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　湯素華　小花貞夫

概要：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．しかし，GPS をはじめとする GNSS および準天頂衛星等による測位は，高いビルに囲まれる都市部では測位精度が低下し，高精度化の実現は難しい．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周辺を走行する車両の高精度な測位が可能となると考えられる．しかし，既に設置された膨大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．本発表では，簡易な無線機を路側機に取付け，安全運転支援の為の車車間通信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式を提案する．一般的な無線 LAN 程度の時間分解能を持つ路側機で，位置誤差平均 6m の車両情報を利用した場合，測位誤差を 50cm にまで抑えることを可能にした．

A proposal on high-precision positioning method of roadside units by using vehicle signals collected in the long-term

KAZUHIRO TODA　SUHUA TANG　SADAO OBANA

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防止する車車間通信[1]が注目されており，歩行者の高精度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 などの 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などの遮蔽の影響で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，高精度な測位が行えない，または精度の低い測位となる場合がある．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，既に設置された 126 万灯もの膨大数の信号機 (国内の車両用信号灯器数[2]) 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難しい．また，設置する路側機すべての測量には膨大な時間と費用が必要になる．

本稿では，簡易な無線機を路側機に取付け，安全運転支援の為の車車間通信[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式を提案する．また，3D レイトレーシング法を用いたシミュレーションを行い，提案方式の有効性を評価する．

以降，第 2 章では研究背景について述べる．第 3 章では，提案方式のベースとなる先行方式について，第 4 章では提案方式を述べ，第 5 章では提案方式の有効性をシミュレーションで評価，考察する．最後に第 6 章で結論を述べる．

2. 背景

2.1 路側機

本稿では，路側機とは「信号機に簡易な無線機と取り付けたもの」であり，自位置を高精度に把握しているものとする．

路側機を使った車両・歩行者測位手法[3]も検討されているが，既に設置された 126 万灯もの膨大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．

2.2 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．平成 29 年度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[4]．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，車両どうしの無線通信により周辺車両や道路状況などの情報を取得して，運転者に対して安全運転の支援を行うシステムである．既に，車両どうしの衝突防止の為のシステムが 2016 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[5]．このシステムでは，700MHz 帯の電波を使用し，車両

電気通信大学 大学院情報理工学研究科
Graduate School of Informatics and Engineering,
The University of Electro-Communications

ⓒ2018 Information Processing Society of Japan

の位置情報,速度等の情報を周囲車両に頻繁 (100ms 毎) にブロードキャストする.車両自身の測位誤差が大きい場合,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．現在の車両測位では，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平均数 m 程度の誤差を含む精度となっている[6][7][8].

一方，歩車間通信[9]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，車両の運転者側への注意喚起を可能にするシステムである[10]．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 などの GNSS 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することで，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受信機間距離を算出する為，高いビルなど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．2018 年 11 月より準天頂衛星システム「みちびき」によるサービスの開始が決定されたが，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為,測位精度向上の効果は限定的である.

3. 提案のベースとなる先行研究[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，車車間通信の電波を利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 で述べる，車両から受信する電波の RSSI ではなく， CSI から得られる直接波の強度から，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る.

3.1 RSSI と CSI

RSSI (Received Signal Strength Indication: 総受信信号強度) は，LOS (Line of Sight:見通し内) の信号 (直接波) だけではなく，反射波や回折波などのマルチパス波の信号も含む全て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為，信号強度が安定しない．この為，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 (Channel State Information: チャネル状態情報) は，無線 LAN や携帯電話の LTE の通信で採用されている変調方式である 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，時間軸での信号強度を示すこともできる．図 1 のように送信機から受信機まで信号が伝播するとき，CSI は図 2 のようになる．最初に届く第 1 波の信号強度は建物や地面に反射せずに到来した直接波の強度を，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，受信機が各パスを分離するのに充分な時間分解能を持つ場合，マルチパ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為，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 20MHz の一般的な無線 LAN 受信機では，50ns (5×10^{-8} 秒) 程度である.

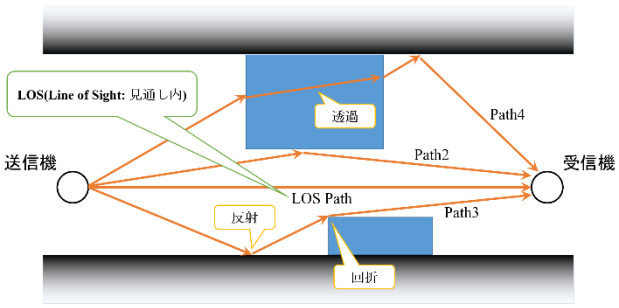

図 1　マルチパス電波伝搬

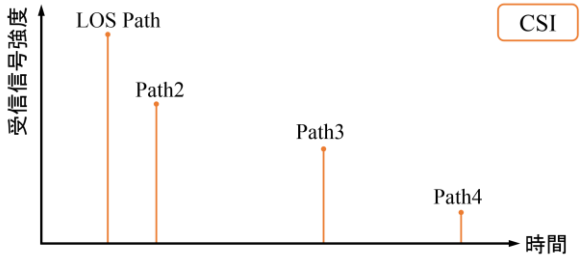

図 2　CSI

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為，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.

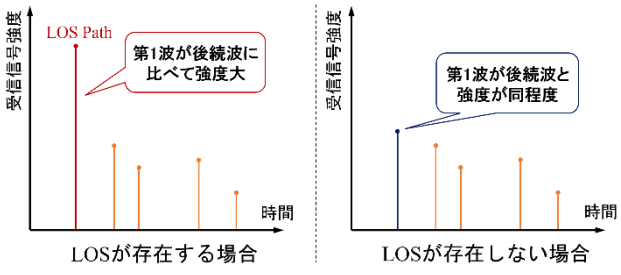

図 3　CSI に基づく直接波の有無判別

ⓒ2018 Information Processing Society of Japan

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，反射や回折により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為，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 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 を用いて直接波の強度を求め，式(1)に示す直接波の強度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．

$$L = a \log_{10} d + b \ . \tag{1}$$

この方式では，送受信機間距離が一定値を越えると地面からの反射波による干渉の影響が生じ，地面反射の 2 波モデルとなる．特に，都市部など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．伝播特性が自由空間モデルと異なる為，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 (Support Vector machine Regression: サポートベクタマシン回帰) を用いて測距する．この方式では，CSI と送受信機間実距離を与えて学習を行う．学習後に CSI を入力することで，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為，複雑な電波伝搬モデルでも適用可能である．

4. 提案方式

先行研究[11]では，車両の位置は正確であるとしたが，現在の車両測位では，平均数 m 程度の誤差を含む精度となっている．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．これを長期間繰り返す．

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 GNSS を利用した測位で生じる程度の誤差があるものとする．

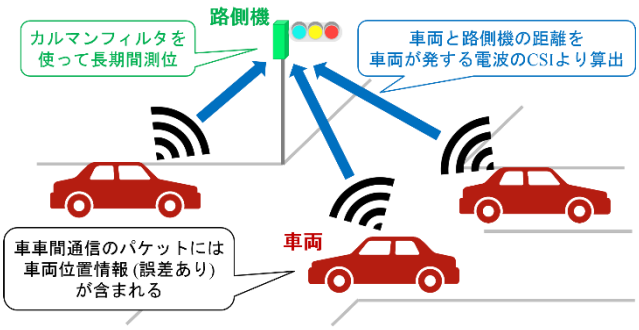

図 4　提案方式の概要

4.2 路車間距離の算出

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

測位する際，適切に車両を選択した上で測位を行わなければ，車両の位置分布が悪くなり，測位精度が悪化する．その為，HDOP (Horizontal Dilution of Precision: 水平精度低下率) が小さくなるように車両選択する[13][14].

路側機位置を$\mathbf{r}$，k番目の車両位置を$\mathbf{R_k}$とすると，

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

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

と表される．k番目の車両に対する路車間距離を$\rho_k(\mathbf{r})$とすると，k番目の車両から見た路側機の方向ベクトル$\boldsymbol{e^{kT}}(\mathbf{r})$と状態変換方向ベクトル$\mathbf{H}$は次のようになる．

$$\boldsymbol{e^{kT}}(\mathbf{r}) = \left[\rho'_k(x), \rho'_k(y), \rho'_k(z)\right] \tag{4}$$

$$= \left[\left.\frac{\partial \rho_k}{\partial x}\right|_{\substack{x=x_i\\y=y_i\\z=z_i}}, \left.\frac{\partial \rho_k}{\partial y}\right|_{\substack{x=x_i\\y=y_i\\z=z_i}}, \left.\frac{\partial \rho_k}{\partial z}\right|_{\substack{x=x_i\\y=y_i\\z=z_i}}\right],$$

$$\mathbf{H} = [\boldsymbol{e^{1T}}, \boldsymbol{e^{2T}}, \ldots, \boldsymbol{e^{nT}}]^T. \tag{5}$$

HDOP は，状態変換方向ベクトル$\mathbf{H}$を用いて，以下のように計算できる．

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

$$\mathrm{HDOP} = \sqrt{\boldsymbol{A}_{11} + \boldsymbol{A}_{22}}, \tag{7}$$

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．これにより，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が可能として，精度悪化を回避する．

4.4 測位計算

路側機の状態を$\mathbf{x}$，路車間距離の測定値を$\mathbf{y}$とすると，

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

ⓒ2018 Information Processing Society of Japan

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

と表される．ここで，x, y, zは路側機の位置，dは CSI から算出した路車間距離である．

(1) **予測ステップ**

時刻更新における状態遷移モデル$\mathbf{F}$，状態推定誤差分散$\mathbf{P}$，状態ノイズ分散$\mathbf{Q}$を用いて，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．

$$\mathbf{x}_m^- = \mathbf{F}\mathbf{x}_{m-1}^+ \quad (10)$$

$$\mathbf{P}_m^- = \mathbf{F}\mathbf{P}_{m-1}^+\mathbf{F}^T + \mathbf{Q} \quad (11)$$

次に，状態変換方向ベクトル$\mathbf{H}$，カルマンゲイン$\mathbf{K}$を求める．ここで，$\rho(\mathbf{x})$は路車間距離，$\mathbf{R}$は測定ノイズ分散を表す．

$$\mathbf{K}_m = \mathbf{P}_m^-\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{P}_m^-\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (12)$$

(2) **更新ステップ**

測定値$\mathbf{y}$と，状態$\mathbf{x}$を用いて状態を更新する．

$$\mathbf{x}_m^+ = \mathbf{x}_m^- + \mathbf{K}_m(\mathbf{y}_m - \rho(\mathbf{x}_m)) \quad (13)$$

$$\mathbf{P}_m^+ = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_m\mathbf{H}_m)\mathbf{P}_m^- \quad (14)$$

状態$\mathbf{x}$は時間経過による変化がない為，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，車両送信周波数は 700MHz，送信電力は 20dBm とした．

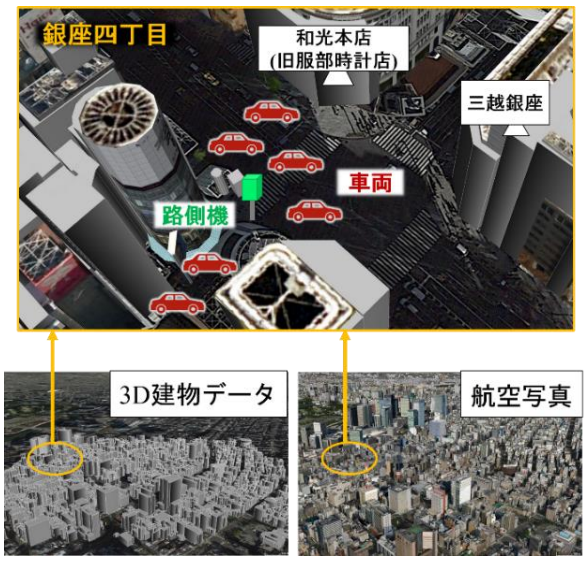

図 5　銀座付近の 3D 建物データと航空写真

(2) **使用する地図**

銀座付近の 3D 建物データ (NTT データ社製) を用いた．RapLab で 3D 建物データを読み込みこんでシミュレーションを行う．3D 建物データ (図 5 左下) 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．1epoch を，車両から電波を受信・測距し，蓄積した測距データを用いて測位するかを判断するタイミングとする．路側機は 1epoch に 30 台の車両データを受信する．計 10,000epoch で受信した車両データのうち，LOS が存在し，実距離 40m 以内の車両 163,744 台に対して測距計算を行った．そのうち，路車間距離 10m 以内の車両は 40,936 台である．警視庁の統計によると，82,566 台の車両が三原橋交差点 (銀座四丁目隣の交差点) を通過する[15]．同等数の車両が銀座四丁目の交差点を通過し，路側機付近 10m 以内を通過する車両が交差点通過数の 1/10 とすると，1 週間以内に路車間距離 10m 以内の 40,936 台の測距データを蓄積可能である．

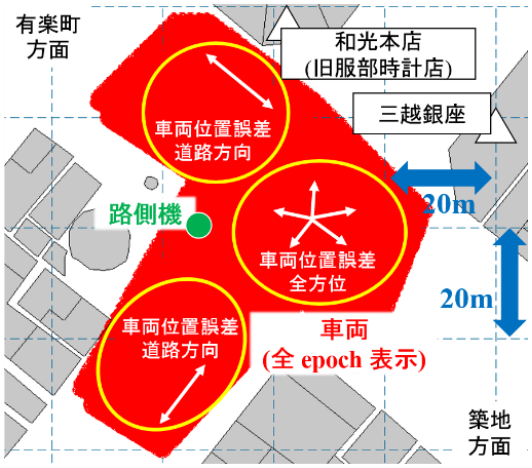

図 6　RapLab で配置した車両と路側機

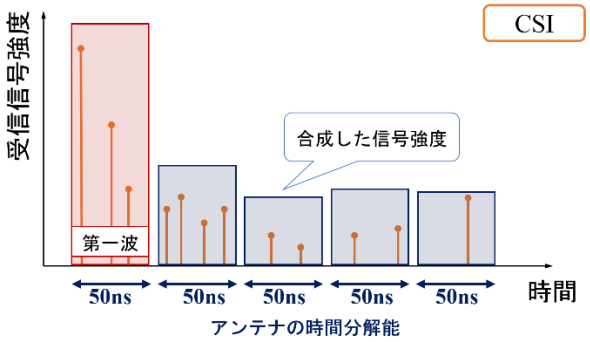

図 7　アンテナの時間分解能を考慮した受信信号強度

直接波の有無判別は先行研究[11]において 95%の精度で判別する実証実験が得られている為，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 10m

ⓒ2018 Information Processing Society of Japan

以内，20m 以内，30m 以内，40m 以内のデータを使ってそれぞれ測位計算を行う．

車両に付加する位置誤差は，平均 6m (標準偏差 $\sigma = 6\sqrt{\pi/2}$) とした．図 6 のように，交差点内にいる車両は全方位ランダム方向に，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．

(4) 路側機の時間分解能

一般的な無線 LAN 受信機と同程度の 50ns に加えて, さらに，5ns，1ns の場合で検証した．

アンテナが受信した電波を模擬する為, RapLab で算出した各パスの位相情報を含む信号強度とその受信時刻から，時間分解能の内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 で述べた線形回帰，SVR を適用して算出する．時間分解能が向上するほど，直接波と反射波・回折波を高精度に分離可能になる為，路車間距離算出精度も向上することとなる．

(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．

路車間距離の測距は, CSI 第 1 波強度を用いた線形回帰，CSI を用いた SVR により行った．

シミュレーションでは, 実距離 40m 以内の CSI データを 10 分割して交差検証を行った[16]. すべての分割について，分割外の Training データで線形近似 (線形回帰の場合) ・学習 (SVR の場合) し，分割内の Test データから路車間距離を算出した．近距離車両の測距誤差を小さくする為，線形回帰の場合のフィッティング関数は路車間実距離 10m 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為，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，1~5,000epoch では路側機の北側のみ，5,001~10,000epoch では路側機の南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，位置分布を考慮することの必要性を調べた．

(7) 測位タイミング

測位計算は，3 台，5 台，10 台，15 台，20 台，40 台，100 台，200 台，500 台，1,000 台を越えた測距データが蓄積された epoch で行う．測距データは 1 回の測位でのみ利用するものとする．

(8) 測位手法

測位手法は，単独測位，カルマンフィルタを適用した測位の 2 手法を比較した．単独測位では一般的な 3 点測位を行い，カルマンフィルタを適用した測位では前回の測位結果を加味して測位結果を修正する．

単独測位の測位誤差は全測位計算の平均値を，カルマンフィルタを適用した測位誤差は最後に測位した値を表す．

5.2 シミュレーション結果

5.2.1 に路車間距離算出結果を，5.2.2 に測位結果について述べる．

5.2.1 路車間距離算出結果

路側機時間分解能別で，CSI 第 1 波強度を用いた線形回帰，CSI を用いた SVR で求めた路車間距離の測距誤差を表 1 に示す．

路車間実距離が 10m 以下では，路側機時間分解能 50ns で数 m 程度の誤差だが，路車間実距離が 20m を越えると測距誤差が増大し，CSI 第 1 波強度を用いた線形回帰では 9.54m の測距誤差が生じる．CSI を用いた SVR では，路車間実距離が 20m を越える場合でも，測距誤差低減に効果があり，4.22m の測距誤差である．これは，SVR の Training データとして遠距離車両も利用していることに起因し，電波の伝播特性が自由空間モデル以外でも，SVR 学習モデルが電波伝播の特徴を掴んだと考えられる．

表 1 において，路側機時間分解能ごとに各測距手法を比較すると，路側機時間分解能が向上すると測距誤差は小さくなり，路側機時間分解能が 1ns では 10m 以下の車両で測距誤差数 cm が可能である．

表 1　路車間実距離と測距誤差

路車間実距離 [m]	全 epoch 車両数 [台]	路側機時間分解能: 50ns		路側機時間分解能: 5ns		路側機時間分解能: 1ns	
		線形回帰 CSI	SVR CSI	線形回帰 CSI	SVR CSI	線形回帰 CSI	SVR CSI
0 ~ 5	10,284	0.17	0.53	0.16	0.38	0.00	0.37
5 ~ 10	30,652	0.67	1.19	0.65	2.01	0.00	0.43
10 ~ 15	20,162	1.87	2.69	1.76	4.45	0.07	0.61
15 ~ 20	20,774	6.09	2.48	6.09	2.54	4.90	1.39
20 ~ 25	22,746	9.54	4.22	9.53	3.99	7.96	3.18
25 ~ 30	18,190	11.56	4.60	11.55	3.88	9.29	2.50
30 ~ 35	28,379	12.97	5.24	13.03	4.40	9.72	1.14
35 ~ 40	12,557	13.77	5.77	13.79	7.61	9.39	3.53

ⓒ2018 Information Processing Society of Japan

5.2.2 測位結果

(1) 測位利用車両の路車間距離

算出した路車間距離が 10m 以内，20m 以内，30m 以内，40m 以内の車両を測位に利用した場合，測位誤差に影響があるかを検証した．路側機時間分解能が 50ns，CSI 第 1 波強度を用いた線形回帰で測距を行ったときの測位結果を比較した．単独測位の結果を図 9，カルマンフィルタを利用した測位の結果を図 10 に示す．横軸は 1 回の測位計算で利用した車両台数，縦軸は水平平面測位誤差 (以下，測位誤差とする) を表す．

単独測位，カルマンフィルタを適用した測位のどちらも，路車間距離 10m 以内の車両データのみを利用した場合で測位誤差が最も小さくなり，カルマンフィルタを適用した測位で最良で 50cm の測位誤差となった．

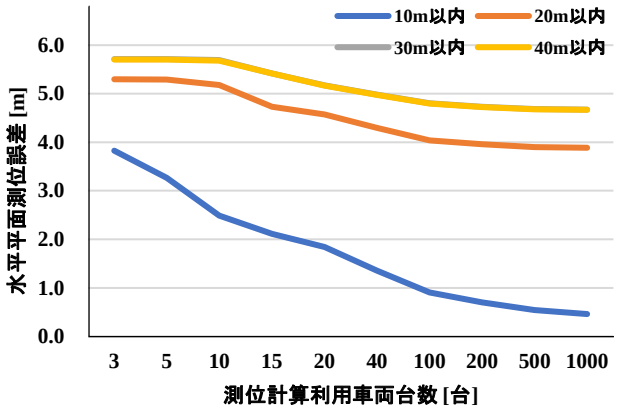

図 9　車両距離別測位誤差【単独測位】

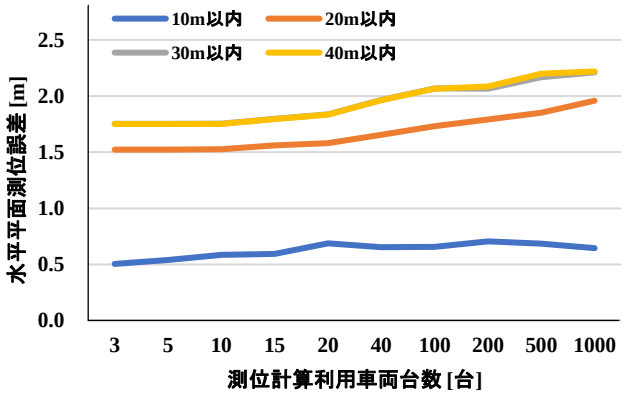

図 10　車両距離別測位誤差【カルマンフィルタ】

(2) 測距手法ごとの測位誤差比較

測位結果を図 11，図 12，図 13 に示す．路側機時間分解能が図 11 は 50ns，図 12 は 5ns，図 13 は 1ns である．

図 13 より，路側機の時間分解能が 1ns では，カルマンフィルタを適用した場合，測位誤差が最良で 47cm になった．図 11 における，時間分解能が 50ns の場合でも測位誤差が最良で 50cm であり，一般的な無線 LAN の時間分解能でも高精度に測位可能である．

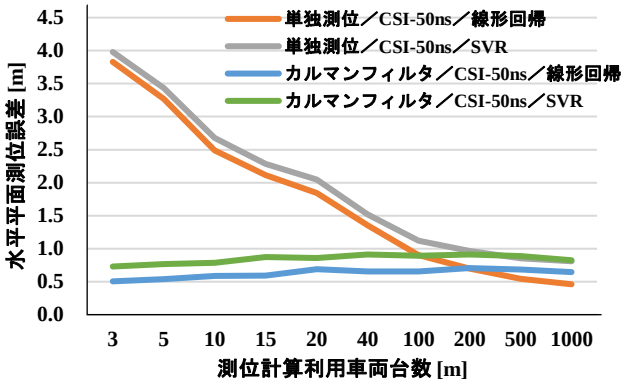

図 11　測距手法別測位誤差【CSI-50ns】

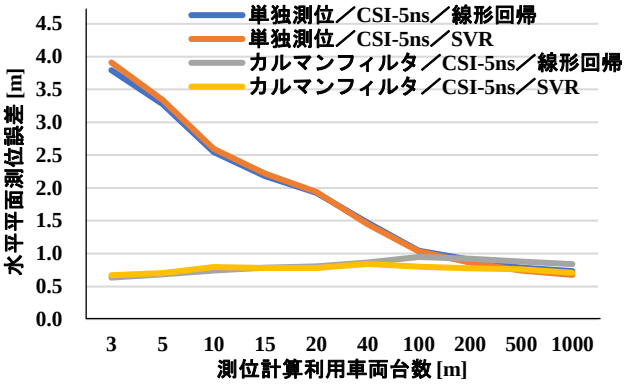

図 12　測距手法別測位誤差【CSI-5ns】

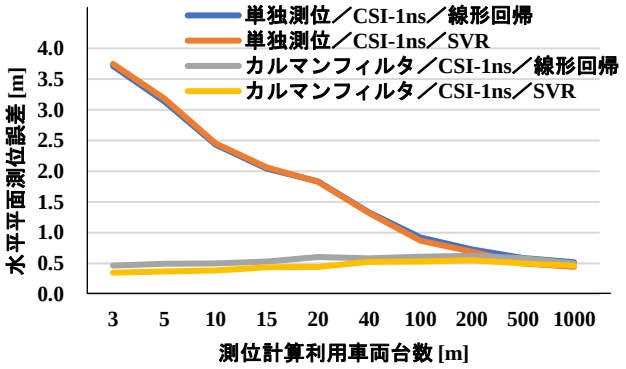

図 13　測距手法別測位誤差【CSI-1ns】

(3) 車両の位置誤差の影響

車両の位置誤差は平均 6m (標準偏差 $\sigma = 6\sqrt{\pi/2}$) としたが，車両の位置精度が向上した場合の結果を比較した．車両の位置誤差平均が 6m，3m，1m，0m の場合で測位計算を行った結果を図 14，図 15 に示す．横軸は車両の位置誤差，縦軸は路側機の測位誤差を表している．図 14 は単独測位，図 15 はカルマンフィルタを適用した測位結果である．路側機時間分解能が 50ns，CSI 第 1 波強度を用いた線形回帰で測距を行ったときの測位結果を比較した．

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．カルマンフィルタを適用した場合において，車両位置誤差 6m で測位誤差が最良 50cm，車両位置誤差 3m で測位誤差は最良 17cm となった．

ⓒ2018 Information Processing Society of Japan

表 2　測位計算回数と HDOP 値

測位計算利用車両台数 [台]		3	5	10	15	20	40	100	200	500	1000
車両位置分布良	測位計算回数 [回]	7131	5173	3164	2284	1787	955	398	201	81	40
	HDOP 値	1.01	0.80	0.59	0.49	0.43	0.31	0.20	0.14	0.09	0.06
車両位置分布悪	測位計算回数 [回]	7005	5143	3165	2274	1782	953	397	201	81	40
	HDOP 値	1.07	0.84	0.62	0.52	0.45	0.33	0.21	0.15	0.09	0.07

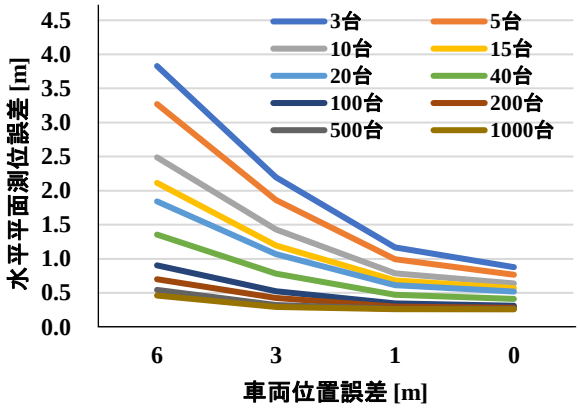

図 14　車両位置誤差別測位誤差【単独測位】

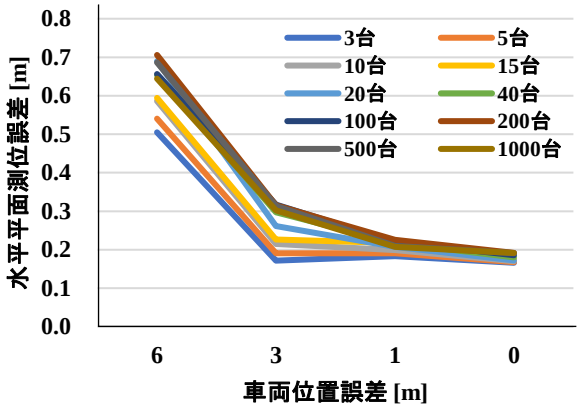

図 15　車両位置誤差別測位誤差【カルマンフィルタ】

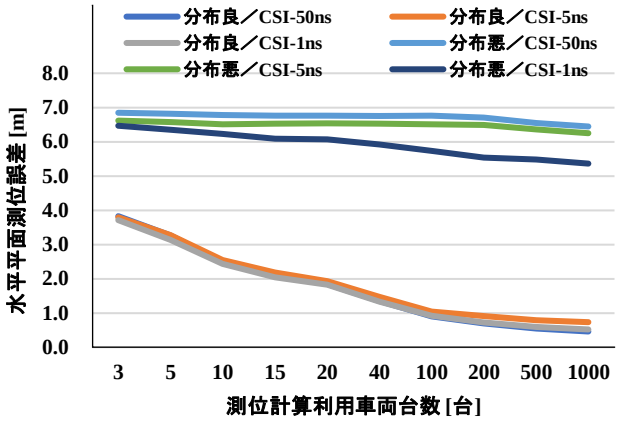

図 16　車両位置分布別測位誤差【単独測位】

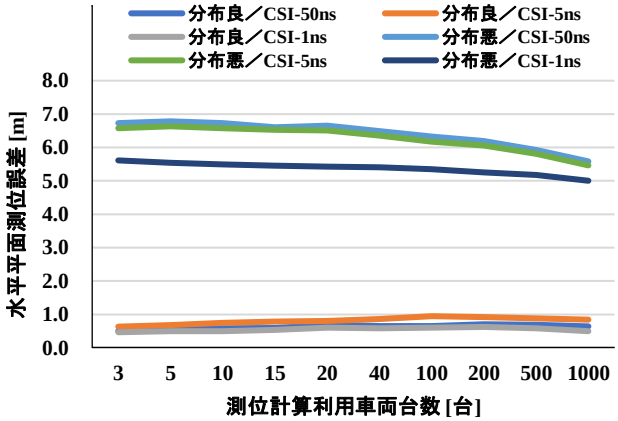

図 17　車両位置分布別測位誤差【カルマンフィルタ】

(4)　車両の位置分布による測位誤差比較

車両の位置分布が良い場合と悪い場合の測位結果を図 16 (単独測位)，図 17 (カルマンフィルタを適用して測位) に示す．路側機時間分解能が 50ns，CSI 第 1 波強度を用いた線形回帰で測距を行ったときの測位結果を比較した．車両の位置分布が良い場合と悪い場合での測位計算回数と HDOP 平均値を表 2 に示す．

車両位置の位置分布が悪く HDOP 値が大きい場合，測位結果が悪化し，路側機時間分解能 50ns，カルマンフィルタ適用で測位誤差が最良で 5.58m (図 17，分布悪／CSI-50ns) である．位置分布が良い場合，他は同じ条件で測位誤差は最良で 50cm (図 17，分布良／CSI-50ns) になる．

測位計算利用車両台数が 3 台の場合において，車両位置分布が良いとき HDOP 値は 1.01 だが，車両位置分布が悪いとき HDOP 値は 1.07 で 5.9%増大している．

5.3　考察

(1)　長期計測の効果について

a)　単独測位

車両位置には誤差が含まれている為，測位計算する際に車両データ数が少なければ誤差の偏りが生まれて測位誤差が増大する．数百台の測位に利用可能な車両データが収集できるまでデータを保持し，データ数が集まった段階で測位計算を行うことで車両位置誤差の影響を小さくすることができる．図 11，図 12，図 13 より，単独測位の場合，測位計算の車両利用台数が多いほど誤差を低減することがわかる．路側機時間分解能 50ns，CSI 第 1 波を用いた線形回帰，1,000 台で測位した場合，測位誤差が 46cm であった．膨大な車両数を使った単独測位は，カルマンフィルタと同等の測位誤差削減効果があると言える．

ⓒ2018 Information Processing Society of Japan

b) カルマンフィルタ

カルマンフィルタを適用して測位する方式では，一度に利用する車両台数が少ない場合でも，最終的な測位誤差を数十 cm に抑えることが可能である．これは，カルマンフィルタを適用したとき，1 回の測位で利用する車両台数が少ない場合でも最終的にカルマンフィルタの状態に全ての車両からの測距データが反映される為，単独測位に比べて測位誤差が小さくなると考えられる．

今回のシミュレーションでは，測位に利用する車両総数が一定であった為，1 度の測位で利用する車両台数が多くなる分，測位回数 (カルマンフィルタの更新回数) が減少する．その影響により，1 度の測位計算に利用する車両台数を多くした場合，若干誤差が増大した (路側機時間分解能 50ns，線形回帰による測距で，車両台数 3 台の場合測位誤差 50cm，車両台数 200 台の場合 71cm)．しかし，実環境において路側機は長期間計測でき，測位に利用する車両総数に制限がなく，1 回の測位に利用する車両台数による測位結果への影響はないと考えられる．

(2) **測位に利用する車両による影響について**

近距離車両数が単時間では少ない場合でも，長期間計測してデータを蓄積すれば測距精度がよい近距離車両のデータのみを利用して測位することが可能であり，測位誤差低減効果がある．算出路車間距離 10m 以上の車両データも利用すると，カルマンフィルタ適用し測位計算利用車両台数 3 台の場合で測位誤差が 1.75m (図 10，40m 以内) となり，10m 以下の車両データのみを利用した場合の測位誤差 50cm (図 10，10m 以内) に比べて大幅に測位精度が悪化する．

(3) **HDOP 値の測位誤差への影響について**

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わかった．

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わからない．路側機の真位置がわからない状態で 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．

6. おわりに

本稿では，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 6m の車両情報を利用し，銀座四丁目の交差点に設置した路側機で，測位誤差を 50cm にまで抑えられることを確認した．また，受信した車両データを保持し車両位置の位置分布を考慮して車両選択することにより測位精度が向上することがわかった．

今後の課題として，さらに測位精度を高めるための車両選択の手法を検討する．

参考文献

[1] 内閣府, “官民 ITS 構想・ロードマップ 2017 ～多様な高度自動運転システムの社会実装に向けて～,” 2017.

[2] 警察庁, “都道府県別交通信号機等ストック数,” 2016. [Online]. Available: https://www.npa.go.jp/bureau/traffic/seibi2/annzen-shisetu/hyoushiki-shingouki/pdf/H28kazu.pdf. [Accessed: 02- Jan- 2018].

[3] C. Ou, “A roadside unit-based localization scheme for vehicular ad hoc networks,” *International Journal of Communication Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 135-150, 2012.

[4] 警察庁, “平成 29 年中の交通事故の発生状況,” 2018.

[5] トヨタ自動車, “ITS Connect,” 2018. [Online]. Available: https://toyota.jp/technology/safety/itsconnect/. [Accessed: 26- Apr- 2018].

[6] Y. Gu, L. Hsu and S. Kamijo, “GNSS/Onboard Inertial Sensor Integration With the Aid of 3-D Building Map for Lane-Level Vehicle Self-Localization in Urban Canyon,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 4274-4287, 2016.

[7] F. de Ponte Muller, E. Diaz, and I. Rashdan, “Cooperative Infrastructure-Based Vehicle Positioning,” *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, 2016.

[8] C. Kwon and I. Hwang, “Constrained stochastic hybrid system modeling to road map - GPS integration for vehicle positioning,” *2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC)*, 2016.

[9] 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.

[10] Suhua Tang, Kiyoshi Saito, and Sadao Obana, “Transmission control for reliable pedestrian-to-vehicle communication by using context of pedestrians,” *in Proc. IEEE ICVES’15*, Nov. 2015, pp. 41-47.

[11] 山下 遼, 湯 素華, 小花 貞夫, “歩行者自己削減のための 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, 2018.

[12] Z. Yang, Z. Zhou, and Y. Liu, “From RSSI to CSI: Indoor Localization via Channel Response,” *ACM Computing Surveys*, vol. 46, no. 2, pp. 1-32, 2013.

[13] Richard B. Langley, “Dilution of precision,” *GPS World*, 1999.

[14] Dennis Milbert, “Improving dilution of precision: A companion measure of systematic effects,” *GPS World*, 2009.

[15] 警視庁, “平成 28 年調査　交通量統計表,” 2018. [Online]. Available: http://www.keishicho.metro.tokyo.jp/about_mpd/jokyo_tokei/tokei_jokyo/ryo.html. [Accessed: 11- May- 2018].

[16] Hastie, T., R. Tibshirani, and J. Friedman, “The Elements of Statistical Learning,” New York: Springer, 2001.

ⓒ2018 Information Processing Society of Japan