

Abstract

近年、可視光 LED は、照明器具、交通信号機、ディスプレイなどの光源として急速に普及しつつある。可視光 LED を用いて通信を行うことで、従来の電波を用いた無線通信では不可能だった応用を実現することができるようになる。特に、イメージセンサを可視光通信の受信機として用いると、位置サービス、拡張現実感 (Augmented Reality) 等での新しいアプリケーションを実現することが可能になる。本稿では、可視光通信の特徴や技術を解説し、特に電波で実現することが難しい位置サービスについて解説する。

キーワード：可視光 LED, LED 照明, 位置サービス

1. はじめに

近年、可視光 LED はその光量が増え、オフィスや家庭の照明器具、交通信号機、ディスプレイなどの光源として急速に普及しつつある。また可視光 LED の発光効率は、従来の電球の発光効率が約 20 lm/W (ワット当りのルーメン)、蛍光灯の発光効率が 60~100 lm/W であるのに対し、可視光 LED は 1980 年代から急速に発光効率が向上し、1970 年代に 10 lm/W 以下だったのが最近では、100 lm/W 程度まで向上し、蛍光灯の効率に追いつきつつあり、将来的には追い越すことが予想されている。この技術的改良及び価格低下のお陰で急速に LED 照明が普及しつつあり、2012 年には照明市場の 20% 以上を LED 照明が占めると予測されている。

照明器具を用いて通信を行う可視光通信は、ユビキタス (偏在的) でしかも人間の目で見える通信という、今までの電波や赤外光を用いた通信にない特徴を持った新しい通信手段として期待されている。

2. 可視光通信の特徴

可視光通信⁽¹⁾には、以下のような特徴がある。

・ユビキタス通信

毎日の生活で使う可視光には、照明器具、誘導灯、

種々のインディケータランプ、車のライト、交通信号機などがあり、このようにあらゆる生活の場に存在する光源が LED 化されると予想されている。それらの光源をデータ通信装置として使うことができるようになればユビキタス通信に適した通信手段となる。

・見える通信

目に見える光を使って通信すると、その光で照らされる場所にしかデータが到達しない。例えば照明光通信で、送信したいデータをその部屋から漏らしたくない場合は、光を遮るカーテンをしたり、ドアを閉じたりするだけで、データがその部屋から外には出て行かない。このようにデータの到達範囲を視認できることで、セキュリティを確信できる安心感がある。

・イメージセンサを用いて正確な位置の検出が可能

可視光は直進性があるので、送信機の方向や位置を検出することが可能である。特にイメージセンサを用いた可視光通信では正確な位置を検出することができるので、送信機の位置とそのコンテンツを同時に取得したり、受信機あるいはユーザの位置を正確に検出したりすることが可能である。

3. 可視光通信技術

3.1 送受信デバイス

可視光送信に利用できる代表的な発光デバイスは、可視光 LED であり、LED 照明の後の照明として期待されている有機 EL も送信機として利用が可能である。可視光 LED によるデータ通信速度は、照明で使われる白色

春山真一郎 正員：フェロー 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

E-mail haruyama@sdm.keio.ac.jp
Shinichiro HARUYAMA, Fellow (The Graduate School of System Design and Management, Keio University, Yokohama-shi, 223-8526 Japan).

電子情報通信学会誌 Vol.94 No.12 pp.1055-1059 2011年12月
©電子情報通信学会 2011

LED で数 Mbit/s, 単色可視光 LED で数十 Mbit/s 程度までの速度を実現することができる。また, 可視光受信に利用できる代表的な受光デバイスは, pin フォトダイオード, アバランシフォトダイオード, イメージセンサである。

pin フォトダイオード, アバランシフォトダイオードが一般的な受光素子であり, いずれもギガヘルツ程度までの光強度変調信号を検出することができるが, アバランシの方が pin フォトダイオードよりも感度が高い。また, 複数の受光素子が二次元状に並んだイメージセンサは, その受光データの読出し方式の違いによりデータレートが大幅に異なるが, 数 bit/s~数 Mbit/s の信号を受信することが可能である。

3.2 変調方式, 調光方式, ちらつきの防止

可視光通信の変調方式は, 電波による通信や赤外線的光空間通信等で使われている様々な変調方式を使うことができる。変調方式は, 光強度を伝送データで直接変調するベースバンド変調方式と, キャリヤ周波数で光強度をまず変調してからそのキャリヤに変調を加えるキャリヤ変調方式がある。ベースバンド変調方式の代表的なものとしては, OOK (On-Off Keying), OOK-RZ (return-to-zero), OOK-NRZ (non-return-to-zero), PAM (Pulse-Amplitude Modulation), PPM (Pulse-Position Modulation), PWM (Pulse Width Modulation) 等がある。また, キャリヤ変調方式の代表的なものとしては, ASK (Amplitude Shift Keying), PSK (Phase Shift Keying), FSK (Frequency Shift Keying) などがある。キャリヤ変調方式を用いることで, 蛍光灯などから放射されるキャリヤ周波数以外の干渉信号を除去することができる。更に, 伝送信号を拡散するスペクトル拡散 (Spread Spectrum) ^{(2), (3)}, 直交周波数分割多重 (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ^{(4)~(6)} も提案されている。スペクトル拡散を行うことで, ジャミングなどにも強い通信を実現することができる。また, OFDM を行うことにより, 周波数効率の高い伝送が可能である。OFDM は高い PAPR (Peak to Average Power Ratio) が必要であるが, 文献 (6) では, 変調信号の正の値を用いて光強度変調を行い, 偶数のサブキャリヤのみを用いることで, PAPR の問題を軽減することが提案されており, 光強度変調が正の値しか取り得ないのをうまく利用した方式である。

可視光光源として照明器具等が用いられる場合, 変調方式は, 調光 (明るさのコントロール) の機能も求められる ^{(7), (8)}。通信を行いながら調光を行う代表的な方式として, PWM と PPM を組み合わせた方式, 信号レベル自身を変化させる方式などがある。

また, 照明光のように部屋全体を明るくする光源で通信を行う場合, 変調を掛けることによって光がちらつく

と人間にとって不快だけでなく, 精神的, 肉体的に悪影響を及ぼす可能性があるため, ちらつかない変調方式が求められる。可視光通信を行う光源のちらつきを人間が感じるかどうかの実験, 検討を筆者のグループが行った ^{(9), (10)}。ちらつきに関する検討は, テレビなどのディスプレイに関しては研究が行われているが, 可視光通信のちらつきに関しては, まだまだ検討が不足しており, これからの研究が期待される。

3.3 イメージセンサによる受信

イメージセンサは, 画像を撮影するための素子であるが, それを利用して可視光通信を行うことも可能である ^{(11)~(15)}。可視光光源からの光がレンズによってイメージセンサの特定のピクセルに投影されているときに, そのピクセルで受光した信号を読み出すことにより光空間通信を行うことができる。またイメージセンサ上で受光しているピクセルの (x, y) 座標を読み取ることで, 可視光光源の到来角度を正確に検出することも可能であり, その到来角度の精度は高解像度のイメージセンサを用いると 0.1 度以下になり, その角度は電波による検出方式では到底到達できないほどの正確さである。

4. 位置サービス

光空間通信は, 赤外線通信として 1970 年代以降開発され, 赤外線リモコン, 赤外線オーディオヘッドホン, 携帯電話や PC のための IrDA などに使用されてきたが, 光空間通信は, 光の直進性のために, 一般的に送信機と受信機の間には障害物があると通信ができなくなるという欠点があり, その結果通信距離は数 m から数十 m という短距離の通信に限られてしまう。その欠点は, 赤外だけでなく可視光を用いた通信でも同様であるが, 見方を変えると, 可視光送信機が設置されている場所で必要な情報を短距離通信で送信することによって, その場所でのみ必要な情報を提供する便利な位置・空間情報サービスを展開することが可能である。電波による通信は中長距離の通信が可能であるが, どこに自分がいるのかをチェックしたり, どこに対象となる物・人がいるのかを探したりする位置情報検索サービスや店舗案内サービスなどは, 光空間通信の方が得意である。特に, あらゆるところに設置されつつある LED 照明を送信機として使うと, ユビキタスな位置・空間情報サービスには最適である。位置情報検索サービスとして現在実用化しているのは GPS を用いたカーナビシステムなどがあるが, GPS は衛星からの電波が届かない建物内では使用することができず, またたとえてきたとしても位置精度が不十分なのでビル内の部屋番号の特定をするのは困難である。一方, 部屋にある LED 照明器具からその部屋番号などの情報が得られれば, 屋内外どこでも使える位置

サービスを行うことができる。

図1は、可視光通信と携帯電話によるインターネットアクセスの組合せによる屋内位置検出の例であるが、これはLED照明から送られた位置情報を基に、携帯電話でインターネット上のある場所サーバにアクセスして人



図1 可視光通信と携帯電話によるインターネットアクセスの組合せによる屋内位置検出 (NEC, 松下電工, 慶大の試作)



(a) 天井ランプ型ID送信機



(b) カートに取り付けられた受信機

図2 スーパーマーケットでの動線解析システム (中川研究所の試作)

間に理解できる場所情報を得る方式でありGPSが使えない屋内でもこの方式で場所を知ることができる。

また、図2のようにスーパーマーケットでLED照明器具から位置情報を送信し、カートでその位置情報を自動的に蓄積することによって、客がどのように動き回ったかということを知ることができる動線解析システムを実現することができる。

その動線解析システムによる解析例が図3に示されている。これは、あるスーパーで動線解析を行った例であるが、線の太さは通過した客数を示し、線の色はその平均移動速度を示しているので、細くて赤い線のところは、そこでの商品には客が余り足を止めなかったことが分かる。このような動線解析にを使えば、スーパーはそのデータを基に配置換えやフロアプランの変更をすることができる。

また、イメージセンサを用いて可視光受信及び到来方向の正確な検出をすることで、様々な位置サービスに応用することが可能であり、そのような例が図4から図7に示されている。図4は、可視光通信を用いた景観ガイドの応用であるが、遠くにあるビル等に取り付けられたLED光源からデータを送りイメージセンサが内蔵されたカメラで高速撮影を行うことでそれぞれの光源からの情報を同時に受け取ることができ、例えばレインボーブリッジが渋滞中であるということが、その景色の中で表示されるので、送信してきた情報源の位置とそのコンテンツを同時に分かりやすく見ることができる。

図5には、灯台のLED光源を用いた可視光通信の実験風景が示されている。これは、2008年度から、海上保安庁海上保安試験研究センターから可視光通信コンソーシアム(VLCC)への研究依頼を受けてVLCCの会員企業(カシオ計算機, NEC, 東芝)が実験中のものであり、1km以上の長距離で灯台から船へのデータ通信をイメージセンサを利用して行おうというものである。なお、VLCCは、中川正雄慶大名誉教授が名誉会長、筆者が会長、坂村健東大教授と松本充司早大教授が副会長で、10数社のメンバー企業が活動が続いている



図3 スーパーマーケットでの動線解析システム (情報提供: 中川研究所)

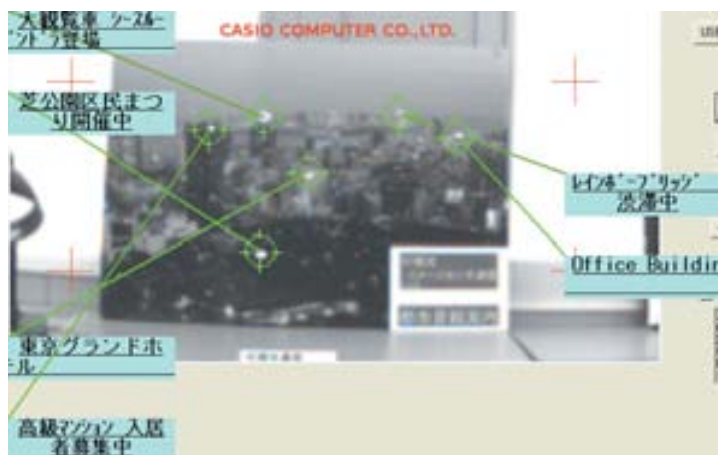


図4 可視光通信を用いた景観ガイドで、端末のディスプレイにコンテンツが表示される (写真提供: カシオ計算機株式会社研究開発センター飯塚宣男氏)



昼間 100m通信成功時画面



実験に使われた2マイル型LED灯台



小形灯台では、既にLED化がかなり進展している

1km通信成功時画面
(「立川灯台の風向NW風速10m」)



(2,780 f/s) / (1.3 kbit/s)
通信解像度: 0.016度/pix @ 10倍ズームレンズ
= (1km先の30cm)

図5 灯台可視光通信 (写真提供: カシオ計算機株式会社研究開発センター飯塚宣男氏)

(<http://www.vlcc.net> 参照).

図6は、三井住友建設、慶大の筆者らのグループ、中川研究所の共同研究で行ったものであるが、可視光通信とイメージセンサを用いて、橋りょうなどの対象物の位置を正確に計測する技術を開発した⁽¹¹⁾。2か所以上の地点でイメージセンサを用いた可視光受信を行い、位置が未知の可視光光源の位置を検出する方式である。この写真は夜間の暗いときに撮影した風景であるが、白く光っているのが変調された白色LED光源である。この特長は、夜間でも測定できる点、また人手によらず完全自動測定が行えるので長期にわたる位置モニタリング観測で位置の微小変化を検出できる点等がある。

図7は、慶大とNECが行った可視光通信を用いたロボット制御の例である⁽¹²⁾。可視光変調された複数のLED照明からの光を、2種類のイメージセンサで受ける。その1個は、光源の正確な方向を検出するための高解像度イメージセンサであり、もう1個は光源からの可



図6 可視光通信を用いた橋りょうの測量 (三井住友建設, 慶大, 中川研究所)

視光変調信号を受信するための低解像度イメージセンサである。これらの情報を基にPCが三次元位置を計算することが可能となり、ロボットの位置を正確に把握しな

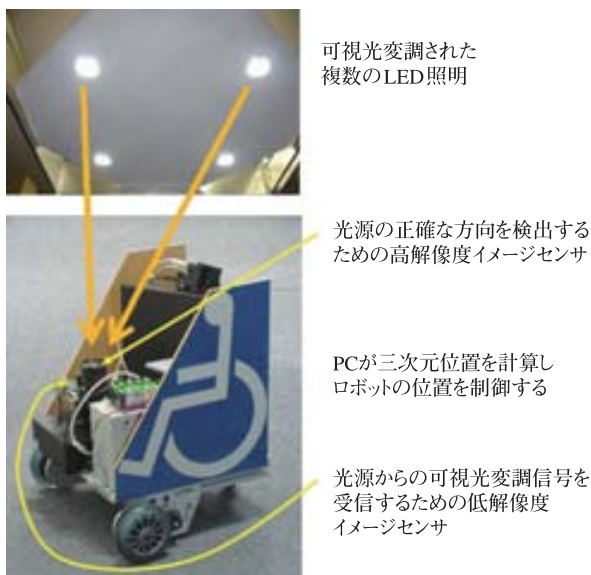


図7 可視光通信を用いたロボットの制御 (慶大, NEC)

から制御することができる。このシステムの利点は、ユビキタスに設置されるLED照明が位置のビーコンとして使うことができる点であり、他の超音波やRFタグなどを用いる位置検出技術よりもユビキタス性という点で優れている。

5. 結 論

可視光通信は、現在急速に普及しつつあるLED照明等を利用して通信を行う方式であり、そのユビキタス性を利用した様々なサービスが提案されている。特にイメージセンサを用いた通信は今までになかった技術でありその技術の発展が望まれる。

可視光送信機としてLED照明等が用いられる場合、LED照明メーカーごとに異なる通信方式が使われると不都合なので、標準化された統一通信方式が望ましい。既にIEEE802.15.7, IrDA/VLCC可視光通信標準規格、日本のJEITA CP-1221, CP-1222等の可視光通信標準化案は提案されているが、まだそのような標準方式は普及していない状況である。

今後、標準化の普及とともに、可視光通信技術の改良、低コスト化が行われれば、可視光通信が普及することも夢ではないであろう。

文 献

- (1) 可視光通信の世界—LEDで拓く『あかりコミュニケーション』, 中川正雄 (監修), 可視光通信コンソーシアム (編), 工業調査会, 2006.
- (2) T.C.W. Schenk, L. Feri, Y. Hongming, and J.-P.M.G. Linnartz, "Optical wireless CDMA employing solid state lighting LEDs," IEEE/LEOS Summer Topicals Meeting, pp. 23-24, March 2009.

- (3) D. Terra, N. Kumar, N. Lourenco, L.N. Alves, and R.L. Aguiar, "Design, development and performance analysis of DSSS-based transceiver for VLC," IEEE International Conference on Computer as a Tool (EUROCON), pp. 1-4, June 2011.
- (4) Y. Tanaka, T. Komine, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "A basic study of optical OFDM system for indoor visible communication utilizing plural white LEDs as lighting," 8th International Symposium on Microwave and Optical Technology (ISMOT 2001), pp. 303-306, Montreal, Canada, June 2001.
- (5) H. Elgala, R. Mesleh, and H. Haas, "Indoor broadcasting via white LEDs and OFDM," IEEE Trans. Consum. Electron., vol. 55, no. 3, pp. 1127-1134, 2009.
- (6) J. Armstrong, "OFDM for optical communications (Invited Tutorial)," J. Lightwave Technol., vol. 27, pp. 189-204, 2009.
- (7) H. Sugiyama, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Brightness control methods for illumination and visible-light communication systems," Third International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC), Aug. 2007.
- (8) G. Ntogari, T. Kamalakis, J. Walewski, and T. Spichopoulos, "Combining illumination dimming based on pulse-width modulation with visible-light communications based on discrete multitone," IEEE/OEA Journal of Optical Communications and Networking, vol. 3, no. 1, pp. 56-65, Jan. 2011.
- (9) 齋藤 翼, 春山真一郎, 中川正雄, "可視光通信におけるちらつき軽減の方法," 信学技報, CS2006-75, pp. 31-35, Jan. 2007.
- (10) 石川翔一, 中川正雄, 春山真一郎, "データ符号化と変調方式による可視光通信におけるちらつき軽減の検討," 信学技報, no. 39, OCS2008-1, May 2008.
- (11) H. Uchiyama, M. Yoshino, H. Saito, M. Nakagawa, S. Haruyama, T. Kakehashi, and N. Nagamoto, "Photogrammetric system using visible light communication," IEEE 34th Annual Conference of Industrial Electronics (IECON), pp. 1771-1776, Orlando, Florida, USA, Nov. 2008.
- (12) T. Tanaka and S. Haruyama, "New position detection method using image sensor and visible light LEDs," IEEE Second International Conference on Machine Vision (ICMV 2009), pp. 150-153, Dubai, the United Arab Emirates (UAE), Dec. 2009.
- (13) 中田啓道, 木村達彦, 松本佳直, "可視光 ID 用光源選択システムの提案と評価," 信学技報, SIP2008-184, pp. 119-124, March 2009.
- (14) T. Nagura, T. Yamazato, M. Katayama, T. Yendo, T. Fujii, and H. Okada, "Tracking an LED array transmitter for visible light communications in the driving situation," 7th International Symposium on Digital Object Identifier Wireless Communication Systems (ISWCS), pp. 765-769, Sept. 2010.
- (15) S. Itoh, Md. S.Z. Sarker, K. Yasutomi, M. Hamai, Y. Iwama, I. Takai, M. Andoh, and S. Kawahito, "A CMOS image sensor for car-to-car and road-to-car optical communication," 17th International Display Workshops, Fukuoka, Japan, pp. 2197-2200, Dec. 2010.

(平成 23 年 7 月 18 日受付 平成 23 年 8 月 15 日最終受付)



はるやま しんいちろう
春山 真一郎 (正員:フェロー)

1981 東大・理・物理卒。1983 米国カリフォルニア大バークレー校電気工学とコンピュータサイエンス学科修士課程了。1990 米国テキサス大オースティン校理学部コンピュータサイエンス学科博士課程了, 理博。1991 米国 AT & T ベル研究所研究員。1996 米国 Lucent Technologies ベル研究所研究員。1998 ソニーコンピュータサイエンス研究所先端情報通信研究室リサーチャ。2002 慶大・理工・情報・客員教授。2007 慶大・理工・情報・訪問教授。2008 慶大大学院システムデザイン・マネジメント研究科教授, 現在に至る。可視光通信, 空間光通信, 新機能イメージセンサ, 無線通信, 位置サービス等の研究に従事。可視光通信コンソーシアム会長。