Vol.2013-ITS-53 No.7
2013/6/14

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

岡本 広大[1,a)]　屋代 智之[1]

概要：ITS（Intelligent Transport Systems:高度道路交通システム）において，車両と歩行者とで通信を行い，位置情報等を処理する事で交通事故を回避しようとする研究が行われている．近年，700MHz 帯の電波の一部が ITS 用に割り当てられたため，これを用いる事で市街地での通信範囲を広げることが出来る。歩行者端末では 700MHz 帯の電波を扱えないため，歩車間での通信を 2.4GHz，車車間での通信を 700MHz で行う方式を提案し，シミュレーションを用いて提案方式の評価を行う．

1. はじめに

日本における交通事故件数及び交通事故死者数は減少傾向にあるが，どちらも依然として少ないとは言い難い数値を保っている [1]．交通事故による死者の中では歩行中の死者が最も多く，歩行者と車両の衝突を回避することは交通事故件数の大幅な減少に繋がると考えられる [2]．また，ITS 無線通信に 700MHz 帯の電波が割り当てられる事が決定し，それに伴う実験用ガイドラインの他，通信の標準規格が策定された [3][4]．この 700MHz 帯の電波の伝搬特性や有用性を調べるための実験や検証が行われている [5][6]．700MHz 帯の電波は通信範囲が広く，遮蔽物の多い都市部のような環境での通信に力を発揮する事が期待される．ITS 無線通信においては，スマートフォン等の歩行者の携帯端末と車両が直接無線通信を行う歩車間通信という通信形態も検討されており，これによって互いの位置関係を把握できれば歩行者と車両の衝突事故を大幅に低減させることができると考えられる．位置関係の把握には GPS によって得られる位置情報の他，車載された指向性アンテナによる歩行者位置推定技術を用いる方法が検討されている [7][8]．しかしながら，歩車間通信には考慮すべき点がいくつか存在する．700MHz 帯を用いる場合，歩行者端末に新しく通信用デバイスを搭載する必要がある．また歩行者端末は処理能力や消費可能電力の面で車載機に劣るため，双方に同程度の負担が掛かるシステムの利用は困難である．歩車間通信を用いずに路側機等のインフラを介して通信するといった方法も検討されているが，新たなインフラ設置に時間とコストを要する．そこで，我々は車車間通信では 700MHz 帯を，歩車間通信では無線 LAN（2.4GHz 帯）を用い，システムの構築に必要なコストを最小限にし，かつ歩行者位置の把握可能範囲を広げる検討を行う．本研究ではネットワークシミュレータを用いて提案方式を検証し，歩行者位置の推定精度やパケットの到達率などから有効性を確認する．システムの必要コストを考慮し，現在の歩行者端末に実装されている無線 LAN のみで通信を行う方式と，提案方式との比較検証を行う．

2. 提案システム

2.1 システム構成

我々は，遮蔽物が多く見通し外通信の起きやすい市街地環境においても交通事故を回避可能であるシステムを提案する．システムが想定する市街地環境においては，GPS の利用に問題が発生する可能性があるため，GPS による測位情報は利用できないものと仮定する．このため，各車両は独自に歩行者位置を推定する必要がある．本システムでは歩行者位置の推定に，アレイアンテナの一種であるスマートアンテナを用いる．スマートアンテナが受信した電波の位相を解析することで，電波の到来角を推定することが可能である [9]．携帯電話等の既存の歩行者端末には無線 LAN として 2.4GHz 帯で通信するためのデバイスが搭載されていることが多く，新たな通信用デバイスを搭載する必要が無い．また，歩車間通信においては，ある程度直進性の高い周波数帯を用いる事で，スマートアンテナによる到来角推定の誤差を低減するといった効果も見込んでいる．提案するシステムは新たなインフラの設置や歩行者端末用通信デバイスの開発をする必要が無く，また歩行者端

1 千葉工業大学
Chiba Insutitute of Technology
a) okamoto@ysr.net.it-chiba.ac.jp

© 2013 Information Processing Society of Japan

末の性能がボトルネックになる事も無い．このため，低コストなシステムを構築する事が可能となっている．

2.2 システムの動作

提案手法の動作例を図 1 に示す．歩行者は無線 LAN による 2.4GHz 帯の通信を用いて，周辺車両に自身の ID を付与したパケットをブロードキャストする (図 1(1))．各車両はスマートアンテナを搭載し，位相差から電波の到来角を，信号強度から距離を推定することで，歩行者の現在位置を推定する (図 1(2))．歩行者の位置を推定した車両は，700MHz 帯の通信を用い，周辺車両と歩行者位置推定結果を共有する (図 1(3))．各車両は共有した歩行者位置を合成し，自身の推定位置を補正する (図 1(4))．

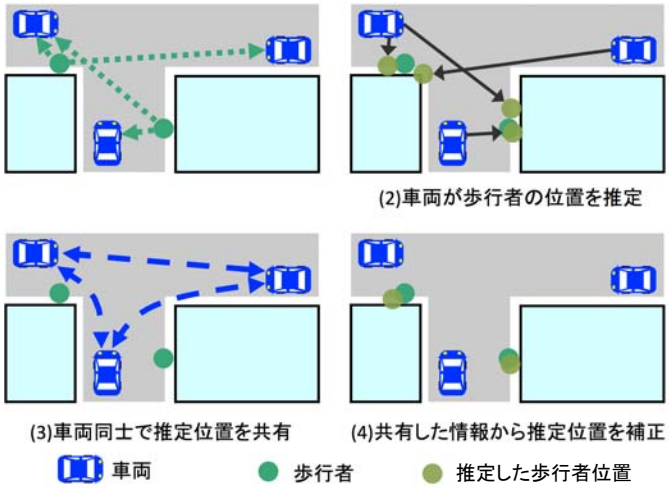

図 1 提案するシステムの動作例

2.2.1 歩行者側の動作

歩行者は 2.4GHz 帯で通信可能な端末を保持し，IEEE 802.11g を用いて通信する．この端末を用いて約 500ms 毎に，各端末にユニークに付与された ID を記載したパケットをブロードキャストする．周辺歩行者との通信衝突の可能性を低減するため，最低待ち時間である 500ms に最大 50ms のランダム待ち時間を追加する．GPS による位置情報の利用が可能であれば，その尤度情報とともにパケットに付与するが，§2.1 で述べたように，本研究では GPS の利用が不可能である環境を想定しているため，今回は歩行者の位置情報は利用しないものとした．

2.2.2 車両側の動作

車両は 2.4GHz 帯での通信が可能なスマートアンテナと 700MHz 帯での通信が可能な装置を搭載する．2.4GHz 帯の通信には IEEE 802.11g を用い，700MHz 帯の通信には ARIB STD-T109 を用いる [4]．歩行者からのパケットを受信した場合，電波の到来角 θ と受信信号強度 S から歩行者の位置を推定する．文献 [10] より，通信に使用している周波数 λ と送信源のアンテナ高 h_b 及び信号の送信レベル T_x，自身のアンテナ高 h_m が既知であれば，電波の減衰の度合いから互いの距離 d を推定可能である．今回は以下に示す伝搬損失の中央値を求める式から距離の推定を行った．

$$S + T_x = L_{bp} + 6 + 20\log(\frac{d}{R_{bp}}) \tag{1}$$

このとき R_{bp} はブレークポイントの距離であり，L_{bp} はブレークポイントでの基本的な伝搬損失の値である．これらの値は以下の式から求められる．

$$R_{bp} = \frac{4h_b h_m}{\lambda} \tag{2}$$

$$L_{bp} = |20\log 10(\frac{\lambda^2}{8\pi h_b h_m})| \tag{3}$$

式 (1) は $d \leq R_{bp}$ の場合に用いられる式であるが，今回想定する環境においては R_{bp} が約 72m となり，一般道を走行する車両の制動距離を大きく超えているため，$d > R_{bp}$ の場合の計算は必要無いと判断した．歩行者位置を推定した車両は，700MHz 帯を用いて歩行者推定位置を周辺車両にブロードキャストする．ブロードキャストされる情報には歩行者の推定位置の他，歩行者のパケットの信号強度と受け取った時刻及び自身の ID が含まれる．このとき，周辺車両との通信衝突の可能性を低減するために，位置推定完了からブロードキャストまでの間には $|S(dB)| \times 4$ms の待ち時間を設ける．これらの情報を受け取った車両は，自身が持つ推定結果と合わせて重み付け処理をすることで最終的な歩行者推定位置を決定する．重み付けは全体の受信信号強度の和 S_{sum} に対する各受信信号強度 S の存在比率を用いて行われる．

3. シミュレーション環境

シミュレータには，Space-Time Engineering 社の Scenargie1.6 を用いた [11]．シミュレーション環境には約 100m×100m の十字路を中心とした地図を用い，市街地におけるビル群を模した構造物を配置した．区域内には歩行者に見立てた通信ノードを 6 ヶ所に配置し，直進するものが 1 つ，途中で曲がるものが 1 つ，その場で静止しているものが 4 つとした．また，歩行者の信号の送信レベル T_x は 20dBm，地面からのアンテナ高 h_b は 1.5m で固定とした．東西方向に伸びる道路には走行車両を 11 台配置し，速度はどれも一律 13m/s とした．南北方向に伸びる道路には停止車両を，0〜6 台の間で 2 台づつ台数を変えて配置した．また，各車両の信号の送信レベル T_x は 20dBm，地面からのアンテナ高 h_b は 1.5m で固定とした．スマートアンテナの角度推定誤差については，一意に角度誤差を定める事が困難であったため，± 1 度，10 度，15 度，20 度，30 度の範囲内で，正規分布に従うものと仮定した．アンテナの

角度誤差± X 度に対し，範囲 [0,1] の一様乱数を $2X$ 回発生させた合計から X を減算する方法で，擬似的な正規分布に従う誤差を発生させている．また，シミュレーション時間は 60 秒とした．車体形状についてはシミュレーション結果に寄与しないため，今回は特に規定しないものとした．表 1 にシミュレーションパラメータ，図 2 にシミュレーション環境を示す．

表 1 シミュレーションパラメータ

項目	シミュレーション環境
シミュレーション範囲	100m × 100m
道路	片側一車線
道路幅	10m(東西)，5m(南北)
送信レベル	20dBm(歩行者)，20dBm(車両)
アンテナ高	1.5m(歩行者)，1.5m(車両)
走行車両	11 台
停止車両	0〜6 台
車両速度	13m/s
推定角度誤差	± 1〜30 度

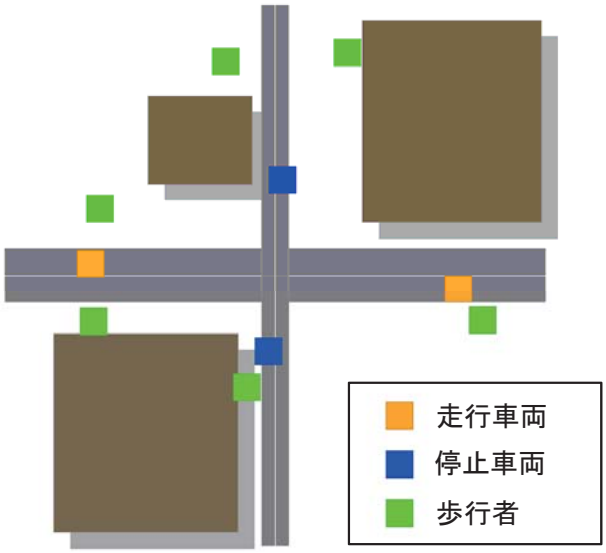

図 2 シミュレーション環境

4. 結果

我々が提案する 700MHz 帯を導入したシステムとの比較対象として，2.4GHz 帯のみを用いたシステムを用いる．これと比較した場合の，歩行者位置推定速度の改善度合いで提案システムを評価した．また，車両台数や角度誤差の変化に伴う位置推定精度の変化についても検討を行った．図 3 は各状態における平均推定時間を表したもので，図 4 は歩行者位置の平均推定誤差を表したものである．

4.1 推定時間

図 3 に各状態における平均推定時間を示す．平均推定時間は，走行車両がそれぞれ道路の東西端からシミュレーション環境内に出現した時間を起点として，各歩行者の位置推定を完了するまでの時間の平均である．停止車両が無い場合には，歩行者位置の推定時間は提案システムと 2.4GHz 帯のみのシステムとでは全く差が無かった．しかし，停止車両が存在する場合には，歩行者位置を推定するまでの時間が 2 秒以上短縮されている．これは走行車両と歩行者の通信が遮蔽物に妨害される場合でも，停止車両を介して歩行者の位置推定が可能であるためだと考えられる．同様の方式を 2.4GHz 帯のみのシステムについても評価しているが，走行車両と停止車両の間での通信も遮蔽物に妨害されるため，性能の著しい変化は見られなかった．今回想定している車両の速度から，提案方式は 2.4GHz 帯のみを用いる方式と比べて，歩行者の位置情報が取得可能となる距離が約 26m 手前になるということであり，これは速度が約 13m/s である車両の，濡れた路面上における制動距離より長い．このことから，700MHz 帯を用いた通信は交通事故の回避に有効であると結論付けられる．

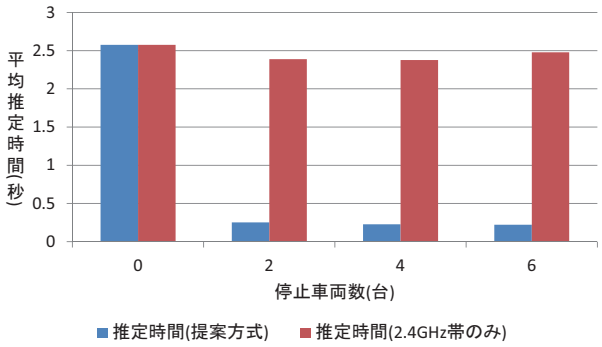

図 3 短縮された推定時間

4.2 推定誤差

歩行者位置の推定誤差については，アンテナの角度推定誤差よりも周囲の車両数が寄与していることが分かった．図 4 に各状態における推定誤差を示す．位置推定の短縮時間と同様，周辺車両の有無が大きく寄与しており，停止車両が 0 台の場合と 2 台の場合とでは結果に大きな差が出ている．これは，停止車両と自身の推定結果を重ね合わせる事で，誤差が低減できたものだと考えられる．角度推定誤差が± 15 度の時に，± 10 度の時よりも良好な結果が出ているが，これはシミュレーションの誤差によるものだと考えられる．実際の歩行者の移動軌跡と，車両が推定した歩行者の移動軌跡を図 5 に示す．アンテナの角度推定誤差の増加と共に推定位置の誤差も増加しているが，移動軌跡の全体的な傾向は一致している．また，車両同士で通信を行わなかった場合との比較のために，車両が単独で推定した

© 2013 Information Processing Society of Japan

歩行者の移動軌跡を図6に示す．複数の車両の推定結果を合成した結果の図5と比較して，明らかに推定誤差が大きいことが分かる．

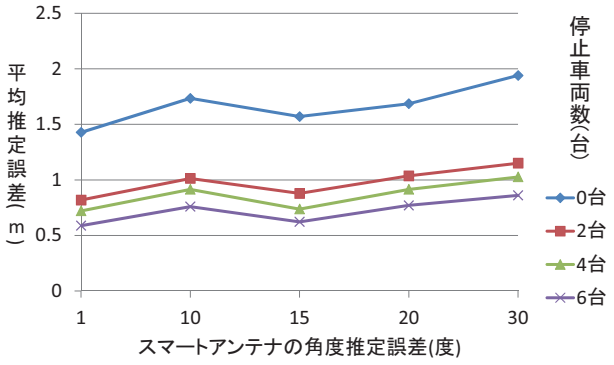

図 4　各状態における平均推定誤差

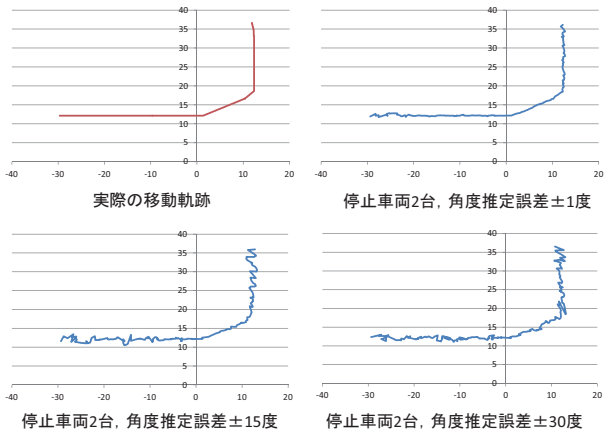

図 5　停止車両 2 台の場合の移動軌跡推定結果

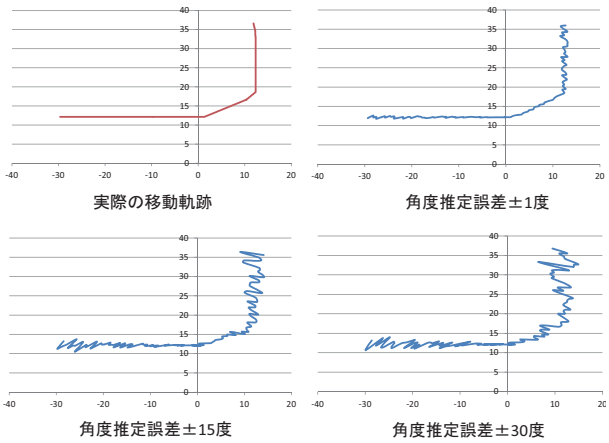

図 6　単独車両の場合の移動軌跡推定結果

5.　結論

歩行者と車両の間での歩車間通信が可能な状況であれば，運転者は知覚外の歩行者を把握できる，あるいは車両の自動制御によって漫然な運転から歩行者を守ることができると考えられる．しかしながら歩行者が保持できる通信端末には機能的，性能的な限界があり，優良なシステムではあるが現実的ではないといった事態が起こりうる．そこで，我々は歩行者端末に広く搭載されている 2.4GHz 帯の通信デバイスと，新たに ITS 用に割り当てられる 700MHz 帯の両方を用いた交通事故回避システムを提案した．700MHz 帯の電波は遮蔽物による影響を受けにくいといった特徴があり，建造物で遮られた歩行者の位置情報を，他の車両を介して迅速に共有することができる．路側機等の新たなインフラの設置も必要としないため，導入にかかるコストは最小限に抑えられる．

今回は Scenargie を用いてシミュレーションを行い，交通事故の回避における 700MHz 帯の有用性について検証した．2.4GHz 帯のみを用いた通信システムと比べ，700MHz 帯を用いる提案方式は，周辺車両が存在することを条件に，市街地における歩行者位置の推定時間を 2 秒以上短縮出来るという結果が得られた．また，同様に周辺車両が存在すれば，歩行者位置推定の精度も向上するといった結果が得られた．提案方式は市街地環境での利用を想定しており，周辺車両は十分に存在すると考えられる．よって、提案方式は多くの場合に有用であるといえる．

今回行ったシミュレーションでは，車体による遮蔽や雑音については考えていない．今後は更に現実に即した環境でのシミュレーションを行いたいと考えている．また，実際の市街地における車両の流入や人の密度なども併せて検討していく必要があると考える．シミュレーションは比較的短時間かつ小規模のものであったため，より大規模，長時間の稼働に対してはシステムが正常に機能しない可能性がある．それらへの対応は勿論であるが，不要な情報を広げすぎない，残しすぎない工夫もまた必要となるだろう．加えて，歩行者と車両の衝突回避のためには歩行者位置の推定ではなく，歩行者の未来位置の予測を行う必要もある．車両の進行方向と歩行者の予測される移動軌跡を照らし合わせることで，より正確な車両制御を行うことが可能になると思われる．

参考文献

[1]　警察庁　交通局交通企画課　平成 24 年中の交通事故死者数について
http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001105450

[2]　警察庁　交通局交通企画課　交通事故統計 (平成 24 年 11 月末)
http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/

© 2013 Information Processing Society of Japan

List.do?lid=000001104745
[3] ITS 情報通信システム推進会議　700MHz 帯を用いた運転支援通信システムの実験用ガイドライン http://www.itsforum.gr.jp/Public/J7Database/p34/ITSFORUMRC006V1_0.pdf
[4] (社) 電波産業会　700MHz 帯高度道路交通システム標準規格 (ARIB STD-T109) http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/1-STD-T109v1_1.pdf
[5] 坪井務，松本徳博，市川広輝，山田出，「車載無線通信の市街地における衝突防止ケーススタディ」，電子情報通信学会技術研究報告，ITS，111(441)，pp.147-152，2012-02-13
[6] 佐藤勝善，飯草恭一，原田博司，「交差点構造における720MHz 帯車両間電波伝搬特性」，電子情報通信学会技術研究報告，ITS，108(424)，pp.133-138，2009-01-28
[7] 藤本和史，山口良太，中西優喜，和田友孝，岡田博美，「歩行者－車両衝突回避支援システム (P-VCASS) の開発」，電子情報通信学会技術研究報告，IN，109(189)，pp.75-80，2009-09-03
[8] 澤悠太，木谷友哉，柴田直樹，安本慶一，伊藤実，「指向性アンテナおよび車車間通信を用いた歩行者位置追跡手法とその評価」，情報処理学会研究報告，ITS，2009(24)，pp.31-38，2009-02-26
[9] 野場敏裕，小川恭孝，西村寿彦，大鐘武雄，田中誠，佐々木邦彦，「車載アレーアンテナによる歩行者方向推定に関する基礎的考察」，電子情報通信学会技術研究報告，A・P，109(117)，pp.177-182，2009-07-01
[10] ITU-R　Recommendation ITU-R P.1411-6 http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1411-6-201202-I!!PDF-E.pdf
[11] Space-Time Engineering ホームページ http://www.spacetime-eng.com/jp/labSimulator.html

© 2013 Information Processing Society of Japan