

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^{1,a)} 澤 悠太² 柴田 直樹² 安本 慶一² 伊藤 実²

受付日 2013年9月2日, 再受付日 2013年10月23日,
採録日 2014年7月11日

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. また, 時系列の測定情報からもベイズ推定を行うことで, さらに位置推定精度の向上を図る. 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, 歩行者および周囲の車両から 0.2 秒ごとに送信されるパケットのロス率は 4%程度であり, 各車両は推定に十分な数のパケットが受信できることが分かった. また, 指向性アンテナおよび GPS の測定誤差が正規分布に従うとしたとき, 単独では誤差約 13 メートルの推定精度だったものを, 周囲の 3 台の車両と協調することで約 5 メートルに, さらに時系列の情報を用いることで約 3 メートルにまで向上させられることが分かった.

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^{1,a)} YUTA SAWA² NAOKI SHIBATA² KEIICHI YASUMOTO² MINORU ITO²

Received: September 2, 2013, Revised: October 23, 2013,
Accepted: July 11, 2014

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 3 meters with 3 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 静岡大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Shizuoka University,
Hamamatsu, Shizuoka 432-8011, Japan

² 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@inf.shizuoka.ac.jp

1. はじめに

近年, 世界中の様々な地域において自動車保有台数が増加しており, それに比例して交通事故も増加している. この問題に対処するため, ITS (Intelligent Transport Systems)

分野では、運転者に対して警告を行ったり、ハンドルやブレーキを制御し運転補助を行う ASV (Advanced Safety Vehicle) を用いた安全確保サービスが導入・検討されている [1]。このようなサービスは、現状では各車両が単体で利用できるものが主流となっている。これら ITS サービスの効果もあり、わが国では、年々交通事故死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、微減するにとどまっておりに [2], [3]、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 [4], [5] や、歩行者および車両が自位置や走行速度など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 [6] 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、指向性アンテナ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、測定誤差を抑制するために車車間通信を用いて車両どうしの協調を図る。具体的には、複数車両間でセンシングしたデータを車車間通信により交換し、得られた複数の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、多数の歩行者をそれぞれ区別して推定するために、歩行者は定期的に固有の ID を持つビーコンを発信する無線デバイスを装備し、車両はビーコンを受信する指向性アンテナ、GPS (Global Positioning System) などの自車両の位置を測定可能な装置、道路形状を把握可能な地図データおよび十分な容量の記憶装置を搭載する車載コンピュータを装備している環境を想定する。各車両においてビーコン電波強度から歩行者と車両の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 測位情報には誤差が含まれる。そこで、到来角度、受信電波強度の測定誤差および車載 GPS の測位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、交差点の周辺にある建物の影響など実環境を考慮した通信シミュレーションが行えるネットワークシミュレータ QualNet [7] を用いて、ある都市部の見通しの悪い交差点を模して、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活発に行われている [4], [5], [6]。文献 [4] では、実際の車両に車車間通信に使用する機器を搭載し、滑走路のような広大な平面上や実際の交差点においてカーナビゲーション上に実装した安全支援アプリケーションを用いて安全支援システムの評価を行っている。文献 [5], [6] 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。

これらのシステムでは、各歩行者と周囲の各車両が GPS で自位置を計測して交換し、お互いの移動方向が重なるときには、車両の運転者に対して危険回避情報を提供する。文献 [5] 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 [6] のシステムでは、歩行者が自位置や走行速度など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などのプローブ情報をサーバに送信し、サーバで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、歩行者の機器が自位置を計算して周囲の車両に通知を行うため、歩行者側の端末の負担が大きくなるという問題がある。提案手法では、歩行者側の機器は単にビーコンを発信するのみで、計算力や電源に制約の少ない車両側ですべて計算を行う。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、サーバなどのインフラの設置費用が必要、遅延時間が大きいなどの問題がある。

歩行者や障害物を検出するためには、歩行者や障害物を認識し、その位置を特定する必要がある。物体の位置を特定する手法には、GPS を用いる手法、レーザレンジファインダを用いる手法 [8]、電波を用いる手法 [9]、ステレオカメラを用いる方法 [10] などがある。GPS を用いる手法は、普及タイプの単独測位方式では、10 メートル程度の測位誤差がある。また、相対測位方式である Differential GPS (DGPS) では、数メートル程度の測位誤差となるが、単独測位方式に比べ導入コストが高くなってしまふ [11]。レーザやカメラ、赤外線などを使う方法では、可視光や高い周

波数の電波を使うため精度は高いが、回折を起こしにくい
ため車両密度が高い場合において車両が遮蔽物となつてしま
い、十分広い範囲での歩行者や障害物の検出を行うことが
できない。電波を用いる手法は、受信電波強度、電波到来
方向、またはその両方を用いて位置の推定を行う。電波
による検出は、レーザやカメラに比べて障害物の影響を受
けにくい、測定誤差は大きい。

3. 提案する歩行者安全支援システム

本章では歩行者の位置を推定し運転者に危険通知するシ
ステムについて、このシステムが必要となる場面を説明し、
次に、本研究における仮定を説明する。

3.1 歩行者検知の対象場面

警察庁の統計 [3] 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 [12] 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で比較す
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。

赤信号や渋滞などによって車両が移動していない車線付
近の歩行者が車道を横断する場合、反対車線を走行する車
両から見ると停止している車両や遮蔽物が死角を生じさせ
る。このように、見通しの悪い交差点では、死角となる場
所が多くなり、車道の横断を試みる歩行者が存在する場
合には、歩行者の位置を推定し運転者に危険通知するシス
テムが必要となる。

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。空走距離は運転者
がブレーキをかけると判断してから実際に動作に移るまで
に走行する距離であり、制動距離はブレーキをかけてから
完全に停止するまでに走行する距離である。事前に運転手
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 [13] 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。

$$d_{braking} = \frac{(v/3.6)^2}{254 \cdot \mu}$$

$$d_{free} = t_{recognize} \cdot v$$

ここで、 v は車両の走行速度を、 μ は道路の摩擦抵抗値を
表す。また、 $t_{recognize}$ は運転手の反応速度を表し、一般的
に 2 秒程度となる [13]。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} 以上離れた位置で歩行者
位置の推定を完了させなければならない。

$$d_{limit} = d_{braking} + d_{free} \quad (1)$$

本論文では、提案するシステムについて、車両と歩行者
の距離が d_{limit} となる時刻での歩行者位置の推定精度を評
価する。

次に、歩行者位置検知を行ううえでの要求される位置推
定の精度を考察する。ITS アプリケーションとして、歩行
者検知による接触事故防止を想定している。歩行者との接
触事故を防止するためには、歩行者が歩道にいるのか車道
にいるのか、車道を横切ろうとしているのかを判断でき
ることが望ましい。わが国の道路構造令 [14] によれば、都市
部での道路幅員は最低 3 メートル以上である。車道に
いるのか歩道にいるのか、車道の場合は同じ車線か隣の車
線かを判断するためには、歩行者位置推定の誤差を車線幅
の半分以下の 1 メートル程度にまで抑えれば、それらの危
険予測が可能であると考えられる。本論文では、現在市販
されている機器を用いてどの程度の位置推定精度が実現可
能かを検証する。

3.3 提案するシステム

本論文で提案するシステムでは、交差点付近にいる歩
行者が周期的に発信したビーコンを、周囲の車両が指向性
アンテナを用いて受信し、そのときの測定情報をもとに歩
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もとに、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。

最終的には、提案システムが、歩行者位置および移動
方向より危険を判断し、必要に応じて運転手に対する危
険通知を行うことを目的とするが、本論文ではそのうち
歩行者の位置推定を行うところまでを対象とする。

3.3.1 対象環境

本システムが想定する歩行者と車両の装備品について記
述する。

各歩行者は、ビーコンを送信する無線通信機器を装
備し、ビーコンに使用する無線通信は IEEE802.11 規格に
準拠したものとする。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、歩行者までの距離と到来角を推定できるとする。このとき、受信電波強度や遅延などから距離へは、文献 [15] などの方法を用いて変換できるものとする。このときの誤差はおおよそ真値を中心とした分布に従っており、本論文では、それをもとにした誤差分布を想定する。また、車車間通信を行うために IEEE802.11 規格の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。送信するデータについては、後述する。

現在、安価な無線 LAN は IEEE802.11a や 11b、今後普及が進む車車間通信では IEEE802.11p で運用されている。本論文では、それらを一般化し、帯域や通信範囲をパラメータ化して表現する。

各車両は GPS レシーバを装備し、その機能により自位置の推定および 1 マイクロ秒以下の精度で同期した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利用できるとする。

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、歩行者 p 固有の 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、歩行者ビーコンを複数受信した場合は、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、トラフィ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るが、今後の課題とする。

最終的に、車両は時間 t_c ごとに、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。

4.1 節では、車両が持つ指向性アンテナと GPS における対象歩行者の測定誤差、および、対象物の存在尤度の算出について述べる。

4.2 節では、まず、ある車両が歩行者ビーコンを受信したときに、そのビーコンの受信強度と到来角、および自車の GPS 測位値より、その歩行者の位置推定を行う手法を述べる。

4.3 節では、他車から車両パケットを受信したとき、これらの情報を利用してより高精度に位置推定を行う手法について述べる。また、歩行者の時系列の位置推定情報を利用して、推定精度の向上を図る手法についても述べる。

以下、本文中では次の表記を用いて説明を行う。

\tilde{x}	x の測定値
\hat{x}	x の真の値
\hat{x}	x の推定値

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。

- 車載 GPS によって測定した自車位置 $(\tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$
- 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 $\tilde{\theta}$

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。

本節では以降、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 車両の位置と進行する絶対角度 (GPS)

本研究では、車両に搭載される GPS の測位誤差について考慮する。

都市部のように構造物によって測位に使う衛星が遮蔽されたり、反射したりした測距信号を受ける場合には、GPS の測位誤差は大きくなる場合がある [16]。しかし、捕捉衛星数が少ないときでもそれらからの測距信号が反射せずに受信されている場合は、測位結果は真値を中心に分布することや、捕捉衛星からの信号が反射している場合にその反

射波を除いて高精度で測位する手法が文献 [17] で示されている。また、反射波の影響を排除できないときでも、前後の車両のような近隣の2つの受信機が同じ捕捉衛星の組合せで測位している場合には測位結果の誤差に相関があり、それを利用して測位精度を向上させられることが示されている。そこで、測位誤差は、真の位置を中心とした分布に従うと仮定する。

また、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。ここでは、マップマッチングによって進行方向の車線の中央にマッチングされるとする。片側1車線で車線幅3メートルの道路で、車幅1.5メートルの車両が車線内を走行したときのこの誤差は最大で0.75メートルとなる。この誤差の大きさは進行方向の誤差に比べて十分小さいため、本論文では、車両位置の真値を中心として、進行方向にのみ標準偏差 σ_g の誤差が発生すると仮定する。たとえば、ある車両の進行方向が x 軸方向であり、真の位置が (x_c, y_c) のとき、その車両が測位した自車位置 $(\tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$ について、 y 軸方向のずれはマップマッチングにより0になり ($\tilde{y} = y_c$)、 x 軸の値は $N(x_c, \sigma_g^2)$ に従う値として得られるとする。

各車両のGPS測位結果の真の位置からの誤差が標準偏差 σ_g の正規分布で表され、進行方向が ϕ である路上の位置 (x_c, 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。

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

なお、任意の道路上の位置 (x, y) における進行方向 ϕ は、車載された地図データより一意に求められるとする。また、GPS測位結果が進行方向からずれる確率は0である。

次に、車両の進行する絶対角度については、カーナビが持つ電子地図とGPSによる現在位置および進行方向、さらに内蔵の電子コンパスなどから正確に得られるものと仮定する。車線内での小刻みな進路変更や、カーブなどで連続的に進行方向が変わる場合においては、この角度に誤差が発生することも考えられるが、指向性アンテナによる歩行者の存在角度の推定誤差よりは十分小さいと考えられる。角度に関する誤差パラメータが複雑化することを避けるため、本論文のモデルでは、角度に関する誤差は後述する指向性アンテナで受信する歩行者パケットの到来角に関する誤差のみとする。

なお、車両が交差点内におり転回中であつたりすると、上述したマップマッチングや進行角度の精度は低下すると考えられる。そのため、本システムによる歩行者位置推定は交差点外の道路区間にいる車両が行うものとする。交差

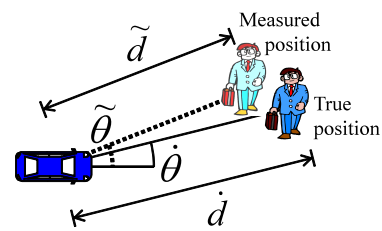


図1 車載の指向性アンテナによる歩行者ビーコンの測定
Fig. 1 Measuring angle and distance of beacon by directional antenna.

点内の車両は、車車間通信によって情報を得ることで歩行者位置を知ることができる。想定するアプリケーションでは交差点に差し掛かる前に危険予測を完了することを考えているため、この仮定においてもシステムの動作上問題はないと考えている。

4.1.2 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、その電波強度 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) を用いて、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 d のとき、測定値が d をとる確率密度関数 $f_D(d|\hat{d})$ は以下の式で表される。

$$f_D(d|\hat{d}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{d-\hat{d}}{\sigma_d}\right)^2} \quad (3)$$

ここで σ_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、評価時には相対パラメータ α_d を用いて、 $\sigma_d = \alpha_d \cdot \hat{d}$ と与える。たとえば、 $\alpha_d = 0.3$ 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。

4.1.3 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 θ 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 $\hat{\theta}$ となる確率密度関数 $f_\Theta(\hat{\theta}|\theta)$ を考える。測定値 $\hat{\theta}$ は真値 θ を中心とした正規分布に従うとする。 θ は方位角であるため $f_\Theta(\hat{\theta}|\theta) = f_\Theta(\hat{\theta} + 2\pi n|\theta)$ (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、

$$f_\Theta(\hat{\theta}|\theta) \simeq \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\theta} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\hat{\theta}-\theta}{\sigma_\theta}\right)^2} \quad (4)$$

σ_θ 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、たとえば6度のように与える。

4.2 バ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、バ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, θ は独立であるとおくと、同時にその値が得られる確率は式 (3)、式 (4) 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 θ となる確率密度 $f_{D\Theta}(d, \theta|\hat{x}_p, \hat{y}_p, \hat{x}_c, \hat{y}_c)$ は、

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

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 (2) で示した確率密度関数に従う。この $(\tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$ の分布は、式 (6) で表した確率密度関数 $f_{D\Theta}(d, \theta|\hat{x}_p, \hat{y}_p, \tilde{x}_c, \tilde{y}_c)$ 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 θ 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。

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

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) である尤度関数は、

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

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) である尤度関数は、

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

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。

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

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以下のようにして得る。

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \arg \max_{(x, y)} L_{D\Theta G}(x, y|\tilde{d}, \tilde{\theta}, \tilde{x}_c, \tilde{y}_c) \quad (8)$$

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 (2) や式 (7)、式 (8) 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、各グリッドごと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うえでの許容される誤差はたかだか 1 メートルである。そこで、本論文で用いる手法では、図 2 のように、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よく、たかだか 100 × 100 グリッド程度である。

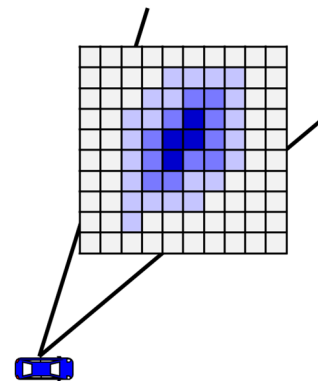


図 2 エリアのグリッド分割
Fig. 2 Pedestrian's existence probability map.

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とる。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。

$$L_t(x, y) = \prod_{i=0}^m L_{D\Theta G}(x, y | \tilde{d}_i, \tilde{\theta}_i, \tilde{x}_i, \tilde{y}_i) \quad (9)$$

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

本項では、各測定時刻で得られた推定結果の時系列の情報をもとに、さらに推定精度を向上させる手法について述べる。

各車両は t_b 間隔で歩行者位置の推定を行う。 t_b ごとに区切った時刻をタイムスロットと呼び、以降、時刻範囲 $[(s-1) \cdot t_b, s \cdot t_b)$ を s 番目のタイムスロットとする。車両は各タイムスロットの最後 ($t = s \cdot t_b$) で推定を行うとすると、 s 番目のスロットでの推定に用いられる尤度関数 $L_s^T(x, y)$ は式 (9) の $L_t(x, y)$ を用いて次のように表される。

$$L_s^T(x, y) = L_{s \cdot t_b}(x, y) \quad (10)$$

タイムスロット s における時系列の情報を考慮した尤度関数を $L_s^S(x, y)$ と表す。1つ前のタイムスロットの歩行者の位置の分布が尤度関数 $L_{s-1}^S(x, y)$ に従うと仮定すると、それから予測した現在のタイムスロットにおいて歩行者が位置 (x, y) に存在する確率 $P^S(x, y | L_{s-1}^S(x, y))$ は、歩行者の移動速度を考慮して次のように定義できる。なお、1つ前のタイムスロットで (x', y') に居た歩行者が、現在のタイムス

ロットで (x, y) に移動する距離 $d = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}$ は、歩行者の移動速度を v_p として、平均 $d_m = v_p \cdot t_b$ 、標準偏差 σ_m の正規分布に従うとする。

$$P^S(x, y | L_{s-1}^S(x, y)) \quad (11)$$

$$= k \iint \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_m} e^{-\frac{(d-d_m)^2}{2\sigma_m^2}} \cdot L_{s-1}^S(x', y') dx' dy'$$

k は $\int P^S(x, y | L_{s-1}^S(x', y')) dx' dy' = 1$ とするための係数である。

式 (11) は、1つ前のタイムスロットの歩行者位置推定が正しいと仮定したとき、現在のタイムスロットにおける歩行者の位置の真値が (x, y) となる確率である。これまでの尤度関数を定義するために用いてきた式 (6) は、歩行者の真値の分布が一様であるとしたときの確率密度関数である。しかし、時系列の情報を考慮したときには、式 (11) を歩行者位置の事前分布として利用することができる。

以上より、タイムスロット s における時系列の情報を考慮した尤度関数を $L_s^S(x, y)$ は以下のように定義され、これを用いて最尤推定量を求める。

$$L_s^S(x, y) = P^S(x, y | L_{s-1}^S(x, y)) \cdot L_s^T(x, y) \quad (12)$$

初期値は $L_0^S(x, y) = L_0^T(x, y)$ である。

さて、式 (11) は二重積分を含み、これを2次元平面の各位置について求めると $O(n^4)$ の計算量となる。そのため、以下の方法を使って $P^S(x, y | L_{s-1}^S(x, y))$ を概算する。なお、式 (7) も二重積分を含むが、こちらはマップマッチングによって計算量は $O(n^3)$ となるため計算の簡略化は行わない。

一般的な歩行者の移動速度 $v_p = 1$ メートル毎秒とし、 $t_b \ll 1$ 秒とすると、歩行者は単位時間 t_b が経過した後、現在のグリッドかその8近傍のグリッドより外には移動しない。ここで、現在のグリッドにとどまる確率を p_m 、上下左右の4近傍のいずれかのグリッドに移動する確率をそれぞれ等確率として p_a 、斜めの4近傍のいずれかのグリッドに移動する確率もそれぞれ等確率として p_b と表せると仮定する。このとき、 $p_m + 4p_a + 4p_b = 1$ である。タイムスロット s において (x, y) に歩行者が存在する確率 $P_t^S(x, y)$ は、その前の単位時間前の時刻 $t-1$ の存在尤度分布 $L_{s-1}^S(x, y)$ が信頼できるとして以下のように表される。

$$P_s^S(x, y) = k \cdot \left[p_m \cdot L_{s-1}^S(x, y) \right. \\ \left. + p_a \cdot \{ L_{s-1}^S(x, y+1) + L_{s-1}^S(x, y-1) \} \right. \\ \left. + p_b \cdot \{ L_{s-1}^S(x+1, y+1) + L_{s-1}^S(x-1, y-1) \} \right. \\ \left. + L_{s-1}^S(x-1, y+1) + L_{s-1}^S(x+1, y-1) \right]$$

このとき、 $k = \{\iint P_s^S(x, y) dx dy\}^{-1}$ である。

ここで、現在の1メートル四方のグリッドを $n \times n$ 個

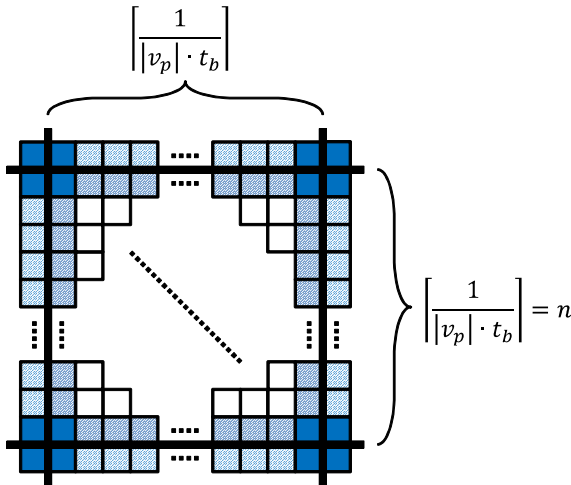


図 3 グリッドの再分割
Fig. 3 Grid subdivision.

($n = \lceil 1/(v_p \cdot t_b) \rceil$) のサブグリッドに分け、 p_m, p_a, p_b をそれぞれ以下のようにして求める．このサブグリッドの 1 辺の長さは、 t_b 秒間に平均移動速度で移動できる距離であるから、あるサブグリッドにいる歩行者は t_b 秒後に、現在のサブグリッドとその 8 近傍の 9 つのグリッドのいずれかに等確率で移動すると仮定できる．現在の歩行者のサブグリッドの位置は以下の 3 通りのいずれかであり、それぞれの場合をとる確率 q_m, q_a, q_b が次のように得られる．

- (1) グリッド中央部のサブグリッド (図 3 の白色サブグリッド) のいずれかであり、 t_b 秒後に隣のグリッドに移動する可能性がない．ここにいる確率 $q_m = \frac{(n-2)^2}{n^2}$ ．
- (2) グリッド境界のサブグリッド (図 3 の薄い網掛けサブグリッド) のいずれかであり、隣のグリッドに移動する可能性がある．ここにいる確率 $q_a = \frac{n-2}{n^2}$ ．
- (3) グリッドの四隅のサブグリッド (図 3 の濃い網掛けサブグリッド) のいずれかであり、隣のグリッドに移動する可能性がある．ここにいる確率 $q_b = \frac{1}{n^2}$ ．

ここで、 $q_m + 4q_a + 4q_b = 1$ である．なお、(1) の場合は t_b 秒後もこの歩行者は同じグリッドにとどまる．(2) の場合は $2/3$ の確率で同じグリッドにとどまり、 $1/3$ の確率で隣接する上下左右いずれかのグリッドに移動する．(3) の場合は $4/9$ の確率で同じグリッドにとどまる、または、 $2/9$ の確率で隣接する上下いずれかのグリッドに移動する、または、 $2/9$ の確率で隣接する左右いずれかのグリッドに移動する、または、 $1/9$ の確率で隣接する斜めのグリッドに移動する．これらを、 p_m, p_a, p_b について解き、以下のようを得る．

$$p_m = q_m + 4 \cdot q_a \cdot \frac{2}{3} + 4 \cdot q_b \cdot \frac{4}{9} = \frac{(3n-2)^2}{3n} \quad (13)$$

$$p_a = \frac{1}{3} \cdot q_a + 2 \cdot q_b \cdot \frac{2}{9} = \frac{3n-2}{(3n)^2} \quad (14)$$

$$p_b = \frac{1}{9} \cdot q_b = \frac{1}{(3n)^2} \quad (15)$$

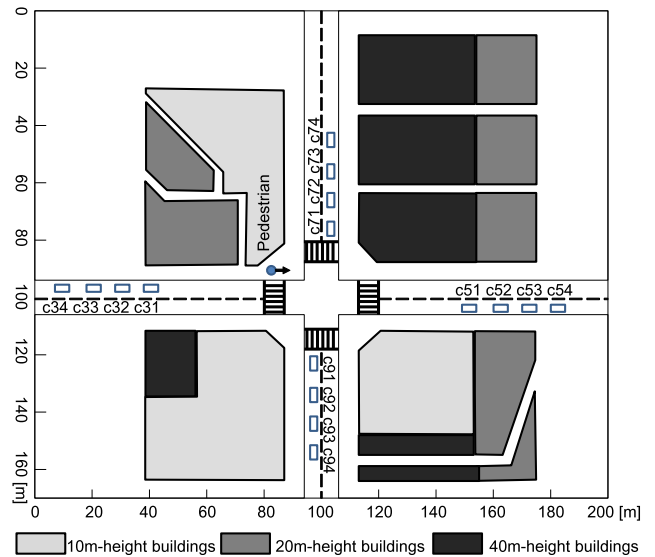


図 4 対象とする交差点と歩行者、車両の初期位置
Fig. 4 Initial position of pedestrian and each cars on target intersection.

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た．実験の目的は、各車両が歩行者の位置を検知するために十分な数のビーコンを制約時間内に受信することができるのか、また、各車両が歩行者およ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 [7] 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 4 に示すような 200 メートル四方の領域中央に車線幅 6 メートルの片側 1 車線道路の交差点を用意した．この交差点は京都市の四条河原町を想定し、10 から 40 メートルの高さの建物が交差点の周囲にあり、歩道は 3 メートル幅とした．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 4 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 4 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。

電波伝搬環境として、見通し外通信を考慮するために Rayleigh Fading モデルを使用することによりフェージングを考慮した。また、建造物を考慮するために、パスロスモデルとして Irregular Terrain モデル [18] を使用し、シャドウイングモデルとして対数正規分布を使用した。

位置推定の対象とする歩行者は 1 人であるが、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 人存在するとした。

5.2 評価項目

提案するシステムを評価するための実験の項目を以下に示す。

5.2.1 歩行者ビーコンおよび他車両からのパケットの受信個数

まず、現実の環境において、交差点へ侵入する車両が、歩行者位置推定に必要な歩行者ビーコンおよび他車両からのパケットを十分取得できるかを評価する。

対象とする車両は図 4 の c51 とする。このとき、交差点に進入する c51 と対象の歩行者との距離が d_{limit} の 22 メートルに達するまでのシミュレーション時間は 3.8 秒である。この間に c51 が、歩行者ビーコンや他車両からの車両パケットを受信した数、および、その受信確率を評価する。

まず、交差点に存在する車両を東西方向に 4 台 (c31, c32, c51, c52)、南北方向にも 4 台 (c71, c72, c91, c92) とし、歩行者ビーコンおよび車両パケットの受信数を評価する。

次に、交差点に存在する車両数を次のように変化させて、歩行者ビーコンおよび車両パケットの受信確率を評価を行う。東西方向については、2 台 (c31, c51)、4 台 (先に加え c32, c52)、6 台 (先に加え c33, c53)、8 台 (先に加え c34, c54) の 4 通り、南北方向については 0 台、2 台 (c71,

c91)、4 台 (先に加え c72, c92)、6 台 (先に加え c73, c93)、8 台 (先に加え c74, c94) の 5 通り、以上を組み合わせた場合それぞれについて実験を行う。

5.2.2 歩行者位置の推定精度

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。

測定誤差のパラメータは以下の 3 つである：(a) 歩行者までの距離の測定値の誤差の標準偏差は $\alpha_d \cdot \tilde{d}$ で表されるため、その係数 α_d 、(b) 歩行者への角度の測定値の誤差の標準偏差 σ_θ 、(c) GPS の測位誤差の標準偏差 σ_g 。

現時点で開発されている指向性アンテナと GPS の測定精度を考慮し、それを基準として 3 通りのパラメータを用意する。指向性アンテナである ESPER アンテナ [19] 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を 0.5 と大きくとり、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いわれている。以上より、基準となる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。

また、今後測定機器の精度が良くなった場合のことを考えた (0.3, 6, 5)、測定環境が劣悪だった場合のことを考えた (0.8, 30, 15) の場合についても評価を行う。

歩行者検知を行う車両は図 4 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。

車両 c34 と同様に歩行者位置を測定し、車車間通信によって情報を交換する交差点内の車両を以下のように変化させる。

- c34 単独
- 対向車が存在 (c34 と c51)
- 4 方向に 1 台ずつ (c34, c51, c71, c91)
- 同 2 台ずつ (上記に加え c31, c52, c72, c92)
- 同 3 台ずつ (上記に加え c32, c53, c73, c93)
- 同 4 台ずつ (上記に加え c33, c54, c74, c94)

以降、これらの場合を 4 方向それぞれの台数で表し、(1,0,0,0)、(1,1,0,0)、(1,1,1,1)、(2,2,2,2)、(3,3,3,3)、(4,4,4,4) と呼ぶ。

上記で説明した、測定誤差のパラメータ、車両台数のそれぞれの組合せに対して評価を行う。

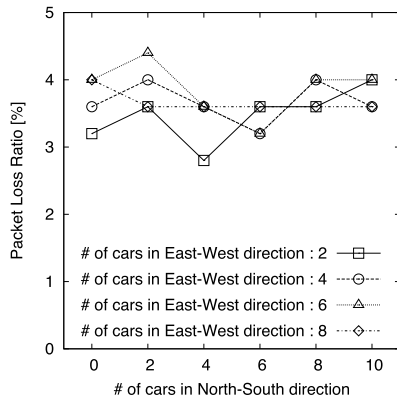


図 5 複数車両が存在する際の歩行者の送信パケットロス率
 Fig. 5 Transmitted packet loss rate among multiple cars.

表 1 車両 c51 が $t = [0, 3.8]$ 間に各ノードからの受信パケット数 (東西方向車両: 4 台, 南北方向車両: 4 台)

Table 1 Number of received packets at c51 while $t = [0, 3.8]$ (Num. of cars is 4 on NW road and 4 on WE road).

送信元	歩行者	c31	c32	c52	c71	c72	c91	c92
受信数	19	14	14	14	13	12	11	13

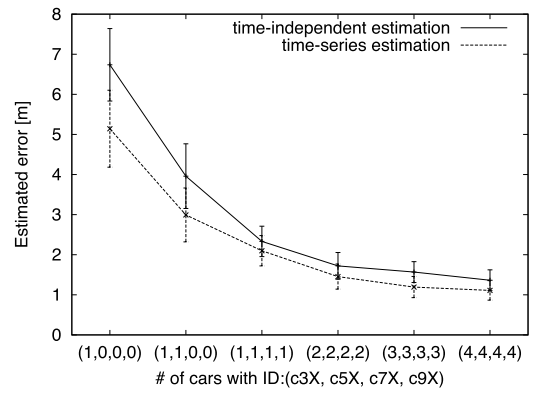
5.3 シミュレーション結果

5.3.1 歩行者ビーコンおよび他車両からのパケットの受信個数

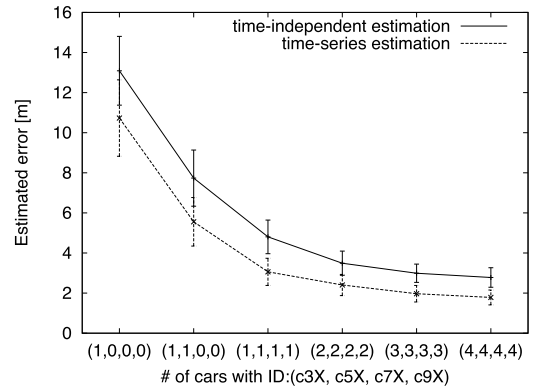
図 5 は、交差点に進入する車両 c51 と交差点内の 12 人の歩行者および数台の車両との、車車間通信による歩行者ビーコンおよび車両パケットのロス率についてのシミュレーション結果である。図 5 より、道路上に存在する車両数が増加しても、ロス率に変化は見られず、歩行者が 12 人、車両が東西方向に 8 台、南北方向に 8 台の計 16 台存在する場合においてもそのロス率は 4% 程度に収まっていることが確認できる。

提案システムは、交差点に多数の歩行者や車両がいる場合においても利用可能である必要がある。提案システムは、歩行者は歩行者ビーコンを定期的に配布するのみであり、歩行者位置推定はすべて車両側で行う。歩行者の端末と比較して、車載機器では CPU 速度や電源の制約は小さいため、システムの実用性の観点からは、計算時間よりも歩行者ビーコンや車両パケットの交換が十分できているかが重要となる。図 5 の評価結果から、1つの交差点に 12 人の歩行者と 2 から 16 台の車両があり、それぞれ歩行者ビーコンの送信と車両パケットの交換をしているにもかかわらず、パケットロス率はつねに 4% 程度と低く輻輳が起きていない。そのため、一般的な都市部の交差点程度の歩行者数では十分対応できると考えられる。

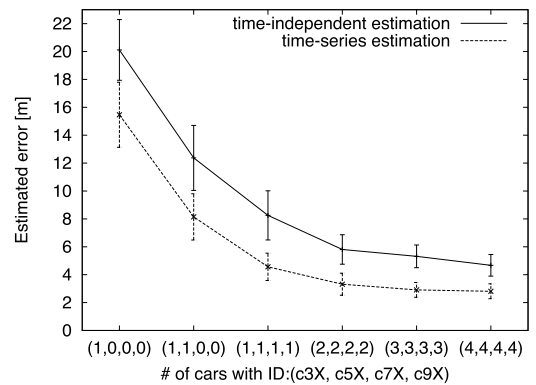
次に、車両 c51 が歩行者から受信した歩行者ビーコン数、および、車両から受信した車両パケット数についてのシミュレーション結果を表 1 に示す。ここで、 $t_b = t_c = 0.2$ 秒であるから、c51 が時刻 3.8 までに歩行者と各車両から



(a) $\sigma_d = 0.3, \sigma_\theta = 6^\circ, \sigma_{GPS} = 5m$



(b) $\sigma_d = 0.5, \sigma_\theta = 15^\circ, \sigma_{GPS} = 10m$



(c) $\sigma_d = 0.8, \sigma_\theta = 30^\circ, \sigma_{GPS} = 20m$

図 6 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)
 Fig. 6 Estimated error of target pedestrian with 95% CI.

受信できる最大パケット数はそれぞれ 19 である。シミュレーション結果より、歩行者からはロスなく、また各車両からの車両パケットも 11 個以上受信できており、提案手法で位置推定をするために十分な数のパケットが取得できていることが示されている。

5.3.2 歩行者位置の推定精度

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とったときのシミュレーション結果を図 6 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。

なお、この結果は乱数を用いて 30 回試行した平均値であり、エラーバーは 95%信頼区間を示す。

図 6 (a) は $(\alpha_d, \sigma_\theta, \sigma_g) = (0.3, 6, 5)$ のときのシミュレーション結果、同図 (b) は $(0.5, 15, 10)$ のときのシミュレーション結果、同図 (c) は $(0.8, 30, 15)$ のときのシミュレーション結果である。

これらのシミュレーション結果から、車両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させることが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さらに向上させることができている。

測定装置の精度が上がるほど推定精度も向上するが、最も精度が悪い (c) の測定誤差がある装置を使用した場合でも、協調する車両数が各方向で 3 台ずつ以上あれば誤差は 3 メートル程度に抑えられる。これは、各車両が精度の低い測定装置で歩行者位置を測定して位置推定を行った場合でも、車両間で協調することにより、精度の高い装置を使用して車両単独で歩行者位置を推定したときよりも誤差を小さくできることが示されている。

3.2 節で、危険回避するために必要とされる歩行者位置推定精度を 1 メートル程度と見積もった。各シミュレーション結果において、道路の各方向 3 台以上の車両と協調し、さらに時系列の情報を利用した歩行者位置を推定したときの精度は、測定誤差が (a) の機器を使った場合で約 1 メートル、(b) の場合で約 2 メートル、(c) の場合で約 2.5 メートルの誤差であった。

6. まとめ

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たシステムで利用するために、車車間通信を用いて近隣の車両が協調することで、単独車両で歩行者位置を測定する場合に比べて、高い精度で歩行者の位置を推定できる手法を提案した。提案手法では、各車両は指向性アンテナを用いて歩行者の位置を測定する。この測定情報には誤差があるが、車車間通信を用いて近隣の車両から複数の測定情報を得ることで、ベイズ推定を用いて推定精度を向上させることができた。また、時系列で得られる歩行者位置の測定値と位置推定の結果の情報を用いて、さらに推定精度を向上させる手法も提案した。

提案手法を計算機上に実装し、片側 2 車線道路の交差点を模した環境を構築し、ネットワークシミュレータを用いて計算機シミュレーションを行った結果、車両が歩行者を検知してから安全に停止できる距離に達するまでの数秒間に、歩行者および周囲の車両から位置推定に十分な数のパケットが受信できることが分かった。また、現在入手できる指向性アンテナや GPS の測定誤差を仮定したときに、車両単独では誤差約 13 メートルの推定精度だったものを、時系列の情報を用いて約 11 メートルに、さらに周囲の 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、歩行者の中から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あげられる。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したりするための機構の検討が必要である。

参考文献

- [1] 国土交通省：先進安全自動車，入手先 <http://www.mlitt.go.jp/jidosha/anzen/01asv/index.html>。
- [2] 警察庁：警察白書，入手先 <http://www.npa.go.jp/hakusyo/>。
- [3] 警察庁：平成 19 年中の交通事故の発生状況，入手先 <http://www.npa.go.jp/toukei/index.htm>。
- [4] Misener, J. and Sengupta, R.: Cooperative Collision Warning: Enabling Crash Avoidance with Wireless Technology, *Proc. 12th World Congress on Intelligent Transport Systems* (2005).
- [5] 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. 2nd ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation and Characterization (WiNTECH-07)*, pp.95–96 (2007).
- [6] Nissan Motor Co., Ltd.: NISSAN ADVANCES TESTING OF INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEM, available from <http://www.nissan-global.com/EN/NEWS/2007/STORY/070313-01-e.html>。
- [7] Scalable Network Technologies, Inc.: QualNet, available from <http://www.scalable-networks.com/>。
- [8] Premebida, C. and Nunes, U.: A Multi-Target Tracking and GMM-Classifer for Intelligent Vehicles, *Proc. 9th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC-06)*, pp.313–315 (2006).
- [9] Malhotra, N., Krasniewski, M., Yang, C., Bagchi, S. and Chappell, W.: Location Estimation in Ad-Hoc Networks with Directional Antennas, *Proc. 25th International IEEE Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS-05)*, pp.633–642 (2005).
- [10] 富士重工業株式会社：SUBARU：スバルアイサイト総合サイト，入手先 <http://www.subaru.jp/eyesight/>。
- [11] GPS — explained, available from <http://www.kowoma.de/en/gps/index.htm>。
- [12] 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，入手先 <http://www.jsdc.or.jp/search/pdf/all/h16.2.pdf>。
- [13] Hayashi, M., Nishioka, A., Goshi, K. and Matsunaga, K.: Human-Centered Intelligent Transport System ASSIST, *Proc. 2nd International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC-07)*, p.7 (2007).
- [14] 道路構造令，入手先 <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S45/S45SE320.html>。
- [15] 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, *Vehicular Technology Conference, 2009, VTC Spring 2009, IEEE 69th*, pp.1–5 (online), DOI: 10.1109/VETECS.2009.5073583 (2009).

- [16] 佐田達典：GPS 測量技術，オーム社 (2003).
- [17] 木谷友哉，羽多野裕之：GNSS における擬似距離残差情報を元にした測位精度向上手法および近隣の端末との協調による測位精度向上，信学技報，Vol.113, No.165 (SANE2013-38), pp.7-12 (2013).
- [18] Hufford, G.: The ITS Irregular Terrain Model, version 1.2.2, available from (http://www.its.bldrdoc.gov/media/35878/itm_alg.pdf).
- [19] 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).



安本 慶一 (正会員)

1991 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。1995 年同大学大学院博士後期課程退学後，滋賀大学経済学部助手。2002 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科准教授。2011 年より現在，同教授。博士 (工学)。分散システム，マルチメディア通信システムに関する研究に従事。ACM, IEEE 各会員。



木谷 友哉 (正会員)

2006 年大阪大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。2005 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。2008 年，静岡大学若手グローバル研究リーダー育成拠点特任助教 (テニュアトラック)。2013 年より現在，同大学院情報科学研究科准教授。博士 (情報科学)。組合せ最適化問題，ネットワークシステム，高度交通システムに関する研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会，自動車技術会各会員。



伊藤 実 (正会員)

1977 年大阪大学基礎工学部卒業，1979 年同大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。1979 年より大阪大学基礎工学部助手。1986 年より同講師，1989 年より同助教授。1993 年より現在，奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授。工学博士。データベース理論，効率的なアルゴリズム開発等の研究に従事。ACM, IEEE, 電子情報通信学会各会員。



澤 悠太

2007 年東北大学工学部情報工学科卒業。2009 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。現在，(株)メガチップスに勤務。



柴田 直樹 (正会員)

2001 年大阪大学大学院基礎工学研究科情報数理系専攻博士後期課程修了。現在，奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科准教授。博士 (工学)。分散システム，ITS，遺伝的アルゴリズム等の研究に従事。IEEE 会員。