓄積した車両データ数を確認, 5台分以上の車両データがあればその epoch で HDOP をすべての組合せで算出する. 表1では, epoch が n+4 のとき, 蓄積した車両データは車両 A, B, C, D, E, F, G の7台, 新たに観測した車両データは H の1台である. この8台の車両から5台の車両を選ぶ ${}_8C_5 (= 56)$ 通りの組合せで HDOP を求め, HDOP が最小となる5台の車両 A, B, C, E, H を選択する. このとき, 表1より HDOP が 0.9 となり1未満であるため, 車両 A, B, C, E, H のデータで測位計算を行い, 測位計算に使用しなかった車両 D, F, G のデータは蓄積, 次の epoch に引き継ぐ.

4.4 測位計算

4.3節で述べた車両選択を行うためには, 長期間計測したデータを蓄積して測位結果に反映させることが不可欠である. カルマンフィルタを適用して, 路車間距離から路側機位置を長期間計測することにより, 時間的な車両の位置分布のばらつきを平滑化することができ, 路側機の高精度測位に有効である.

路側機位置を状態 \mathbf{x} , 路車間距離を観測値 \mathbf{y} とすると,

$$\mathbf{x} = (x, y, z)^T, \tag{8}$$

$$\mathbf{y} = (d_1, d_2, \dots, d_n)^T, \tag{9}$$

と表される. ここで, d_k は測位に利用可能な k 番目の車両が発する信号の CSI から算出した路車間距離である.

(1) 予測ステップ

時刻を $m-1$ から m に更新する. なお, 添字 (-) は予測値, 添字 (+) は最新の推測値である.

$$\mathbf{x}_m^- = \mathbf{F}\mathbf{x}_{m-1}^+, \tag{10}$$

$$\mathbf{P}_m^- = \mathbf{F}\mathbf{P}_{m-1}^+ \mathbf{F}^T + \mathbf{Q}. \tag{11}$$

ここで, 定数となる, 時刻更新における状態遷移モデル \mathbf{F} ,

状態ノイズ分散 \mathbf{Q} は以下のように定義する. \mathbf{Q} はカルマンフィルタにおけるプロセスノイズに相当し, 時刻更新によって状態 (路側機位置) は変化しないことからプロセスノイズは生じない.

$$\mathbf{F} = \mathbf{I}_3 \quad (3 \text{ 列} \times 3 \text{ 行の単位行列}), \tag{12}$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{O}_3 \quad (3 \text{ 列} \times 3 \text{ 行の零行列}). \tag{13}$$

状態推定誤差分散 \mathbf{P} の初期値 \mathbf{P}_1 は, 定数 p を用いて次のように定める. たとえば, $p = 100$ とする.

$$\mathbf{P}_1 = \begin{bmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{14}$$

次に, 状態変換方向ベクトル \mathbf{H} を用いて, カルマンゲイン \mathbf{K} を求める. \mathbf{R} は測定ノイズ分散で, 路側機と測位に利用可能な k 番目の車両との距離算出誤差分散 σ_k^2 を用いて以下のように定める. 路車間距離算出誤差分散は距離ごと (たとえば, 5m 以下, 5m 以上 10m 以下, ...) にあらかじめ計算しておく.

$$\mathbf{K}_m = \mathbf{P}_m^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_m^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}. \tag{15}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix}. \tag{16}$$

(2) 更新ステップ

観測値 \mathbf{y} と, 状態 \mathbf{x} を用いて状態を更新する. $\rho(\mathbf{x})$ は路側機と n 台の車両間の距離で n 次 \times 1 次の列ベクトルである.

$$\mathbf{x}_m^+ = \mathbf{x}_m^- + \mathbf{K}_m (\mathbf{y}_m - \rho(\mathbf{x}_m^-)), \tag{17}$$

$$\mathbf{P}_m^+ = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_m \mathbf{H}_m) \mathbf{P}_m^-. \tag{18}$$

状態 \mathbf{x} は時間経過による変化がないため, 計測期間が延びるにつれて状態推定誤差分散 \mathbf{P} , カルマンゲイン \mathbf{K} は小さくなり, 更新量は減少して真値に収束する.

5. シミュレーション評価

提案方式の有効性をシミュレーションにより検証した.

5.1 シミュレーション環境・条件

(1) 使用するシミュレータ

3D レイトレーシング法による電波伝搬シミュレーションを行うソフトウェア RapLab (構造計画研究所社製) を用いた. 得られた信号のパス情報を数値解析ソフトウェア MATLAB で解析し, 路側機の測位結果を算出した.

最大電波反射回数, 最大電波回折回数はそれぞれ 1 回, 電波の透過は生じない設定にした. また, 車両からの電波の送信周波数は 700 MHz, 送信電力は 20 dBm とした.

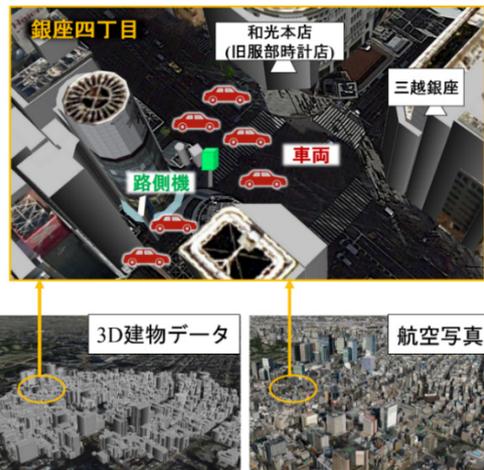


図 5 銀座付近の 3D 建物データと航空写真

Fig. 5 3D building data and aerial photographs near Ginza.

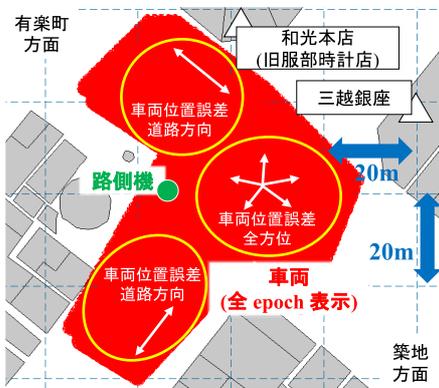


図 6 RapLab で配置した車両と路側機

Fig. 6 Position of vehicles and roadside units on RapLab.

(2) 使用する地図

銀座付近の 3D 建物データ (図 5 左下, NTT データ社製) を用いた. RapLab で 3D 建物データを読み込んでシミュレーションを行う. 3D 建物データは, 対応する航空写真 (図 5 右下, Google Earth より入手) とほぼ一致している.

(3) 路側機と車両の配置

銀座四丁目の交差点 (図 5 上) に路側機と車両を配置した. 配置した路側機と車両の位置を 図 6 に示す. 計 10,000 epoch で受信した車両データのうち, LOS が存在し, 実距離 40 m 以内の車両 163,744 台に対して測距計算を行った. 安全運転支援システムでは, 各車両は 100 ms ごとに周囲にパケットを配信するため, 路側機は同じ車両から複数のパケットデータを傍受する. しかし, シミュレーションでは, 1 台の車両につき, 測位に利用するのは 1 つのパケットのみとし, 各車両の位置誤差は互いに相関せず, 正規分布に従うものとした. これは, 衛星配置から測位誤差分布を予測できること [15] に加え, 長期間計測することで GPS 衛星配置の時間的変化が測位誤差分布を平滑化し正規分布に近づくと考えられるためである.

また, 測距計算を行った車両 163,744 台から次の車両台数: 50 台, 100 台, 500 台, 1,000 台, 2,000 台, 5,000 台, 10,000 台, 20,000 台, 40,000 台, をランダムに選択した.

直接波の有無判別は先行研究 [11] において機械学習により 95% の精度で判別する実証実験の結果から得られており, 学習データ数を増強することでさらなる精度向上が見込まれるため, ここでは 100% 判別できるものとした. 測距の結果, 算出した路車間距離が 10 m 以内, 20 m 以内, 30 m 以内, 40 m 以内のデータを使ってそれぞれ測位計算を行った.

車両に付加する位置誤差は, カーナビの性能として一般的にいわれる平均 6 m (標準偏差 $\sigma = 6\sqrt{\pi/2}$) とした. 車両位置誤差は都市部でも周辺環境により生じる誤差の大きさは異なるため, 5.2.2 項 (4) において位置誤差平均を 6 m 以外に, 1 m, 10 m でも検証した. 図 6 のように, 直線道にいる車両は道路方向の 2 方向どちらかに, 交差点内にいる車両は全方位ランダム方向に位置誤差を付加した. 直線道にいる車両は道路方向の 2 方向どちらかに位置誤差を付加した理由は, 車線検知やカーナビによるマップマッチングにより直線道では車両の進行方向 (道路方向) に対して垂直方向の位置誤差は軽減されると考えられるためである. 一方, 交差点内にいる車両は全方位ランダム方向に位置誤差を付加した理由は, 車両は 4 方向から交差点に出入, 右左折直進し, 車両の進行方向は多岐にわたることから, 進行方向に対する誤差は特定の方向に偏らないと考えられるためである.

(4) 路側機の時間分解能

CSI の計測における, 一番大きな誤差要因は受信機の無線 LAN モジュールの時間分解能である. 直接波と後続波が重なってほぼ同時に受信した際に, 時間分解能の制約でそれらを区別できないため, それらの合計強度から距離を算出することで誤差が生じる.

一般的な無線 LAN 受信機と同程度の時間分解能 50 ns の場合に加えて, さらに分解能が高い, 10 ns, 5 ns, 1 ns の場合で検証した. このシミュレーションでは, 時間分解能制約なしのパス情報を 3D レイトレーシング法により取得し, 各パスの位相情報を含む信号強度とその受信時刻から, 時間分解能のうちに含まれる信号を合成する (図 7). 路車間距離は, 合成して算出した CSI に, 3.3 節で述べた線形回帰を適用して算出する. 時間分解能が高くなるほど, 直接波と反射波・回折波を高精度に分離可能になるため, 路車間距離算出精度が向上すると考えられる.

(5) 路車間距離の測距

以下, CSI は (4) の方法により合成した信号を表し, CSI 第 1 波の強度は, 初到来波 (直接波) の受信時刻から時間分解能時間経過後までに受信した信号を合成した強度を表すものとした.

路車間距離の測距は, CSI 第 1 波の強度を用いた線形回

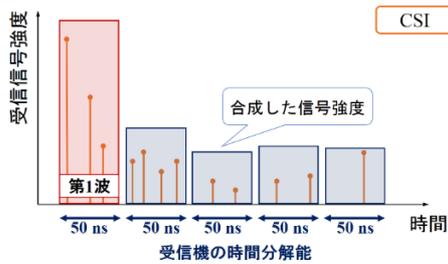


図 7 受信機の時間分解能を考慮した CSI

Fig. 7 CSI under the constraint of time resolution of the receiver.

表 2 路車間実距離と測距誤差

Table 2 Roadside unit-vehicle distance errors.

実距離 [m]	データ数 [台]	RSSI を用いた測距誤差 [m]	CSI を用いた測距誤差 [m]			
			* 50ns	* 10ns	* 5ns	* 1ns
0 ~ 5	10,284	0.21	0.17	0.16	0.16	0.00
5 ~ 10	30,652	0.80	0.67	0.65	0.65	0.00
10 ~ 15	20,162	2.08	1.87	1.78	1.76	0.07
15 ~ 20	20,774	6.22	6.09	6.10	6.09	4.90
20 ~ 25	22,746	9.75	9.54	9.54	9.53	7.96
25 ~ 30	18,190	11.82	11.56	11.57	11.55	9.29
30 ~ 35	28,379	13.24	12.97	13.05	13.03	9.72
35 ~ 40	12,557	14.22	13.77	13.82	13.79	9.39

* 路側機無線 LAN モジュールの時間分解能を表す。

帰により行った。実距離 40 m 以内にいる車両からの電波の CSI データを 10 分割して交差検証を行った [16]。近距離車両の測距誤差を小さくするため、フィッティング関数は路車間実距離 10 m 以内の車両データのみで算出した。

(6) HDOP

車両の位置分布により、測位精度が変化することを検証するため、全 epoch を通して各道路に均等に車両を配置 (車両の位置分布が良い) する場合と、路側機の北側のみに車両を配置 (車両の位置分布が悪い) する場合の 2 パターンで検証した。2 パターンの車両位置分布で HDOP 値と測位精度を比較し、車両位置分布を考慮することの必要性を調査した。

(7) 測位手法

車両位置分布の HDOP 値が閾値以下となる組合せの車両データが 5 台蓄積された epoch で、カルマンフィルタを適用する。測距データは 1 度の測位計算でのみ利用するものとする。また、水平平面測位誤差は推定位置と真位置との水平平面方向の距離を表し、以降、測位誤差と呼ぶ。10,000 epoch 経過時の測位誤差を、最終的な路側機の測位誤差とする。

5.2 シミュレーション結果

路車間距離算出結果と測位結果について述べる。

5.2.1 路車間距離算出結果

路側機の時間分解能別で、CSI 第 1 波強度を用いた線形回帰で求めた路車間距離の測距誤差を表 2 に示す。

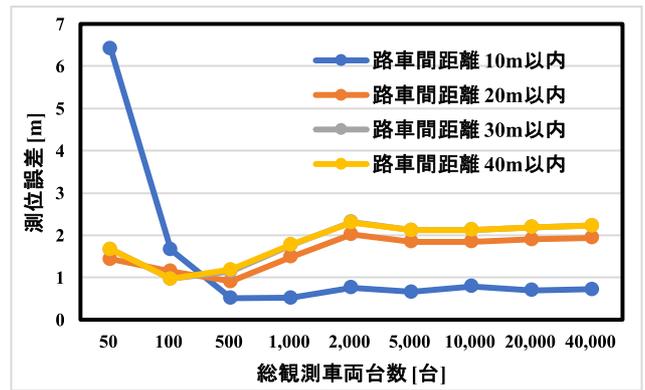


図 8 路車間距離別路側機測位誤差

Fig. 8 Horizontal positioning errors of roadside unit per roadside-unit to vehicle distance.

路車間実距離が 10 m 以下では、路側機の時間分解能 50 ns で数 cm 程度の誤差だが、路車間実距離が 20 m を超えると測距誤差が増大し、約 10 m の測距誤差が生じる。

また、路側機の時間分解能ごとに各測距手法を比較すると、分解能が向上すると測距誤差は小さくなり、分解能が 1 ns では 10 m 以下の車両で測距誤差を 1 cm 以下にすることが可能となる。

5.2.2 測位結果

(1) 測位に利用可能な車両の路車間距離

算出した路車間距離が 10 m 以内、20 m 以内、30 m 以内、40 m 以内の車両を測位に利用した場合に、測位誤差にどのような影響があるかを検証した。路側機の時間分解能が 50 ns のときの結果を図 8 に示す。横軸は測位計算で利用した累積の車両台数、縦軸は測位誤差を表す。「路車間距離 30 m 以内」の線は、「路車間距離 40 m 以内」の線と重なっている。

路車間距離 10 m 以内の車両データのみを利用した場合の測位誤差が最も小さくなり、40,000 台を観測した時点で、72 cm の測位誤差となった。なお、40,000 台のうち、推定した路車間距離が 10 m 以内の車両データは 8,627 台であった。

(2) 路側機の時間分解能ごとの測位誤差比較

路側機の時間分解能が一般的な無線 LAN 受信機の 50 ns から向上したとき、測位精度がどれほど改善されるかを検証した。ここでは推定した路車間距離が 10 m 以内の車両データのみを利用する。車両位置の誤差平均が 6 m のときの測位結果を図 9 に、1 m のときの測位結果を図 10 に示す。横軸は測位計算で利用した累積の車両台数、縦軸は対数スケールの測位誤差を表す。図 9、図 10 とともに、「時間分解能 50 ns」、「時間分解能 10 ns」の線は、「時間分解能 5 ns」の線と重なっている。

車両位置の誤差平均が 6 m の場合には、時間分解能の向上による路側機の測位誤差の大きな改善は見られず、40,000 台観測したときで、50 ns で 72 cm、1 ns で 50 cm であった。

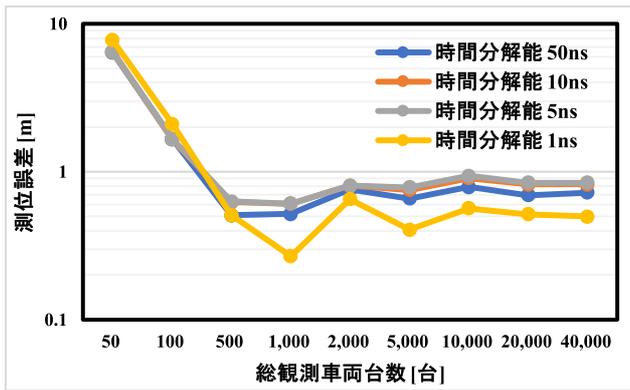


図 9 時間分解能別路側機測位誤差【車両位置誤差平均 6m】

Fig. 9 Horizontal positioning errors of roadside unit per time-resolution (Average position error of vehicles is 6 m).

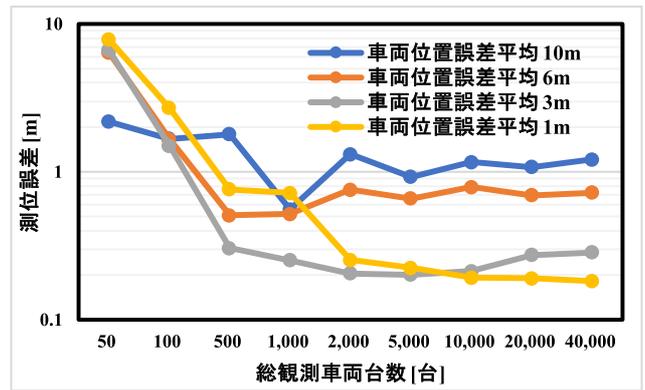


図 11 車両位置誤差別路側機測位誤差

Fig. 11 Horizontal positioning errors of roadside unit per vehicle positioning error range.

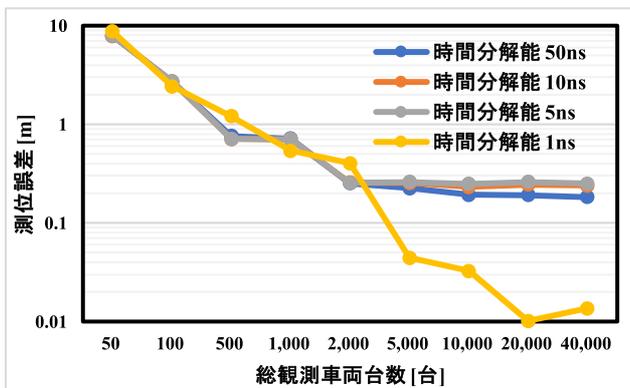


図 10 時間分解能別路側機測位誤差【車両位置誤差平均 1m】

Fig. 10 Horizontal position errors of roadside unit per time-resolution (Average position error of vehicles is 1 m).

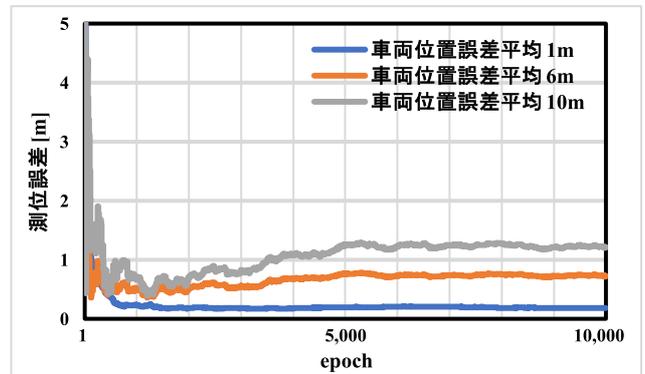


図 12 路側機測位誤差【良配置】

Fig. 12 Horizontal positioning error of roadside unit (with balanced vehicle position distribution).

しかし、車両位置誤差平均が 1m の場合には、時間分解能が 50 ns で 18 cm、1 ns では 1 cm となり、さらに高精度な測位が可能となる。

(3) 車両の位置誤差の影響

車両の位置精度が向上した場合、路側機の測位精度がどれほど改善されるかを検証した。路側機時間分解能が 50 ns において、車両の位置誤差平均が 10 m、6 m、3 m、1 m の場合で測位計算を行った結果を図 11 に示す。横軸は測位計算で利用した累積の車両台数、縦軸は対数スケールの測位誤差を表す。

車両の位置誤差が小さくなる程、測位誤差も小さくなった。車両位置誤差が 1 m まで改善した場合、測位誤差は 18 cm となった。

(4) 車両の位置分布による測位誤差比較

路側機の時間分解能が 50 ns において、車両の位置分布が良い場合（良配置：路側機から見て全方位の車両データを蓄積）測位結果を図 12 に、悪い場合（悪配置：路側機から見て北方向の車両データのみを蓄積）の測位結果を図 13 に示す。横軸が時間軸で epoch、縦軸が測位誤差である。

車両の位置分布が悪い場合、HDOP 値は 8.33 となり、車

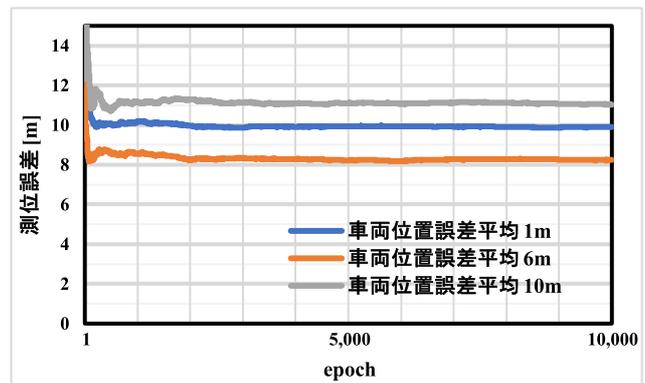


図 13 路側機測位誤差【悪配置】

Fig. 13 Horizontal positioning error of roadside-unit (with biased vehicle position distribution).

両位置誤差平均が 6 m のとき測位誤差が 8.24 m となった。一方、車両の位置分布が良い場合、HDOP 値は 0.69 となり、他は同じ条件で測位誤差は 72 cm になる。

車両位置誤差が小さいとき、車両の位置分布が良い場合には路側機測位の精度改善効果が見られたが、車両の位置分布が悪い場合、車両位置誤差にかかわらず路側機測位の精度は悪化している。

5.3 考察

5.3.1 近距離車両の利用

車両との距離が大きい場合、距離変化による信号強度変化が微小であり、測距誤差が大きくなることから、近距離車両のみを測位に利用することが測位精度向上に効果的である。ある瞬間では測距精度が高い近距離を通過する車両数が少なくても、長期間計測してデータを蓄積すれば測距精度が高いデータのみを利用して測位可能である。

5.3.2 路側機の時間分解能向上による効果

車両位置誤差が小さい場合には、路側機の時間分解能の向上による路車間距離の測距精度の改善効果が測位精度向上に貢献している。

表 2 より、路側機の時間分解能が向上すると路車間距離の測距精度が向上している。車両の平均位置誤差が 6m の場合、測距誤差よりも車両位置誤差の影響のほうが大きく、時間分解能向上の効果は限定的である。一方、車両の位置誤差が 1m の場合には、路側機における時間分解能の向上により測位精度は大きく改善し、1 ns では数 cm 程度の誤差で測位可能である。

なお、今回のシミュレーションでは、建物や地面の反射・回折を模擬しているが、路側機付近を通過する車両や歩行者の影響、および干渉波やホワイトノイズの影響を考慮していない。実環境における追加検証が今後必要になる。

5.3.3 車両位置誤差の影響

路側機の測位において、車両位置誤差の影響が路側機の時間分解能の影響に比べて大きい、長期間車両データを蓄積することにより、誤差分布を平準化して路側機の測位精度を向上させることが可能である。各車両の移動経路は様々であり、位置誤差のずれの大きさ、方向は正規分布に従うものと考えられるためである。

しかし、各車両に搭載される測位システムが、偏った傾向のもとに位置を補正した場合における、路側機の測位への影響は今後の検討課題である。一方、今後は自動運転の普及により車両位置誤差がさらに小さくなることが想定されるため、路側機測位への影響は軽微なものと考えられる。

5.3.4 車両の位置分布考慮の必要性

測位計算を行う前に HDOP 値が小さくなるよう車両の位置分布を考慮して車両選択し、測位計算を行うことで測位誤差を軽減できることが分かった。

今回のシミュレーションでは、既知の路側機位置に対して、任意に車両を配置し位置分布を調整して検証したが、実環境ではどの車両群が路側機にとって良い位置分布かが分からない。路側機の真位置が分からない状態で HDOP 値が小さくなるように車両位置分布が良い車両を選択することが必要である。

5.3.5 路側機の高精度測位が可能となる条件

提案方式では、車両に平均 6m の位置誤差が含まれる場合でも、一般的な無線 LAN 受信機程度の時間分解能

(50 ns) であっても長期間計測することにより最終的な測位誤差を 1 m 以下に抑えることが可能であることが分かった。シミュレーション結果から、路側機の測位誤差 1 m 以下を実現するためには、1) 測位に利用する車両を路車間距離が 10m 以内の車両に絞り、2) 車両の位置誤差平均は 6m 以下であり、3) 路側機から見た観測可能な車両の配置が一方に偏っていないことがあげられる。さらに、路側機の時間分解能が向上すれば、測距誤差削減により条件 1) で示した路車間距離が 10m 以上の車両が測位に利用可能となり、路側機周辺を車両が通過しにくい場所でも測位可能になると考えられる。

5.3.6 周辺環境の変動による影響

長期的な観測では、気温や湿度、天気等によって電波伝搬に影響を及ぼす可能性がある。今回のシミュレーションでは考慮していないが、今後それらを考慮したシミュレーションを行う予定である。

6. 関連研究との差異

測位基準点を用いた対象ノードの測位手法は、大きく 4 つに分類される [17]。1) 基準点静止、対象ノード静止、2) 基準点静止、対象ノード移動、3) 基準点移動、対象ノード静止、4) 基準点移動、対象ノード移動の 4 つに分類できる。このうち、提案手法は、3) 基準点移動、対象ノード静止の分類に属する。

測位基準点と測位する対象ノードとの距離を求め、三辺測量（または、3カ所以上の測位基準点を用いて測位）する方式は数多く提案されている。ここでは、1) 測距、2) 基準点の配置に分けて、関連研究と提案方式の差異を明確にする。

6.1 測距

測距には、ToA (Time-of-Arrival)、TDoA (Time Difference of Arrival)、RSSI を用いるものがある。ToA、TDoA では、送受信機が正確に時刻を同期する必要がある。時刻同期を必要としない手法も提案されているが、相互にパケットをやり取りする必要がある [18]。RSSI では、3.1 節で述べたように環境によりマルチパスが発生し、信号強度が変動することで測距精度が低下する。

そこで提案方式では、3.1 節で述べた、CSI から得られる直接波の信号強度を用いて測距することでマルチパスによる誤差影響を軽減する。

6.2 基準点の配置

すべての対象ノードを正確に測位可能な、基準点の移動経路の計画手法が検討されている [19]。これらの手法は、数少ない基準点が動き回り、多数の対象ノードを効率的かつ正確に測位することを目的としている。

一方、提案方式では、基準点は車車間通信を行う一般車

両であり、移動経路は指定できない。そのため、対象ノードにとって最適な基準点の配置を決定するのは、基準点ではなく、対象ノード側となる。対象ノードは多数の基準点の中から最適な配置となる組合せをDOPにより選択する。

6.3 まとめ

上記の議論から、提案方式における既存研究との主要な違いを以下にまとめる。

- (1) 測位基準点は車車間通信を行う一般車両であり、測位基準点(車両)が対象ノード(路側機)を測位するために移動するわけではないことから、測位基準点の移動経路は指定できないこと。
- (2) 測距をするためにRSSIではなくCSIを利用し、路側機の無線LANモジュールの時間分解能を向上させることにより、測距精度の向上が可能であること。
- (3) 衛星の配置状態を指標化したDOPを車両配置に対して適用することにより、車両を選択していること。

7. おわりに

本論文では、簡易な無線機を路側機に取付け、位置誤差を含む車両からの電波から車両と路側機との距離を算出し、それを長期間繰り返すことにより路側機の高精度な測位を行う方式を提案した。

シミュレーションによる評価の結果、一般的な無線LAN程度の時間分解能(50 ns)を持つ路側機でカルマンフィルタを適用して測位することにより、位置誤差平均6 mの車両情報を利用し、銀座四丁目の交差点において、測位誤差を72 cmにまで抑えられることを確認した。受信機の時間分解能を1 nsまでに向上させた場合には測位誤差が50 cmに、さらに車両の平均位置誤差が1 mの場合には、測位誤差を1 cmまでにすることができる。

今後の課題として、1) 実環境での検証、2) 車両位置の誤差の偏りの調査、3) さらなる測位精度向上のための車両選択の手法検討等があげられる。

参考文献

- [1] 内閣府：戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)自動走行システム研究開発計画(2018)。
- [2] 警視庁：都道府県別交通信号機等ストック数(2016)(online), 入手先(<https://www.npa.go.jp/bureau/traffic/seibi2/annzen-shisetu/hyoushiki-shingouki/hyousikisimngouki.html>) (参照 2018-10-25)。
- [3] 警察庁交通局：平成29年中の交通事故死者数について(2018)。
- [4] 朴 尚洙：760 MHz帯の車車間・路車間通信が始まる、トヨタが新型車への搭載を発表, *MONOist* (2015) (online), 入手先(<https://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1510/01/news046.html>) (参照 2018-12-03)。
- [5] Gu, Y., Hsu, L.T. and Kamijo, S.: GNSS/Onboard Inertial Sensor Integration with the Aid of 3-D Building Map for Lane-Level Vehicle Self-Localization in Urban Canyon, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol.65, No.6,

- pp.4274–4287 (2016).
- [6] De Ponte Müller, F., Diaz, E.M. and Rashdan, I.: Co-operative infrastructure-based vehicle positioning, *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)* (2016).
- [7] Kwon, C. and Hwang, I.: Constrained stochastic hybrid system modeling to road map - GPS integration for vehicle positioning, *2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control, CDC 2016*, pp.314–319 (2016).
- [8] Tang, S., Saito, K. and Obana, S.: Transmission control for reliable pedestrian-to-vehicle communication by using context of pedestrians, *2015 IEEE Int. Conf. Veh. Electron. Safety, ICVES 2015*, pp.41–47 (2016).
- [9] Ou, C.H.: A roadside unit-based localization scheme for vehicular ad hoc networks, *Int. J. Commun. Syst.*, Vol.27, No.1, pp.135–150 (2014).
- [10] Khattab, A., Fahmy, Y.A. and Wahab, A.A.: High Accuracy GPS-Free Vehicle Localization Framework via an INS-Assisted Single RSU, *Int. J. Distrib. Sens. Networks*, Vol.2015, pp.10–18 (2015).
- [11] 山下 遼, 湯 素華, 小花貞夫：歩行者事故削減のためのGPSと車両からの電波を用いた歩行者位置の高精度測位方式の提案と評価, 情報処理学会論文誌, Vol.59, No.1, pp.113–123 (2018)。
- [12] Yang, Z., Zhou, Z. and Liu, Y.: From RSSI to CSI, *ACM Comput. Surv.*, Vol.46, No.2, pp.1–32 (2013)。
- [13] Langley, R.B.: Dilution of Precision, *GPS World* (1999)。
- [14] Zhong, E. and Huang, T.: Geometric Dilution of Precision in Navigation Computation, *2006 International Conference on Machine Learning and Cybernetics* (2006)。
- [15] 安田明生, 平田 誠, 奥田邦晴, 今津隼馬：GPSにおけるGDOPと測位誤差分布について, 日本航海学会論文集, Vol.79, pp.25–31 (1988)。
- [16] Hastie, T., Tibshirani, R. and Jerome, F.: *The Elements of Statistical Learning*, New York (2001)。
- [17] Halder, S. and Ghosal, A.: A survey on mobile anchor assisted localization techniques in wireless sensor networks, *Wirel. Networks*, Vol.22, No.7, pp.2317–2336 (2016)。
- [18] Chen, H., Liu, B., Huang, P., Liang, J. and Gu, Y.: Mobility-assisted node localization based on TOA measurements without time synchronization in wireless sensor networks, *Mob. Networks Appl.*, Vol.17, No.1, pp.90–99 (2012)。
- [19] Ou, C. and He, W.: Path Planning Algorithm for Mobile Anchor-Based Localization in Wireless Sensor Networks, *IEEE Sens. J.*, Vol.13, No.2, pp.466–475 (2013)。



戸田 和宏 (正会員)

1993年生。2017年電気通信大学情報・通信工学科卒業。2019年同大学大学院博士前期課程修了。この間、車両が発する電波を用いた都市部での測位精度向上の研究に従事。



湯 素華 (正会員)

1998年中国科学技術大学電子情報工学科卒業。2003年同大学大学院博士課程修了。工学博士。同年(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)適応コミュニケーション研究所研究員。2014年電気通信大学大学院情報理工学研究科助教, 2019年同研究科准教授。アドホックネットワーク, ITS, 省電力無線通信, マルチメディア通信の研究に従事。電子情報通信学会, IEEE各会員。



小花 貞夫 (正会員)

1953年生。1976年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。1978年同大学大学院修士課程修了。同年国際電信電話(株)(現, KDDI(株))入社。パケット交換方式, ネットワークアーキテクチャ, OSIプロトコル実装, データベース, ビデオテックス, 分散処理, ネットワーク管理の研究・開発に従事。2004年(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)適応コミュニケーション研究所所長。2011年電気通信大学大学院情報理工学研究科教授。無線アドホックネットワーク, 高度交通システム(ITS), センサネットワーク, ネットワーク低消費電力化等の研究に従事。工学博士。2001年文部科学大臣賞(研究功績者), 電子情報通信学会会員。本会フェロー。