

二次元コードを用いた可視光通信の基礎考察と実験について

田中 仁^{†1} 萬代 雅希^{†2} 渡辺 尚^{†1}

†1 静岡大学大学院情報学研究科 †2 上智大学理工学部情報理工学科

Fundamental Discussion and Experiments of Visible Light Communications using Two Dimensional code

Hitoshi Tanaka^{†1} Masaki Bandai^{†2} Takashi Watanabe^{†1}

†1 Graduate School of Informatics, Shizuoka University

†2 Faculty of Science and Technology, Sophia University

1. はじめに

可視光通信は、LED (Light Emitting Diode) 等を光強度変調することによりデータを送信し、PD (Photodiode) やイメージセンサで受信する通信方式であり、照明器具や交通信号を送信機に用いることにより、低コストで通信基盤を整備できるなどの利点のため注目されている。[1]技術開発に関しては、安価でより高速な可視光通信を目指して、送受信デバイスや通信方式の改良が試みられている。

本研究では、通信方式の改良方式である二次元コードに注目し、これを用いた可視光通信の高速化、大容量化を最終目的とする。本稿ではその第一歩として、まず可視光通信の特徴と現状を送信デバイス、受信デバイス、通信方式の観点からまとめる。次に、市販のデバイスを用いて低コストで二次元コード可視光通信を実現する基礎システムを構築し、基礎実験を行う。

2. 可視光通信

2.1 可視光通信の特徴

可視光通信の利点として以下の3点があげられる。

- 1) 低コストでインフラ整備が可能である。
- 2) 通信範囲の把握が容易である
- 3) 並列伝送による高速化

1) については、近年、特に省電力化を目的として、照明機器、交通信号機、電光掲示板などにLEDが用いられている。これらを送信機として用いれば、新たに送信機の設置場所を確保する必要なく情報通信が行える。また、可視光は、電波や赤外線に比べて、通信状況を視覚的に判別できる。従って、可視光通信では通信状況が悪いと判断した場合にはより品質の高い場所に移動することも可能である。

3) については、イメージセンサを用いて空間分離が行えるため、信号を並列に伝送が可能であり、ネットワークの大容量化が図られる可能性がある。

一方、光の直進性ため、遮蔽物によって通信が阻害される欠点を持っている。そのため、後述する見通しでの利用が主となる。

2.2 送信デバイスの特徴

従来の光無線通信(FSO: Free Space Optical)では、レーザ光が用いられていたが、近年は、1. 低消費電力、2. 少発

熱、3. 長寿命、4. 高速性などの理由でLEDが主流となっている。LEDは発光効率が高いため、消費電力は白熱灯の1/10、蛍光灯の1/3である。また、発熱は、1/2以下である。LEDの寿命は、発熱による構成部品の劣化に依存するが、一般の白熱灯の寿命が約1,000時間であるのに対し、LEDの寿命は約40,000時間とされている。LEDのOn-Off速度は、100nsec以下であり、将来さらなる高速化が期待されている[1]。

可視光通信では、白色LEDあるいは単色LEDが用いられる。白色LEDは、照明機能をも兼ねることが可能である。その一方で、送信デバイスの観点からは以下の問題があげられる。

1) 白色LEDはR・G・Bそれぞれ単色のLEDよりもコストが高い。

2) 白色LEDは蛍光体を用いると変調できる速度が遅くなる。

1)の原因は、白色LEDはR・G・Bを組み合わせることで白色とするためであり、

また、2)については、蛍光体を用いるとON-OFFの切り替え速度が遅くなるため変調速度が下がためである。

2.3 受信デバイスの特徴

受信デバイスとしては、従来から存在するフォトダイオード(PD)がある。また、PDをアレイ状に配置したものやCCDカメラ、CMOSカメラをイメージセンサとして用いる方法がある。これらの特徴を以下に述べる。

1) PDは送受信デバイスの光軸を正確に調整する必要がある。

2) イメージセンサは並列通信(空間分離)が行える。

3) イメージセンサは処理速度が遅い。

4) 高速度カメラを用いたイメージセンサは高価である。

PDは、送受信デバイスの光軸を正確に調整する必要があるのに対し、イメージセンサでは、PDほど精密な調整を必要としない。さらに、イメージセンサでは複数の光源を同時に受信することが可能であるため並列効果(空間分離)が得やすい。例えば、図1に示すようにPDでは複数の光源からの光を合算して受信する。つまり、背景光の影響を受ける。これに対し、イメージセンサではレンズを通すことにより同時に複数の映像を受信できる。複数の映像を画像処理によって分離すれば、並列した通信が行える。その一方で、イメージセンサは複数の光源からの信号を並行して画像処理する必

要があるため、PD に比べ処理速度が遅い。通常のデジタルカメラ用のイメージセンサを用いた場合には、30fps である。川人らは、空間光通信用 CMOS イメージセンサを開発し、屋外 70m で 10Mbps を達成している。[3]高速化を図るために高速度カメラを用いる方法も考えられるが、数万円～1000 万円以上と高価である。

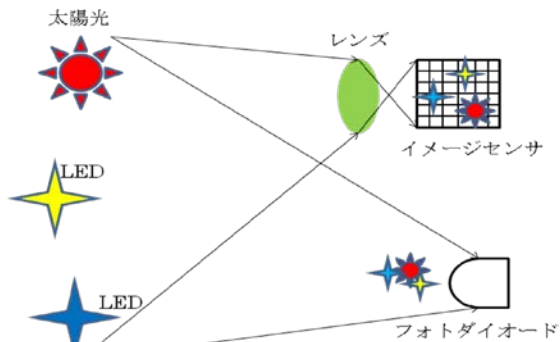


図 1:イメージセンサによる空間分離

2.4 可視光通信標準化

可視光通信標準化では、2008 年 10 月 24 日に可視光通信コンソーシアムが赤外線データ協会 (IrDA) 及び、光無線通信システム推進協議会 (ICSA) と共同で可視光通信の標準化に向けた活動を開始している。

2009 年に IrDA 通信方式とのデータフォーマット互換がある Visible Light PHY Spec.1.0 を発行している。この規格は現在の IrDA の通信波長を可視光領域に拡張した方式であり、4Mbps の通信が可能となる。また、2009 年に光無線 LAN システムの標準規格 ARIB STD T50 4.0 版の発行を行っている。

2.5 適用例

2.5.1 物流管理システムへの応用

イメージセンサと光 ID タグを用いた物流システムにおける物品管理がある。図 2 のように荷物に光 ID タグを貼り付け、天井に設置したカメラで ID を読み取ることにより物品の管理などを行う。光 ID による倉庫管理での利点は以下の 2 点があげられる

- 1) 荷物に光 ID を貼り付けることにより、荷物の位置を正確に把握でき、画像による確認も可能である。
- 2) 二つの光源により向きの検出も可能となることから、RFID よりも正確な位置確認が可能となる。

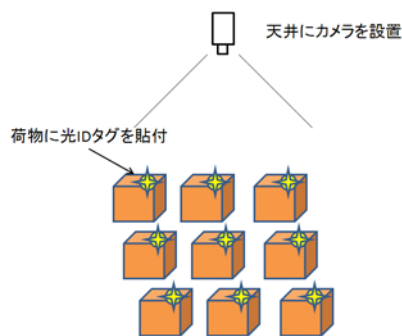


図 2:光 ID タグシステム

2.5.2 店舗や商品のレイアウト設計への応用

スーパーマーケットなどの店舗においては、店舗配置や商

品の陳列レイアウト が重要となる。この設計には人の流れ、行動や関心度を調査する必要がある。この調査には、顧客の軌跡を解析する動線調査が行われる。動線調査は、顧客の軌跡を基に、売場の効率分析を行う。この動線調査に可視光通信を用いた、光ゲート式動線調査システムが開発されている [4]。図 3 のように ID 情報を載せた照明などの光ゲートを設置し、受信機を取り付けたカートが光ゲートを通過する時に ID 情報を受信しメモリへ蓄積する。これにより、レジの光ゲートまで一連の動線情報として認識し、顧客の動線を解析する。

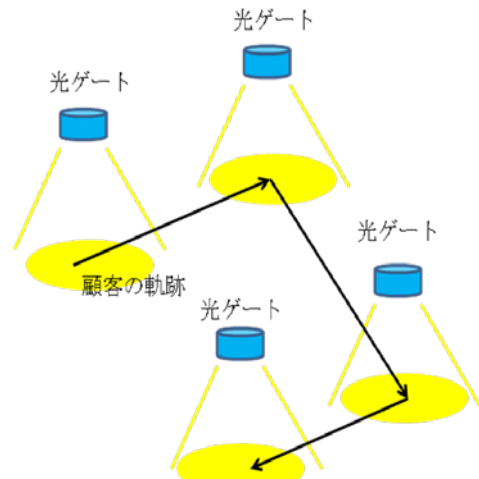


図 3: 光ゲート式動線調査システムの仕組み

2.5.3 Augmented Reality 技術への応用

AR 技術を応用することにより、LED ライトや LED 信号機などからの得た情報により付加された画像をディスプレイ上に表示できる。この技術を用いて、大阪・梅田で LED 可視光通信と屋内 GPS、AR を組み合わせた実証実験が行われた [5]。この実証実験では、可視光通信機器と屋内 GPS 機器が複数設置されており、参加者はそれらの場所を宝探しとして巡っていく。設置箇所と思われる場所で専用端末をライトの下にかざし、可視光通信で宝となるデータを受信する。この実験で商業施設の最先端のサービス提供のあり方を模索する。

2.5.4 高度道路交通システムへの応用

前車両のブレーキランプからブレーキ情報や対向車のヘッドライトから前方の情報を取得する事が可能である。また、LED 交通信号機、表示板から情報を車両や歩行者に送信し、交通情報の提供を行うことが可能である。図 4 高速道路などでは GPS が届かないトンネル内であってもトンネル内の照明一つずつに ID を振り分け、その ID を受けとることにより位置情報の取得も可能である [6][7]。

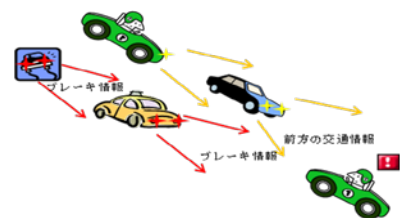


図 4:ブレーキランプ、ヘッドランプからの情報の取得

3. 通信方式

3.1 変調

可視光通信では主に光強度変調を用いている。ここでは、主な変調方式について述べる。電波と同じく ASK (Amplitude Shift Keying), FSK (Frequency Shift Keying), PSK (Phase Shift Keying), PPM (Pulse Position Modulation) が用いられる。FSK, PSK では、光の周波数帯域が電波の帯域よりも高いため、光の周波数や位相を信号に対応して変調させることが難しい。また、ASK では OOK (On-Off-Keying) がよく用いられる。PPM は赤外線通信でよく用いられており、可視光通信に適用可能である。

3.1.1 ASK 変調

OOK は ASK のもっとも単純な形式であり、搬送波の有無によりデジタルデータを表す方式である。より複雑な手法として、オン、オフの長さを変化させるモールス信号などがある。

3.1.2 PPM 変調

A) PPM

PPM は可視光通信でよく用いられる変調である。1symbol を L 個のタイムスロットに分割し、その中の一か所にパルスを配置する。1symbol の中でどこの位置にパルスがあるかで情報を送る方式である。

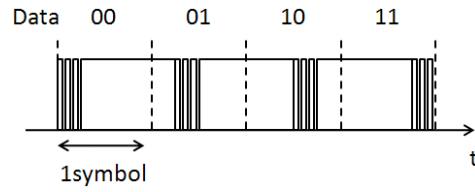
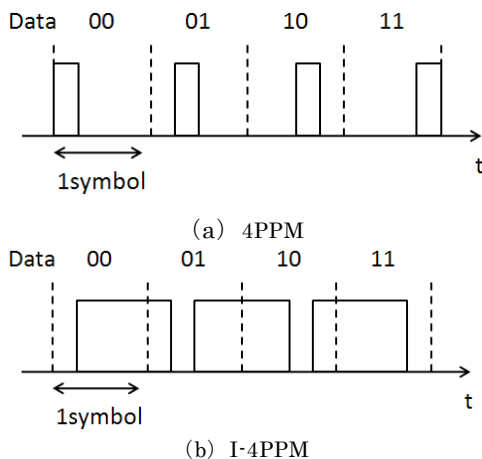
B) I-PPM (Inverted Pulse Position Modulation)

PPM では LED の明るさは無変調時の $1/L$ になる。そこで、PPM を反転させた I-PPM が提案されている[8]。I-PPM はパルスがある位置が 0、無い位置が 1 とすることで、照明として明るく点灯させながら通信を行う方式である。I-2PPM では $1/2$ の光強度になり、I-4PPM では $3/4$ の光強度になる。

C) SC-I-PPM (Subcarrier Inverted Pulse Position Modulation)

PPM, I-PPM では矩形パルスを用いているため、太陽光などの背景光の影響を受けやすい。そこで矩形パルスの代わりに副搬送波を用いた SC-I-PPM が提案されている。副搬送波を用いることで受信側でのフィルタ処理が可能となり、信号成分と背景光成分の分割が行える。

図5に4値の PPM と I-PPM, SC-I-PPM を示す。



(c) SC-I-4PPM

図5: 4値の PPM, I-PPM, SC-I-PPM

3.2 多重化

波長多重化を行うことにより、高速化が図れる。ここでは現在、可視光通信で研究されている WDM (Wavelength Division Multiplexing) と光 CDMA (Optical Wideband Code Division Multiple Access) について述べる。

3.2.1 WDM

WDM の特徴とは複数の異なる波長の光信号を同時に送信し、フィルタを通すことで各波長を個別で受信することが可能であるため、高速化が可能である。しかし一方、通信距離が 5cm[9]や 10cm[10]と短い距離で行われている。

3.2.2 光 CDMA

一次変調した信号に各ユーザ特有の拡散符号を掛け合わせ、拡散した送信波形を送信し、受信した波形に拡散符号を掛け合わせるにより、信号を取り出すことができる方式である。送受信間の拡散符号パターンを一致させる同期捕捉が必要であり、時間、波長制御の必要がない。

3.2.3 二次元コード

可視光通信では、イメージセンサで並列伝送を行うときに送信側は LED アレイが多く用いられているため、二次元コードを OOK で変調し送信する方法が考えられる。二次元コードの特徴として以下の3点があげられる。

- 1) バーコードより高密度で大容量情報を表示でき、英数・かな・漢字・図形などが表示できる。
- 2) 誤り訂正機能を有しており、一部データを復元する事が可能である。
- 3) シンボルや、ボードを用いて、 360° どの方向からでも読み取りが可能である。

一方、以下の問題点として、情報の書き換えが不可であり、一度に読み取れるのは一つという問題があるが、これらは可視光通信を適用することで解決が可能であると考えられる。

二次元コードは大きく分けて、従来のバーコードを積み重ねた形のスタック型とパターンが格子状になっているマトリクス型がある。スタック型としては PDF417 が、マトリクス型としては QR コード, Data Matrix, Maxi Code があり、ISO 標準として採用されている。図6に主なマトリクス型二次元コードを示す。



(a) QR コード (b) Data Matrix (c) Maxi Code

図6:マトリクス型二次元コード

3.3.1 QRコードの特徴

QRコードの特徴として以下の3点がある。

- 1) セルサイズは $21 \times 21 \sim 177 \times 177$ である。また、セルサイズが $11 \times 11 \sim 17 \times 17$ のマイクロQRコードもある。
- 2) 英数字で最大 4296 文字の情報を持たせることが可能。
- 3) 規格化されたQRコードについて、デンソーウェーブが保有している特許の権利行使を行わないとを宣言している。

3.3.2 Data Matrixの特徴

Data Matrixの特徴として以下の3点がある。

- 1) $9 \times 9 \sim 49 \times 49$ の規格と 10×10 から 144×144 の規格がある。
- 2) 英数字で最大 2335 文字の情報量を持たせることが可能。
- 3) ECC200規格はデータセルが 24×24 以上になった場合コードを分割している。

3.3.3 Maxi Codeの特徴

Maxi Codeの特徴として以下の3点がある。

- 1) シンボルサイズが固定されている。
- 2) セルサイズは 0.33mm 固定。
- 3) 英数字で最大 93 文字の情報を持たせることが可能。
- 4) 高速読み取りが可能。

3.3.4 カラー二次元コード

二次元コードを拡張し、情報密度を高める研究が行われている。その中でも輝度値を多値化することにより情報密度を高めた、カラー多重化QRコードが提案されている[11]。それぞれのQRコードを層として、層ごとに色を設定し、各層を加法混色によって合成することによりカラーQRコードを生成する。読み込まれたコードは色について層を分解し、層ごとにQRコードとして読み込む。

4. 市販デバイスを用いた可視光通信

安価な可視光通信を実現するために、市販デバイスと画像処理オープンソースを用いた実験装置を作成した。送信機には赤色LEDマトリクス、受信機にはWEBカメラを用いた。図7にシステム概要、図8に作成した実機を示す。

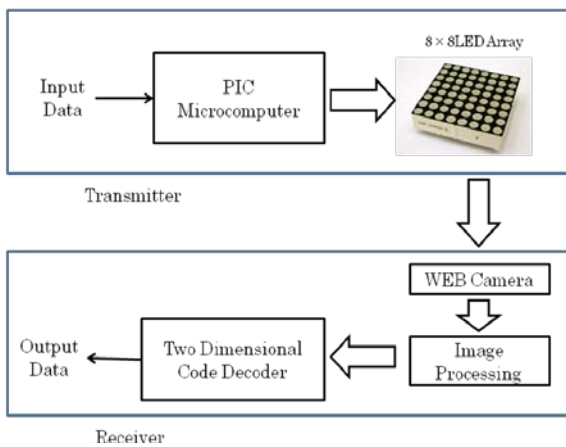
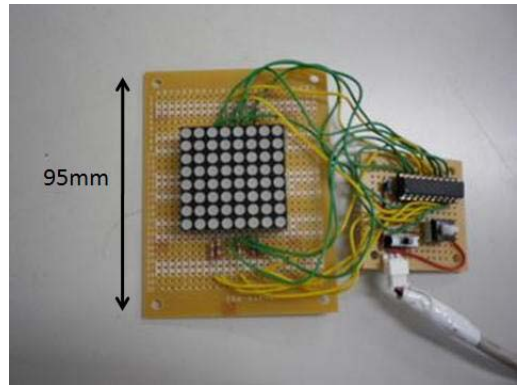


図7:基礎実験での構成



(a) 送信側装置



(b) 受信側装置
図8:基礎実験装置

4.1 送受信機

4.1.1 送信機

送信機は 8×8 の正方行列上に配置された 64 個の LED アレイ、PIC マイコンからなる。特性を表1に示す。LED アレイはダイナミック点灯である。ダイナミック点灯とは、全ての LED を点灯するのではなく一定時間ごとに列を切り替えて表示する方式である。切り替え時間を短くすることにより同時に点灯しているように見せている。このため、LED マトリクスの接続 PIN 数を少なくでき、制御が簡単になる。本実験では PIC マイコンの速度を考慮し、一列あたりの切り替え時間を 0.26msec と設定した。 8×8 の表示に掛かる時間は 2.08msec となる。

あらかじめ、PIC マイコン上に二次元コード化したデータを記憶させておき、LED アレイ上で表示する。二次元コードとしてはセルサイズの制約から、Data Matrix を基にした 8×8 二次元コードを利用する。図9に本研究で用いた 8×8 二次元コードを示す。Data Matrix を基にした理由は、QRコードのセル数が一番低いもので 11 セル必要であるのに対し、Data Matrix はセル数が同じ場合 QR コードと比較してより多くの情報を送れるからである。

表1:LEDアレイの特性

製品名	PARA LIGHT TOM-1588BH
サイズ	$38 \times 38\text{mm}$
LED 波長	700nm
LED 数	8×8

LED 縦, 横ピッチ	4.70mm
点灯方式	ダイナミック点灯
接続 PIN 数	8×2

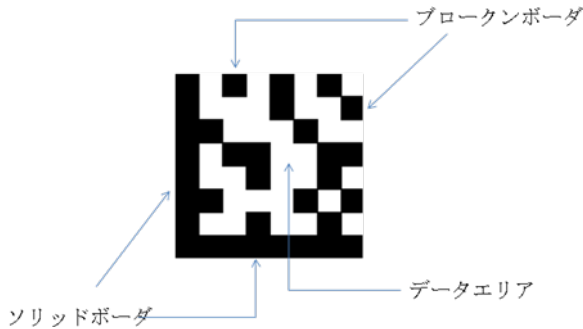


図 9: 8×8 二次元コード

ソリッドボードは画像認識の際にコードサイズと角度を認識するために用いる。ブロークンボードは画像認識の際にセルマッピングに用いる。データエリアは、ソリッドボード、ブロークンボードに囲われた領域で、白黒のセルでデータを表す。今回作成した二次元コードはセル数 8×8、データセル数 6×6 となる。

4.1.2 受信機

画像処理部、二次元コード復号化機からなる。LED アレイ上で表示した二次元コードを WEB カメラで撮り、画像から二次元コードを復号化する。本稿ではカメラ画像から二次元コードを復号化する画像処理に OpenCV を用いた。

5. 基礎評価

実験諸元を表 2 に示す。

表 2: 実験諸元

通信距離	50cm
伝送速度	30bps/LED
PIC マイコン	PIC16F687
LED マトリクス一列表示に掛かる時間	0.26msec
二次元コード表示切り替え速度	30fps
カメラ	Microsoft LifeCam HD-5000
カメラのフレームレート	30fps
カメラの解画像度	640×380pixel
レンズのピント	オートフォーカス
画像処理	OpenCV v2.1

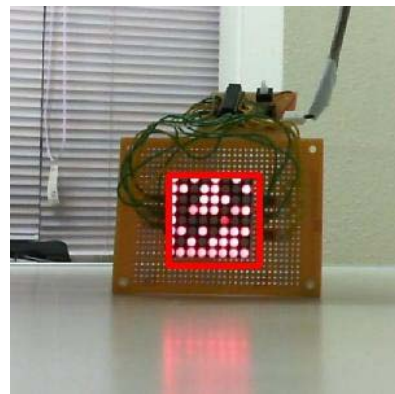
視覚的に評価をしたところ、図 10 のように良好に通信できることを確認した。フレーム速度 30fps で本研究に用いている二次元コードを送信すると 6×6×30 で最大 1080bps となる。LED マトリクスの表示速度は 1 コード表示で 2.08msec となるため、64 個の LED を全てデータ送信に用いると、32 kbps が得られる。また、LED マトリクス表示をダイナミック点灯ではなくスタティック点灯で行うと、1 コードの表示時間が 0.26msec となるため、約 240kbps の通信が可能となる。

また、画像処理でフレームのキャプチャ速度が遅くなるため、二次元コードの表示速度を遅くしないといけないという問題がある。このため、通信速度を上げられない。

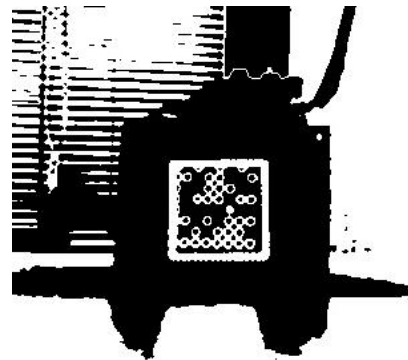
上記の点を改良する案として、以下の 3 点が考えられる。

- 1) 一旦メモリに蓄えておき、まとめて処理を行う
- 2) セル数を増やす
- 3) 画像を画像としての意味を持たせる。

1) については、画像処理が重いので一時的に蓄えておき、通信が終わった後処理を行うことで、カメラのフレーム速度の限界で通信が行える。2) については並列度を上げることで、高速化を図る。しかし、送信機のサイズとカメラの解像度が問題となる。そこでカラー二次元コードを用いることが考えられる。カラー二次元コードによりセルサイズを変更せずに高速化を図れる。3) については画像そのものに意味を持たせ、パターンを作っておくことで通信の高速化を図ることが考えられる。例えば、図 12 のようにマークを映し出したときに、そのマークに対するあらかじめ登録した情報に還元することで高速化を図れる。



(a) カラー画像



(b) 二値化画像

図 10: LED マトリクス認識

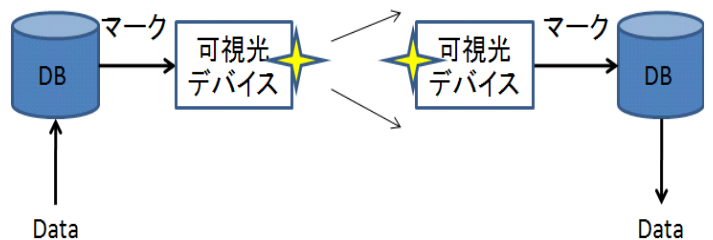


図 11: 画像に意味を持たせる通信

6. まとめ

本稿では市販のデバイスを用いて低コストで二次元コード可視光通信を実現する基礎システムを構築し、基礎実験を行った。本システムにより、イメージセンサを用いた通信ではカメラのフレーム速度が通信に大きく影響を与えるとわかった。今後の課題として、送信された情報を一時的にメモリに蓄え、まとめて処理を行う方法と、画像に意味を持たせる方法を考える。

参考文献

- [1] 春山真一郎, “可視光通信”, 電子情報学会論文誌, Vol. J86-A, No.12, pp. 1284-1291, 2003
- [2] 北林弘之, 川端吉純, 松原秀樹, 宮原賢一, 田中聡, “高出力赤外線 LED の開発”, SEI テクニカルレビュー第 176 号, 2010, pp. 80-83
- [3] 伊藤真也, 高井勇, M. S. Z. Sarker, 濱井燃太, 安富啓太, 安藤道則, 川人祥二, “屋外 70m/伝送速度 10Mbps を有する空間光通信用 CMOS イメージセンサ”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 34, No. 16, pp.21-24, 2010
- [4] 中川研究所: <http://www.naka-lab.jp/>
- [5] e空間 Kansai コンソーシアム: <http://ekukankansai.jp/>
- [6] 可視光通信コンソーシアム: <http://www.vlcc.net/>
- [7] 鈴木勝宜, “可視光通信システムの ITS への応用”, 東芝レビュー, Vol. 61, No. 8, 2006
- [8] 杉山英充, 春山真一郎, 中川正雄, “可視光通信に適した変調方式の実験的検討”, 信学技報, Vol. 105, No. 76, pp.43-48, 2005
- [9] 西田祥子, 伊藤陽介, 春山真一郎, 中川正雄, “LED 波長多重による近接可視光並列通信”, 信学技報, Vol. 105, No. 638, pp. 115-120, 2006
- [10] 鈴木修司, “可視光通信技術の現状と将来への展開”, 東海情報通信懇談会, 2010 年代の新たな電波利用技術に関する講演会, 2010. 4. 23, 名古屋
- [11] 遠藤佑介, 恩賀嶺, 廣友雅徳, 森井昌克, “カラー多重化 QR コードの提案と評価”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 33, No. 37, pp. 43-48, 2009