

電波強度を利用した歩行者位置推定精度向上 のためのフィルタリング手法の提案

西牧 佑哉¹ 岩井 誠人² 佐藤 健哉¹

概要：近年、スマートフォンやタブレット端末の位置情報を用いた様々なサービスが利用されている。また、知的交通システム (ITS: Intelligent Transport Systems) の研究が盛んに行われている。ここで、歩車間通信によって歩行者と車両が位置情報を交換することで交通事故を減らすことを考えた場合、お互いの正確な位置情報が必要となる。位置情報を取得する手法として最もよく利用されているのが GPS (Global Positioning System) である。しかし、都市部では GPS 信号が周囲の建物の影響を受けて、位置誤差が増大するという問題がある。本研究では、車両およびビーコンの電波強度を利用して、屋外の歩行者の位置推定精度を向上させる手法を提案する。提案手法では、電波強度にカルマンフィルタを適用し、伝搬損失指数を車車間通信を用いて動的に算出する。歩行者の位置はノードのフィルタリングを行った上で WCL (Weighted Centroid Localization) を用いて求める。シミュレータによって位置推定精度の評価を行い、提案手法の優位性を示した。

キーワード：屋外位置推定、歩車間通信、車車間通信、電波強度、伝搬損失指数、WCL

Proposal of Filtering Method for Improving Pedestrian Positioning Accuracy using Signal Strengths

1. はじめに

近年、自動車の安全性や運転手の快適性の向上を目的とした知的交通システム (ITS: Intelligent Transport Systems) の研究が盛んに行われている。例えば、車車間通信や歩車間通信を用いて、車両同士または車両と歩行者がお互いの位置情報や速度情報等を交換することによって交通事故を減らすといった取り組みがある [1], [2]。ここで、重要となるのがお互いの位置情報の精度である。位置情報を取得する手法として位置測位システムがあり、その中で最もよく利用されているのが GPS (Global Positioning System) である。しかし、GPS の測位精度は数 m から数十 m であり、都市部では GPS 信号が建物による遮断やマルチパスの影響を受けて、位置誤差がさらに増大するという問題がある。このように、GPS の精度は周囲の環境の影響を受けるため、安定した位置推定を行うことは難しい。また、歩行者は自身の位置推定に GPS を使用するが、車両は GPS

以外にもマップマッチングや車載カメラによる車線検出なども併せて利用できる [3], [4]。そのため、車両は歩行者に比べて高精度に自身の位置を推定することができる。したがって本研究では、都市部における屋外の歩行者の位置推定精度に焦点を当て、車両およびビーコンの電波強度を利用してその精度を向上させる手法を提案する。

2. 既存手法

2.1 GPS

GPS は、現在最もよく利用されている位置推定手法である。GPS 機能を備えた端末では、複数の衛星から送信された GPS 信号を受信することによって自身の位置を推定する。見通しが良い場所や周囲に高い建物がない場所では、見通し内で受信できる GPS 信号の数が多いため、位置誤差は小さい。一方、都市部では高層ビルが立ち並び、そのため、GPS 信号はそれらによる遮蔽や反射、回折の影響を受けて、位置誤差が 10[m] 以上にもなりうる [5]。

¹ 同志社大学大学院 理工学研究科 情報工学専攻

² 同志社大学大学院 理工学研究科 電気電子工学専攻

2.2 電波強度を利用した位置推定手法

2.2.1 電波強度と距離

スマートフォンやタブレット端末では、BLE (Bluetooth Low Energy) や Wi-Fi といったノードから発せられた電波を受信した際の電波強度を利用して、その端末の位置を推定することが可能である [6], [7]. この手法では、電波強度が距離に応じて減衰するという特性を利用して、送信元の位置情報および電波強度から推定した送信元までの距離情報を用いて対象の位置を推定する。電波強度から距離を推定するには、一般的に式 (1) が利用される。

$$P(d) = A - 10n \log_{10} d \quad (1)$$

ここで $P(d)$ は送信元から d [m] 離れた位置における電波強度 [dBm], A は送信元から 1 [m] 離れた位置における電波強度 [dBm], n は伝搬損失指数を表す。伝搬損失指数は自由空間では $n = 2$ となるが、実際には周囲の電波伝搬環境によって変化する。そのため、この値は動的に与えられるべきであるが、既存手法でそういったことは行われていない。また、電波強度はフェージングやシャドウイングの影響を受けて変動し、電波強度が小さいほどその変動は大きくなる。それらに起因する推定距離の誤差を小さくするために、平均した電波強度を利用したり、フィルタリングを適用したりすることが考えられている [6].

送信元の位置情報と電波強度から推定した距離情報を用いて、対象の位置を求める手法はいくつか存在するが、ここでは最小二乗法と WCL (Weighted Centroid Localization) について説明する。それぞれの位置が $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)$ である $m(m \geq 3)$ 個のノードがあり、各ノードと対象の距離が d_1, d_2, \dots, d_m である時の対象の位置 (x, y) を求める場合を考える。

2.2.2 最小二乗法

上記の状況から、式 (2) が得られる。これは式 (3) のように線形化すると、最小二乗法を使って式 (4) で表される近似的な解を求めることができる [8].

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 & = d_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 & = d_2^2 \\ \vdots & \\ (x_m - x)^2 + (y_m - y)^2 & = d_m^2 \end{cases} \quad (2)$$

$$AX = b \quad (3)$$

$$X = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (4)$$

$$A = \begin{pmatrix} 2(x_1 - x_m) & 2(y_1 - y_m) \\ 2(x_2 - x_m) & 2(y_2 - y_m) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{m-1} - x_m) & 2(y_{m-1} - y_m) \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$b = \begin{pmatrix} x_1^2 - x_m^2 + y_1^2 - y_m^2 - d_1^2 + d_m^2 \\ x_2^2 - x_m^2 + y_2^2 - y_m^2 - d_2^2 + d_m^2 \\ \vdots \\ x_{m-1}^2 - x_m^2 + y_{m-1}^2 - y_m^2 - d_{m-1}^2 + d_m^2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

2.2.3 WCL

WCL とは加重平均を位置推定に利用した手法である。重みには距離の逆数の累乗が用いられることが多い [9]. 各ノードの x 座標および y 座標を式 (7)(8) のように重み付けして平均することで対象の位置を求める。

$$x_w = \sum_{i=1}^m x_i w_i / \sum_{i=1}^m w_i \quad (7)$$

$$y_w = \sum_{i=1}^m y_i w_i / \sum_{i=1}^m w_i \quad (8)$$

$$w_i = \frac{1}{d_i^g} \quad (9)$$

3. 提案手法

3.1 概要

本研究では図 1 に示すように、道路脇に設置したビーコンおよび車両の電波強度を利用して歩行者の位置を推定する。車両は自身の車両情報を定期的に周囲に送信することを想定する。電波強度を利用した位置推定の精度を向上させるには、電波強度から距離を正確に求める必要がある。しかし、先述したように電波強度にはいくつか問題がある。そこで提案手法では、電波強度の変動を低減するためにフィルタリングを適用する。また、歩車間の距離を算出する際に使用する伝搬損失指数として、車車間通信を用いて算出した動的な値を利用する。歩行者の位置は、周辺ノード数の増加やノード位置の偏りに対応するためにノードのフィルタリングを行った上で WCL を用いて求める。

3.2 電波強度のフィルタリング

提案手法では、逐次的にフィルタリングが可能なカルマンフィルタを利用する。車両およびビーコンから歩行者が受信した電波強度の変動を小さくするためにカルマンフィルタを適用する。以下の式を用いてフィルタリングを行う。

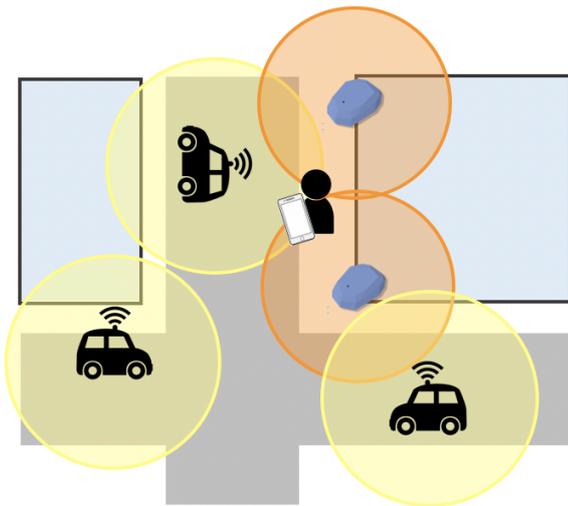


図 1 提案手法の概要

Fig. 1 Outline of proposal.

表 1 車両の電波強度に対するパラメータ

Table 1 Parameters for vehicle signal strength.

歩行者の状態	$\hat{P}(0)$	Q	R
静止	1000	4.0210	26.8549
移動	1000	3.8871	27.8656

表 2 ビーコンの電波強度に対するパラメータ

Table 2 Parameters for beacon signal strength.

歩行者の状態	$\hat{P}(0)$	Q	R
静止	1000	0.0129	22.5865
移動	1000	3.0541	21.2856

$$\hat{x}^-(k) = \hat{x}(k-1) \quad (10)$$

$$\hat{P}^-(k) = \hat{P}(k-1) + Q \quad (11)$$

$$g(k) = \frac{\hat{P}^-(k)}{\hat{P}^-(k) + R} \quad (12)$$

$$\hat{x}(k) = \hat{x}^-(k) + g(k)(y(k) - \hat{x}^-(k)) \quad (13)$$

$$\hat{P}(k) = (1 - g(k))\hat{P}^-(k) \quad (14)$$

ここで、 $\hat{x}^-(k)$ は事前推定値、 $\hat{x}(k)$ は事後推定値、 $\hat{P}^-(k)$ は事前誤差分散、 $\hat{P}(k)$ は事後誤差分散、 $y(k)$ は観測値、 $g(k)$ はカルマンゲイン、 Q はシステム雑音、 R は観測雑音を表す。 $\hat{P}(0), Q, R$ は表 1, 表 2 に示す値に設定した。これらの値は、シミュレーションによって得られた数値をもとに最尤法を使って事前に求める。

3.3 車車間通信を用いた動的な伝搬損失指数の算出

車両 k が m 台の周辺車両と車車間通信を行なっている時、車両 $i (1 \leq i \leq m)$ との伝搬損失指数は式 (1) を変形して得られる式 (15) を用いて求めることができる。ここで、 d_i は車両 k と車両 i の間のユークリッド距離を、 $P(d_i)$ は車両 k が受信した車両 i からの電波強度を表す。ある範囲内における伝搬損失指数を求めるために、閾値を $P.th$ と

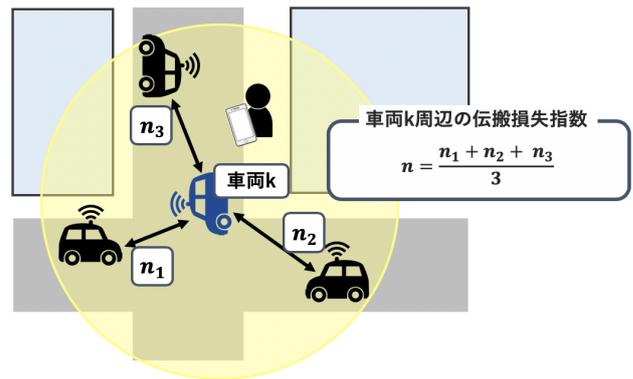


図 2 車車間通信を利用した伝搬損失指数の算出

Fig. 2 Calculation of path loss index using vehicle-to-vehicle communication.

して、 $P(d_i) > P.th$ を満たす電波強度を利用する。次に、式 (16) を用いて一定時間内に得られた周辺車両との伝搬損失指数の平均値を求め、その結果を車両 k 周辺の伝搬損失指数とする。図 2 に車車間通信を用いて伝搬損失指数を算出する様子を示す。

$$n_i = \frac{A - P(d_i)}{10 \log_{10} d_i} \quad (15)$$

$$n_k = \frac{\sum_{i=1}^m n_i}{m} \quad (i \neq k) \quad (16)$$

3.4 位置推定アルゴリズム

3.4.1 WCL

式 (7) ~ 式 (9) で表される WCL を用いて歩行者の位置を求める。最小二乗法に比べて WCL の方が距離誤差が推定位置に与える影響が小さいために、提案手法では WCL を採用した。また、伝搬損失指数に関してビーコンとの距離を求める際には $n = 2.0$ として、車両との距離を求める際には前節の動的な値を利用する。

3.4.2 ノードのフィルタリング

WCL は、位置を推定したい対象が電波の送信元である周辺ノードを各頂点とする図形内に存在する時に有用な手法である。しかし、本研究のような状況下では、周辺車両の台数によってノードの位置に偏りが生じやすい。WCL は周辺ノードの位置の加重平均を求めるため、ノードの位置に偏りがあると推定結果の誤差が大きくなる。そこで、提案手法では図 3 に示すようにノードのフィルタリングを行うことで WCL に適したノードを選択する。アルゴリズムの詳細手順を以下に述べる。

- (i) 歩行者の位置を原点として 4 つの象限に分ける。
- (ii) 各象限から順に歩行者との距離が最も近いノードを一つ取り出す。
- (iii) 各象限からその次に近いノードを一つ取り出す。

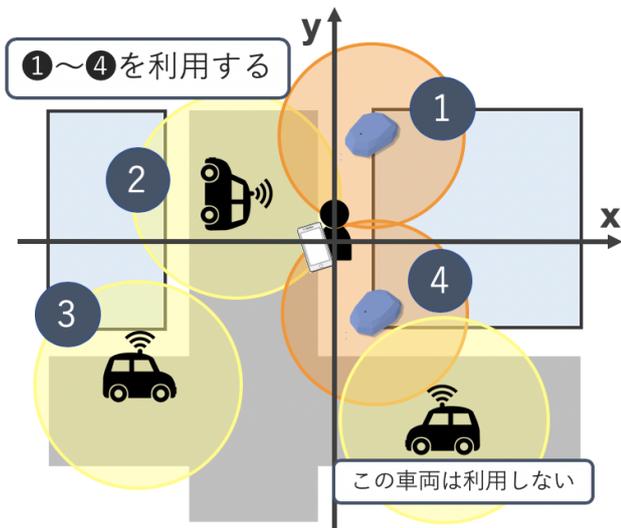


図 3 フィルタリングされたノード
Fig. 3 Filtered node information.

(iv) ノードを選べない象限が出るまで (iii) を繰り返す。

ノードを選べない象限が出た場合、各象限から一つ以上のノードを選択済みであれば、第一象限からノードを選べなかった象限の一つ前の象限までで最後に選択したノードは破棄する。すべてのノード情報を使って WCL を行った結果を歩行者の初期位置として、フィルタリングされたノード情報を使って再度 WCL を行った結果を最終的な歩行者の位置とする。

4. 評価と考察

4.1 シミュレーション環境

提案手法の性能評価にシミュレータとして Space-Time Engineering (STE) 社が開発したネットワークシミュレータである Scenargie2.1[10] を用いた。図 4 にシミュレーション環境を示す。本研究は、都市部における歩行者の位置推定精度の向上を目的としているため、歩行者の周囲が建物に囲まれている環境を用意した。道路と建物の間の白い部分が歩道であり、歩行者はその歩道上にいる。図 4 に示す上側の歩行者の位置を 20 [m] 下の歩行者の位置まで 5 [m] 間隔で変更して、計 5 回のシミュレーションを行い、それらの平均の位置誤差を評価する。

表 3 にシミュレーションで用いるパラメータを示す。モビリティモデルの GIS-BASED-RANDOM-WAYPOINT は、各車両がランダムに通過点を決定し、その通過点を走行するように道路に沿って移動していくモデルである。ITU-R P.1411 モデル [11] は、道路マップ情報を考慮した電波伝搬モデルであり、道路の形状に応じて電波が減衰するので、直接波と地面からの反射波のみを考慮したモデルより現実に近いモデルである。また、WCL に関してノードのフィルタリング時の初期位置を求める際は $g = 3$ 、フィ

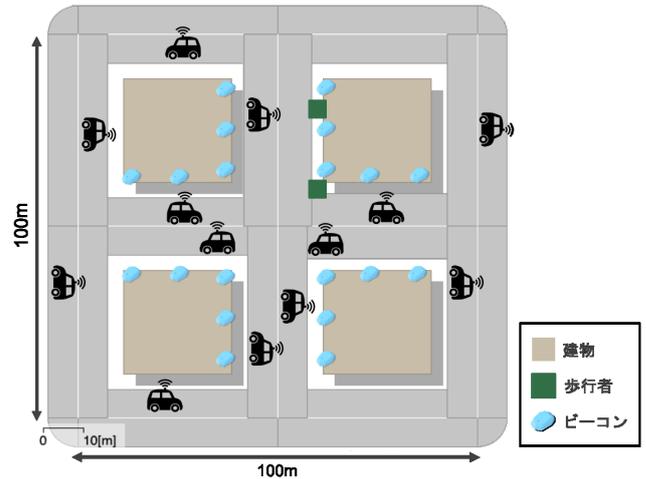


図 4 シミュレーション環境
Fig. 4 Simulation environment.

表 3 シミュレーションパラメータ
Table 3 Simulation parameters.

シミュレータ	Scenargie2.1	
シミュレーション時間	20 [s]	
ビーコン間隔	10 [m]	
車両台数	80 [台]	
モビリティモデル	GIS-BASED-RANDOM-WAYPOINT	
車両速度	50 [km/h]	
歩行者速度	0 [m/s]	
位置推定間隔	500 [ms]	
	ビーコン	車両
使用周波数	2.4 [GHz]	760 [MHz]
送信間隔	500 [ms]	100 [ms]
送信電力	-21 [dBm]	19.2 [dBm]
P_{th}	-50 [dBm]	
電波伝搬モデル	ITU-R P.1411	
フェージングモデル	Rayleigh	

ルタリング後に最終的な歩行者の位置を求める際は $g = 2$ とした。これは、フィルタリング後に比べて初期位置を求める際は距離誤差の大きいノード情報が多く、その影響を小さくするためである。

4.2 評価項目

提案手法の評価として、既存手法との位置誤差における比較を行う。比較対象とする既存手法は以下のように定義する。

- GPS
- 最小二乗法 1
位置推定アルゴリズムとして最小二乗法を用いたもの。電波強度のフィルタリング、動的な伝搬損失指数、ノードのフィルタリングは適用しない。
- 最小二乗法 2
位置推定アルゴリズムとして最小二乗法を用いたもの。

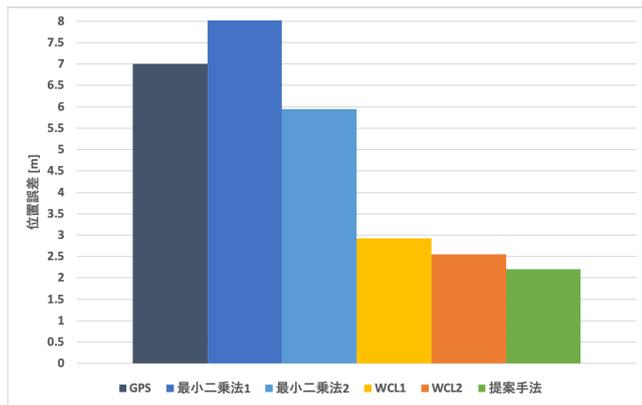


図 5 平均位置誤差

Fig. 5 Average position errors.

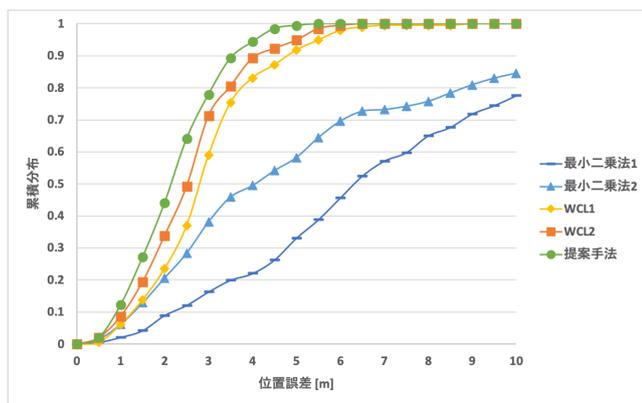


図 6 位置誤差の累積分布

Fig. 6 Cumulative distribution of position errors.

の、電波強度のフィルタリング、動的な伝搬損失指数のみ適用する。

● WCL1

位置推定アルゴリズムとして WCL を用いたもの。電波強度のフィルタリング、動的な伝搬損失指数、ノードのフィルタリングは適用しない。

● WCL2

位置推定アルゴリズムとして WCL を用いたもの。電波強度のフィルタリング、動的な伝搬損失指数のみ適用する。

また、車両台数、車両速度、車両の位置誤差を変化させてシミュレーションを行い、それらの提案手法に与える影響についても評価する。

4.3 評価結果

4.3.1 既存手法との位置誤差の比較

シミュレーションした結果を図 5, 図 6, 表 4 に示す。車両台数は 80 台、車両速度はすべて 50 [km/h] で、車両の位置に誤差は含まれないものとしている。GPS の位置誤差に関しては、シミュレータ上で測定することが難しかったため、参考文献 [5] を参考に 7 [m] とした。また、表 4

表 4 位置誤差に関する代表値

Table 4 Typical values for position errors.

	平均値 [m]	標準偏差 [m]	最大値 [m]	最小値 [m]
GPS	7	-	-	-
最小二乗法 1	8.28	8.74	94.56	0.39
最小二乗法 2	5.94	5.96	38.52	0.34
WCL1	2.92	1.35	8.95	0.36
WCL2	2.56	1.18	6.37	0.36
提案手法	2.21	1.02	5.37	0.26

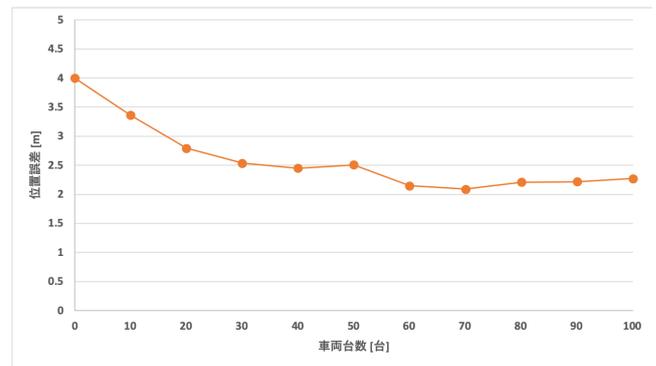


図 7 車両台数の増加に伴う歩行者の位置誤差の変化

Fig. 7 Changes in pedestrian position error with increasing number of vehicles.

の値はそれぞれ少数第三位を四捨五入したものである。提案手法の平均位置誤差、最大位置誤差、最小位置誤差が最も小さくなっていることや、収束速度もはやいことから提案手法が既存手法よりも有効であることがわかる。提案手法と WCL2 の結果より、WCL2 の手法に加えてノードのフィルタリングを行っている提案手法はより高精度で安定した位置推定を行うことができている。また、最小二乗法 1 より最小二乗法 2 の、WCL1 より WCL2 の位置誤差が小さくなっている。これは電波強度のフィルタリングおよび動的な伝搬損失指数の利用によって距離誤差が、ビーコンでは約 2.38 [m] から約 1.30 [m] に、車両では約 14.59 [m] から約 10.64 [m] に小さくなったためである。

4.3.2 車両台数の影響

車両速度はすべて 50 [km/h] で車両の位置に誤差は含まれないものとして、車両台数を変化させてシミュレーションした結果を図 7 に示す。車両台数が増加すると位置推定に利用できる情報が増えるため、車両台数の増加に伴って位置誤差は減少しているが、80 台以上では横ばいとなっている。そのため、シミュレーション環境においては 80 台以上の車両が存在すれば十分であることがわかる。80 台以上で位置誤差が減少しない原因は、WCL によるものである。WCL では歩行者の周辺ノード位置の加重平均を求め、歩行者が周辺ノードを各頂点とする長方形の中心にいる時に最も高精度で位置を求められるが、実際はそういった状況にならないことが多い。そのため、各ノードまでの推定距離に誤差がなく、ノードのフィルタリングに

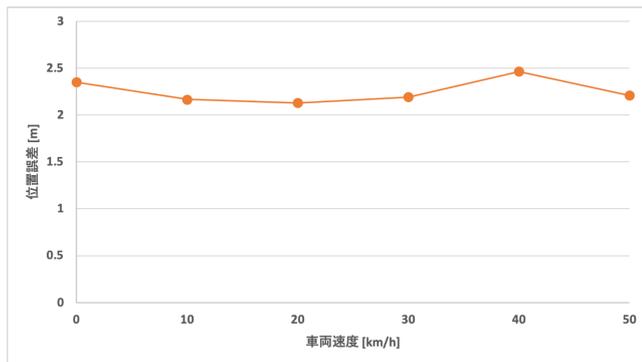


図 8 車両速度の増加に伴う歩行者の位置誤差の変化

Fig. 8 Changes in pedestrian's position error with increasing vehicle's speed.

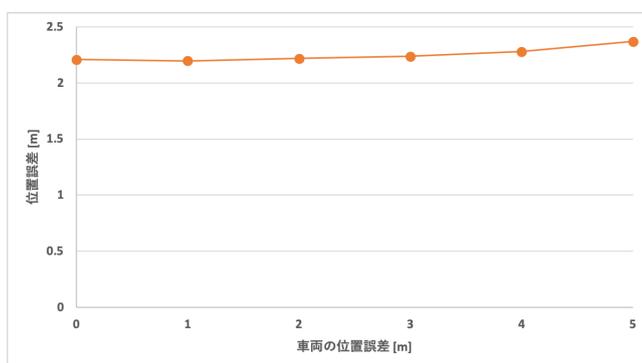


図 9 車両の位置誤差の増加に伴う歩行者の位置誤差の変化

Fig. 9 Changes in pedestrian's position error with increasing vehicle's position error.

よって最適なノードを選択できる条件でシミュレーションを行っても、約 1.74 [m] の位置誤差が生じる。

4.3.3 車両速度の影響

車両台数は 80 台で車両の位置に誤差は含まれないものとして、車両速度を変化させてシミュレーションした結果を図 8 に示す。位置誤差は最大で約 2.46 [m]、最小で約 2.13 [m] であるが、車両速度の増加に伴う位置誤差の変化に有意差は見られない。そのため、提案手法において車両速度の影響は無視できるものである。

4.3.4 車両の位置誤差の影響

車両台数は 80 台で車両速度はすべて 50 [km/h] としてシミュレーションした結果を図 9 に示す。車両の位置に対しては、一様分布で誤差を加えている。例えば、誤差 1 [m] の場合は、横方向と縦方向それぞれに $1/\sqrt{2}$ [m] の誤差が一様分布で加わる。図 9 より、提案手法では車両の位置誤差の増加に伴って歩行者の位置誤差が増加する。しかし、車両の位置誤差が 3 [m] 以下の場合、位置誤差の差は最大 4 [cm] であり、参考文献 [3], [4] によると、車両の位置誤差は最大でも 3 [m] であることから提案手法において車両の位置誤差は無視できる範囲内である。

5. おわりに

位置情報を取得する手法として現在最もよく利用されている GPS には、都市部で位置誤差が大きくなるという問題がある。そこで、位置推定精度を向上させるために、車両およびビーコンの電波強度を用いた位置推定手法を提案した。電波強度を利用する際には電波強度の変動、伝搬損失指数の値の設定が問題となるが、提案手法ではカルマンフィルタを適用することで電波強度の変動を小さくし、伝搬損失指数については車車間通信を用いることで周囲の電波伝搬環境に動的に対応し、これらの問題点を改善した。位置推定アルゴリズムでは、ノードのフィルタリングを行った上で WCL を行うことでさらなる精度向上を目指した。シミュレータを用いて既存手法と提案手法の位置誤差の比較評価を行い、評価結果から提案手法によって位置誤差が小さくなることが示された。また、様々な条件でシミュレーションを行うことで、80 台以上の車両がシミュレーション環境では必要であり、車両速度や車両の位置誤差の影響は提案手法において無視できることが確認できた。

参考文献

- [1] Anaya, J. J., Merdrignac, P., Shagdar, O., Nashashibi, F. and Naranjo, J. E.: Vehicle to pedestrian communications for protection of vulnerable road users, *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*, pp. 1037–1042 (online), DOI: 10.1109/IVS.2014.6856553 (2014).
- [2] 岡本広大, 屋代智之: 2.4GHz 帯と 700MHz 帯を用いた車両対歩行者事故回避システムの提案, 技術報告 7, 千葉工業大学, 千葉工業大学 (2013).
- [3] Suhr, J. K., Jang, J., Min, D. and Jung, H. G.: Sensor Fusion-Based Low-Cost Vehicle Localization System for Complex Urban Environments, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 18, No. 5, pp. 1078–1086 (online), DOI: 10.1109/TITS.2016.2595618 (2017).
- [4] Gu, Y., Hsu, L.-T. and Kamijo, S.: Passive sensor integration for vehicle self-localization in urban traffic environment, *Sensors (Basel)*, Vol. 15, No. 12, pp. 30199–30220 (2015).
- [5] Krista, M. and Pete, B.: Smartphone GPS accuracy study in an urban environment, *PLOS ONE*, Vol. 14, No. 7, pp. 1–19 (online), DOI: 10.1371/journal.pone.0219890 (2019).
- [6] Xue, W., Qiu, W., Hua, X. and Yu, K.: Improved Wi-Fi RSSI Measurement for Indoor Localization, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 17, No. 7, pp. 2224–2230 (online), DOI: 10.1109/JSEN.2017.2660522 (2017).
- [7] Varshney, V., Goel, R. K. and Qadeer, M. A.: Indoor positioning system using Wi-Fi & Bluetooth Low Energy technology, *2016 Thirteenth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*, pp. 1–6 (online), DOI: 10.1109/WOCN.2016.7759023 (2016).
- [8] Guoquan, L., Enxu, G., Zhouyang, Y., Yongjun, X., Jinzhao, L. and Yu, P.: Indoor Positioning Algorithm Based on the Improved RSSI Distance Model, *Sensors*, Vol. 18, p. 2820 (online), DOI: 10.3390/s18092820

- (2018).
- [9] Subedi, S., Kwon, G.-R., Shin, S., seung Hwang, S. and Pyun, J.-Y.: Beacon based indoor positioning system using weighted centroid localization approach, *2016 Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pp. 1016–1019 (online), DOI: 10.1109/ICUFN.2016.7536951 (2016).
 - [10] Space-Time Engineering: Scenargie, (online), available from <https://www.spacetime-eng.com/jp/> (accessed 2019-10-26).
 - [11] P Series: Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Short-Range Outdoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 300 MHz to 100 GHz, (online), available from https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1411-9-201706-I!!PDF-E.pdf (accessed 2019-10-26).