

# 運転者に対する交通安全支援のための指向性アンテナ および車車間通信を用いた歩行者の位置推定手法

木谷 友哉<sup>1,a)</sup> 澤 悠太<sup>2</sup> 柴田 直樹<sup>2</sup> 安本 慶一<sup>2</sup> 伊藤 実<sup>2</sup>

**概要:** 本論文では、歩行者の交通安全支援を行うことを目的として、歩行者位置計測装置を搭載した複数車両の通信による協調による歩行者位置推定手法を提案する。提案手法では、歩行者が定期的に発する固有 ID を持つビーコンを車載の指向性アンテナを用いて受信し、それから歩行者までの距離および方向を測定する。測定値には誤差があるため、車車間通信により各車両が測定した歩行者の位置情報を他車両と交換し、複数の測定データからベイズ推定を用いて歩行者位置を推定することで精度の向上を図る。ネットワークシミュレータを用いた計算機シミュレーションにより、単独では誤差約 13 メートルの推定精度だった場合には、周囲の 12 台の車両と協調することで約 2 メートルにまで向上させられることが分った。

**キーワード:** ベイズ推定, 指向性アンテナ, 車車間通信ネットワーク (VANET), 歩行者位置推定, 交差点交通安全

## A Pedestrian Position Estimation using Inter-Vehicle Communication with Directional Antennas

TOMOYA KITANI<sup>1,a)</sup> YUTA SAWA<sup>2</sup> NAOKI SHIBATA<sup>2</sup> KEIICHI YASUMOTO<sup>2</sup> MINORU ITO<sup>2</sup>

**Abstract:** In this paper, we propose a method for detecting positions of a pedestrian by cooperation of multiple cars with directional antennas and inter-vehicle communication in order to support drivers for pedestrian safety. In our method, each pedestrian periodically broadcasts a beacon, and each car receives the beacon and measures the distance and the angle of arrival from the pedestrian with a directional antenna. The method has the cars exchange measured data one another and let them improve the estimate accuracy of the position of the pedestrian with the exchanged data. Through computer simulation, we have confirmed that the error of the position estimation of a target pedestrian is about 2 meters with 12 cooperating neighbor cars whereas that is about 13 meters without cooperating.

**Keywords:** Bayesian estimation, directional antenna, vehicular ad hoc network (VANET), pedestrian position estimation, intersection safety

### 1. はじめに

我が国では、年々交通事故死亡者総数は減少しているが、歩行者や二輪車の死者数について着目すると微減するに留

まっております [1]、現在各自動車メーカーを中心として一歩進んだ交通安全支援を目的とした歩行者および二輪車検知システムの開発が進められている。それらのシステムでは、各車両に搭載されているセンサを用いて車両周辺の歩行者検知を行う方法 [2], [3] や、歩行者および車両が自位置や走行速度等のプローブ情報を路側に設置されたサーバに送信し、サーバが歩行者と車両の位置関係を各車両に通知する方法 [4] が採用されている。しかし、前者では各センサの死角や誤差に起因する問題が、後者では交差点ごとにサー

<sup>1</sup> 静岡大学 大学院情報学研究科  
Graduate School of Informatics, Shizuoka University, Hamamatsu 432-8011 Japan

<sup>2</sup> 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科  
Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, Ikoma, Nara, 630-0192 Japan

a) t-kitani@ieee.org

バを設置するための導入コストの問題が発生している。

本研究では、センシングデバイスを搭載した複数車両が車車間通信を用いることで安価にかつ高精度で歩行者位置を検出する手法を提案する。既存のシステムでは、車載センサで検知した結果は検知した車両のみで使用されるため、センサの死角に存在する歩行者を検知できず、測定誤差が大きければ信頼性のない検知結果になってしまう。そこで、車載センサの死角の解消を図り、測定誤差を低減するために車車間通信を用いて車両間の協調し、センシングしたデータを統合することでセンシングの精度を高める。この手法では、交差点ごとにセンサを設置する必要がなくシステム導入コストの抑制が期待できる。

提案手法では、各車両において歩行者の発するビーコン電波から歩行者と車両間の距離を測定するとともに指向性アンテナによりビーコン電波の到来角度を測定する。これら測定情報およびGPSにおける各車両の測位情報には誤差が含まれる。そこで、これらの誤差が正規分布に従うと仮定し、方向および距離の情報を用いて地図上の各地点における歩行者の位置を最尤法を用いて推定する。

次に、その推定精度を向上させるために各車両の測定結果を、車車間通信により他の車両と交換する。複数の車両が測定した歩行者のセンシング情報から歩行者位置の推定を行うことで精度の向上を図る。また、時系列の推定情報からさらなる位置推定精度の向上を図る。

提案手法を計算機上に実装し、ネットワークシミュレータ QualNet [5] を用いて、周辺に建物のある見通しの悪い交差点における、歩行者の発するビーコンと車車間通信で交換されるパケットの受信率、および、それをもとにした歩行者位置推定精度を測定し、提案手法の有効性を示す。

## 2. 関連研究

複数車両が協調し運転者に対して安全支援を行うシステムは、現在、各自動車メーカーや研究者の間で研究がなされている。文献 [3], [4] では歩行者を対象とした危険回避システムが提案されている。文献 [3] のシステムでは、車両からプローブ情報を歩行者に送信し、歩行者側において危険判断を行い、必要であれば自ら位置情報を運転者に対して送信する。文献 [4] のシステムでは、歩行者が自位置や走行速度等のプローブ情報をサーバに送信した後、車両についても同様に自車両の位置や走行速度等のプローブ情報をサーバに送信し、サーバにて歩行者と車両の位置関係を明らかにし、注意喚起が必要と判断された場合に、サーバより車両に対して歩行者の情報が送信される。前者では、歩行者は自ら情報を送信するための機器を装備する必要があり、歩行者の負担が大きくなってしまいう問題が存在する。後者では、車両からは見えない歩行者について危険判断が可能となるが、サーバ等のインフラの設置費用が必要、遅延時間が大きい等の問題が存在する。

## 3. 提案する歩行者安全支援システム

### 3.1 歩行者検知の対象場面

警察庁の統計 [1] によると、交通事故の 74.6% が交差点で発生しており、そのうち 43.5% が市街地の交差点で発生している。また、歩行者が死亡した交通事故において、25% が歩行者の車道への飛び出しが原因となっている。一方、自動車安全運転センターの調査研究 [6] によると、運転者のブレーキ操作開始のタイミングについて、事前に歩行者横断情報が提供されている場合とされていない場合と比較すると、情報提供がある場合の方が 1 秒程度早まるということが分かっている。

これらのことから、車道を横断する可能性がある歩行者の情報を事前に運転者に対して提供することができれば、歩行者の交通事故死傷者数を抑制することができると考えられる。以上の議論より、本研究では、歩行者位置検知の対象場面として、「車両密度および歩行者密度が高く見通しの悪い交差点」を想定する。

### 3.2 システムが満たすべき制約

車両が危険を認識し停止操作を行ってから実際に停止するまでに、車両は空走距離と制動距離と呼ばれる距離の和(停止距離と呼ばれる)だけ走行する。事前に運転者に対して歩行者位置を通知し交通事故を防ぐためには、自動車と歩行者の距離が停止距離以内になる前に歩行者位置の推定を完了する必要がある。本研究では、文献 [7] に示される以下の式を用いて空走距離  $d_{free}$  および制動距離  $d_{braking}$  を算出する。

$$d_{limit} = d_{braking} + d_{free} = \frac{(v/3.6)^2}{254 \cdot \mu} + t_{recognize} \cdot v \quad (1)$$

ここで、 $v$  は車両の走行速度を、 $\mu$  は道路の摩擦抵抗値を表す。また、 $t_{recognize}$  は運転者の反応速度を表し、一般的に 2 秒程度となる [7]。実用的な危険通知システムでは、歩行者から以下の制約距離  $d_{limit}$  以上離れた位置にて歩行者位置の推定を完了させなければならない。

### 3.3 提案するシステム

本論文で提案するシステムでは、車両が指向性アンテナを用いて歩行者の周期的に発信したビーコンを受信し、その測定情報を元に歩行者の位置を推定・検知する。また、車車間通信を通じて車両間で測定情報を交換し、複数の車両が測定した情報から歩行者の位置を推定することで推定精度の向上を図る。さらに、時系列で得られた推定情報を元に、さらなる推定精度の向上を図り、交通安全支援として十分な精度の達成を目指す。

#### 3.3.1 想定装備

各歩行者は、ビーコンを送信する無線通信機器を装備するとする。

各車両は指向性アンテナを搭載し、それによって歩行者から受信したビーコンから、歩行者のまでの距離と到来角を推定できるとする。また、車車間通信を行うために無指向性の無線通信装置も搭載する。それを用いて、パケットをブロードキャストし、車車間でシングルホップの通信を行う。各車両は GPS レシーバを装備し、自位置の推定および GPS の正確な時計を利用できるとする。さらに、十分な空き容量の HDD を持つ車載コンピュータを装備する。それには、道路形状を把握可能な地図データが搭載されており、利用できるものとする。

### 3.3.2 歩行者の動作

歩行者  $p$  は  $t_b$  間隔でビーコンを周囲にブロードキャストする。この歩行者ビーコンは、 $pkt_p(id_p, ts)$  で表され、 $p$  の ID  $id_p$ 、ビーコン送信時のタイムスタンプ  $ts$  を含む。

### 3.3.3 車両の動作

車両  $c$  は、歩行者ビーコン  $pkt_p(id_p, ts)$  を指向性アンテナで受信したとき、アンテナから受信電波強度と電波到来角  $\tilde{\theta}$  を得る。また、その測定した受信電波強度から文献 [8] のような手法を利用して歩行者までの距離の推定値が導けるとし、その距離を測定距離  $\tilde{d}$  とする。車両  $c$  は、そのビーコンを受信した時刻  $t$  ( $t$  は  $ts$  の直後であり、 $t \simeq ts$ ) における自車の位置  $(\tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$  を車載 GPS により測位する。車両はこの 6 つ組の情報  $(\tilde{x}_c, \tilde{y}_c, id_p, \tilde{d}, \tilde{\theta}, ts)$  から歩行者の位置を推定する。

車両は  $t_c$  間隔でパケットを周囲の車両に送信し、自身が測定した歩行者の情報を知らせる。ここで、車両のパケット送信間隔  $t_c$  は歩行者ビーコンの送信間隔  $t_b$  以下とする ( $t_c \leq t_b$ )。直近  $t_b$  間に歩行者ビーコンを受信していない場合は、このパケットは送信しない。車両パケットは、自車両の ID  $id_c$  を上記の測定結果の 6 つ組に付加して、 $pkt_c(id_c, \tilde{x}_c, \tilde{y}_c, id_p, \tilde{d}, \tilde{\theta}, ts)$  で表す。なお、複数の歩行者ビーコンを受信した場合は、それぞれについて車両パケットを生成し、送信することができる。ここでは、トラヒックを増大させないために、各歩行者について直近  $t_c$  間に受信したビーコンのうち最新のものから作成された車両パケットのみを送信する。また、歩行者検知の対象エリアは想定する無線到達範囲と比較して大きくないため、他車両が生成した車両パケットは中継しない。歩行者が多数いる交差点では、事故が起りやすい状態にない歩行者をフィルタリングするなどの考慮が必要であり、今後の課題とする。

最終的に、車両は時間  $t_c$  毎に、自車が受信した歩行者ビーコンの測定情報、および、直前  $t_b$  間に受信した車両パケットに含まれる情報から、歩行者が存在する尤度分布を求め、歩行者位置を推定する。

## 4. 提案システムにおける歩行者位置推定

本章では、提案するシステムで用いる歩行者位置の推定手法について説明する。

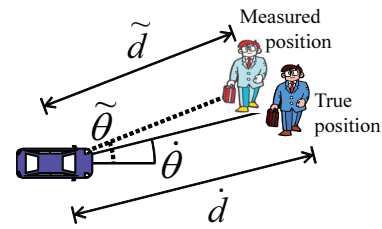


図 1 車載の指向性アンテナによる歩行者ビーコンの測定

本文中では次の表記を用いて説明を行う。 $\hat{x}$  は  $x$  の測定値、 $\dot{x}$  は  $x$  の真の値、 $\hat{x}$  は  $x$  の推定値をそれぞれ表す。

### 4.1 測定誤差の仮定

提案システムでは、各車両は以下の 3 つの値を測定する。

- 指向性アンテナで測定した歩行者までの距離  $\tilde{d}$
- 指向性アンテナで測定した歩行者への角度  $\tilde{\theta}$
- 車載 GPS によって測定した自車位置  $(\tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$

ここでは、それぞれについて正規分布に基づいた誤差があるとするとする。

本小節では以降、各測定値の誤差と測定値がとる確率密度関数について述べる。

#### 4.1.1 歩行者までの距離 (指向性アンテナ)

本研究で使用する車載された指向性アンテナが測定した歩行者までの距離についてのモデルを説明する。

図 1 に示すように、車両がある歩行者からビーコンを受信し、その歩行者までの距離  $\tilde{d}$  が測定できるとする。ここでは、この測定距離の誤差が正規分布に従うと仮定する。また、障害物による遮蔽や構造物による電波の反射の影響はその誤差に含まれるものとする。この車両歩行者間の真の距離が  $\dot{d}$  のとき、測定値が  $d$  を取る確率密度関数  $f_D(d|\dot{d})$  は以下の式で表される。

$$f_D(d|\dot{d}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{d-\dot{d}}{\sigma_d}\right)^2} \quad (2)$$

ここで  $\sigma_d$  は指向性アンテナが測定する距離の誤差の標準偏差であり、これは測定対象までの真の距離  $\dot{d}$  に比例するとし、係数  $\alpha_d$  を用いて、 $\sigma_d = \alpha_d \cdot \dot{d}$  と与える。例えば、 $\alpha_d = 0.3$  であると、正規分布の統計的意味から、測定値は真値の 0.7 から 1.3 倍の範囲に約 68% の確率で、0.4 から 1.6 倍の範囲に約 95% の確率で入る。

#### 4.1.2 歩行者への角度 (指向性アンテナ)

次に、車載する指向性アンテナが測定した歩行者ビーコンの到来角についてのモデルを説明する。

ある車両に対して、歩行者が  $\theta$  の角度に位置するとき、その車両が測定した歩行者からのビーコンの到来角が  $\theta$  となる確率密度関数  $f_\Theta(\theta|\dot{\theta})$  を考える。誤差の仮定より測定値  $\theta$  は真値  $\dot{\theta}$  を中心とした正規分布に従う。 $\theta$  は方位角であるため  $f_\Theta(\theta|\dot{\theta}) = f_\Theta(\theta + 2\pi n|\dot{\theta})$  ( $n$  は整数) となり、厳密には測定値の分布は切断正規分布となるが、ここでは正規分布で近似する。ゆえに、

$$f_{\Theta}(\theta|\dot{\theta}) \simeq \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\theta}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\theta-\dot{\theta}}{\sigma_{\theta}}\right)^2}. \quad (3)$$

$\sigma_{\theta}$  は車載アンテナが測定する到来角の誤差の標準偏差であり、指向性アンテナの特性を基に、例えば6度のように与える。

#### 4.1.3 車両の位置 (GPS)

一般的なカーナビゲーションシステムでは、マップマッチングにより進行方向に直角な方向のずれは補正される。そこで本稿では、車両位置の真値を中心として、進行方向にのみ標準偏差  $\sigma_g$  の正規分布に従う誤差が発生すると仮定する。

各車両の GPS 測位結果の真の位置からの誤差が標準偏差  $\sigma_g$  の正規分布で表され、進行方向が  $\dot{\phi}$  である路上の位置  $(\tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$  に車両がいるとき、GPS による測位結果が  $(x_c, y_c)$  となる確率密度は以下のように表される。

$$f_G(x_c, y_c | \tilde{x}_c, \tilde{y}_c) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_g} e^{-\frac{1}{2}\frac{(x_c-\tilde{x}_c)^2+(y_c-\tilde{y}_c)^2}{\sigma_g^2}} & (\tan^{-1}\frac{y_c-\tilde{y}_c}{x_c-\tilde{x}_c} = \dot{\phi}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4)$$

なお、任意の道路上の位置  $(x, y)$  における進行方向  $\phi$  は、車載された地図データより一意に求められるとする。

#### 4.2 ベイズ推定を用いた歩行者位置の推定手法

提案手法では、あらかじめ分かっている各測定値の誤差の分布から、ベイズ推定を用いて歩行者の位置を推定する。本節では、単一の歩行者ビーコン測定結果から歩行者の位置を推定するための尤度関数の設計について述べる。また、計算量を削減するための方策についても説明する。

##### 4.2.1 単一の歩行者ビーコン測定結果からの位置推定

車両  $c$  が、指向性アンテナを用いて歩行者  $p$  から歩行者ビーコン  $pkt_p(id_p, ts)$  を受信し、その受信強度と到来角から  $p$  までの距離  $\tilde{d}$  と角度  $\tilde{\theta}$  を測定したとする。また、その受信時刻  $t$  ( $t \simeq ts$ ) における  $c$  の GPS 測位位置を  $(\tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$  とする。このとき、 $p$  が位置  $(x, y)$  に存在する尤度  $L(x, y | \tilde{d}, \tilde{\theta}, \tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$  を求め、最尤法による最尤推定量  $(\hat{x}, \hat{y})$  を歩行者の推定位置とする。

一般に、測定値  $\tilde{x}$  から真値  $\hat{x}$  を推定するための尤度関数  $L(\hat{x}|\tilde{x})$  は、真値が与えられたときにその測定値が得られる確率密度関数  $f(\tilde{x}|\hat{x})$  を用いて以下のように定義される。

$$L(\hat{x}|\tilde{x}) = f(\tilde{x}|\hat{x}) \quad (5)$$

そこで、歩行者位置の真値  $(\hat{x}_p, \hat{y}_p)$  が与えられたときに、測定値が  $(\tilde{d}, \tilde{\theta}, \tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$  となる確率密度関数を求め、それを用いて尤度関数を定義する。

まず、GPS による測位誤差がない場合を考える。歩行者位置の真値  $(\hat{x}_p, \hat{y}_p)$  と自車両の位置  $(\tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$  ( $= (\hat{x}_c, \hat{y}_c)$ )

が与えられたとき、歩行者までの距離の真値は  $\hat{d} = \sqrt{(\hat{x}_p - \tilde{x}_c)^2 + (\hat{y}_p - \tilde{y}_c)^2}$ 、角度の真値は  $\hat{\theta} = \tan^{-1} \frac{\hat{y}_p - \tilde{y}_c}{\hat{x}_p - \tilde{x}_c}$  で得られる。ここで測定値  $d, \theta$  は独立であるため、同時にその値が得られる確率は式 (2)、式 (3) の積となる。以上より、測定した歩行者までの距離が  $d$ 、角度が  $\theta$  となる確率密度  $f_{D\Theta}(d, \theta | \hat{x}_p, \hat{y}_p, \tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$  は、

$$f_{D\Theta}(d, \theta | \hat{x}_p, \hat{y}_p, \tilde{x}_c, \tilde{y}_c) = f_D(d|\hat{d})f_{\Theta}(\theta|\hat{\theta}) \quad (6)$$

となる。

次に、GPS の測位結果に誤差がある場合を考える。自車両の位置の GPS の測位結果  $(\tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$  が真の位置  $(\hat{x}_c, \hat{y}_c)$  からずれている場合、自車両の測位結果  $(\tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$  は式 (4) に従う。この  $(\tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$  の分布は、式 (6) の事前分布となり、そのとき測定した歩行者までの距離が  $d$ 、角度が  $\theta$  となる確率密度  $f_{D\Theta G}(d, \theta | \hat{x}_p, \hat{y}_p, \tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$  は、その事後確率として以下のように求められる。

$$f_{D\Theta G}(d, \theta | \hat{x}_p, \hat{y}_p, \tilde{x}_c, \tilde{y}_c) = \int \int f_{D\Theta}(d, \theta | \hat{x}_p, \hat{y}_p, \tilde{x}_c, \tilde{y}_c) f_G(\tilde{x}_c, \tilde{y}_c | \hat{x}_c, \hat{y}_c) d\tilde{x}_c d\tilde{y}_c$$

以上の確率密度関数を用いて尤度関数を設計する。まず、自車位置の GPS 測位値  $(\tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$  が得られたときに、自車の真の位置が  $(x_c, y_c)$  である尤度は、

$$L_G(x_c, y_c | \tilde{x}_c, \tilde{y}_c) = f_G(\tilde{x}_c, \tilde{y}_c | x_c, y_c)$$

と定義できる。また、自車位置  $(x_c, y_c)$  と歩行者までの距離と角度の測定値がそれぞれ  $\tilde{d}, \tilde{\theta}$  が得られたとき、歩行者の位置が  $(x, y)$  である尤度は、

$$L_{D\Theta}(x, y | \tilde{d}, \tilde{\theta}, x_c, y_c) = f_{D\Theta}(\tilde{d}, \tilde{\theta} | x, y, x_c, y_c)$$

と定義できる。よって、測定値として  $\tilde{d}, \tilde{\theta}, (\tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$  が得られたときに、歩行者の位置が  $(x, y)$  である尤度関数は以下のように定義できる。

$$L_{D\Theta G}(x, y | \tilde{d}, \tilde{\theta}, \tilde{x}_c, \tilde{y}_c) = \int \int L_{D\Theta}(x, y | \tilde{d}, \tilde{\theta}, x_c, y_c) L_G(x_c, y_c | \tilde{x}_c, \tilde{y}_c) dx_c dy_c \quad (7)$$

このようにして求めた尤度関数から、歩行者の推定位置  $(\hat{x}, \hat{y})$  を最尤法による最尤推定量として得る。

##### 4.2.2 対象エリアのグリッドへの分割

歩行者位置の推定に関する計算では、式 (4) や式 (7)、式 (??) に示したように、場合分けや積分、極大値算出の処理が必要となる。計算量を減らすために、歩行者検知の対象エリアをグリッドに分割し、各グリッド毎に歩行者の存在尤度を求める。

3.2 節で述べたように歩行者位置検知を行う上での許容される誤差は高々1メートルである。そこで、本稿で用いる手法では、対象エリアを縦横それぞれ1メートルのグリッド状に分割し、各グリッドの中心  $(x, y)$  に対する式

(7) の値をそのグリッドに歩行者が存在する尤度として導出する。なお、グリッドに分割される対象エリアは、対象交差点と自車の無線到達範囲の共通部分が含まれていれば良く、高々  $100 \times 100$  グリッド程度である。

### 4.3 車両間の協調による推定精度の向上

#### 4.3.1 複数車両での測定による推定精度の向上

本項では、車車間通信によって他車両から受信した車両パケットの情報を利用して、位置の推定精度を高める方法を説明する。

提案手法では、車両  $c$  は、自車が測定した歩行者  $p$  の情報  $pkt_c(id_c, \tilde{x}, \tilde{y}, id_p, \tilde{d}, \tilde{\theta}, ts)$  を  $t_c$  秒間隔で周囲の車両に送信する。各車両は、歩行者ビーコンの送信間隔である  $t_b$  秒間に他車から受信した車両パケットからの情報を利用して、歩行者位置の推定精度の向上を図る。歩行者位置の推定精度を上げるために同時に利用されるデータは、同じ歩行者 ID と同じタイムスタンプを持つものである。なお、タイムスタンプ  $ts$  が、現在時刻より  $t_b$  以上古いデータは破棄する。

自車両が受信した歩行者ビーコン  $pkt_p(id_p, ts)$  から測定した  $\tilde{d}_0, \tilde{\theta}_0, (\tilde{x}_0, \tilde{y}_0)$  と他車両から受信した  $m$  個の車両パケット  $pkt_c(id_{c_i}, \tilde{x}_i, \tilde{y}_i, id_p, \tilde{d}_i, \tilde{\theta}_i, ts)$  ( $i = 1, \dots, m$ ) の情報からベイズ推定を用いて歩行者位置の推定を行う。複数の車両による歩行者位置の測定値はそれぞれ独立であるため、真値が与えられたときにそれぞれの測定値が上記のものになる確率は、前節で示した単独データにおける確率の積となる。よって、この場合の尤度関数も単独の場合の積を取る。時刻  $t$  に歩行者  $p$  が位置  $(x, y)$  に存在する尤度  $L_t(x, y)$  を以下のように定義する。

$$L_t(x, y) = \prod_{i=0}^m L_{D\Theta G}(x, y | \tilde{d}_i, \tilde{\theta}_i, \tilde{x}_i, \tilde{y}_i) \quad (8)$$

最尤法によって、この尤度関数を最大にする位置  $(\hat{x}, \hat{y})$  を歩行者  $p$  の推定位置とする。

#### 4.3.2 時系列の情報を用いた歩行者推定精度の向上

現在、歩行者の存在確率は 1 メートル四方のグリッドで表現している。歩行速度を平均  $v_p$ 、ビーコン発信間隔を  $t_b$  とすると、その間に進む距離は平均  $v_p \cdot t_b$  である。そこで、現在の 1 メートルのグリッドを  $n = \frac{1}{v_p \cdot t_b}$  とし  $n \times n$  のサブグリッドに再分割し、計算を簡略するために、歩行者は  $t_b$  で現在のサブグリッド及びその 8 近傍のサブグリッドのいずれかに等確率で移動すると仮定して、 $t_b$  後の歩行者存在尤度を予測する。その予測した尤度と、前節までの尤度を用いて最尤推定を行う。

## 5. シミュレーションによる評価実験

提案する車車間通信を用いた歩行者位置推定手法について計算機を用いたシミュレーションによる評価実験を行っ

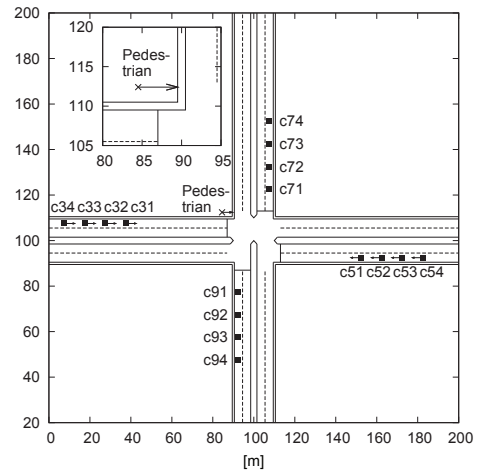


図 2 対象とする交差点と歩行者、車両の初期位置

Fig. 2 Initial Position of Pedestrian and Each Cars on Target Intersection

た。実験の目的は、各車両が歩行者及び周辺の車両から受信したビーコンやデータによって危険回避するに十分な精度を実現できるのかを明らかにすることである。

本研究では、通信の評価に使うネットワークシミュレータとして QualNet [5] を使用した。

### 5.1 実験の設定

#### 5.1.1 交通に関する設定

評価実験で使用する道路として、図 2 に示すような 200 メートル四方の領域中央に車線幅 4 メートルの片側 2 車線道路の交差点を用意した。以下、図の上を北として、領域内にある通信ノードである歩行者と車両について説明する。歩行者は図 2 に示すように交差点北西におり、秒速 1 メートルで等速で東に進む。車両は、各方向の道路にそれぞれ最大 4 台存在し、図 2 に示されているのはその初期位置である。東西方向に進む車両は秒速 12 メートル（時速 50 キロメートル）で等速で移動する。南北方向に進む車線の車両は信号により停止しているとする。

道路の摩擦抵抗値は乾燥している状態である  $\mu = 0.7$  と仮定し、運転手の反応速度  $t_{recognize}$  を 2 秒とした。この場合の停止距離は式 (1) より  $d_{limit} = 22$  メートルとなる。

#### 5.1.2 通信に関する設定

通信に関して以下を仮定し、ネットワークシミュレータ Qualnet に設定した。

歩行者の発するビーコンおよび車車間通信は IEEE802.11b を使用する。無線到達範囲を 100 メートルに設定し、歩行者ビーコンの送信間隔  $t_b = 0.2$  秒、車両パケットの送信間隔  $t_c = 0.2$  秒として通信を行う。

歩行者ビーコン  $pkt_p(id_p, ts)$  のパケットサイズは 100 バイトとする。歩行者 ID  $id_p$ 、タイムスタンプ  $ts$  をそれぞれ 4 バイトで表すとして、これらを格納するのに十分である。

車両パケット  $pkt_c(id_c, \tilde{x}_c, \tilde{y}_c, id_p, \tilde{d}, \tilde{\theta})$  のサイズは 150 バ

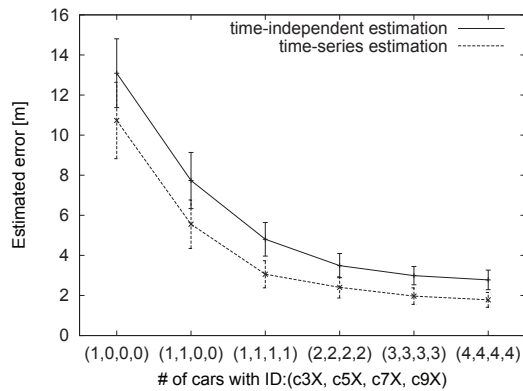


図 3 複数車両における歩行者位置推定精度の変化 (95% 信頼区間) ( $\sigma_d = 0.5$ ,  $\sigma_\theta = 15^\circ$ ,  $\sigma_{GPS} = 10m$ )

イトとする。GPS による測位位置  $(\tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$  の各座標をそれぞれ 8 バイト、それ以外の車両 ID  $id_c$ 、測定した距離  $\tilde{d}$ 、測定した角度  $\tilde{\theta}$  をそれぞれ 4 バイトで表すとして、これらを 1 人の歩行者分を格納するのに十分である。なお、今回の評価では、1 つの車両パケットに格納する対象の歩行者は 1 人とする。位置推定の対象とする歩行者は 1 人であるが、ある程度混雑した交差点を想定するため、シミュレーションエリア内でビーコンを送出している歩行者は他に 11 人、車両は最大で 16 台存在するとした。

## 5.2 評価項目

情報を交換する車両数の変化によって歩行者位置の推定精度がどのように変化するかを評価するために、測定誤差と通信する車両数を変化させながら歩行者位置推定を行う。

現時点で開発されている指向性アンテナと GPS を考慮して以下のようにパラメータを設定した。指向性アンテナである ESPER アンテナ [9] は、30 度単位で受信パケットの到来角を把握することが可能である。そこで、基準とする到来角の測定誤差の分散  $\sigma_\theta$  を左右 15 度とする。なお、受信強度から距離を測定することは現時点では難しく、誤差が大きい。そのため、基準となる誤差の係数  $\alpha_d$  を 0.5 と大きく取り、測定値は真値の 0.5 から 1.5 倍の範囲に分散すると仮定する。GPS については、現在 10 メートル程度の誤差があると言われている。以上より、測定誤差に関するパラメータを  $(\alpha_d, \sigma_\theta, \sigma_g) = (0.5, 15, 10)$  とする。

歩行者検知を行う車両は図 2 に示した車両 c34 とする。なお、c34 が歩行者に対して  $d_{limit} = 22$  メートル手前に到達するのシミュレーション時間で  $t = 4.58$  秒である。歩行者位置推定精度は、この時刻の前のタイムスロットの最後である  $t = 4.4$  秒における歩行者の推定位置と真の位置との距離で評価する。

## 5.3 シミュレーション結果

交差点内で歩行者位置推定のために協調する車両数を変化させ、推定精度として歩行者推定位置と真の位置の差を

取ったときのシミュレーション結果を図 3 に示す。図中には、各タイムスロットで受信した車両パケットから推定した結果 (time-independent estimation) と時系列の情報を考慮して推定した結果 (time-series estimation) を示す。この結果は乱数を用いて 30 回試行した平均値である。またこのときのパケットロス率は高々 4% であった。

これらのシミュレーション結果から、車両 c34 が単独で歩行者位置を推定する場合 (車両数 (1, 0, 0, 0)) と比較して、複数の車両で協調することで大きく精度を向上できることが確認できた。また、時系列の情報を利用することで精度を更に向上できている。

## 6. まとめ

本論文では、精度の十分でない測定装置を用いて各車両が歩行者の位置を推定した際に、近隣の車両と無線通信によって情報共有することで、歩行者位置推定精度を向上させる手法を提案し、計算シミュレーションによってその有効性を示した。

提案する歩行者の安全を支援するシステムの今後の実用化に向けた課題として、位置推定が必要な歩行者をフィルタリングする機構の導入が挙げられる。また、推定した歩行者の位置から危険な歩行者かどうかを判断したり、それを運転手に通知するための機構の検討が必要である。

## 参考文献

- [1] 警察庁：平成 19 年中の交通事故の発生状況，<http://www.npa.go.jp/toukei/index.htm>.
- [2] Misener, J. and Sengupta, R.: Cooperative Collision Warning: Enabling Crash Avoidance with Wireless Technology, *Proc. ITSWC 2005* (2005).
- [3] Ikeda, D., Horie, M., Yamaguchi, R., Wada, T. and Okada, H.: An effective algorithm of the relative movement between vehicles and pedestrians in VPEC, *Proc. WiNTECH-07*, pp. 95–96 (2007).
- [4] Nissan Motor Co., Ltd.: NISSAN ADVANCES TESTING OF INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEM, <http://www.nissan-global.com/EN/NEWS/2007/STORY/070313-01-e.html>.
- [5] Scalable Network Technologies, Inc.: QualNet, <http://www.scalable-networks.com/>.
- [6] 自動車安全運転センター：運転者の安全運転を支援するための情報提供のあり方に関する調査研究，[http://www.jsdc.or.jp/search/pdf/all/h16\\_2.pdf](http://www.jsdc.or.jp/search/pdf/all/h16_2.pdf).
- [7] Hayashi, M., Nishioka, A., Goshi, K. and Matsunaga, K.: Human-Centered Intelligent Transport System - ASSIST, *Proc. ICICIC-07*, p. 7 (2007).
- [8] Bahillo, A., Prieto, J., Mazuelas, S., Lorenzo, R., Blas, J. and Fernandez, P.: IEEE 802.11 Distance Estimation Based on RTS/CTS Two-Frame Exchange Mechanism, *Proc. VTC-Spring 2009*, pp. 1–5 (online), DOI: 10.1109/VEVECS.2009.5073583 (2009).
- [9] 橋口正哉，俊 程，飯草恭一，Taillefer, E., 平田明史，大平 孝：無線アドホックネットワーク用エスパアンテナの設計と試作，電子情報通信学会論文誌 (B)，Vol. J85-B, No. 12, pp. 2245–2256 (2002).