

## 高速光無線通信用CMOSイメージセンサとその自動車システムへの応用に関する研究

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学 公開日: 2015-12-16 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 高井, 勇 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.14945/00009272">https://doi.org/10.14945/00009272</a>

静岡大学 博士論文

高速光無線通信用 CMOS イメージセンサと  
その自動車システムへの応用に関する研究

2015 年 6 月

大学院 自然科学系教育部

ナノビジョン工学専攻

高井 勇



# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 背景	1
1.2 研究の目的と概要	5
1.3 論文の構成	8
参考文献	9
<b>第2章 イメージセンサ通信技術の基礎的考察と自動車システムへの応用</b>	<b>12</b>
2.1 ISCの概要と特徴	12
2.2 最大受信角と最大安定受信距離	15
2.3 ISCの自動車システムへの応用	18
2.4 LEDの情報送信デバイスとしての性能	21
参考文献	33
<b>第3章 光通信イメージセンサとイメージセンサ通信システム</b>	<b>34</b>
3.1 はじめに	34
3.2 光通信イメージセンサ (OCI)	35
3.2.1 OCIを用いたISCシステムの概要	35
3.2.2 光通信画素 (CPx)	37
3.2.3 フラグ画像出力機能	40
3.2.4 OCIチップの全体構成	43
3.2.4 OCIチップの試作	45
3.3 CPxの基本特性	46
3.3.1 直流応答特性	47
3.3.2 周波数応答特性	48
3.3.3 時間応答特性	50
3.4 LED送信機システムとカメラ受信機システム	51
3.4.1 LED送信機システム	51
3.4.2 カメラ受信機システム	55
3.4.3 ノイズ測定	59
3.4.4 フラグ画像出力機能の動作実験	62

<b>3.5 光信号伝送実験</b>	<b>63</b>
3.5.1 10 Mbps の光信号受信	64
3.5.2 照明環境が受信性能に与える影響	66
3.5.3 通信距離が受信性能に与える影響	67
3.5.4 符号誤り率 (BER) の測定	68
3.5.5 座標切り替えによる光信号の受信開始時間	70
<b>3.6 まとめ</b>	<b>72</b>
<b>参考文献</b>	<b>74</b>
<b>第4章 ISC 技術の自動車システムへの応用： 光車車間通信システム</b>	<b>76</b>
4.1 はじめに	76
4.2 光車車間通信システムの概要	76
4.3 車載用 LED 送信機およびカメラ受信機システム	78
4.4 光車車間通信システムの構築	82
4.5 走行実験	85
4.5.1 LED 検出実験	85
4.5.2 パケット到達率の測定	88
4.5.3 符号誤り率の測定	89
4.5.4 車両内部データおよび画像データの伝送実験	90
4.6 まとめ	97
<b>参考文献</b>	<b>99</b>
<b>第5章 結論</b>	<b>100</b>
<b>謝辞</b>	<b>102</b>
<b>発表履歴</b>	<b>104</b>

# －図目次－

1.1	LED を用いた OWC システム.....	1
1.2	LED を用いた OWC の自動車分野への応用例.....	2
1.3	LED 検出の課題.....	6
1.4	OCI の概要.....	7
2.1	PD 通信の概要.....	13
2.2	ISC の概要.....	13
2.3	通信距離と受信電力の関係.....	14
2.4	ISC の距離特性.....	15
2.5	レンズ焦点距離 $f$ と受信角 $\theta$ の関係.....	16
2.6	レンズ焦点距離 $f$ と安定受信距離 $L_{MAX}$ の関係.....	17
2.7	車車・路車間通信システムへの応用例とシステム動作概要.....	19
2.8	レンズ焦点距離と最大受信角および最大安定受信距離の関係.....	20
2.9	LED の周波数特性測定結果：白色 LED.....	23
2.10	LED の周波数特性測定結果：青－緑色系 LED.....	24
2.11	LED の周波数特性測定結果：黄色系 LED.....	24
2.12	LED の周波数特性測定結果：赤色 LED1.....	25
2.13	LED の周波数特性測定結果：赤色 LED2.....	25
2.14	LED の周波数特性測定結果：近赤外 LED.....	26
2.15	$t_r$ と $t_f$ の測定結果.....	27
2.16	発光波長 $\lambda$ と遮断周波数 $f_c$ の関係.....	32
3.1	OCI を用いた OWC システムの概要.....	37
3.2	通信画素の構造と等価回路.....	38
3.3	通信画素の動作概要.....	40
3.4	グレイ画像とフラグ画像の読出し回路.....	41
3.5	グレイ画像とフラグ画像の読出し動作.....	43
3.6	OCI の全体構成.....	44
3.7	CPx の選択の概要.....	45
3.8	試作した OCI チップの外観.....	46
3.9	CPx の直流光応答特性の測定システム.....	47
3.10	CPx の直流光応答特性の測定結果.....	48

3.11	CPx の周波数応答特性の測定システム.....	49
3.12	CPx の周波数応答特性の測定結果.....	50
3.13	CPx の時間応答特性の測定結果.....	51
3.14	LED 送信機システムの外観とシステムブロック図.....	52
3.15	LED 送信機の周波数応答特性と遮断周波数の測定結果.....	53
3.16	LED 送信機の時間応答特性の測定結果.....	54
3.17	マンチェスタ符号化の概要.....	55
3.18	カメラ受信機システムの外観とシステムブロック図.....	56
3.19	直接型 FIR フィルタのブロック図.....	58
3.20	入力信号の劣化モデル.....	59
3.21	入力信号の復元モデル.....	59
3.22	ノイズの PSD の測定結果.....	61
3.23	フラグ画像出力結果：屋内.....	62
3.24	フラグ画像出力結果：屋外.....	63
3.25	実験状況.....	64
3.26	10Mbps の光信号の受信結果.....	65
3.27	10Mbps の光信号受信時のアイパターン.....	65
3.28	照明環境を変化させたときの光信号の受信結果.....	66
3.29	通信距離を変化させたときの光信号の受信結果.....	67
3.30	通信距離を長距離にしたときの光信号の受信結果.....	68
3.31	光信号の受信結果：LED 検出機能オフ.....	69
3.32	光信号の受信結果：LED 検出機能オン.....	69
3.33	座標の切り替えパターン.....	71
3.34	座標切り替えによる光信号の受信開始時間の測定結果.....	71
4.1	光車車間通信システムの概要.....	77
4.2	LED 送信機システムの外観とシステムブロック図.....	78
4.3	カメラ受信機システムの外観と構成.....	80
4.4	パケット構造.....	81
4.5	複数の光源が検出されたときの選択手順.....	82
4.6	LED 送信機システムとカメラ受信機 システムによる光車車間通信システム.....	83
4.7	車間距離の算出方法.....	84
4.8	光車車間通信システムの外観.....	84
4.9	フラグ画像を用いた LED アレイの検出結果.....	87
4.10	5 秒ごとの PAR 測定結果.....	89

4.11	車両ピッチングの瞬間.....	89
4.12	車両内部データと画像データの受信結果：昼間 1.....	91
4.13	車両データと画像データの受信結果：昼間 2.....	92
4.14	車両データと画像データの受信結果：夜間.....	92
4.15	車間距離 L の測定結果（50 秒間）.....	93
4.16	後続車から見えない人物がいる場合の例.....	93
4.17	画像データの連続受信結果：昼間.....	94
4.18	画像データの連続受信結果：夜間.....	95
4.19	数百メートル走行時の前方画像の 平均受信フレームレートの測定結果.....	96

## －表目次－

2.1	測定 LED：白色 LED.....	21
2.2	測定 LED：青－緑色系 LED.....	22
2.3	測定 LED：黄色系 LED.....	22
2.4	測定 LED：赤色 LED.....	22
2.5	測定 LED：近赤外 LED.....	22
2.6	LED の $f_c$ , $t_r$ , $t_f$ の測定結果：白色 LED.....	28
2.7	LED の $f_c$ , $t_r$ , $t_f$ の測定結果：青－緑色系 LED.....	28
2.8	LED の $f_c$ , $t_r$ , $t_f$ の測定結果：黄色系 LED.....	28
2.9	LED の $f_c$ , $t_r$ , $t_f$ の測定結果：赤色 LED.....	29
2.10	LED の $f_c$ , $t_r$ , $t_f$ の測定結果：近赤外 LED.....	29
3.1	試作した OCI チップの設計仕様.....	46
3.2	LED 送信機システムの設計仕様.....	52
3.3	通信仕様.....	55
3.4	カメラ受信機システムの設計仕様.....	57
3.5	BER の測定結果.....	70
4.1	コントローラ部の主な設計仕様.....	79
4.2	LED アレイ部の主な設計仕様.....	79
4.3	カメラ受信機システムの設計仕様.....	80
4.4	通信方式の仕様.....	81
4.5	PAR の測定結果.....	88
4.6	BER の測定結果.....	90
4.7	前方画像の受信フレームレートの測定結果.....	96

# 第 1 章 序論

## 1.1 背景

近年，普及が進む LED（Light Emitting Diode）を情報送信デバイスとして活用する光無線通信（OWC：Optical Wireless Communication）技術が注目されている[1-3]。特に，照明・表示用の可視光 LED を用いた OWC は，可視光通信（VLC：Visible Light Communication）と呼ばれ，次世代のコピキタス通信技術として大きく期待されている[4-8]。日本国内では，可視光通信協会（VLCA：Visible Light Communication Association）[9]などが精力的に展開活動を実施しており，更にこの VLC 技術に関する規格化も進められている。例えば JEITA（電子情報技術産業協会）から CP-1221「可視光通信システム」，CP-1222「可視光 ID システム」，CP-1223「可視光ビーコンシステム」などの関連規格がすでに発行されている[10-12]。また，近年では海外，例えば IEEE（The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.）においても IEEE802.15 WPAN に“802.15.7 Short-Range Optical Wireless Communications”といったタスクグループが立ち上がっており，展開活動が加速し始めている[13]。

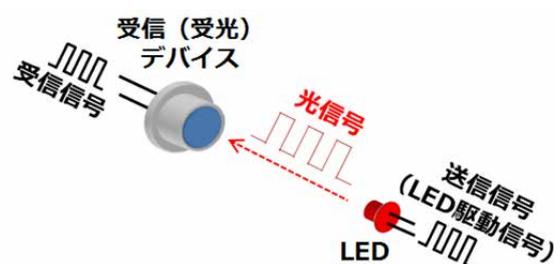


図 1.1 LED を用いた OWC システム

OWC システムは光源を変調，例えば点灯－消灯（ON-OFF）して，その明滅を光信号として情報を送信する。このように，光源から発せられた光の信号によって情報を送信する OWC システムにとって，LED は現在考えられる光源の中で最適である。なぜなら

LED は従来の照明光源，例えば白熱電球や蛍光灯と比較して桁違いに高速に応答（入力電気信号に対する発光の応答）することが可能であるため，高速に変調された大容量の光信号を送信することができる．更に LED は従来の光源と比較して省電力，長寿命であり，発光強度の向上と低コスト化も日々進められている．LED は今後も普及が加速し，様々な照明機器や表示機器に搭載されることが見込まれる[14]．従って，情報伝送のための送信ノードが生活環境のあらゆる場所に設置されるという，従来では考えられなかった通信環境の変化が起こると期待される．このような背景から，LED を用いた OWC は近い将来のユビキタス通信システムとして発展する可能性を大いに秘めている．

この LED を用いた OWC 技術を自動車の通信システムに応用する試みも始まっている[15-22]．LED の普及はすでに自動車および道路交通分野にも及んでおり，ヘッドライトやブレーキランプといった車両の灯火類，交通信号機などへの搭載が急速に進んでいる．これは，この領域においてもあらゆるところに LED という送信ノードが設置されてきていることを意味する．代表的な応用例として，図 1.2 に示すような車両間で通信を行う車車間（V2V：Vehicle-to-Vehicle）通信，信号機などの道路インフラと車両間で通信を行う路車間（V2I または I2V：Vehicle-to-Infrastructure）間通信などが検討されている．

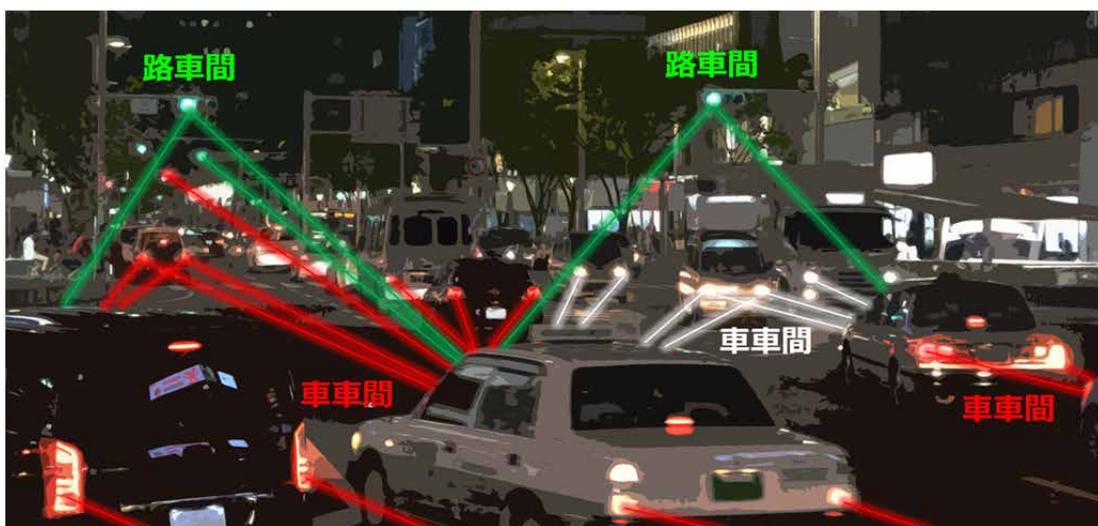


図 1.2 LED を用いた OWC の自動車分野への応用例

一方、この OWC システムの受信（受光）デバイスには pn 型フォトダイオード（PD）や pin 型 PD、アバランシェ PD などの単一 PD を使用することが広く検討されている [23-25]。これらの受信デバイスは、近赤外を用いた近距離の OWC 規格である IrDA（Infrared Data Association）などでもすでに使用されており、入手性やコスト、利用実績の観点からシステムへの導入が検討しやすい。しかしながら単一 PD の受信チャンネルは空間方向に一点しかないため、PD の前方空間（検出範囲内）の光をその一点ですべて受けることになる。これは極めて近距離の 1 対 1 通信を前提とした場合であれば問題がないが、図 1.2 のように、比較的遠距離で前方に複数の LED が存在する場合、それらの信号が全て合成されて PD に入射する。これはいわゆるクロストークや干渉、混信と呼ばれる状態であり、合成されてしまった信号から各信号を分離することは非常に困難である。また、特に車載システムの場合は屋外での使用が前提となるため、太陽や街灯といった強力な外乱光が PD に直接入射する状況を考えると、PD で飽和が生じて LED の光信号が全く検出できなくなる恐れがある。

このような課題を解決するため、近年、カメラ（イメージセンサ）を受信デバイスとして用いる検討が行われている [26-29]。カメラに搭載されたイメージセンサは、PD を内蔵した画素が 2 次元平面に数十万個から数百万個並べられており、画素の数だけ検出範囲内を空間分離（分割）できる [30]。従って、複数の LED や太陽、街灯などが同時に存在しても、それらは混信することなく個別の画素で受光され、個別の信号としてセンサから出力される。この混信（干渉）フリー通信は、イメージセンサを用いた受信システムが獲得する強力なアドバンテージである。このようにイメージセンサを用いた OWC システムが従来のシステムでは見られない極めて有益かつ実用的な特徴を持つことから、自動車応用を目指した OWC システムにカメラを適用する研究が進められている。また、近年、自動車には予防安全システムに用いるためのカメラの搭載がすでに進んでおり、そのカメラに通信機能を統合することができれば複数の機能を一台のカメラで実現することができるようになる。この機能統合は、従来にない、より高度な安全システムの実現に寄与する可能性がある。

しかしながら、イメージセンサを用いた“イメージセンサ通信（ISC：Image Sensor Communication）”にも乗り越えなければならない課題があり、単一 PD を用いた“PD 通信”と比較して伝送レート（通信速度）の向上が難しい [31]。単一 PD は通常でも数十

MHz や数百 MHz の帯域を持つため、数十 Mbps を超える高速な光信号を比較的容易に受信できる。しかしながら、通常イメージセンサは信号電荷を画素内の容量で一定時間蓄積した後に読み出すというサンプリング動作を行うため、そのサンプリングレート、すなわちフレームレートを超える速度の光信号を捉えることができない。一般的な撮影用カメラのフレームレートは数十 fps 程度であるため、ナイキスト条件を満足すると、事実上その半分以下の速度（数 Hz～数十 Hz）の信号しか受信できないことになる。ISC で伝送レートを向上するために、ハイスピードカメラを用いた受信システムが提案されている[32, 33]。しかしながら、ハイスピードカメラを用いたシステムは外部に大型の大容量メモリシステムが必要な上、莫大な枚数の画像を高速に処理するためのシステムコストが高く、車載システムに適用することは難しい。また、確かにハイスピードカメラのフレームレートは通常のカメラと比較して高速であるが、それでも画素あたりの伝送レートは数十 kbps～数百 kbps に制限される。基本的に画素で信号を蓄積してサンプルするという従来のイメージセンサの仕組みでは、MHz 以上の周波数で変化するような光信号を捉えることは容易ではない。この課題を乗り越える方法として、自動車用ではないが光信号受信のための独自設計のイメージセンサを用いるシステムが提案されている[34-36]。この独自のイメージセンサは画素に入射した光信号の蓄積とサンプリングを行わず、直接アナログ電圧信号として外部に出力する。つまりこれはイメージセンサのアーキテクチャの中に単一 PD 通信の仕組みを導入するといったアプローチであり、サンプリングレート、すなわちフレームレートによる伝送レートの制限を回避できる。しかしながら光 ID 信号（光ビーコン）の受信といった比較的低速のシステム用であるため、こちらも現状では数十 kbps 程度の伝送レートに限定されている。このように ISC の伝送レートは、現状では単一 PD 通信と比較して桁違いに遅く、大容量の情報伝送のための受信システムとしては未だ実用的な段階にない。

これまでに説明したように、普及が進む LED を送信デバイスとした OWC が盛んに研究されるようになり、その流れは自動車分野にまで波及している。この自動車（車載）用 OWC システムの受信デバイスとしてカメラ（イメージセンサ）が検討されているが、現状では伝送レートに課題があり、PD 通信のように大容量の情報伝送が実現できる用途が立っていない。LED とカメラによる自動車用 ISC システムの実現には、光信号の受信性能が飛躍的に高められた、これまでにないカメラ受信機が求められている。

## 1.2 研究の目的と概要

本研究では、自動車用 ISC システム実現において最も大きな課題の一つである受信システム、すなわちカメラ受信機の受信性能の大幅な向上を目指す[37]。更に ISC システムが自動車の通信システムに応用できることを示すため、そのカメラ受信機を実際の車両に搭載し、実運用環境を想定した屋外走行実験を通してその性能と有用性を示す[38]。

本研究で目標とする自動車用 ISC システムの情報伝送性能は、車速やブレーキなどの安全のための基本的な数値情報と音声や画像といった大容量のメディア情報を同時に伝送するため、単位画素あたり 10 Mbps とする。これは従来技術から二桁から三桁程度の性能向上を実現することになる。

すでに述べたように画像取得用のカメラを受信機として使用しても、イメージセンサの動作速度（サンプルレート、フレームレート）の制約から受信性能の大幅な向上は見込めない。従って本研究では、フレームレートによる伝送レートの制約からカメラ受信機を解放するための独自のイメージセンサを試作するというアプローチをとる。このイメージセンサを“光通信イメージセンサ（OCI : Optical Communication Image sensor）”と呼ぶ。ただし、製造コストの増加は普及の妨げとなるため、特殊なプロセスは使用せず、従来の CMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor）イメージセンサのプロセスで実現するという制約を課して研究を進める。

この OCI に従来にない二つの新しい機能を搭載し、自動車用 ISC システム実現の障壁となっている二つの大きな課題を克服する。一つは、前述した 10Mbps クラスの高速な光信号を受信する機能である。そしてもう一つは、画像内から LED を高速かつ高精度に検出する機能である。ISC では、受信性能向上という最も大きな課題以外にも、画像内から送信ノードである LED を高速に検出しなければならないという単一 PD 通信にはない重要な課題がある。イメージセンサで取得される画像には LED 以外の不要な物体が大量に写り込むが、ISC ではその画像中から LED を検出し、光信号の受信を開始しなければならない。しかしながら、通常の画像処理技術で複雑な画像内から LED だけを高速に見つけ出すことは容易ではない。例えば図 1.3 に示すように、通常のグレイ（輝度）画像に対して 2 値化処理を施しても、LED と空、LED と白い壁はそれぞれが十分に

明るため、このような簡単な処理ではそれらを正しく区別することは極めて困難である。また、画像処理技術を高度化していくと、画像処理デバイスの大型化に伴うコストの増加や、計算コストの増加に伴う検出速度の低下が懸念される。検出速度の低下は LED との通信リンクが確立できない時間、つまり通信遮断時間が長くなることを意味し、通信システムとして致命的な性能低下となる。我々はこの OCI に 10 Mbps の光信号の受信と高速かつ高精度な LED 検出という二つの重要な課題を克服する技術を搭載し、従来に例のないカメラ受信機の実現に挑戦する。

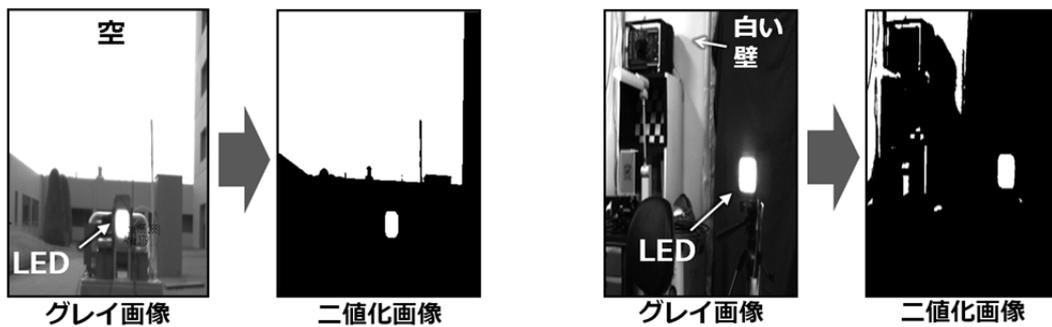


図 1.3 LED 検出の課題

本研究ではまず初めに、サンプル動作を基本とした通常の画像取得用の画像画素 (IPx : Image Pixel) では高速な光信号の受信が困難であるため、信号蓄積とサンプル動作を排除し、画素内の容量成分を低減して光の変化に対する応答性能の向上を追求した光信号受信用の新たな画素を設計する。これを“通信画素 (CPx: Communication Pixel)”と呼び、この CPx により 10 Mbps クラスの光信号の受信性能をカメラ受信機に与えることを目指す。次に、通常のグレイ画像内から画像処理で高速に LED を検出するのは困難であるため、LED のような強い光量を持つものだけが現れる特殊な画像を出力する回路を設計する。この画像の露光時間は通常のグレイ画像と比較して桁違いに短く、更にその画像は OCI 内で二値化 (1-bit 化) される。従ってその画像内には光強度の強い LED のような光源のみが“1”として現れ、LED と比較して強度の弱い物体 (領域) は“0”に落とされる。この画像を“フラグ画像”と呼び、LED しか存在しないこのフラグ画像を用いることで非常に高速かつ高精度な LED 検出を実現する。図 1.4 に設計を目指す OCI

の簡単な構造を示す。まず、CPx アレイと通信用回路（CPx の選択回路，受信信号出力回路など）から成る通信用回路群を設計し，更に IPx アレイと画像用回路（IPx の制御・選択回路，グレイ画像出力回路，フラグ画像出力回路など）から成る画像用回路群を設計する。そして，CPx と IPx の画素アレイを一つの画素アレイに混載し，更に画像用回路と通信用回路をこのハイブリッド画素アレイの周囲に配置する。機能集積が可能な CMOS 技術により，このように OCI には撮像と通信の二つの機能が同時に集積される。これにより，IPx と画像用回路を用いて画像内から LED を検出して追跡しつつ，検出された LED の光信号を CPx と通信用回路を用いて受信することができる。このような前例のない機能集積イメージセンサである OCI を実現し，カメラ受信機への搭載を目指す。

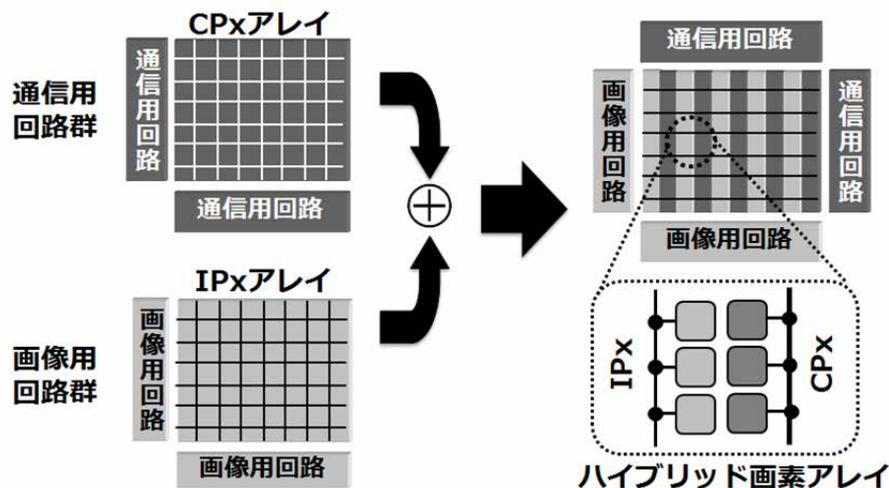


図 1.4 OCI の概要

次に，試作した OCI の受信デバイスとしての性能を明らかにするため，周波数応答特性などの基本的な特性を測定する。続いて，基本特性の測定結果を反映した OCI 搭載のカメラ受信機と LED 送信機から成る性能検証用の ISC システムを構築する。OCI の搭載により，カメラ受信機は高速かつ高精度に LED を検出しつつ，高速な光信号を受信する能力を獲得する。そして 10 Mbps クラスの光信号の伝送実験により，目標に対するカメラ受信機の性能を明らかにする。

最後に本研究の集大成として，車載システム用の OCI 搭載カメラ受信機と LED 送信機を試作し，それぞれを実際の車両に搭載して車両間で光情報伝送を行う“光車車間通

信システム”を構築する。そして屋外照明環境下かつ走行状態において車車間で車速などの基本的な数値データと大容量の画像データを伝送する実験を行い、ISC システムが自動車用通信システムとして十分に適用できる能力と性能を持つことを示す。

本論文では、大きな二つの課題を克服するイメージセンサの実現に留まらず、LED 送信機とカメラ受信機による ISC システムの構築とその性能評価にも取り組む。更に前例のない自動車システムの構築と屋外走行時における性能評価にまで到達し、センサの研究から最終形態である自動車システムの研究まで一貫して取り組む。

### 1.3 論文の構成

本論文は以下の 5 章で構成される。

第 1 章では、背景および本研究の目的、概要を述べる。

第 2 章では、ISC の概要や特徴を紹介し、光学系によって決まるカメラ受信機の諸性能について述べる。また、ISC の自動車通信システムへの応用とその意義や優位性を示し、更に LED の情報送信デバイスとしての性能について実際の測定結果から言及する。

第 3 章では、実用的な自動車用 ISC システムを実現するためにカメラ受信機に与えられた“10 Mbps クラスの光信号の受信”と“高精度リアルタイム LED 検出”という二つの課題に応える OCI の設計と試作を行った結果について述べる。また、この OCI を搭載したカメラ受信機と LED 送信機から成る性能検証用の ISC システムを構築し、LED とカメラ間で様々な光伝送実験を行った結果について述べる。

第 4 章では、ISC システムが自動車用の通信システムに適用できることを示すため、車載用 LED 送信機と OCI を搭載したカメラ受信機を新たに試作すると共に、それらを実際の 2 台の車両に搭載し、車両間で情報伝送を行う“光車車間通信システム”を構築した結果を述べる。そして、様々な実運用条件下での実験、すなわち屋外走行実験を行い、その性能を明らかにした結果を述べる。

第 5 章では、本研究の結論を述べる。

## 参考文献

- [1] P. Daukantas, "Optical wireless communications: the new hot spots?," Optics & photonics news, OSA, pp.34-41, March 2014.
- [2] C. W. Chow, C. H. Yeh, Y. F. Liu, P. Y. Huang, "Mitigation of optical background noise in light-emitting diode (LED) optical wireless communication systems," IEEE photonics Journal, vol. 5, no. 1, p. 7900307, Feb. 2013.
- [3] L. Zeng, D.O'Brien, H. Minh, G. Faulkner, K. Lee, D. Jung, Y. Oh, E. T. Won, "High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting," IEEE J. Selected Areas in Communications, Vol. 27, No. 9, pp.1654-1662, Dec. 2009.
- [4] S. Haruyama, "Visible light communications," Proc. of 2010 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), pp.1-22, Sept. 2010.
- [5] S. Hranilovic, L. Lampe, and S. Hosur, "Visible light communications: the road to standardization and commercialization (Part1)," IEEE Communications Magazine, vol. 51, no. 12, pp.24-25, Dec. 2013.
- [6] S. Hranilovic, L. Lampe, S. Hosur, R.D. Roberts, "Visible light communications: the road to standardization and commercialization (Part 2)," IEEE Communications Magazine, vol.52, no.7, pp.62-63, July 2014.
- [7] D. O'brien, "Visible light communications: challenge and potential," 2011 IEEE Photonics Conference (PHO), pp.365-366, Oct. 2011.
- [8] Neil Savage, "Li-Fi gets ready to compete with Wi-Fi [News]," IEEE Spectrum, IEEE , vol.51, no.12, pp.13-16, Dec. 2014
- [9] 一般社団法人 可視光通信協会 (VLCA) , <http://vlca.jp/>
- [10] 電子情報技術産業協会規格, JEITA CP-1221, "可視光通信システム," 2007年3月.
- [11] 電子情報技術産業協会規格, JEITA CP-1222, "可視光 ID システム," 2007年6月.
- [12] 電子情報技術産業協会規格, JEITA CP-1223, "可視光ビーコンシステム," 2013年5月.
- [13] IEEE 802.15 WPAN (Wireless Personal Area Network) TG7 (Task Group 7), Visible Light Communication, <http://www.ieee802.org/15/pub/TG7.html>
- [14] C. W. Chow, C. H. Yeh, Y. Liu, Y. F. Liu, "Digital signal precessing for light emitting diode based visible light communication," IEEE Photonics Society news, vol.26, no.5, pp.9-13, Oct. 2012.
- [15] 中川正雄, "可視光通信と ITS," 電子情報通信学会技術研究報告, ITS, vol.106, no.181, pp.25-30, 2006年7月.

- [16] 山里敬也, “可視光通信の交通信号への適用,” 照明学会誌, vol.98, no.1, pp.17-20, 2014.
- [17] Shun-Hsiang Yu, O. Shih, Hsin-Mu Tsai, N. Wisitpongphan, R. Roberts, “Smart automotive lighting for vehicle safety,” IEEE Communications Magazine, vol.51, no.12, pp.50-59, Dec. 2013.
- [18] A. Belle, M. Falcitelli, M. Petracca, P. Pagano, “Development of IEEE802.15.7 based ITS services using low cost embedded systems,” 2013 13th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), pp.419-425, 5-7 Nov. 2013.
- [19] A.-M. Cailean, B. Cagneau, L. Chassagne, S. Topsu, Y. Alayli, M. Dimian, “Design and implementation of a visible light communications system for vehicle applications,” 2013 21st Telecommunications Forum (TELFOR), pp.349-352, 26-28 Nov. 2013.
- [20] R. Yoneda, K. Okuda, W. Uemura, “A tight curve warning system using FSK visible light and road-to-vehicle communication,” 2013 IEEE Third International Conference on Consumer Electronics Berlin (ICCE-Berlin), pp.1-3, 9-11 Sept. 2013.
- [21] N. Kumar, N. Lourenco, D. Terra, L.N. Alves, Rui L. Aguiar, “Visible light communications in intelligent transportation systems,” 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), pp.748-753, 3-7 June 2012.
- [22] A. Cailean, B. Cagneau, L. Chassagne, S. Topsu, Y. Alayli, J.-M. Blossville, “Visible light communications: Application to cooperation between vehicles and road infrastructures,” 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), pp.1055-1059, 3-7 June 2012.
- [23] L. Grobe, A. Paraskevopoulos, J. Hilt, D. Schulz, F. Lassak, F. Hartlieb, C. Kottke, V. Jungnickel, K.-D.Langer, “High-speed visible light communication systems,” IEEE Communications Magazine, vol.51, no.12, pp.60-66, Dec. 2013.
- [24] T. Saito, S. Haruyama, M. Nakagawa, “A New Tracking Method using Image Sensor and Photo Diode for Visible Light Road-to-Vehicle Communication,” 10th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT 2008), pp.673-678, 17-20 Feb. 2008.
- [25] S. Okada, T. Yendo, T. Yamazato, T. Fujii, M. Tanimoto, Y. Kimura, “On-vehicle receiver for distant visible light road-to-vehicle communication,” 2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.1033-1038, 3-5 June 2009.
- [26] 山里敬也, “受信機に高速イメージセンサを用いた ITS 可視光通信,” 電子情報通信学会技術研究報告, CS2013-94, vol. 113, no.390, pp.57-63, 2014.
- [27] 木村好克, 内藤貴志, 二宮芳樹, “可視光車車間通信システムのための LED 送信部検出手法,” 自動車技術会論文集, vol.41, no. 4, pp.889-894, 2010 年 7 月.

- [28] T. Yamazato, I. Takai, H. Okada, T. Fujii, T. Yendo, S. Arai, M. Andoh, T. Harada, K. Yasutomi, K. Kagawa, S. Kawahito, "Image-sensor-based visible light communication for automotive applications," *IEEE Communications Magazine*, vol.52, no.7, pp.88-97, July 2014.
- [29] H. Binti Che Wook, T. Komine, S. Haruyama, M. Nakagawa, "Visible light communication with LED-based traffic lights using 2-dimensional image sensor," 2006 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2006), pp.243-247, 8-10 Jan. 2006.
- [30] 高井勇, 川人祥二, "イメージセンサ通信技術を用いた光車車間通信システム," 信頼性, 日本信頼性学会誌, vol.34, no.8, 2012 年 11 月.
- [31] 高井勇, 川人祥二, "LED とカメラでつながる光車車間通信システム," 自動車技術, 自動車技術会, vol.68, pp.42-48, 2014 年 2 月.
- [32] 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," *Fundamentals Review*, 基礎・境界ソサイエティ, 電子情報通信学会, vol.3, no.2, pp.45-53, 2009.
- [33] N. Iizuka, "Image sensor communication –a new way of visible light communication," *Int. Display Workshop 2010 (IDW '10)*, pp. 2193-2196, 2010.
- [34] N. Matsushita, D. Hihara, T. Ushiro, S. Yoshimura, J. Rekimoto, Y. Yamamoto, "ID CAM: a smart camera for scene capturing and ID recognition," *Proc. of The Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2003*, pp.227-236, 7-10 Oct. 2003.
- [35] Y. Oike, M. Ikeda, K. Asada, "A smart image sensor with high-speed feeble ID-beacon detection for augmented reality system," *Proceedings of the 29th European Solid-State Circuits Conference 2003 (ESSCIRC '03)*, pp.125-128, 16-18 Sept. 2003.
- [36] 山中大, 春山真一郎, 中川正雄, "可視光 ID 情報受信用高速イメージセンサチップの設計," 電子情報通信学会技術研究報告, LQE, レーザ・量子エレクトロニクス, vol.107, no.302, pp.97-102, 2007 年 10 月.
- [37] I. Takai, S. Ito, K. Yasutomi, K. Kagawa, M. Andoh, S. Kawahito, "LED and CMOS Image Sensor Based Optical Wireless Communication System for Automotive Applications," *IEEE Photonics Journal*, vol.5, no.5, p.6801418, Oct. 2013.
- [38] I. Takai, T. Harada, M. Andoh, K. Yasutomi, K. Kagawa, S. Kawahito, "Optical Vehicle-to-Vehicle Communication System Using LED Transmitter and Camera Receiver," *IEEE Photonics Journal*, vol.6, no.5, p.7902513, Oct. 2014.

## 第2章 イメージセンサ通信技術の基礎的考察と自動車システムへの応用

LED を用いた OWC システムには、受信デバイスに単一 PD を使用した PD 通信と、イメージセンサ（カメラ）を用いたイメージセンサ通信（ISC）がある。本章では、PD 通信と ISC の比較を行うと共に、ISC の特徴や優位性を示す。また、ISC を自動車システムに導入した場合の概要についても述べる。更に、次章から研究目標であるカメラ受信機の性能向上に焦点を合わせて述べるにあたり、本章で市販されている LED の特性測定を行い、事前に情報送信デバイスとしての性能を明らかにしておく。

### 2.1 ISC の概要と特徴

PD 通信と ISC の概要を図 2.1 と図 2.2 にそれぞれ示し、両者の比較を行う[1]。PD 通信に用いる単一 PD は受光部分、すなわち光の受信チャンネルが受光面上に一つ（一点）しかない。そのため、前方空間内（信号検知範囲内）に複数の LED が存在したり、太陽などのノイズ源が存在したりする場合は、それらの受信信号はすべて PD 上で合成されて受信される。これは混信、干渉、クロストークと呼ばれる状態であり、合成してしまった信号から各信号を分離することは非常に困難である。また、太陽や街灯といった強力な外乱光が PD に入射すると、PD で飽和が生じて LED の光信号がまったく検出できなくなる可能性がある。この課題に対応するため、望遠レンズを使用して PD の検知範囲を狭めることで複数 LED の光信号の同時入射を回避すると共に、外乱光の影響を低減するシステムが提案されている[3]。しかしながら検出範囲が極めて狭いめ、送受システムが固定されている場合はよいが、移動体間の通信では空間内の LED の位置（座標）を別の方法（カメラを用いるなど）で見つけ、LED のある方向に PD を機械的に向けるなどの複雑な仕組みが必要になる。このようなことから、LED を用いた PD 通

信の屋外，とりわけ車載への応用検討は限定されてきた。

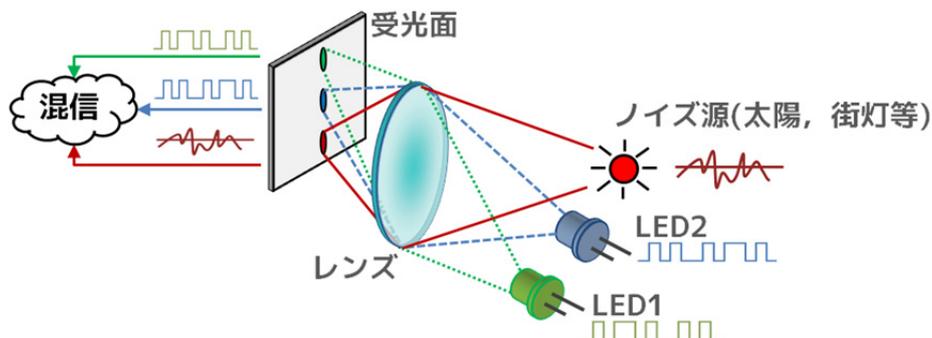


図 2.1 PD 通信の概要

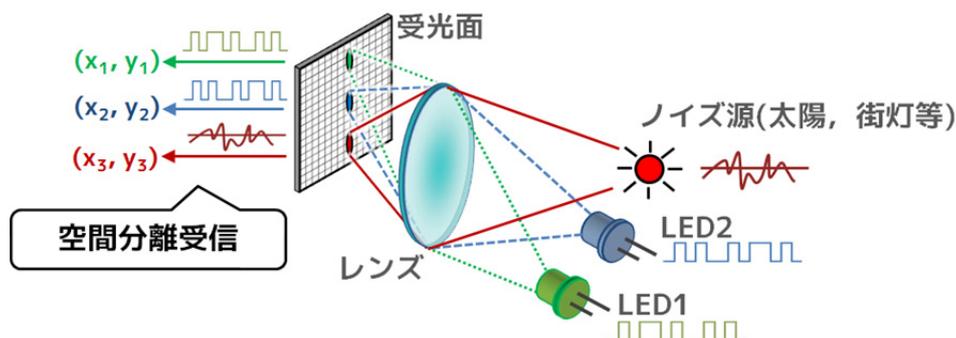


図 2.2 ISC の概要

一方，イメージセンサは PD を内蔵した数十万から数百万個の莫大な数の画素，すなわち光受信チャンネルを受光面上に持ち，画素の数だけ検出範囲内を空間分離できる[3]。従って，図 2.2 に示すように，受光面に入射した複数の光信号は空間的に完全に分離して受信され，個別の信号として出力される。そのため，ISC は複数 LED との混信のない通信が可能で，更にノイズ信号も光信号と分離されるという車載応用する上で非常に有益な特徴を持つ。またこの特徴により，各 LED 送信機の通信プロトコルが異なっても受信可能である。その上，光信号を受信する際，図に示すようにセンサ平面上の LED の空間座標 ( $x$ - $y$  座標) が光信号と同時に取得できる。これは，データ送信元の位置，つまり取得したデータが誰から送られてきたのかを直接特定することができることを意味する。

また、結像光学系を用いたこの ISC には、通信距離に対する受信電力が一定というユニークな特徴がある[4]。例えば図 2.3 に示すように、LED アレイとレンズまでの距離が  $L$  であるとき、LED アレイのイメージセンサ上の結像サイズ（画素数）が  $S$ 、その全受信電力を  $P$  とすれば、1 画素あたり（単位面積あたり）の受信電力は  $P/S$  となる。ここで、LED とレンズまでの距離を  $n$  倍離れた時、イメージセンサ上で受ける全受信電力は  $P/n^2$  となり減衰するが、同時に結像サイズも  $S/n^2$  と縮小されるため、1 画素あたりの受信電力は結果的に  $P/S$  となり、距離が変化しても一定である。このような通信距離の変化に対して受信電力が一定という特徴は、従来の無線通信技術では見られない。そしてこの特徴は、受信信号の強度変化を補償するような回路などを受信機から削減できるというメリットを生み、システムの簡素化を助けると共に通信品質を高める。ただし、受信電力が一定である距離の範囲は、LED アレイが 1 画素以上に結像している場合であり、結像サイズが 1 画素を下回ると距離の二乗で受信電力は減衰する。結像サイズが 1 画素になることを結像限界と呼び、結像限界に到達する条件は、LED アレイのサイズやレンズパラメータ、画素のサイズなどで決まる。

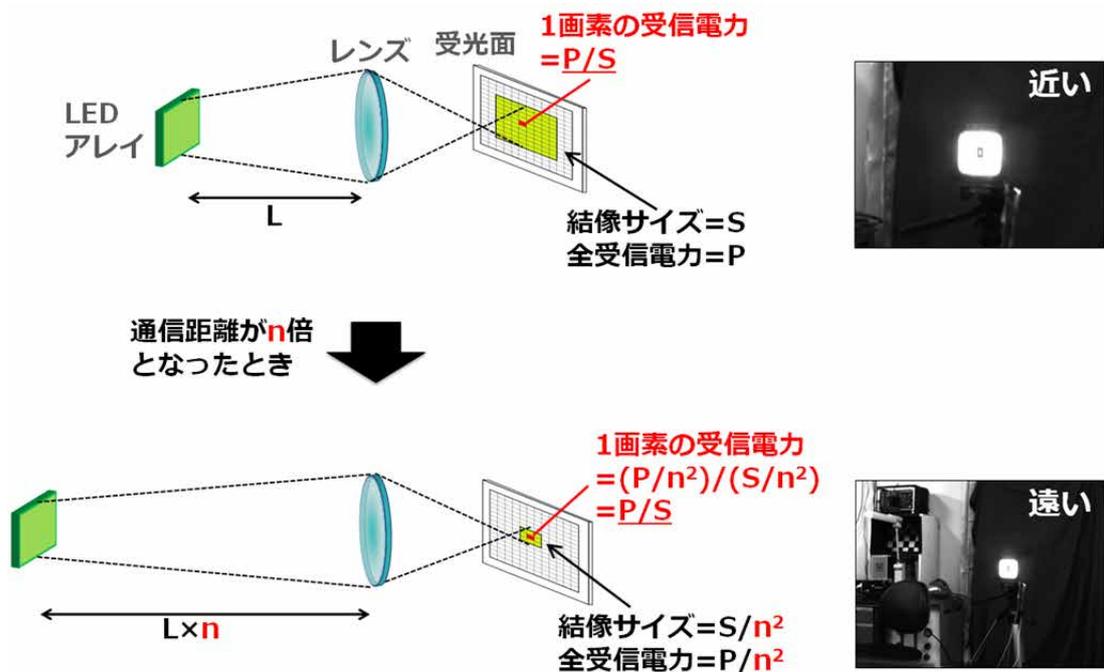


図 2.3 通信距離と受信電力の関係

図 2.4 に ISC の距離特性の概略を示す。すでに述べたよう ISC における 1 画素あたりの受信電力は、通信距離が伸びても結像限界に至るまでは一定であり、安定した通信品質が保たれる。そして対象物の結像サイズが 1 画素になる結像限界を超えると、距離の二乗で減衰を始める。この安定した受信電力が得られる理論的な最大距離を以後、“最大安定受信距離”と呼ぶ。

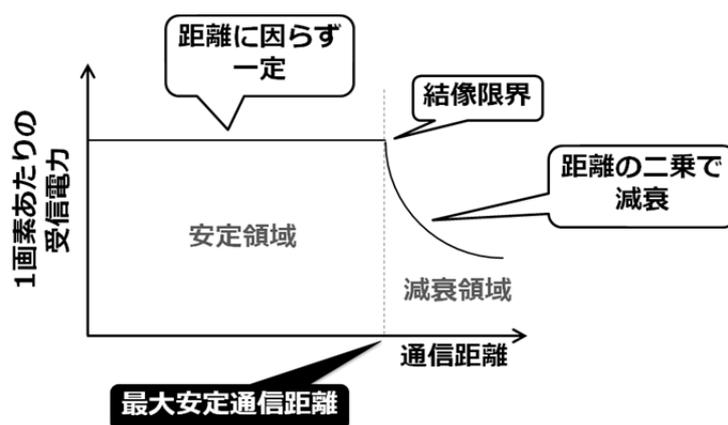


図 2.4 ISC の距離特性

このように ISC は、“混信フリー”，“通信距離に対する安定した受信信号強度”，“送信ノードの空間位置の特定”，“通信結果と画像処理結果の融合”といった従来の通信技術にはない様々なユニークかつ有益な特徴を有する。この ISC の登場，そして LED の普及という背景を受け，光無線通信の自動車応用の可能性と期待が高まっている。

## 2.2 最大受信角と最大安定受信距離

カメラを通信システムの受信機として見た時，“画角”が“最大受信角”，対象物（LED アレイ）の結像サイズが 1 画素になる“結像限界距離”が“最大安定受信距離”に対応する。この最大受信角と最大安定受信距離は，対象物のサイズやレンズのパラメータ，イメージセンサの画素サイズなどで決まる。ここでは，それらのパラメータと最大受信角および最大安定受信距離の関係を示す。

画角  $\theta$  とレンズの焦点距離  $f$  およびイメージセンサの水平サイズ  $x$  (または垂直サイズを  $y$ ) の関係は以下の式(2.1)で求められる[5]。ただし、ここではレンズの収差や歪みなどは考慮しない。

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{x}{2f} \cdots (2.1)$$

従って、画角  $\theta$  は以下の式(2.2)で求められ、この  $\theta$  がすなわち“最大受信角”である。

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left( \frac{x}{2f} \right) [\text{rad}] = \frac{180}{\pi} \cdot 2 \tan^{-1} \left( \frac{x}{2f} \right) [\text{deg.}] \cdots (2.2)$$

ここで例として、イメージセンサのサイズを一般的な 1/3 インチ (水平サイズ  $x = 4.8$  mm, 垂直サイズ  $y = 3.6$  mm) としたときの  $f$  と  $\theta$  の関係を図 2.5 に示す。図からわかるように、レンズの焦点距離が長くなれば、画角は次第に狭くなっていく。このようにイメージセンサ通信では、受信角はレンズの焦点距離で制御でき、レンズ交換によって通信システムの仕様を容易に変更することが可能である。

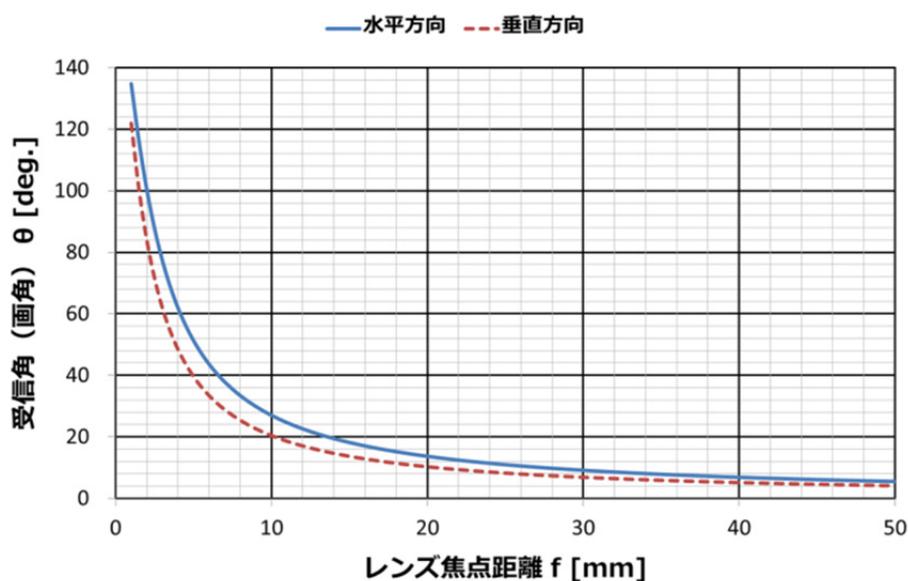


図 2.5 レンズ焦点距離  $f$  と受信角 (画角)  $\theta$  の関係

結像限界距離  $L_{MAX}$  とレンズ焦点距離  $f$ 、画素サイズ（幅もしくは高さ） $D_{PIX}$ 、LED アレイサイズ（幅もしくは高さ） $D_{LED}$  の関係は以下の通りである[5].

$$D_{LED} : D_{PIX} = L_{MAX} : f \cdots (2.3)$$

従って、結像限界距離  $L_{MAX}$  は以下の式(2.4)で求められ、この  $L_{MAX}$  がすなわち“最大安定受信距離”である。

$$L_{MAX} = \frac{D_{LED} \cdot f}{D_{PIX}} \cdots (2.4)$$

ここで例として、 $D_{PIX}$  を  $7.5 \mu\text{m}$  としたときの  $f$  と  $L_{MAX}$  の関係を図 2.6 に示す。なお、 $D_{LED}$  は、LED テールランプ（5 cm）、LED テールランプ（10 cm）、LED 信号機（ $\Phi 30 \text{ cm}$ ）の 3 種類を例として示した。

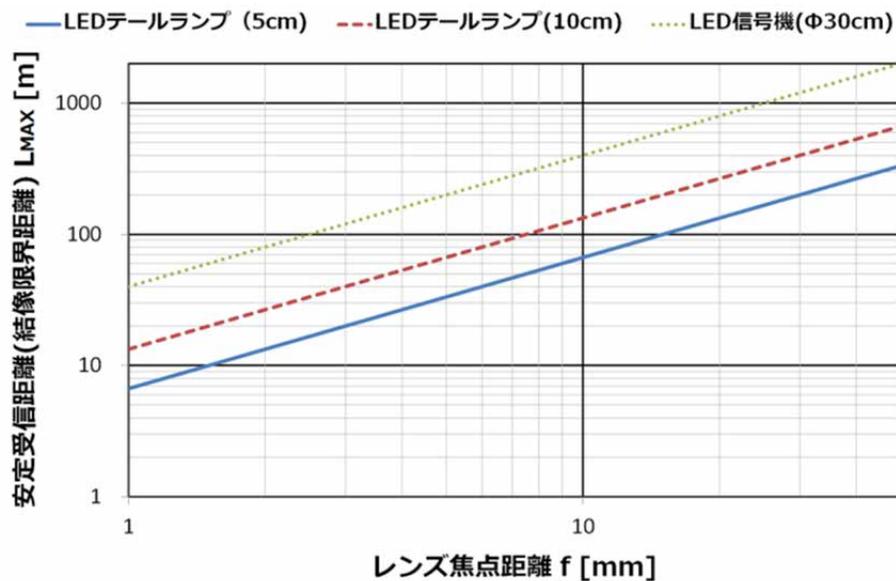


図 2.6 レンズ焦点距離  $f$  と安定受信距離（結像限界距離） $L_{MAX}$  の関係

このように ISC では、イメージセンサの仕様(画素のサイズなど)が決定していれば、受信角と安定受信距離はレンズによって決まる。図 2.5 と図 2.6 および式(2.2)と式(2.3)で示したように、レンズ焦点距離を長くすれば受信角は狭まり、逆に受信距離は伸びる。つまり、角度と距離は背反の関係にある。従って、この ISC 技術を適用する場合は、まず想定アプリケーションで必要とされる最大受信角と最大受信距離を見積もり、それら両者を満たす焦点距離のレンズが存在するかどうか重要になる。もし、必要とされる受信角と受信距離を同時に満たすことができない場合は、受信角を優先してレンズ選定し、減衰領域まで使用することや、より画素サイズの小さいイメージセンサを使用するなどの変更を検討する必要がある。

## 2.3 ISC の自動車システムへの応用

図 2.7 にこれまで説明した ISC 技術を自動車分野における通信システムに応用した例を示す[6]。自動車応用として、大きくは二つある。一つは、交通信号機や標識のような道路インフラの LED から車両に情報を伝送する路車間 (I2V または V2I) 通信システムであり、様々な道路交通情報や死角領域の情報などが配信される[7]。そしてもう一つは、車両のテールランプやヘッドライトといった灯火類の LED から周辺を走行している別の車両に情報を伝送する車車間 (V2V) 通信システムであり、車速やブレーキ状況などの様々な車両の内部データなどが送られる[8]。このとき、LED を人の目で感知することができない速度で高速に変調すると共に、平均電力を一定にして運転者が LED の明るさの変動を感じることがないようにしなければならない。

次に図 2.7 を用いて、ISC を車車および路車間通信システムに応用した際の動作を概説する。まず、車載されたカメラ受信機は通常の撮影機能を用いて車両前方の画像を出力し、その画像の中から画像処理を用いて LED 領域を検出する。そして、検出した LED 領域の光の強度の変化(光の明滅)を観測し、その強度変化を光信号として受信する。カメラ受信機は画像の出力周期(例えば 30 fps や 60 fps)で繰り返し LED を検出し、LED を追跡しながら LED との通信リンクを途切れなく確立する。しかしながらすでに述べ

たように、この複雑な画像から LED のみを正確かつ高速に検出することが大きな課題となっており、検出アルゴリズムの複雑化・高度化が進むと 30 fps (33.3 ms 周期) や 60 fps (16.6 ms 周期) といった実時間 (リアルタイム) 検出の実現が困難となる。車は常に移動しており、検出周期の低下や検出の失敗は、即座に通信リンク切断につながる。従って、高速かつ正確な LED 検出技術の確立は受信性能向上に続く、必須の課題である。

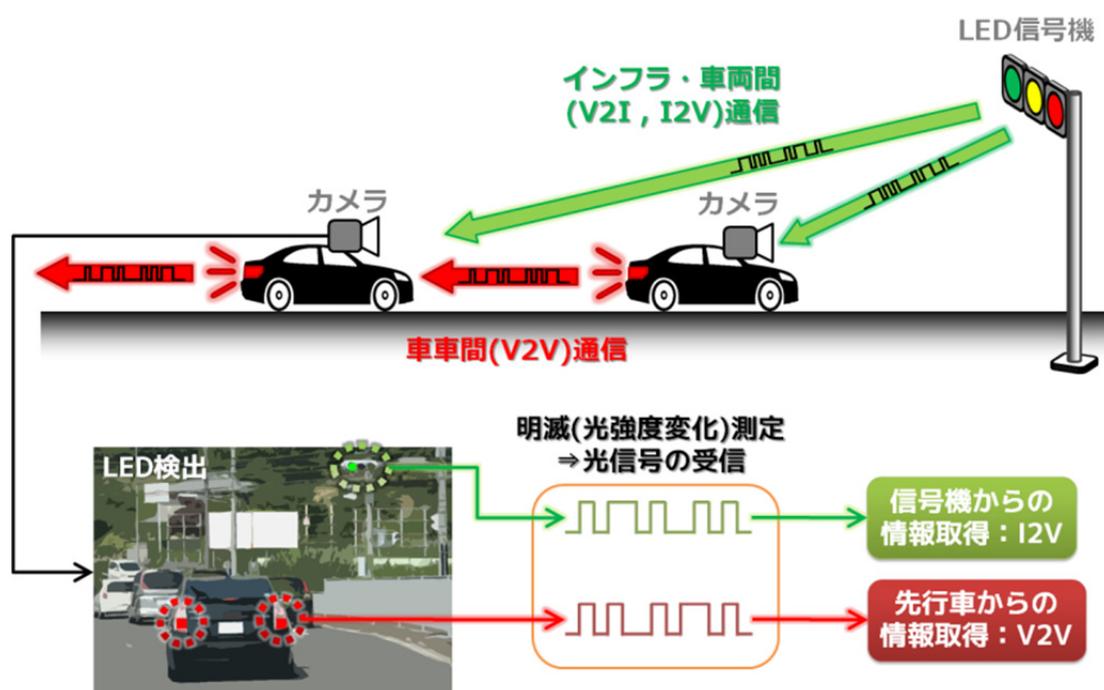


図 2.7 車車・路車間通信システムへの応用例とシステム動作概要

この ISC は光を用いて情報伝送を行うため、いわゆる直接波 (LOS: Line-Of-Sight, 見通し内) 通信である[9, 10]。従って、カメラ受信機が通信リンクを確立できる相手は見通しの範囲内、つまり画像内に写っている LED に限定される。つまり、この光通信リンクは光が透過しないビルや壁、濃いガスや霧によって遮られ、見通し外の相手とは確立できない。しかしながら、逆にマルチパスを考慮する必要がないため通信品質が高く、リンク設計が容易である。また、情報伝達範囲がカメラの画角と LED の照射角が重なる範囲に限定されるため、秘匿性が高く、妨害を受けにくいと同時に他車への妨害も与えにくい。この ISC は有視界内において比較的短距離で高い信頼性が求められるア

アプリケーションに向くという直接波通信の本来の特徴を持ちながら、更に取得される画像から通信相手(LED)の空間位置を特定して信号を受信することが可能である。また、この技術は光通信で得られた情報と画像処理の結果を融合することが可能であるため、従来にない新しいアプリケーションの創発が期待される。

次に、前節で示した最大受信角と最大安定受信距離から、車載システムに応用した際のカメラ受信機に適したレンズを検討する。イメージセンサのサイズを 1/3 インチ、画素サイズを 7.5  $\mu\text{m}$  としたときのレンズの焦点距離と最大受信角および最大安定受信距離の関係を図 2.8 に示す。レンズの焦点距離は市販品で比較よく用いられる代表的な数値である。また、最大安定受信距離は幅 10 cm の車両灯火用 LED ランプおよび直径 30 cm の LED 信号機を用いて算出している。LED 信号機との路車間通信については LED の発光面サイズが大きいため、4.2 mm の短焦点距離のレンズを用いても 150 m を超える安定受信距離が得られる。一方、車両灯火用 LED との車車間通信については LED 発光面積が小さくなるため、それほど長距離にはならず、アプリケーションに適したレンズを慎重に選定する必要がある。例えば時速 100 km で走行する高速道路での適正車間距離を 100 m とすると、今回の算定条件下ではカメラ受信機には焦点距離 8.5 mm 以上のレンズが必要となる。また、時速 60 km で走行する一般道での適正車間距離を 60 m とすると、4.8 mm 以上のレンズが必要となる。そしてこの最大安定受信距離からレンズを選定した時、その時の受信角が想定するアプリケーションの要求を満足するかを検討する必要がある。

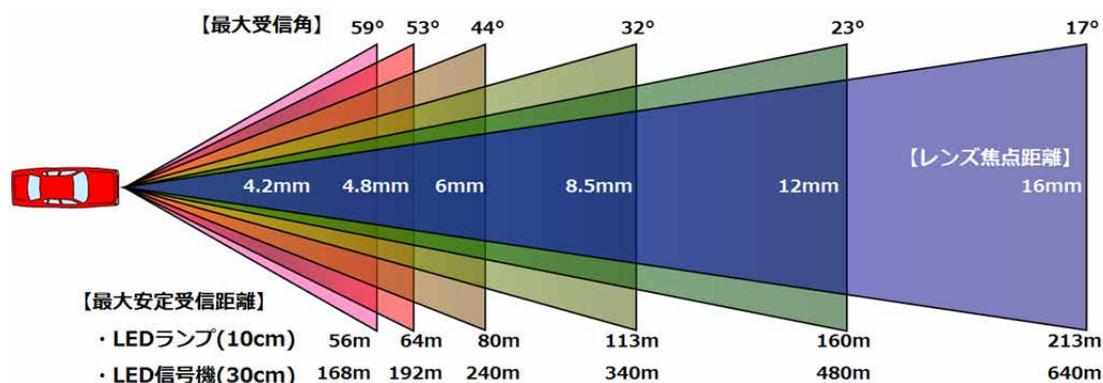


図 2.8 レンズ焦点距離と最大受信角および最大安定受信距離の関係

## 2.4 LED の情報送信デバイスとしての性能

LED の高速な応答性能から LED を送信デバイスとする OWC が次世代の新しい無線技術として期待されている。しかしながら、LED の送信デバイスとしての能力を把握するための具体的な特性、例えば遮断周波数や立上りおよび立下り時間 ( $t_r$  および  $t_f$ ) などがデータシートに記載されている例は非常に少ない。そのため、可視光 LED を用いてどの程度の伝送レートで情報が送信できるのかを、データシートのような公開情報のみから見積もることは実際には難しい。

そこで、照明・表示用として現在市販されている可視光 LED の周波数応答特性を測定して遮断周波数を求めると共に、 $t_r$  と  $t_f$  を測定して LED の情報送信デバイスとしての性能を把握する。本測定では計 7 社 (A 社～G 社) から、白色 3 個、青－緑色系 10 個、黄色系 LED 9 個、赤色 13 個の型番の異なる市販 LED を計 35 個集めた。また、比較のため 2 社の計 4 個の近赤外 LED も用意した。測定のために用意した LED を表 2.1 から 2.5 に示す。表中、“製造”は製造会社の別称であり、“発光波長”は LED のデータシートにピーク発光波長もしくはドミナント発光波長と記載されている値である。なお、白色は単一波長光ではないため、一般的に色座標で示されることが多い。また、“素子材料”はデータシートに記載されていたものであり、表中の“( )”のものはデータシートに未記載であったため順電圧の値などから推測したものである。今回準備した LED の素子材料は、白色および青－緑色系が InGaN (インジウム窒化ガリウム)、黄色系と赤色が主に AlGaInP (アルミニウム・インジウム・ガリウム・リン)、近赤外が GaAlAs (アルミニウム・ガリウム・ヒ素) である。白色 LED は、青色光を蛍光体で白色光に変換するタイプのものである。また、黄色系には InGaN と思われる順電圧値を持つ材料未記載の LED や、GaP (リン化ガリウム) の LED が小数含まれる。

表 2.1 測定 LED : 白色 LED

製造	色座標	素子材料
A	(0.31, 0.32)	InGaN+蛍光体
B	(0.31, 0.31)	InGaN+蛍光体
C	(0.31, 0.32)	(InGaN+蛍光体)

表 2.2 測定 LED : 青-緑色系 LED

製造	色	発光波長[nm]	素子材料	製造	色	発光波長[nm]	素子材料
A	青	470	InGaN	C	青緑	500	(InGaN)
A	緑	525	InGaN	C	緑	525	(InGaN)
B	青	470	InGaN	D	緑	525	InGaN
B	青緑	527	InGaN	D	緑	525	InGaN
C	青	471	(InGaN)	G	緑	527	(InGaN)

表 2.3 測定 LED : 黄色系 LED

製造	色	発光波長[nm]	素子材料	製造	色	発光波長[nm]	素子材料
A	黄緑	572	AlGaInP	B	黄	591	AlGaInP
A	黄	590	AlGaInP	B	橙	611	AlGaInP
A	橙	605	AlGaInP	C	黄	575	(InGaN)
B	黄緑	572	GaP	C	アンバー	590	(InGaN)
B	黄	591	AlGaInP				

表 2.4 測定 LED : 赤色 LED

製造	色	発光波長[nm]	素子材料	製造	色	発光波長[nm]	素子材料
A	赤	630	AlGaInP	D	赤	626	AlGaInP
A	赤	637	GaAlAs	D	赤	626	AlGaInP
B	赤	630	AlGaInP	D	赤	626	AlGaInP
B	赤	620	AlGaInP	E	赤	633	AlGaInP
C	赤	625	(AlGaInP)	F	赤	616	AlGaInP
D	赤	630	AlGaInP	G	赤	624	(AlGaInP)
D	赤	626	AlGaInP				

表 2.5 測定 LED : 近赤外 LED

製造	色	発光波長[nm]	素子材料	製造	色	発光波長[nm]	素子材料
A	近赤外	870	GaAlAs	E	近赤外	850	GaAlAs
A	近赤外	870	GaAlAs	E	近赤外	880	GaAlAs

周波数特性は、ネットワークアナライザを用いて入力周波数（LED 駆動周波数）に対する光出力の変化（減衰）を見た。測定周波数は 100 kHz から 500 MHz、測定点数は 1600 点である。

図 2.9 から図 2.14 に横軸を周波数、縦軸を光出力とした測定結果を示す。なお、光出力は測定開始点である 100 kHz を基準（0 dB）としている。また、赤色 LED は数が多いため、二つのグラフに分けて示した。本結果から、同様の発光波長帯や、同じ素子材料、同じ製造会社の LED であっても統一的な特性は示さず、それぞれ異なることが分かった。また、図 2.9 の「A\_White\_1 (A 社の白の 1 番)」、図 2.11 の「B\_Yellow-Green\_1 (B 社の黄緑の 1 番)」および「C\_Amber\_1 (C 社のアンバーの 1 番)」、図 2.14 の「E\_NIR\_2 (E 社の近赤外の 2 番)」は他と比較しても明らかに帯域が狭く、基準点である 100 kHz の時点ですでに減衰が始まっていることが確認された。使用した測定器の測定下限が 100 kHz であるため、今回の測定ではこの 4 種の LED に関しては周波数特性の全体像を正確に把握することはできなかった。すなわち、帯域が極めて狭いこの 4 種の LED は Mbps クラスの伝送を狙うシステムには不向きであると判断できる。

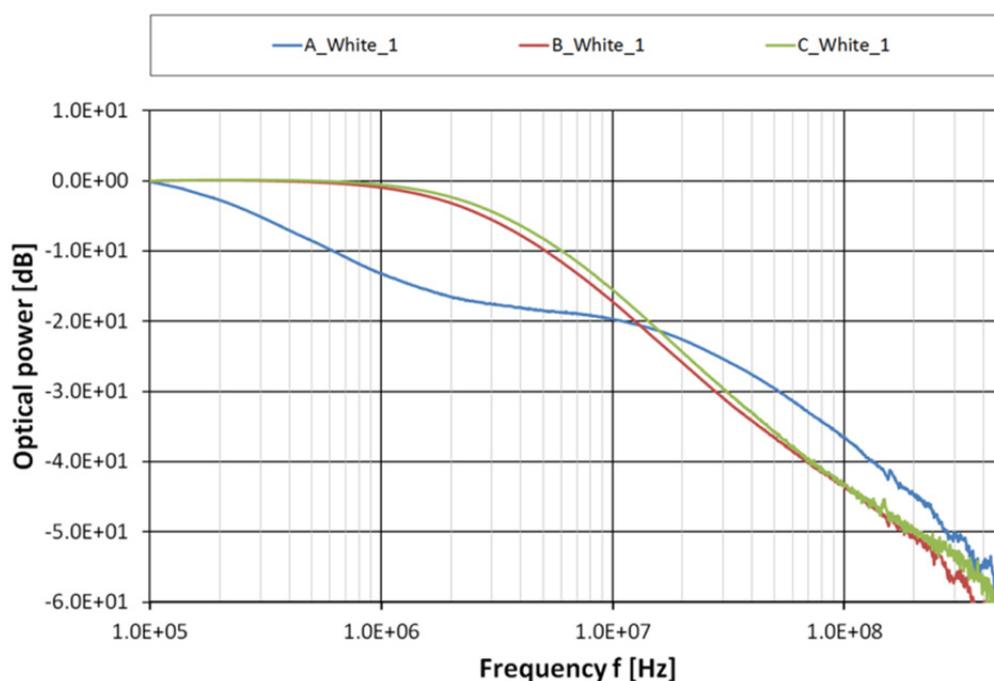


図 2.9 LED の周波数特性測定結果：白色 LED

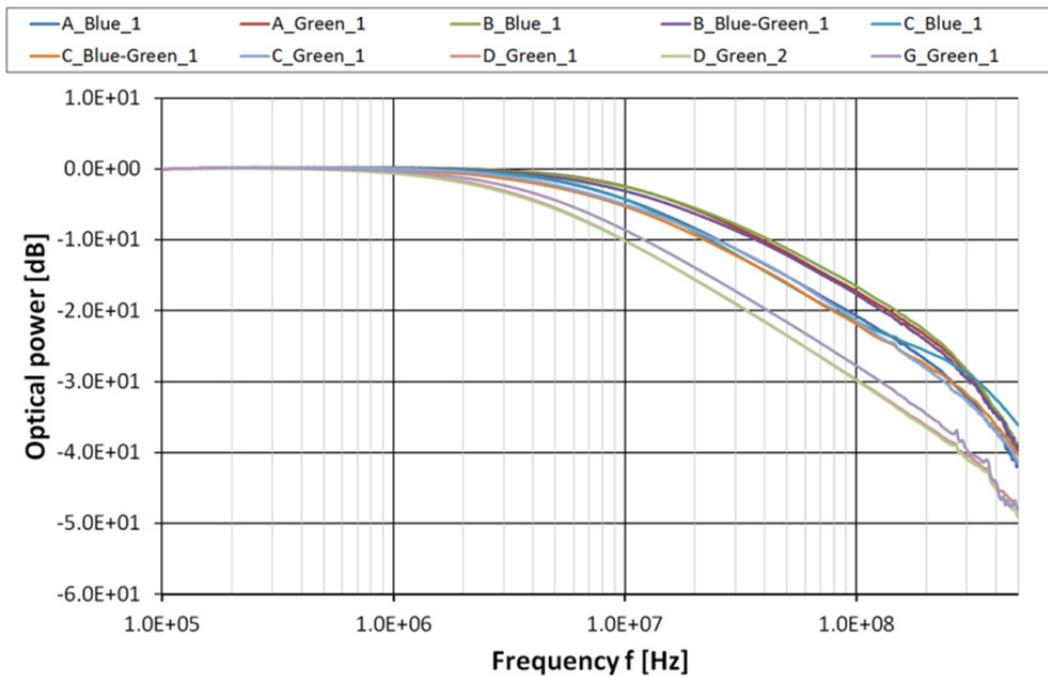


図 2.10 LED の周波数特性測定結果：青－緑色系 LED

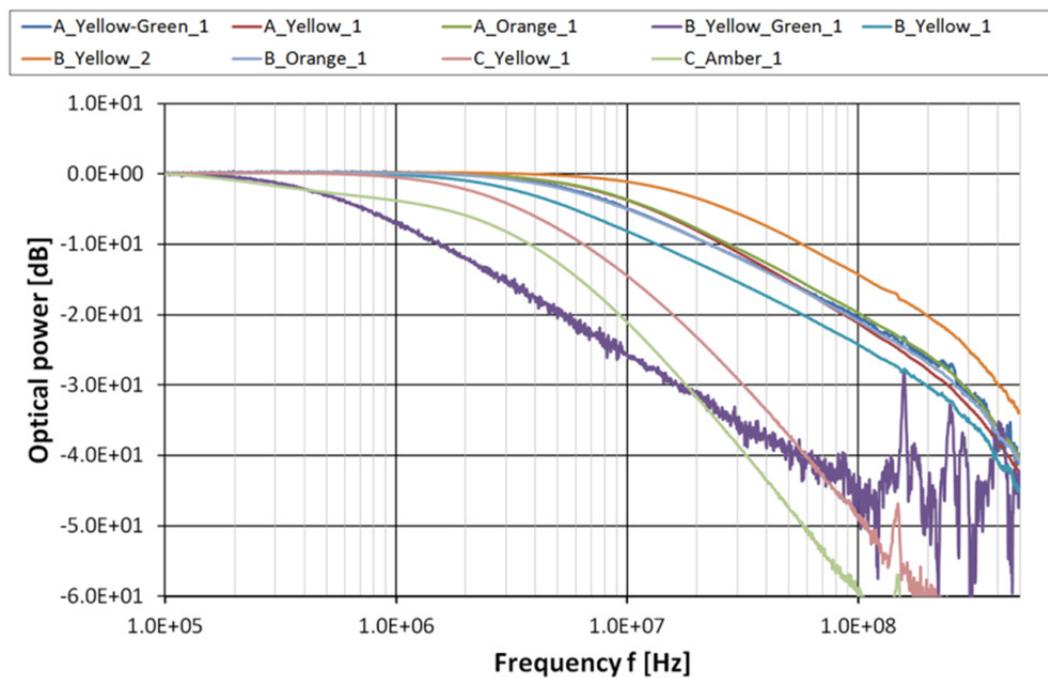


図 2.11 LED の周波数特性測定結果：黄色系 LED

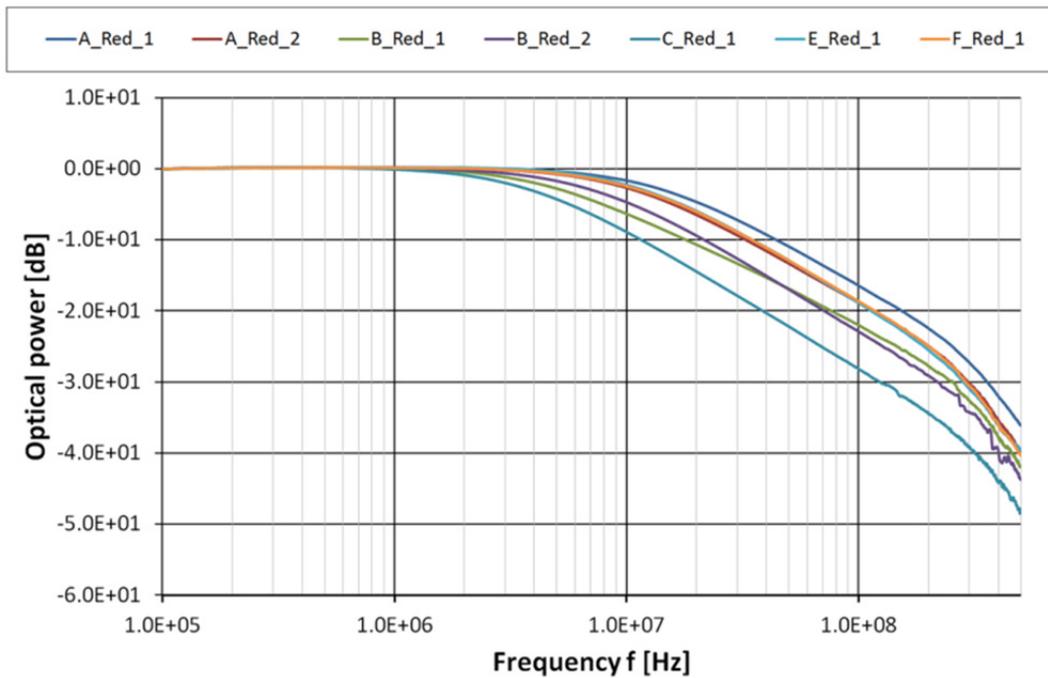


図 2.12 LED の周波数特性測定結果：赤色 LED1

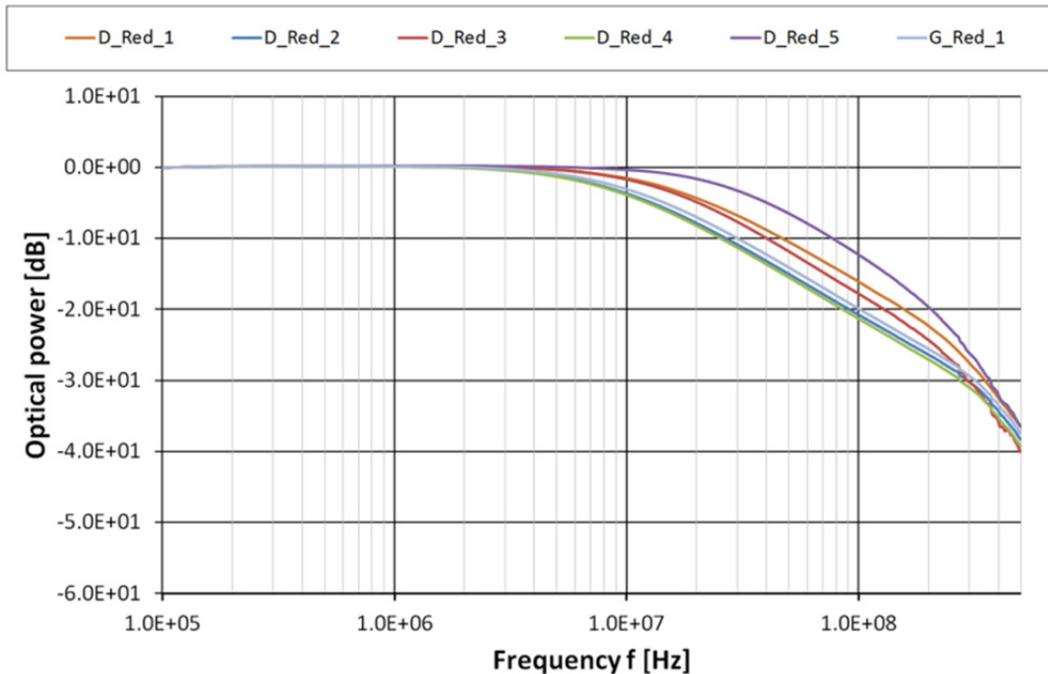


図 2.13 LED の周波数特性測定結果：赤色 LED2

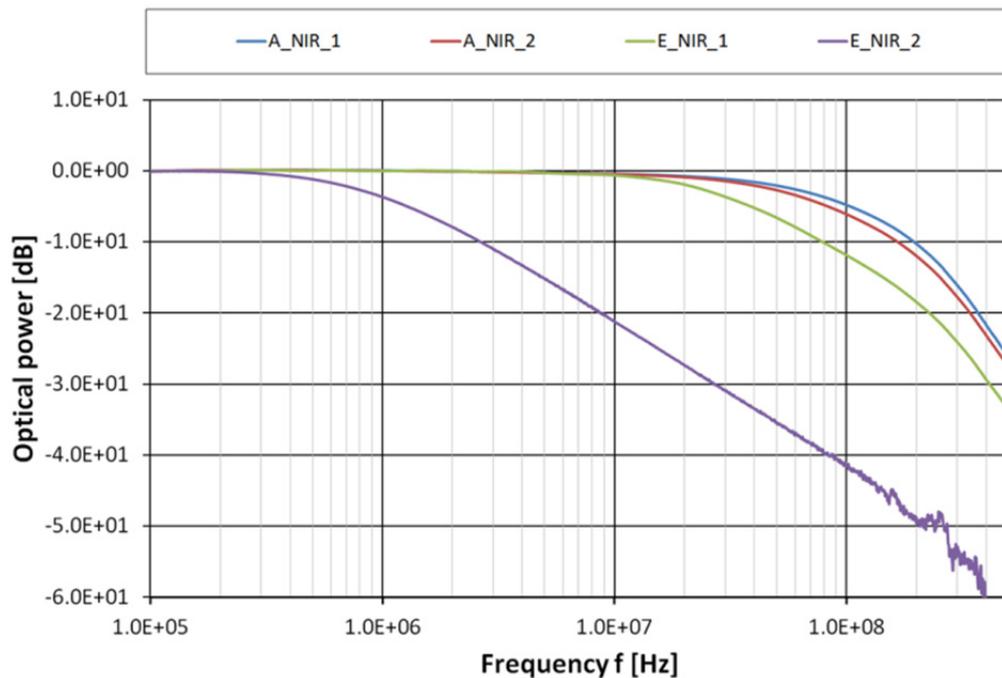
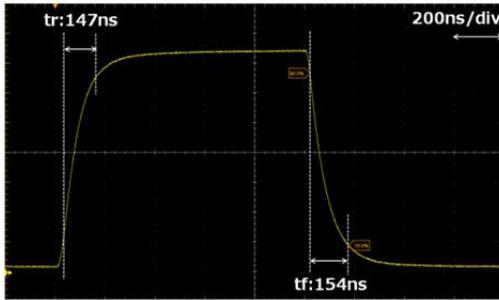
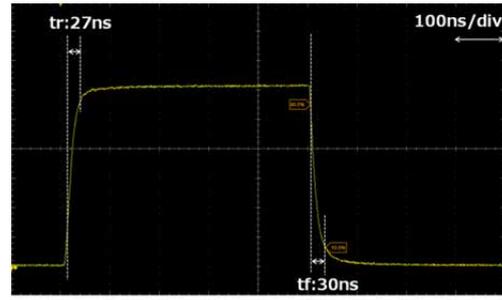


図 2.14 LED の周波数特性測定結果：近赤外 LED

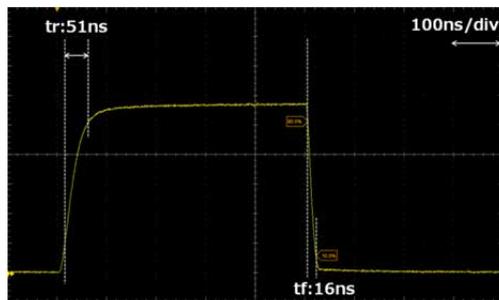
続いて LED の  $tr$  と  $tf$  を測定した。測定した LED は周波数特性測定と同じである。 $tr$  と  $tf$  は LED に十分高速な矩形波信号を入力し、LED の光出力波形を O/E (光-電気) 変換器で電気信号に変換してオシロスコープ上で測定した。 $tr$  は矩形波の入力に対して光出力が 10% から 90% まで上昇するのに要する時間、 $tf$  は光出力が 90% から 10% まで下降するのに要する時間である。オシロスコープの波形サンプリングレートは 1.25 GSPS, O/E 変換器の帯域は 1 GHz であり、測定する  $tr$  と  $tf$  に対して必要十分である。図 2.15 に各色系統の LED の中から  $tr$  が短い LED の波形を代表例として示す。



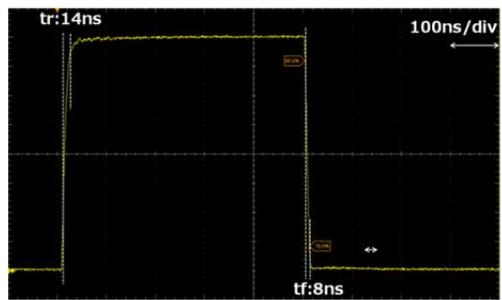
(a) C社\_白色 (1番) LED



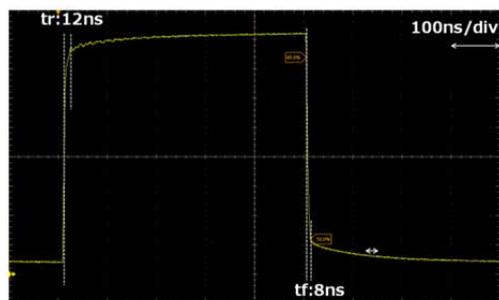
(b) A社\_緑色 (1番) LED



(c) A社\_橙色 (1番) LED



(d) D社\_赤色 (5番) LED



(e) A社\_近赤外 (1番) LED

図 2.15  $tr$  と  $tf$  の測定結果

表 2.6 から表 2.10 に測定した全 LED の遮断周波数  $f_c$ ,  $tr$ ,  $tf$  をまとめて示す.  $f_c$  は周波数特性の測定結果から光出力が基準 (本測定では 100 kHz) から 3dB 減衰する点の周波数である. また, 表に  $tr$  と  $tf$  の比 ( $tr/tf$ ) の計算結果を示し, 両者のどちらが応答性能を制限しているかを把握する.

表 2.6 LED の  $f_c$ ,  $tr$ ,  $tf$  の測定結果 : 白色 LED

LED 名	色座標	材料	$f_c$ [Hz]	$tr$ [ns]	$tf$ [ns]	$tr / tf$
A_White_1	(0.31, 0.32)	InGaN	210,625	2098.1	2300.6	0.91
B_White_1	(0.31, 0.31)	InGaN	1,944,850	194.3	187.3	1.04
C_White_1	(0.31, 0.32)	(InGaN)	2,341,016	147.2	154.0	0.96

表 2.7 LED の  $f_c$ ,  $tr$ ,  $tf$  の測定結果 : 青 - 緑色系 LED

LED 名	$\lambda$ [nm]	材料	$f_c$ [Hz]	$tr$ [ns]	$tf$ [ns]	$tr / tf$
A_Blue_1	470	InGaN	7,465,477	35.7	24.5	1.46
A_Green_1	525	InGaN	11,629,995	26.6	30.2	0.88
B_Blue_1	470	InGaN	11,568,134	31.2	15.9	1.96
B_Blue-Green_1	527	InGaN	9,739,232	31.0	37.0	0.84
C_Blue_1	471	(InGaN)	7,643,810	49.3	20.0	2.47
C_Blue-Green_1	500	(InGaN)	5,753,296	40.8	40.7	1.00
C_Green_1	525	(InGaN)	6,171,126	48.3	38.6	1.25
D_Green_1	525	InGaN	2,954,983	74.7	79.0	0.94
D_Green_2	525	InGaN	2,788,458	80.0	54.0	1.48
G_Green_1	527	(InGaN)	3,654,389	53.5	63.0	0.85

表 2.8 LED の  $f_c$ ,  $tr$ ,  $tf$  の測定結果 : 黄色系 LED

LED 名	$\lambda$ [nm]	材料	$f_c$ [Hz]	$tr$ [ns]	$tf$ [ns]	$tr / tf$
A_Yellow-Green_1	572	AlGaInP	6,846,082	50.9	19.2	2.65
A_Yellow_1	590	AlGaInP	8,580,062	73.7	15.8	4.65
A_Orange_1	605	AlGaInP	8,713,813	50.9	16.3	3.12
B_Yellow_Green_1	572	GaP	484,597	611.4	196.4	3.11
B_Yellow_1	591	AlGaInP	3,881,847	106.6	32.5	3.28
B_Yellow_2	591	AlGaInP	18,144,233	33.3	8.6	3.87
B_Orange_1	611	AlGaInP	6,556,816	69.0	20.9	3.31
C_Yellow_1	575	(InGaN)	2,425,051	148.5	148.9	1.00
C_Amber_1	590	(InGaN)	631,630	1011.7	1311.6	0.77

表 2.9 LED の  $f_c$ ,  $tr$ ,  $tf$  の測定結果 : 赤色 LED

LED 名	$\lambda$ [nm]	材料	$f_c$ [Hz]	$tr$ [ns]	$tf$ [ns]	$tr/tf$
A_Red_1	630	AlGaInP	14,454,455	30.4	14.6	2.08
A_Red_2	637	GaAlAs	10,825,806	39.6	15.7	2.52
B_Red_1	630	AlGaInP	5,303,326	79.1	25.0	3.17
B_Red_2	620	AlGaInP	7,153,393	47.0	16.7	2.82
C_Red_1	625	(AlGaInP)	1,309,876	84.1	34.7	2.43
D_Red_1	630	AlGaInP	15,398,352	27.6	13.3	2.08
D_Red_2	626	AlGaInP	8,624,646	37.0	15.4	2.41
D_Red_3	626	AlGaInP	14,197,029	25.7	12.5	2.06
D_Red_4	626	AlGaInP	8,312,562	41.8	14.9	2.80
D_Red_5	626	AlGaInP	28,480,805	13.6	8.5	1.61
E_Red_1	633	AlGaInP	11,939,298	31.6	14.3	2.20
F_Red_1	616	AlGaInP	11,444,413	30.4	11.7	2.60
G_Red_1	624	(AlGaInP)	9,897,896	36.0	12.6	2.85

表 2.10 LED の  $f_c$ ,  $tr$ ,  $tf$  の測定結果 : 近赤外 LED

LED 名	$\lambda$ [nm]	材料	$f_c$ [Hz]	$tr$ [ns]	$tf$ [ns]	$tr/tf$
A_NIR_1	870	GaAlAs	67,578,486	11.4	8.5	1.35
A_NIR_2	870	GaAlAs	54,509,251	12.0	8.4	1.43
E_NIR_1	850	GaAlAs	26,498,952	6.4	31.7	0.20
E_NIR_2	880	GaAlAs	865,433	481.1	269.7	1.78

まず、白色 LED の測定結果について述べる。計 3 個の LED の遮断周波数は、平均 1.5 MHz、最高 2.3 MHz、最低 211 kHz であった。選定を行えば Mbps クラスの情報伝送の実現が見込めるが、最高と最低の差が約一桁もある。 $tr$  と  $tf$  は約 150 ns 以上、 $tr/tf$  比から立上りと立下り時間は同様であった。白色 LED の結論として、Mbps クラスの伝送は可能であるが、10 Mbps クラスの伝送は通常のベースバンド変調では難しく、帯域利用効率の高い伝送（変調や符号化）方式が必要と考えられる。また、LED 間の性能差が大きいいため、選定には注意が必要である。

青－緑色系の LED の測定結果について述べる。青－緑色系の計 10 個の LED の遮断周波数は、平均 6.9 MHz、最高 11.6 MHz、最低 2.8 MHz、最高－最低差 8.8 MHz であった。

従って、青-緑色系ではどの LED を用いても Mbps を超える情報伝送が比較的容易に実現できることが分かった。また、高速なものでは 10 MHz を超えるものが存在した。素子材料が同じ白色 LED と比較して、青-緑色系は全体的に特性が良い。これは、白色 LED に使われている蛍光体の応答性能に起因するものと考えられる。 $tr$  と  $tf$  は全て 100 ns 以下であり、20 ns~30 ns 台の LED も存在する。 $tr/tf$  比は特に統一的な傾向を示していないが、 $tr$  が  $tf$  と比較して 2 倍以上遅い LED が存在した。青-緑色系 LED の結論として、平均的に 5 Mbps 以上、特性の良いものでは 10 Mbps を超える情報伝送が可能であることが分かった。帯域利用効率の高い伝送方式を適用すれば、20 Mbps を超える伝送も実現できると考えられる。

黄色系の LED の測定結果について述べる。黄色系の計 9 個の LED の遮断周波数は、平均 6.3 MHz、最高 18.1 MHz、最低 485 kHz、最高-最低差は 35 倍以上である。大半の LED で Mbps クラスの伝送が実現できる性能を持つが、LED 間の性能差が極めて大きい。 $tr$  と  $tf$  の測定結果では、素子材料が InGaN と推定されている「C\_Yellow\_1」と「C\_Amber\_1」を除き、全面的に  $tr$  が遅く、大半で 3 倍以上の開きが出た。黄色系 LED の結論として、平均的に 5 Mbps 以上の情報伝送を行う能力があるが、性能差が大きく、帯域が 500 kHz 以下の LED も存在するため選定には注意が必要である。

赤色 LED の測定結果について述べる。赤色 LED の計 13 個の LED の遮断周波数は、平均 11.3 MHz、最高 28 MHz、最低 1.3 MHz、最高-最低差は 20 倍程度である。これまで測定した可視光 LED の中で、この赤色は全体として特性が良く、多くの LED で帯域が 10 MHz を超える。 $tr$  と  $tf$  も全て 100 ns 以下である。特に「D\_Red\_4」は  $fc$  が 28 MHz、 $tr$  が 13.6 ns、 $tf$  が 8.5 ns と優れた性能を持つ。 $tr/tf$  比から、全ての LED で  $tr$  が遅く、概ね 2~3 倍であった。黄色系と赤色 LED の  $tr/tf$  の測定結果から、素子材料が AlGaInP の LED は  $tr$  が性能制限となることが拮めた。赤色 LED の結論として、可視光 LED の中で送信デバイスとしての性能が高く、比較的容易に 10 Mbps 以上の情報伝送が実現できると考えられる。

可視光 LED との比較のために用意した近赤外 LED の測定結果について述べる。近赤外 LED の計 4 個の LED の遮断周波数は、平均 37.4 MHz、最高 67.6 MHz、最低 865 kHz であった。「E\_NIR\_2」が全体の平均性能を落としたが、可視光 LED と比較して近赤外 LED は総じて特性が良い。また、 $tr$  と  $tf$  も 10 ns 程度と極めて高速である。 $tr/tf$  比は全

てではないが  $t_r$  の方が遅いという傾向を示した。近赤外 LED の結論として、これまで測定した可視光 LED と比較して非常に特性が良く、送信デバイスとしての性能が高い。50 Mbps 以上の情報伝送実現も可能であると考えられる。

最後に全 LED の周波数特性測定のまとめとして、発光波長  $\lambda$  に対する  $f_c$  を示したグラフを図 2.20 に示す。白色は単一光ではないため、グラフ上では InGaN を用いていることから 450 nm として示した。また、InGaN+蛍光体、InGaN、GaP、AlGaInP、GaAlAs の素子材料（データシートに未記載のものは推定材料）をパラメータとした。この結果から分かるように、発光波長や素子材料によって遮断周波数、すなわち帯域が決まるわけではないことが分かる。可視光 LED では、AlGaInP を用いた赤色 LED は全体的に帯域が広いが、それでも帯域が非常に狭い LED もあり、選定は簡単ではない。今回の 35 個の可視光 LED の測定を通して言えることは、全ての LED が 100 kHz 以上の帯域を持ち、約 90 % の LED が 1MHz 以上の帯域を持つ。そして、約 30 % の LED が 10 MHz 以上の帯域を持つ。また、可視光 LED では赤色が、全体では近赤外 LED が情報送信デバイスとしての性能が高い。しかしながらすでに述べたように、データシートに記載されている素子材料や発光波長などから帯域の優劣を正確に推定することは困難である。従って可視光 LED を使用する場合は、現状では必ず実測する必要があることが明確となった。

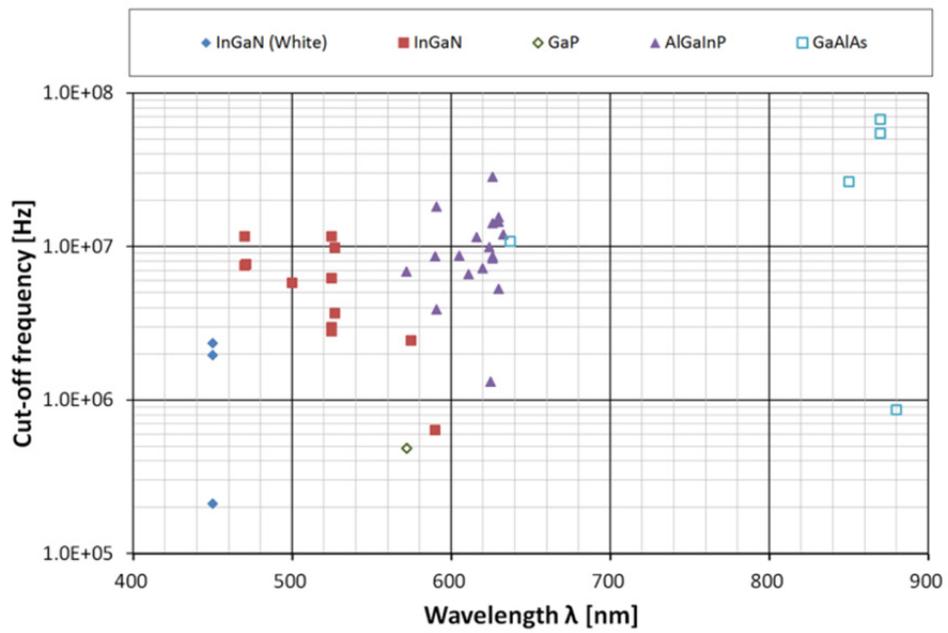


図 2.16 発光波長  $\lambda$  と遮断周波数  $f_c$  の関係

## 参考文献

- [1] 中川正雄, “可視光通信の世界,” 可視光通信コンソーシアム編, 工業調査会, 2006.
- [2] S. Okada, T. Yendo, T. Yamazato, T. Fujii, M. Tanimoto, Y. Kimura, “On-vehicle receiver for distant visible light road-to-vehicle communication,” 2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.1033-1038, 3-5 June 2009.
- [3] 高井勇, 太田充彦, 木村好克, 安藤道則, Md. S. Z. Sarker, 安富啓太, 濱井燃太, 伊藤真也, 川人祥二, “イメージセンサによる車車・路車間通信のための光空間通信システム,” 映像情報 industrial, 産業開発機構, vol.42, no.2, pp.79-87, 2010 年 2 月.
- [4] Md. S. Z. Sarker, S. Itoh, M. Hamai, I. Takai, M Andoh, K. Yasutomi, S. Kawahito, “Design and implementation of a CMOS light pulse receiver cell array for spatial optical communications,” Sensors 2011, vol.11, no. 2, pp.2056-2076, Feb. 2011.
- [5] 鈴木茂夫, “CCD/CMOS カメラ信号処理技術入門,” 日刊工業新聞社, 2005.
- [6] T. Yamazato, I. Takai, H. Okada, T. Fujii, T. Yendo, S. Arai, M. Andoh, T. Harada, K. Yasutomi, K. Kagawa, S. Kawahito, “Image-sensor-based visible light communication for automotive applications,” IEEE Communications Magazine, vol.52, no.7, pp.88-97, July 2014.
- [7] C. Premachandra, T. Yendo, M. P. Tehrani, T. Yamazato, H. Okada, T. Fujii, M. Tanimoto, “Outdoor Road-to-Vehicle Visible Light Communication Using On-Vehicle High-Speed Camera,” International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, vol.13, no.1, pp.28-36, Jan. 2015.
- [8] 木村好克, 二宮芳樹, “可視光車車間通信システムのための LED 送信部検出手法,” 2009 年 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 基礎・境界, p.309, 2009 年 3 月.
- [9] Kaiyun Cui, Gang Chen, Zhengyuan Xu, R.D. Roberts, “Line-of-sight visible light communication system design and demonstration,” 2010 7th International Symposium on Communication Systems Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), pp.621-625, 21-23 July 2010.
- [10] 高井勇, 川人祥二, “LED とカメラでつながる光車車間通信システム,” 自動車技術, 自動車技術会, vol.68, pp.42-48, 2014 年 2 月.

# 第3章 光通信イメージセンサとイメージセンサ通信システム

## 3.1 はじめに

普及が進む表示・照明用の LED を送信デバイスとして、イメージセンサを受信デバイスとして使用する光無線通信 (OWC) システムに対する期待と注目が、近年、急速に高まっている[1, 2]. このイメージセンサを受信デバイスとする“イメージセンサ通信 (ISC)”技術は、“混信 (干渉) フリー”, “通信距離に対する安定した受信信号強度”, “送信ノードの空間位置の特定”, “通信結果と画像処理結果の融合”といった従来の無線通信技術では見られない多くの有益な特徴を持つ[2-4]. また、この ISC を自動車分野に応用する検討も始まっている[4-6]. 従来の PD 通信では太陽などによる屋外の強力な照明環境 (光ノイズ環境) に対する耐性と、対マルチノード (マルチ LED) 通信時の混信が主な課題となっていたが、ISC の“混信フリー”という特徴がこれらの課題を解決に導き、自動車応用の実現に向けた期待を後押ししている。

しかしながら自動車用 ISC システムを実現するためには、前章ですでに述べたようにまだ乗り越えなくてはならない大きな二つの課題が、カメラ受信機に与えられている。一つは“光信号の受信性能の向上”, そしてもう一つが“高速な LED の検出”である。従来のイメージセンサ通信技術の伝送レートは、イメージセンサのフレームレートが光信号のサンプルレートの上限となることから、ハイスピードカメラを用いた受信システムでも単位画素あたり数十 kbps~数百 kbps 程度に制限される[7]. これは PD 通信と比較して桁違いに低く、近年における情報伝送のための受信システムとして十分な性能ではない。また、ISC では様々な物体が存在する複雑な画像内から LED を検出して通信を開始しなければならない。しかしながら、第1章の図 1.3 ですでに示したようにグレイ画像を用いた通常の画像処理で LED を高速かつ正確に検出することは容易ではない。

実用的な自動車用 ISC システムを実現するためにカメラ受信機に求める性能，すなわち我々が目指すべき目標をここで明確にする．まず，基本的な車速などの数値データと音声や映像といった大容量のメディアデータを同時に伝送するため，カメラ受信機に 10 Mbps クラスの光信号が受信できる能力を与える．そして，LED との通信リンクを迅速に確立するため，100 ms 以下の実時間（リアルタイム）で LED を検出する能力をカメラ受信機に与える．本章では，この二つの能力をカメラ受信機に与えるための新たな機能集積 CMOS イメージセンサ，すなわち“光通信イメージセンサ（OCI）”の設計と試作を行った結果について述べる．更に，この OCI を搭載したカメラ受信機と LED 送信機から成る性能実証用の ISC システムを構築し，LED とカメラ間で 10 Mbps クラスの高速な光伝送を行った結果について述べる[8]．

## 3.2 光通信イメージセンサ（OCI）

### 3.2.1 OCI を用いた ISC システムの概要

図 3.1 に本研究で実現を目指す ISC システムの概要を示す．本システムは LED 送信機と OCI を搭載したカメラ受信機で構成される．10 Mbps クラスの光信号を受信する能力と実時間で LED を検出する能力をカメラ受信機に与えるため，OCI には二つの新しい技術が搭載されている[9]．

一つは，“通信画素（CPx）”である．この CPx は光信号の受信に特化され，連続的かつ高速な光の強度変化を捉えることに焦点が当てられた新しい構造の画素である．高速な光の変化を捉えるため，CPx は信号電荷の蓄積とサンプリング動作が排除され，更に光の変化に対する応答性能を制限する CPx 内の容量成分を低減する構造とすることで，10 Mbps クラスの光信号の受信を可能にする．しかしながら蓄積機能のない CPx は，通常の画像を取得する機能が失われている．そこで，図 3.1 に示すように，OCI の画素アレイを IPx アレイと CPx アレイで構成されるハイブリッド型の画素アレイ構造とすることで，一つのセンサで“画像の取得”と“高速な光信号の受信”という二つの機能を実現す

る。

そしてもう一つの技術が、“フラグ画像の出力機能”である。フラグ画像は、通常のグレイ画像と比較して極めて短い露光時間で撮影され、更に入力閾値を基準に OCI 内で二値化（1-bit 化）された画像である。このような極短時間露光と二値化により、フラグ画像には LED のような光強度の強いものだけが“1”として現れ、強度の弱い LED 以外の背景領域などは“0”に落とされ排除される。この LED しか存在しないフラグ画像を用いることで高速かつ高精度な LED 検出を実現する。

図 3.1 を用いて、OCI を用いた ISC システムの動作概要を説明する。光信号は LED 送信機から送出され、レンズを通過してカメラ受信機内の OCI の受光面（画素アレイ）に到達する。一方、OCI を搭載したカメラ受信機は IPx アレイを用いてグレイ画像と LED 検出用の新しい画像であるフラグ画像を取得し、取得されたフラグ画像は外部の画像処理装置に送られる。そこで画像処理技術を用いてフラグ画像内から LED が検出され、その空間座標（ $x, y$ ）が得られる。次に取得された座標が OCI にフィードバックされ、その座標に対応する CPx が選択されることで光信号の受信動作が開始される。最後に選択された CPx により光信号が受信され、その受信信号は読出し回路を通して外部に出力される。OCI を用いた ISC システムは、この一連の動作を繰り返し実行し、画像内の LED を検出しながら高速な光信号を受信する。

なお、製造コストの増加は ISC システムの実用化と普及の妨げとなるため、OCI の実現には特殊なプロセスは使用せず、従来の CMOS イメージセンサのプロセスを使用するという制約を課して研究を進めた。

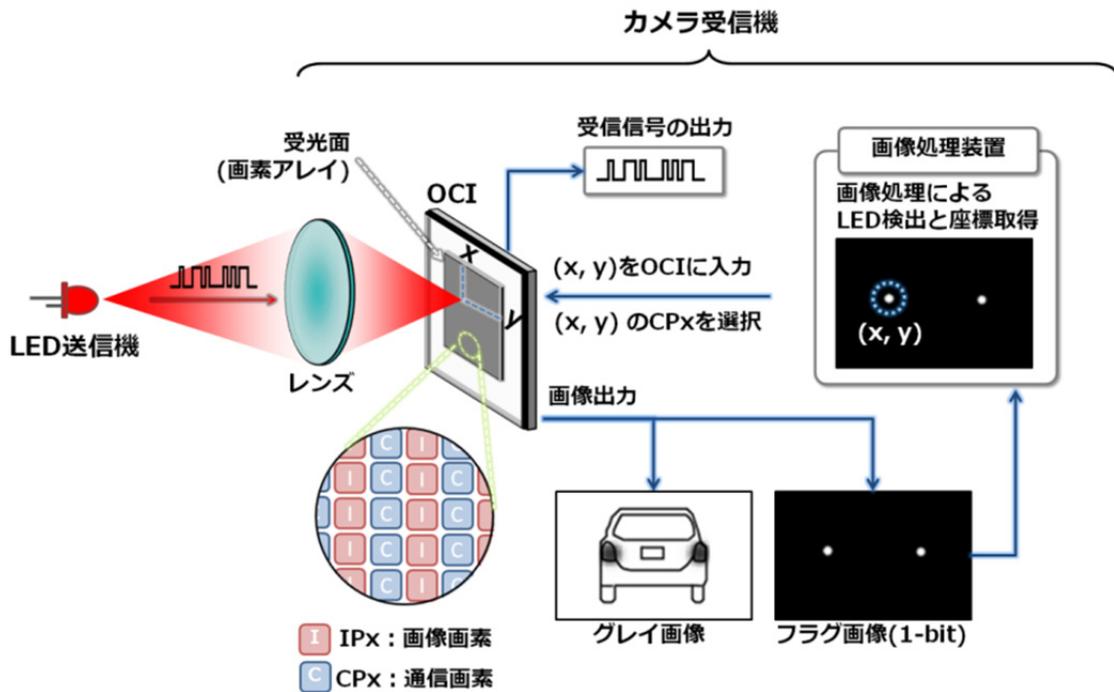


図 3.1 OCI を用いた OWC システムの概要

### 3.2.2 光通信画素 (CPx)

10Mbps クラスの光信号を受信するために、光の強度変化に対する応答性能の向上にフォーカスした光通信特化型画素である CPx について説明する。

図 3.2 に CPx の構造と等価回路を示す。この CPx は 2 つのトランジスタ (M1, M2), フォトダイオード (PD), グランド (GND) でバイアスされた n-ch JFET (n-channel Junction gate Field-Effect Transistor) と等価な構造を持つ要素部品で構成される。その要素部品のドレインには電源 (VDD) が、そしてソースには PD が接続されている。また、PD と要素部品の間 (FD : Floating Diffusion) に接続された信号線は、一方がソースフォロア (SF) アンプの入力トランジスタ M1 に接続されている。この信号線をチャージセンシングノードと呼び、PD で生成された信号電荷によって生じる信号電圧  $V_{CS}$  を SF アンプに伝える。M2 は画素選択のために用いられ、選択信号 (SEL) によって動作する。

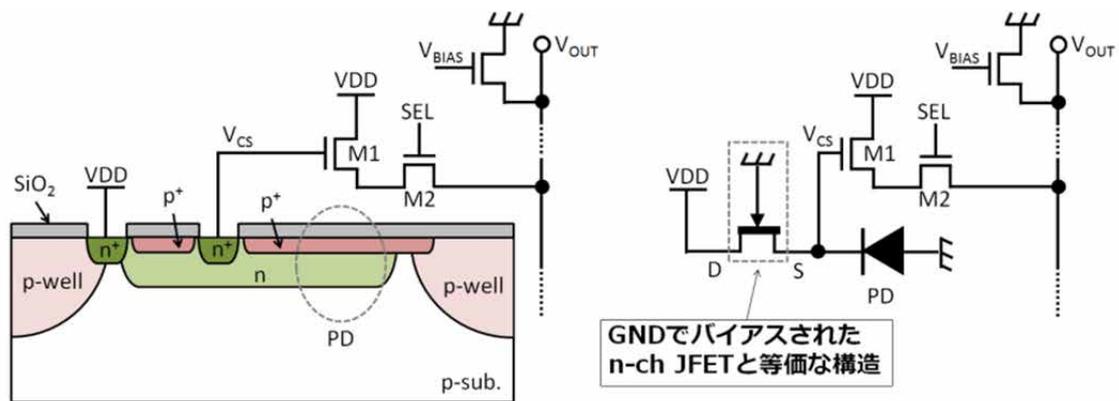


図 3.2 通信画素の構造と等価回路

この CPx が一般的な画像取得用の 4 トランジスタ型画素 (IPx) [10] と構造上で大きく異なる点は二つある。一つは PD で蓄積された電荷を転送する転送トランジスタがないこと、そしてもう一つが蓄積電荷をドレインに排出する (リセットする) リセットトランジスタの位置に GND にバイアスされた要素部品が配置されていることである。この要素部品は常に電流が流れる状態 (ON 状態) であり、常時リセット素子とも、ある種の抵抗とも言える。従って、転送トランジスタがなく、常時リセットがかけられている構造により、PD で生成された信号電荷はほとんど蓄積されることなくそのままドレインに排出される。光信号の受信は、入射する光信号の強度変化によりこの PD からドレインに流れる電荷量 (電流量) が変化し、それと同時に変化する  $V_{CS}$  の電圧変動を光信号として捉える。このように蓄積動作が排除された CPx は光信号を連続的なアナログ信号として出力できるため、サンプルレートの制約からカメラ受信機を解放できる。

実質的に 2 トランジスタ型画素となるこの構成部品の少ないシンプルな構造は、光を受ける PD エリアの拡大を可能にし、高感度化に寄与する。しかしながら、一般的に PD エリアを単に拡大するとキャパシタンス成分 (容量性負荷) も増加し、それに伴って光の強度変化に対する応答速度が低下する。そこで高感度化と高速化の両立を図るため、この CPx には空乏化 (埋め込み) PD が採用されている。埋め込み PD は、完全空乏化時にフリッジング電界が生成されて空乏領域のキャパシタンスが大幅に縮小される。そのため、この埋め込み PD が採用された CPx は応答性能を犠牲にすることなく、PD 面積の拡大により感度が高められている。

埋め込み PD が採用されたことにより、光の変化に対する応答性能を制限する支配的

な容量成分の一つは、要素部品の FD 部の容量（チャージセンシングノード容量） $C_{FD}$  となる。応答性能を示す時定数  $\tau$  は以下の式（3.1）で示され、 $C_{FD}$  の低減は直接的な効果をもたらす。

$$\tau = CR = C_{FD} \frac{nV_{th}}{I_p} \dots (3.1)$$

ここで  $V_{th}$  ( $=k_B T/q$ ) は熱電位、 $n$  は理想化定数、 $I_p$  は光入射によって流れる電流である。この CPx では、FD のサイズを限界まで小さくすることで応答性能の向上が図られている。

更にこの CPx は対数応答という特徴を持つ。この CPx の基本的な動作は対数応答型広ダイナミックレンジ（DR）画素[11]と同様であり、流れるドレイン電流  $I_d$  は以下の式で示される。

$$I_d = I_{d0} \exp\left(\frac{\phi_{ch} - V_{CS}}{nV_{th}}\right) \dots (3.2)$$

ここで、 $\phi_{ch}$  はドレインと FD 間のチャネルの空乏化電位、 $I_{d0}$  は  $\phi_{ch}=V_{CS}$  の時の基準ドレイン電流である。 $V_{CS}$  に対して  $I_d$  が指数関数的に応答するため、逆に  $I_d$  に対して  $V_{CS}$  は対数的に応答することになる。屋外環境での利用が前提となる車載システムにおいて、通常の線形応答画素は DR の不足から強力な環境光の入射により飽和し、光信号が受信できない恐れがある。また入射する LED の光信号の強度が非常に強い場合も受信信号が飽和によりクリップされる可能性がある。この対数応答特性は DR を拡大して屋外照明環境下における飽和を防いで光信号の確実な受信を助けると共に、LED 毎に異なる信号強度に対応できる。

図 3.3 に通信画素の動作概要を示す。LED の光信号がオンの場合、PD で発生した電荷がドリフト電界を伴って FD 部に直ちに流れ込み、電荷を一時的に蓄積する一方で、ポテンシャルバリアを越えた電荷が FD からオーバフローする。そして、その時の出力電圧  $V_{CS}$  は生成された電荷の量、すなわち光信号の強度に応じて素早く下降する。この時の  $V_{CS}$  の応答曲線が上述したように対数応答となる。一方、LED からの光信号がオフ

となった場合、FD 付近の残留電荷は拡散によりゆっくりと放出されるため、 $V_{CS}$  は ON 時と比較して緩やかな対数曲線を描いて上昇する。従って、この通信画素の応答性能は光信号がオフしたときの上昇時間で決まる。また、光信号のオンとオフで応答時間が異なるため、この CPx の応答特性は上昇と下降で非対称という特徴を持つ。

このように CPx は、非蓄積と非サンプリング動作によりフレームレートの制約からカメラ受信機を解放し、埋め込み PD の採用により応答速度を犠牲にすることなく感度が高められ、FD 部の最小化による応答性能の向上が図られ、更に対数応答により屋外環境下での飽和が防がれている。しかしながら、上昇と下降で応答曲線が非対称という特徴も併せ持つ。

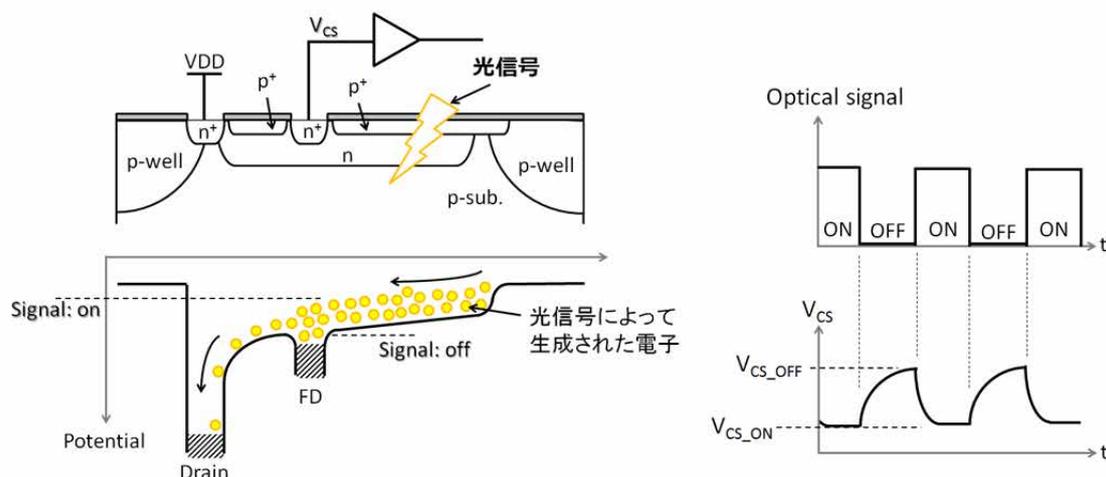


図 3.3 通信画素の動作概要

### 3.2.3 フラグ画像出力機能

送信デバイスである LED を画像内から高速かつ高精度に検出するためのフラグ画像出力機能について説明する。

図 3.4 に OCI に搭載された画像信号の読出し回路を示す。この読出し回路は大きく“IPx”、“コンパレータ回路”、“カラム CDS（相関二重サンプリング）回路”の 3 つの回路

群で構成され、2つの画像を出力する機能が搭載されている。一つはIPxとCDS回路を用いた一般的なグレイ画像の出力機能であり、そしてもう一つがIPxとコンパレータ回路を用いたフラグ画像の出力機能である。2つの画像出力機能で共用されるこのIPxは、埋め込みPDを用いた標準的な4トランジスタ型画素[12, 13]であり、このOCIでは特別な仕組みは有していない。また、グレイ画像を出力するためのIPxとCDS回路の動作は従来技術と同様である[11, 14]。つまり、従来の画像出力回路と回路構成上で大きく異なる点は、グレイ画像の信号線にコンパレータ回路が接続されたことである。IPxを用いて2次元空間の明るさ情報（光強度）を取得する点は同じであるが、グレイ画像信号はCDS回路からアナログ信号で出力されるのに対し、フラグ画像信号はこのコンパレータの閾値電圧  $V_{ref}$  によって2値化され、1-bitのデジタル信号で出力される。

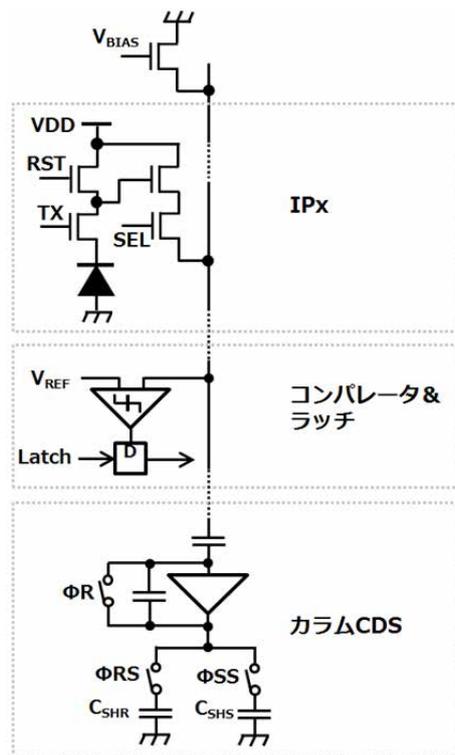


図 3.4 グレイ画像とフラグ画像の読出し回路

図 3.5 にグレイ画像とフラグ画像の読出し動作を示す。まず初めに  $n$  行目の IPx の信号がグレイ画像用の信号として CDS 回路に送られ、 $n$  行目のグレイ画像信号として出力される。次にこの CDS 動作の直後、垂直シフトレジスタの選択行が一行戻され、一動

作前の (n-1) 行目の IPx が選択される。そして、その (n-1) 行目の IPx の信号がフラグ画像用の信号としてコンパレータ回路に送られ、(n-1) 行目のフラグ画像信号として出力される。二種類の画像用の信号を得るための IPx の基本的な動作は同じであるが、違いは露光時間（電荷蓄積時間）である。グレイ画像信号の露光時間は、基本的に垂直レジスタが一周し、再度 n 行目まで戻ってくるまでの時間となる。しかしながらフラグ画像の場合、n 行目の読出し処理の直後に (n-1) 行目の読出し処理が行われるため、その露光時間は n 行目と (n-1) 行目の選択時間の差、すなわち僅か 1 水平時間（1H 時間）しかない。例えば画像のフレームレートが 60fps、垂直解像度が 480 の場合、グレイ画像の最大露光時間は約 16.6ms、フラグ画像の露光時間は 1H 時間の約 35 $\mu$ s であり、その差は 3 桁である。

一般的に 35 $\mu$ s の極めて短い露光時間では十分な信号が蓄積できず、通常の光強度を持った物体の信号量は僅かとなる。従って、コンパレータ回路の閾値を上回ることができず、出力信号としては“0”に落とされることになる。しかしながらセンサに直接入射する LED の光強度は圧倒的に強く、僅か 1H という短時間でも LED が位置する画素には多くの電荷が蓄積する。従って LED のように、光の強度が極めて強い物体領域だけがコンパレータの閾値を超え、“1”が出力されることになる。つまりこのフラグ画像は、センサで受光した段階で 2 次元空間内の対象物の光の強度をある閾値を基準に“強い (1)”か“弱い (0)”かに区別した画像である。すでに述べたように、グレイ画像を用いて画像処理で 2 値化するような手法では、LED のような光源領域と不要な背景を正確に区別することは困難である。しかしながら、センサ内部で受光した段階で 2 値化する本手法は、LED のような光源領域とそれ以外の物体領域の信号レベルの差が極めて大きいためそれらの区別が容易であり、LED 検出に不要な領域を正確かつ完全に排除することができる。そしてこの 2 つの画像信号の出力動作を 0 行目から最終行まで繰り返すことで 1 フレーム分の画像信号を出力し、外部回路でグレイ画像とフラグ画像のそれぞれ 2 枚の画像を完成させる。最後に完成したフラグ画像から画像処理を用いて LED 検出が行われる。この動作を繰り返すことで高精度かつ高速な LED の検出および追跡を実現する。

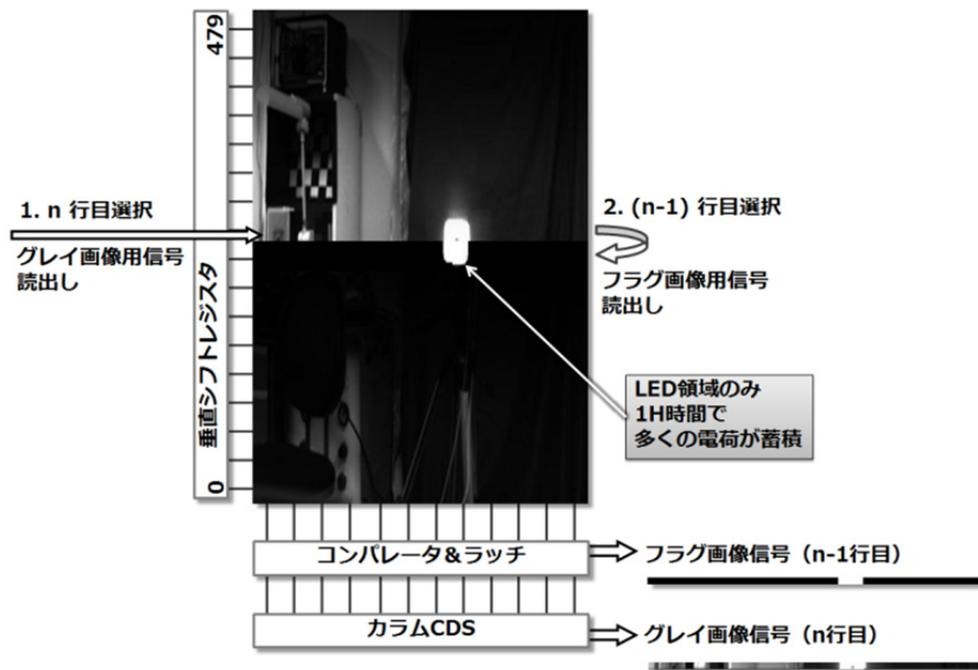


図 3.5 グレイ画像とフラグ画像の読出し動作

### 3.2.4 OCI チップの全体構成

図 3.6 に CPx とフラグ画像出力機能を搭載し、一つのセンサで画像取得と光信号受信の両機能を実現する OCI の全体構成を示す。

OCI の中心にある画素アレイには、垂直（縦）方向に並べられた IPx と CPx が交互に配置されている。そして IPx の出力線は画素アレイ下段の画像信号取得用回路群に接続され、通信画素の出力線は画素アレイ上段の光信号受信用回路群に接続されている。画像信号取得用の回路群は、“コンパレータとラッチ”、“カラム CDS と読出しアンプ”、“垂直シフトレジスタ”、そして“水平シフトレジスタ”で主に構成されている。また、光信号受信用の回路群は、“X アドレスジェネレータ”、“Y アドレスジェネレータ”、“9ch アナログマルチプレクサ”、“9ch 信号読出しアンプ”で主に構成されている。

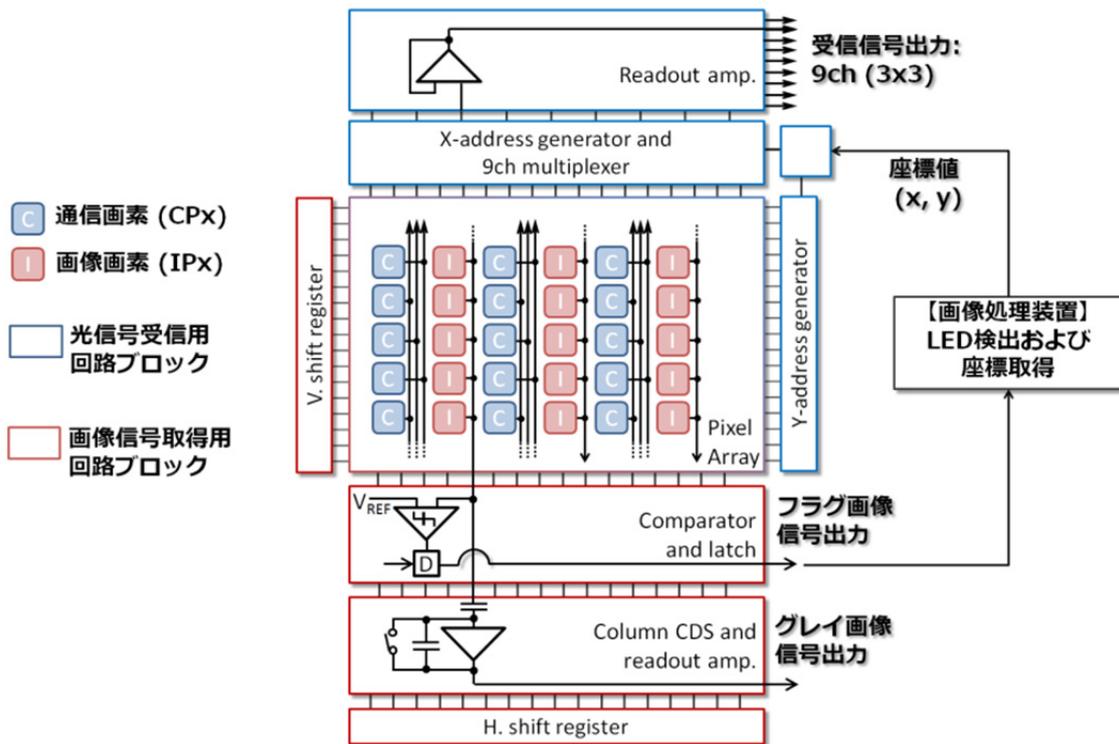


図 3.6 OCI の全体構成

OCI の全体動作を説明する。まず初めに OCI のコンパレータ回路から 1bit のフラグ画像信号，カラム CDS 回路からアナログ値のグレイ画像信号がそれぞれ出力される。行ごとのグレイ画像信号とフラグ画像信号は外部のメモリでそれぞれ順次保持され，全行の読出しが完了した時に一枚の画像が完成する。完成したフラグ画像は外部の画像処理装置に送られ，LED 領域が検出されると共に，検出された領域の中心座標  $(x, y)$  が取得される。その座標値は，OCI に送られ，X および Y のアドレスジェネレータにセットされる。そして，セットされた座標値に対応する CPx が両アドレスジェネレータによって選択され，光信号の受信を開始する。ただし，OCI では図 3.7 に示すように，LED 検出によって得られた座標  $(x, y)$  に隣接する  $(x', y)$  の CPx がアドレスジェネレータによって選択される。また，その時，その  $(x', y)$  を中心とした周囲 8 つの CPx も同時に選択され，それらも光信号の受信が行える状態になる。つまり同時に 9ch の CPx が稼働する。これは，検出した LED の座標が LED 検出の直後の僅かな時間で動いた時に，通信が途切れないようにするためのいわば補償である。そして最終的に 9ch の CPx によ

って受信された受信信号が、それぞれ個別に 9ch の読出しアンプを通して出力される。

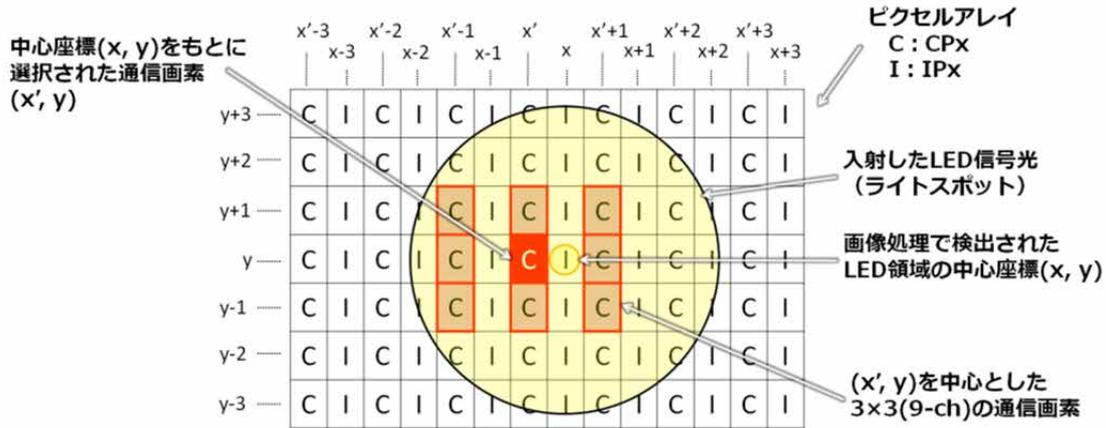


図 3.7 CPx の選択の概要

OCI は本動作を繰り返すことで LED を検出、追跡しながら高速な光信号を受信することができる。今回、グレイ画像およびフラグ画像を最大 60fps で出力できるように回路を設計し、最高 16.6ms 周期で LED が検出される。

### 3.2.4 OCI チップの試作

図 3.8 および表 3.1 に試作した OCI チップの外観と設計仕様を示す。プロセステクノロジーは  $0.18 \mu\text{m}$ , 1P4M の CMOS イメージセンサ (CIS), チップサイズは  $7.5 \text{ mm} \times 8.0 \text{ mm}$  である。また、画素アレイサイズ (受光面積) は  $4.8 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$  ( $1/3$  インチサイズ), 画素サイズ (画素ピッチ) は  $7.5 \mu\text{m} \times 7.5 \mu\text{m}$ , 総画素数は  $642 \times 480$  である。この  $642 \times 480$  の画素アレイ内には、 $321 \times 480$  の IPx アレイと CPx アレイが図 3.6 で示したように交互に配置されている。パッケージ仕様は QFP の 144 ピン, 投入電源電圧はアナログ回路用が 3.3V, デジタル回路用が 3.3 V と 1.8 V である。

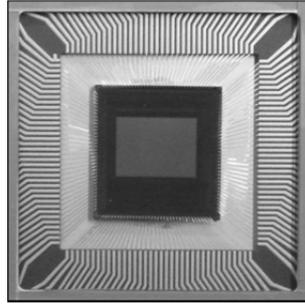


図 3.8 試作した OCI チップの外観

表 3.1 試作した OCI チップの設計仕様

テクノロジー	0.18 $\mu\text{m}$ , 1P4M CIS
チップサイズ	7.5 mm (H) $\times$ 8.0 mm (V)
画素サイズ (画素ピッチ)	7.5 $\mu\text{m}$ $\times$ 7.5 $\mu\text{m}$
画素数	642 (H) $\times$ 480 (V) - IPx : 321 (H) $\times$ 480 (V) - CPx : 321 (H) $\times$ 480 (V)
画素アレイサイズ	4.8 mm $\times$ 3.6 mm 1/3 インチサイズ
最高画像出力レート	60 fps (16.6 ms)
パッケージ仕様	QFP, 144 ピン, 0.5 mm ピッチ
電源電圧	デジタル回路 : 3.3 V, 1.8 V アナログ回路 : 3.3 V

### 3.3 CPx の基本特性

CPx はこれまでになく光信号受信のための特別な画素であり、その特性は画像取得用の画素と異なる。ここでは、試作した OCI を用いて CPx の直流応答特性、周波数応答特性、時間応答特性といった基本的な特性の測定を行った。

### 3.3.1 直流応答特性

図 3.9 に示す測定システムを用いて、CPx の直流光に対する応答特性を測定した。直流光とは時間的に無変動な光、すなわち環境光（背景光）のことである。前節で述べたように CPx の光強度に対する応答は対数応答である。そのため、この直流光を低照度から高照度まで変化させることで CPx が対数応答特性により飽和しないことを実験的に確認する。また、光強度の変化に対する OCI の出力電圧範囲を調べる。この測定により、夜間や日中といった照明環境の変化によって出力電圧のオフセットレベルがどれくらい変動するかも確認できる。本測定では直流光を OCI と照度計に向き合って設置したハロゲンランプで作り出した。また、OCI にレンズは装着せず、OCI とハロゲンランプの距離は 1m とした。そして、ランプの光の照度を 0.04 ルクスから 78500 ルクスまで変化させたときの CPx の出力電圧  $V_{CPX}$  を測定した。なお、この 6 桁の照度範囲は屋外照明環境の夜間から日中を想定した値である。

図 3.10 に横軸を照度、縦軸を出力電圧  $V_{CPX}$  とした直流光応答特性を示す。図が示すように照度の増加に伴って  $V_{CPX}$  は低下し続け、CPx の対数応答特性から高照度の照明環境であっても飽和しないことを確認した。そして、実際の屋外照明環境を想定した今回の照度範囲では  $V_{CPX}$  は 1.90 V から 1.68 V まで変化しすることを確認した。これにより、出力電圧範囲は 1.90 V ~ 1.68 V、出力電圧振幅  $\Delta V_{CPX}$  は 220 mV であることがわかった。照明環境により出力電圧のオフセットレベルが 220 mV 変動するため、OCI を用いた ISC システムではオフセット変動の影響を受けない DC フリーの伝送方式（変調・符号化方式）を採用する。

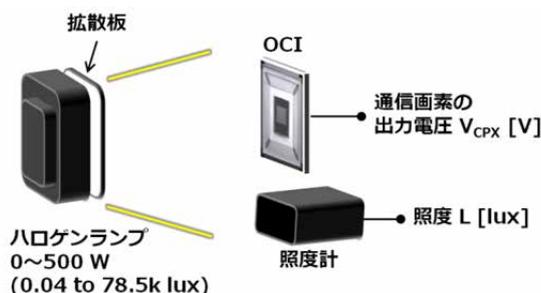


図 3.9 CPx の直流光応答特性の測定システム

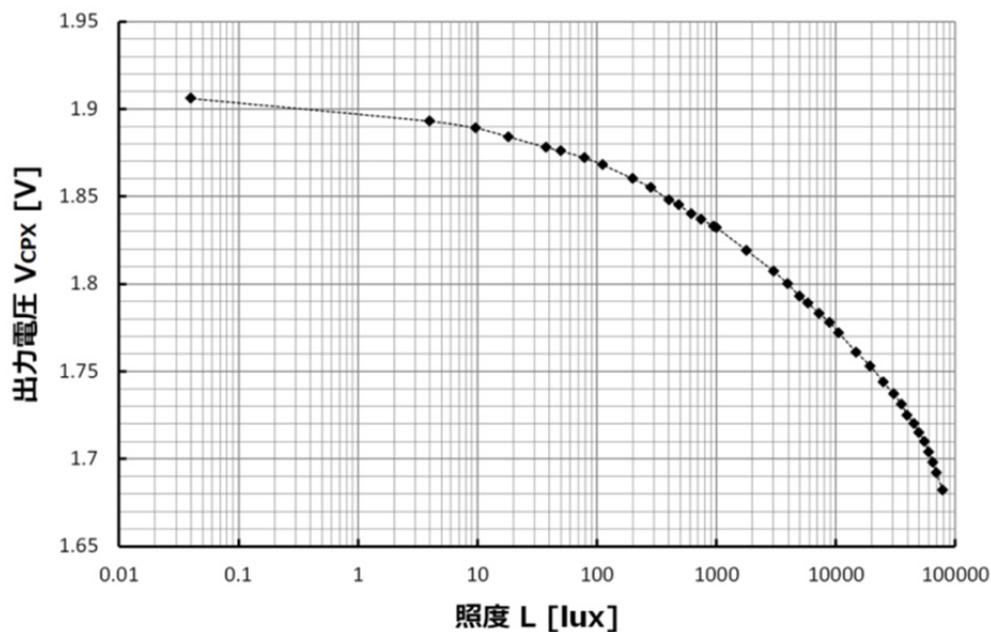


図 3.10 CPx の直流光応答特性の測定結果

### 3.3.2 周波数応答特性

図 3.11 に示す測定システムを用いて、CPx の周波数応答特性を測定した。周波数応答特性は入力信号の周波数変化に対する出力信号の応答を示すものであり、CPx の受信デバイスとしての基本的な性能を明らかにできる。本測定にはネットワークアナライザを使用し、システムへの入力信号振幅  $V_{IN}$  とシステムからの出力信号振幅  $V_{OUT}$  を用いて以下の式で伝達関数  $H_{CPx}$  を求める。

$$H_{CPx}(f) = 20 \log \frac{V_{OUT}(f)}{V_{IN}(f)} \dots (3.3)$$

本測定での  $V_{IN}$  は光源の駆動電圧振幅、 $V_{OUT}$  は OCI の出力電圧振幅である。光源には帯域の十分広いレーザー（帯域幅 2.5 GHz、発光波長 670 nm）を使用した。OCI に取り付けられたレンズの焦点距離  $f$  は 4.2 mm、 $F_N$  は 1.6 である。また、測定した周波数範囲は 200 kHz～100 MHz、測定点数は 1601 点である。

図 3.12 に横軸を周波数  $f$ 、縦軸を  $H_{CPx}$  とした周波数応答特性を示す。なお、縦軸は 200 kHz のときの  $H_{CPx}$  を基準（0dB）とした。図から分かるように、周波数の増加に伴い  $H_{CPx}$  は低下し続ける特性を示し、例えば受信信号は 11.5 MHz で -20 dB、36 MHz で -40 dB と大きく減衰する。フラットな特性区間がないため、通信信号は CPx を通過する際に周波数領域で歪められる（劣化する）。従って、OCI を用いた通信システムには劣化した信号を周波数領域で補償（復元）する等化器（イコライザ）などのデジタル信号処理技術が必須である。本測定で得られた周波数応答特性のデータを基に次節で信号復元のためのイコライザが設計され、受信機システムに搭載される。

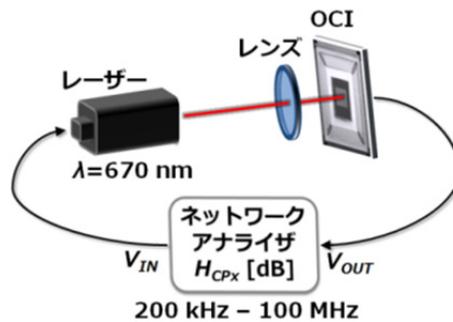


図 3.11 CPx の周波数応答特性の測定システム

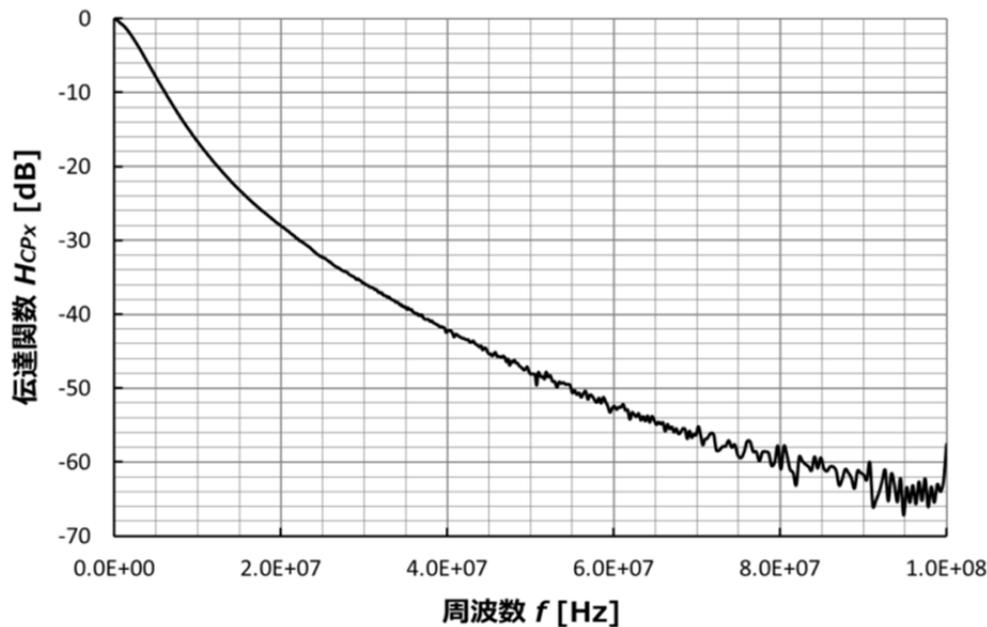


図 3.12 CPx の周波数応答特性の測定結果

### 3.3.3 時間応答特性

CPx の時間応答特性，すなわち立上り時間  $t_r$  と立下り時間  $t_f$  は前節で説明したように異なり，また  $t_r$  と  $t_f$  では  $t_r$  が応答性能を制限する．そこで，1 MHz，約 0.5 mW のレーザー光を CPx に照射して  $t_r$  と  $t_f$  を測定し，それらの応答時間が異なることや  $t_r$  が性能を制限することを実験的に確認する．

図 3.13 に時間応答特性を測定した結果を示す．なお，本図はオシロスコープの画面をキャプチャしたものであり，図の上段はレーザーの駆動信号，下段は CPx の出力信号である．図から分かるように，レーザー光がオン状態に変化すると CPx の出力は直ちに下降し，オフ状態になるとゆっくりと上昇することが確認できた．従って，CPx の時間応答性能は光信号がオフになったときの上昇時間で決まる．今回の実験条件では， $t_r$  と  $t_f$  はそれぞれ 317 ns と 163 ns であり，その差は約 2 倍であった．

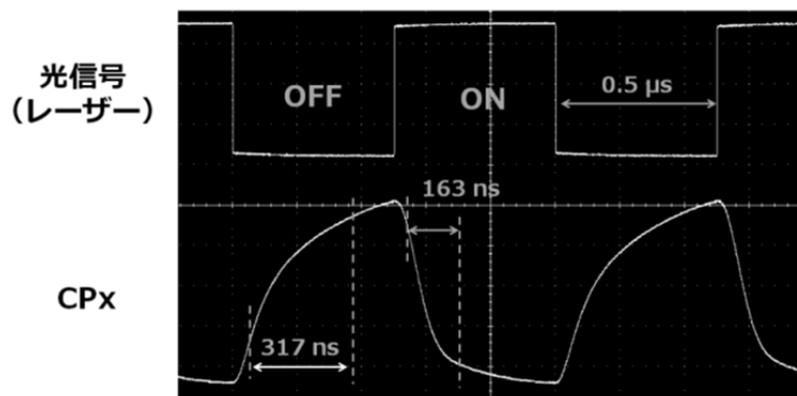


図 3.13 CPx の時間応答特性の測定結果

### 3.4 LED 送信機システムとカメラ受信機システム

OCI を用いた ISC システムの情報伝送性能を確かめるため、LED 送信機システムおよび OCI を搭載したカメラ受信機システムを構築した。ここでは、LED 送信機とカメラ受信機それぞれの詳細なシステム構成および設計仕様、性能などを記す。また、システムのノイズ特性測定や、フラグ画像を用いた LED 検出機能の動作確認を実施した結果についても示す。

#### 3.4.1 LED 送信機システム

図 3.14 に LED 送信機システムの外観およびシステム構成を示す。また、表 3.2 にその設計仕様と実測性能を示す。

この LED 送信機には 10×10 個の LED が搭載されており、発光面積は 5.5 × 5.5 cm<sup>2</sup> となっている。LED には発光波長 870 nm の近赤外 LED が使用されており、総光出力は最大で約 2 W である。伝送信号は信号発生器で生成され、ドライバと LED アレイを通して光信号が送信される。なお、本来であれば可視光 LED を使用するところであるが、

本研究ではカメラ受信機の性能向上とその評価に焦点を当てており、第 2 章で得られた結果を元に、十分な帯域特性を持った近赤外 LED を暫定的に使用した。

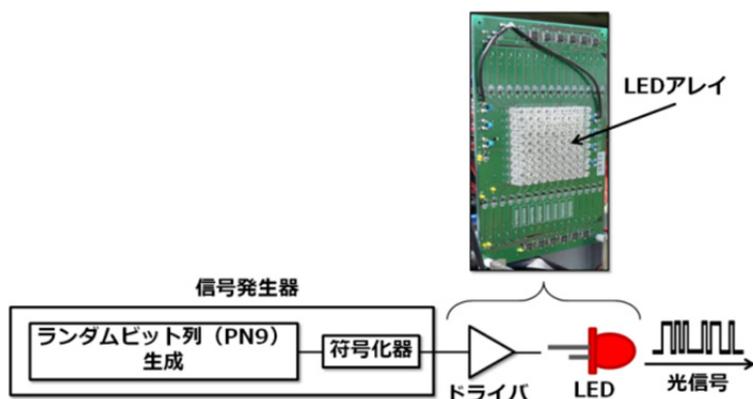


図 3.14 LED 送信機システムの外観とシステムブロック図

表 3.2 LED 送信機システムの設計仕様

LED 数	10 × 10 個
LED アレイサイズ	5.5 cm × 5.5 cm
最大光出力	約 2 W
ピーク発光波長	870 nm
半値放射角	±20 deg.
遮断周波数 $f_c$ 図 3.15	55 MHz
応答時間 図 3.16	tr 4.2 ns
	tf 7.1 ns
電源電圧	7~9 V
最大 LED 消費電力	約 9 W
基板外形	100 mm (H) × 180 mm (V)

情報送信機器としての基本的な性能を把握するため、LED 送信機の周波数応答特性と遮断周波数を測定した。周波数応答特性は、LED 送信機を 100 kHz から 100 MHz の矩形波（パルス）信号で駆動し、その時の LED 送信機の光出力を測定することで得た。図 3.15 に横軸をパルス周波数、縦軸を LED の光出力とした測定結果を示す。なお、縦軸の光出力は 100 kHz のときの光出力を基準（0 dB）とした。結果から、本 LED 送信

機の遮断周波数は 55 MHz であり, 10 Mbps クラスの光信号を十分送信できる能力があるとことを確認した.

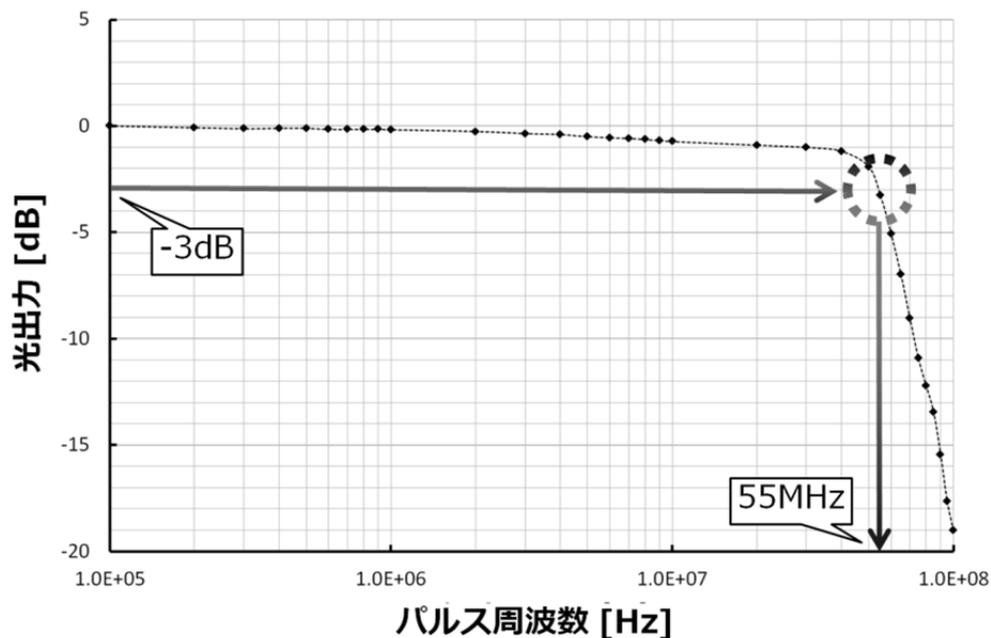
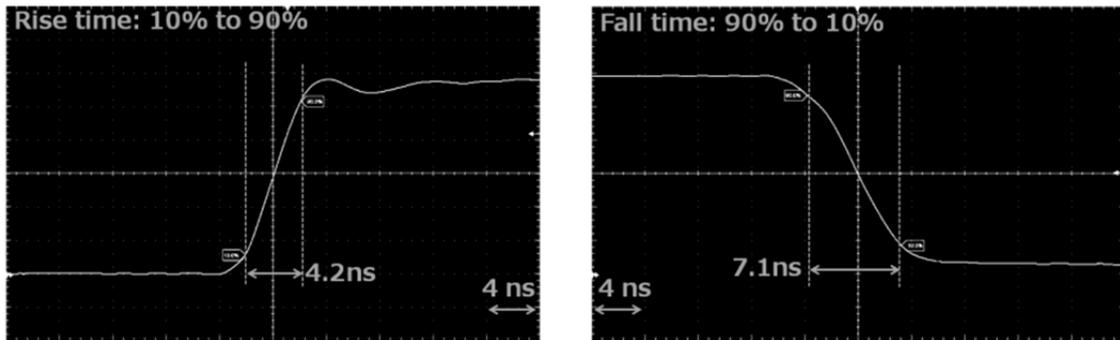


図 3.15 LED 送信機の周波数応答特性と遮断周波数の測定結果

次に, LED 送信機の時間応答性能を確認するため, LED 送信機を矩形波信号で駆動して光信号の立上り時間  $t_r$  と立下り時間  $t_f$  をそれぞれ測定した. なお,  $t_r$  は光出力が 10% から 90% に達する時間であり,  $t_f$  は 90% から 10% に達する時間である. その結果,  $t_r$  と  $t_f$  は図 3.16 に示すようにそれぞれ 4.2 ns と 7.1 ns であり, OCI の性能と比較して十分高速に応答することを確認した.

OCI の周波数応答ならびに時間応答性能を上回る LED 送信機の実現に成功したため, システムの伝送性能の評価を行う際, 課題や性能制限の原因をカメラ受信機側に一本化して解析できる.



(a) 立上り時間  $t_r$

(b) 立下り時間  $t_f$

図 3.16 LED 送信機の時間応答特性の測定結果

表 3.3 に、LED 送信機とカメラ受信機間で情報伝送を行うための通信仕様を示す。信号発生器で生成される伝送信号の変調方式は On-Off Keying (OOK), 符号化方式はマンチェスタ符号化 (MC : Manchester Coding) である。OOK はすなわち 2 値の 1bit 変調方式である。また、MC は OOK 信号の“0”と“1”を、図 3.17 に示すように“01 (または 10)”と“10 (または 01)”に変換したものである。この符号化は、1bit を伝送する間に必ず 0 と 1 が入れ替わるため、OOK 信号を DC フリー (直流成分を使用しない) 信号に変換できる。また、信号の変化と平均電力がデータ内容に依らず一定であるため同期がとり易い。しかしながら、1bit を伝送するために 2 クロックを必要とするため、伝送 (帯域利用) 効率は NRZ (Non Return to Zero) などと比較して悪い。設定できるデータレートは 9.765625 Mbps, 15.625 Mbps, 19.53125 Mbps の 3 種類であるが、以後は簡単のため 10 M, 15 M, 20 Mbps と表現する。送信データは疑似ランダムビット列 (PN9) である。この PN9 は、9 段のシフトレジスタで構成された回路によって生成される 511-bit 長の疑似ランダム信号列である。繰り返し信号であるため真のランダム (不規則) ではないが、繰り返し周期が十分長く、全ての組み合わせを含んでいるためランダムとみなされて一般的に通信性能評価によく用いられる。

表 3.3 通信仕様

変調方式	OOK
符号化方式	MC
データレート	10 Mbps (9.765625 Mbps) 15 Mbps (15.625 Mbps) 20 Mbps (19.53125 Mbps)
送信データ	疑似ランダムビット列 (PN9)

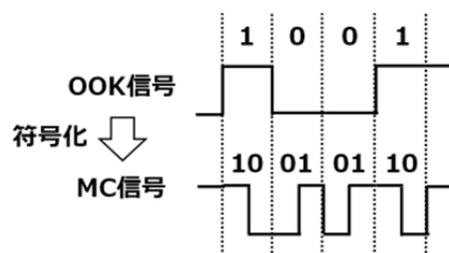


図 3.17 マンチェスタ符号化の概要

### 3.4.2 カメラ受信機システム

図 3.18 に OCI を搭載したカメラ受信機システムの外観とシステムブロック図を示す。また、表 3.4 にカメラ受信機システムの設計仕様を示す。このカメラ受信機システムはフラグ画像から LED を検出して OCI に座標を指示すると共に、受信した光信号に対してデジタルフィルタや復号化処理を行って伝送情報（ビットデータ）を取得することができる。

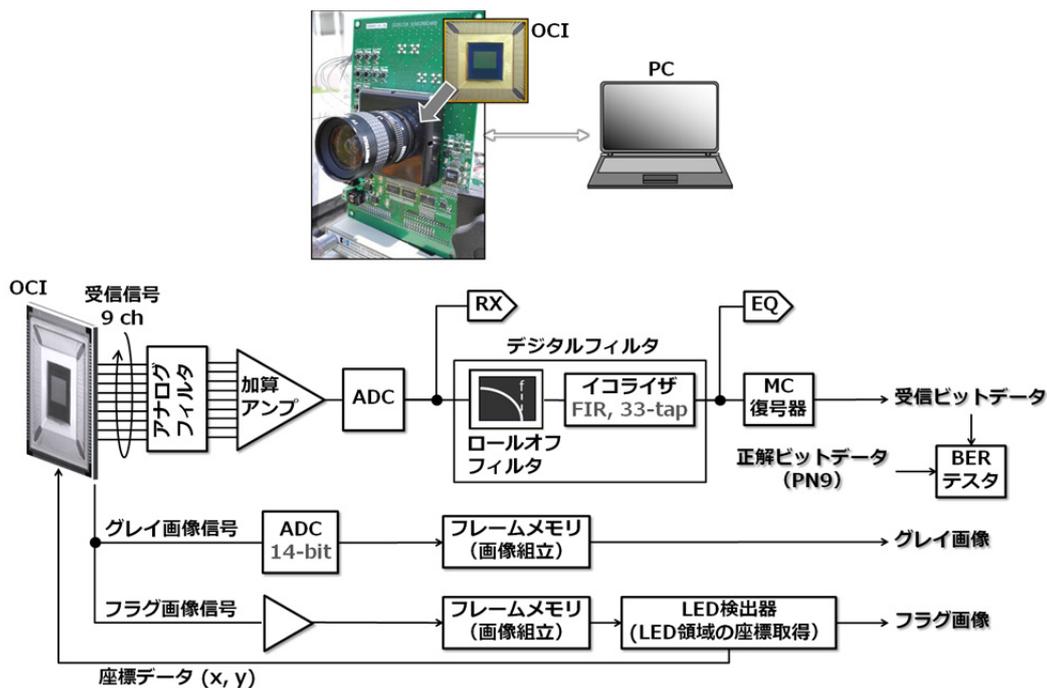


図 3.18 カメラ受信機システムの外観とシステムブロック図

画像信号に関しては、グレイおよびフラグ画像信号が OCI からそれぞれ独立に出力される。そして各信号はフレームメモリに蓄積され、最大 60 fps (16.6 ms) の周期で各画像が組み立てられる。グレイ画像は完成後に明るさやコントラスト等の画質調整が行われて PC モニタ等に出力される。フラグ画像はモニタ等に出力されると共に LED 検出器に送られ、LED 領域の検出とその中心座標の取得が行われる。LED 領域の検出には、画像処理の分野で一般的なラベリング処理が用いられる[15]。最後に検出器で得られた座標データ  $(x, y)$  が OCI に送られ、CPx の選択に使用される。この一連の動作が最高 16.6 ms の周期で繰り返し実行される。現在のところ、グレイ画像は表示のみに用いられているが、将来的に白線認識や歩行者検出などの従来の安全支援用の画像処理技術に使用することが可能である。

通信信号に関しては、受信した光信号が OCI の 9-ch の出力ピンからそれぞれ出力され、アナログフィルタ (ハイパスフィルタ) を通過した後、加算アンプで 1 つの信号に合成される。本システムの光信号は DC フリーの MC 方式で符号化されているため、不要な DC 成分をこのハイパスフィルタで排除する。そして、加算された信号は ADC (Analog-to-Digital Converter) でデジタル化された後、信号処理を行うためのデジタル

フィルタ部に送られる。ADC のサンプリングレートは LED 送信機のデータレートに合わせられ、1 シンボルあたり 8 回サンプルされる。デジタルフィルタ部はロールオフフィルタ (ROF) やイコライザを持ち、OCI の特性によって周波数領域で歪められた受信信号を回復する。そして回復された受信信号は復号器で復号され、最終的に受信ビットデータとして出力される。また、受信ビットデータと PN9 の正解ビットデータを用いて符号誤り率 (BER: Bit Error Rate) が測定される。

表 3.4 カメラ受信機システムの設計仕様

搭載イメージセンサ	OCI
レンズ	(実験により適宜変更)
アナログフィルタ	ハイパス (DC カット) フィルタ - 遮断周波数 : 1.7 kHz
ADC (通信信号用)	8 Sample/Symbol - 78.125 MSPS (10 Mbps) - 125 MSPS (15 Mbps) - 156.25 MSPS (20 Mbps)
ROF	Raised-cosine filter ロールオフ率 1.0
イコライザ	FIR フィルタ (直接型) タップ数 33
ADC (グレイ画像信号用)	14-bit
I/F (⇔PC)	USB 2.0, カメラリンク
電源電圧	5 V
基板外形	アナログ基板 : 12 cm (H) × 19 cm (V) デジタル基板 : 10.5 cm (H) × 15.5 cm (V)

本システムに使用したイコライザの設計について述べる。イコライザには、インパルス応答の継続時間が有限である直接型 FIR (Finite Impulse Response) フィルタを使用した[16, 17]。FIR フィルタは、IIR (Infinite Impulse Response) フィルタのようなフィードバックがなく、図 3.19 のようなトランスバーサルフィルタで構成できるため、常に安定して動作する。

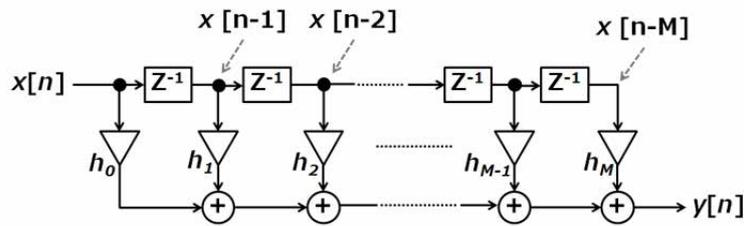


図 3.19 直接型 FIR フィルタのブロック図

図 3.19 のフィルタの入出力を示す差分方程式は、以下のようなになる。

$$y[n] = \sum_{m=0}^M h_m x[n-m] \quad \dots (3.4)$$

ここで  $h_m$  はフィルタの係数， $M$  はフィルタの次数である．またこの式 (3.4) に対応する伝達関数は，以下の式で表される．

$$H_{eq}(z) = \sum_{m=0}^M h_m z^{-m} \quad \dots (3.5)$$

ここで  $z^{-1}$  の項は，1 サンプルだけ遅延された信号 (1 サンプル前の信号) を意味する．従ってこの式は， $M$  サンプル前までの各遅延信号をフィルタで保持し，1 サンプルごとにそれら遅延信号に係数をかけて合成することを意味する．なお，図中，遅延器 ( $z^{-1}$ ) と乗算器 ( $h_m$ ) の組をタップと呼び，タップの数だけ遅延信号と係数の乗算を行い，それらを足し合わせる．

本システムでのフィルタ係数  $h_m$  は，OCI の周波数応答特性から算出した．入力信号  $X(f)$  が CPx の伝達関数  $H_{CPx}(f)$  によって劣化し，その劣化信号が出力信号  $Y(f)$  として得られるという基本的な伝送モデルを図 3.20 に示す．

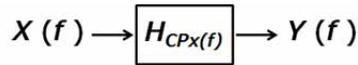


図 3.20 入力信号の劣化モデル

またこれは以下のように  $H_{CPX}(f)$  と  $X(f)$  の乗算で表すことができる。

$$Y(f) = H_{CPX}(f) X(f) \quad \dots (3.6)$$

つまり、図 3.21 および式 (3.7) で示すように、 $H_{CPX}$  の逆数を  $Y$  に乗算すれば、劣化信号  $Y$  から元の入力信号  $X$  を復元することができる。本システムでは、測定した  $H_{CPX}$  の逆関数 ( $H_{CPX}^{-1}$ ) となる係数  $h_m$  を持った  $H_{eq}$  を設計し、受信機システムで受信信号の復元を行う。

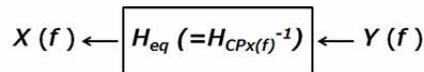


図 3.21 入力信号の復元モデル

$$X(f) = \frac{Y(f)}{H_{CPX}(f)} = H_{eq} Y(f) \quad \dots (3.7)$$

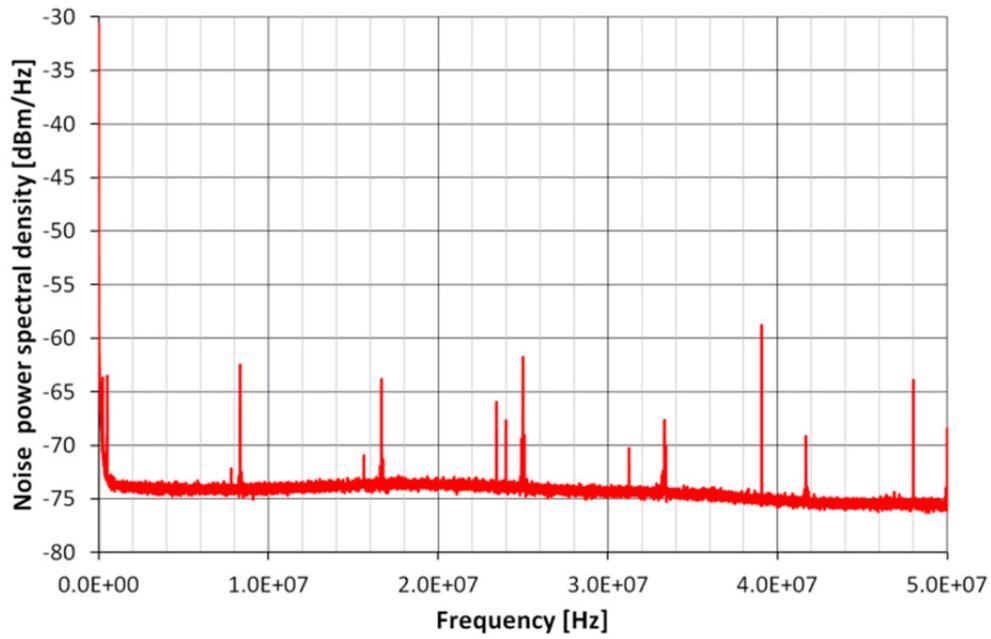
### 3.4.3 ノイズ測定

試作したカメラ受信機の受信システムとしての基本的な性能を把握するため、ノイズの電力スペクトル密度 (PSD : Power Spectrl Density) を測定した。PSD とは、時間信号に含まれる単位周波数あたりのパワー (信号電力) を周波数領域で表したものである。本測定ではまず、レンズを閉じて OCI に光信号が入射しない状態でカメラ受信機の受信信号出力端子 RX (図 3.18) の電圧振幅を測定した。そして、時間信号であるその測定電圧を高速フーリエ変換 (FFT : Fast Fourier Transform) を用いて周波数領域の信号に

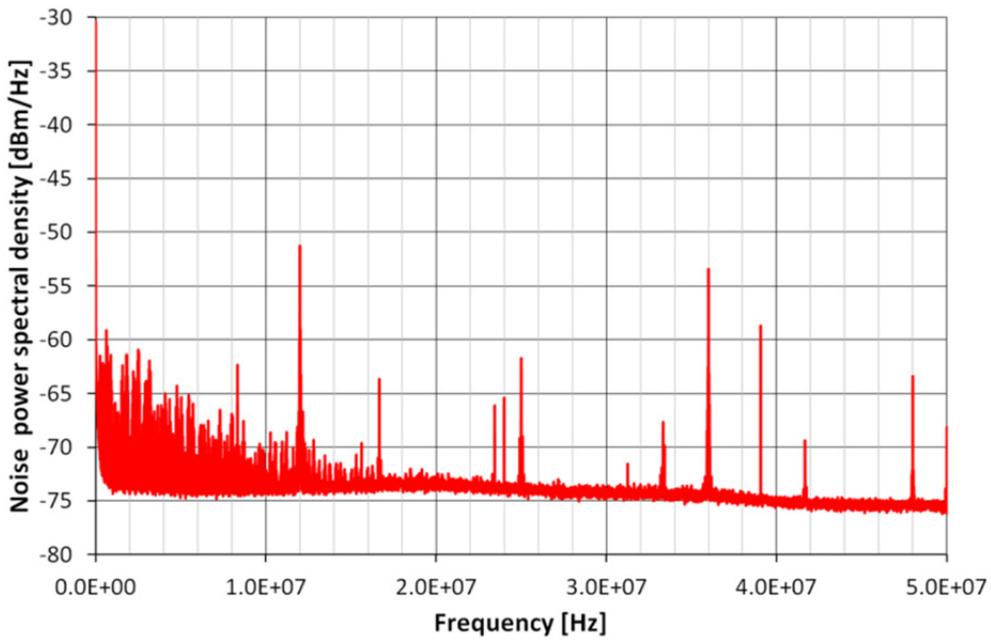
変換し、PSD を算出した。また、光信号受信機能と画像取得機能を OCI に同時に集積したことによる受信性能への影響を確認するため、OCI の画像出力機能を停止した場合と稼働した場合の二つの条件でノイズを測定した。画像出力機能の停止とは、OCI 内部のグレイ画像およびフラグ画像を取得するための回路群（垂直および水平シフトレジスタ回路、CDS 回路、画像読み出しアンプ回路など）を駆動するために必要なクロック信号などの外部からの投入を、全て停止することを意味する。

図 3.22 に、画像機能を停止した時と稼働した時のノイズ測定結果を示す。なお、横軸は周波数、縦軸は算出したノイズの PSD (dBm/Hz) である。画像機能を停止した場合には、カメラ受信機システムに搭載された FPGA (Field-Programmable Gate Array) などのデジタル回路の動作クロック信号やその折り返し信号などが、狭帯域のピークを持って散発的に現れていることが確認できる。それらを除けば、約-75 dBm/Hz 程度の値が全域のノイズ電力として現れている。

次に画像機能が ON の場合では、画像出力用の回路に用いられる様々な周波数成分を持ったデジタル信号のノイズが受信信号の出力ラインに重畳し、主に 10 MHz を超える程度までの帯域で全体的にノイズレベルが増加している。また、特に 12 MHz に大きなノイズ信号のピークが現れた。12 MHz は画像用回路の水平シフトレジスタのクロック周波数であり、画像機能の稼働によってこの 12 MHz のノイズ信号が最も受信信号に影響を与えると予想される。



(a) 画像出力機能 : OFF



(b) 画像出力機能 : ON

図 3.22 ノイズの PSD の測定結果

### 3.4.4 フラグ画像出力機能の動作実験

試作したカメラ受信機システムを起動し、フラグ画像の出力機能の動作実験を実施した。図 3.23 は屋内での動作実験結果であり、左からカメラ受信機のグレイ画像出力機能によって出力された LED 送信機が OFF の時のグレイ画像、次に LED 送信機が ON の時のグレイ画像、そして LED が ON の時のグレイ画像を画像処理技術で二値化した画像、最後がカメラ受信機のフラグ画像出力機能によって出力されたフラグ画像である。LED を ON したグレイ画像には信号レベルが飽和している領域が LED 発光面以外にもあり、グレイ画像を二値化しただけではそれらが“1（白領域）”として残る。次の画像処理ステップでこの中から正確に LED の発光面のみを検出することは困難である。しかしながらフラグ画像は LED の発光面のみが正確に“1”として出力され、LED 発光面以外の不要な領域は“0（黒領域）”に落とされているのが確認できる。このように不要な物体が消え、LED 領域のみしか残されていない画像を用いれば、画像処理で LED 領域を検出することが非常に容易になることは明らかであり、その結果として、高精度かつ高速な LED 検出を実現することができるようになる。

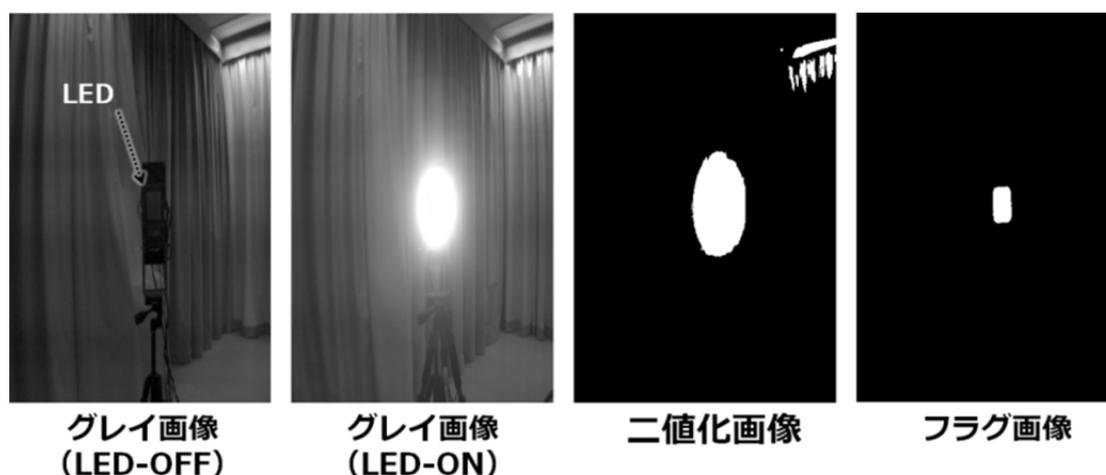


図 3.23 フラグ画像出力結果：屋内

図 3.24 に屋外でカメラ受信機を起動し，フラグ画像を出力した結果を示す．単純な二値化処理では光強度の強い空の領域が残り，この画像の中から画像処理を用いて LED の領域だけを正確に検出することは困難である．それと比較してフラグ画像には検出の妨げとなる空の領域が“0（黒）”に落とされ，LED のみが“1（白）”として出力されている．本結果から，フラグ画像が屋外においても不要な背景領域には反応せず，LED の発光面のみに対応することが確認できた．屋外照明環境下での利用が前提となる自動車応用において，LED 検出にこのフラグ画像を用いることは極めて効果的であるといえる．

本実験によりフラグ画像が正常にカメラ受信機から出力されることを確認し，更に高速かつ正確な LED 検出の実現に極めて大きな貢献ができることを示した．

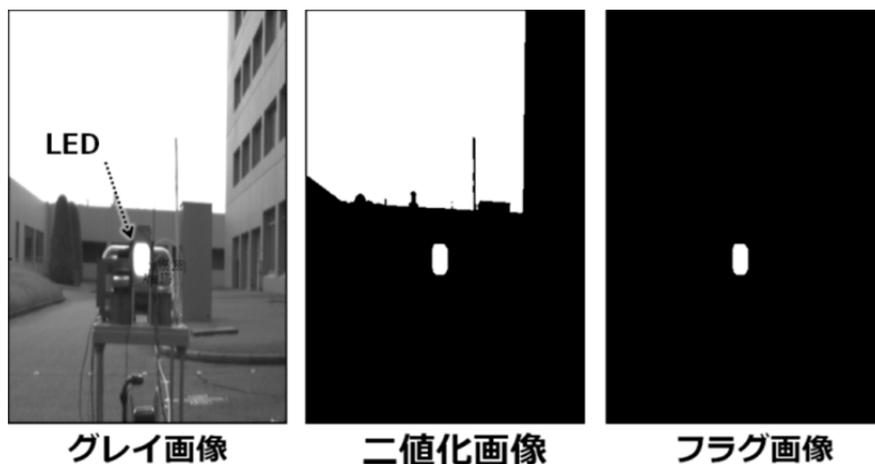


図 3.24 フラグ画像出力結果：屋外

### 3.5 光信号伝送実験

構築した光無線通信システムを用いて光信号の伝送実験を行い，OCI を搭載した本カメラ受信機システムの詳細な受信性能を確認した．

### 3.5.1 10 Mbps の光信号受信

まず、データレート 10 Mbps の最も基本的な光信号の受信実験から実施した。この実験は図 3.25 に示すように LED 送信機とカメラ受信機を固定して行われた。また、純粋な光信号の受信性能を確認するため、LED のリアルタイム追跡機能は稼働させず、LED の座標が一度検出（確定）されたら受信機システム内の LED 検出に関わる全ての回路を停止した。これにより、各種ノイズが受信信号に混入することを防ぐ。LED とカメラの距離は 1 m、照明環境は 350 lx、伝送情報はマンチェスタ符号化されたランダムデータ（PN9）である。受信結果は図 3.18 の RX および EQ ピンをモニタすることで確認した。この実験条件を“基本条件”として以後の実験にも使用する。

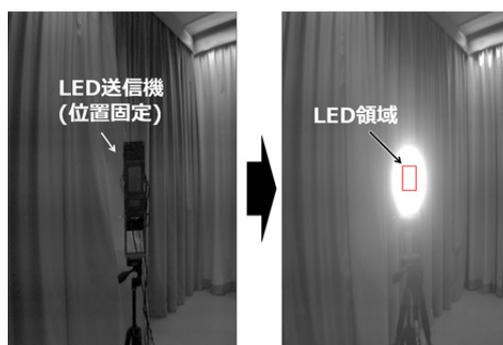


図 3.25 実験状況

図 3.26 に RX ピンをモニタした結果を示す。その結果、LED から送信された光信号がカメラ受信機で受信され、その受信信号がカメラ受信機から十分な振幅強度を持って出力されることを確認した。なお、本受信信号の電圧振幅は、加算アンプによって 9ch の出力電圧が加算されたものであるため、1ch 当たりの出力電圧振幅はこの波形のおおよそ 1/9 となる。

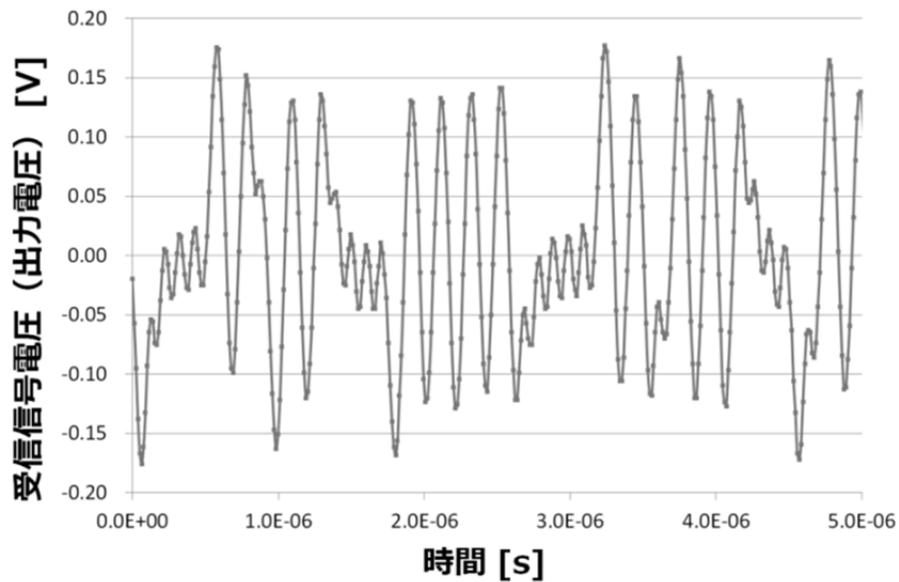
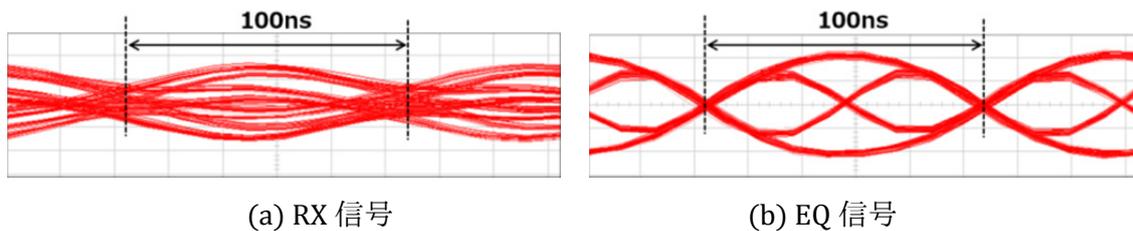


図 3.26 10Mbps の光信号の受信結果

図 3.27 に RX および EQ 出力のアイパターン（時間波形信号を任意の時間で区切って重ね描画したもの。信号品質が高ければ、このパターンの形状が目（アイ）が開いたように見える）を示す。RX 信号は通信画素の特性によって大きく歪んでおり、アイが閉じてしまっていることが確認できる。しかしながらこの歪められた RX は、イコライザによって正しくかつ効果的に補正され、エラーフリー（誤りなし）通信に十分なほどアイが開くことを確認した。



(a) RX 信号

(b) EQ 信号

図 3.27 10Mbps の光信号受信時のアイパターン

### 3.5.2 照明環境が受信性能に与える影響

照明環境の変化が本システムの受信性能に与える影響を調べた。実験条件は、照明環境を除き先の実験の基本条件と同様である。照明環境は 0.04 lx, 350 lx, 10,000 lx, そして高強度の 2 つの光源（ハロゲンランプ）をカメラに対向して配置した逆光環境の 4 種類である。なお、ここでの照度は、LED 送信機に照射されている光を照度計で測定した値である。

図 3.28 に各照明環境におけるグレイ画像および RX と EQ のアイパターンを示す。本結果から、RX と EQ は照明環境の変化による影響をほとんど受けないことが確認され、また西日時などに想定される逆光環境においても同様に影響がないことを確認した。特にこの逆光環境の結果は、ISC の“混信（干渉）フリー”という特徴を示すものである。

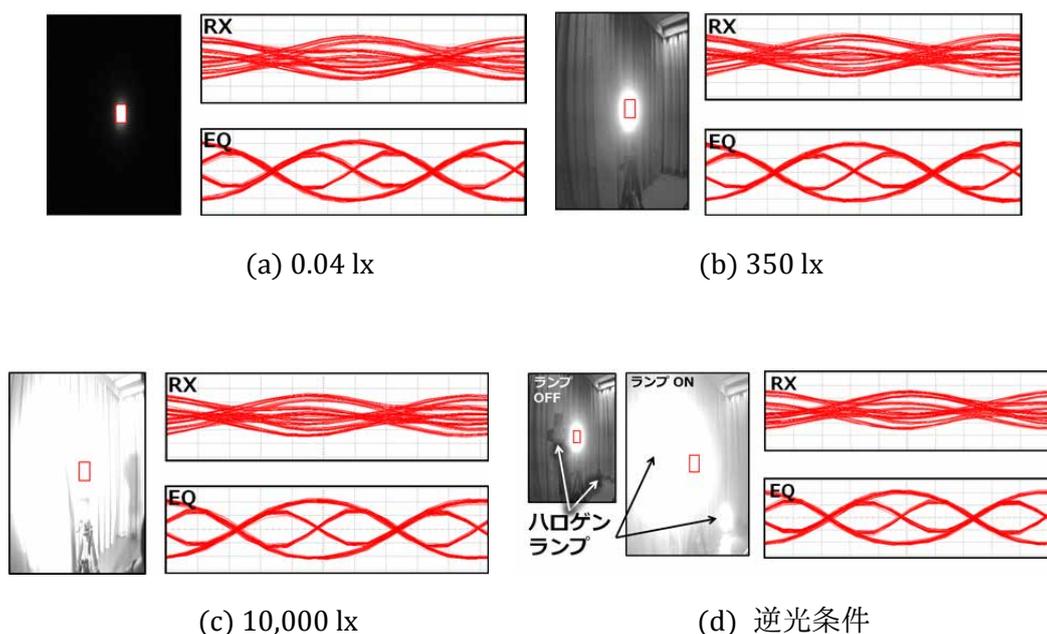


図 3.28 照明環境を変化させたときの光信号の受信結果

### 3.5.3 通信距離が受信性能に与える影響

通信距離の変化が本システムの受信性能に与える影響を調べた。実験条件は通信距離を除き基本条件と同じであり、その通信距離は 0.5, 1.0, 2.0 m の 3 種類である。本実験では室内用に広角レンズ ( $f=4.2$  mm) を用いているため 0.5 m~2.0 m の距離変化でも画像上の LED の結像サイズは大きく変化 (62 画素~15 画素) し、これは例えば  $f=50$  mm のレンズを用いて 6 m~24 m の距離変化実験をしたのと同様である。

図 3.29 に各通信距離におけるグレイ画像および RX と EQ のアイパターンを示す。本結果から、RX と EQ は距離の変化に対してほとんど影響を受けないことが確認された。これは ISC の特徴である“距離変化に対する安定した受信信号強度”を示すものである。

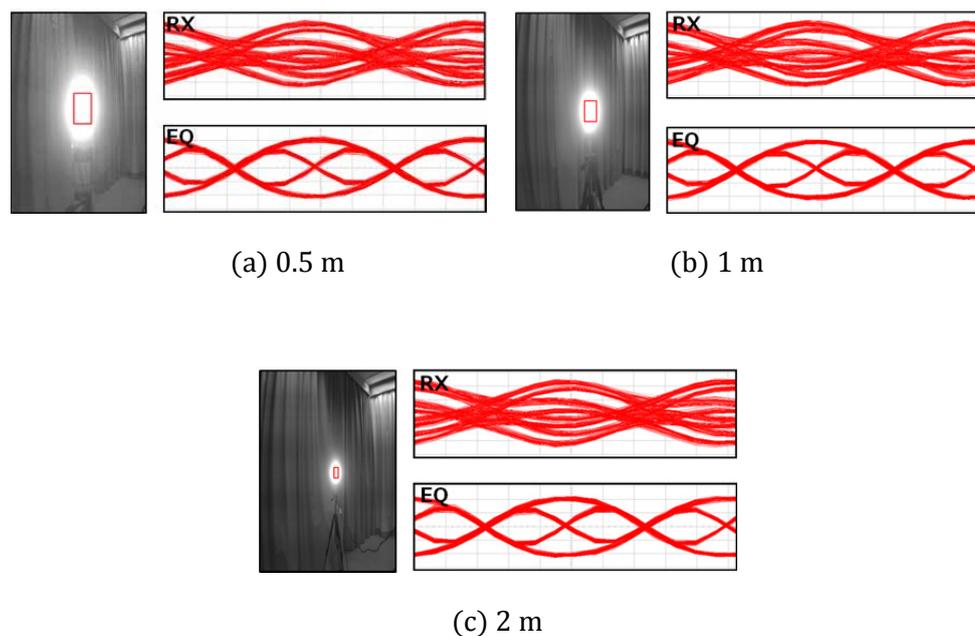


図 3.29 通信距離を変化させたときの光信号の受信結果

図 3.30 は焦点距離 50 mm のレンズを用いて長距離の 10 Mbps の光無線伝送を行った結果である。図 3.30(a)は屋内環境で通信距離が約 10 m のときの EQ 信号であり、(b)は屋外環境で通信距離が約 20 m のときの EQ 信号である。図から分かるように 10 m と 20 m でアイパターンに大きな差異はなく、また図 3.29 と比較してもアイパターンの開

口度に優劣は見受けられない。この実験は、長距離光無線伝送がレンズを変更するだけで容易に行えることを示した。なお、この長距離伝送実験のみ、受信機システムの通信信号用 ADC などが異なる。

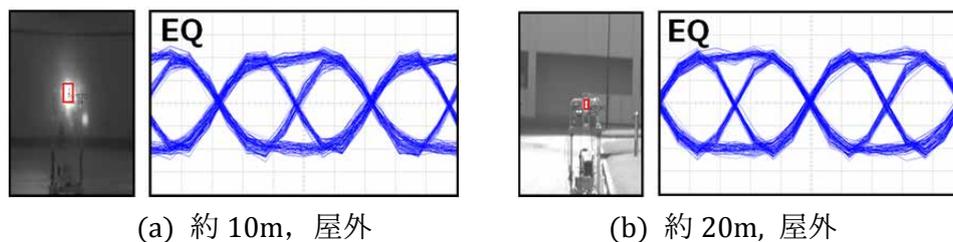


図 3.30 通信距離を長距離にしたときの光信号の受信結果

### 3.5.4 符号誤り率 (BER) の測定

伝送性能を定量的に把握するため、BER の測定を行った。この測定では、本システムで設定可能な 10 Mbps, 15 Mbps, 20 Mbps の全てのデータレートで BER を測定した。また、これまでの実験では LED の検出・追跡機能を停止して実施したが、本測定では LED 追跡機能の動作による BER への影響も確認した。実験条件は、データレートを除いて基本条件に準ずる。また、BER 測定のための伝送データ量は  $10^7$  bit とし、 $10^{-5}$  オーダの BER 特性を確認する。

図 3.31 に LED 追跡機能オフでの各データレートにおける EQ 信号のアイパターンを示す。結果から、10 Mbps および 15 Mbps においてはアイパターンが十分に開くことを確認した。また、20 Mbps についてはアイパターンの開口度は低下するものの、それでも閉じないことを確認した。一方、LED 追跡機能を動作させて光信号を受信した場合には、図 3.32 に示すようにノイズ信号（受信信号波形の重なりから逸脱する波形）が混入することを確認した。前節ですでに明らかにしたように、このノイズは LED 検出機能を動作させたことによって発生する様々な回路ノイズである。10 Mbps および 15 Mbps においてはアイパターンの開口にほとんど影響がないものの、20 Mbps においてはアイパターンの開口部分にノイズ信号が相当入り込んでしまうことを確認した。

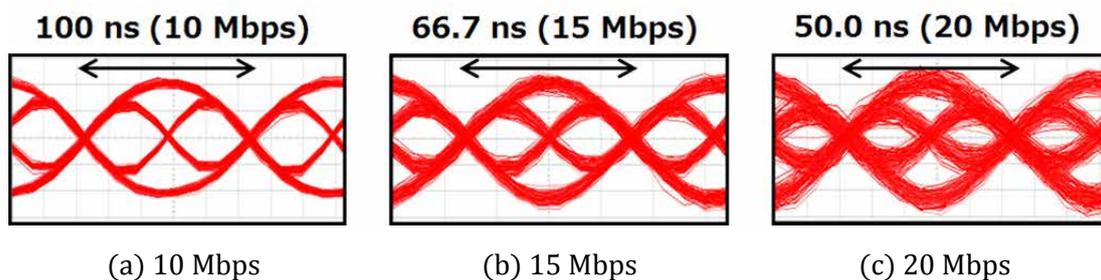


図 3.31 光信号の受信結果：LED 検出機能オフ

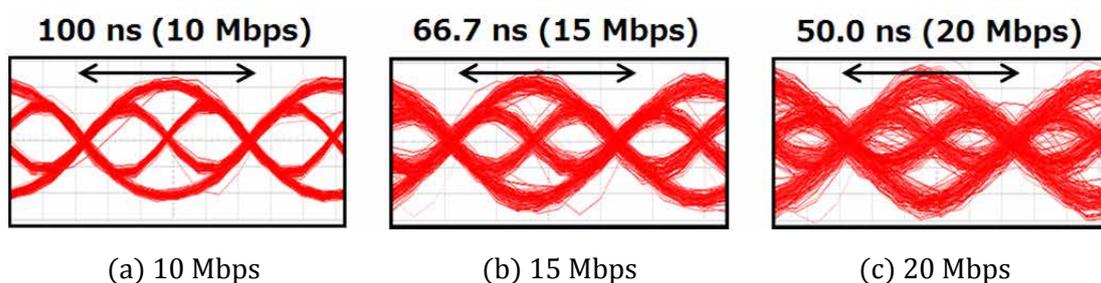


図 3.32 光信号の受信結果：LED 検出機能オン

表 3.5 に BER 測定結果を示す。LED 追跡機能がオフ場合、10 Mbps および 15 Mbps でエラーフリー（誤りなし）通信を確認した。また 20 Mbps においても BER  $10^{-5}$  オーダと、無線型の通信システムとしては良好な結果が得られた。LED 検出を行った場合、10 Mbps ではエラーフリーであったが、15 Mbps および 20 Mbps では受信性能が低下し、それぞれ  $10^{-5}$  オーダおよび  $10^{-3}$  オーダであった。ここで生じたエラーの主な原因は、前節で説明したように画像出力機能の稼働によって生じたノイズである。そのため、このノイズの問題を解決することが今後の性能向上の大きな鍵の一つであるといえる。もしそれが実現されれば、20 Mbps においても  $10^{-5}$  オーダの BER が得られるものと考えられる。

今回の実験により、本システムの純粋な光信号の受信性能は 20 Mbps であることがわかった。また、実際の運用を想定して LED 検出機能を動作させたとき、本システムの受信性能は 15 Mbps であるという結論が得られた。加えて、先のノイズの課題を解決することで、LED 追跡を行いながら 20 Mbps の情報伝送が実現できる見込みが得られた。

表 3.5 BER の測定結果

伝送 レート	LED 追跡なし	LED 追跡あり
10 Mbps	- (0 / $1 \times 10^7$ bit)	- (0 / $1 \times 10^7$ bit)
15 Mbps	- (0 / $1 \times 10^7$ bit)	$6.67 \times 10^{-5}$ (667 / $1 \times 10^7$ bit)
20 Mbps	$6.73 \times 10^{-5}$ (673 / $1 \times 10^7$ bit)	$1.25 \times 10^{-3}$ (12465 / $1 \times 10^7$ bit)

( ) 内は、誤りビット数 / 全送信ビット数

### 3.5.5 座標切り替えによる光信号の受信開始時間

画像内の全く異なる座標から通信リンクを確立したい LED の座標まで指示座標を一気に切り替えた時、受信信号が OCI からどれくらいの時間で出力され始めるかを測定した。これは、LED との通信に成功して次の異なる座標の LED に切り替えた（移動した）瞬間などを想定している。測定条件は基本条件とし、図 3.33 に示すように、座標（179, 236）にある LED 送信機に向かって水平方向から一気に座標を切り替えた場合、垂直方向から切り替えた場合、そして斜め方向から切り替えた場合の 3 種類の出力信号を測定した。

3 種類の切り替えパターンで出力信号を測定した結果を図 3.24 に示す。なお、本グラフは三つの測定結果を座標切り替えの瞬間で合わせ、一つにまとめて比較しやすくしたものである。この結果から、どの切り替えパターンにおいても概ね  $2 \mu\text{s}$  程度という短時間で受信信号の出力が開始され、 $3 \mu\text{s}$  から  $4 \mu\text{s}$  で出力信号が安定することを確認した。

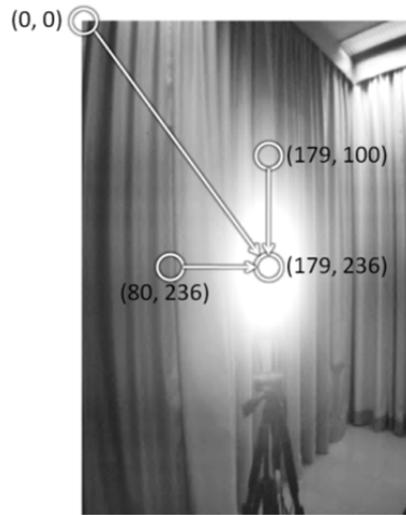


図 3.33 座標の切り替えパターン

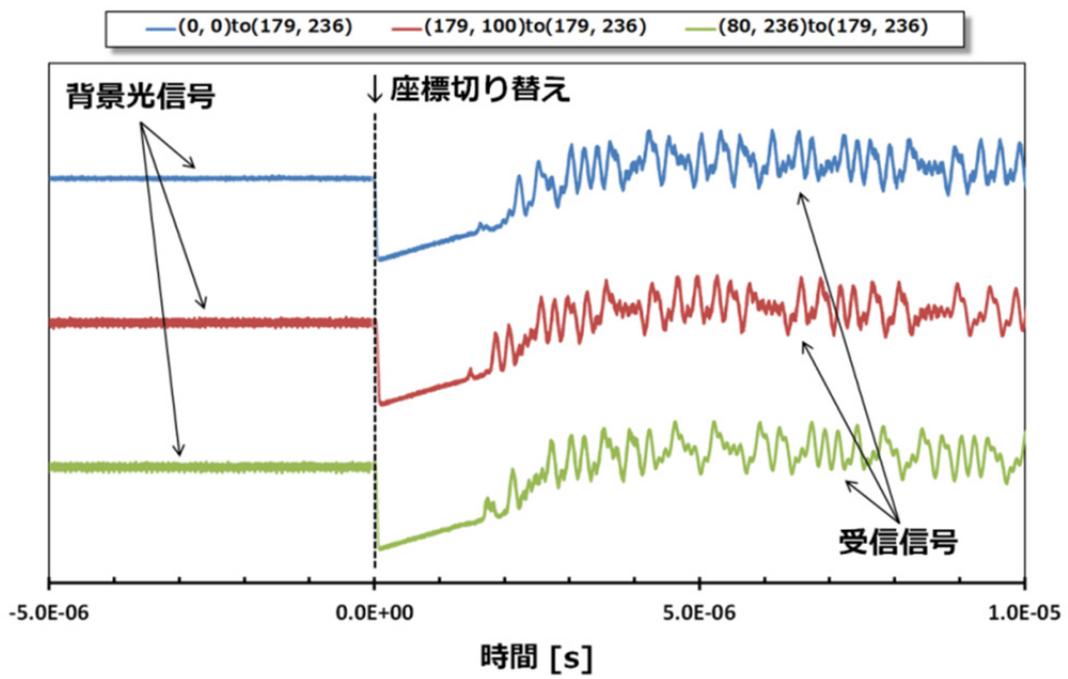


図 3.34 座標切り替えによる光信号の受信開始時間の測定結果

## 3.6 まとめ

LED とイメージセンサを用いた自動車用 ISC システムを実現するために、カメラ受信機に“10Mbps クラスの高速な光信号の受信”と“高精度リアルタイム LED 検出”という二つの乗り越えなければならない大きな課題が与えられた。本章では、この二つの課題を解決するための光通信用機能集積 CMOS イメージセンサ“OCI”の設計と試作を行い、実験により OCI の受信デバイスとしての性能を示した。また、LED 送信機と OCI を搭載したカメラ受信機から成る性能実証用の ISC システムを構築し、様々な実験を通してその性能を示した。

OCI には課題を解決するための二つの新しい技術が搭載された。一つは 10 Mbps クラスの光信号を受信するために設計された通信特化型画素の“CPx”である。そしてもう一つは、画像内から LED を高速かつ正確に検出するために使用する“フラグ画像”の出力機能である。そして、この 2 つの新しい技術を搭載した OCI が設計され、試作された。また、この OCI は特殊なプロセスではなく、制約としていた通常の CMOS イメージセンサのプロセスで実現された。

次に、CPx の直流光特性や周波数特性、時間応答特性を測定し、OCI の受信デバイスとしての基本的な性能を把握した。そしてこれらの諸特性の測定結果を基に、OCI を搭載したカメラ受信機と LED 送信機から成る性能実証用の ISC システムを構築した。LED 送信機システムは 55 MHz の帯域を持ち、10 Mbps, 15 Mbps, 20 Mbps のマンチェスタ符号化された光信号をカメラ受信機に送ることができる。カメラ受信機システムは、OCI から出力されるフラグ画像信号を用いて LED を検出し、CPx を用いて高速な光信号を受信することができる。フラグ画像出力実験の結果、屋内および屋外においても、フラグ画像では LED 以外の不要な物体が“0”に落とされ、LED のみが“1”として現れることを確認した。このフラグ画像により LED しか存在していない画像から LED 検出ができるようになり、16.6 ms 周期というリアルタイム LED 検出を実現した。実際の光信号の受信実験では、10 Mbps の光信号が受信され、CPx の応答特性によって劣化した信号がイコライザによって十分に復元されることを確認した。また、照明環境および距離の変化に対する受信性能への影響を確認した結果、ISC 技術の特徴が示す通り、それらが変化し

でも受信信号は何ら影響を受けないことが確認された。定量的な情報伝送性能を把握するために実施された BER 測定では、LED 検出機能を停止した場合は 15 Mbps までエラーフリーとなることが確認できた。また、LED 検出機能を稼働させた場合でも 10 Mbps の光伝送がエラーフリーで実現できた。これらの実験により、LED 送信機と OCI を搭載したカメラ受信機から成る ISC システムが、“10 Mbps クラスの高速な光信号の受信”と“高精度リアルタイム LED 検出”という大きな課題を克服したことが示された。

## 参考文献

- [1] T. Yamazato, S. Haruyama, "Image Sensor Based Visible Light Communication and Its Application to Pose, Position, and Range Estimations," *IEICE Transactions on Communications*, vol.E97-B, no.9, pp.1759-1765, 2014.
- [2] 中川正雄, "可視光通信の世界," 可視光通信コンソーシアム編, 工業調査会, 2006.
- [3] N. Iizuka, "Image sensor communication –a new way of visible light communication," *Int. Display Workshop 2010*, pp. 2193-2196, 2010.
- [4] 高井勇, 川人祥二, "イメージセンサ通信技術を用いた光車車間通信システム," 信頼性, 日本信頼性学会誌, vol.34, no.8, 2012年11月.
- [5] T. Nagura, T. Yamazato, M. Katayama, T. Yendo, T. Fujii, H. Okada, "Tracking an LED array transmitter for visible light communications in the driving situation," *2010 7th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, pp.765-769, 19-22 Sept. 2010.
- [6] H. B. C. Wook, S. Haruyama, M. Nakagawa, "Visible light communication with LED traffic light using 2-dimensional image sensor," *IEICE Transaction on Fundamentals*, vol.E89-A, no.3, pp.654-659, 2006.
- [7] S. Nishimoto, T. Nagura, T. Yamazato, "Overlay coding for road-to-vehicle visible light communication using LED array and high-speed camera," *2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp.1704-1709, 2011.
- [8] I. Takai, S. Ito, K. Yasutomi, K. Kagawa, M. Andoh, S. Kawahito, "LED and CMOS Image Sensor based Optical Wireless Communication System for Automotive Applications," *IEEE Photonics Journal*, vol.5, no.5, p.6801418, Oct. 2013.
- [9] S. Itoh, I. Takai, Md.S.Z. Sarker, M. Hamai, K. Yasutomi, M. Andoh, S. Kawahito, "A CMOS image sensor for 10Mb/s 70m-range LED-based spatial optical communication," *2010 IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC)*, pp.402-403, 7-11 Feb. 2010.
- [10] 米本和也, "CCD/CMOS イメージ・センサの基礎と応用," CQ 出版社, 2003.
- [11] 相澤清晴, 浜本隆之 編著, "CMOS イメージセンサ," 映像情報メディア学会編, コロナ社, 2012.
- [12] N. Teranishi, A. Kohono, Y. Ishihara, E. Oda, K. Arai, "No image lag Photodiode structure in interline CCD image sensor," *1982 Int. Electron Devices Meeting*, Vol. 28, pp. 324-327, 1982.
- [13] P. P. K. Lee, R. C. Gee, R. M. Guidash, T-H. Lee, E. R. Fossum, "An active pixel sensor

fabricated using CMOS/CCD process technology," Workshop on CCD and AIS, 1995.

- [14] 角南英夫, 川人祥二, "メモリデバイス イメージセンサ," 丸善株式会社, 2009.
- [15] 八木伸行, 井上誠喜, 林正樹, 中須英輔, 三谷公二, 奥井誠人, 鈴木正一, 金次保明, "C 言語で学ぶ実践画像処理," オーム社, 1992 年.
- [16] 三上直樹, "はじめて学ぶデジタルフィルタと高速フーリエ変換," CQ 出版社, 2005.
- [17] 西村芳一, "デジタル信号処理による通信システム設計," CQ 出版社, 2006.

## 第4章 ISC技術の自動車システムへの応用： 光車車間通信システム

### 4.1 はじめに

LED送信機とカメラ受信機を用いた光無線通信（OWC）技術，すなわちイメージセンサ通信（ISC）技術の自動車応用が検討されている[1-5]．応用システムの例として，LED信号機から車載のカメラ受信機に情報を送る路車間（V2I, I2V）通信システムや，車のLEDランプなどから車載カメラ受信機に情報を送る車車間（V2V）通信システムが検討されている．

自動車応用を目指したISCシステムを実現するためには，“高速な光信号の受信”と“高速なLED検出”という二つの大きな課題を克服する必要がある．前章において，これらの課題を解決するための従来にない機能集積CMOSイメージセンサ，すなわち光通信イメージセンサ（OCI）を実現した[6]．更に性能実証用のLED送信機とOCIを搭載したカメラ受信機からなるISCシステムを構築し，高精度リアルタイムLED検出と10 Mbpsを超える光情報伝送の実現に成功した[7]．

本章では本研究の集大成として，車載用のLED送信機とOCIを搭載したカメラ受信機を新たに試作し，それらを実際の2台の車両に搭載して車車間で通信を行う“光車車間通信システム”を構築した結果を示す．そして，様々な実運用条件下での実験，すなわち屋外走行実験を行い，その性能を明らかにした結果を示す[8-9]．

### 4.2 光車車間通信システムの概要

図4.1に本研究で構築を目指すLED送信機とカメラ受信機を用いた光車車間通信シス

システムの概要を示す[10]。本システムは2台の車両で構成され、先行車にLED送信機システム、後続車にOCIを用いたカメラ受信機システムがそれぞれ搭載される。先行車は自身の車両から様々な情報を収集し、それを光信号に載せて周辺を走行する車両、すなわち後続車に送信する。また後続車は先行車から送信された光信号をカメラ受信機で受信し、その受信情報を安全や快適のためのアプリケーションに応用する。

カメラ受信機での光信号の受信手順は、まずカメラ受信機に搭載されたOCIの画像出力機能を用いてグレイ画像とフラグ画像を取得することから始まる。そして、フラグ画像を用いた画像処理により高速かつ正確なLED検出が行われ、OCIに搭載されたCPxがそのLED領域の光の強度変化を光信号として受信する。カメラ受信機システムはこのLED検出から光信号の受信という一連の動作を実時間(リアルタイム)で繰り返し、継続的に先行車との通信リンクを確立する。

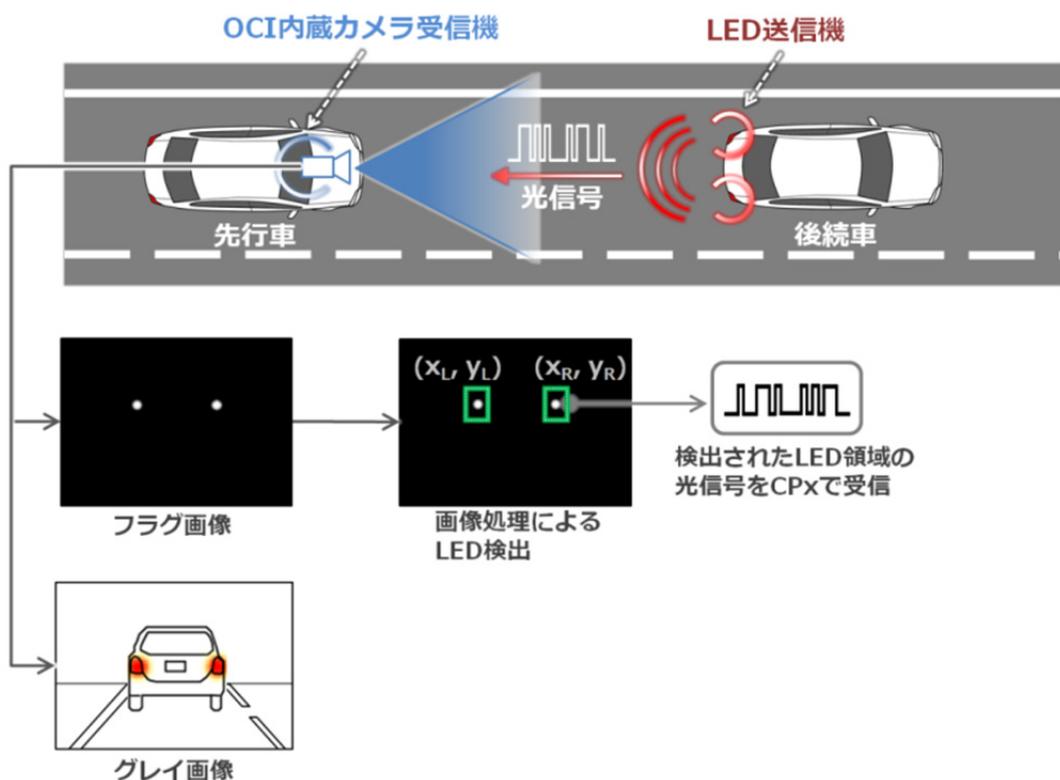


図 4.1 光車車間通信システムの概要

本システムでは、カメラ受信機で取得したグレイ画像は表示以外の目的では使用されていない。しかしながら、無論、このグレイ画像は白線検出や歩行者検出などの従来からある画像処理を用いた安全システムのために用いることができる。つまりこれは、光無線通信のためのカメラと画像処理システムのためのカメラが将来的には融合できることを意味する。

### 4.3 車載用 LED 送信機およびカメラ受信機システム

ここでは、光車車間通信システムを実現するための LED 送信機システムとカメラ受信機システム、および情報伝送のための通信仕様（通信フォーマット）について詳説する。

図 4.2 に試作した LED 送信機システムの外観と構成を示す。この送信システムは主に LED アレイ部と PC を含むコントローラ部で構成される。表 4.1 および表 4.2 に、コントローラ部と LED アレイ部の主な設計仕様を示す。コントローラ部は光信号に乗せるための各種データを車両から収集し、そしてパケット化と符号化を行う。LED アレイ部には  $10 \times 10$  個の LED が搭載され、最大 4 W の光出力で光信号が送信される。使用された LED は、前章の性能実証用の ISC システムと同様に高速動作が可能な近赤外 LED（遮断周波数 55 MHz、発光波長 870 nm）である。

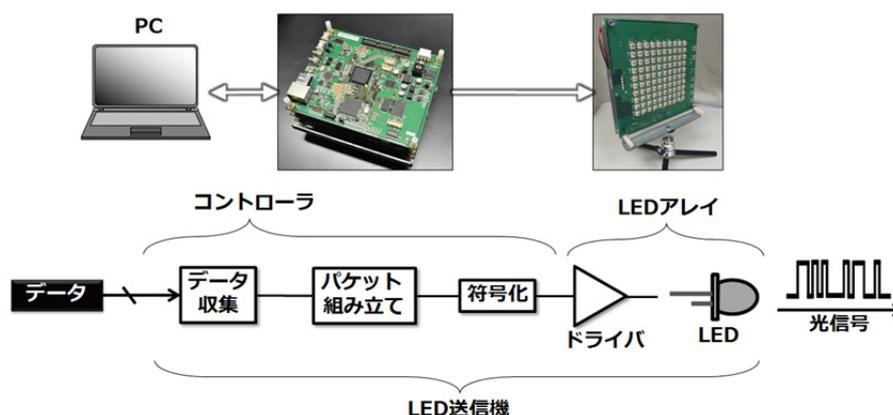


図 4.2 LED 送信機システムの外観とシステムブロック図

表 4.1 コントローラ部の主な設計仕様

OS	μITRON
I/F (⇔車両)	専用ケーブル (12V Digital など)
I/F (⇔LED アレイ部)	専用ケーブル (3.3 V Digital)
I/F (⇔PC)	USB 2.0, イーサネット
電源電圧	5 V
基板外形	150 mm (H) × 120 mm (V)

表 4.2 LED アレイ部の主な設計仕様

LED 数	10 × 10 個
LED アレイサイズ	10 cm × 10 cm
最大光出力	約 4 W
ピーク発光波長	870 nm
半値放射角	±20 deg.
遮断周波数	55 MHz
電源電圧	9 V
LED 消費電力	約 15 W
基板外形	150 mm (H) × 150 mm (V)

図 4.3 に PC を含むカメラ受信機システムの外観と構成を示し、表 4.3 に本システムの設計仕様を示す。使用したレンズの焦点距離  $f$  は 12.5 mm、この焦点距離と OCI の画素アレイサイズから算出された画角（通信角）は 22 度（水平）× 16 度（垂直）である。光学フィルタは使用していないため、可視光から近赤外までの光信号が受信可能である。本システムでは、OCI から出力されたグレイ画像とフラグ画像の信号はそれぞれフレームメモリに蓄積され、最大 16.6 ms 周期（60 fps）でそれぞれの画像が完成する。完成したグレイ画像とフラグ画像は PC モニタに表示出力され、更にフラグ画像は LED 検出器に送られ、画像処理によって最大 16.6 ms 周期で LED 領域の検出が行われる。そして、LED 検出によって得られた LED 領域の中心座標  $(x, y)$  が OCI に送られ、前章で説明した手順で通信画素が選択される。続いて、選択された通信画素で受信した光信号

が OCI から出力され、80 MSPS の ADC によってデジタル変換された後、イコライザ（33 タップ、FIR フィルタ）で等化処理される。そして、等化した信号を復号し、更にパケット分解して受信データを取り出す。最終的に得られた受信データは、PC に搭載された表示ソフトウェアによってモニタ上に表示される。

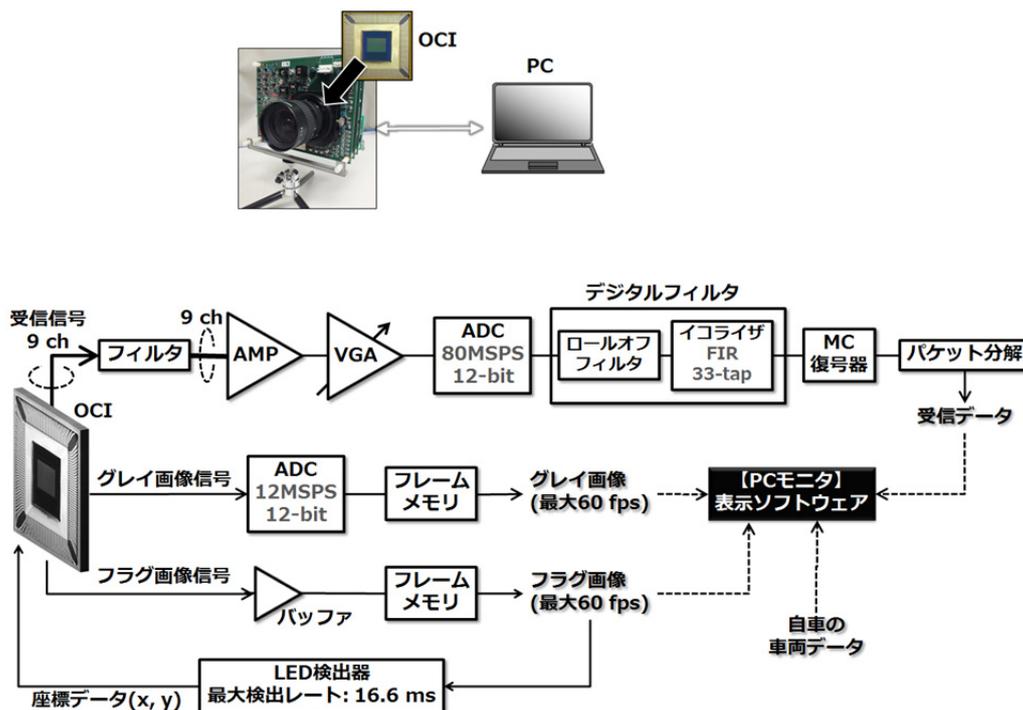


図 4.3 カメラ受信機システムの外観と構成

表 4.3 カメラ受信機システムの設計仕様

OS	μITRON
搭載イメージセンサ	OCI
レンズ	$f = 12.5 \text{ mm}$ , $F_N = 1.4$ , 光学フィルタなし
画角（通信角）	22 (H) × 16 (V) deg.
ADC（通信信号用）	80 MSPS, 12-bit
ADC（グレイ画像信号用）	12 MSPS, 12-bit
I/F（⇔車両）	専用ケーブル（12V Digital など）
I/F（⇔PC）	USB 2.0, イーサネット
電源電圧	5 V
基板外形	150 mm (H) × 120 mm (V)

表 4.4 および図 4.4 に通信仕様とパケット構造を示す。符号化方式はマンチェスタ符号化とし、データレートは 10 Mbps とした。また、バースト誤り対策のために、ペイロードデータのブロックインターリービングが行われる。更にランダム誤り（エラー）対策のために、マンチェスタ符号化された信号に BCH 符号化[11, 12]がかけられる。本システムでは 1 ビットおよび 3 ビットのエラー訂正が可能な 2 種類の BCH 符号が用意された。パケットは、32 ビットのプリアンブル、32 ビットのユニークワード、2392 ビットのペイロード、8 ビットのポストアンブルで構成され、約 0.5 ms 周期で LED 送信機から送信される。ただし、BCH 符号化を行うと正味のペーロードサイズは小さくなり、1 ビット訂正では約 2164 ビット、3 ビット訂正では約 1708 ビットになる。なお、この仕様は規格化されたものではなく、我々がシステムの性能を確認するために独自に設定したものである。

表 4.4 通信方式の仕様

符号化方式	マンチェスタ符号
データレート	10 Mbps
パケット送信周期	約 0.5 ms
誤り対策（バースト誤り）	ブロックインターリービング
誤り対策（ランダム誤り）	BCH 符号化 <ul style="list-style-type: none"> <li>－ 1 ビット誤り訂正</li> <li>－ 3 ビット誤り訂正</li> </ul>

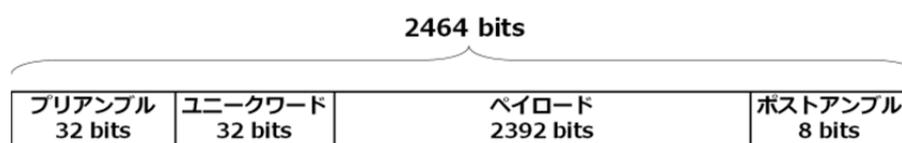


図 4.4 パケット構造

図 4.5 に複数の光源（例として複数の LED と太陽）が検出されたときの各領域の選択手順を示す。LED 検出の結果、複数の LED 領域が検出された場合、まず受信システムは A, B, C, D, E といったように各領域にラベル付けを行う。続いて、受信システムはラベル付けされた領域（通信対象）を一つ一つ順番に選択していき、光信号の受信を

試みる。例えば、まず初めに  $A(x_1, y_1)$  の領域を選択し、A からの光信号が正常に受信できたら、次の対象として  $B(x_2, y_2)$  を選択し、B からの光信号を受信する。そして、ラベル付けをされた最後の領域の光信号の受信が完了したら、一番初めに選択した領域を再度選択し、その光信号を受信する。このループ動作は、次フレームのフラグ画像から新しい領域座標が得られるまで繰り返される。もし領域を選択しても一定時間内にパケットが受信できなければ、それらは太陽や街灯などの情報を持っていない不要な光源と判断し、スキップする。例えば図中の領域 E は、一定時間経った後に飛ばされ、領域 A が選択される。

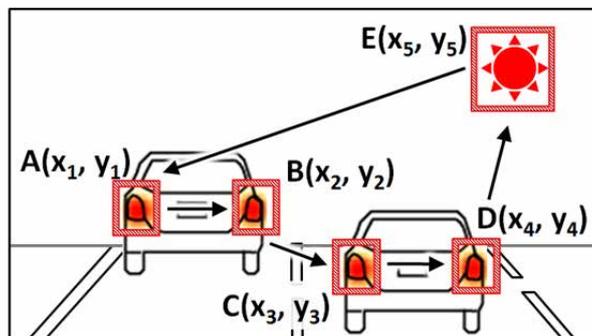


図 4.5 複数の光源が検出されたときの選択手順

## 4.4 光車車間通信システムの構築

図 4.6 に試作した LED 送信システムとカメラ受信システムから成る光車車間通信システムの概要を示す。先行車は車両後方左右に 2 つの LED アレイを、そして PC を含むコントローラ、前方視界カメラを持つ。前方視界カメラは先行車が見ている前方風景を撮影し、それを“先行車視点画像”として後続車に伝送するために設置されている。コントローラは車両の各種内部データ（車両データ）および先行車視点画像を収集し、LED アレイをドライブしてそれらのデータを後続車に送る。本システムでの車両データは車両 ID、左右どちらの LED アレイかを識別する LED ID、車速、各種車両装置の動作状態（ブレーキ、ハザード、ライト、左右ウインカなどの On-Off 状態）、そして左右 LED アレイ

間の取り付け距離である。左右の LED アレイからは LED ID 以外は同じ情報が送信される。

本システムでは先行車視点画像の形式を 320 × 240 (QVGA サイズ) のカラーとし、撮影後、画像は JPEG 形式に圧縮される。前方視界カメラの最大出力フレームレートは 20 fps であるが、照明環境によって自動で調整される露光時間によって変動する。また、JPEG 圧縮後の画像サイズも一定ではないため、露光時間と画像サイズによって送信される先行車視点画像のフレームレートは変化する。予備実験によれば、平均送信フレームレートは昼間の照明環境下で約 15 fps、夜間の環境下で約 10 fps であった。1 枚の先行車視点画像はパケットのペイロードよりサイズが大きいため、分割され、複数のパケットを用いて送られる。

後続車にはカメラ受信機と PC が搭載され、カメラ受信機は光信号を受信すると共に、自車の車両内部データを収集する。そして、受信データと自車データは PC に送られ、PC 上で解析と表示がされる。

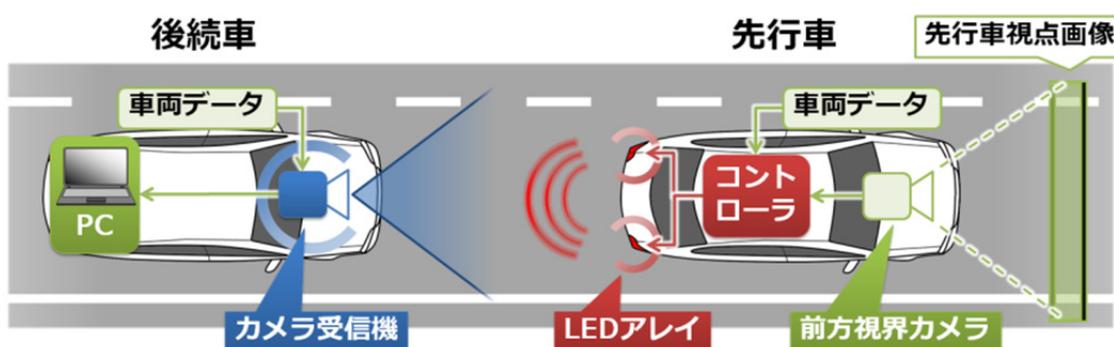


図 4.6 LED 送信機システムとカメラ受信機システムによる光車車間通信システム

更に後続車の PC 上では、取得した受信データやフラグ画像を使用して、新たな情報を算出する。1 つは 2 台の車両間の相対速度であり、これは受信した先行車の車速と自車の車速の差で容易に算出される。2 つ目は車間距離であり、受信した左右 LED アレイの取り付け距離とフラグ画像を用いて算出される。算出式および算出方法を式(4.1)および図 4.7 に示す。ここで、 $D$  は左右 LED アレイの取り付け距離、 $f$  はレンズの焦点距離、 $n$  は画像上での左右 LED アレイ間の距離、 $a$  は画像画素のサイズである。 $D$  は先

行車から送られ、 $f$ と $a$ は既知の値（本システムではそれぞれ 12.5 mm と 7.5  $\mu\text{m}$ ）である。 $n$ はフラグ画像から簡単な画像処理を用いて求めることができる。

$$L = \frac{f}{n \cdot a} D \text{ [m]} \dots (4.1)$$

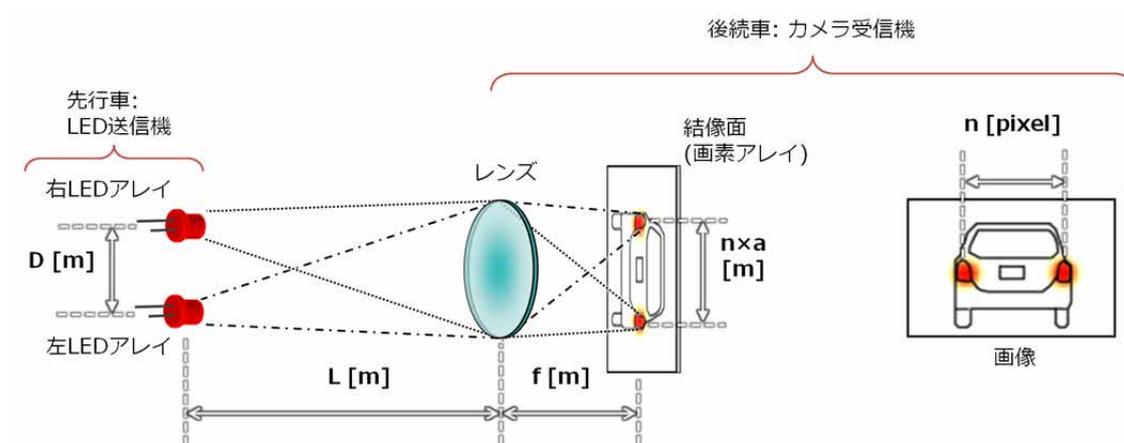


図 4.7 車間距離の算出方法

図 4.8 に構築した光車車間通信システムの外観写真を示す。LED アレイは先行車のリアウインドウの左右に取り付けられ、前方視界カメラは先行車のダッシュボード上に取り付けられている。また、カメラ受信機は後続車の屋根に設置されている。



図 4.8 光車車間通信システムの外観

## 4.5 走行実験

構築した光車車間通信システムの性能および有用性を確認するための実験を行う。ここの実験は実応用（実運用）を想定し、全て屋外かつ走行状態で行われる。また、本実験は昼間から夜間にかけて実施され、照明条件は屋外であるため制御下になく、常に大きく変化する。最大車速は 25 km/h とし、各車の車速と車間距離は運転者によって適宜自由に調整される。実験走路はアスファルト路で、完全な平坦路ではない。また、走行軌跡（走行ルート）は実験ごとに異なる。従って本走行実験は、多くの実験条件が常に変化する中で実施されることをここで前置きする。

### 4.5.1 LED 検出実験

様々な屋外照明環境下におけるフラグ画像を用いた LED 検出の結果を図 4.9(a)から (h)に示す。各結果画像内の左側の画像はグレイ画像、右側はフラグ画像である。LED 領域の検出結果は、両画像内に矩形（緑色）で表示されている。なお、本実験ではフラグ画像内の微小領域はノイズと判断して検出しない（矩形表示しない）。

図 4.9(a)および(b)は、先行車に取り付けられた LED アレイを昼間の照明環境下で検出した結果である。グレイ画像には LED 以外の多くの不要な物体が存在しているが、フラグ画像ではそれらが効果的に排除され、LED 領域のみが極めて忠実に出力（白領域）されている。これは、例えばグレイ画像上で非常に明るく見えている物体でも、それらの実際の光強度は LED と比較して明確に区別できるほど差がある（弱い）ことを示している。そして、出力されたフラグ画像に対して検出処理を行った結果、正確に LED 領域のみが検出されることを確認した。(c)は西日に向かって走行している厳しい照明環境下であり、グレイ画像には飽和するほど明るい領域が無数に存在している。しかしながらフラグ画像にはそれらの不要な物体は一切現れず、LED 領域のみが正確に検出されている。(d)は夜間に走行した結果である。夜間はグレイ画像を見ても分かるように不

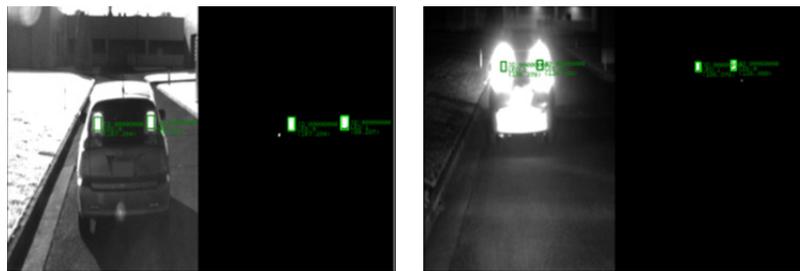
要な物体が昼間と比べてほとんど存在しないため、比較的検出が容易な環境条件である。そして、LED 領域が夜間においても誤りなく検出されることを確認した。(e)および(f)は西日時に太陽光が先行車の車体後部で直接反射してカメラ受信機に入射しており、想定される最も厳しい照明環境条件の一つである。この場合、LED 領域が正確に検出されているが、それと同時に反射された太陽の領域を誤検出している。このフラグ画像を用いた LED 検出手法は送信機の LED アレイだけではなく、それ同程度またはそれを超える光強度を持つ物体にも反応する。しかしながら、フラグ画像に反応してしまうこれらの領域は小さい上、すでに説明したようにデータを持っていないこれらの領域は、これ以降の処理でスキップされるため、本システムの通信性能に与える影響は小さい。(g)および(h)は右ウインカやブレーキランプが点灯したときの結果であるが、これらの領域も LED や電球などの光源であるため強い光強度を持ち、LED アレイと同様に検出されている。しかしながらこれらも、先の太陽光の領域と同様に小さく、後処理の過程でスキップされるため影響はほとんどない。

フラグ画像を用いた本 LED 検出手法は、グレイ画像から検出していた従来の手法と比較して大幅な検出性能の向上を果たし、屋外環境においても高精度かつ高速に動作することを確認した。



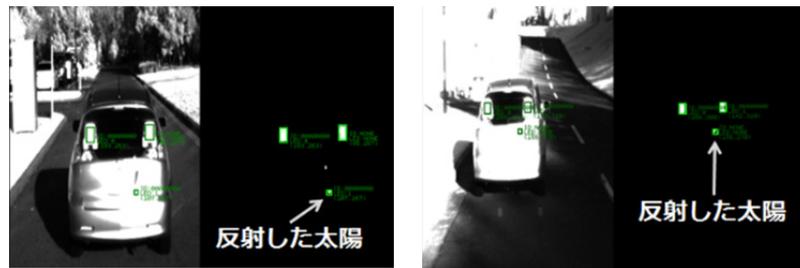
(a)昼間

(b)昼間



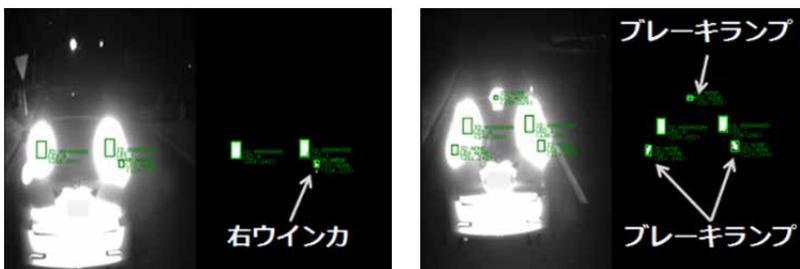
(c)西日

(d)夜間



(e)西日：太陽光の反射

(f)西日：太陽光の反射



(g)夜間

(h)夜間

図 4.9 フラグ画像を用いた LED アレイの検出結果

## 4.5.2 パケット到達率の測定

表 4.5 にパケット到達率 (PAR: Packet Arrival Rate) を測定した結果を示す。PAR は通信システムの性能を示す基本的な指標の一つであり、受信パケット数/送信パケットで算出される。この PAR が低く、そもそもパケットが到達しなければ、いくら受信機に誤り訂正や等化処理などを実装しても意味がないことになる。従って、この PAR は基本的であると同時に、最も重要な性能指標である。なお、本測定での受信パケット数は、受信機がパケット内のプリアンブルとポストアンブルの両方を正しく捕まえることができた場合にカウントされ、ペイロード内のビットの誤りは加味しない。

測定の結果、送信された 138,571 パケットの内、126,074 パケットが正常に受信され、従って PAR は 91.0 % と良好な結果が得られた。本測定により、本システムが複雑な通信プロトコルや通信手続きなどを用いることなく、屋外走行環境においても通信リンクを必要十分に確立できることを確認した。

表 4.5 PAR の測定結果

送信パケット数	受信パケット数	PAR [%]
138,571	126,074	91.0

次に約 9 % のパケット損失 (パケット未到達) が発生した原因を突き止めるため、時間ごとの PAR の変動を確認した。図 4.10 に 5 秒ごとに 100 秒間、PAR を測定した結果を示す。図に示されるように、PAR が時折大きく悪化し、最低値で約 38 % を記録していることが確認できる。これは 5 秒の間に一時的に通信リンクが切断されたと判断できる。この PAR が悪化した (リンクが切断された) 瞬間のグレイ画像を確認すると、図 4.11 に示すように車両が道路の凹凸により大きくピッチング (縦揺れ) していることがわかった。前述したように、本システムは最大約 16.6 ms (60 fps) 周期でフラグ画像から LED を検出し、追従できる。しかしながらこの図が示すように、1 フレームの間に LED が元の位置から完全に外れてしまうほど大きく移動すると、追従が間に合わず、パケットの受信に失敗する。本実験は、車両のピッチングがパケット損失の主たる

原因の一つであることを突き止めると共に、車載応用において 16.6 ms の検出周期では対応できない場合があることを明らかにした。従って、LED 検出周期、すなわちフラグ画像の出力周期の向上などが今後のシステムの課題の一つである。

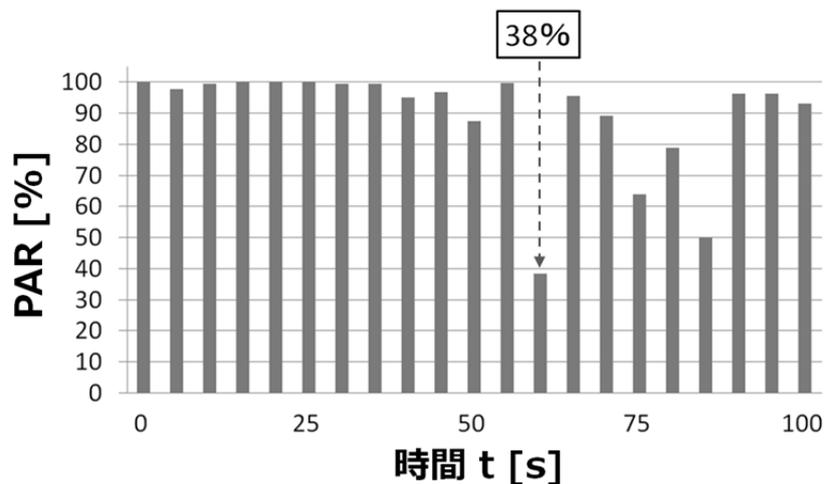


図 4.10 5 秒ごとの PAR 測定結果

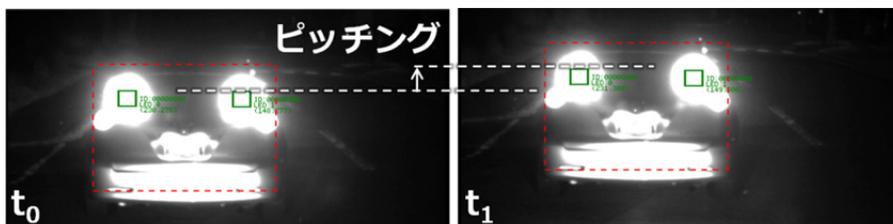


図 4.11 車両ピッチングの瞬間

### 4.5.3 符号誤り率の測定

誤り訂正のための BCH 符号のパラメータを決定するため、符号誤り率 (BER: Bit Error Rate) を測定した。この測定では、到達パケットのペイロード内のビットに誤りがあったとき、表中の“エラービット数”をカウントアップした。BCH 符号のパラメータは、符号化なし、1 ビット誤り訂正、3 ビット誤り訂正の 3 種類である。なお、各パラメータ

における測定時の実験条件（照明環境や走行ルート，車速など）は，同一ではない．結果を表 4.6 に示す．測定の結果から，3 ビット誤り訂正の BCH 符号を設定すれば，エラーフリーとなることが分かった．これにより，以後の実験にはこの 3 ビット誤り訂正を使用する．

表 4.6 BER の測定結果

BCH 符号	BER	エラービット数 / 受信ビット数
符号化なし	$1.14 \times 10^{-4}$	3,767 / 33,017,728
1 ビットエラー訂正	$1.94 \times 10^{-6}$	41 / 21,093,600
3 ビットエラー訂正	-	0 / 26,333,888

#### 4.5.4 車両内部データおよび画像データの伝送実験

これまでに構築した光車車間通信システムを用いて，車両内部データおよび画像データの伝送実験を実施した．昼間および夜間に実施した実験の結果を図 4.12 から図 4.14 に示す．なお，これらの図は後続車に設置された PC の受信データ表示ソフトウェアのスクリーンショット画像であり，そこに説明のための種々のキャプションが付け加えられている．この受信データ表示ソフトウェアには，「グレイ画像および LED 検出結果」，「受信した先行車の車速」，「後続車（自車）の車速」，「受信した先行車視点画像」，「各種車両装置の動作状況（ブレーキ，左ウインカ，右ウインカ，ハザード，ヘッドライト）」，そして算出した「相対速度」や「車間距離」などが表示されている．

図 4.12 では，「先行車の車速」の受信に成功し，図中左上に 12.6 km/h と表示されている．また，この時に自車で収集した「後続車の車速」は 14.0 km/h であると表示されている．「受信した先行車視点画像」は図中左下に表示されており，QVGA サイズのカラー画像を正常に受信できることを確認した．図中右下の「各種車両装置の動作状況」では，先行車のブレーキが作動しているという情報の受信に成功し，赤い矩形で表示されている．この時，同時に後続車のブレーキも作動していることが示されている．また，先行車の車速の受信成功により相対速度（1.4 km/h）が算出され，更に LED アレイ設

置間隔の受信成功により車間距離（7.781 m）が算出されている。

図 4.13 も同様に昼間の実験の結果であるが、各種車両データおよび画像データの受信に成功していることが確認された。またこの結果では、先行車のみがブレーキを作動させており、後続車がブレーキを作動させていないため危険であると判断し、赤枠で警告表示すると共に警報が鳴ることを確認した。

図 4.14 は夜間の実験結果であり、先行車のブレーキ、右ウインカ、ヘッドライトが作動していることを後続車に伝えることに成功している。また、この時も先行車のみがブレーキを作動させているため、危険と判断して注意喚起されることを確認した。

本実験は、我々の構築した光車車間通信システムが屋外走行条件下においても高速に光情報を伝送し、種々の車両データと画像データを伝える能力があることを示した。

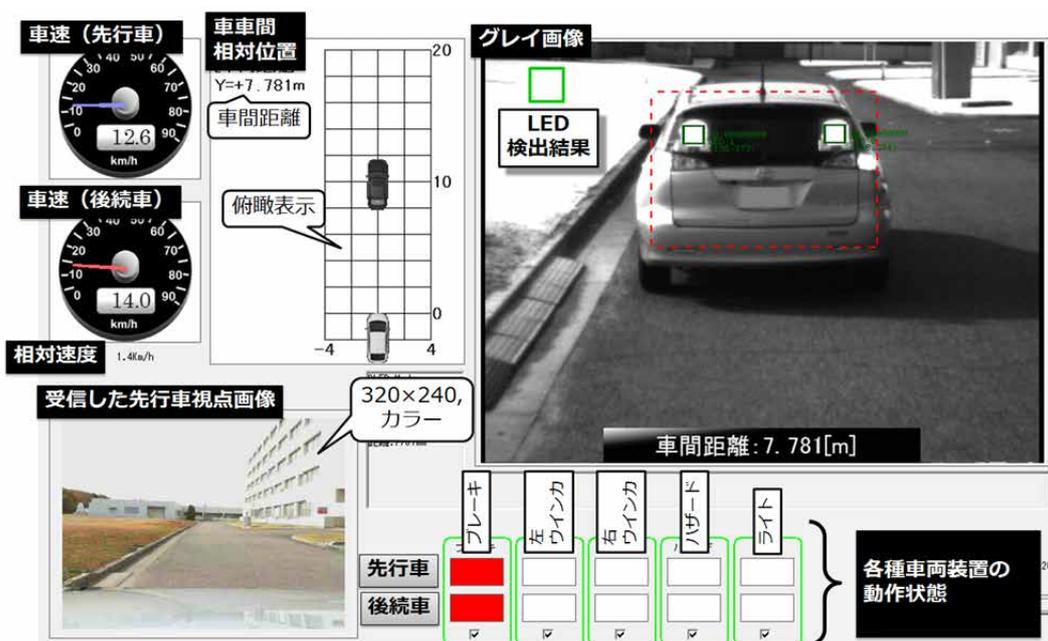


図 4.12 車両内部データと画像データの受信結果：昼間 1

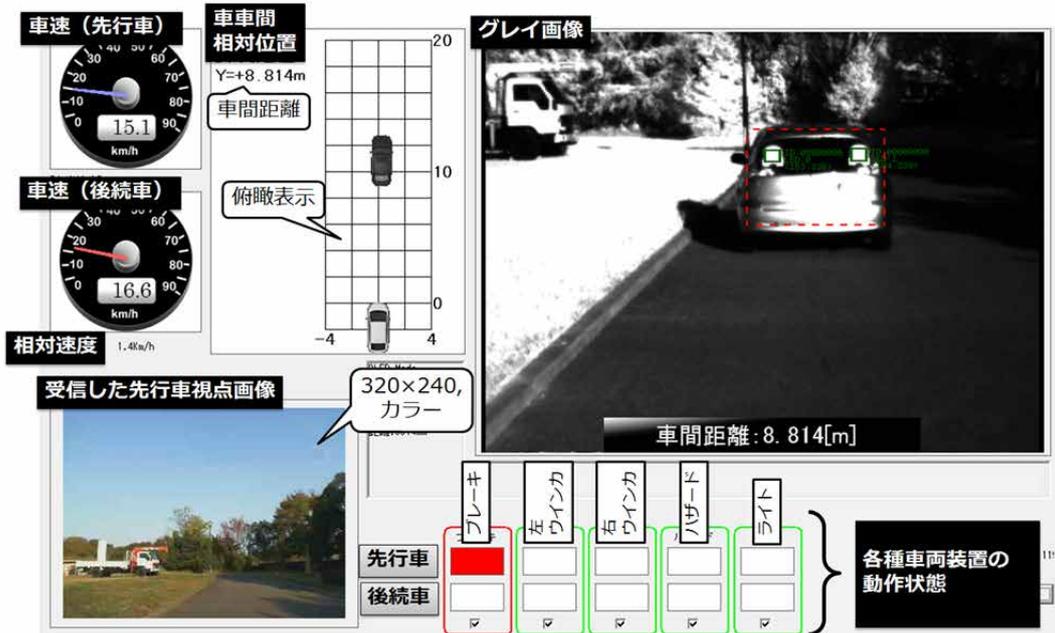


図 4.13 車両データと画像データの受信結果：昼間 2

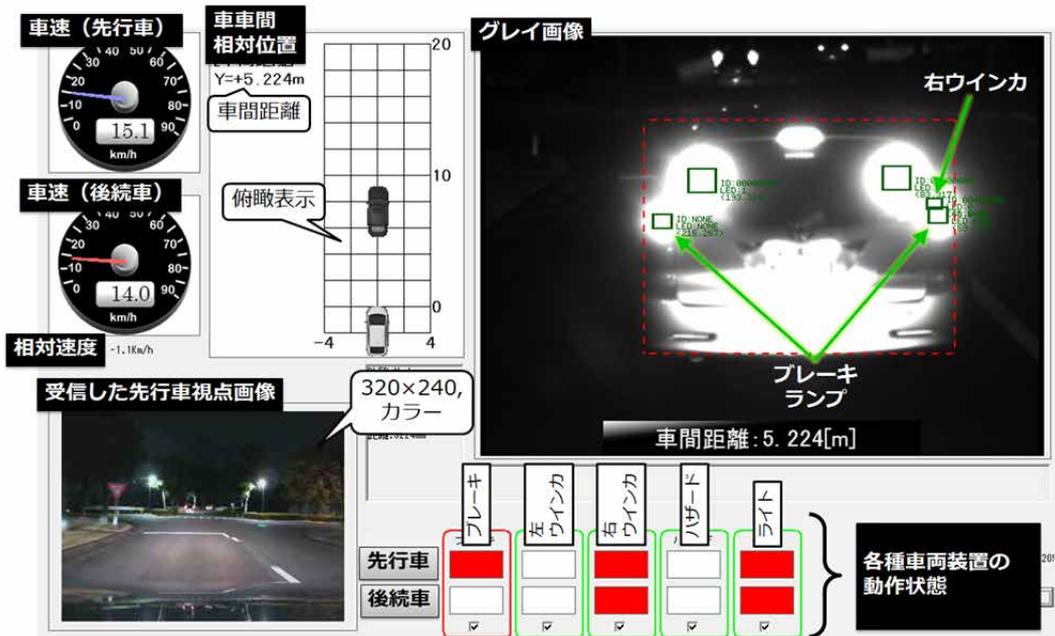


図 4.14 車両データと画像データの受信結果：夜間

図 4.15 は約 50 秒間、車間距離  $L$  を連続的に測定した結果である。本測定結果は、追加的なデバイスや複雑な信号処理技術と用いることなく、光通信システムが測距機能

を獲得できることを示した。

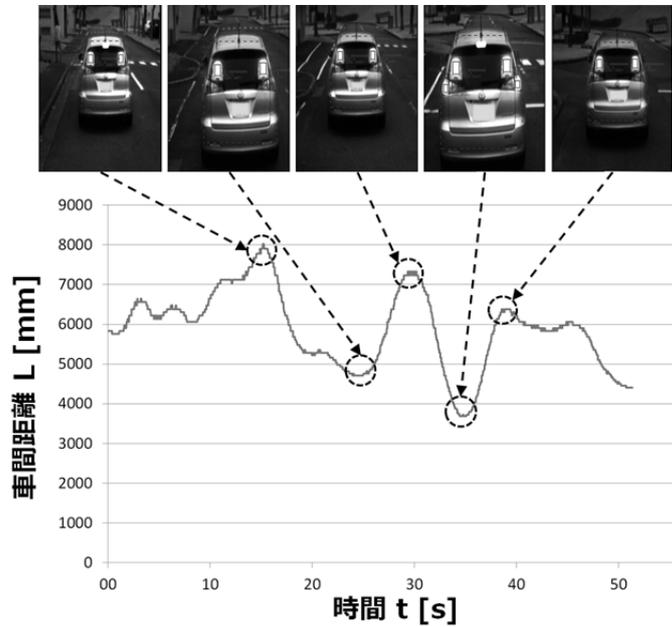


図 4.15 車間距離 L の測定結果 (50 秒間)

図 4.16 は先行車からしか見えない人 (歩行者等) が前方に存在する場合の例である。このように後続車には見えていない人や危険を, 先行車からの画像送信により事前に察知することが可能になる。

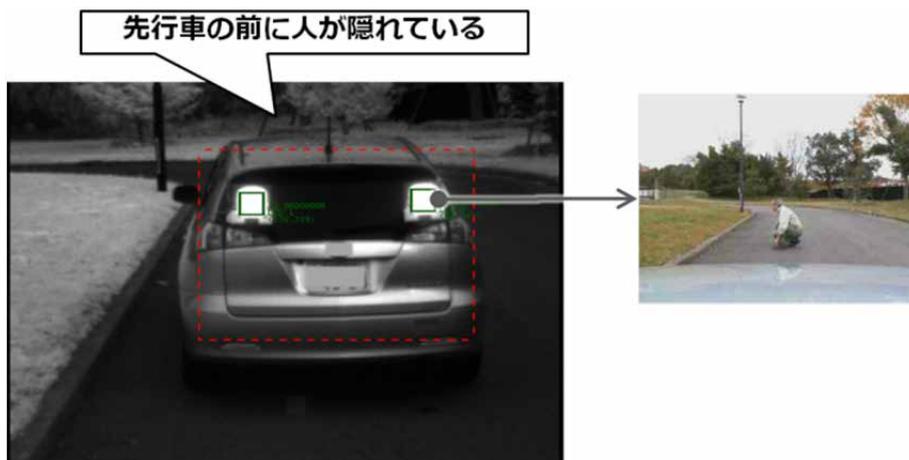
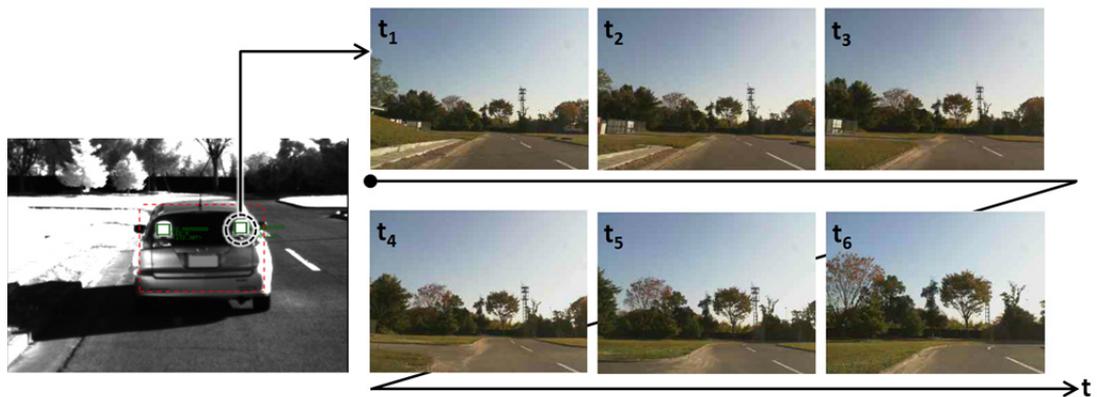
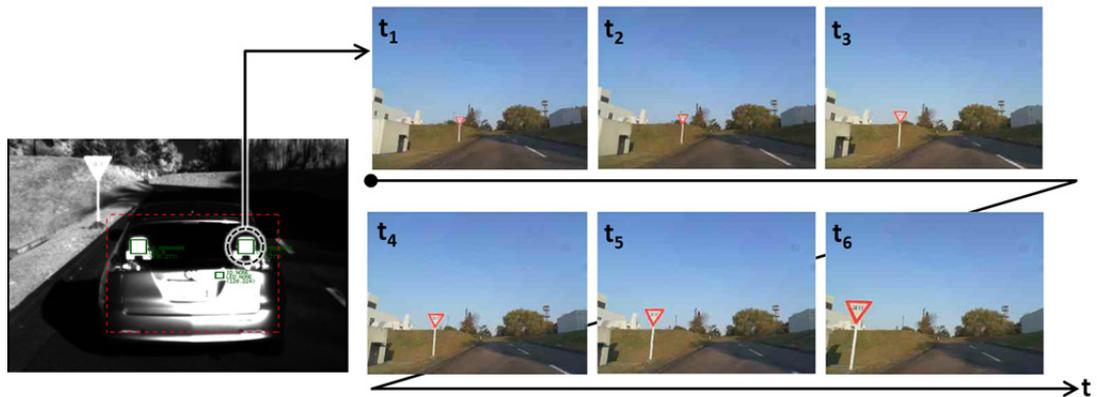


図 4.16 後続車から見えない人物がいる場合の例

図 4.17 および図 4.18 は、昼間と夜間において先行車視点画像を連続的に受信した結果の一例である。図 4.17 は昼間の受信結果であり、特に(b)は車体に太陽が反射している悪条件での受信であるが、正常に画像が受信されている。また、図 4.18 は夜間の受信結果であり、こちらも昼間と同様に問題なく画像が受信されている。本結果から、連続的な画像データ、すなわちビデオデータが照明環境に依らず受信されることを確認した。

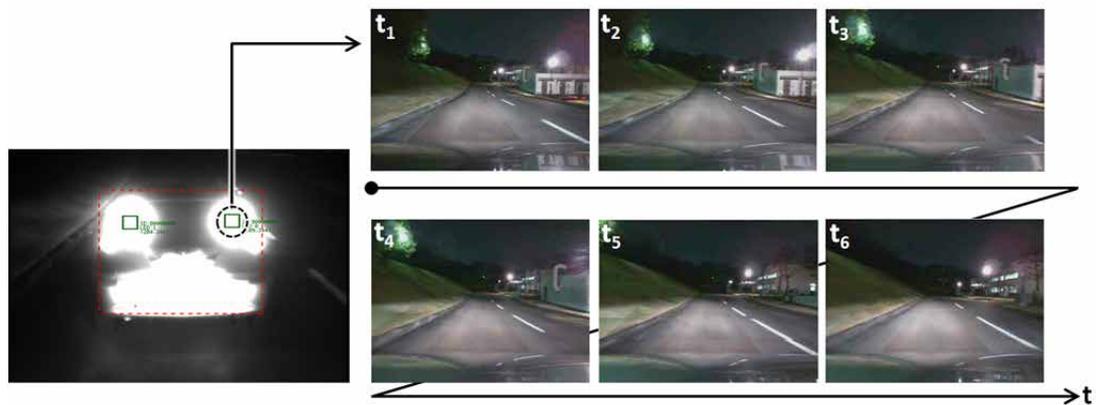


(a)

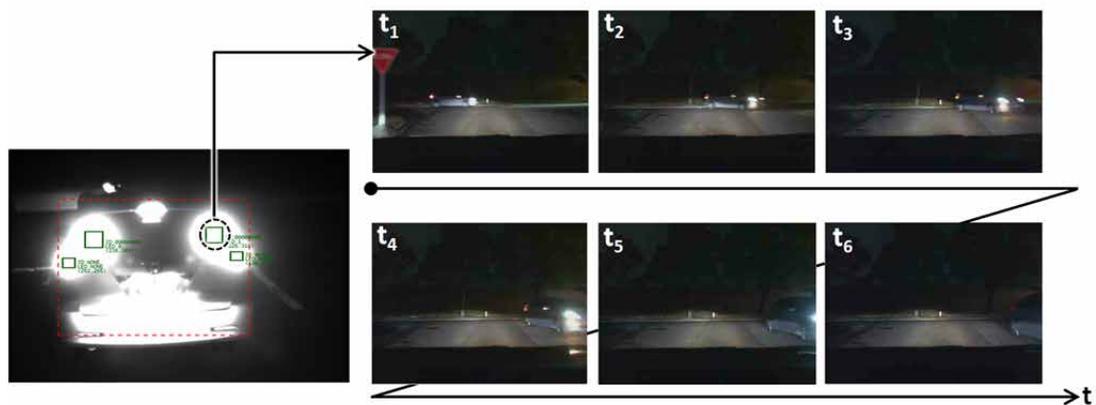


(b)

図 4.17 画像データの連続受信結果：昼間



(a)



(b)

図 4.18 画像データの連続受信結果：夜間

次に画像データの受信性能を確認するため、昼間と夜間の照明環境下において先行車視点画像の受信フレームレートを測定した。結果を表 4.7 に示す。前節ですでに説明したように、先行車から送信される画像の平均送信フレームレートは昼間の照明環境下で約 15 fps、夜間の照明環境下で約 10 fps である。もしパケット損失やビット誤りが発生した場合、受信フレームレートはこの送信フレームレートから低下することになる。測定の結果、平均受信フレームレートは昼間で 13.0 fps、夜間で 8.9 fps となり、画像到達率はそれぞれ 89 % および 89 % という良好な結果が得られた。画像到達率から判断すれば、画像伝送性能は照明環境の影響をほとんど受けないといえる。本結果は、光車車間

通信システムが高度な通信プロトコルなどを用いることなく、屋外走行条件下で画像データを十分な性能で伝送できることを示した。

表 4.7 先行車視点画像の受信フレームレートの測定結果

照明環境	平均送信フレームレート [fps]	平均受信フレームレート [fps]	画像到達率 [%]
昼間	15	13.0	87
夜間	10	8.9	89

最後に画像フレームの未到達（損失）が発生した原因を調査するため、数百メートル走行した時の平均受信フレームレートを測定し、レートの変動を調べた。その結果、図 4.19 に示すように、時折レートが大きく低下する場合があります、その瞬間はパケット損失が発生したときと同じく、車両が大きくピッチングしていることを確認した。従って、この画像損失の主たる原因は、パケット損失によるものであることを確認した。

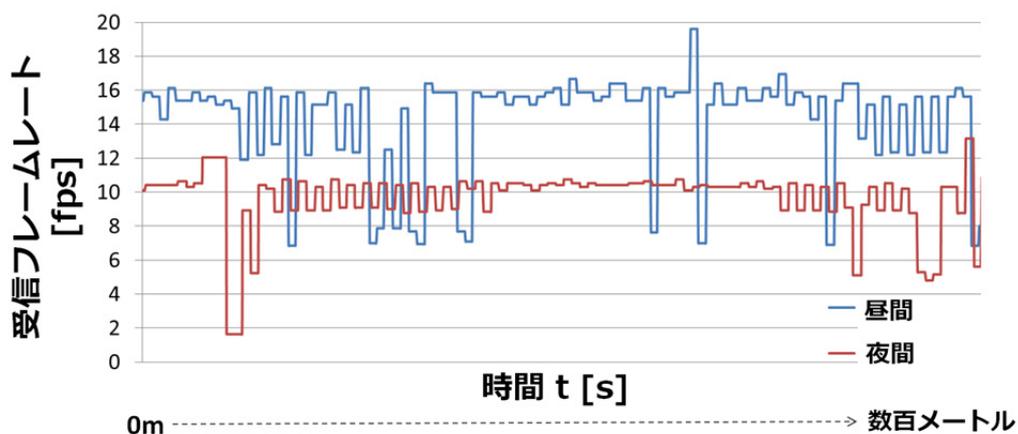


図 4.19 数百メートル走行時の画像の平均受信フレームレートの測定結果

## 4.6 まとめ

本章では、本研究の集大成として LED 送信機と OCI を用いたカメラ受信機を用いた“光車車間通信システム”が構築され、様々な屋外走行実験を通してその性能が明らかにされた。

車載用に試作した LED 送信機システムは、車速などの基本的な車両データと前方視界カメラで撮影した画像データを収集して送信データの変調および符号化、パケット化を行い、10 Mbps の光信号で周辺車両に情報を送信することができる。また、OCI を搭載した車載用カメラ受信機は、LED をリアルタイムで追跡しながら 10 Mbps の光信号を受信し、その受信信号の復号化とパケット分解を行うと共に、自身の車両データを収集してそれらのデータの受信結果を解析用 PC に表示できる。そして、この車載システム用の LED 送信機とカメラ受信機が先行車と後続車にそれぞれ搭載され、2 台の車両間で光伝送を行う“光車車間通信システム”が構築された。

続いてこの光車車間通信システムの性能と有効性を確認するために、様々な実験が実運用条件下、すなわち屋外照明環境下かつ走行状態で実施された。画像内から LED を高速かつ正確に検出するために採用されたフラグ画像は、過酷な屋外照明環境下においても不要な物体には反応せず、LED のような光源のみに反応することを確認した。このフラグ画像の貢献は自動車用 ISC システムを実現する上で極めて大きく、実運用環境下での LED の高精度リアルタイム検出が実現され、大きな課題の一つが克服された。次に、LED を追跡しながら 10 Mbps の光信号を受信して PAR と BER を測定した。その結果、PAR は 91.0 %、BER は 3-bit の誤り訂正符号化を用いることでエラーフリーとなることが確認された。直接波通信であるこの光通信は、伝送路が極めてシンプルであり、屋外環境下においても複雑な伝送技術を用いることなく良好な伝送性能が得られることを確認した。そして、実際に先行車から各種車両データと大容量の画像データ (320 × 240, QVGA, カラー) を送信し、後続車でそれらが正しく受信されることを確認した。更に、送信された LED 送信機の設置間隔から車間距離の算出にも成功し、通信結果と画像処理結果の融合によって、ISC システムが測距システムとしても活用できることを示した。

これらの実験結果はISC技術が自動車の通信システムとして適用可能であることを示すと共に、その能力、有用性、潜在力を示した。今後は、より多様な照明環境下および道路環境下で性能評価を実施していくと共に、システムの小型化、通信仕様の最適化などを検討していく予定である。

## 参考文献

- [1] 齋藤翼, 春山真一郎, 中川正雄, “LED テールランプとイメージセンサを用いた可視光車車間通信および測距方式の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, CS, 通信方式, vol.105, no.638, pp.121-126, 2006 年 2 月.
- [2] H. Binti Che Wook, T. Komine, S. Haruyama, M. Nakagawa, “Visible light communication with LED-based traffic lights using 2-dimensional image sensor,” 2006 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2006), pp.243-247, 8-10 Jan. 2006.
- [3] 木村好克, 内藤貴志, 二宮芳樹, “可視光車車間通信システムのための LED 送信部検出手法,” 自動車技術会論文集, vol.41, no. 4, pp.889-894, 2010 年 7 月.
- [4] 山里敬也, “受信機に高速イメージセンサを用いた ITS 可視光通信,” 電子情報通信学会技術研究報告, CS2013-94, vol. 113, no.390, pp.57-63, 2014.
- [5] Md. S. Z. Sarker, S. Itoh, M. Hamai, I. Takai, M Andoh, K. Yasutomi, S. Kawahito, “Design and implementation of a CMOS light pulse receiver cell array for spatial optical communications,” Sensors 2011, vol.11, no. 2, pp.2056-2076, Feb. 2011.
- [6] S. Itoh, I. Takai, Md.S.Z. Sarker, M. Hamai, K. Yasutomi, M. Andoh, S. Kawahito, “A CMOS image sensor for 10Mb/s 70m-range LED-based spatial optical communication,” 2010 IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), pp.402-403, 7-11 Feb. 2010.
- [7] I. Takai, S. Ito, K. Yasutomi, K. Kagawa, M. Andoh, S. Kawahito, “LED and CMOS image sensor based optical wireless communication system for automotive applications,” IEEE Photonics Journal, vol.5, no.5, p.6801418, Oct. 2013.
- [8] I. Takai, T. Harada, M. Andoh, K. Yasutomi, K. Kagawa, S. Kawahito, “Optical vehicle-to-vehicle communication system using LED transmitter and camera receiver,” IEEE Photonics Journal, vol.6, no.5, p.7902513, Oct. 2014.
- [9] T. Yamazato, I. Takai, H. Okada, T. Fujii, T. Yendo, S. Arai, M. Andoh, T. Harada, K. Yasutomi, K. Kagawa, S. Kawahito, “Image-sensor-based visible light communication for automotive applications,” IEEE Communications Magazine, vol.52, no.7, pp.88-97, July 2014.
- [10] 高井勇, 川人祥二, “LED とカメラでつながる光車車間通信システム,” 自動車技術, 自動車技術会, vol.68, pp.42-48, 2014 年 2 月.
- [11] 今井秀樹, “情報理論,” 昭晃堂, 1984 年.
- [12] 塩野充, “デジタル情報理論,” オーム社, 1998 年.

## 第5章 結論

本論文では世界を先導する実用的な自動車用イメージセンサ通信（ISC）システムの実現を目指し，“10 Mbps クラスの高速な光信号の受信”と“高精度リアルタイム LED 検出”という二つの能力を兼ね備えたカメラ受信機の実現に挑戦した。この二つの能力をカメラ受信機に与えるために、独自の機能集積 CMOS イメージセンサ“光通信イメージセンサ（OCI）”の提案と試作を行い、実証システムを用いた実験を通してその諸性能を明らかにした。また、その OCI を搭載したカメラ受信機と LED 送信機による“光車車間通信システム”を提案し、実運用条件下での実験を通してその性能と自動車応用の可能性を示した。

第2章では、まず ISC の概要を示し、ISC が“混信フリー”、“通信距離に対する安定した受信信号強度”、“送信ノードの空間位置の特定”、“通信結果と画像処理結果の融合”といった従来の無線通信技術では見られない特徴と優位性を持つことを紹介し、その具体的な内容を説明した。また、ISC システムでは受信システムとしての基本的な性能である“受信距離”と“受信角”がレンズなどのパラメータによって決められることを示し、その計算方法やレンズの選定方法などを記した。更にこの ISC システムを車載システムに使用した際の応用例を挙げると共に、導入のメリットや課題などを挙げた。そして最後に、市販されている LED の送信デバイスとしての能力が未知数であったことから、その能力を定量的に掴むための基本的な特性測定を行った。周波数特性から各 LED の遮断周波数を求めた結果、約 90 %の LED が 1MHz 以上の帯域を持ち、更に約 30 %の LED が 10 MHz 以上の帯域を持つことが分かった。従って、本測定から多くの LED が Mbps クラスの光信号を送信できる能力を持つことが掴めた。

第3章では、カメラ受信機に与えられた“10 Mbps クラスの光信号の受信”と“高精度リアルタイム LED 検出”という二つの課題に応えるため、通信画素 CPx とフラグ画像出力機能を備えた OCI の提案と試作を行い、その結果を示した。そして、その OCI を搭載したカメラ受信機と LED 送信機から成る性能検証用の ISC システムを構築し、様々な実験を通して OCI を用いたカメラ受信機の性能と有効性を確認した。実験により、フラグ

画像がシステムから正常に出力され、屋内および屋外照明環境下において不要な背景領域が排除されると共に LED 領域だけが画像内に出力されることを確認した。これにより、LED のみ存在する画像から LED 検出を行うことができるようになり、目標の一つであった“高精度リアルタイム LED 検出”を実現することができた。続いて、CPx を用いた光伝送実験では、CPx の応答特性によって歪められた受信信号がイコライザで適切に復元されることを確認し、また ISC の特徴で示した通り、照明環境や伝送距離によって受信信号が影響を受けないことを確認した。伝送性能の定量評価として BER 測定を行った結果、画像出力機能が停止した状態において 15 Mbps の光伝送がエラーフリーを実現した。また、画像出力機能を稼働した場合には、ノイズの影響を受けて受信性能が低下したが、10 Mbps の光伝送でエラーフリーを達成した。これらの実験により、OCI を搭載したカメラ受信機が“10 Mbps クラスの光信号の受信”と“高精度リアルタイム LED 検出”という二つの大きな目標を達成したことが確認された。

第 4 章では、ISC システムが自動車用通信システムに適用できることを示すため、車載用 LED 送信機と OCI を搭載したカメラ受信機を新たに試作すると共に、それらを実際の 2 台の車両に搭載し、車両間で情報伝送を行う“光車車間通信システム”を提案した。そして、実運用条件、すなわち屋外照明環境下かつ走行状態において様々な実験を行い、その性能と実現可能性を示した。フラグ画像を用いた LED 検出は、過酷な屋外照明環境下においても極めて有効であることが実験的に示され、常に移動する LED を正確かつ高速に検出し、迅速かつ継続的な通信リンクの確立に大きな貢献を果たした。また、先行車に搭載された LED 送信機は、車両データ（車速など）と画像データ（QVGA、カラー）を 10 Mbps の光信号に載せて後続車に送信し、後続車に搭載されたカメラ受信機がその光信号を走行状態においても正しく受信できることを確認した。更に先行車から送信された LED アレイの設置距離という低容量の情報と画像処理とを融合することで、受信機が測距装置としても機能することを示した。これらの実験結果は、実運用条件下においても ISC システムが車車間で画像クラスの大容量データを伝送できることを証明し、次世代の車載通信システムの有力な候補の一つに成り得ることを示した。

## 謝辞

本研究を遂行するに当たり、終始懇篤な御指導と本論文審査において多大なる御尽力を賜りました静岡大学電子工学研究所 川人祥二教授に衷心より感謝いたします。本研究で学ばせて頂いたことは、今後の私の研究者人生において何ものにも代えがたい大きな財産となりました。

本研究をまとめるにあたり、有益なる御助言、御指導、また本論文審査の労を賜りました静岡大学電子工学研究所 浅井秀樹教授、猪川洋教授、香川景一郎准教授に深く感謝いたします。

本研究を遂行するにあたり、大変多くの直接的な御力添え、また数々の御助言、御指導を頂き、更には研究に限らずあらゆる面で多大な御協力を頂いた株式会社東芝 伊藤真也氏（元静岡大学電子工学研究所助手）、静岡大学電子工学研究所 安富啓太助教に心より感謝いたします。

本研究テーマのチームメンバーとして多くの時間を共にし、議論を重ね、本研究の進展に大きな御力を頂いた静岡大学電子工学研究所 川人研究室 Md. Shakowat Zaman Sarker 氏、岡見浩治氏、濱井燃太氏、岩間祐治氏、宋松氏に深く感謝いたします。

日頃より多岐にわたる御協力、御助言を頂いた静岡大学電子工学研究所 川人研究室 福田道雄氏、高澤大志氏をはじめとする研究室職員諸氏ならびに、時間を惜しまず常に献身的な御力添えを頂いた本多一隆氏、澤田友成氏をはじめとする研究室学生諸氏に心より感謝いたします。

長きにわたり本研究の遂行を力強く支え、見守り、そして数えきれないほどの有益なる御指導、御協力を頂いた株式会社豊田中央研究所 安藤道則氏、原田知育氏、太田充彦氏、木村好克氏、山下達弥氏、各務学氏、佐藤和夫氏、二宮芳樹氏（現名古屋大学特任教授）をはじめとする株式会社豊田中央研究所関係者各位に深く感謝いたします。

本研究の更なる進展を狙うにあたり、多くの御助言、御協力を頂きました名古屋大学 山里敬也教授、後藤裕樹氏をはじめとする名古屋大学関係者各位ならびにその研究協力者各位に心より感謝いたします。

本研究の一部は、文部科学省知的クラスター創成事業の助成を受けて遂行されたものであり、ここに謝意を表します。

最後に、私の社会人学生としての大学進学に賛成し、いつも心の支えになってくれた家族に心から感謝いたします。

## 発表履歴

### 論文・解説記事など

- 1) 高井勇, 太田充彦, 木村好克, 安藤道則, Md.Shakowat Zaman Sarker, 安富啓太, 濱井燃太, 伊藤真也, 川人祥二, "イメージセンサによる車車・路車間通信のための光空間通信システム," 映像情報 industrial, 産業開発機構, vol.42, no.2, pp.79-87, 2010 年 2 月.
- 2) Md. S. Z. Sarker, Shinya Itoh, Moeta Hamai, Isamu Takai, Michinori Andoh, Keita Yasutomi, and Shoji Kawahito, "Design and Implementation of A CMOS Light Pulse Receiver Cell Array for Spatial Optical Communications," Sensors2011, vol.11, no.2, pp.2056-2076, Feb. 2011.
- 3) 高井勇, 川人祥二, "イメージセンサ通信技術を用いた光車車間通信システム," 信頼性, 日本信頼性学会, vol.34, no.8, pp.526-531, pp. 42-48, 2012 年 11 月.
- 4) Isamu Takai, Shinya Ito, Keita Yasutomi, Keiichiro Kagawa, Michinori Andoh, and Shoji Kawahito, "LED and CMOS Image Sensor Based Optical Wireless Communication System for Automotive Applications," Photonics Journal, IEEE , vol.5, no.5, p.6801418(Article#), Oct. 2013.
- 5) 高井勇, 川人祥二, "LED とカメラでつながる光車車通信システム," 自動車技術, 自動車技術会, vol.68, pp.42-48, 2014 年 2 月.
- 6) Takaya Yamazato, Isamu Takai, Hiraku Okada, Toshiaki Fujii, Tomohiro Yendo, Shintaro Arai, Michinori Andoh, Tomohisa Harada, Keita Yasutomi, Keiichiro Kagawa, and Shoji Kawahito, "Image-sensor-based visible light communication for automotive applications," Communications Magazine, IEEE , vol.52, no.7, pp.88-97, July 2014.
- 7) Isamu Takai, Tomohisa Harada, Michinori Andoh, Keita Yasutomi, Keiichiro Kagawa, and Shoji Kawahito, "Optical Vehicle-to-Vehicle Communication System Using LED Transmitter and Camera Receiver," Photonics Journal, IEEE , vol.6, no.5, p.7902513(Article#), Oct. 2014.

## 口頭発表など

### 国際会議

- 1) Md. S. Z. Sarker, Isamu Takai, Michinori Andoh, Keita Yasutomi, Shinya Itoh, Shoji Kawahito, "A CMOS Active Pixel Sensor for Optical Communication," IS&T Electronic Imaging Science and Tech., 7249-21, San Jose, Jan. 2009.
- 2) Md. S. Z. Sarker, Isamu Takai, Michinori Andoh, Keita Yasutomi, Shinya Itoh, Shoji Kawahito, "A CMOS imager and 2-D light pulse receiver array for spatial optical communication," Solid-State Circuits Conference, 2009, A-SSCC 2009, IEEE Asian, pp.113-116, 16-18 Nov. 2009.
- 3) Shinya Itoh, Isamu Takai, Md. S. Z. Sarker, Moeta Hamai, Keita Yasutomi, Michinori Andoh, Shoji Kawahito, "A CMOS image sensor for 10Mb/s 70m-range LED-based spatial optical communication," Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), 2010 IEEE International , pp.402-403, 7-11 Feb. 2010.
- 4) Shinya Itoh, Md. S. Z. Sarker, Keita Yasutomi, Moeta Hamai, Yuji Iwama, Isamu Takai, Michinori Andoh, Shoji Kawahito, "A CMOS Image Sensor for Car-to-Car and Road-to-Car Optical Communication," The 17th International Display Workshops (IDW'10), 1-3 Dec. 2010.
- 5) Shoji Kawahito, Shinya Ito, Yuji Iwama, Isamu Takai, Michinori Ando, Keita Yasutomi, Keiichiro Kagawa, "A-2D Optical Pulse Receiver/Imager with Two-Port Pixels for Simultaneously Producing Image and Communication Signals," 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials, GH-1-2, pp.1029-1030, Nagoya, Sep. 2011.
- 6) Takaya Yamazato, Isamu Takai, Hiraku Okada, Toshiaki Fujii, Tomohiro Yendo, Shintaro Arai, Michinori Andoh, Tomohisa Harada, Keita Yasutomi, Keiichiro Kagawa, Shoji Kawahito, "Image Sensor based Visible Light Communication for Automotive Applications," International Symposium on Optical Wireless Communications, Beijing Jade Palace Hotel, China, June 2013.
- 7) Son Song, Keita Yasutomi, Keiichiro Kagawa, Isamu Takai, Shoji Kawahito,

"Optimization of light pulse response of CMOS image-based receiver for spatial communications," The 13th International Conference on QIR (Quality in Research), E10.1, Program Book vol.2, pp.135, Yogyakarta, Indonesia, 26 June 2013.

- 8) Yuki Goto, Isamu Takai, Takaya Yamazato, Hiraku Okada, Akitoshi Fujii, Shoji Kawahito, Shintaro Arai, Tomohiro Yendo, Koji Kamakura, "BER characteristic of optical-OFDM using OCI," Circuits and Systems (APCCAS), 2014 IEEE Asia Pacific Conference on, pp.328-331, 17-20 Nov. 2014.

## 国内会議

- 1) 伊藤真也, Md.Shakowat Zaman Sarker, 安富啓太, 岡見浩治, 高井勇, 安藤道則, 川人祥二, "車車間・路車間光通信システムへの CMOS イメージセンサ技術の応用と光受信画素回路の特性評価," 映像情報メディア学会技術報告, vol.33, no.18, pp.33-36, 2009年3月19日.
- 2) 伊藤真也, Md. Shakowat Zaman Sarker, 安富啓太, 川人祥二, 高井勇, 安藤道則, "車車間・路車間光通信システム用 CMOS イメージセンサ," 映像情報メディア学会年次大会講演予稿集 (2009), 2009年8月.
- 3) 高井勇, 太田充彦, 木村好克, 安藤道則, Md.Shakowat Zaman Sarker, 安富啓太, 濱井燃太, 伊藤真也, 川人祥二, "イメージセンサによる車車・路車間通信のための光空間通信システム," ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW2009), 2009年12月.
- 4) 濱井燃太, 伊藤真也, Md. Shakowat Zaman Sarker, 安富啓太, 高井勇, 安藤道則, 川人祥二, "車車間・路車間光通信用 CMOS イメージセンサと LED 光源を用いた通信距離の評価実験," 電子情報通信学会技術研究報告, ICD, 集積回路, vol.109, no.336, pp.71-75, 2009年12月7日.
- 5) 伊藤真也, 高井勇, Md. Shakowat Zaman 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年3月26日.
- 6) 伊藤真也, 川人祥二, 高井勇, 安藤道則, "長距離高速空間光通信用 CMOS イメージセンサと応用," 次世代画像入力ビジョンシステム部会 定例会, 2010年4月.
- 7) 濱井燃太, 伊藤真也, Md.ShakowatZamanSarker, 安富啓太, 高井勇, 安藤道則, 川人

- 祥二, “空間光通信画像センサの通信高速の最適化,” LSI とシステムのワークショップ 2010, 2010 年 5 月.
- 8) 岩間祐治, 伊藤真也, 濱井燃太, Md.S.Z.Sarker, 安富啓太, 高井勇, 安藤道則, 川人祥二, “長距離高速空間光通信用 CMOS イメージセンサ,” 新画像システム・情報フォトリクス研究討論会, 2010 年 6 月.
  - 9) 高井勇, 原田知育, 太田滋, 安藤道則, 伊藤真也, 川人祥二, “CMOS イメージセンサによる空間光通信システム,” 電子情報通信学会技術研究報告, OCS, 光通信システム, vol.110, no.257, pp.169-172, 2010 年 10 月 21 日 .
  - 10) 伊藤真也, M. S. Z. Sarker, 濱井燃太, 安富啓太, 川人祥二, 高井勇, 安藤道則, “光源追従機能を有する CMOS 空間光通信画像センサ,” 第 4 回集積光デバイスと応用技術研究会, 2010 年 12 月 10 日.
  - 11) 高井勇, 原田知育, 太田滋, 安藤道則, 伊藤真也, 川人祥二, “機能集積イメージセンサによる自由空間光通信システム,” 第 17 回画像センシングシンポジウム (SSII2011), 2011 年 6 月.
  - 12) 岩間祐治, 伊藤真也, Md.S.Z.Sarker, 安富啓太, 香川景一郎, 高井勇, 安藤道則, 川人祥二, “空間光通信・撮像機能一体型画素構造,” 映像情報メディア学会年次大会講演予稿集 (2011), 2011 年 8 月.
  - 13) 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,” 電子情報通信学会技術研究報告, ITS, vol.111, no.441, pp.135-140, 2012 年 2 月 13 日.
  - 14) Song Song, Keita Yasutomi, Keiichiro Kagawa, Isamu Takai, Shoji Kawahito, “Optimization of a High-speed Response Pixel for Spatial Optical Communication Using CMOS Light Pulse Receiver Cell Arrays,” 映像情報メディア学会年次大会講演予稿集 (2012), 2012 年 8 月 29 日.
  - 15) 高井勇, 原田知育, 安藤道則, 宋松, 安富啓太, 香川景一郎, 川人祥二, “【招待講演】空間光通信用イメージセンサの開発と車車間通信システムへの応用,” 研究報告高度交通システム (ITS) , vol.50, no.5, pp.1-7, 2012 年 9 月 3 日.
  - 16) 高井勇, 原田知育, 安藤道則, 宋松, 安富啓太, 香川景一郎, 川人祥二, “LED 送信機とカメラ受信機による光車車間通信システム,” 精密工学会 ViEW2012 ビジョン技

術の実利用ワークショップ, 2012 年 12 月.

- 17) 後藤裕樹, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 高井勇, 川人祥二, 荒井伸太郎, 圓道知博, 鎌倉浩嗣, “光通信イメージセンサを用いた可視光通信への光 OFDM 方式の適用に関する一検討,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, p.388, 2014 年 3 月.



本論文の著作権は、国立大学法人静岡大学創造科学技術大学院自然科学系教育部ナノビジョン工学専攻 高井勇が所有しています。

本論文の記事・図面の無断複写，複製および無断転載を禁じます。

ただし，著者は本論文の複写権を国立大学法人静岡大学に唯一許諾します。