

イメージセンサ受信型可視光通信技術の開発

Image Sensor-based Visible Light Communication Technology

大嶋 光昭
Mitsuaki Oshima

青山 秀紀
Hideki Aoyama

中西 幸司
Koji Nakanishi

前田 敏行
Toshiyuki Maeda

要 旨

本稿では、イメージセンサを受信機として高速なサンプリングを可能とする新しい可視光通信方式を提案する。撮像画像1枚あたり1回のサンプルを行う従来の受信方式に対し、本方式では、CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 型イメージセンサのラインスキャン特性を利用して1枚の撮像画像から複数回のサンプリングを行うことで、従来方式の1000倍を超えるサンプリングレートを実現した。これにより、30 fps程度の通常のフレームレートのイメージセンサを受信機とした場合であっても、人間の目には知覚されない数千Hz以上の周波数で変調された可視光信号が受信できるようになり、照明機器や液晶ディスプレイのバックライトなどのさまざまな光源を外見はそのままに送信機として利用可能となった。筆者らは、この可視光通信方式が市販のスマートフォンで利用可能であることを確認し、さらに、本可視光通信方式を利用して実空間上の物体・クラウドサーバ・スマートフォンをつなぐことでさまざまなサービスを実現する光IDサービスシステムを開発した。

Abstract

This paper proposes a novel method of visible light communications (VLC) that realizes high-speed sampling using a normal-speed image sensor. While existing methods take a single sample from a single captured image, our method takes multiple samples from a single image utilizing a line-scan mechanism of a complementary metal oxide semiconductor (CMOS) image sensor. We have also made the sampling rate a thousand times faster. As a result, a high-frequency modulated signal, which is imperceptible and flicker-free for the human eye, can be used for a normal-speed image sensor and lighting fixtures and LCD displays can be utilized as VLC transmitters without undergoing any change in their appearance. We confirmed that it successfully works on smartphones on the market and implemented the Light ID Service System that provides various services by connecting real-space objects, cloud servers, and smartphones.

1. はじめに

可視光通信とは、人間の目に見える波長帯の光を搬送波として用いた無線通信技術を指す。照明を通信インフラとしても活用できることや、既に光っている光源を変調するだけであるため通信のためにエネルギーはほとんど必要ないこと、生体や電子機器にほとんど影響を与えないこと、電波法の制限を受けないことなどの利点から、数十年前より注目されていたものの、これまで普及することはなかった。その原因として、高速に制御できる発光素子が普及していなかったことと、受信に特別な装置が必要であったことが挙げられる。

近年、赤崎、中村らによる青色LEDの実用化(1993年)に伴い、照明や液晶ディスプレイのバックライト光源などへの応用が一気に進み、可視光通信の送信環境が整った。これに伴い、IEEE802.15.7[1]やCP1223[2]といった可視光通信規格が制定されたが、スマートフォンで受信するためには外付け受信デバイスが必要であったことが普及の障害となっていた。

一方で、飯塚らは、通常のスマートフォンのカメラで受信可能な方式として、ピカピカカメラを提案した[3]。これは、送信光源の色の変化の頻度(変調周波数)を一般

的なカメラのフレームレートである毎秒30回よりも遅くすることで、スマートフォンにアプリケーション(以下、アプリ)をインストールするだけで受信を可能とした方式である。しかし、変調周波数が十数Hzと低いこの方式では、光源の色の変化が人の目にもちらつきとして明らかに知覚されるため、照明などを送信光源として用いることはできなかった。また、通信速度も毎秒十数ビット程度であり、用途も限定されていた。

そこで、筆者らは、CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) イメージセンサのラインスキャン特性に着目し、これらの問題を解決する新しい可視光通信方式を開発した。従来のカメラ受信方式では、撮像画像1枚1枚の光源の状態(輝度や色)の変化を測定するため、光源の状態を測定するサンプリングレートは撮像フレームレートに等しかった。一方、本方式では、1枚の画像から複数の時点の光源の状態の測定を可能とし、サンプリングレートはフレームレートの1000倍以上となる。これにより、人間の目には一様に発光しているように感じられるような高速で変調させた信号を、スマートフォンのカメラで受信することが可能となった(第1図)。

さらに、筆者らは、この技術を基盤としたスマートフォンアプリ、送信機、光ID変換サーバからなる“光IDサー



第1図 イメージセンサ受信型可視光通信システム
Fig. 1 Image sensor-based visible light communication system

ビスシステム”を開発した。送信機は固有のID情報(以下、光IDと記す)を送信し、スマートフォンは読み取った光IDに関連付けられた情報をクラウドサーバからダウンロードして表示する。これにより、実空間に配置された光IDとクラウドサーバ上に配置された情報を紐(ひも)付け、応用範囲の広いさまざまなサービスを提供できる。

光IDサービスシステムの最大の特長として、レスポンス速度の速さと適切な通信範囲が挙げられる。同様のサービスを実現可能な技術には、QRコード(注1)、NFC(注2)、Bluetooth(注3)などがある。まず、QRコードの受信にはフォーカス処理のため数秒の時間がかかるが、光IDはフォーカス合わせは不要であり、数百ミリ秒で受信が完了する。また、NFCの通信範囲は数cm程度であるが、光IDは数mの距離からでも受信可能である。さらに、可視光はBluetoothの電波に比べて極めて指向性が高いため、付近に送信機が多数存在する状況であっても、ユーザーがカメラを向けた送信機の信号のみを正確に受信し、サービスを提供することができる。これらの特長を活(い)かすことにより、光IDサービスシステムによる新しいユーザー体験を提供することができる。

以下、本稿では、スマートフォンカメラによる高速受信方式の原理、照明などを送信機とするための可視光信号の変調方式、光IDサービスシステムの構成を解説し、最後に、今後の課題と展望について述べる。

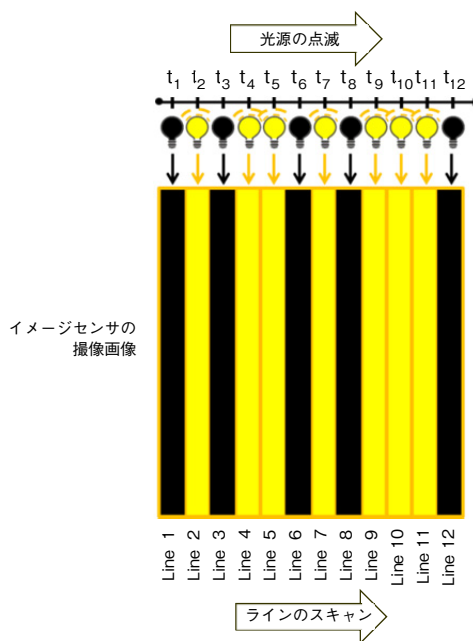
2. ラインスキャンサンプリング

今日のほぼ全てのスマートフォンやデジタルカメラにはCMOS型イメージセンサが搭載されているが、CMOS型イメージセンサで撮像された画像は、全体が厳密に同

(注1) (株) デンソーウェーブの登録商標または商標
(注2) ソニー (株) の商標
(注3) Bluetooth SIG, Inc.の登録商標

じ時刻の風景を写しているわけではない。CMOS型イメージセンサは、通常、1ラインごとにセンサが受光した光の量を読み出していく。そのため、この読み出しにかかる時間を見計らって、1ラインごとに時間差をおいて受光の開始、終了の制御が行われる。つまり、CMOSイメージセンサで撮像された画像は、少しずつタイムラグのある多数のラインを重ねた形になる。そのため、素早く動く物体を撮像した場合には、物体上端を撮像し始めた時点から物体下端を撮像し終わる時点までに物体が移動してしまい、物体が歪(ひず)んだように撮像される。

筆者らは、この、一般にはCMOS型イメージセンサの欠点とされる性質に着目し、イメージセンサによる可視光信号受信の高速化を実現した。すなわち、ラインごとに露光時間が微妙に異なっていることを利用することで、第2図に示すように、1枚の画像中から複数の時点における光源の輝度や色をラインごとに測定することができ、フレームレートよりも高速に変調された信号を捉えることができる。以降では、このサンプリング手法を“ラインスキャンサンプリング”と、同じタイミングで露光される1列の画素を“露光ライン”と記す。

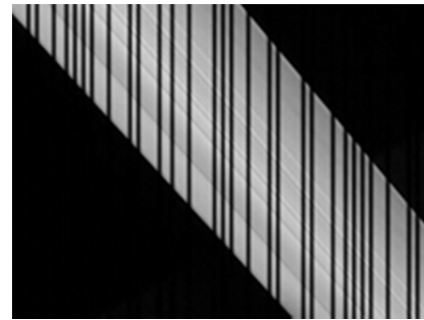


第2図 ラインスキャンサンプリングの原理
Fig. 2 Principle of Line Scan Sampling

ただし、通常の撮像設定では、高速で点滅する光源を撮影しても、点滅が露光ラインに沿った縞(しま)模様として現れることはない。なぜなら、通常の設定では、露光時間が光源の点滅周期よりも非常に長いいため、第3図(a)に見られるように、光源の点滅による輝度の変

化が均一化されてライン間の画素値の変化は極めて小さくなり、ほぼ一様な画像になるからである。そこで、露光時間を点滅周期程度に設定することで、第3図 (b) のように、光源の点滅の状態が露光ラインの輝度変化として観測することができる。第4図は、高速で点滅するLED電灯を撮像した画像であり、点滅のパターンが輝線のパターンとして明瞭に観察できる。

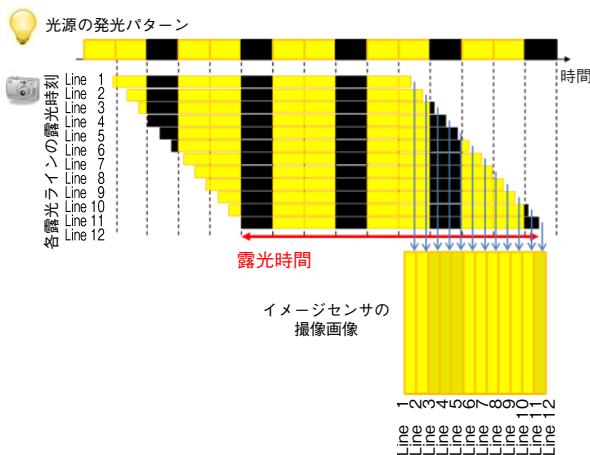
露光ラインは、通常、イメージセンサの長辺方向に平行になるように設計される。今日の多くのスマートフォンでは、1920×1080サイズの動画撮影が可能であり、4K解像度 (3840×2160) をサポートした機種も登場しつつある。そのため、フレームレートを30 fpsとすると、この方式を用いることで、毎秒32 400回から60 000回のサンプルが得られる。



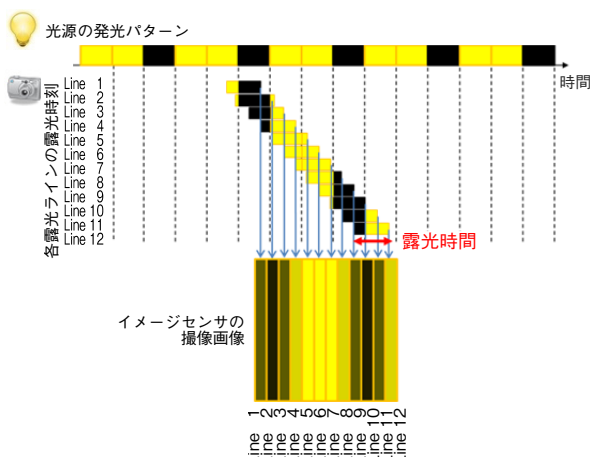
第4図 ラインスキャンサンプリング
Fig. 4 Image of Line Scan Sampling

3. 光源と変調方式

照明やディスプレイのバックライト光源として、高速に点滅させることが可能なLEDが普及し始めたことで、さまざまな機器を可視光通信の送信機として利用することが可能となった。具体的には、第5図に示すように、照明器具だけでなく、液晶ディスプレイや、照明看板、さらには、スポットライトで照らされた物体からの反射光も可視光信号の送信光源として利用できる。



(a) 露光時間が長い場合



(b) 露光時間が短い場合

第3図 露光時間の長短における撮像画像
Fig. 3 Image retrieval in conditions of long/short exposure duration



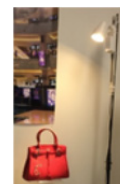
(a) LED 照明



(c) 電照看板



(b) デジタルサイネージ



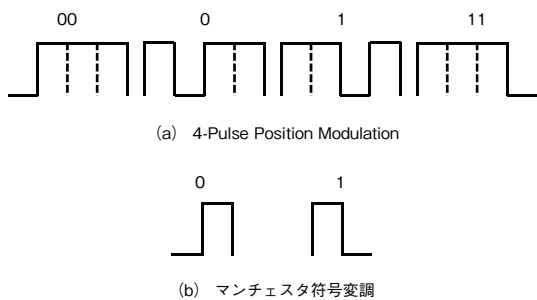
(d) 反射光

第5図 可視光通信用送信機
Fig. 5 VLC transmitters

ただし、これらの光源は、可視光信号送信のために自由に点滅させられるわけではない。送信による点滅が人間に見えてしまうようでは、照明などの本来の機能を損ねてしまう。そのため、送信信号は人間の目にちらつきが感じられないよう、融合周波数 (人間の認識できる限界の周波数) である50 Hz以下の周波数成分を極力含まないようにする必要がある[4]。また、できるだけ明るく照らすことも求められる。

このような要求に応える変調方式として、4PPM

(4-Pulse Position Modulation) と呼ばれる変調方式がある。これは、第6図 (a) に示すように、光源の明暗の4回の組み合わせで2 bitを表現する方式で、4回のうち常に3回が明るく、1回が暗い状態となるため、信号の内容によらず明るさの平均は3/4=75%となる。同様の方式として第6図 (b) マンチェスタ符号変調方式があるが、これは2状態で1 bitを表現する方式で、変調効率は同じ50%であるが、平均輝度は50%と低くなるため、4PPMのほうが適していると言える。そのため、次章で述べる光IDサービスシステムでは、4PPMを基本とした変調方式を採用した。



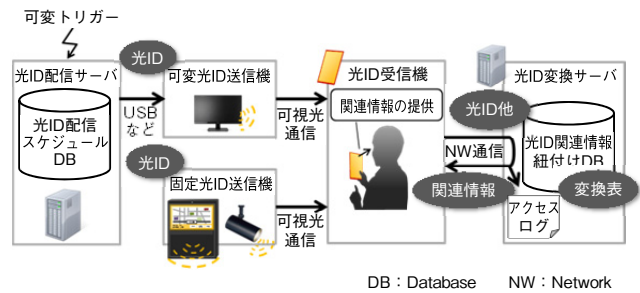
第6図 人間の目には輝度変化を感じさせない変調方式
Fig. 6 Modulation schemes that are imperceptible to the human eye

4. 光IDサービスシステム

4.1 全体構成

光IDサービスシステムは、光IDの送信機と受信機（以下、光ID送信機、光ID受信機と記す）、光IDに紐付けた情報を管理する光ID変換サーバの3つのシステムから構成される。光ID送信機には、表示する映像やコンテンツに合わせて送信IDを変更する可変光ID送信機と、製造時に組み込まれた光IDを変わりなく送信し続ける固定光ID送信機の2種類がある。光IDを用いてエンドユーザーに情報を提供する流れを第7図に示す。

光ID受信機は光IDを受信したのち、光ID変換サーバに問い合わせて紐付け管理されている関連情報を取得して情報の提供を行う。その際、光ID変換サーバへのアクセスログを記録しておくことで光ID受信頻度による課金処理を行うことができる。さらに、光ID送信機の利用率と利用時間による広告価値の算出や、光IDが受信された場所と利用時間によるエンドユーザー行動分析などに展開することが可能となるなど、ログ解析による新規サービス展開が考えられる。

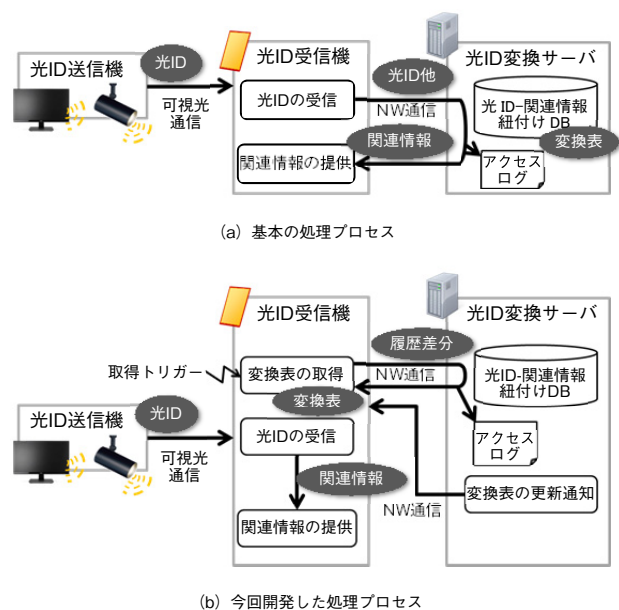


第7図 光IDサービスシステム全体構成
Fig. 7 Overview of Light ID system

4.2 光ID変換処理

光IDを受信する際に、都度変換サーバにアクセスして光IDに紐付く関連情報を取得するという構成（第8図 (a)）では、ネットワーク通信の遅延によりエンドユーザーへの情報提供スピードが遅くなり、光ID技術の特長である高速ID受信、つまり、高速レスポンスのメリットが半減してしまう。そのため、光ID変換サーバへのアクセス頻度を抑制しつつ、都度光ID変換サーバへアクセスするのと同等のログ記録を実現する必要がある。

そこで、第8図 (b) に示す光ID変換処理を行う。光ID受信機の起動時や特定の地理条件が得られたときに、光ID変換サーバが保持している光ID変換用の変換表を受信端末にダウンロードしておく。これにより、光IDを受信するたびに、光ID変換サーバにアクセスせずとも関連情報の取得が可能になる。光ID変換サーバで更新が発生した場合は、光ID変換サーバから光ID受信機に通知し、

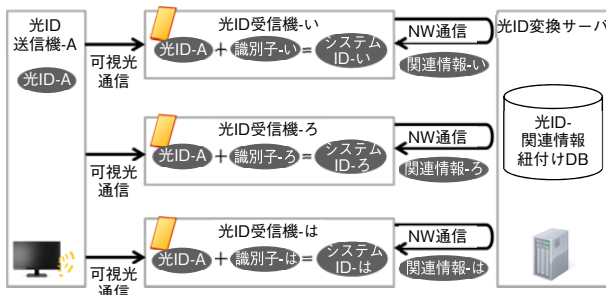


第8図 光ID変換フロー
Fig. 8 Data flows of Light ID resolution

変換表を更新させる。アクセスログの光ID変換サーバへの即時的な記録はできなくなるが、変換表の更新時に受信機から光ID変換サーバに、差分として受信履歴を通知させることで、アクセスログを記録できる。

4.3 光IDとサービスIDの連携

本システムを複数の店舗を含む複合商業施設などで運用するためには、それぞれの光ID送信機から複数の異なるサービスを提供することが必要となる。例えば、複合商業施設の案内看板からの光IDを受信した際に、総合案内アプリを起動していた場合はその施設の地図を、A店専用のアプリを起動していた場合はA店の空席情報を表示することが求められる。このような要求に対応するための方法として、第9図に示すように、光ID受信機で提供するサービスごとに識別子を発行し、受信した光IDと識別子を組み合わせ、サービスが識別できるIDを新たに作成して光ID変換サーバに問い合わせることで、固有關連情報を提供することが可能である。



第9図 複数アプリ対応のための光ID変換フロー
Fig. 9 Data flows of Light ID resolution for a single transmitter-multiple services

5. 今後の展望

ライセンスサンプリングによって信号を受信することができる時間の範囲は、撮像画像中の送信機が写っている部分を撮像している時間のみに限られるため、送信された信号は非連続的に分割して受信される。そのため、大きなデータを短時間で効率的に受信することは難しい。しかし、この問題は、例えば、注目領域のみを高速で撮像する機能を搭載、変調光が写っている部分のみを撮像して連続受信を可能にするといったスマートフォン側の対応によって解決できる。現在のスマートフォンはこの機能に対応していないが、今後サービスが大きく普及、拡大してくるにつれて、本技術に対応するようにOSやミドル/ハードウェアを変更したスマートフォ

ンが登場してくることが期待できる。このようなスマートフォンを受信機とした場合には、送信信号を連続的に受信することができるようになり、大きなデータを受信することや、小さな、あるいは、遠くの送信機からの信号受信も可能となる。例えば、サイネージなどの送信機から可視光通信で送られた音声データをスマートフォンで直接受信する新しい放送型サービスも可能となる。また、小さな光源からの信号受信が可能になると自動車のヘッドライトやテールランプからIDや走行情報を送り離れた場所にいる別の自動車に搭載されたカメラでこの信号を受信する自動車間 (V2V: Vehicle to Vehicle) 通信への応用も可能である。これら新しい市場の展開に向けて、本方式は欠かせない技術になると期待できる。

6. まとめ

ライセンスサンプリングを利用することで、人間には一様な発光として感じられるような高速変調信号を、スマートフォンに対応アプリをインストールするだけで受信することが可能となった。これは、可視光通信サービスの市場展開時に、新たに受信機を普及させる必要がないという点で、意義が大きい。

今後、さまざまな機器とクラウドを連携させたサービスや機器間 (M2M: Machine to Machine) 通信を活用したサービスの導入が加速していくと予想される。本手法は、普及が進むLED光源を搭載した機器とスマートフォンのアプリにより、機器とインターネットサービスを連携させる機能 (IoT: Internet of Things) を低コストでかつ柔軟に実現することが可能であり、今後、さまざまなサービスへの応用展開が期待される。

参考文献

- [1] IEEE Computer Society, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks- Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light," IEEE, 2011.
- [2] AV&IT標準化委員会, "電子情報技術産業協会規格 可視光ビーコンシステム," 2013.
- [3] 飯塚宣男 他, "ピカピカカメラ: カメラを用いた可視光通信スマホアプリ," 照明学会誌, vol. 98, no. 10, pp. 546-549, 2014.
- [4] S. Hecht et al., "Intermittent stimulation by light: V. the relation between intensity and critical frequency for different parts of the spectrum," The Journal of General Physiology, vol. 19, no. 6, pp. 965-977, 1936.

執筆者紹介



大嶋 光昭 Mitsuaki Oshima
AVCネットワークス社
イノベーションセンター
Innovation Center, AVC Networks Company
工学博士



青山 秀紀 Hideki Aoyama
AVCネットワークス社
イノベーションセンター
Innovation Center, AVC Networks Company
博士（工学）



中西 幸司 Koji Nakanishi
AVCネットワークス社
イノベーションセンター
Innovation Center, AVC Networks Company



前田 敏行 Toshiyuki Maeda
AVCネットワークス社
イノベーションセンター
Innovation Center, AVC Networks Company