

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24650028

研究課題名(和文)LED通信の特性を考慮した車車間通信プロトコルの開発

研究課題名(英文)Development of Inter-vehicular communication protocol using LED communication

研究代表者

東野 輝夫 (Higashino, Teruo)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：80173144

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：近年のLED通信の技術革新により、信号機や車のヘッドライトなどのLED照明にLED通信機能を付与することで、車車間あるいは路車間で数Mbps程度の光通信と数cm程度の誤差の測距が行えるようになってきている。LED通信は見通し通信が可能であれば無線通信のようなパケット衝突を起こさずに複数の車両間との並行同時通信が行える。本研究では、走行車両群のリアルタイムな位置情報を高精度に推定するためのLED通信ベースの車車間通信プロトコルの開発を行った。提案プロトコルにより、従来の無線通信ベースの周辺車両群の走行位置推定方式より高精度に周辺車両群の位置推定が行えることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Recently, LED communication becomes popular, and LED lighting of traffic signals and vehicular headlights achieves a few Mbps as communication bandwidth. It also achieves a few cm measurement error. LED communication can transmit multiple packets in parallel if line-of-sight communication is possible while wireless communication causes packet collisions when two packets are sent simultaneously. In this research project, we consider ITS problems such as collision avoidance, collection of route information and real-time position estimation, and propose a LED communication based inter-vehicular communication protocol for estimating positions of neighboring vehicles in real-time. The proposed LED communication based protocol can achieve better accuracy for estimating positions of neighboring vehicles than traditional wireless communication based inter-vehicular communication protocols.

研究分野：モバイルネットワーク技術

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：高度交通システム 車車間通信 LED通信 通信プロトコル モビリティ 都市交通

1. 研究開始当初の背景

近年、ミリ波レーダーなどの測路デバイスを用いて、前方車両との車間距離が極端に短くなった場合に自動的に急ブレーキをかけて衝突を回避する機能を組み込んだ乗用車が開発されている。また、各車両の危険情報を車車間通信で後続の車両に伝搬させることで、多重衝突を回避しようとする研究などが行われている。しかし、車両の安全走行のためには、より高精度な周辺車両のリアルタイム状況把握が必要とされている。

2. 研究の目的

LED通信の技術革新により、信号機や車のヘッドライト・テールライトのLED照明にLED通信機能を付与することで、車車間(あるいは路車間)で10Mbps以上の光通信が可能になってきている[1, 2, 3]。LED通信は見通し通信が可能であれば無線通信のようなパケット衝突を起こさずに複数の車両間で並行同時通信が可能である。本研究では、周辺走行車両群の走行位置のリアルタイム推定に関して、LED通信の特性を考慮した新しい車車間(路車間)通信プロトコルを考案し、その効率や精度などを明確にすることを研究の目的とする。

3. 研究の方法

LED通信モジュールをベースにLED通信の特性を分析し、LED通信のシミュレーションに必要な通信モデルを構築する。得られたLED通信モデルを元に、LED通信の特性を考慮した新しい車車間(路車間)通信プロトコルを考案する。一般に、LED通信機能付信号機や車両の割合が低い場合は、車両間で十分に情報交換できない可能性がある。そのような場合でも、LED通信機能を保持する周辺車両や対向車線の走行車両が非保持車両の位置やスピードなどの走行状況を強調して推定し、LED通信機能付車両間で効率よく情報交換できる仕組みを構築することで、LED通信機能付車両の割合が低い状況でもある程度の性能が得られるプロトコルを考案する。

上記のプロトコルの検討と並行して、申請者らがIEEE Trans. on Vehicular Technology誌(Vol. 59, No. 2, pp. 627-637, 2010)で考案した現実的な車両モビリティ(microscopicモビリティ)を元に、周辺車両群との見通し通信可能時間・確率や各車両の加減速の速度変化を現実的な車両の速度変化にできるだけ合わせて評価できるような車両走行モデルを構築し、それらをもとにLED通信シミュレータを開発し、提案手法の評価を行う。

4. 研究成果

本研究では、それぞれの車両が信号機や周辺車両に取り付けられたLED光源を利用し、対象までの距離を求め、自車両及び周辺車両の位置推定を行う。それぞれの車両が推定結果を通信し合うことで、不可視の位置にいる

車の座標情報も得られる。一般に、推定に用いる情報が多いほど推定位置の精度が高くなり、高精度な推定が実現出来る。

この提案手法について、位置推定の精度や周辺車両の認識率をシミュレーションにより評価した。性能評価は、様々な交通環境、状況を考え、状況別に評価を行った。具体的には、信号機から信号機までの間隔、車両の加減速の有無、道路上を走行する車両密度、LED通信機器及びイメージセンサの装備率等のパラメータを変化させ、その変化が推定精度や認識率にどう影響するかを評価した。

シミュレーションにおいては、交通シミュレータVISSIM[4]で車両のモビリティを作成し、その車両のモビリティとあらかじめ作成した信号機の座標情報を本手法を実装したプログラムに入力することで行っている。この性能評価から、想定した各状況において、シミュレーション上で位置誤差が数cmから数十cm程度の高精度な位置推定が行えたことや、直接目視できない周辺車両を含め高精度で周辺車両をリアルタイム認識できることを確認した。

4.1 LED通信デバイス

LED通信デバイスではLEDを高速に点滅させ、その点滅を特殊なイメージセンサで捉えて、実効1Mbps以上の高速通信を行うことができる。これをLED通信と呼ぶ。受信側のイメージセンサには、数百万個以上の画素がアレイ状に配置されているため、送信元LED光源が複数あるときでもLEDの信号を混信することなく並行受信可能である。

また、LED通信用の特殊なイメージセンサは、光信号を受信するための“通信用画素”と画像取得のための“撮像用画素”とが画素アレイとして交互に配置されており、画像の取得と光信号の受信を同時に行うことができる。さらに、取得した画像から画像処理などを行うことでLEDの向きを正確に捉えることができる。また、受信側では複数のLED間の画素上の距離と、受信したデータが含むLED間の距離情報から、送信元のLEDまでの距離を誤差数cm程度の精度で求めることができる[3]。これらは車車間、路車間の通信にも応用できる。

4.2 目標とする性能と想定する環境

衝突防止などをはじめとした安全走行支援システムを実現するためには、自車両の位置情報に加え、死角に存在する車両も含めた周辺車両の位置情報が一定周期ごとに獲得できることが望ましい。我々の従来の研究では、得られた位置情報の精度は1m前後に留まっている。しかし、衝突防止を考えた場合、車両がどの車線を走行しているか等を正確に判別する必要がある。具体的には、一車線の幅はおよそ3m程度であり、一般乗用車の幅は2m程度であるため、位置誤差が50cm以下になれば、実環境においても十分に車線を

認識することができると考えられる。実際には、さらに位置誤差を抑えることが望ましい。

まず、各車両は GPS 受信機を搭載し、LED 送信機器の機能を有したヘッドライトやテールライト、LED 受信機としてイメージセンサの 3 点を保持していると仮定する。LED ライトは車両のヘッドライトやテールライトへの普及が進んでおり、これらへ信号の変調器を加えることで、LED 通信の送信機として活用することが出来る。また、イメージセンサに関しても、安全運転支援や事故時の証拠保全などの目的から、高級車を皮切りにイメージセンサを搭載する車両が増えつつあり、これらを LED 通信用のイメージセンサへ置き換える可能性はある。また、提案手法では、議論の単純化のため、各車両はシステム起動時に毎回ランダムで決まるような一時的な ID を利用できるものと仮定し、信号機は自身が設置されている緯度、経度情報を保持しているとする。また、受信車両から信号の座標を正確に測距するため、LED 送信機が信号の両端に取り付けられており、自身の座標情報と、LED 送信機間の距離を LED 通信によって常に発信しているものとする。

LED を用いた測距の際の誤差に関して、文献[3]では、対象までの距離ごとに測距誤差を求め、55m 程度まで 0.1m 程度の誤差で距離を測定できることが確かめられている。そのため、本研究では LED によって測定した相対距離の誤差は、標準偏差が $0.1m/2$ で平均が 0 の正規分布に従うと仮定した。

また、LED の角度測定誤差については、文献[1]によれば、高解像度のイメージセンサを用いれば、0.1 度以下となる。そのため本研究では角度誤差を 0.1 度と仮定する。角度誤差が 0.1 度と仮定すると、対象に向かって横方向のイメージセンサによる測定誤差 E_x は、対象までの距離を x とすると、

$$E_x = x \tan(0.1)$$

となる。また、GPS の測定誤差は標準偏差が 5m で平均が 0 の正規分布に従うと仮定する。

現在研究開発が進められている多くの安全走行支援アプリケーションでは各車両が一定間隔で自身の位置情報を送信する環境を想定していることから、提案手法では一定間隔のタイムスロットを基準に動作するものと仮定する。具体的には、各車両はタイムスロット毎に自車両および近接車両の位置を更新し、次のタイムスロットで、その推定位置情報を LED 通信によって交換し続けるようなプロトコルを考える。

4.3 LED 通信を用いた協調型位置推定手法

提案手法における位置推定では、各車両はタイムスロットごとに以下の動作を行う。

1. 推定情報の受信と線形予測 (B)
2. 自車両の推定情報の更新 (A)
3. 周辺車両の推定情報の更新 (A)
4. 推定情報の送信 (B)

通信環境に関する詳細を説明した後、それ

表 1 カーデータ E(id) が保持する変数一覧

変数名	説明
id	識別用車両 ID
(x, y)	推定位置座標
T	推定位置更新時刻
(V _x , V _y)	速度ベクトル
V _t	速度の取得時刻
byGPS	情報が GPS に基づいたものかどうかの判別情報

ぞれの動作 (A) と (B) の処理の詳細を述べる。

通信環境としては、各車両は、1 台分の車両位置推定情報を表 1 のようなカーデータ E(id) として保持する。以降、E(id) を車両 “id” の推定情報とする。E(id) は、車両 ID(id)、更新時刻(t)、xy 座標(x, y)、速度ベクトル(V_x, V_y)、速度の観測時刻(V_t)、GPS に基づいているかの判別情報(byGPS) の組から構成される。

ここでは、カーデータのサイズは 32byte を想定している。1 パケットは 1KB とし、自車両および周辺車両についてのカーデータ 32 台分をパケットにつめ、車両間でパケットを送受信する。また、通信速度は 1Mbps を想定しており、1 パケットの送出にかかる時間(以下、パケットサイクル)は 1/128 秒となる。また、各車両は Ts タイムスロット(更新間隔)毎に、保持する推定情報を更新する。更新間隔 Ts のデフォルト値は 0.2 秒である。

(A) 自車両位置の推定と更新

自車両の位置推定については、自車両から見通せる範囲に信号機がある場合、信号機の位置を基準に自車両位置を推定する。このときの推定位置を信号機位置に基づく推定位置と呼ぶ。自車両から見通せる範囲に信号機がない場合は、可能な限り周辺車両から受信した信号機位置に基づく推定位置を用いて自車両の位置情報を更新する。いずれの測距も出来なかった場合には、GPS によって自車両の位置を測定する。以下では、これを GPS に基づく推定位置と呼ぶ。

次に、周辺車両位置の位置を推定する。イメージセンサによって周辺車両(以下、ターゲット a と呼ぶ)を観測できた場合には、自車両の推定位置座標に基づいてターゲットの推定位置座標を生成する。また、前のタイムスロットの間に受信したデータの中から、車両 a に関する情報を取り出す。しかし、この推定情報 E(a) は周辺車両が過去に保持していた推定データであるため、時間経過によって、推定位置の誤差が大きくなっている。そのため、推定情報 E(a) に含まれる速度情報(V_x, V_y)と速度の観測時間 V_t から、線形補間で車両の現在位置を推定する。

こうして得られた推定位置情報の単純平均を取ることで、ターゲットの推定位置情報を更新する。ただし、信号機位置に基づく推定位置が得られた場合はそれらのみで計算し、誤差が比較的大きいと思われる GPS に基づく推定位置は、そのような情報が得られなかった場合のみ計算に組み入れる。

(B) 送受信の処理

LED 通信を用いる場合、送信時にパケットの衝突を考慮する必要が無いので、各車両は可能な限りの頻度で推定情報 $E(id)$ を送信するものとする。それと同時に周辺車両が送信している情報を可能な限り受信し、 T_s 秒毎に受信したデータに基づき推定情報 $E(id)$ を更新する。同時に更新された推定情報 $E(id)$ 32 台分をパケットに纏め、それ以降は新しく更新されたパケットを送信する。

次にパケットの受信に関して説明する。提案する LED 通信デバイスでは、イメージセンサが捉えた範囲内に複数の送信元がある場合、それらの送信の全てを検出できるが、その機構的な制限から複数の情報を同時に受信することが出来ない。そのため、複数の送信元が検出できた場合は、そのうちのいずれのデータを受信するかを選択する必要がある。また、送信が非同期に行われることを仮定しているため、受信対象として選択した送信元がその時点で送信途中のパケットは完全には受信できず、その次の送信サイクルを待つ必要があり、全ての時間に有効なデータを受信できるとは限らない。本研究でのシミュレーションでは、送信元の切り替えタイムラグなどを考慮しない代わりに最悪の状況を考え、1 パケットサイクルごとに、待機、パケット受信、待機、パケット受信、を繰り返すものと仮定する。つまり、最悪時の更新間隔間に受信可能なパケット数 M は、更新間隔を T_s 、パケットサイクルを P_c とすると、 $M=T_s/2P_c$ として実験を行う。観測可能な周辺車両が M 台より多く存在した場合には、それらのうち、ランダムに M 台を選択して情報を受信するものとする。

4.4 性能評価

ここでは位置推定の精度に影響する誤差要因を考え、シミュレーション実験により、提案手法の性能を評価した。車両挙動に関しては、交通流シミュレータ VISSIM[4] を用いて生成した車両挙動ログデータを用い、通信のシミュレーションは LED 通信シミュレータを実装して評価を行った。

シミュレーション実験では、評価指標として推定位置の誤差と車両認識率を用いる。位置誤差は実際の車両位置と推定位置のユークリッド距離とし、自車両の誤差のみ計測し平均をとる。また、車両認識率は、各装備車両が対象領域内に存在する全車両(LED 通信機器非装備車両は含まない) に対して一定以下の位置誤差で位置を推定できた周辺車両の割合とする。本研究では推定位置の誤差

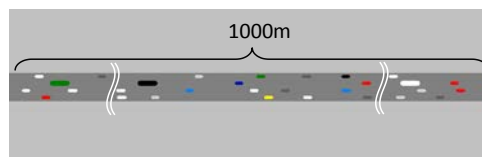


図1 直線道路マップ

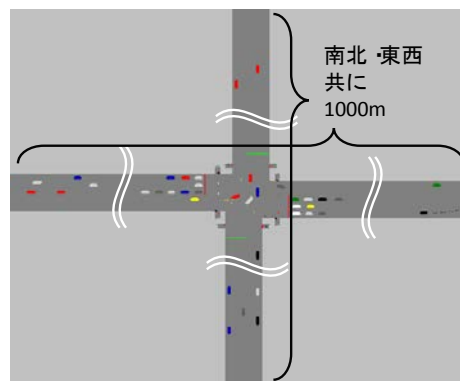


図2 交差点道路マップ

や車両認識率に影響すると考えられる要因として以下を挙げ、要因毎にシミュレーション実験により性能を評価した。

- (A) 信号機の間隔
- (B) 車両密度
- (C) LED 通信機器の装備率
- (D) 交差点

また、評価項目における誤差要因それぞれの影響を確認するために、以下の2つの車両走行シナリオを作成した。

・「信号機間隔」, 「車両密度」, 「LED 通信機器の装備率」による変化を調べるためのシナリオ: 提案手法の基本性能を調べるために直線道路を車両が走行する環境を想定する。このシナリオを Straight Road Scenario と命名する。このシナリオでは、図1のようなレーン幅 3.5m, 長さ 1km, 片側 2 車線の直線道路を車両が時速 50km で走行する。車両は適時車線変更を行うものとする。標準のパラメータとしては、信号機間隔:1km, 車両密度:2000 台/h, 装備率:100%, 速度:53 ± 5km/h を用い、実験ごとにそれらの一部を変化させ、シミュレーションを行った。走行する車両(ただし、車両は適時車線変更を行うものとする)については、車両密度、装備率を変化させる。また、信号機の設置間隔を変化させ、信号機の前では加減速が起こる。このような環境下で各場合の位置誤差や認識率の変化を調べた。

・交差点シナリオ: 提案手法が現実に近い環境でどの程度の性能であるかを調べるために、信号機により交通整理される十字型の交差点を車両が走行する環境を想定する。このシナリオを Intersection Scenario と命名する。図2に道路マップを示す。このシナリオでは、信号機により交通整理される環境としているため、加減速や右左折の車両挙動が起こる。ただし、右左折を行う場合と比較するため、車両が右左折を行う

表2 シミュレーションパラメータ設定

パラメータ	設定
GPS モデル	標準偏差 5m, 平均 0 の正規分布
LED による測距時の距離誤差	標準偏差 0.05m, 平均 0 の正規分布
LED による測距時の最大角度誤差	0.1 度
通信速度	1Mbyte
パケットサイズ	1Kbyte
見通し可能距離	100m
車の全長	4.76m
車幅	1.75m

ない場合も用意した。

各シナリオに対し、VISSIM 上で 30 秒間シミュレーションを行い、性能を評価した。ただし、評価対象範囲は、Straight Road Scenario については、1km 道路の中央 400m 区間としている。Intersection Scenario については、交差点の中央 100m 四方の範囲を評価対象範囲としている。また、シミュレーション時のパラメータは表2の通りとした。

(A) 信号機間隔による変化

信号機の間隔が長くなると、信号機が直接見えない車両が増加し、マルチホップで位置推定を行う車両数が増加する。しかし、その受信情報は時間経過によって推定誤差が大きくなるため、信号機の間隔が長くなればなるほど、自車両の位置誤差は大きくなる。

信号機間隔を変化させた際の自車位置推定結果を図3示す。自車両の位置誤差の平均は、信号機間隔が100m から1km まで変化しても大きな変化は見られなかった。これは、信号機が直接見えない区間に存在する車両が受信する推定情報の誤差を、線形予測を行うことで小さくできるためと考えられる。

また、認識率について、自車両から100m 以内にいる車両はおおむね100%認識し、100m 以上離れている車両も誤差10cm 以下で95%以上認識できた。このことから、自車両から100m 以内であるが他車両に遮られて見えない車両や自車両から100m 以上離れている車両等の直接見えない車両に関しても高精度で位置推定できることが確認できた。

(B) 車両密度による変化

道路の車両密度(交通量)を変化させた際の結果のグラフを図4、図5に示す。自車両の位置誤差の平均について見ると、交通量が増えるに従い小さくなっている。これは、交通量が増えると周辺車両から受信する情報量が増え、推定情報の平均化において用いる情報量が増えたためと考えられる。

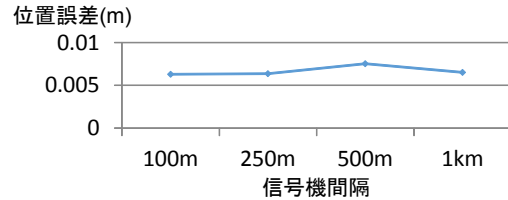


図3 信号機間隔を変化させた場合の自車両の位置誤差の変化

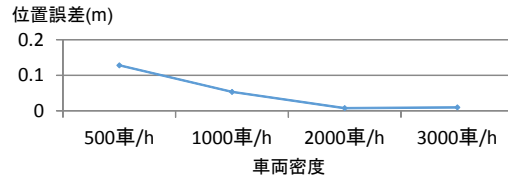


図4 車両密度を変化させた場合の自車両の位置誤差の変化

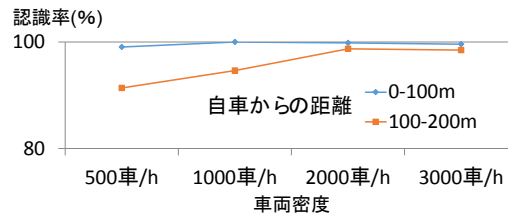


図5 車両密度を変化させた場合の周辺車両認識率の変化

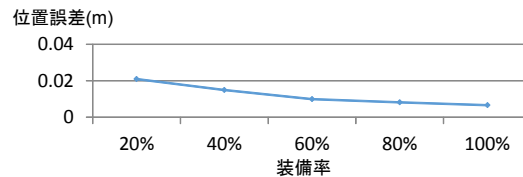


図6 車両密度を変化させた場合の自車両の位置誤差の変化

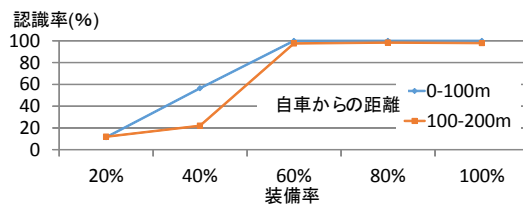


図7 装備率を変化させた場合の周辺車両認識率の変化

また、認識率についても交通量が増えると、自車両からの距離に関わらず100%に近づく傾向があることが確認できた。これは、周りから受信する情報量が増えたことで、推定情報の精度があがったことに加え、認識していない車両に関しての推定情報を受信する可能性が上がったことが考えられる。

(C) LED 通信機器の装備率による変化

LED 通信デバイスの装備率を変化させた際の結果のグラフを図6、図7に示す。自車両の位置誤差の平均について見ると、装備率が下がると、大きくなる傾向がある。非装備

車両は推定情報を持たずまた送信しないように、装備車同士の間には非装備車が走行すると装備車間の送受信ができなくなる。そのため、装備車が周辺車両から受信する情報量が減り、位置誤差が大きくなると考えられる。

また、認識率については、非装備車は観測できず位置を推定できないため、装備車を対象にしている。装備率が60%以上の場合は、認識率は100%に近い。ある程度の装備率以上であれば、推定情報の送受信によって周りの装備車の位置推定が行えていることがわかる。しかし、装備率が40%を切ると推定情報の送受信が非装備車によって阻まれることが多くなり、認識率が急激に下がる。

(D) 交差点

交差点を走行している車について位置誤差と認識率を調べたものを図8、図9に示す。これまでに述べた直線道路を車両が等速で走行する場合、交差点を車が右左折せずに直進する場合、交差点を車が右左折している場合、の3つの場合の比較を行っている。

交差点を車が右左折せずに直進する場合については、あまり誤差は大きくならないことが分かる。自車両の位置誤差は交差点を車が右左折している場合に大きくなっているが、これは車が右左折した場合、受信情報の線形予測を行った際の誤差が大きくなるためと考えられる。また、認識率については、交差点を車が右左折している場合のみ下がっているが、これは右左折中の車両の位置誤差が大きいためそれらの車両を一定誤差以下で認識できていないためと考えられる。

4.5 まとめ

本研究では、LED通信デバイスを用いて車両間で協調型位置推定を行う手法を提案した。LED通信では見通し外との通信は行えないが、提案手法ではマルチホップ通信を行うことで、見通し外の車両の位置に関しても把握出来るよう工夫した。想定した各状況において、シミュレーション上で位置誤差が数cmから数十cm程度の高精度な車両位置推定が行えたこと、また直接目視できない周辺車両も高精度で認識できることなどを確認した。

今後の課題としては、LED通信デバイス非装備車両への対応が挙げられ、ミリ波レーダー等の測域センサを利用してそれらについても観測できるようにするなどの対応が考えられる。さらに、実測データに基づいた車両モビリティを利用した性能評価を行い、さらなる課題発見、改良を行い、車両の衝突防止を目的としたアプリケーションなどに実際に適用できるかどうかを検討していく必要がある。

参考文献

- [1] 春山真一郎：“可視光通信”，電子情報通信学会誌，一般社団法人電子情報通信学会，Vol. 94, No. 12, pp. 1055-1059, 2011.

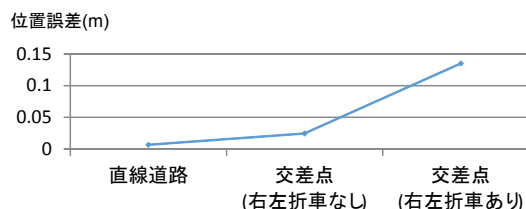


図8 車両挙動を変化させた場合の自車両の位置誤差の変化

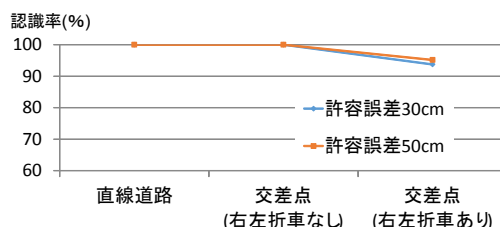


図9 車両挙動を変化させた場合の周辺車両認識率の変化

- [2] 高井勇，原田知育，安藤道則，宋松，安富啓太，香川景一郎，川人祥二：“空間光通信用イメージセンサの開発と車車間通信システムへの応用”，情報処理学会研究報告，Vol. 2012-ITS-50, No. 5, pp. 1-7, 2012.
- [3] 大村明寛，山里敬也，岡田啓，藤井俊彰，圓道知博，荒井伸太郎：“B-10-103可視光通信によるLEDアレイと車載高速度カメラ間の距離推定”，電子情報通信学会総合大会講演論文集，一般社団法人電子情報通信学会 Vol. 2012, No. 2, pp. 426, 2012.
- [4] PTV Group：“VisSim”，<http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-uk/products/ptv-vissim/>

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計2件)

- 大坪泰秀，梅津高朗，東野輝夫：“LEDによる通信・測距デバイスを用いた協調型車両位置推定手法の提案”，情報処理学会 第54回高度交通システム研究会 (ITS), 2013-ITS-54, IPSJ-ITS13054004. pdf, 2013年9月.
- Takaaki Umedu, Yasuhide Otsubo, Teruo Higashino: “Cooperative Positioning Method Using On-Board LED Communication and Distance Measurement Devices”, Proc. of IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (IEEE 2014 ICCE-TW), CD-ROM, May 2014.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東野 輝夫 (大阪大学)
研究者番号：80173144