

可視光通信による運転者支援システム

LED アレイと車載高速カメラを用いた路車間可視光通信

山里 敬也†

† 名古屋大学教養教育院

〒 464-8603 名古屋市千種区不老町 C3-1 (631)

yamazato@m.ieice.org

あらまし 本稿では、LED 信号機に見立てた LED アレイを高速に変調させることで、移動する車輻へ情報伝送を行う路車間可視光通信について述べる。LED 信号機から情報伝送を行うことで、ドライバーが目で見確認する信号情報に加えて、データ伝送も行うことができるため、交差点での安全運転支援などに有効である。本稿では、我々がこれまで行ってきた研究を中心に、デモも交え紹介する。とりわけ、可視光通信に高速カメラを用いる利点、とりわけ、路車間可視光通信へ応用する場合の利点について述べていく。

キーワード LED, ITS, 可視光通信, 並列光空間通信, 階層的符号化

Driver Assistant System using Visible Light Communications

Road-to-Vehicle Visible Light Communications using LED Array and On-Vehicle High-Speed Camera

Takaya YAMAZATO†

† Institute of Liberal Arts and Sciences, Nagoya University

C3-1, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8063 JAPAN

yamazato@m.ieice.org

Abstract We are conducting a study on visible light communications (VLC) using an LED traffic light and a high-speed camera equipped in a vehicle. Since we use the camera, we can capture and record surround images of the vehicle while receiving the data transmitted from the LED traffic light. This paper introduces the VLC system we are working on. Especially, this paper describes the advantages of road-to-vehicle VLC when the reception device is composed of high-speed camera.

Key words LED, ITS, Visible Light Communication, Hierarchical Coding

1. まえがき

LED は白熱灯に比べ長寿命で消費電力が低く、視認性に優れ発熱が少ないなどの利点を持つため、信号機や照明などに LED が用いられるようになった [1]。LED 照明は急速に普及が進んでおり、今後あらゆる所で用いられる可能性が高い。

LED は高速点滅が可能な半導体であるため、人間の目に絶えず光って見える程の速さで点滅させる事で、照明や表示として使うと同時に音声情報やデジタル情報を送信する通信機器として使うことも可能である [3], [13]。可視光を高速に変調させて行う無線通信を可視光通信と呼ぶ。可視光を発する部品を持つ製品は多岐にわたり、照明を始め、信号機やテールランプ、電光掲示板、携帯電話など無数に存在する。LED の普及に伴い、これらのあらゆる機器を可視光通信を行う情報伝送デバイ

スとしても用いることができれば、ユビキタス通信の実現につながると期待されている [7]。

可視光通信は、1998 年に慶應義塾大学理工学部の中川正雄教授により提唱された。2001 年から 2003 年までは本会第 3 種研究会「可視光空間通信研究会」の委員長として活躍された。中川氏は、可視光通信の研究、実用化、そしてその普及へと精力的に取り組んでおられるのは周知の通りである。2003 年には可視光通信コンソーシアム（現会長：慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科教授 春山 真一郎）を立ち上げ、可視光通信の研究、実用化、そしてその普及へと精力的に取り組んでいる [4]。可視光通信は、IEEE の標準化も終わり [5]、海外メディアでも可視光通信が取り上げられるなど [6]、世界的にブレイクする兆しがある [?]。

可視光通信については、中川氏及び春山氏による優れた解

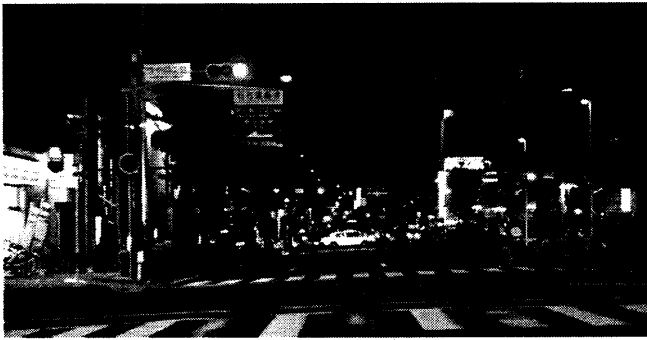


図 1 車両走行時に車内から撮影された画像

Fig. 1 Captured image from vehicle while driving.

説論文、記事などがあるので詳しくはそちらを参照してほしい [3], [7].

さて、可視光源の遍在性のため、あらゆる場面において可視光通信の適用を考えることができるが、本稿では走行車両が情報を受信する状況での可視光通信に着目する。図 1 は実際に走行時に車両内から撮影された画像である。この画像を見ても分かるように、走行時の車両からは数多くの信号機やテールランプ、外灯、表示などの光源を同時に確認することができる。例えば、LED 信号機や LED テールランプなどに可視光通信機能を付加すれば、信号機を設置している付近の道路状況や前方車両からの情報をドライバーにリアルタイムに提供するといった、高度道路交通システム (ITS) のためのユビキタス可視光通信が実現可能であると考えられる [8].

本稿では、可視光通信の中でも ITS への応用、取り分け、LED 式交通信号機から車両へ情報伝送を行う路車間可視光通信にターゲットを絞り紹介していく [8]~[10]. さて、著者等が検討している路車間可視光通信は受信機に高速度カメラを用いている点に特徴がある。高速度カメラは、その時間分解能が高いため、画像処理を軽くできる。これは、通常のカメラでは難しい高速な認識・追従を可能とするばかりでなく、通信のための受信機として考えた場合でも、高速伝送ができることになる。

本稿では、可視光通信に高速度カメラを用いる利点、とりわけ、路車間可視光通信へ応用する場合の利点について述べていく。

2. 可視光通信の特徴

目で見える可視光を用いた無線通信は、電波を利用する無線通信と比べて次のような特徴がある。

- 送信機 (光源) が目で見えるため、どこからデータ伝送を行っているのか分かる。受信機からすれば、送信機 (光源) が見れば受信できる。
- 光源を利用するため、比較的大きなパワーを利用できる。特に照明器具を用いた可視光通信の場合、数ワットから数百ワットのパワーを送信電力として利用できる。
- データ伝送範囲が明確であるためセキュアな通信ができる。送信機で照射した範囲内でのみ通信が可能となり、その光を遮蔽すれば通信は完全に遮断できる。
- 電波の使用が制限されている場所でも利用できる。たと

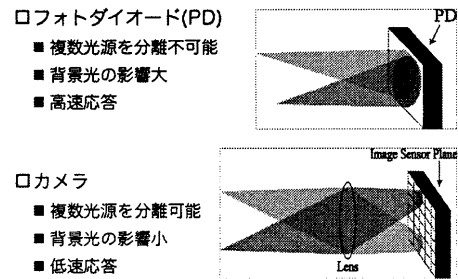


図 2 フォトダイオード (PD) とカメラ (イメージセンサ) の違い
Fig. 2 The difference between a photo-diode (PD) and a camera (image sensor).

えば、病院、電車、飛行機などでも利用できる。また、工場やデータセンターなど電磁ノイズが多く電波の利用が難しい場所でも利用できる。

- 電波法で規制されることは無い。可視光は電磁波の波長が 350 nm から 800 nm であり、可視光の周波数は 375 THz から 857 THz となる。これは、電波法で規定している「3,000GHz(3THz) 以下の周波数の電磁波」では無いため電波法で規制されることは無い。

2.1 送信用デバイス

可視光通信で用いられる送信用デバイスの代表的なものとして、LED がある。LED は半導体デバイスであるため高速点滅させることが可能である。筆者らの測定では、2MHz 程度までは安定して動作するが、更に高速動作させることも可能であり、文献 [11] では、青色 LED を用い、12MHz までは問題無いとしている。

2.2 受信用デバイス

可視光通信で利用される受信デバイス (光受信器) の代表的なものとしてはフォトダイオード (PD) [12]~[17] とカメラ (イメージセンサ) がある [18], [19].

PD は光通信において一般的な受信デバイスであり高速応答できる。しかしながら、屋外での利用を考えると、通常 PD は視野角が大きく外乱光の影響が無視できない。

一方、受信機にカメラを用いた方式は次の利点がある。

- カメラで撮影することにより、送信源である LED のみを背景光から分離、取り出すことができる。このため、背景光の影響を受けにくく、屋外でも利用できる。
- 個々の LED を独立に復調できる。例えば、複数の LED を独立に変調するとする。このとき、受信機は LED の数だけ並列にデータを受信できるので、データレートを向上できる。このような二次元的な並列伝送は PD では実現不可能であり、カメラを受信機に用いたときのみ可能となる [19]. これを並列光空間通信方式と呼ぶ。
- 複数の光源から送信される信号を並列に復調することができる。例えば、LED 信号機や LED テールランプといった異なる光源から異なる情報を伝送したとしても、それぞれを個別に復調することができる [20].

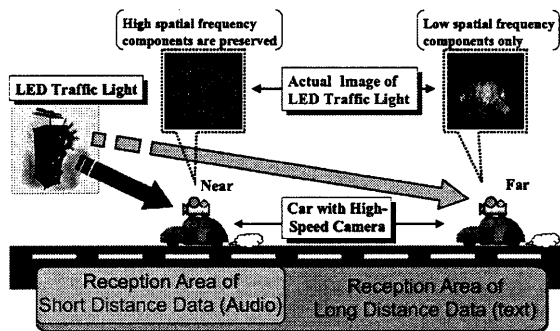


図 3 車両が遠方から信号機のある交差点へ進入するケースを想定した路車間可視光通信

Fig. 3 Road-to-Vehicle Visible Light Communications assuming the case where a vehicle approaching an intersection.

3. 可視光通信による運転者支援システム

3.1 想定しているシナリオ

筆者らは図 3 に示すように、車両が遠方から信号機のある交差点へ進入するケースを想定し、データ伝送装置として LED 式交通信号機、その受信装置として車両に搭載する高速度カメラを用いた路車間可視光通信システムの研究を行っている。LED 式交通信号機に通信機能を追加することで、運転者が視覚的に認識する信号情報に加えて安全運転支援情報も受信できるため、交差点事故の削減に寄与できるものと考えている。

本研究では、図 4 に示すように、路車間可視光通信による交差点支援システムを想定し、道路に設置された LED サイネージ、LED 信号機から車両に向かってデータ伝送を行うことを考える。

また、前方車両の LED テールランプからも情報伝送を行うことを想定する。本研究では、受信機に高速度カメラを採用するため、複数の情報源 (LED 光源) から同時に情報を受信する場が考えられる。特に車両走行時では、次から次に現れて通り過ぎていく無数の情報源と通信を行うことになる。この点において、LED 信号機や LED テールランプなど複数の LED 光源との可視光通信を想定する場合は、並列に受信することが可能な高速度カメラのほうが有利である。

以下、交差点支援システムで要求される伝送速度について述べ、続いて、高速度カメラのフレームレートについて述べていく。

3.2 交差点における運転者支援システムで要求される伝送速度

交差点における運転者支援システムでは、以下の 3 つのケースでの情報伝送が考えられる。

- LED 信号機から交差点の中央で右折待ちをしている車両へ運転支援情報を伝送する場合、
- LED 信号機から交差点を通過する車両へ運転支援情報を伝送する場合、
- 走行する前方車両から後方車両へ運転支援情報を伝送する場合

以下、それぞれの場合について要求される伝送速度について述

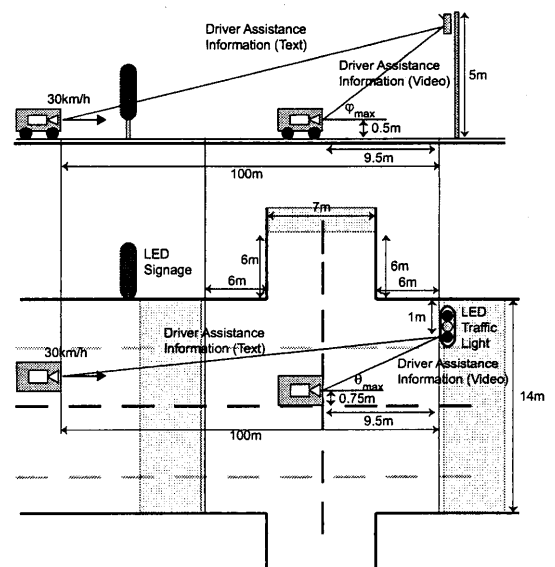


図 4 路車間可視光通信による運転者支援システム。

Fig. 4 Driver assistant system by road-to-vehicle visible light communication.

べていく。

3.2.1 LED 信号機から交差点の中央で右折待ちをしている車両へ運転支援情報を伝送する場合 (路車間通信 (静止))

まず、交差点の中央で右折待ちをしている車両へ LED 信号機から運転支援情報を伝送することを考える。

交差点の中央から LED 信号機までの距離を 9.5m、信号機の高さを 5m、カメラの高さを 0.5m とすると、垂直方向の画角は $\phi_{max} = \arctan \frac{5.0-0.5}{9.5} = 25.34^\circ$ となる。同様に LED 信号機が道路の端から 1m 離れて設置され、車両の右端が道路の中央に接し、車両の中央にカメラを設置したとすると、水平方向の画角は $\theta_{max} = \arctan \frac{7.0-1.0-0.75}{9.5} = 28.92^\circ$ となる。これより、カメラの解像度が 1024×1024 ピクセル、レンズの焦点距離が 35mm のとき、前方上方にある LED 信号機は問題無く撮影できる [21]。

ここで、運転支援情報として、LED 信号機の上部に設置したインフラカメラの映像をドライバーに伝送することを考えると、データ伝送速度としては 64kbps 以上は必要になる。音声情報であれば 32kbps もあれば良い [9], [23]。

なお、この場合は LED 信号機および車両ともに静止しているため、通信路は安定しており、ほぼ理想的であると言える。

3.2.2 LED 信号機から交差点を通過する車両へ運転支援情報を伝送する場合 (路車間通信 (走行))

続いて、交差点を通過する場合を考える。この場合に必要となるカメラの解像度およびレンズの焦点距離は、先に示した場合と同じである。

さて、文献 [22] によると、車両が安全に交差点を通過し得るために LED 信号機を視認できるための距離は、時速 30km/h では 100m 以上とある。時速 30km/h では約 6 秒で交差点を通過することになるため、ドライバー支援情報として画像は適切ではなく、テキスト情報で十分である。従って、100m 先か

ら数 kbps のテキスト情報が伝送できれば良い [9], [23].

なお、この場合、路車側の LED 信号機は高速に過ぎ去っていくことになる。よって、LED 信号機の検出・認識・追従特性が誤り率特性を支配する。

3.2.3 走行する前方車両から後方車両へ運転支援情報を伝送する場合（車車間通信）

車車間通信では、前方車両と自車両との相対的な位置、速度の変化は小さいことが想定される。これより、安定した通信が期待でき、高速伝送も可能である。ただし、前方車両と自車両のいずれも走行しているため、走行に伴う細かな振動の影響は避けられない。よって、車両が通過する場合の路車間通信ほどでは無いにしても、前方車両テールランプの検出・認識・追従特性が誤り率特性を支配する。

4. 高速度カメラを用いた路車間可視光通信

4.1 高速度カメラ

高速度カメラとは、通常のカメラより高速に撮影できるカメラを指し、一般に、100 frame per second (fps) のフレームレート相当を超えるフレームレートのイメージセンサをもつカメラのことを言う。文献 [24] によると、高速度カメラの性能は、高速イメージセンサのフレームレートと空間解像度（画素数）の積で性能が決まり、既に画素読み出しレートが 1 T pixel/s を誇るイメージセンサが実現されている。たとえば、画素数 10^6 であれば、フレームレートは 10^6 に達し、 $1\mu\text{s}$ に一枚の撮影ができることになる。

この高速なイメージセンサを可視光通信の受信機に用いた場合の性能について考えてみよう。点光源を捕捉するのに 4 ピクセル、また時間分解能として、フレームレートの半分のレートで点滅する光源を受信できると仮定する。さらに、送信機として、総数 $10^6/4$ 個の点光源を $10^6/2$ で点滅させ、それぞれ独立に個別の情報を伝送することを考え、その点光源の全てを 1 T pixel/s のイメージセンサで受信することを考える。この場合、100Gbps 強の通信ができることになる。

以上のような高速伝送は、イメージセンサの全ての画素を受信のために用いることで実現できるが、実際の利用シーンを考えると実現が難しい。先にイメージセンサの利点として送信源である LED のみを分離・取り出すことができることを述べた。よって、イメージセンサのもつ空間解像度は主に LED の検出・認識・追従に用いるのが自然である。しかし、ITS への応用を考える場合、光源そのものの移動、また、移動に伴う形状の変化（近づくと大きくなるなど）も考慮にいたした LED の検出・認識・追従を行う必要がある。容易に想像できるかと思うが、これを空間方向だけ行うのは困難であり、また、通常のカメラのような 30fps では時間方向での処理にも限界がある。

高速度カメラの場合、高速に点滅する点滅パターンを時間相関を取ることで情報源の検出ができる。これは、空間方向の情報を使わずに、無線通信などと同様に、時間方向のみで LED の検出・認識ができることを意味する。つまり、撮像形の限界に検出性能が依存せず、ロバストな検出が可能である [25].

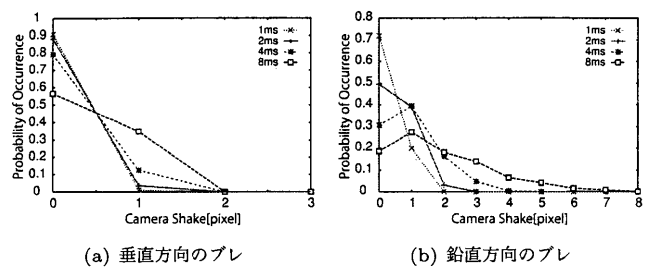


図 5 車両走行時における画像 (LED アレイ) の移動量 (30km/h, 通信距離 50m)

Fig. 5 The amount of pixel movements of LED array in driving situation (30 km/h, 50 m of communication distance)

4.2 運転者支援システムで要求される高速度カメラのフレームレート

図 5 に車両走行時における画像 (LED アレイ) の移動量を示す。ここで示した実測結果は、車両が時速 30km/h で走行し、通信距離が 50m での左右方向 (図 5(a)) および上下方向 (図 5(b)) のピクセル単位での画像変化 (移動量) を示しており、高速度カメラで異なる撮影間隔 (1ms, 2ms, 4ms, 8ms) の場合の実測値である。

ここで、通信距離 50m のデータを示した理由は、通信距離 50m で道路に凹みがあり、その影響で画像変化が最も大きくなっていったためである。これは、鉛直方向のブレが特に大きいことから確認できる。

この図より分かるように、撮影間隔を短く、すなわちフレームレートを高速にすることで、ブレは小さくできる。しかし、1ms でも 1 ピクセルのブレは生じており、このブレを完全に取り除くことは困難である。一方、フレームレートを遅くするとブレは大きくなる。

さて、図 5 の結果はフレームレート 1000fps の場合である。送受信機間で同期をとらない場合、1000fps で撮影した光源から情報を取得するには最低でも 2ms の間隔が必要となる。この場合、車体の振動によって図 5 に示すように、2ms 間に最大 2 ピクセル程度の光源位置のブレが発生する。走行速度が 60km/h であれば倍の 4 ピクセル程度のブレが生じると考えられる。この 4 ピクセルのブレを 1 ピクセルにまで軽減することを考えると、単純計算では 4000fps 程度は必要となり、さらに走行速度が速い場合も考えると 8000fps 以上は欲しいところである。

4.3 高速度カメラを用いた可視光通信の既存研究

高速なイメージセンサを用いた可視光通信の研究としては、文献 [27]~[29] がある。これらは、高速に点滅する点滅パターンを時間相関を取ることで情報源の検出を行っている。このため、撮像形の限界に検出性能が依存せず、ロバストな検出が可能である。しかし、本研究で想定しているような車両への伝送を目的としておらず、よって、そのまま交差点支援システムへ適用できるかどうか不明である。

車車間通信向けの高速度イメージセンサの開発例としては、文献 [30] がある。開発されたイメージセンサは、通信用の画素 (高速読み出しができる) と画像用画素 (通常と同様に 30fps で

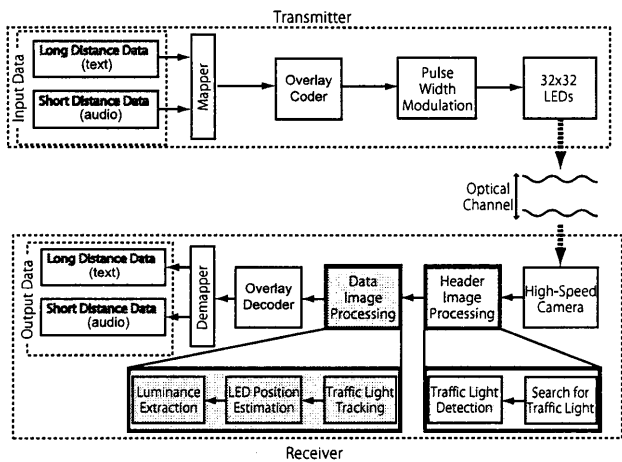


図 6 LED アレイと高速度カメラを用いた路車間可視光通信システムのブロック図。

Fig. 6 Blockdiagram of Road-to-Vehicle Visible Light Communication System using LED Array and High-Speed Camera

の読み出し)の2種類の画素を持つことを特徴としている。また、この文献では、このイメージセンサを用いた車車間通信実験についても紹介しており、走行時でも、10Mbpsの伝送を実現しており、種々の車両情報や動画(QVGA, カラー, 7.8fps)が伝送できることを報告している。このイメージセンサは既存のCMOS技術で製作されるため、仮に量産化された場合、市販のイメージセンサと同コストとなり、大変魅力的である。筆者等の知る限りにおいては、可視光通信用途に開発されたイメージセンサは、おそらくこれが初めてである。

5. LED アレイと高速度カメラを用いた路車間可視光通信

ここでは、著者等が検討しているLEDアレイと高速度カメラを用いた路車間可視光通信の概要を述べる[8]~[10], [23], [31]. 特に4.で述べた高速度カメラを用いることで、ロバストなLEDアレイの検出・認識・追従について、時間方向での同期および空間方向の同期と捉え説明する。

5.1 システムモデル

図6にシステムモデルを示す。

送信機は32×32の正方行列上に配置された256個のLEDで構成された“LEDアレイ送信機”を用いる。

受信機では、まず、LEDアレイ送信機を含んだ広範囲を高速度カメラによって撮影する。カメラはCMOSイメージセンサを持ち、これにより光信号を電気信号に変換し、結果を画像に出力する。その画像の中から送信機を見つけ、トラッキング、LEDの位置推定、LEDの輝度抽出を順に行う。

5.2 高速度カメラによるLEDアレイの検出・認識・追従

本研究では、受信機に高速度カメラを用いているため、送信機でのLEDの点滅との同期(時間方向の同期)、及び、送信機(情報源)の認識・追跡のための同期(空間方向の同期)の2種類の同期が存在する。そこで、時間方向と空間方向、それぞれ分けて同期について説明する。

まず、時間方向の同期について述べる。LEDの点滅とカメラ

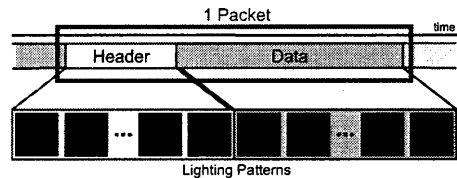


図 7 パケットフォーマット。

Fig. 7 Packet format.

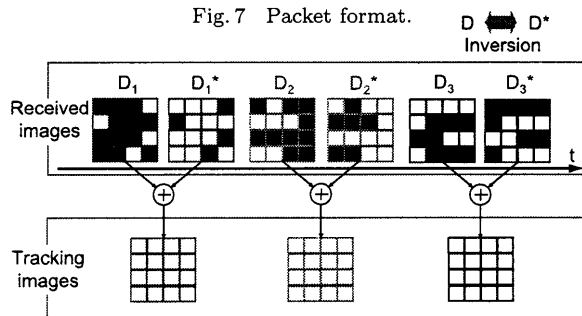


図 8 反転信号を用いた LED アレイ追跡例

Fig. 8 LED array tracking using the inverted signals.

の撮影のタイミングをまったく同じにさせることは、車両が走行している環境では物理的に困難である。そこで、LEDの点滅速度に対し、カメラの撮影速度を少なくともLED点滅周波数の2倍以上と設定することで、LEDとカメラ間の同期が取れていない場合に対応する。本研究では、先に述べた通り、カメラの撮影速度を1000fpsとしているため、LEDの実効点滅速度を500Hzと設定する。

図7にパケットフォーマットを示す。時間同期は、ヘッダ部で確立し、それ以降のデータ部については、ヘッダ部で確立した同期タイミングで動作させる。具体的には、上述した全点灯と全消灯がくり返される点滅パターンを用いて時間同期の確立を行っている。さらに、ヘッダ部のBarker系列を検知することで、情報源の光源かどうかの識別を行うことができる。以上のように時間方向でLEDアレイの検出・認識を行うため、撮像形の限界に検出性能が依存せず、ロバストな検出が可能である[25].

次に、空間方向の同期について述べる。これはLEDアレイの追従に相当する。空間方向では、情報伝送時においても、移動体と光源間の位置関係が刻々と変化するため、時間同期のようにヘッダ部で確立した光源位置を認識するだけでは不十分である。そのため、情報伝送を行っているデータ部でも光源追跡が必要になる。特に、本研究で対象としている自動車のように、移動体が振動する場合は数ピクセル単位での変化を追跡する必要がある。そこで、本研究では、先に述べた反転パターンを利用してデータ部での空間方向の同期を取る。

ここで、図8にその一例を示す。図中でDとあるのが送信情報から生成した点滅パターンであり、D*がDの輝度値を反転させた反転パターンである。高速度カメラでは受信したDとD*を足し合わせることでヘッダ部のような全点灯パターンを取得することができる。各LEDの送信データの元信号(D)に対してそれぞれ輝度値を反転させた反転信号(D*)を作り、DとD*を加算することで全点灯画像を生成する。この全点灯パター

ンを空間方向の同期に用いることで、容易に光源を追従することが可能となる [31].

6. むすび

本稿では、交差点における運転者支援システムとして、我々がこれまで行ってきた路車間可視光通信について紹介した。とりわけ、可視光通信に高速度カメラを用いる利点、とりわけ、路車間可視光通信へ応用する場合の利点について述べた。

可視光通信は”送信源が見えていれば”通信できる。電波を利用した無線通信との違いは、この点が大い。見える、ということはカメラが利用できることであり、このため画像処理の様々な技術を通信用に用いることが可能である。とりわけ、高速度カメラを利用することで、空間方向の処理だけでなく、時間方向での処理も行うことになり、通信での処理と画像での処理の両者の良い点を活かした処理ができるようになる。これは、画像計測や画像認識など、従来は空間方向の処理のみで特性が決定するようなものにも、時間方向の概念を入れることで、更なる特性改善ができることを示唆している。つまり、通信技術が画像処理分野へ貢献できる。このように可視光通信では、通信と画像の両方の技術が必須である。研究の側面からみたときの可視光通信の魅力はここにある。

謝辞

本研究は、香川高専・荒井伸太郎氏、長岡技科大・圓道知博氏、名大・藤井俊彰氏、岡田啓氏らとともに行っている可視光通信に関する一連の成果をまとめたものである。本研究の一部は、科研基盤 (C) の助成を受けて行われたものである。記して謝意を表する。

文 献

- [1] “Light emitting diodes (LED) traffic signal lights system for Singapore,” Project Profile, ST Electronics, Feb. 2006. <http://www.stee.stengg.com/lsg-grp/capabilities/pdf/transport/road/13022006/LED-Traffic-Lights.pdf>
- [2] G. Pang, T. Kwan, H. Liu, C.-H. Chan, “LED Wireless,” IEEE Ind. Appl. Mag., pp.21-28, Feb. 2002.
- [3] 春山真一郎, “可視光通信,” 信学論 (A), vol.J86-A, no.12, pp.1284-1291, Dec. 2003.
- [4] 可視光通信コンソーシアム (VLCC), <http://www.vlcc.net/>
- [5] IEEE 802.15 WPAN Visible Light Communication Interest Group (IGv1c), <http://www.ieee802.org/15/pub/IGv1c.html>
- [6] “Visible Light Communications Consortium Success in Long-Distance Visible Light Communication Experiment Using Image Sensor Communication,” Reuters, March 2009. <http://www.reuters.com/article/pressRelease/idUS122756+27-Mar-2009+BW20090327>
- [7] 中川正雄, “ユビキタス可視光通信,” 信学論 (B), vol.J88-B no.2 pp.351-359, Feb. 2005.
- [8] 山里敬也, “LED アレイと高速度カメラを用いた可視光通信の ITS への応用,” 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ誌, Vol.3, No.2, pp.45-53, Oct. 2009.
- [9] T. Yamazato, S. Haruyama [Tutorial] Visible Light Communications IEEE International Conference on Communications, Jun., 2011.
- [10] T. Yamazato, “Visible Light Communication and Its Application to ITS,” International Symposium on Emerging Short Range Communications, Jun. 2011.
- [11] Dominic O’Brien, “Visible light communications: achieving high data rates” 3rd Annual Smart Spaces: Smart Lighting ERC Industry - Academia Days, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY., Feb., 2011. http://smartlighting.rpi.edu/resources/PDFs/Smart_Lighting_ERC_OBrien_11_02_08.pdf
- [12] M. Akanegawa, Y. Tanaka, and M. Nakagawa, “Basic study on traffic information system using LED traffic lights”, IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 2, no. 4, pp. 197-203, Dec. 2001.
- [13] G. Pang, C. Chan, and T. Kwan, “Tricolor light emitting dot matrix display system with audio output”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 37, no. 2, pp. 534-540, March/April 2003.
- [14] 橋本紘樹, 小川 明, “LED を用いた光 AM 空間通信システム,” 第 3 回 ITS シンポジウム 2004, pp.437-442, Oct. 2004.
- [15] 湊, 伊多波, 小澤, 中川, “PWM 変調と AM 受信で構成された簡易可視光通信システム,” 信学論 (B), Vol.J88-B, No.12, pp.2390-2393, Dec. 2005.
- [16] 原 俊樹, 圓道知博, 藤井俊彰, 谷本正幸, “動的環境におけるカメラとフォトダイオードを用いたハイブリッド型長距離可視光通信システム,” 信学論 (A), vol.J90-A no.11, pp.883-884, Nov. 2007.
- [17] 岡田賢詞, 圓道知博, 谷本正幸, 藤井俊彰, 木村好克, “長距離可視光通信のための車載受信機の振動軽減,” 信学技報, ITS2008-59, pp.145-149, Feb. 2009.
- [18] H.S. Liu and G. Pang, “Positioning beacon system using digital camera and LEDs,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol.52, no.2, pp.406-419, March 2003.
- [19] 宮内 聡, 小峰敏彦, 後 輝行, 吉村真一, 春山真一郎, 中川正雄, “高速 CMOS イメージセンサを用いた二次元送受信機による並列光空間通信の提案,” 信学技報, CS2004-18, pp.7-12, May 2004.
- [20] 増田恭一郎, 山里敬也, 岡田 啓, 片山正昭, “LED 信号機と車載カメラを用いた可視光空間通信における階層的符号化方式,” 信学論 (A), vol. J90-A, no. 9, pp.696-704, Sept. 2007.
- [21] H.B.C. Wook, S. Haruyama, M. Nakagawa, “Visible Light Communication with LED Traffic Lights Using 2-Dimensional Image Sensor,” IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E89-A, No.3, Mar., 2006.
- [22] 山梨県道路工事設計マニュアル道路編 (道路) 第 13 章交差点設計 (平成 24 年 3 月 30 日) <http://www.pref.yamanashi.jp/douroseibi/sekkeimanyuaru.html>
- [23] 笠嶋他, “[技術展示] LED アレイと高速度カメラを用いた路車間可視光通信のリアルタイム伝送” 信学技報, vol.USN2011-89, pp.173-175, 2012 年 1 月.
- [24] 須川, CMOS イメージセンサにおける高速化技術の動向映像情報メディア学会誌, Vol.66, No.3, pp.174-177, 2012 年 3 月
- [25] 石井 抱 “[招待講演] 高速視覚センシングとその応用展開” 信学技報, vol.USN2010-60, pp.119-124, 2011 年 1 月.
- [26] 須川成利, “CMOS イメージセンサにおける高速化技術の動向,” 映像情報メディア学会誌, vol.66, no.3, pp.174-177, 2012 年 3 月.
- [27] 松下伸行, 日原大輔, 後 輝行, 吉村真一, 暦本純一, “ID Cam : シーンと ID を同時に取得可能なスマートカメラ,” 情報処理学会論文誌, vol.43, no.12, pp.3664-3674, 2002 年 12 月.
- [28] 香川景一郎, 他, “イメージセンサを応用した空間光伝送用受光デバイスの設計・試作,” 映像情報メディア学会誌, vol.58, no.3, pp.334-343, 2004 年 3 月.
- [29] 伊藤慎宣, 他, “IrID : 赤外線 LED による小型位置取得装置の実装と運用,” 情報処理学会論文誌, vol.49, no.1, pp.83-95, 2008 年 1 月.
- [30] 高井 勇, 原田知育, 安藤道則, 川人祥二, “空間光通信イメージセンサによる車車間通信システムの開発,” 信学技報, vol.ITS2011-39, no.2, pp.135-140, 2012 年 2 月.
- [31] 名倉 徹, 山里敬也, 荒井伸太郎, 岡田 啓, 圓道知博, 藤井俊彰, “車両走行時の路車間可視光通信のための LED アレイ追跡手法,” 信学論 (B), vol.J95-B, no.2, pp.326-336, 2012 年 2 月.