

# 反射光を利用した可視光通信

村田 拓磨

## Visible Light Communication Using Reflected Light

Takuma MURATA

### Abstract

Visible Light Communication (VLC) is an optical wireless communication system that carries information by modulating light of LEDs recently developed for high frequency blinking. Previous researches related to the VLC mainly used line-of-sight communication. Therefore, communication failures frequently occur even in the same room.

In this study, we made an experimental device receiving reflected lights and verified the reception performance of the device. Then we clarified issues to improve the communication accuracy and the communication range in the same room as follows; communication accuracy, receivable range, and transmission speed. We evaluated them on the experimental device and found the following results; 1) Under the transmission speed of 115200 [bps], the reception accuracy does not decrease with cable connection and with reflected lights. 2) Reflected lights could be received source at a distance of 7.2 cm from the LED.

The received signal must be amplified to improve communication accuracy and communication range. In addition to that, an element capable of high-speed operation must be used to improve transmission speed.

*Keywords : Visible Light Communication(VLC), Reflected Lights, Confidentiality, IoT, FPGA*

### 1. はじめに

近年, 高速明滅可能な LED が登場し LED の光に信号を重畳させ伝送する可視光通信が提案された. 電波とは異なる通信手段のためその標準化への活動があり, 2007 年に中川らを中心とした可視光通信コンソーシアム(VLCC)の標準化案をもとに, 社団法人電子情報技術産業協会(JEITA)によって可視光を媒体とする通信規格「可視光通信システム」(CP-1221)が制定された[7].

VLCC は 2014 年に一般社団法人可視光通信協会(VLCA)を設立し, 現在も可視光通信の普及活動を行っている.

可視光通信に関連する開発研究では既存の照明器具に取り付け可能なデバイスの開発[1]や, 水中での無線通信[2], 交通機関へ利用した自動運転のサポート[3]等が提案されている.

これらの先行研究の課題には, 太陽光のような背景光との区別があげられる[4]. 家庭用照明器具に取り付ける場合は, 照明光を直接受信できる場所でなければ信号を受信できないという問題があり, 現在普及している WiFi と置き換えるのは難しい. 照明光としてよく用いられる白色 LED は, LED からの光で蛍光体を励起させ白色を演出しており, LED の点滅周波数を上げると蛍光体励起が追いつかなくなるため高速化が難しいことが指摘されている[8]. また, 可視光通信が必要とされる場面では電波の使用が好ましくない場面であることが考えられるため, 双方向通信の実現についても課題として挙げられている[6].

### 2. 目的

可視光通信の利点は光を外に漏らさなければデータの機密性に優れ, 他の周波数帯の電波との干渉が無いことである. しかし, 従来の研究では直接光を用いて通信していたため, 家庭用照明光で通信を行う場合は同じ部屋内でも通信できない場所があった. 本研究では反射光からの受信性能を検証する. 本研究の検証結果から屋内における通信精度の向上および通信可能範囲の拡大のため取り組まねばならない課題を明確にする.

### 3. 研究手法

#### 3. 1 構成

図 1 に, 本研究で用いる可視光通信システムの構成図を示す. 送信機で送信するデータは PC から RS232C で送信機側の FPGA へ送り, それを可視光通信用に符号化・変調し LED を点滅させる. 受信機側は, Photo Diode(PD)を用いた受光回路によって光を受信し RS232C インターフェース IC を用いて信号レベルを変換, FPGA で復号化し信号を取り出す. 本システムは調歩同期式である. 受信したデータは受信機側の FPGA から PC へ RS232C で送信するため, PC 上で確認できる.

製作した可視光通信システムの実機を図 2 に, 研究に使用した機器を表 1 に示す. FPGA は Spartan-3A を用いたが, 内部クロックが 50[MHz]のため本システムの最大動作周波数は 50[MHz]以下である. また, 試作のため LED は小型のもので代用しているが, 今後は部屋全体を照らすより高出力のものを扱う予定である.

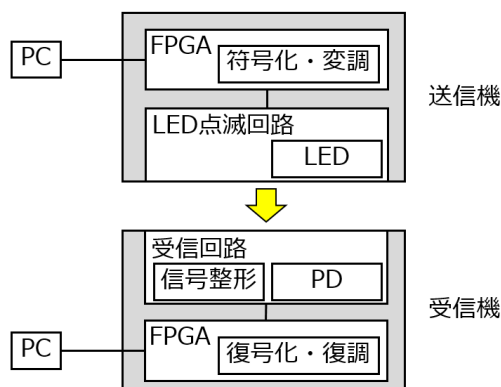


図 1. 可視光通信システム構成図

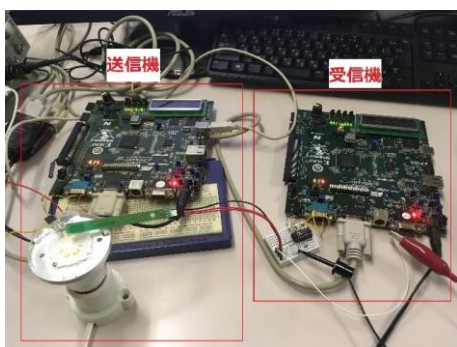


図 2. 可視光通信システム実機

表 1. 使用機器

名称	型番	メーカー
FPGA	Spartan-3A スターターキット	Xilinx
LED1	LDA7N-H	東芝
LED2	OSM5XNE3C1S	OptoSupply
PD	LEC-RP0508B	アウトスタンディングテクノロジー
RS232C インターフェース IC	ADM3202ANZ	Texas Instruments
MOSFET1	BSP149	Infineon Technologies
MOSFET2	IRLI520NPBF	Infineon Technologies
オシロスコープ	TBS1052B	Tektronix
直流安定化電源	LEADER 818-1.2	新川電機
ファンクションジェネレータ	WF1973	エヌエフ回路設計ブロック

### 3. 2 符号化

本研究では、4B5B 符号化を用いて信号の符号化を行った。4B5B 符号化を用いた信号の送受信については立花ら(2012)による研究が先行研究として挙げられる[5]。変換後は 0 または 1 の連続が 3bit 以下となるように設計されているため、可視光通信に用いることで照明のちらつきを抑えることが期待できる。

また、符号化の対象となるのは PC から RS232C で送信機に到達する 1 フレーム(10 ビット)の信号のうちデータ部に相当する 8 ビットである。この 8 ビットのデータに対し 4B5B 符号化を行い

10 ビットに変換し、スタートビットとストップビットを加え合計 12 ビットを 1 フレームのデータとして送信する。つまり、4B5B 符号化により符号化後のクロックの周波数は符号化前の周波数の 6/5 倍となる。PC と FPGA 間の伝送速度と、送信機と受信機間の伝送速度の対応を表 2 にまとめる。以降本稿における伝送速度とは、特に指定がなければ送信機と受信機間の速度を指す。

表 2. 伝送速度の対応

PC-FPGA		送信機-受信機	
ボーレート[bps]	周波数[Hz]	ボーレート[bps]	周波数[Hz]
9600	4800	11520	5760
115200	57600	138240	69120
230400	115200	276480	138240
460800	230400	552960	276480

### 3. 3 点滅回路

本研究では LED の点滅回路を 2 種類製作した。初期に製作した回路図を図 3 に、不具合を確認したため修正した回路図を図 4 に示す。図 3 は家庭用 LED 照明 LDA7N-H の内部回路と LED の間に FET を挿入してスイッチング回路を作り、Spartan-3A からの信号で点滅させる。FET は BSP149 を用いた。図 4 も同様に、FET によるスイッチング回路で LED を点滅させる。LED に OSM5XNE3C1S を、FET に IRLI520NPBF を用いた。図 3 と図 4 の大きな違いは、電源に AC 100[V]を用いているか DC 6[V]を用いているかである。

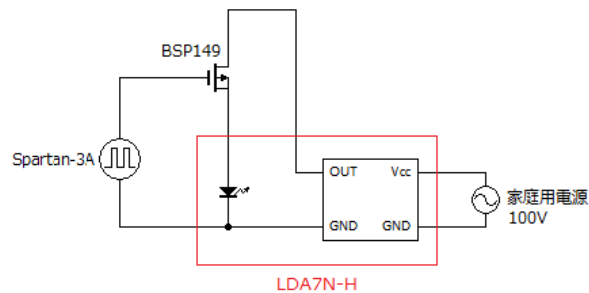


図 3. LED 点滅回路 1

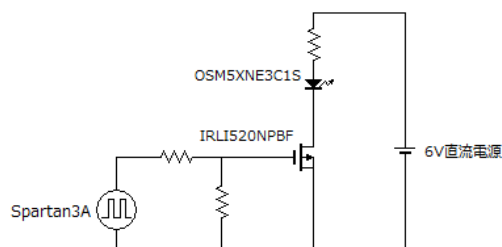


図 4. LED 点滅回路 2

### 3. 4 受信回路

PD に LEC-RP0508B を用いた受信回路を図 5 に示す。この回路に用いた RS232C インターフェース IC の ADM3202ANZ は表 3 のような入出力関係がある。また、この回路において  $R_{d1}$  は重要な役割を持つ。装置の受信距離を延ばす場合や反射光のような微弱な信号を扱う場合は受信感度 ( $V_{d1}$ ) を高くする必要があり、 $R_{d1}$  を大きくすることで実現できる。一方、通信速度を上げたい場合は PD の電荷の放出を高速に行う必要があり、 $R_{d1}$  を小さくすることで実現できる。本研究では、3.6 節に示す装置の評価を通して反射光を受信するのに適切な  $R_{d1}$  の値を求めていく。

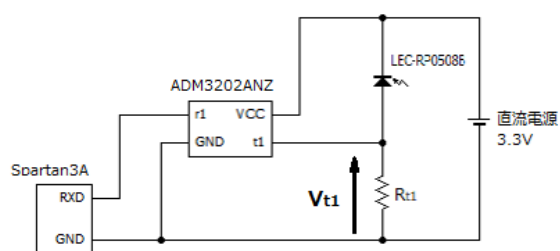


図 5. 受信回路

表 3. ADM3202ANZ の入出力関係

入力( $V_{d1}$ )	出力(RS232C 信号レベル)
1.67[V]以下	“1”
1.67[V]以上	“0”

### 3. 5 調歩同期

本システムは調歩同期式であるが、受信精度を向上させるため以下の方式を採用している。

受信機側はアイドル時に 50[MHz]の周波数で信号を読み取り、スタートビットを検出後、送信機と受信機の間で取り決めておいたクロックの半分の時間を空けてから調歩同期を開始する。これにより受信する波形の中央あたりで信号を読み出すことができ受信データの信頼性が向上する。ストップビットを受信後は直ちに 50[MHz]のアイドル状態に戻る。

FPGA の各個体のクロックには僅かな誤差が生じると考えられるが、この方式を用いることで誤差の修正が期待できる。

### 3. 6 評価方法

本研究では制作した装置について、受信精度・受信距離・応答速度の 3 つの評価を行う。各評価に現れる  $R_{d1}$  は図 5 における受信回路の抵抗値を指す。また、直接光と反射光の受信距離の測定はそれぞれ図 6 と図 7 の矢印の長さである。反射光の受信距離は光源から壁までを測定しているため、光源から PD までの実際の距離は、測定した距離の 2 倍の長さとなる。反射光を測定する際は PD に LED からの直接光が入射しないよう LED を紙

を筒状にしたもので覆い、その上に PD を配置している。

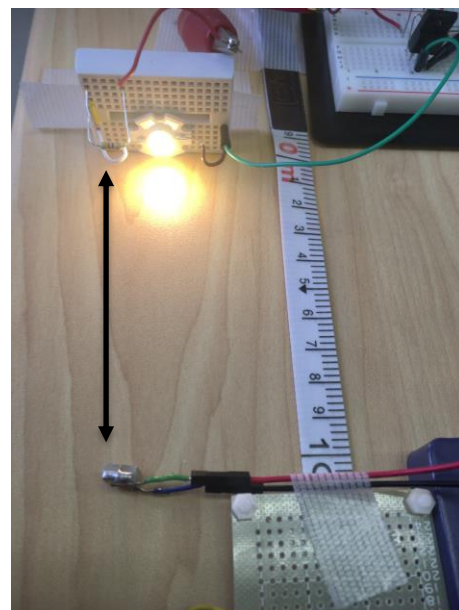


図 6. 直接光の測定環境

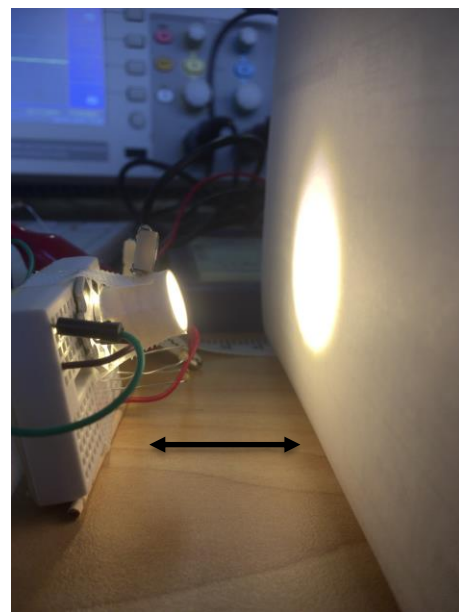


図 7. 反射光の測定環境

#### (i). 通信精度の評価

製作した装置を用いて通信を行い、その通信精度を評価する。元データは PC から送信機へ RS232C で送信し、受信機で受信したデータは同様に RS232C で PC へ送る。元データと受信したデータは PC 上に保存されるので、比較して(1)式よりビット単位の通信精度を求める。データはランダムな文字列で構成される 4KB のテキストファイルとし、伝送速度は 11520[bps]と 138240[bps]の 2 つを用意した。この評価では①直接ケーブルで接続②直接光③反射光の 3 通りの通信を行う。同時に、 $R_{d1}$  の値を変更

し、最も精度の高かった抵抗値を求める。

$$(\text{通信精度})[\%] = \left\{ 1 - \frac{\text{diff}[(\text{送信}/\text{受信データ})[\text{bit}]]}{4 \times 1024 \times 8 [\text{bit}]} \right\} \times 100 \quad (1)$$

#### (ii). 通信可能距離の評価

装置を用いて通信を行い、信号が受信可能な距離を測定する。この評価では LED 点滅回路における FPGA からの入力をファンクションジェネレータで置き代える。入力は 10[kHz]の周波数の矩形波とし、受信回路中の FPGA への出力部分をオシロスコープで測定し信号が復元できているか確認する。また、 $R_{\text{d}}$  の値を変更し各抵抗値における通信可能距離を記録する。信号が読み取り可能とする指標にはデューティ比を用いる。デューティ比  $D$  は(2)式より計算できる。

$$D = \frac{\tau}{T} \quad (2)$$

ここで、 $\tau$ は信号が立ち上がっていない時間、 $T$  は搬送波の周期である。デューティ比が 10%以下または 90%以上の信号は受信が難しく復元が困難である。よって、デューティ比 10%から 90%までの波形を受信可能な信号とする。

#### (iii). 応答速度の評価

装置全体の応答速度を評価する。この評価では LED 点滅回路における FPGA からの入力をファンクションジェネレータに置き換え、任意の周波数の矩形波を入力した時の応答を評価する。入力した波形は①FET②LED③受信回路と伝わる。速度向上の手法を考察するために、それぞれの項目について評価を行う。各項目の評価方法は次の通り。

##### ① FET の応答速度の評価

LED 点滅回路中の FET の D-S 間の電位をオシロスコープで測定する。

##### ② LED 明滅速度の評価

FET のスイッチングにより LED を点滅させ、LED の両端の電位をオシロスコープで測定する。

##### ③ 受信回路の出力の応答速度の評価

LED 点滅回路からの信号を受信回路で受信し、FPGA への出力をオシロスコープで測定する。このとき、デューティ比が 10%から 90%までの信号を読み取り可能とする。

## 4. 結果とまとめ

### 4. 1 初期実験における送信機の製作

LED に LDA7N-H を用いて図 3 の LED 点滅回路を製作した。PC 上から伝送速度 9600[bps]で文字“a”を送信し、図 5 で示した受信回路中の  $V_{\text{d}}$  を測定した結果図 8 のような波形が得られた。波形は送信した信号と一致した。一方で図 9 に示すように、信号とは無関係に一定の周期で LED が消灯してしまうという問題

が生じた。また、受信した波形が歪んでいたが、FET と受光器の応答速度を考慮すると反応が鈍く、正常に動作していないことが考えられる。そこで、次に図 3 の点滅回路における FET の挙動が正常であるか調査した。

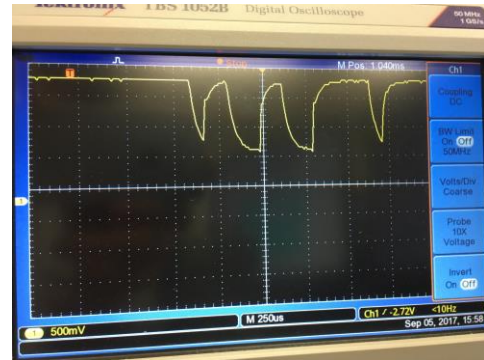


図 8. 初期実験における受信信号

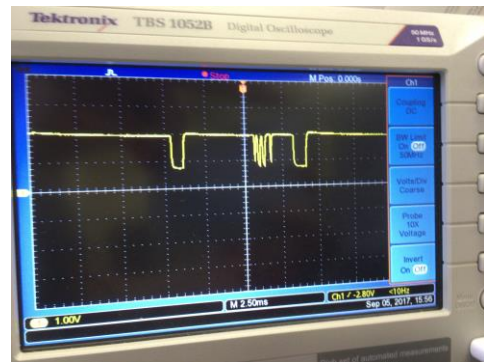


図 9. 周期的に LED が消灯している様子

### 4. 2 FET の ON/OFF 時の挙動について

FET を用いて LED を ON/OFF させたときの電流値を表 4 に示す。OFF 時にもわずかに電流が流れてしまい、LED を完全に消灯できていなかった。BSP149 のカットオフ電流は 0.1[μA]のため OFF 時の挙動は異常である。

表 4. FET の応答

ON 時	OFF 時
0.17A	8mA

### 4. 3 初期実験結果のまとめと考察

初期実験では図 3 の点滅回路を用いて信号を伝送した。一方で LED が信号とは無関係に一定の周期で点滅するという問題が発生した。原因として以下の 2 つを考えた。

(1) 使用した FET の性能が足りなかった。

(2) FET を挿入することで LED 内部回路に不具合が生じた。

(1)が原因であれば、使用する FET を高性能なものに交換することで解決する。(2)が原因であれば、使用する LED を単体のチップのものに取り替えることで解決する。



FETの交換とLEDの変更をそれぞれ行った結果、原因は(2)であることが分かった。次の4.4節から点滅回路に使用するLEDを変更し新たな回路を製作して実験を行った。

#### 4.4 LED点滅回路の修正

初期実験で使用したLEDを単体チップのOSM5XNE3C1Sに変更し図4の点滅回路を製作した。PC上から伝送速度9600[bps]で文字“a”を送信し、図5の受信回路で受信し $V_{in}$ を測定した結果図10のような波形が得られた。LEDが信号と無関係に消灯せず目的の信号を取り出せることが確認できた。また、信号の波形が矩形波に近く、この伝送速度ではFETとLEDとPDの応答速度に問題なく通信ができることが確認できた。4.5節からは、図4の点滅回路と図5の受信回路を用いて図1の可視光通信システムを構成し3.6節の手順で装置の評価を行う。

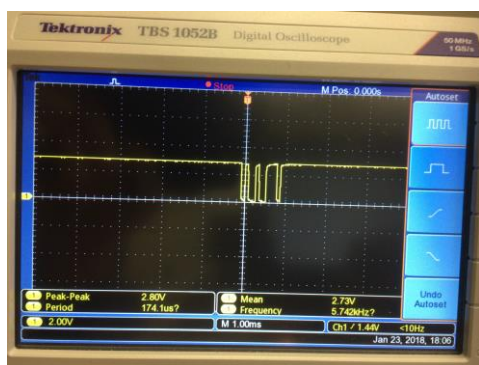


図10. 回路変更後の受信信号

#### 4.5 通信精度の評価

4[KB]のテキストデータを各伝送速度で送受信し、(1)式より通信精度を算出した結果を表5にまとめる。測定した結果、少なくとも276480[bps]以下の周波数ではケーブル接続・直接光・反射光における通信で精度に違いがないことが分かった。また、この時の直接光・反射光における $R_{t1}$ の値と受信距離を表6に示す。反射光の受信距離については、測定した値を2倍して光源からPDまでの距離を求めている。反射光の場合は受信精度が落ちてしまったが、原因として $R_{t1}$ が高く信号の復元が追いつけなかったと考えている。

表5. 各通信手段における通信精度

伝送速度	ケーブル接続	直接光	反射光
11520[bps]	100.0000[%]	100.0000[%]	100.0000[%]
138240[bps]	100.0000[%]	100.0000[%]	100.0000[%]
276480[bps]	100.0000[%]	100.0000[%]	100.0000[%]
552960[bps]	100.0000[%]	100.0000[%]	76.7120[%]

表6.  $R_{t1}$ の抵抗値と光源からの距離

通信方法	$R_{t1}$ [k $\Omega$ ]	距離[cm]
直接光	8	2.0
反射光	33	3.0

#### 4.6 通信距離の評価

本装置を用いて信号が受信可能な距離を測定する。直接光での測定結果のグラフを図11に示す。同様に、反射光の測定結果のグラフを図12に示す。ここで、下限距離はデューティ比が90%となる距離を指す。下限距離より短い場所では光源から受け取るエネルギーが過剰となり信号の復元が難しくなる。上限距離は光信号が微弱でデューティ

比が10%となる距離を指す。信号が復元できる距離の範囲は上限距離と下限距離の間である。

評価の結果、反射光を用いる場合は光の一部が壁に吸収されるといった現象により同じ距離でも受信信号が弱くなるため受信可能距離が短くなることが確認できた。

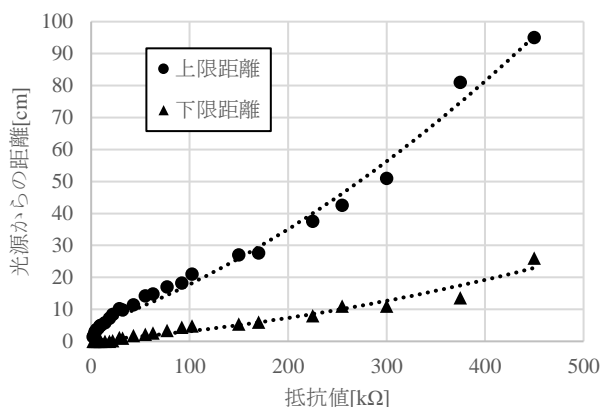


図11. 直接光における受信距離と $R_{t1}$ の抵抗値の関係

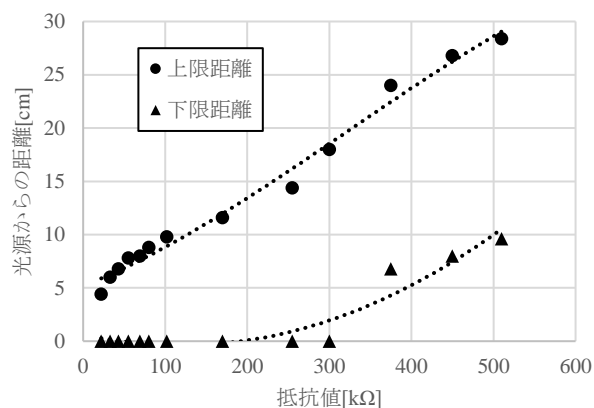


図12. 反射光における受信距離と $R_{t1}$ の抵抗値の関係

#### 4.7 応答速度の評価

FET, LED, 受信回路の出力の応答速度を測定した結果を表7に示す。受信回路の $R_{t1}$ の値は表6のものを用いた。FETは2.2[MHz]より高い周波数ではON時にD-S間の電位を0まで下げることができなかった。LEDのみ個別に単体テストした結果、計算上は2.95[MHz]までの周波数で動作することが分かったが、FETを用いてスイッチングを行うと2.2[MHz]よ

り高い周波数では明るさの減少が確認できた。受信開始の出力の応答速度については、直接光と反射光で異なる結果となった。これは抵抗値  $R_d$  の値が異なるためだと考えている。 $R_d$  の値は大きいほど受信回路の動作周波数は低下する。一方で反射光は信号が減衰しているため  $V_d$  を大きくとる必要がある。 $V_d$  を増幅させることで  $R_d$  を小さくできるため、速度向上の課題として  $V_d$  の増幅を挙げる。

また、受信回路において RS232C インターフェース IC の応答速度が足を引きずる結果となった。しかし RS232C は 100[KHz]以下で使われることが多い点を考慮すると、これは十分な速度である。さらなる高速通信を実現するためには、本システムにおいて別の通信規格を採用する必要がある。

表 7. 各素子の応答速度

測定対象	最大動作周波数[MHz]
FET(D-S 間)	2.2
LED	2.95
受信回路の出力 (直接光)	1.0
受信回路の出力 (反射光)	0.2

#### 4. 8 結果とまとめ

本研究では、図 4 と図 5 の回路を用いて図 1 のシステムを構成した。このシステムの性能評価の結果を表 8 にまとめる。通信精度を評価した結果、276480 [bps]以下の伝送速度ではケーブル接続・直接光・反射光で精度に差が出なかった。

表 8. 評価のまとめ

	ケーブル接続	直接光	反射光
抵抗値[kΩ]		8	33
受信精度 (11520[bps])	100.0000[%]	100.0000[%]	100.0000[%]
受信精度 (138240 [bps])	100.0000[%]	100.0000[%]	100.0000[%]
受信精度 (276480[bps])	100.0000[%]	100.0000[%]	100.0000[%]
受信精度 (552960 [bps])	100.0000[%]	100.0000[%]	76.7120[%]
受信距離[cm]		4.8	7.2
最大動作周波 数[MHz]		1.0	0.2

受信可能距離が反射光のほうが長くなった理由として、 $R_d$  が高かったことが考えられる。図 11 図 12 の結果を比較すると、 $R_d$  が同じ値であれば受信可能距離は反射光のほうが短く、反射光は直接光に比べて減衰することが確認できた。

動作周波数が直接光に比べ反射光のほうが低くなった理由

として以下の 2 つが考えられる。

(1)抵抗値  $R_d$  が大きい

(2)LED の光が壁を反射する速度が遅い

直接光と反射光で  $R_d$  の値に差があるため(1)が原因である可能性があり、受信信号を増幅することで  $R_d$  の値を下げることで課題となった。また、本システムには RS232C を用いているが、これが装置の通信速度におけるボトルネックとなった。各素子の応答速度は表 9 の通りである。さらなる速度向上を目指す場合は、通信規格の見直しを含め、装置の各素子を再検討する必要がある。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたって、終始熱心にご指導を賜りました才田聡子准教授に感謝の意を申し上げます。また、使用機器に関してご指導頂きました桐本賢太教授、吉野慶一教授、松久保潤准教授に厚く御礼申し上げます。また、貴重な機材を貸していただいた太屋岡研究室の皆様に重ねて御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 上野 秀樹, 佐藤 義之, 片岡 淳, ”可視光 ID システム”, 東芝レビューVol.62, No.5, pp.44-47, 2007
- 2) 浅沼 市男, 宗山 敬, “海洋レーザ観測装置の基礎実験について”, 海洋科学技術センター試験研究報告, pp.125-140, Mar.1990
- 3) 李 曜廷, “イメージセンサによる新しい車車間可視光通信”, 慶応義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント工学科修士論文, March.2014
- 4) 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, OCS2005-19, pp. 43-48, May, 2005
- 5) 立花 裕也, 藤本 暢宏, “プログラマブル LSI
- 6) による高速可視光通信システム用 4B/5B CODEC に関する研究”, 近畿大学工学部研究報告 No.46, pp.55-59, 2012
- 7) 鈴木 康祐, 旭 健作, 渡邊 晃, ”LED を受光素子とする双方向可視光通信システムの検討”, 電子情報通信学会技術研究報告 Vol.110, No50, pp.5-10, May, 2010
- 8) 春山 真一郎, ”JEITA 規格 CP-1221「可視光通信システム」及び CP-1221「可視光 ID システム」”, JEITA review, 8 巻, 7 号, pp.16-19, July, 2007
- 9) 藤本 暢宏, ”照明光通信の開発を目指して”, 近畿大学次世代基盤技術研究所報告 Vol.1, pp.95-100, 2010