

光学スキャナとイメージセンサを用いる  
可視光通信システムの構築に関する研究

2019年 3月

今井 義人

光学スキャナとイメージセンサを用いる  
可視光通信システムの構築に関する研究

今井 義人

システム情報工学研究科

筑波大学

2019年 3月

## 概要

本研究は、情報をLED（Light emitting diode）や有機EL（electro-luminescence）等に代表される発光素子の高速点滅として送信し、カメラで受信する可視光通信システムに関するものである。受信機にイメージセンサを用いる可視光通信システムは、離れた距離に存在する複数の情報源を同時に認識しつつ、それらと選択的な通信が実現できる等、電波無線通信にはない特徴を有している。一方、一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ、高速な変調光に対応可能で、かつ、遠距離に存在する情報源との通信を実現できる通信システムは、著者の知る限り、これまで確立されていない。仮に、そのような通信システムを実現することが出来れば、カメラを搭載している遍在するデバイスを活用して、遠距離に存在する情報源との高速通信が可能になることから、可視光通信の幅を拡げることが期待される。

そこで、本研究は、これまで可視光通信に用いられてこなかった光学スキャナを活用することで、一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ、高速な変調光に対応可能で、かつ、遠距離に存在する情報源との通信を実現する、新しい可視光通信システムを確立することを目的としている。そして、光学スキャナとイメージセンサを利用する可視光受信機を設計するとともに、屋外環境での運用に適した信号変復調方式や、データ伝送方式などの周辺技術を確認している。さらに、それらを可視光通信システムとして実装すると共に、屋外における実験を実施することで、提案システムが一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ、高速な変調光に対応可能で、かつ、遠距離に存在する情報源との通信を実現できることを明らかにしている。

本論文は全5章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、序論として、本研究の背景、及び、目的を説明している。本研究の対象である可視光通信システムと、その発展の歴史を受信機ごとに振り返ることで、本研究が既存のシステムでは実現されていなかった、遍在的に存在するイメージセンサを用いつつ、遠距離に存在する情報源から送信された高速な変調光の受信を可能とする技術を確認することを提案している。

第2章は、本研究で提案する可視光通信システム（送信機、および、受信機）の概要と、基本的な通信原理を説明している。そして、先行研究との相違点を踏まえつつ、本研究で提案する可視光通信システムは、原理的には、一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ、高速な変調光に対応可能で、かつ、遠距離に存在する情報源との通信が実現できることを示す。

第3章は、光学スキャナとイメージセンサを利用する可視光通信システムを設計している。まず、光学系（発光素子、光学スキャナ、および、イメージセンサ）に必要な条件を整理した上で、実際に送信機と受信機を構築している。そして、最も基本的な変復調方式であるPWM（Pulse width modulation）を用いて通信システムの性能評価実験を行っている。そして、実験の結果、屋外環境での運用に適した信号変復調方式や、データ伝送方式などの周辺技術が、提案システムには不可欠であることを明らかにしている。

第4章は、屋外環境での運用に適した信号変復調方式や、データ伝送方式を検討している。

そして、PSK (Phase shift keying) , および、ブロック伝送が適していることを明らかにすると共に、それらを可視光通信システムとして実装している。さらに、屋外における実験を実施し、提案システムが一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ、高速な変調光に対応可能で、かつ、遠距離に存在する情報源との通信を実現できることを明らかにしている。

第5章は、本研究の総括を行っている。第2章から第4章における研究を通じて、カメラを搭載している遍在するデバイスを活用して、遠距離に存在する情報源との高速通信を可能にする新しい可視光通信システムの構築に成功し、可視光通信の幅を拡げることにも貢献できたと結論づけている。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	はじめに	1
1.2	可視光通信システムに関する先行研究	1
1.3	研究目的	4
1.4	論文構成	5
<b>第2章</b>	<b>光学スキャナとイメージセンサを用いる可視光通信システムの原理</b>	<b>7</b>
2.1	はじめに	7
2.2	イメージセンサを用いる従来の可視光通信システム	7
2.3	光学スキャナとイメージセンサを用いる提案可視光通信システム	8
2.4	まとめ	10
<b>第3章</b>	<b>ベースバンド信号を用いる通信システムの構築と性能評価</b>	<b>11</b>
3.1	はじめに	11
3.2	システムデザイン	11
3.2.1	送信機	11
3.2.2	受信機	12
3.2.3	光学系	13
3.3	予測される性能	15
3.3.1	露光時間と回転速度の最適な関係	15
3.3.2	解像点数と通信速度の関係	16
3.3.3	解像点数と解像度, 通信品質の関係	18
3.4	予測される性能の検証	19
3.4.1	実験条件	19
3.4.2	パラメータのチューニング	20
3.4.3	解像度	21
3.4.4	背景光雑音	22
3.4.5	通信範囲	23
3.4.6	考察	24
3.5	屋外実験による性能評価	24
3.5.1	屋外実験におけるシステムデザイン	25
3.5.2	実験条件	27

3.5.3	屋外環境での実験結果	29
3.5.4	考察	30
3.6	まとめ	31
<b>第4章</b>	<b>ブロック伝送とパスバンド信号を用いる通信システムの構築と性能評価</b>	<b>35</b>
4.1	はじめに	35
4.2	屋内におけるパスバンド変復調方式によるシステムデザイン	35
4.2.1	送信機	37
4.2.2	受信機	38
	信号走査と取得	38
	信号検出	38
	信号復調	39
4.2.3	提案システムの特徴	39
	信号検出	40
	シンボル判別	40
4.3	屋内実験による性能評価	40
4.3.1	実験条件	40
4.3.2	信号検出の確認	41
4.3.3	符号識別の確認	42
4.3.4	考察	44
4.4	屋外におけるパスバンド変復調方式によるシステムデザイン	45
	周期的信号欠損	46
	信号-雑音干渉	47
4.4.1	システムデザイン	48
	送信機	48
	受信機	50
4.4.2	屋外実験による性能評価	51
	送信機, 及び, 受信機の実装	51
	実験環境	52
	信号-雑音干渉の影響	54
	周期的信号欠損の影響	56
	距離- BER 特性	56
	考察	58
4.4.3	並列送信による屋外実験	59
	実験環境	59
	実験結果	60
	考察	60
4.5	まとめ	62

第 5 章 結論	65
謝辞	68
参考文献	70
付録 A 受信機のパラメータ $T_e, T_o$ の関係について	75

# 目次

1.1	可視光通信システムのシステムモデル	2
1.2	提案システムをスマートフォンで実装した例	5
1.3	本論文における各章の位置づけ	5
2.1	(a) 既存のイメージセンサを用いる可視光通信システムのブロックダイアグラム (b) 提案する光学スキャナとイメージセンサを用いる可視光通信システムのブロックダイアグラム	8
2.2	光学スキャナとイメージセンサを用いた可視光通信システムの運用イメージ; 情報源が特定の平面上に拘束され, 光学スキャン時に光源の軌跡が重なり合わない条件における, 複数情報源との同時通信をしている例	9
3.1	PWM によるイメージセンサを用いた可視光通信システムの概要	12
3.2	PWM 信号の例	12
3.3	低速なイメージセンサとポリゴンミラーで高速明滅可視光信号を検出するメカニズム	13
3.4	ベースバンド信号を用いる可視光通信システムにおける受信機の復調器	14
3.5	(a) レーザープリンターの光学系と (b) 本システムの光学系	15
3.6	提案システムのパラメータの関係	16
3.7	取得信号と $T_s$ , $T_o$ の関係性. (i) $T_s < T_o$ のとき, (ii) $T_s > T_o$ のとき, (iii) $T_s = T_o$ のとき	17
3.8	ポリゴンミラーの周りの幾何光学系の概略図	18
3.9	ベースバンド信号を用いる可視光通信システムにおける屋内実験で実装した送受信機	19
3.10	ポリゴンミラーの回転速度 $\omega$ と BER の関係	21
3.11	解像点数 $N_{res}$ と BER の関係	22
3.12	SNR と BER の関係	23
3.13	水平, 垂直方向における提案システムの光受信特性	24
3.14	通信距離と BER の関係	25
3.15	(a) 従来のイメージセンサを用いる可視光通信システムの概観, (b) 前回の光学スキャナを用いる可視光通信システムの概観	26



3.16 (a) ミラー一面あたりの走査周期, $T_0$ と有効走査時間, $T_e$ の関係 ; (b) 従来の提案システムにおける受信データ ; (c) 提案するデータ構造と改良したシステムにおける受信データ . . . . .	27
3.17 ベースバンド信号を用いる可視光通信システムにおける屋外の実験系 . . . . .	28
3.18 (a) 夜間における取得画像の例 (ノイズなし); (b) ノイズ低減法を用いたときの日中における取得画像の例と (c) ノイズ低減法を用いなかったときの日中における取得画像の例 . . . . .	30
3.19 夜間における取得画像の通信距離と相対的輝度の関係 . . . . .	31
3.20 (a) 夜間における通信距離と PER, BER の関係 (b) 日中における通信距離と PER, BER の関係 . . . . .	32
3.21 パケットデータが欠損した取得画像の例. (a) は取得画像, (b) は取得画像中の走査信号を波形変換した波形, (c) は (b) の波形をしきい値によって二値化した波形 . . . . .	33
3.22 パケットデータにノイズが干渉したときの取得画像の例. (a) は取得画像, (b) は取得画像中の走査信号を波形変換した波形, (c) は (b) の波形をしきい値によって二値化した波形 . . . . .	34
4.1 (a) 既存のイメージセンサを用いる通信システムの概観, (b) 従来の光学スキャナを用いる PWM 変調を用いる通信システムの概観 . . . . .	36
4.2 BPSK-可視光通信システムのブロックダイアグラム . . . . .	37
4.3 信号検出のシステムブロックダイアグラム; (a) 上部は PWM 信号のフロー, (b) 下部は BPSK 信号のフロー . . . . .	39
4.4 PWM 信号画像の分析 (a) PWM 信号と線状のノイズ画像, (b)HPF (15 kHz) を通過後, 垂直位置に平行に計算された PWM 信号画像の合計パワー, (c) 列 ( $i = 116$ ) におけるノイズ信号のパワースペクトル密度 (PSD), (d) 列 ( $i = 206$ ) における信号のない PSD, (e), (f) 列 ( $i = 330, 362$ ) における PWM 信号の PSD, 水平ピクセル数 $i$ の範囲は $0 \sim 639$ , 青色のグラフは原画像からの PSD で, オレンジ色のグラフは HPF を通過した画像からの PSD . . . . .	43
4.5 BPSK 信号画像の分析 (a) BPSK 信号と線状のノイズ画像, (b)HPF (15 kHz) を介して垂直位置に平行に計算された BPSK 信号画像の合計パワー, (c) 列 ( $i = 206$ ) におけるノイズ信号の PSD, (d) 列 ( $i = 206$ ) における信号のない PSD, (e) 列 ( $i = 295$ ) におけるキャリア信号の PSD, および (f) 列 ( $i = 327$ ) における BPSK の PSD, 水平ピクセル数 $i$ の範囲は $0 \sim 639$ , 青色のグラフは原画像からの PSD で, オレンジ色のグラフは HPF を通過した画像からの PSD . . . . .	44
4.6 SNR と BER の関係 . . . . .	45
4.7 ベースバンド信号とパスバンド信号のシステム両方で面状ノイズを取得した画像の処理フローの例 . . . . .	46

4.8	光学スキャナとイメージセンサを用いた可視光通信システムの運用イメージ; 情報源と雑音源が, 光学スキャナの走査方向に存在し, 光学スキャナの走査によって信号と雑音の干渉が発生している例 . . . . .	47
4.9	光学スキャナとイメージセンサを用いた可視光通信における送信機および受信機の動作タイミング . . . . .	47
4.10	イメージセンサ出力における信号-雑音干渉 . . . . .	48
4.11	ブロック伝送とパスバンド信号を用いるイメージセンサによる可視光通信システムのブロック図 . . . . .	48
4.12	送受信機が同期されていない環境におけるブロック伝送 ( $N = 6$ ) . . . . .	49
4.13	イメージセンサ出力におけるパスバンド信号-雑音干渉 . . . . .	50
4.14	パスバンド信号を用いる可視光通信システムの送信機, および, 受信機の構成	52
4.15	画像合成によって得られた擬似的なイメージセンサ出力, および, 実際の人工光下で観測されたイメージセンサ出力の比較 (a) 光学スキャナで走査された信号, 人工光 (屋内) 0 lx, (b) 光学スキャナで走査された雑音, 人工光 (屋内) 250 lx, (c) (a) と (b) の画像合成によって得られた擬似的なイメージセンサの出力, (d) 実際の人工光下で観測されたイメージセンサ出力, 人工光 (屋内) 250 lx (e) (c) および (d) における輝度のヒストグラム . . . . .	54
4.16	距離 10 m において観測されたイメージセンサの出力, および, その空間周波数 (黒線: 信号部, 灰線: 雑音部) (a) パスバンド信号, 自然光 (屋外) 100 lx, (b) 同 自然光 (屋外) 300 lx, (c) ベースバンド信号, 自然光 (屋外) 300 lx . . . . .	55
4.17	データブロック欠損率 . . . . .	56
4.18	パスバンド信号を用いる可視光通信システムの距離-BER 特性 . . . . .	57
4.19	ベースバンド信号を用いる可視光通信システムの距離-BER 特性 . . . . .	58
4.20	並列可視光通信システムの実験系 . . . . .	59
4.21	並列可視光通信システムの取得画像 . . . . .	61
4.22	並列可視光通信システムの背景画像 . . . . .	61
4.23	パスバンド信号を用いる並列可視光通信システムの距離-BER 特性 . . . . .	62
4.24	提案システムを車載した場合の例 . . . . .	63
4.25	提案システムを車々間, 路車間通信に適用した場合のサービスエリア . . . . .	63
A.1	送受信機が同期されていない環境におけるブロック伝送 ( $N = 5.3$ ) . . . . .	76

# 表目次

1.1	受信機ごとの可視光通信システムの利点と欠点 . . . . .	4
2.1	情報伝達効率の観点における可視光通信システムの比較 . . . . .	10
3.1	カメラの仕様 . . . . .	19
3.2	ベースバンド信号を用いる可視光通信システムにおける屋内実験の実験パラ メータ . . . . .	20
3.3	$N_{\text{res}}$ と $k$ の関係 . . . . .	21
3.4	ベースバンド信号を用いる可視光通信システムにおける屋外実験の実験パラ メータ . . . . .	29
4.1	パスバンド信号を用いる可視光通信システムにおける屋内実験の実験パラメータ	42
4.2	パスバンド信号を用いる可視光通信システムの屋外実験における実験パラメータ	53
4.3	パスバンド信号を用いる可視光通信システムの屋外並列実験における実験パラ メータ . . . . .	60

# 第1章 序論

## 1.1 はじめに

可視光通信システムとは、ヒトの目に見える可視光を用いて情報をやりとりする、無線通信システムである。可視光を用いる無線通信システムは、古くから存在しているが、本論文では、情報を発光素子の高速点滅として送信し、受光素子を用いて受信するものを、可視光通信システムと定義する。可視光通信システムは、世の中に広く普及している発光素子や受光素子を通信インフラに利活用できるポテンシャルを有している。したがって、基本的な通信技術に加え、それを応用したアプリケーション等、多岐に亘る領域において研究がなされている。そこで、本章では、可視光通信システムに関する先行研究や、その特徴を紹介する(第1.2節)。次に、これまでの先行研究では未だ達成されていない技術領域を明らかにすると共に、その技術領域が有している可能性について説明する。そして、本論文の目的を定めるとともに、次章以降の構成について説明する(第1.3節)。最後に、本章の内容をまとめる(第1.4節)。

## 1.2 可視光通信システムに関する先行研究

可視光通信システムは無線通信システムの一つであり、その構成は図1.1のようにモデル化できる。図に示されるとおり、送信機は送りたい情報を変換し、変調された可視光として、発光素子から送信する。受信機は、変調された可視光を、受光素子を用いて受信し、復調することで、情報を受信する。可視光通信システムに関するこれまでの先行研究に着目すると、発光素子にはLED (Light emitting diode) を利用するものが殆どである。一方、受光素子はPD (Photo diode)、高速度カメラ (1,000 fps~)、および、汎用カメラ [10~60 (fps)] が、用途に応じて使い分けられている。そこで、本章では可視光通信システムに関する先行研究を、(1) 受光素子にPD、(2) 受光素子に高速度カメラ、(3) 受光素子に汎用カメラを用いるものの三つに大別し、各々の特徴(利点、および、欠点)、ならびに、応用例について説明する。

### (1) 送信機にLED、受信機にPDを用いる可視光通信システム

可視光通信システムの中で、最も初期に提唱されたシステムは、発光素子にLED、受光素子にPDを用いるものである [1, 2, 3, 4, 5, 6]。PDとは、光を検出することによって光エネルギーを電気信号に変換する受光デバイスである。PDは、通常でも数十MHzや数百MHzの帯域を持つため、高速に変調された可視光信号を受光することができる。ゆえに、PDを用いる可視光通信システムのデータレートは最高で数Gbpsに及ぶ。した

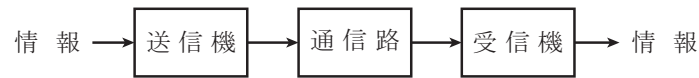


図 1.1: 可視光通信システムのシステムモデル

がって、PD を用いる可視光通信システムは LED 照明を送信機とした位置サービスを実現する手段としての研究が進み、その応用例として、複数物体の同時位置検出 [7, 8, 9], ナビゲーションシステム [10, 11, 12, 13], 路車間通信や車々間通信 [14, 15, 16, 17] などに関する研究がなされてきた。

PD による可視光通信システムは、送信機と受信機が一对一で、受光される信号の殆どが変調された可視光の場合、極めて高速な情報伝送が可能である。一方、PD は、検出範囲内の光をその一点で受光するため、複数光源が存在する場合、それらの信号がすべて合成されて PD に入射することになる。これによって、混信が発生し、この合成された信号から各信号に分離することは非常に困難になる。また、屋外環境での利用を考えると、通常の PD では視野角が大きく外乱光の影響が無視できない。そこで、100 m 程度の長距離通信を行うためには、外乱光を排除できるように視野角の狭い望遠レンズで送信機の LED のみを狙う仕組みが必要である。加えて、路車間通信や車々間通信など、送受信機の位置が時間に伴い相対的に移動する場合は、望遠レンズを LED に向ける機械的な首振り機能が必要になる。

## (2) 送信機に LED, 受信機に高速度カメラを用いる可視光通信システム

PD を用いる可視光通信システムの次に注目されたのは、高速度カメラを用いるものである。高速度カメラとは、結像のための光学系と、フレームレート [1 秒間に撮影できる静止画のコマ数 (フレーム)] は 1,000–100,000 (fps) のイメージセンサ [PD を内蔵した画素が二次元アレイ] で構成される装置である。受信機に高速度カメラを用いる可視光通信システムは、送信機からの光がレンズによってイメージセンサの特定のピクセルに投影されている時に、そのピクセルで受光した信号をフレームごとに読み出すことにより可視光通信を行うことができる。イメージセンサは、画素の数だけ検出範囲内を空間分離できることから、複数の LED や外乱光 (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、個別の信号としてイメージセンサから出力される。したがって、受信機に高速度カメラを用いる可視光通信システムは、複数の送信機が同時に存在する環境や、送信機からの信号と、外乱光が同時に受光される屋外環境における通信に適している。さらに、撮影画像から可視光信号を読み出す以外にも、撮影画像そのものを情報として利用できる。したがって、高速度カメラを用いる可視光通信システムは、路車間通信, 車々間通信 [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26] などの移動体通信から、写真測量システム [27] や拡張現実感 (AR) [28] に至るまで、多岐に亘る研究がなされてきた。

高速度カメラの欠点は、外部に大型の大容量メモリシステムが必要なおえ、莫大な枚数の画像を高速に処理するための負荷が大きいことが挙げられる。これは、システムの大型化にも繋がる。また、高速度カメラを用いる通信システムでは、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、メガヘルツ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。

### (3) 送信機に LED, 受信機に汎用カメラを用いる可視光通信システム

高速度カメラを用いる可視光通信システムは、上述の通り、多岐に亘る応用可能性を有している一方、システムが複雑かつ大型になりがちであった。そこで、より小型な汎用カメラ [フレームレートが 10-60 (fps) 程度のカメラ] を用いて可視光通信を実現する手法が提唱された [29]。汎用カメラは、高速度カメラより小型なデバイスであり、ほとんどの人が常時携帯するスマートフォンに標準的に搭載されるなど、広く普及しているデバイスである。したがって、受信機に汎用カメラを用いる可視光通信システムは、遍在しているイメージセンサを利活用できる点において、これまでのシステムに対するアドバンテージを有している。しかしながら、汎用カメラは 1 秒あたりの処理枚数が小さいことが欠点である。そして、送信機の LED の変調速度を、汎用カメラのフレームレートに併せてしまうと、人間にとって不快なチラツキ (フリッカ) が発生してしまう。そのため、LED の変調方式をフリッカが生じないように工夫したり、汎用カメラの特性を活かした通信方式に関する研究が進んでいる。

その具体例として、まず、イメージセンサの種類の一つである CMOS センサが持つ、ローリングシャッター効果を活かした可視光通信システム [30, 31, 32, 33] がある。ローリングシャッター効果とは、CMOS センサの露光タイミングがセンサの走査線毎にずれる現象である。この現象によって、送信データは明暗縞の帯として取得され、汎用カメラのフレームレート以上の高いデータレートを受信することができる。一方、ローリングシャッター効果を利用するためには、変調光を CMOS センサの大きな範囲で受光する必要がある。したがって、この方式は、現状では近距離に存在する情報源との通信が主な用途に留まっており、遠距離に存在する情報源との通信にはあまり活用されていない。

また、汎用カメラを用いつつ、送受信機のサンプリングを工夫したアンダーサンプリング方式がある [34, 35, 36]。アンダーサンプリングとは、サンプリング定理よりも低い周波数でサンプリングすることを指す。本来であれば、サンプリング定理よりも低くサンプリングすると、元の波形を復元できなくなる。しかしながら、これらの研究では、あえて受信機のカメラのサンプリング間隔を小さくした上で、送信機を高速に変調させている。これにより、送信機はチラツキが起きなくなる一方で、受信機は性能に合ったサンプリング間隔、すなわち、フレームレートで通信が可能となっている。通信距離は、原理上、長距離通信が可能であるが、実現できるデータレートは、受信機のサンプリングレートが上限になってしまうため、比較的小さくなってしまふ。その上で、データレートを増加するために、LED を 2 つ以上使用して符号化を工夫している。ゆえに、

表 1.1: 受信機ごとの可視光通信システムの利点と欠点

手法	利点	欠点	通信速度	通信距離	応用例	
PD[6, 17]	高速な変調光を受信可能	背景光に弱い	2k~2.1G (bps)	15 cm~900 m	路車間通信 ナビゲーション	
高速度カメラ [19, 37]	背景光に強い	システムが高価	1 k~10M (bps)	50~60 (m)	路車間通信 車々間通信 拡張現実感	
汎用カメラのみ [29]	スマートフォンが利用できる	高速な変調光は受信困難	640 bps	3.5 m	屋内通信	
汎用カメラ	ローリングシャッター方式 [30, 31]	高速な変調光を受信可能	近距離通信に限定	15~2684 (bps)	10~30 (cm)	屋内通信
	アンダーサンプリング方式 [36, 38]	長距離通信が可能	高速な変調光は受信困難	150~500 (bps)	12~60 (m)	屋内通信

アンダーサンプリング方式は高速な変調光を利用できるとはいえ、受信機側は高速な変調光を処理できないことから、可視光通信システムとしては高速な変調光に対応可能とは言えない。

### 1.3 研究目的

前述で取り上げた、それぞれの可視光通信システムについて表 1.1 で整理した。先行研究を俯瞰すると、広く普及している汎用イメージセンサを利用しつつ、高速な変調光に対応可能で、かつ、遠距離に存在する情報源との通信を実現できる通信システムは、著者の知る限り、これまで確立されていない、と言える。

ここで、本研究の目的は、一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ、高速な変調光に対応可能で、かつ、遠距離に存在する情報源との通信を実現する通信システムを確立することとする。そのために、可視光通信にこれまで用いられてこなかった光学スキャナを活用することで、新しい特徴を有する可視光通信システムを構築する [39, 40, 41, 42]。提案システムをスマートフォンで実装する場合の例を図 1.2 に示す。

スマートフォンのカメラレンズに光学スキャナを搭載し、レンズとスマートフォンを組み合わせることで、提案システムが実現するイメージである。送信信号の検出、追跡にはスマートフォンのカメラ機能で、可視光通信を光学スキャナの走査によって実施するように機能を切り替える。また、光学スキャナは一次元方向の走査だけでなく、二次元方向の走査が可能なデバイスも存在するため、可視光信号を二次元方向にスキャンすることで提案システムのデータレートを向上することも可能である。

本論文では、光学スキャナとイメージセンサを組み合わせた受信機と、それに適した信号変復調方式を含む、新しい可視光通信システムを提案するとともに、その性能を実験により評価する。具体的には、新しい可視光通信システムに不可欠な光学スキャナとイメージセンサの最適な連携動作条件を明らかにするとともに、その運用に適したブロック伝送方式とパスバンド変復調方式を確立する。そして、新しい可視光通信システムの性能を屋外実験により評価した結果、新しい可視光通信システムは、高速な変調光に対応可能であり、かつ、イメージセンサで受光された信号の輝度が十分に確保されている環境であれば、遠距離に存在する情報源との通信を、良好な品質で実現できることを明らかにする。

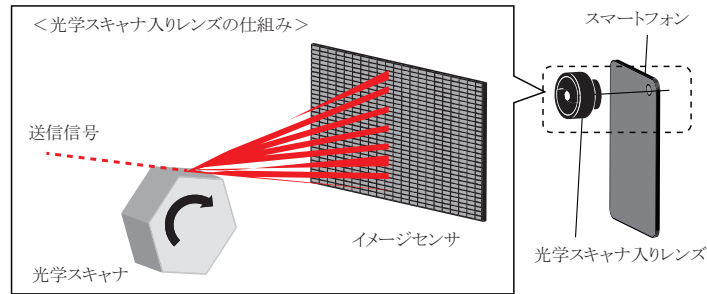


図 1.2: 提案システムをスマートフォンで実装した例

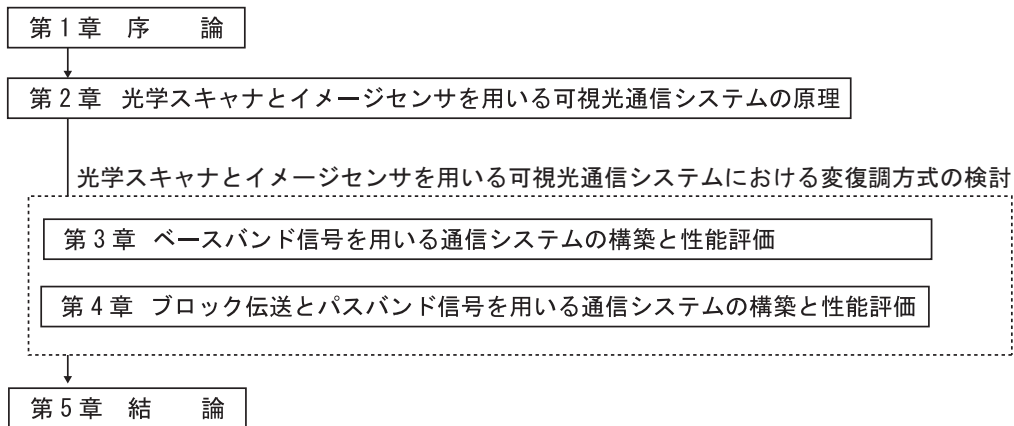


図 1.3: 本論文における各章の位置づけ

本論文は、既存の可視光通信システムでは実現されていなかった、遍在的に存在するイメージセンサを用いつつ、遠距離に存在する情報源から送信された高速な変調光の受信を可能とする技術を新しく確立するものであり、可視光通信の幅を拡げることが期待される。なお、本論文では、光学スキャナによる可視光通信システムの構築を優先するため、一次元方向の光学スキャナを採用し、光学系を必要最低限の構成で用意している。

## 1.4 論文構成

本論文は図 1.3 で示されるように、全 5 章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第 2 章は、本研究で提案する可視光通信システム（送信機、および、受信機）の概要と、基



本的な通信原理を説明する。そして、先行研究との相違点を踏まえつつ、本研究で提案する可視光通信システムは、原理的には、一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ、高速な変調光に対応可能で、かつ、遠距離に存在する情報源との通信が実現できることを示す。

第3章は、光学スキャナとイメージセンサを利用する可視光通信システムを設計する。まず、光学系（発光素子、光学スキャナ、および、イメージセンサ）に必要な条件を整理した上で、実際に送信機と受信機を構築する。そして、最も基本的な変復調方式である PWM (Pulse width modulation) を用いて通信システムの性能評価実験を行う。そして、実験の結果、屋外環境での運用に適した信号変復調方式や、データ伝送方式などの周辺技術が、提案システムには不可欠であることを明らかにする。

第4章は、屋外環境での運用に適した信号変復調方式や、データ伝送方式を検討する。そして、PSK (Phase shift keying)、および、ブロック伝送が適していることを明らかにすると共に、それらを可視光通信システムとして実装する。そして、屋外における実験を実施し、提案システムが一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ、高速な変調光に対応可能で、かつ、遠距離に存在する情報源との通信を実現できることを明らかにする。

第5章は、本研究の総括を行う。第2章から第4章における研究を通じて、カメラを搭載している遍在するデバイスを活用して、遠距離に存在する情報源との高速通信を可能にする新しい可視光通信システムの構築に成功し、可視光通信の幅を拡げることにも貢献できることを述べる。

## 第2章 光学スキャナとイメージセンサを用いる可視光通信システムの原理

### 2.1 はじめに

本章では、本研究で提案する可視光通信システム（送信機、および、受信機）の概要と、基本的な通信原理を説明する。そして、先行研究との相違点を踏まえつつ、本研究で提案する可視光通信システムは、原理的には、一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ、高速な変調光に対応可能で、かつ、遠距離に存在する情報源との通信が実現できることを示す。

### 2.2 イメージセンサを用いる従来の可視光通信システム

図 2.1(a) に既存手法であるイメージセンサによる可視光通信システム、(b) に光学スキャナとイメージセンサを利用した可視光通信システムのブロック図をそれぞれ示す [40]。図 2.1(a) と (b) との違いは、受信機の光学スキャナの有無である。

一般的に、イメージセンサを用いる可視光通信システムの送信機は変調器と発光素子で構成される。情報は、変調器によって、規則的な周期 (シンボル周期)  $T_b$  の非負の方形パルスに変換される。発光素子は方形パルスに応じて点灯や消灯をすることで、情報を輝度として表現する。受信機は、イメージセンサと信号抽出部、復調器で構成される。送信信号は光空間の通信路を通して受信機のイメージセンサで受光される。イメージセンサは光信号を電気信号に変換することで、受信結果を画像として出力する。画像出力の間隔はイメージセンサの露光時間で制御される。露光時間は送信機側のシンボル周期と同期させることで、各撮影画像に正確な輝度情報を復元することができる。一つの発光素子の光信号は画像内の一つ、または、複数のピクセルに相当する。信号抽出部は取得画像の中から送信信号のピクセル情報を識別する。ピクセル情報は通信路の変動によって変化する。特に、送受信機間が移動する場合、通信システムへの振動や外乱光などによって、フレームごとに送信信号のピクセル位置や画像上でのサイズが変化する。そのため、送信信号の捕捉や追跡を正確に行う研究も盛んに行われている [20, 21, 22, 24, 26]。信号抽出部で識別された領域から、送信信号に対応した輝度値を取り出すことで復調器は情報の復調を行う。変復調方式は、LED の光にスペクトルの広がりがあるために、光の位相を変化する位相変調はできず、光の強弱を切り替える強度変調が主となる。そのため、LED の ON/OFF で情報を変調する OOK (On-Off Keying) 変復調方式が代表的である。本通信システムでは送信機の LED を複数使用することでデータレー

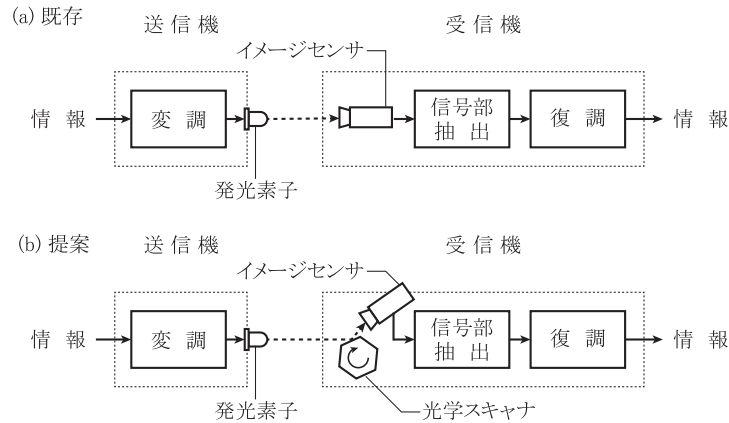


図 2.1: (a) 既存のイメージセンサを用いる可視光通信システムのブロックダイアグラム (b) 提案する光学スキャナとイメージセンサを用いる可視光通信システムのブロックダイアグラム

トを増やすことが多い。また、情報に対して符号化を導入することで、通信品質を向上させる工夫が盛んに行われている。

### 2.3 光学スキャナとイメージセンサを用いる提案可視光通信システム

光学スキャナを用いる可視光通信システムも、送信機は変調器と発光素子で構成される。情報は、変調器によって、シンボル周期  $T_b$  の非負の方形パルスに変換される。発光素子は方形パルスに応じて点灯や消灯をすることで、情報を輝度として表現する。受信機は、光学スキャナとイメージセンサ、信号抽出部、復調器で構成される。送信信号は光空間の通信路を通過して光学スキャナによってイメージセンサに走査される。本論文では、光学スキャナが光信号を反射して、その反射光がイメージセンサ上を移動することを走査と定義する。イメージセンサの露光時間中に、入射光の反射角が変化すれば、イメージセンサ上の光の位置は時間とともに変化する。このときの光信号の時間の変化を撮影画像として取得することで、送信信号の時系列情報を空間情報としてマッピングできる。画像出力の間隔はイメージセンサの露光時間で制御されるが、露光時間は送信機側のシンボル周期と同期させる必要はない。これは、一フレームにつき一シンボルで対応させる必要がないため、本システムでは、一フレームにつき複数シンボルが取得できる。一つの発光素子の光信号は撮影画像内にて破線状となって複数のピクセルに対応する。信号抽出部は取得画像の中から送信信号を識別する。識別は、送信信号の走査方向に直交する方向の RGB 値の合計を計算し、波形信号に変換することで行う。送信信号から生成された波形信号はその他の信号(外乱光)とは異なる特徴を持つことを利用して、取得画像から送信信号を含むピクセル画像(関心領域)のみを抽出できる。これによって、生成された波形信号から復調器は情報の復調を行う。変復調方式は前述の従来のイメージセンサを用いる通信システムと同様に、強度変調が主となる。しかしながら、本シス

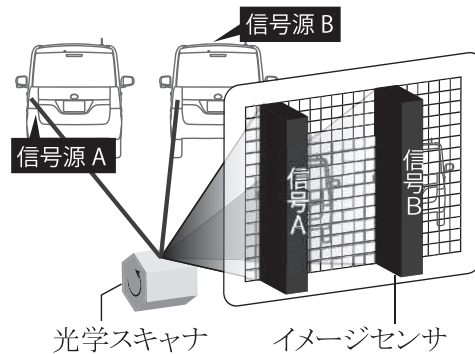


図 2.2: 光学スキャナとイメージセンサを用いた可視光通信システムの運用イメージ; 情報源が特定の平面上に拘束され、光学スキャン時に光源の軌跡が重なり合わない条件における、複数情報源との同時通信をしている例

テムの特徴により、撮影画像に送信信号の時系列情報を埋め込むことができるため、点滅が情報を意味するベースバンド信号以外にも、情報を搬送波に乗せて伝送するパスバンド信号を利用することが可能である。

本システムは、従来の可視光通信システムと比較すると、イメージセンサの露光時間と送信機のシンボル周期の同期の要否に違いがある。従来は、露光時間に合わせて送信機が点滅をする必要があったが、本システムでは、露光時間中に送信信号の時系列情報を空間情報としてマッピングできる。これによって、送信信号の変調速度をイメージセンサのフレームレートよりも大きく設定できるため、チラツキが起きないシステムが設計できる利点がある。また、この方式は、光学スキャナによって走査された映像をイメージセンサで読み取るため、車々間通信システム等、情報源が特定の平面上に拘束され、光学スキャン時に光源の軌跡が重なり合わない条件では、複数情報源との同時通信が可能である(図 2.2)。さらに、本システムは、LED 1 個あたりから一フレームで多くの情報を受光できることも重要である。イメージセンサによる可視光通信システムのデータレートは、受信機のイメージセンサの処理能力に依存している。したがって、従来のシステムはデータレートを上げるために送信機側に多くの LED を設置したりすることで対応しているが、LED 1 個あたりの情報伝達効率から考えると、効率が小さいと言える。イメージセンサによる可視光通信システムを今後、通信インフラとして展開するためには、送信機である LED は既存の照明器具をそのまま利用することが望ましい。情報伝達効率が小さいイメージセンサによる可視光通信では、単一の LED 照明の利用が困難になることが予測される。故に、イメージセンサによる可視光通信において、情報伝達効率を考えることは重要なキーワードになる。

ここで本論文では、イメージセンサによる可視光通信システムにおける、情報伝達効率を、1 つの LED あたりのフレームあたりの情報伝送量(シンボル/フレーム/LED)と定義する。そこで、これまでのイメージセンサによる可視光通信システムを表 2.1 に整理した。カテゴリとしては、次頁に分けられる。LED と高速カメラを用いた可視光通信システム [37, 43, 44, 45], LED と

表 2.1: 情報伝達効率の観点における可視光通信システムの比較

手法	LED の数	カメラのフレームレート (fps)	スループット (symbol/sec)	情報伝達効率 (symbol/frame/LED)	通信距離 (m)
高速度カメラ [44]	256	1000	128000	0.5	30
既存 ローリングシャッター [30]	1	20	2684	134	0.1
アンダーサンプリング [38]	2	50	50	0.5	1.5
提案 光学スキャナ [42]	1	12	72	6	20

ローリングシャッター効果のある商用カメラを用いた手法(ローリングシャッター方式) [30, 33, 34], LED および市販のカメラで, アンダーサンプリングされたベース変調方式 [35, 36, 38], そして, 著者が提案する, 光学スキャナを用いた手法 [42] の4つである. 表 2.1 を見ると, 既存のイメージセンサによる可視光通信システムの効率は非常に低いことがわかった. また, ローリングシャッター方式は効率 134 (シンボル/フレーム/LED) を達成するが, このシステムは短距離 (0.1 m) にしか使用できない. 一方, 著者の提案するイメージセンサによる可視光通信システムは既存のシステム [38, 44] の効率の6倍であることを示している [42]. また, 通信距離は 20 m とローリングシャッター方式よりも長距離通信が可能である. したがって, 提案するイメージセンサによる可視光通信システムは, これまでのシステムにおいて, 情報伝達効率, 伝送距離ともに, 比較的大きな可視光通信システムである, といった従来にない位置づけとなる. 以上のことから, 提案システムは, 既存のイメージセンサを用いる通信システムに光学スキャナを適用することで, 一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ, 高速な変調光に対応可能であり, LED 1 個あたりの情報伝達効率に優れた, 遠距離に存在する情報源との通信が実現できる, 従来の可視光通信システムにはない位置づけのシステムとなる.

## 2.4 まとめ

本章では, 従来のイメージセンサを用いる可視光通信システムの原理を説明し, それに対して, 提案する光学スキャナを用いる可視光通信システムの原理と特徴を整理した. これにより, 提案システムは, 一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ, 高速な変調光に対応可能であり, LED 1 個あたりの情報伝達効率に優れ, 遠距離に存在する情報源との通信が実現できることを述べた.

## 第3章 ベースバンド信号を用いる通信システムの構築と性能評価

### 3.1 はじめに

第2章より、提案する可視光通信システム（送信機、および、受信機）の概要と、基本的な通信原理を説明し、先行研究との相違点を整理した。第3章では、光学スキャナとイメージセンサを利用する可視光通信システムを設計する。まず、光学系（発光素子、光学スキャナ、および、イメージセンサ）に必要な条件を整理した上で、実際に送信機と受信機を構築する。そして、最も基本的な変復調方式である PWM（Pulse width modulation）を用いて通信システムの性能評価実験を行うことで、屋外環境での運用に適した信号変復調方式や、データ伝送方式などの周辺技術を検討する。

### 3.2 システムデザイン

#### 3.2.1 送信機

送信機はパルス幅変調 (PWM) ドライバと LED で構成される (図 3.1 の左側)。送信機はランダムなバイナリデータを規則的な周期 (シンボル周期) $T_b$  ごとに長短のパルスに変調する。変調信号  $s(t)$  は、下記のように表せる (式 3.1)。

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]\delta(t - nT_b), \quad (3.1)$$
$$x[n] = \begin{cases} 1 & (0 \leq t < T_{lp}) \\ 0 & (T_{lp} < t < T_b) \text{ if } b[n] = 1 \end{cases}$$
$$x[n] = \begin{cases} 1 & (0 \leq t < T_{sp}) \\ 0 & (T_{sp} < t < T_b) \text{ if } b[n] = 0 \end{cases}$$

なお、本章では、受信機側においてシンボルの分離を容易にするために、実験において、 $T_{lp} = 0.6T_b$ 、 $T_{sp} = 0.2T_b$  と定めた。 $T_{lp}$  は長パルス、 $T_{sp}$  は短パルスの点灯時間を表す。本実験で定めた PWM 信号の例を図 3.2 に示す。

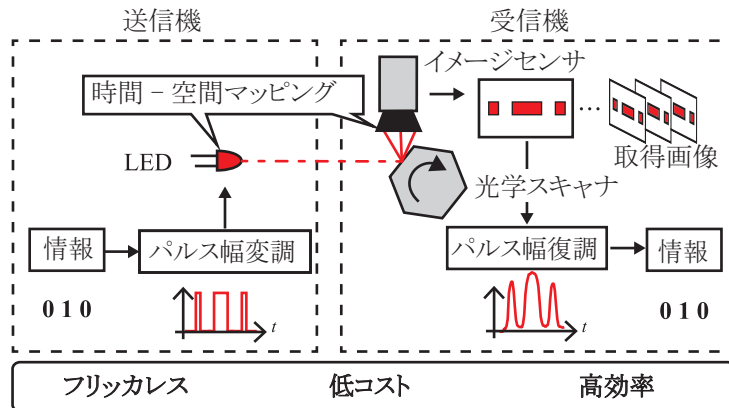


図 3.1: PWM によるイメージセンサを用いた可視光通信システムの概要

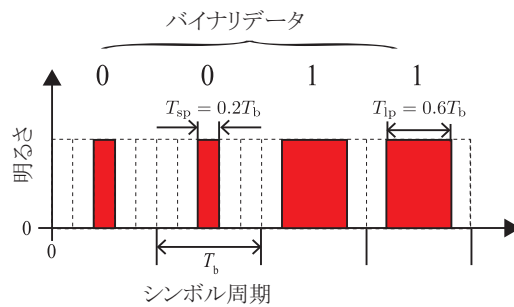


図 3.2: PWM 信号の例

### 3.2.2 受信機

受信機は、図 3.1 の右側に示すように、カメラ、ポリゴンミラー、および復調器で構成されている。まず、LED からの入射光は、回転速度  $\omega$  (rad/s) でポリゴンミラーによって走査され、露光時間  $T_s$  (s) のイメージセンサによって取り込まれる。図 3.3 に入射光の走査原理を示す。ポリゴンミラーの回転速度  $\omega$  は一定であるため、入射光の反射角は時間とともに変化し、イメージセンサ上の光の位置は時間とともに変化する。このようにして、イメージセンサは光信号の時系列信号を取得することができる。イメージセンサ上の光の位置は時間的に非線形に変化する (ポリゴンミラーによる光学的歪み)。しかしながら、この非線形歪みは、 $T_p$  と、 $T_{sp}$  の差を大きくすることで、その影響を小さくすることができる。その結果、イメージセンサは、露光時間  $T_s$  がシンボル周期  $T_b$  よりも大きい場合であっても、送信信号をシンボルごとに受光することができる。イメージセンサによって取り込まれた画像は、復調器によって処理される。具体的には、復調器は、送信されたメッセージを図 3.4 のように取得する。

#### (1) 波形変換

復調器は、走査方向に直交する方向の画像の RGB 値の和を計算することによって、取

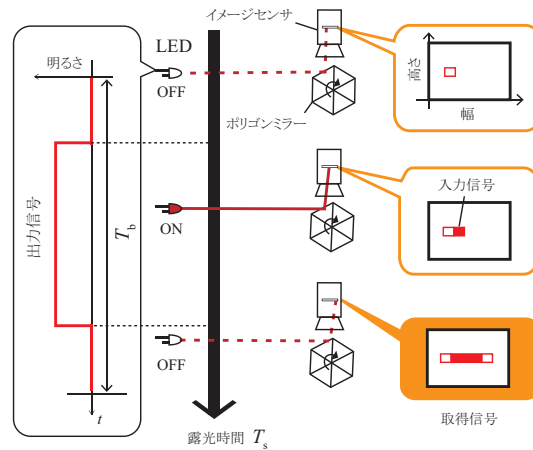


図 3.3: 低速なイメージセンサとポリゴンミラーで高速明滅可視光信号を検出するメカニズム

得画像を PWM パルスに変換する。

(2) 信号抽出

信号を受光するために、受信機は、PWM パルスと長さ  $kd$  の長方形窓との相互相関関数を計算する。相互相関関数のピーク位置から、復調器は信号位置を受光し、それを抽出する。  $k$  と  $d$  は、露光時間あたりに送信される実際のビット数と、ビットあたりの走査長の長さであり、3.3.2 項にて詳細を述べている。

(3) パルス幅計測

復調器は、抽出された信号のピーク値の  $1/3$  の値を閾値として各パルスの幅を測定し、その要素がパルス幅であるベクトルを得る。

(4) バイナリ化

復調器は、最終的にパルス幅ベクトルを閾値によってバイナリデータベクトルに変換する。

### 3.2.3 光学系

ここで、ポリゴンミラーを用いる光学系について紹介する。ポリゴンミラーはレーザープリンターによく用いられる。レーザープリンターはレーザーをポリゴンミラーの回転により走査を行い、感光ドラム上に画像を生成する装置である。この光学系には、シンドリカルレンズとトロイダルレンズが工夫されて使用されている。図 3.5(a) に示す。はじめに、レーザーはビームの向きが平行状態になるように調節される。このレーザーから出力されたビームは、x 断面では、シンドリカルレンズを通して、平行光のままポリゴンミラーに入射する。シンドリカルレンズとは、円柱面を持つレンズであり、平行光束が入射すると、一方



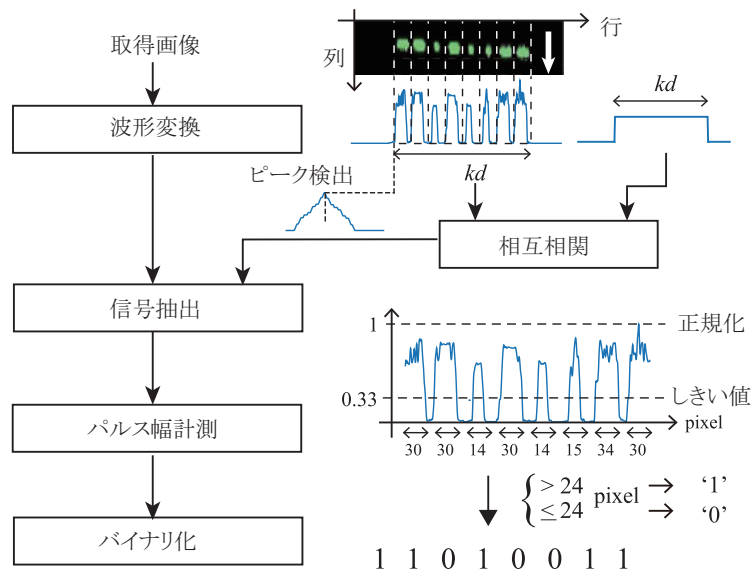


図 3.4: ベースバンド信号を用いる可視光通信システムにおける受信機の復調器

向の断面のみ屈折され、他方はそのまま直進し、焦点位置で細い線状に結像する性質を持つ。ポリゴンミラーに入射された後、回転によって、反射光の向きを走査して、その後方の  $f-\theta$  レンズによって感光ドラムの対応した位置に結像する。これに対して、 $y$  断面では、ポリゴンミラーの前方に配置されたシリンドリカルレンズによりポリゴンミラー面に線状に結像する。ミラー面に線状に結像した光は反射した後、広がっていくので、そのままでは  $f-\theta$  レンズによる結像位置が  $x$  断面の位置と異なってしまう。そこで、 $f-\theta$  レンズの一部を  $y$  断面のみに屈折力を付加するようなトロイダルレンズにすることで、感光ドラム面の同一位置に  $x, y$  両断面ともに良好なスポット像を形成することができる [46]。  $f-\theta$  レンズの役割は、感光ドラム面に走査されるスポット像の移動速度を一定にする働きを持つとも言い換えられる。ポリゴンミラーが一定の角速度で回転するとき、スポット像の移動速度は走査面に対して一定にならない。これは、通常の焦点距離  $f$  のレンズでは、その光軸と入射ビームの成す角  $\theta$  とスポットの位置  $x$  が、  $x = f \cdot \tan \theta$  の関係を持つためである。このため、  $x = f \cdot \theta$  の関係を持つような意図的に光学的な歪みを与えた  $f-\theta$  レンズを用いている。

一方、本システムの光学系を図 3.5(b) に示す。図 3.5(a) との違いは、レーザーが LED に、  $f-\theta$  レンズがズームレンズ、感光ドラム面がイメージセンサ面に代わり、レーザーの後方にあったシリンドリカルレンズがなくなっている。光源が LED になったことで、レーザーよりも光は広がりを持ってポリゴンミラーに入射される。LED の光は指向角を持つ。指向角とは LED の光が広がる角度を指す。中心部から見た位置が最も強くなる光になり、中心部の明るさから、ずれていって 1/2 の明るさになる角度を 2 倍した値が指向角となる。ポリゴンミラーに入射される LED の光は指向角内の光束が中心となる。指向角から離れた光束は、受信強度が徐々に小さくなって、レンズに入射される。ポリゴンミラーに入射された光はポリゴンミ

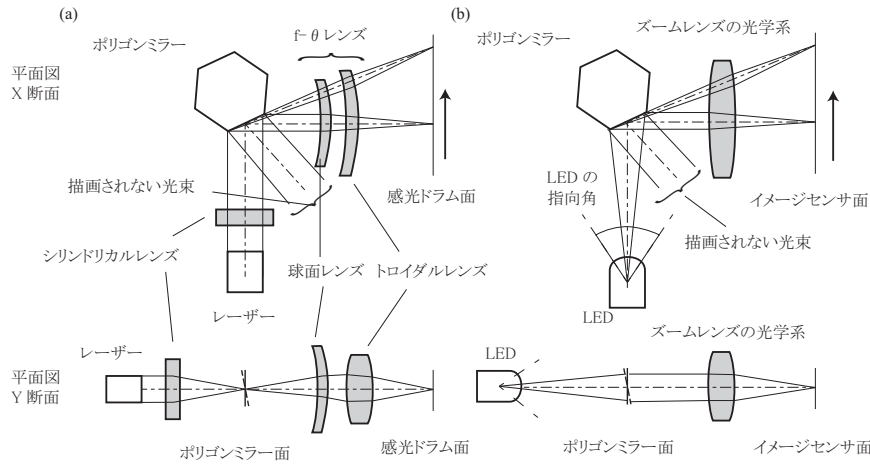


図 3.5: (a) レーザープリンターの光学系と (b) 本システムの光学系

ラーの回転によって、反射光の向きを走査して、その後方のカメラレンズ(ズームレンズ)によってイメージセンサの対応した位置に結像する．本来なら、本システムにおいても、ポリゴンミラーに入射される前には、LEDの光を平行状態で入射されるようなレンズや、ポリゴンミラーで反射された後は、イメージセンサ上のスポット像の移動速度が一定になるようなレンズなど、本システムにあったレンズ設計が必要となる．しかしながら、本論文では、システムの原理の設計を確立することを優先するために、レンズ設計は考慮せず、変調信号を調整することで、光学的な歪みなどをカバーしている．適切なレンズ設計を行えば、LEDの光を効率よくポリゴンミラーに走査できるようになるため、送受信機間の運用距離向上が期待できる．また、イメージセンサに走査されるスポット像がより鮮明になるため、取得画像はより多くの像を含むことができる．

### 3.3 予測される性能

システム性能を最大限にチューニングすることで、提案システムによる効率的な可視光通信を実現する．具体的には、図 3.6 に示される、カメラの露光時間、ポリゴンミラーの回転速度、LEDの搬送周波数などのパラメータを調整することで、通信速度、及び、通信品質を最適化する．

#### 3.3.1 露光時間と回転速度の最適な関係

はじめに、カメラの露光時間とポリゴンミラーの回転速度の関係について検討する．ポリゴンミラーの走査周期  $T_0$ (s) は下記のように表せる(式 3.2)．

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega N}, \quad (3.2)$$

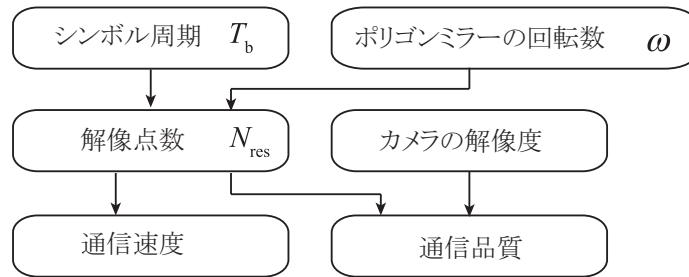


図 3.6: 提案システムのパラメータの関係

$\omega$  (rad/s) はポリゴンミラーの回転速度を表す。ポリゴンミラーの最適な走査周期  $T_0$  とカメラの露光時間  $T_s$  は下記のように表せる (式 3.3)。

$$T_s = T_0. \quad (3.3)$$

上記の条件において、イメージセンサは図 3.7 に示すように、ポリゴンミラーから効率的に反射光を取得することができる。

- (i)  $T_s < T_0$  なら、信号の収縮が起こる。言い換えれば、より多くのビットが特定のフレームで受信され、いくつかのフレームは信号を含まなくなる。この場合、カメラの解像度には上限があるため、受信機が受信されたフレームから収縮した長短パルスを区別することが困難になるため、通信品質が低下する結果となる (図 3.7 (i))。
- (ii)  $T_s > T_0$  の場合、特定のフレームに複数の信号が重なるため、通信品質の低下を招く (図 3.7 (ii))。

したがって、 $T_s = T_0$  の条件は、(図 3.7 (iii)) に示すように、信号の収縮や多重化をすることなく、一フレームあたりのビット数を最大化することができるために、最適な関係であると言える。この結果、提案システム受信機は各フレームにおいて、LED の高速変調信号を破線画像として取得することができる。

### 3.3.2 解像点数と通信速度の関係

上記の条件を満たす場合の通信速度に着目する。 $T_s = T_0$  のとき、破線の画像は、送信機と受信機の両方のパラメータにしたがってサイズが変わる。具体的には、破線の密度は、ポリゴンミラーの回転速度  $\omega$ 、およびシンボル周期  $T_b$  によって変化する。破線画像から正しくメッセージを復号するには、パルス間の距離を大きくする必要がある。一方、高速通信を実現するためには、パルス間の距離を小さくする必要がある。したがって、適切な通信品質で高速通信を行うためには、 $\omega$  と  $T_b$  の最適な組み合わせを見つける必要がある。まず、ポリゴンミ

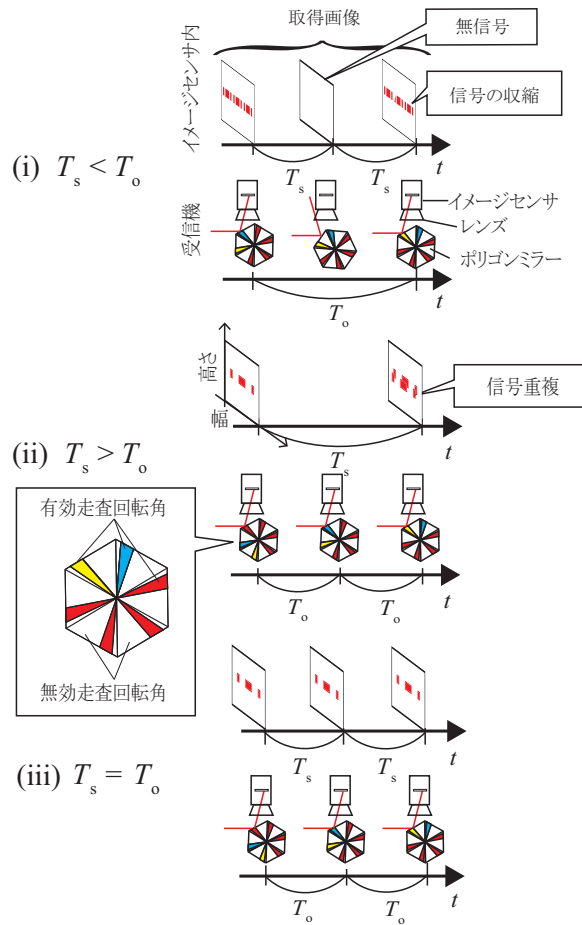


図 3.7: 取得信号と  $T_s, T_o$  の関係性. (i)  $T_s < T_o$  のとき, (ii)  $T_s > T_o$  のとき, (iii)  $T_s = T_o$  のとき

ラーに着目すると、イメージセンサの画角に留意しなければならない。図 3.8 に、ポリゴンミラーの周辺の幾何光学系を示す。面ごとのポリゴンミラーの回転角を  $\theta$  とすると、偏向角は  $2\theta$  になる (図 3.8)。しかし、カメラの視野 (FOV) や、ポリゴンミラー及びカメラの位置、ポリゴンミラーのサイズ、及び、面の数の制限のために、カメラは反射された全ての光を取得することができない。そこで、カメラが反射光を取得できない、面辺りの角度範囲 (無効時間比) を  $\epsilon$  と定義する (図 3.7)。この場合、有効走査偏向角  $\delta$  は以下のように表せる (式 3.4)[47]。

$$\delta = \frac{2\pi}{N} - \epsilon. \quad (3.4)$$

したがって、有効走査回転角は  $\delta/2$  となる。ポリゴンミラーの反射面の後ろに焦点距離  $f$  の結像レンズを置くと、走査長  $l$  は、有効走査回転角を用いて表すことができる (式 3.5)。

$$l = 2ftan\delta. \quad (3.5)$$

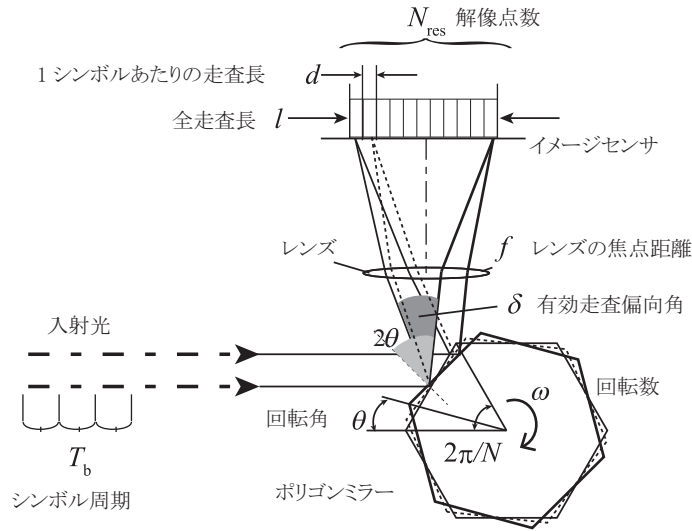


図 3.8: ポリゴンミラーの周りの幾何光学系の概略図

一方で、走査長  $l$  あたりにどれくらいの点を載せられるかを検討する．1 シンボル当りの走査長  $d$  は以下のように表せる (式 3.6).

$$d = 2f \tan(2\omega T_b). \quad (3.6)$$

次に、全走査長と 1 シンボルあたりの走査長との比を、走査長さあたりの解像点数、すなわち、 $N_{\text{res}}$  と定義する．解像点数は、フレーム当たりのシンボルの数に対応する．解像点数  $N_{\text{res}}$  は次のようになる (式 3.7).

$$\begin{aligned} N_{\text{res}} &= l/d \\ &= \frac{\tan(\delta)}{\tan(2\omega T_b)}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

$N_{\text{res}}$  の値は、通信速度に影響する．提案システムにおいて、実質的なデータレート  $R$  (bps) は以下のように表せる (式 3.8),

$$R = N_{\text{res}}/T_s. \quad (3.8)$$

### 3.3.3 解像点数と解像度、通信品質の関係

さらに、解像点数とカメラの解像度の両方が通信品質に影響する．全走査長は実質的に一定であるので、 $N_{\text{res}}$  の増加は、1 シンボルあたりの走査長の収縮をもたらす．したがって、カメラの解像度が不十分であると、撮影された画像から長短のパルスを区別することは困難で

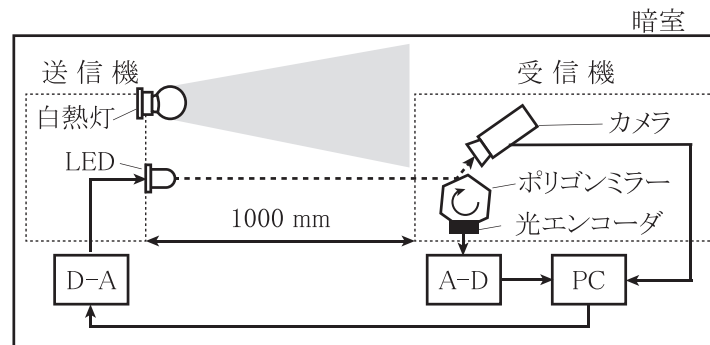


図 3.9: ベースバンド信号を用いる可視光通信システムにおける屋内実験で実装した送受信機

表 3.1: カメラの仕様

カメラモデル	XCG-V60E, SONY
センサータイプ	1/3type PS IT CCD
レンズモデル	TV LENS for 1/2
焦点距離	8 ~ 48 (mm)
露光時間	2 ~ 1/100,000 (s)
撮影解像度	640 × 480
カメラの視野角	25.3608 deg

ある。次の章では、カメラの露光時間とポリゴンミラーの回転速度の最適な関係が成立することを示す。また、提案システムの受信機は、解像点数やカメラの解像度を変更することで、実用的な通信品質で高速通信が可能であることを示す。

### 3.4 予測される性能の検証

#### 3.4.1 実験条件

提案システムの性能評価のために、送信機と受信機を作製し、通信実験を行った。図 3.9 に作製した送受信機を示す。表 3.1 にカメラの仕様を示す。表 3.2 は実験パラメータを示す。送信機は A-D コンバータ (NI USB-6212, National Instruments) と LED (OS5RPM5B61A-QR, OptoSupply) で構成されている。LED のサイズ、輝度、半値角はそれぞれ直径 5 mm, 7 cd, 60 度である。受信機は、ポリゴンミラーと CCD イメージセンサ (XCG-V60E) で構成されている。ポリゴンミラーは、6 面、内接円直径  $\phi 25$ , 厚さ 2 mm であった。ポリゴンミラーとイメージセンサとの距離は 10 mm であった。この距離は最短距離であり、走査長が最大になるように設定された。

作製した送受信機を用いて、以下のように可視光通信実験を行った。送信機と受信機の両方は、静的状態の暗室に設置されており、受信機は送信機の光学軸と位置合わせされている。

表 3.2: ベースバンド信号を用いる可視光通信システムにおける屋内実験の実験パラメータ

LED のシンボル周期	0.2 – 2 (ms)
ポリゴンミラーの回転速度	6.28 ~ 20.94 (rad/s)
露光時間	1/12 s
レンズの焦点距離	8 mm
レンズのピント	infinity
レンズの F 値	2.0
レンズとポリゴンミラーの距離	10 mm
通信距離	750 ~ 1750 (mm)
撮影解像度	320 × 480
$\epsilon$ (カメラが取得できない反射光の一面あたりの角度)	$\pi/4$
$\delta$ (カメラが取得できる反射光の一面あたりの角度)	$\pi/12$
取得画像中の LED のピクセルサイズ	45 pixels

このような環境下において、イメージセンサの露光時間は 1/12 sec で一定であった。実験では、送信データをパケットに分割し、各パケットの送信とカメラシャッターの動きをポリゴンミラーの回転と同期させた (ポリゴンミラー上に光エンコーダを置いて一面ごとの回転を検出する)。しかし、実験中に、トリガ検出が時々遅れることがわかった。そのような場合、受信側でデータパケットの一部のみを得ることになる。システム性能を安定的に評価するために、データパケットの長さを  $N_{\text{res}}$  の約 60 % とした。この場合、トリガにいくらかの遅延があっても、受信側でデータを正常に取得できることがわかっている。したがって、実験で得られた実効データレート  $R_{\text{exp}}$  は次のようになる (式 3.9)。

$$\begin{aligned} R_{\text{exp}} &= k/T_s \\ &\leq N_{\text{res}}/T_s. \end{aligned} \quad (3.9)$$

同期機構を慎重に設計することにより、 $R_{\text{exp}}$  を  $R$  に近づけることができるが、ポリゴンミラーの最適化は将来の課題の一つである。

前項では提案したイメージセンサによる可視光通信システムの性能を理論的に検討した。以下の項では、理論的な調査を実験的に検証する。また、提案システムを背景光雑音中において動作させ、提案システムの通信品質を示す。

### 3.4.2 パラメータのチューニング

前述までの提案システムのパラメータの関係性に関する理論的な検討を実験によって明らかにする。イメージセンサの露光時間  $T_s$  が一定であるという条件の下では、ポリゴンミラーの最適な走査周期  $T_0$  は  $T_s$  と等しくなる (式 (3.3) 参照)。したがって、 $N = 6$  のとき、式 (3.2) から、ポリゴンミラーの最適な回転速度は 12.56 rad/s になる。それ以外の場合は、3.3.1 節で説明されているように、通信品質の低下が問題になる可能性がある。上記を検証するために、回転速度を 8.23 から 20.94 (rad/s) までを変化させることによって提案システムの性能を調べた。詳細には、 $T_b = 0.67$  ms と  $k = 7$  ビットとパラメータを設定し、環境ノイズのない状態で

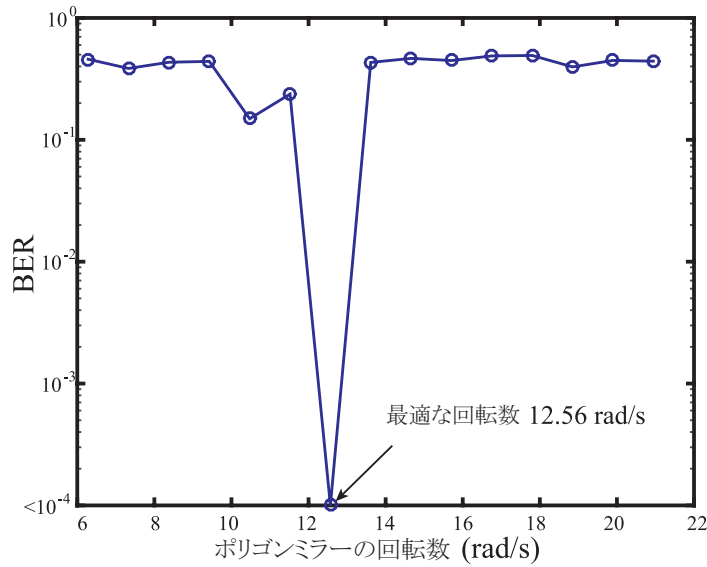


図 3.10: ポリゴンミラーの回転速度  $\omega$  と BER の関係

表 3.3:  $N_{\text{res}}$  と  $k$  の関係

$N_{\text{res}}$	6	11	17	21	28	31	38	39	48	55
$k$	4	8	10	14	18	22	28	30	36	40

BER を測定した。図 3.10 に実験で得られた  $\omega$  と BER の関係を示す。この図に示すように、 $T_0$  が  $T_s$  に等しいとき、BER は  $\omega = 12.56 \text{ rad/s}$  のときに最小であることが明らかになった。また、BER は、分解能低下や信号干渉のために  $\omega \neq 12.56 \text{ rad/s}$  のときに増加し、時には十分な通信品質を達成しないことが明らかになった (e.g.  $\text{BER} < 10^{-3}$ )。以上のことから、提案システムの最適条件は  $T_0 = T_s$  であると言える。また、高品質な通信を実現するためには、ポリゴンミラーの回転速度を厳密に制御する必要がある。以降の実験では、パラメータ  $\omega = 12.56 \text{ rad/s}$  を使用する。

### 3.4.3 解像度

PWM のキャリア周波数の最適値を選定する。式 (3.8) に示すように、解像点数を増やすことにより、データレート  $R$  を増加させることができる。しかし、イメージセンサの解像度には上限があるため、通信品質は低下する。受信機が受信フレームから長短パルスを区別することが困難になる。解像点数の最適値を見つけるために、 $T_0$  を 0.2 から 2 (ms) まで変化させながら提案システムの性能を調べた (式 3.7 参照)。周囲雑音がないという条件で BER を測定した。さらに、カメラの解像度を変更し、これらの条件で各 BER を測定し、通信品質への影響を検証した。取得画像の解像度は、 $576 \times 704$ ,  $288 \times 352$ ,  $58 \times 71$  (pixels) であった。解像点



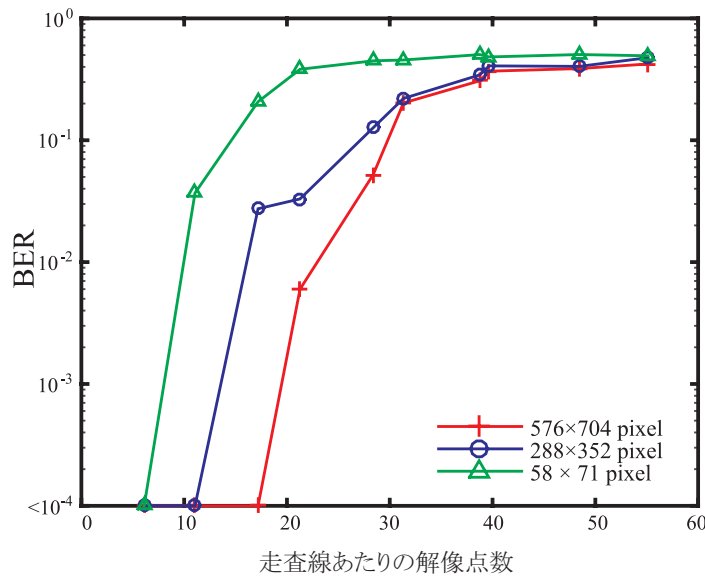


図 3.11: 解像点数  $N_{\text{res}}$  と BER の関係

数ごとの  $k$  の値は、表 3.3 に示す。SNR は約 70 dB であった。

図 3.11 に解像点数  $N_{\text{res}}$  および BER の関係を示す。解像点数が増えると BER が小さくなるのが分かる。加えて、より高い解像度で同じ数の解像点数を与えればさらに良い結果になることがわかる。したがって、解像点数  $N_{\text{res}}$  を調整することによって、通信速度と品質のバランスを取る必要がある。チューニングの結果、 $N_{\text{res}} = 17$  と  $k = 10$  のパラメータで 120 bps を達成した。この状態は、十分な通信品質 (e.g. BER < 10<sup>-3</sup>) といえる。通信速度は既存の方式よりも同じイメージセンサで比較すると 10 倍高速になるといえる。 $T_b = 0.67$  ms を使用すると、人間の目にちらつきがおこらないことも重要である。以下の実験では、カメラの解像度とほぼ同じ解像度の 576 × 704 pixel の画像を使用している。

### 3.4.4 背景光雑音

3.4.2 項と 3.4.3 項で決定されたパラメータを使用して、背景光雑音 (より現実的な環境) のある下で提案システムの性能を評価した。具体的には、パラメータ  $\omega = 12.56$  rad/s,  $T_b = \{2, 1, 0.67, 0.5\}$  (ms),  $k = \{4, 8, 10, 14\}$  ビットである。この条件では、解像点数はそれぞれ  $\{6, 11, 17, 21\}$  に相当する。雑音源には、白熱灯を使用した。このランプは、図 3.9 のように送信機の LED の頭上に設営した。まず、画像にノイズを定量的に加えるために、ランプを点灯させてノイズの多い画像を取得した。次に、雑音のない状態で、各解像点数について BER を測定し、信号画像を得た。次に、ノイズ画像を信号画像に付加して画像を生成した。これらの画像は、ノイズ画像の強度を変えることによって変換した。図 3.12 に各解像点数に関する SNR と BER の関係を示す。この図に示すように、提案システムは、SNR が 10 dB 以上の

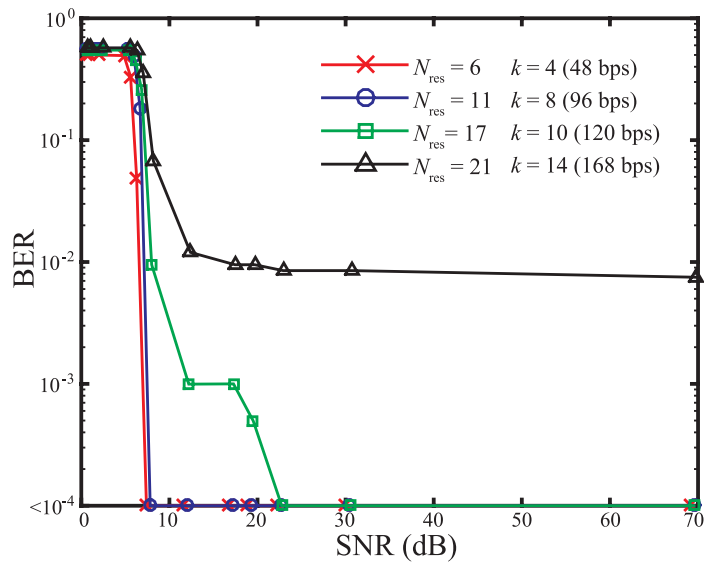


図 3.12: SNR と BER の関係

場合に十分な通信品質 ( $BER < 10^{-3}$ ) を達成することが明らかになった。これは、提案システムが十分な SNR 環境下で実用的な通信品質を達成できることを意味する。SNR が低下するにつれて BER が増加するが、この BER 曲線は無線通信システムの同様の性質を示している。したがって、通信路符号化の使用によって、データレートを増加させることが期待される。

### 3.4.5 通信範囲

提案システムの様々な通信距離における性能を評価した。まず、提案システムの光受信特性を測定した。これは、送信機と受信機との間の 3 次元関係の変化に対応する。実験の簡略化のために、受光器の位置を固定し、LED の水平方向と垂直方向を回転させて特性を測定した。送信信号はキャリア周波数のランダム信号、 $T_b = 0.67$  ms であった。ポリゴンミラーの回転速度は 12.56 rad/s であった。通信距離は 1000 mm であった。図 3.13 に SNR と LED の水平方向と垂直方向の角度との関係を示す。SNR を計算するために、取得画像に 0 dBW のホワイトノイズを追加した。SNR が約 60 dB を超えると、画像の LED の点線を捕捉できることが明らかになった。次に、通信距離を 750 から 1750 (mm) に変更して BER を測定した。図 3.14 は、通信距離を変更したときの BER と各解像点数との関係を示している。図から、通信距離の増加に伴い BER が増加することが明らかになった。これは、通信距離が増加するにつれて SNR が低下することを意味する。その結果、提案システムは適切な通信距離で最高の性能を達成することができた。また、現在の提案システムの水平、垂直方向における光受信特性を図 3.13 に示す。この図より、本システムの受信特性は水平、垂直画角でそれぞれ 35 度程度、30 度程度であることがわかる。これは、採用したイメージセンサが 1/3 型であること、

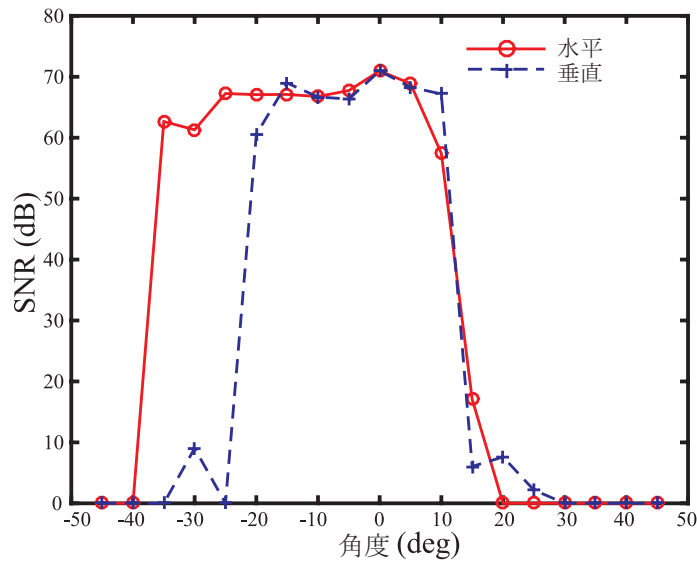


図 3.13: 水平，垂直方向における提案システムの光受信特性

また，使用したレンズの焦点距離が 8 mm であることから，カメラとしての水平，垂直画角がそれぞれ，33.4 度，25.4 度と算出される受光範囲とほぼ等しい．使用した送信光源の LED の半減角は 60 度であったが，本システムの光受光特性は使用する受信機の視野角で最終的に制限されることがわかった．

### 3.4.6 考察

実験の結果から，提案システムが 120 bps のデータレートを達成できることが明らかになった．これは，同じイメージセンサーを使用して比較したときに，既存手法の 10 倍の速さになる．その結果，低ノイズ環境の下であれば，実用的な BER を実現し，高い伝送レートとフリッカレスなシステムを実現できることを示した．一方で，本節で実装したシステムは，送信機と受信機との間に同期信号を利用しているため，実質的な無線通信システムではないとも言える．現状のシステムで，同期信号が不可欠な理由は，受信機が周期的に送信信号を欠損してしまうためである．光学スキャナが可視光信号を走査する範囲は，カメラの画角よりも大きい．同期信号を利用しないためには，送信信号のデータ順序を受信機で判別できるように構成する必要がある．

## 3.5 屋外実験による性能評価

前述により，ベースバンド変調方式による，光学スキャナとイメージセンサーを用いる可視光通信システムは，屋内の暗室環境における性能評価によって，遍在する一般的なイメージ

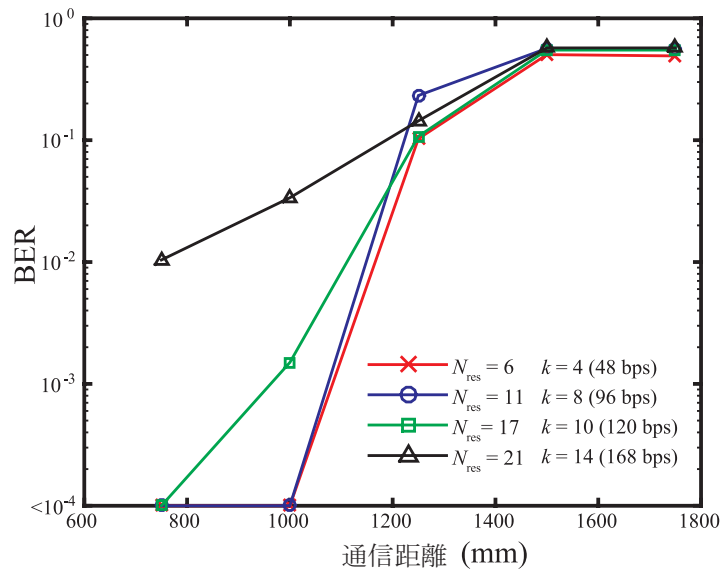


図 3.14: 通信距離と BER の関係

センサを使用しても高速な可視光通信が可能であることを確認した。しかしながら、本システムを屋外で運用する場合において、解決しなければならない問題が複数あることがわかっている。問題点について、図 3.15(b) に示す。まず、同期の問題がある。現状の著者のシステムは、連続的なデータを伝送するために送信機と受信機との間に同期信号を必要としていた。さらに、背景光雑音の問題がある。これは、可視光通信システム全般にも当てはまる問題である。本システムにおいても可視光信号が背景光雑音に埋もれて受信してしまうため、通信品質の低下が生じてしまう。本節では、以上の問題の解決を目的に、これまでの光学スキャナとイメージセンサを用いるベースバンド変調方式型可視光通信システムをアップデートさせた。具体的には、本システムを屋外環境において適用させるために、新しいデータ送信構造と背景光雑音を低減する仕組みを導入した。

### 3.5.1 屋外実験におけるシステムデザイン

- 送信データ構造

提案システムは 1 フレームで複数のビットを得ることができる。しかし、送信信号は限られた時間 (有効走査時間,  $T_e$ ) でしか得られない。送信信号はポリゴンミラーで反射され、イメージセンサは送信信号の一部を取得する。イメージセンサの画角は限られているために、残りの送信信号は失われる [図 3.16(a)]。イメージセンサが 1 面あたりのポリゴンミラーの走査で受光できる割合,  $\alpha$  は以下のように表せる (式 3.10),

$$\alpha = \frac{\delta}{2 \times \frac{2\pi}{N}}, \quad (3.10)$$

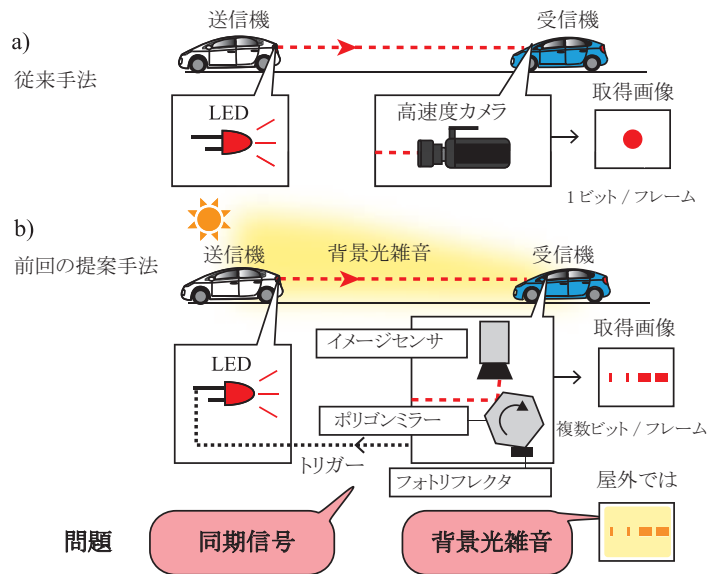


図 3.15: (a) 従来のイメージセンサを用いる可視光通信システムの概観, (b) 前回の光学スキャナを用いる可視光通信システムの概観

$\delta$  と  $2 \times \frac{2\pi}{N}$  は有効走査偏向角と一面あたりの回転角をそれぞれ表す. この場合, 有効走査時間  $T_e$  は以下のように表せる (式 3.11),

$$T_e = \alpha T_s. \quad (3.11)$$

したがって, 送信機が連続的にデータを出力すると, 受信データは間欠的になる [図 3.16(b)]. この問題に対処するために, 連続したデータサンプリングを達成できるパケットベースの信号構造を導入した. 図 3.16(c) は新しく導入したデータ構造と受信データを示している. 送信されたデータはパケットの単位に分割され, 各パケットは複数回送信される. パケットの理想的な長さは  $T_e/2$  である. これは, 受信機は少なくとも 1 つのパケットを確実に取得できることを意味する. 各パケットは, プリアンブル, パケット ID, ペイロードデータおよびポストアンブルからなる.

- ノイズ低減技術

屋外環境で通信を行うと, 撮影された画像には大量の雑音が含まれる. 既存の復調器では, 走査方向に直交する方向の画像の RGB 値の総和を計算することにより, 撮像画像を PWM パルスに変換している. したがって, 取得画像にノイズが含まれていると, 受信機は, PWM パルスが歪んでしまうためにデータを正しく復号することができない. したがって, 本システムは周囲のノイズに敏感である. この問題に対処するために, 周囲のノイズを物理的に避けるように受信機を暗い箱で覆った. 箱には, 送信信号を取り込むための穴 (または開口) がある. さらに, 開口部からの侵入するノイズを低減するために, イメージセンサのレンズに赤色の波長を通過するバンドパスフィルタを適用し

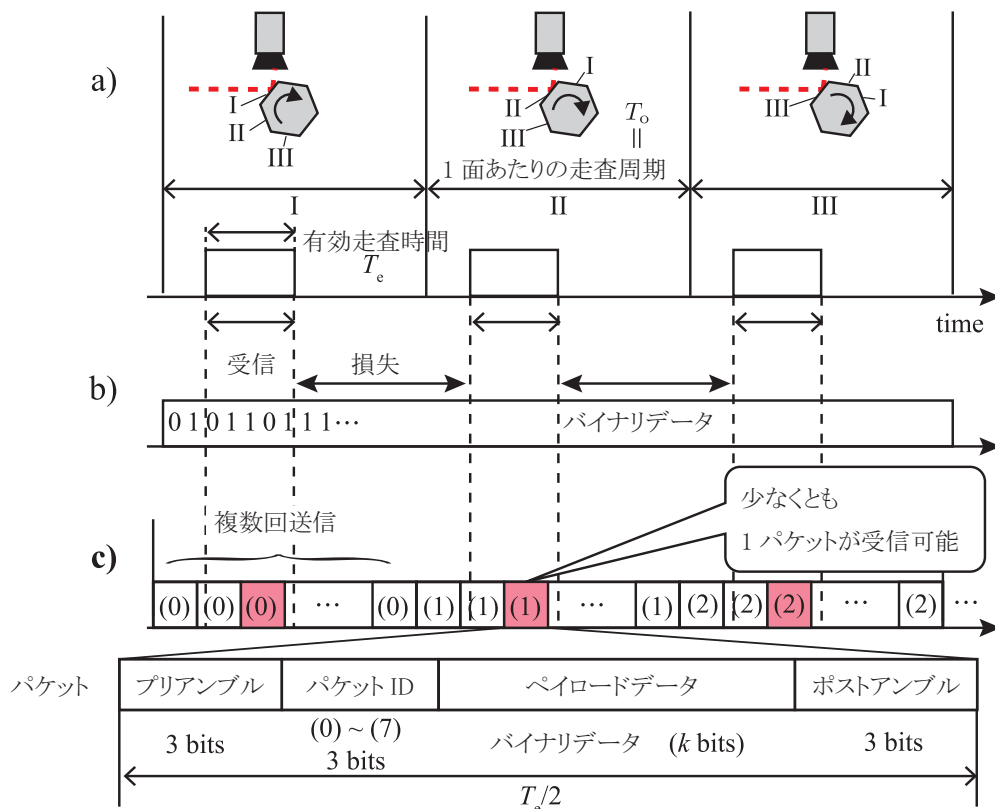


図 3.16: (a) ミラー一面あたりの走査周期,  $T_o$  と有効走査時間,  $T_e$  の関係; (b) 従来の提案システムにおける受信データ; (c) 提案するデータ構造と改良したシステムにおける受信データ

た. 本システムは, 自動車のテールランプを送信機として想定したため, 送信機の LED を赤色に選定している. 予備実験を行うことにより, 屋外環境での通信システムの使用には, 暗室箱とバンドパスフィルタの組み合わせが必要であると判断した.

### 3.5.2 実験条件

改良された通信システムの性能を実験で評価した. 図 3.17 に示すように, 送信機と受信機を作製した. カメラの仕様は表 3.1, 表 3.4 に実験パラメータをまとめる.

送信機は, マイクロコンピュータ (Arduino UNO) と赤色 LED (OS5RKA5B61P, OptoSupply) で構成されている. LED の直径は 5 mm, 輝度は 48,000 mcd, 半値角は 60 度であった. LED のシンボル周期  $T_b$  は  $300 \mu\text{s}$  であるため, 3.33 kHz で点滅する (100 Hz を超えると人間の目にはちらつきの影響はない [48]). データの変調では, 受信機側で屋外環境においても明確な受光を可能にし, 走査歪みの影響を克服するために, 長いパルスと短いパルスとの間に大きな差 (長パルスは短パルスよりも 5 倍長い) を設定した. 本実験では, 長パルスを符号の 1 ( $\frac{5}{7}T_b$ ),

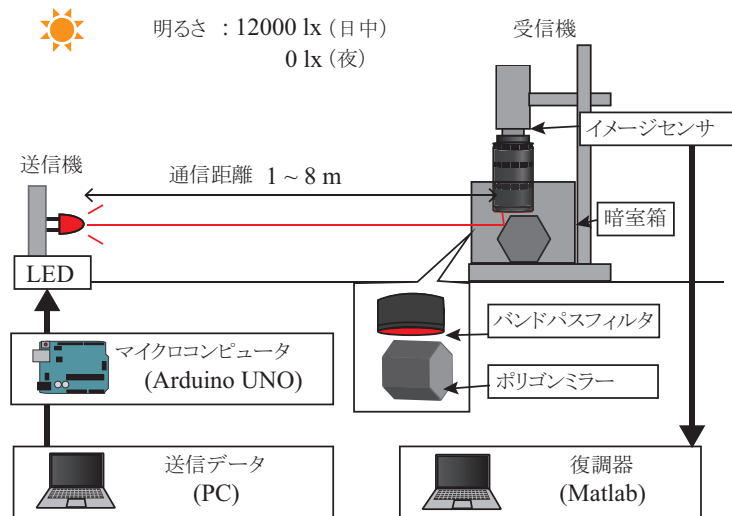


図 3.17: ベースバンド信号を用いる可視光通信システムにおける屋外の実験系

短パルスを符号の  $0 (\frac{1}{7}T_b)$  とした。送信されるパケットの中身のそれぞれの設定は、プリアンブルとポストアンブルを 3 bit (シンボル周期の 3 倍で点灯)、パケット ID を 3 bit、ペイロードデータを  $k = 7$  (bit) で実装した (図 3.16(c))。一つのパケットは 17 回繰り返し送信される。ペイロードデータは、パルス幅変調したランダムなバイナリデータである。

受信機は、ポリゴンミラー、バンドパスフィルタ、暗室箱、CCD イメージセンサ (XCG-V60E, SONY)、復調器としてのコンピュータで構成されている。ポリゴンミラーは、6 面、内接円直径  $\phi 25$ 、厚さ 40 mm であった。ポリゴンミラーとイメージセンサとの距離は 10 mm であった。この距離は走査長が最も長く撮像されるとき最短距離である。受信機は送信機の光学軸と位置合わせしている。CCD イメージセンサーに赤色波長 [575 ~ 700 (nm)] を通過させるバンドパスフィルタ (MC R1 SR-60 52 mm, Kenko) を取り付けた。この環境では、イメージセンサの露光時間は 1/12 sec で一定であった。取得画像は、ソフトウェア復調器によって処理され、受信されたバイナリデータは、送信されたバイナリデータと比較した。昼間と夜間の屋外での様々な通信距離での改善された通信システムの性能を評価した。昼夜の輝度はそれぞれ 12,000 と 0 (lx) であった。さらに、夜間に取得された 1 フレームからの平均輝度値を計算することによって、走査信号の信号の強度を計算した。図 3.19 は、撮影した画像の通信距離と相対輝度の関係を示している。図から分かるように、通信距離が長くなるほど LED 輝度が小さくなり、通信性能が低下することがわかる。このような環境で、通信距離を 1 から 8 (m) に変更して、パケット誤り率 (PER; Packet Error Rate) と BER を測定した。

表 3.4: ベースバンド信号を用いる可視光通信システムにおける屋外実験の実験パラメータ

LED のシンボル周期	300 $\mu$ s
回転速度	12.56 rad/s
露光時間	1/12 s
レンズの焦点距離	8 mm
レンズのピント	Infinity
F 値	11.0
レンズとポリゴンミラーの距離	10 mm
通信距離	1 ~ 8 (m)
撮影解像度	104 × 480
一面あたりの回転角と有効走査回転角の比	1/8
明るさ (日中/夜)	12000/0 (lx)

### 3.5.3 屋外環境での実験結果

- 背景光雑音の軽減

屋外環境で 1 m の通信距離を持つ通信システムの周囲雑音に対する頑健性を確認するために予備実験を行った。図 3.18 は屋外で撮影された画像の例を示している。夜間、昼間、ノイズ低減技術なしでキャプチャされた画像をそれぞれ、図 3.18(a), 3.18(b), 3.18(c) に示す。図 3.18(a) に見られるように、夜間では、ノイズ低減技術がなくても、破線を明確に得ることができることがわかる。一方、昼間では、本システムをノイズ低減技術なしで使用すると、送信されたデータを取得するのは困難であることがわかる [図 3.18(b)]。しかし、図 3.18(c) に示すように、改善された通信システムにノイズ低減法を適用すると、昼間においても、破線を明確に受光することができる。この結果、ノイズ低減法が背景光雑音に効果的であることを示唆している。

- データ損失の軽減

図 3.20 は屋外の実験結果を示している。これによって、改良された通信システムが、パケットベースの信号構造を採用することで、連続的にデータをサンプリングできることが明らかになった。さらに、送受信期間には同期信号を必要としないため、非同期にて、可視光信号を伝送することが可能になった。通信品質の評価として、PER (損失パケット数/パケット総数) によって、送信データがどれくらい連続して受信できているか、また、BER (パケットあたりのビットエラー数/パケットあたりの総ビット数) によって、受信したパケットデータにどれくらい誤りがないかを測定した。図 3.20(a) に示すように、改良された通信システムは、通信距離が夜間で 4 m のとき、十分な通信品質 (PER = 0 %, BER <  $10^{-3}$ ) を達成することが明らかになった。通信距離が 5 m を超えると、図 3.19 に示すように、走査信号の輝度値が小さいため、パルス波形を受光することが困難であった。一方、提案システムでは、図 3.20(b) に示すように、昼間でも 4 m で十分な通信品質 (PER = 0 %, BER <  $10^{-3}$ ) を達成していることがわかる。これは屋外環



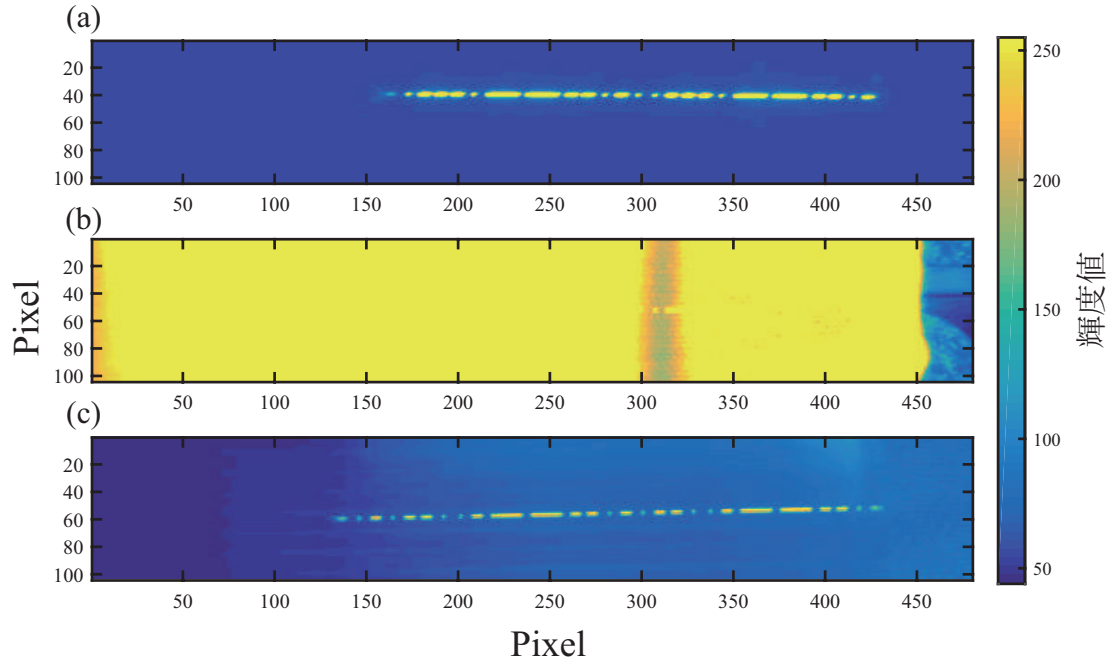


図 3.18: (a) 夜間における取得画像の例 (ノイズなし); (b) ノイズ低減法を用いたときの日中における取得画像の例と (c) ノイズ低減法を用いなかったときの日中における取得画像の例

境でのノイズの影響を低減して，可視光通信を実現できることを示している。

### 3.5.4 考察

この実験条件における通信速度  $R_{\text{exp}}$  は，式 (3.9) から，84 bps だった．これは，LED の個数ごとに同じイメージセンサを使用して比較したとき，既存の方式の 7 倍の速さである．前回実装した屋内向けの通信システムでは，既存の方式の 10 倍の通信速度に相当する，と評価したが，実際には，送受信機間に同期信号を有していたため，無線通信システムとしてはまだ確立していたとは言えなかった．しかしながら，専用の送信データ構造とノイズ低減方法によって，提案手法である光学スキャナとイメージセンサを用いる可視光通信システムは送受信機間を非同期で運用可能になった上，屋外環境で可視光通信を実施できたことから，本システムが可視光通信システムとして確立できたと言える．本実験では，解像点数の通信品

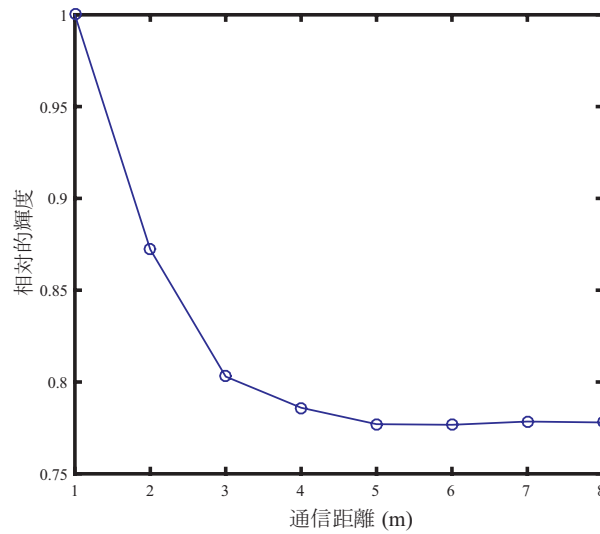


図 3.19: 夜間における取得画像の通信距離と相対的輝度の関係

質を調整した結果にて実施しているが、本設定がこのシステムの通信速度の限界であるとは言えない。パルス幅変調の設定や、他の変復調方式などを検討することで、1フレームあたりの受信ビット数を増やすことは可能であると考えられる。

本実験では、通信距離は5 m以上になると、PERが低下しているため、送信機のデータが連続して受信できていないことを示している。これは、本システムがパルス幅変調によって信号を変調していることに起因している。図 3.21 にパケットデータが欠損した取得画像の例を示す。取得画像は長短のパルスによる走査で構成されている。短いパルスは長いパルスよりも輝度が小さくなってしまふ。これによって、通信距離が大きくなると、パケットの中身が欠損し始めてしまふ。ゆえに、変調方式の0/1の輝度の大きさの比率が偏ることは、通信品質の低下を招くことを意味する。ゆえに、パルス幅変調によるシステムは長距離通信には向いていないと言える。さらに、パルス幅変調のようなベースバンド変調方式は情報そのものを含む信号を表現しているため、背景光雑音の干渉が生じると、元の送信信号に影響が出やすい。図 3.22 にパケットデータに背景光雑音が干渉したことによって、データの一部が変形してしまった例を示す。よって、通信品質の向上のためには、パルス幅変復調方式以外の方法を導入することを検討する必要がある。

### 3.6 まとめ

本章では、光学スキャナとイメージセンサを利用する可視光通信システムを設計した。まず、光学系（発光素子、光学スキャナ、および、イメージセンサ）に必要な条件を整理した上で、実際に送信機と受信機を構築し、最も基本的な変復調方式である PWM (Pulse width

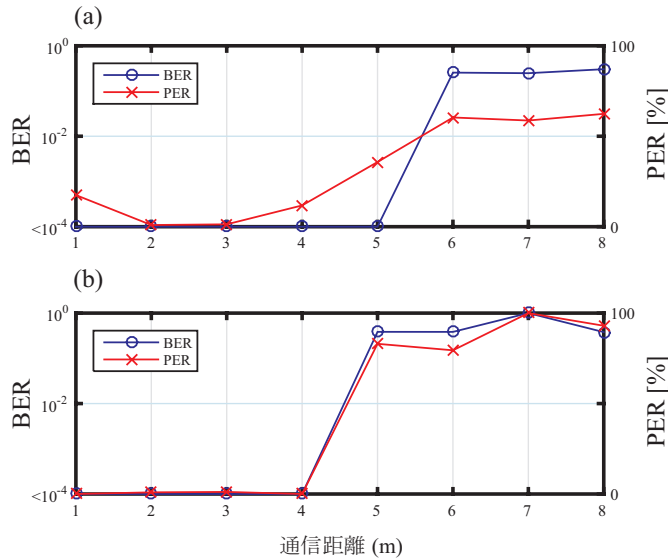


図 3.20: (a) 夜間における通信距離と PER, BER の関係 (b) 日中における通信距離と PER, BER の関係

modulation) を用いて通信システムの性能評価実験を屋内環境, 屋外環境それぞれで実施した。そして, 実験の結果, 屋外環境での運用に適した信号変復調方式や, データ伝送方式などの周辺技術が, 提案システムには不可欠であることを明らかにした。

前半では, 本システムは光学スキャナを用いることでイメージセンサに取得する 1 フレーム当りの可視光信号のシンボル数を増加させられることを光学的な視点から解説した。さらに, 本システムが効率よく可視光信号を受信するためには, 送受信機間の各パラメータの関係性について検討する必要があることを理論的に示した。そして, 実際に実装したシステムを用いて, これらの予測を屋内環境実験によって検証した。これにより, ポリゴンミラーの走査周期とイメージセンサの露光時間を一致させることで一フレーム当り最も効率よく受信できること, 通信速度はポリゴンミラーの回転速度と送信機のシンボル周期で制御できること, そして, 解像度が大きければ解像点数が大きくなり, 解像点数が大きくなると通信速度が大きくなるが, 通信品質が下がることを実験的にも明らかにした。さらに, 本システムの通信性能を評価したところ, 本システムは既存システムであるイメージセンサのみの可視光通信システムと比べて, 1 フレームあたり 10 ビット受信できることから, 10 倍の通信速度を実現できることを示した。

後半では, 本システムを屋外環境において運用することを検討した。従来の本システムには, 送受信機間の同期を前提にした設計が必要であること, また, 背景光雑音対策が検討されていないことの二つの問題があったことから, 問題の改善を目的に本システムの改良をした。非同期なシステムを構築するために, 連続データサンプリングのためのデータ構造を導入し, 背景光雑音には, 受信機に暗室箱とバンドパスフィルタを追加した, これらのシステ

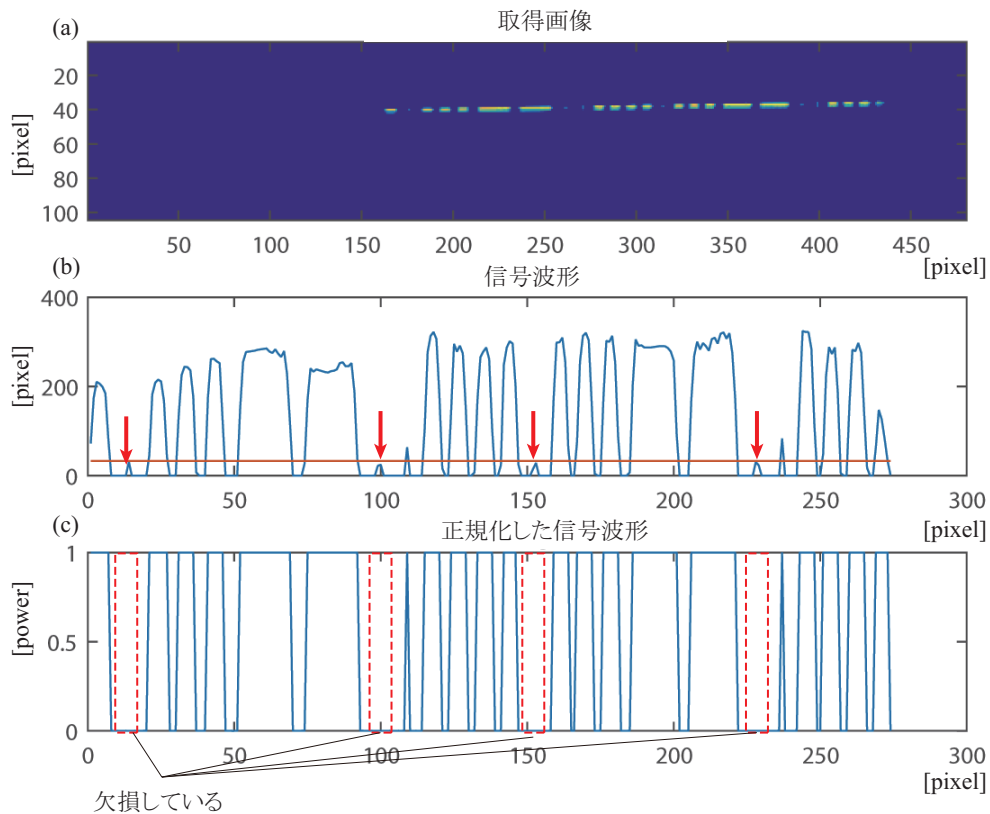


図 3.21: パケットデータが欠損した取得画像の例. (a) は取得画像, (b) は取得画像中の走査信号を波形変換した波形, (c) は (b) の波形をしきい値によって二値化した波形

ムデザインをもとに, 改良後のシステムの通信性能を屋外実験によって検証した結果, 改良後のシステムは, 送信機と受信機との間の同期なしに, 屋外環境において十分な品質で高速通信を達成できたことを示した. この時点での, 通信速度は, 既存のイメージセンサのみの可視光通信システムと比較して, 1 フレームあたり 7 ビット受信できることから, 7 倍の通信速度を屋外環境において実現できたといえる.

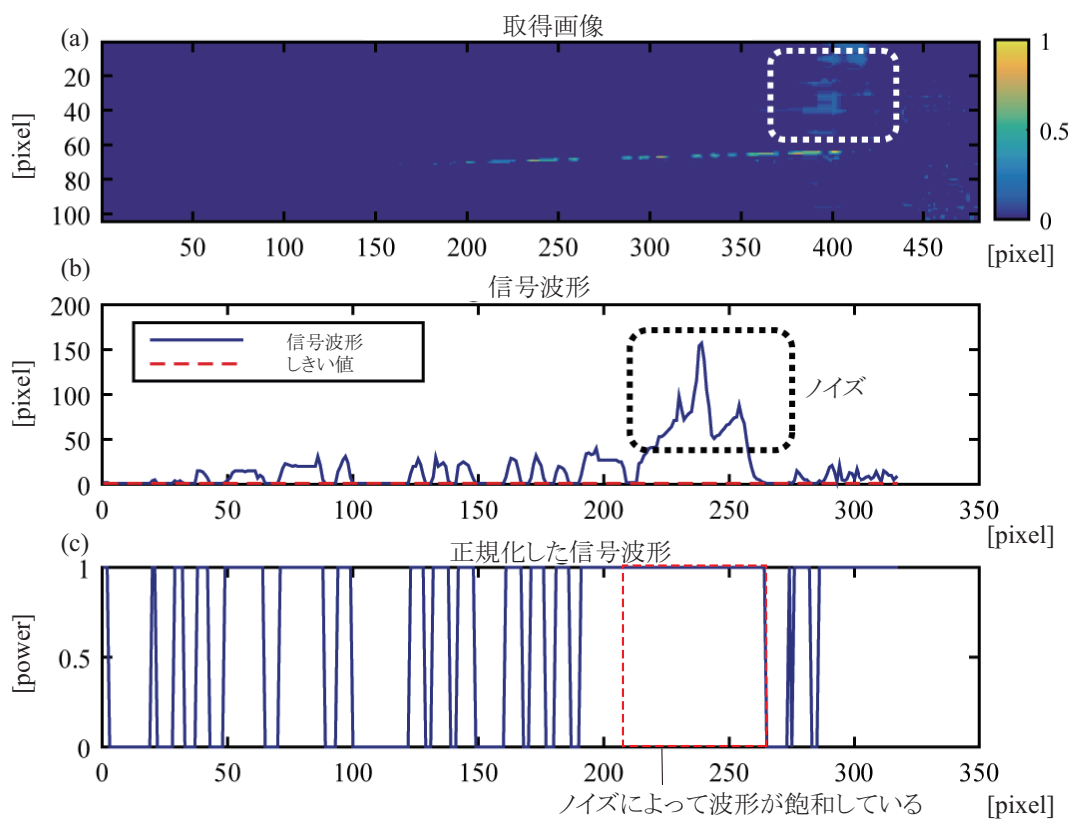


図 3.22: パケットデータにノイズが干渉したときの取得画像の例. (a) は取得画像, (b) は取得画像中の走査信号を波形変換した波形, (c) は (b) の波形をしきい値によって二値化した波形

## 第4章 ブロック伝送とパスバンド信号を用いる通信システムの構築と性能評価

### 4.1 はじめに

第3章では、ベースバンド変調方式を導入したシステムを実際に構築し、屋外環境での運用に適した方式の検討を行った。第4章では、別の方式から屋外環境の運用方法を検討する。これにより、ブロック伝送とパスバンド信号を組み合わせた方式が、より屋外環境においてすなわち離れた方式であることを明らかにする。そして、実際にそれらを可視光通信システムとして実装し、屋外実験を踏まえて、提案システムが一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ、高速な変調光に対応可能で、かつ、遠距離に存在する情報源との通信を実現できることを明らかにする。

### 4.2 屋内におけるパスバンド変復調方式によるシステムデザイン

はじめに、光学スキャナとイメージセンサを用いる可視光通信システムにパスバンド信号を導入させたシステムを設計する。屋外環境においての可視光通信を検討する際、パスバンド信号を用いる通信システムが第3章で設計したベースバンド信号を用いるものよりも優れた方式であることを検証するために、導入として屋内環境において性能を確認する。従来のベースバンド信号を用いるシステムのままでは、(1) 信号検出、および(2) 信号復調の2つの問題のために、屋外環境においては、通信システムとしての運用が困難である。

#### (1) 信号検出段階の問題

著者の通信システムでは、信号とノイズの両方がポリゴンミラーで走査され、イメージセンサによって取得される。ノイズには大きく分けて二種類存在し、線状のノイズと、面状のノイズが有る。線状ノイズは送信機とは別の光源が受信機で走査された時に生じる事が多い。ここで言う光源とは、街灯や照明など、変調を施していない物を指す。面状ノイズとは、明るい環境において、受信機の開口部から入射したすべての光が走査されることで、取得画像を明るくするノイズを指す。しかし、走査されたPWM信号と線状ノイズの両方が0 Hzの中心周波数を有する。したがって、システムは信号とノイズを分離することができず、信号検出に失敗する(図4.1(1) 信号検出)。

#### (2) 信号復調段階の問題

光学スキャナを用いる通信システムが信号をうまく検出できたとしても、信号の復

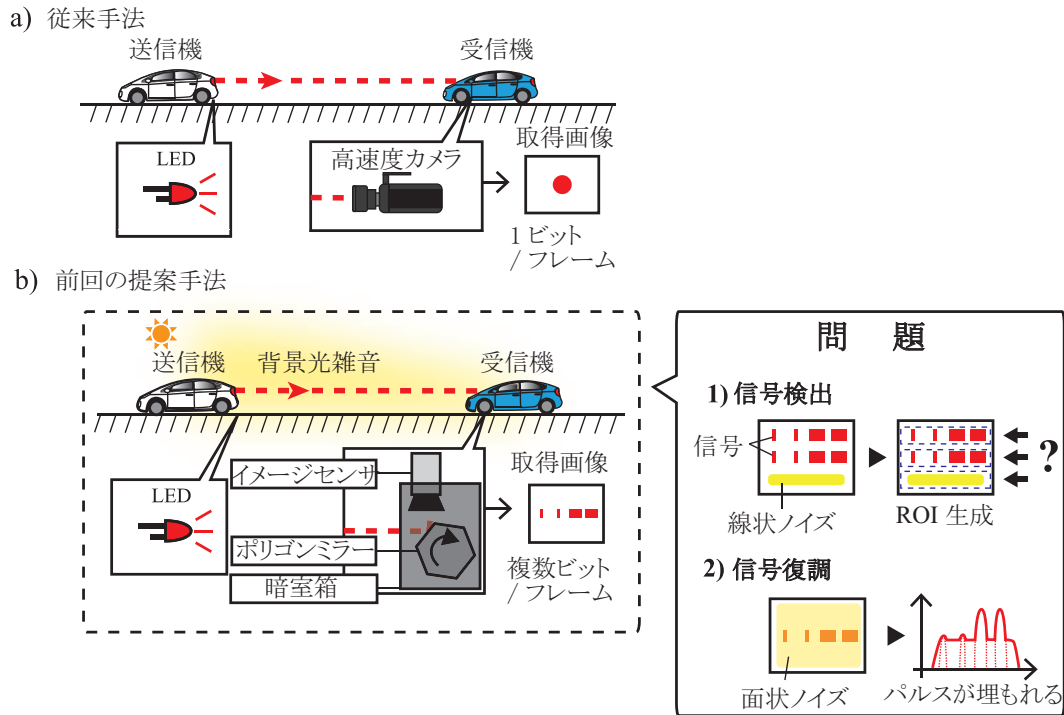


図 4.1: (a) 既存のイメージセンサを用いる通信システムの概観, (b) 従来の光学スキャナを用いる PWM 変調を用いる通信システムの概観

調は依然として課題である。このシステムでは、受信機はパルス幅を測定することによって取得画像をバイナリデータに変換する。したがって、パルス間で十分な輝度差が必要となる。しかし、(1)で説明したように、走査されたノイズの表面は中心周波数が  $0\text{ Hz}$  であるため、パルス内の輝度の差が小さくなり、通信品質が劣化する (図 4.1(2) 信号復調)。

これらの問題に対処するため、本システムが中心周波数、数十  $\text{kHz}$  の通過帯域信号をサポートできるように改良をした。著者の通信システムはパスバンド信号と互換性があることから、パスバンド信号の特徴である、特定の空間周波数帯域において、ピークを持つ送信信号を利用できる。この性質を利用すれば、送信信号と線状ノイズの違いが判別できるため、簡単に検出することができる。また、生成するパスバンド信号は符号間に周波数や位相の違いがあるだけで、輝度の大きさの違いはほとんどない。よって、面状ノイズに埋もれるなどの送信信号の輝度が小さくなる状況においても、信号の復調が容易になる。

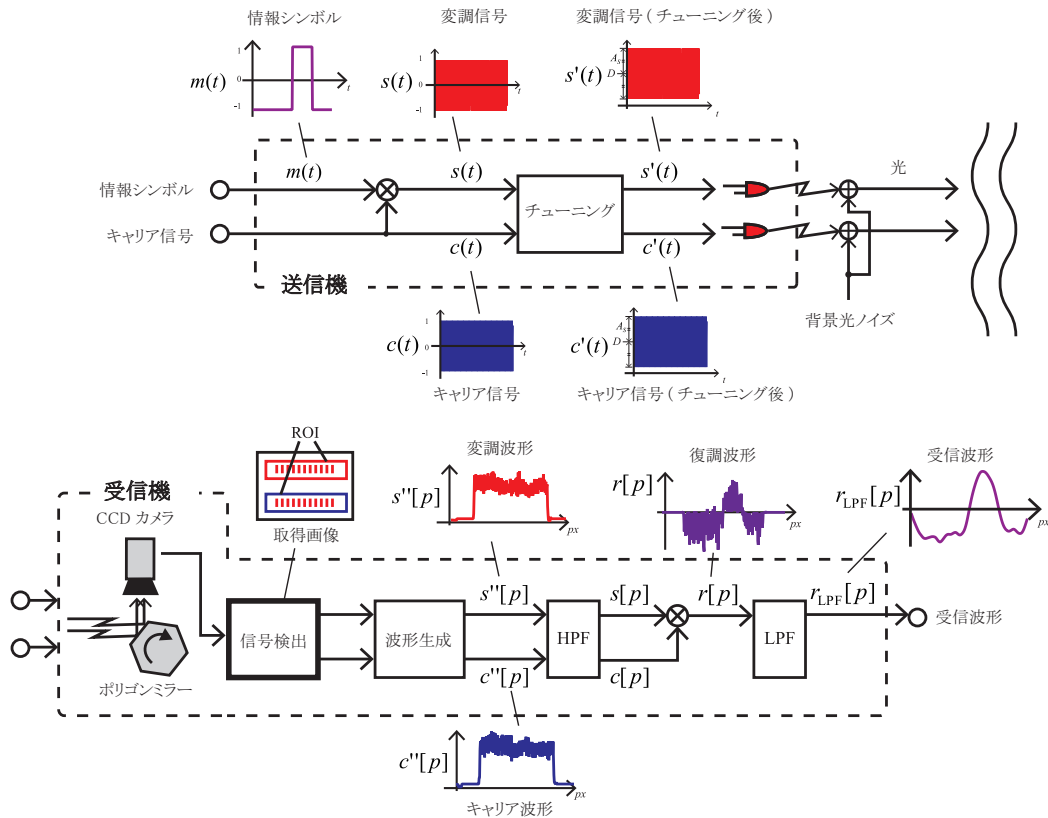


図 4.2: BPSK-可視光通信システムのブロックダイアグラム

#### 4.2.1 送信機

図 4.2 (左側) に送信機の構成を示す。送信機は、入力情報をパスバンド変復調方式の一つである、BPSK (Binary-Phase shift keying) で変調する。変調信号  $s(t)$  は、下記のように表せる (式 4.1)。

$$s(t) = \text{Re}\{m(t) \exp(j2\pi f_c t)\} \quad (0 < t \leq T_e) \quad (4.1)$$

$m(t)$ ,  $f_c$ ,  $T_e$  は、それぞれシンボル情報 (-1 or 1 in BPSK), 搬送波周波数, そして, 有効走査時間を示す。搬送波周波数  $f_c$  は  $f_{\text{eye-max}}$  と  $f_{\text{cam-max}}$  (kHz) の間で設定される。  $f_{\text{eye-max}}$  と  $f_{\text{cam-max}}$  は人間の目がちらつきを感じる限界の周波数 (約 100 Hz [48]), もう一方は, ポリゴンミラーによる走査の制限周波数である。有効走査時間  $T_e$  は, 信号の走査長を示す。  $T_e$  は次のように表される:  $T_e = k \times T_b$ 。ここで,  $k$  と  $T_b$  はシンボルの数, シンボル周期を示す。この BPSK 信号  $s(t)$  は, チューニングブロックでオフセット  $D$  に加算される。これは, LED が正電圧のみを扱うためである。さらに, オフセット付加信号は, LED 特性の影響を打ち消すために, チューニングブロックで振幅  $A_n$  で非線形に増幅される (LED の入力電圧と輝度の間に非線形特性があるため)。最後に, オフセット付加および非線形増幅信号が LED から出



力される。  $s(t)$  に加えて、オフセット付加された非線形増幅キャリア信号も別の LED から同時に出力されるので、復調器は信号復調に搬送波を容易に利用することができる。キャリア信号  $c(t)$  は、次のように表せる (式 4.2)。

$$c(t) = \cos(2\pi f_c t) \quad (0 < t \leq T_e). \quad (4.2)$$

したがって、2つの LED によって出力された信号  $s'(t), c'(t)$  は、以下のように表せる (式 4.3)。

$$\begin{cases} s'(t) = A_n s(t) + D \\ c'(t) = A_n c(t) + D. \end{cases} \quad (4.3)$$

## 4.2.2 受信機

図 4.2 (右側) に受信機の構成を述べる。次項にて、受信機における信号処理を説明する。

### 信号走査と取得

LED からの入射光は、ポリゴンミラーによって回転速度、 $\omega$  で走査され、露光時間  $T_s$  のイメージセンサによって取得される。回転速度  $\omega$  は一定であるので、入射光の反射角は時間とともに変化し、イメージセンサによって取得された光の位置も変化する。その結果、イメージセンサは、高速に点滅する光を破線として検出することができる。回転速度、 $\omega$  と露光時間  $T_s$  は式 (3.3) のように同期しなければならない。そして、LED から出力された2つの信号  $s''[p], c''[p]$  は、走査された画像上で次の式で表すことができる (式 4.4)。

$$\begin{cases} s''[p] = s[p] + n[p] \\ c''[p] = c[p] + n[p], \quad (p = 0, 1, 2, \dots, P_{\max}), \end{cases} \quad (4.4)$$

$p$  と  $P_{\max}$ ,  $s[p], c[p], n[p]$  はそれぞれ、画像上のピクセル指標、ピクセル最大サイズ、変調信号、キャリア信号、そして、雑音信号である。キャプチャされた画像上の信号の長さ  $s''[p]$  と  $c''[p]$  は、最大ピクセルサイズ、すなわち、カメラの視野 (FOV; Field of view) で決まる。

### 信号検出

取得画像は、信号検出器によって処理される。これは、走査された信号の位置を検出して、取得画像から関心領域 (ROI; Region of Interest) を生成する。BPSK 復調器は、走査方向に直交する方向の画像の RGB 値の合計を計算することによって、ROI 画像を波形に変換する。

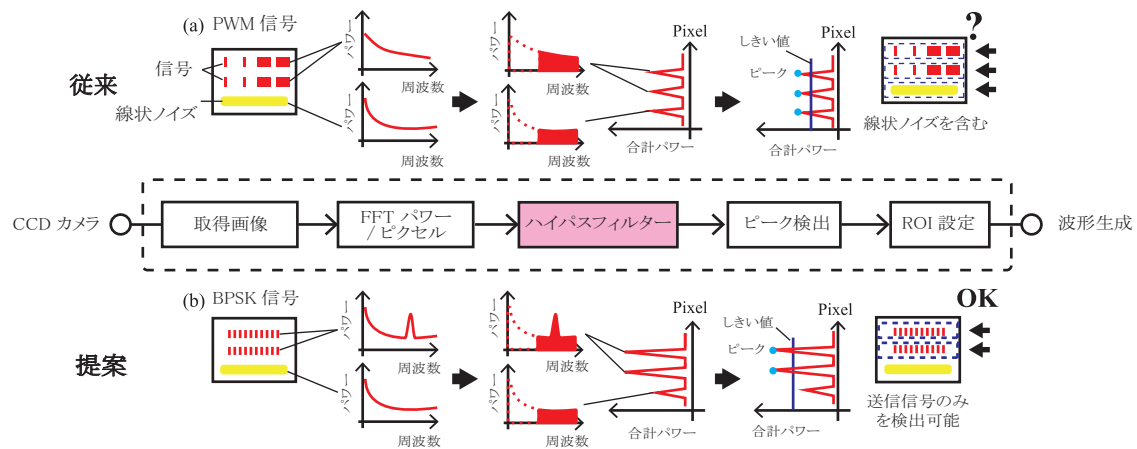


図 4.3: 信号検出のシステムブロックダイアグラム; (a) 上部は PWM 信号のフロー, (b) 下部は BPSK 信号のフロー

### 信号復調

復調するために、変調波形は搬送波波形と乗算される。まず、変調信号と搬送波波形の両波形にハイパスフィルタ (HPF; High pass filter) を適用してオフセットノイズを除去する。そして、以下のように乗算により復調波形  $r[p]$  が生成される (式 4.5)。

$$r[p] = s[p]c[p] = \frac{1}{2}m[p]\{1 + \cos[4\pi f_c p]\}, \quad (4.5)$$

$m[p]$  は取得画像中のシンボル情報を表す。さらに、キャリア信号成分を除去するために、ローパスフィルタ (LPF; Low pass filter) を変調波形に適用する。抽出されたシンボル情報  $r[p]_{\text{LPF}}$  は次のように表せる (式 4.6)。

$$r[p]_{\text{LPF}} = \frac{1}{2}m[p]. \quad (4.6)$$

結果、BPSK 変調器はシンボル情報から受信データを出力する。

### 4.2.3 提案システムの特徴

著者の通信システムは、イメージセンサがパスバンド信号を扱うことができるという独特の特徴を有する。これは、イメージセンサがポリゴンミラーによって得られた画像中の時系列情報を得ることができるためである。したがって、本システムは、レベル変動に強いパスバンド変復調方式を利用することができる。さらに、イメージセンサは複数の光源を取り込むことができることから、送信機の LED を増やすことで、データレートの増加や、エラー訂正の強化にも応用が可能である。

## 信号検出

著者の以前のシステム(第3章におけるベースバンド信号を用いる通信システム)は、取得画像中の変調信号に周囲のノイズが含まれたときに、復調器が変調信号を識別できないという問題があった。したがって、復調器は変調信号のみを検出する必要がある。復調器は、走査方向の画像のRGB値の和を計算することによって信号の位置を検出することができる。ただし、走査されたPWM信号とノイズ信号の中心周波数はいずれも0 Hzである。したがって、通信システムは信号とノイズの走査線を分離できず、信号検出に失敗する。

一方、パスバンド信号を用いるシステムでは、変調信号と雑音信号の間に異なる周波数成分があることを利用する。変調されたキャリア信号は、走査方向に対して高い周波数を有する。雑音信号は、走査方向に対するDC成分の周波数を有する。このようにして、HPFを通過する変調信号のみを検出することができる。図4.3は信号検出器の処理プロセスを示している。まず、走査方向に高速フーリエ変換(FFT; fast Fourier transform)により、取得画像の各画素ラインを算出する。次に、これらの値はHPFを通過する。PWM信号[図4.3(a)]では、送信信号はノイズのように周波数が低くなる。したがって、HPFはノイズ信号をほとんどカットできないため、雑音信号をカットすることはできない。一方、BPSK信号[図4.3(b)]では、送信される信号の周波数はノイズよりも高くなる。これらの信号がHPFを通過すると、ノイズのパワーが減少する。次に、ピーク検出の段階でしきい値を使用して送信信号の位置のみを検出することができる。最後に、取得画像からROIを正常に生成することができる。

## シンボル判別

ベースバンド信号を用いる通信システムが信号をうまく検出できたとしても、信号の復調は困難である。ベースバンド信号を用いる通信システムでは、受信機はパルス幅を測定してPWM画像をバイナリデータに変換する。したがって、パルス間に十分な輝度差が必要である。しかし、走査された面状ノイズの場合は、0 Hzの中心周波数を有し、PWM信号のパルス間の輝度差を埋めてしまう。したがって、面状ノイズが含まれた場合には、受信機は、シンボルを閾値で判別することができなかった。対照的に、BPSK変調信号は、0 Hzから離れたキャリア周波数を有する。これは、受信機が変調信号を周囲雑音から分離できることを意味する。したがって、パスバンド信号を用いる通信システムでは、ベースバンド信号を用いるものよりも、信号復調が容易になる。

## 4.3 屋内実験による性能評価

### 4.3.1 実験条件

実験で提案したパスバンド信号を用いる通信システムの性能を評価した。比較のために以前のベースバンド信号を用いる通信システムも使用した。表3.1はカメラの仕様を、表4.1は実験パラメータを示す。送信機は、A-Dコンバータ(NI USB-6212, National Instruments)と2

個の赤色 LED (OS5RKA5B61P, OptoSupply) で構成されている。LED は直径 5 mm, 輝度は 48000 mcd, 半減角は 60 度であった。ペイロードデータは, BPSK 変調されたランダムバイナリデータであった。搬送波周波数は 15 kHz であり, シンボル周期は 1/1000 s であった。LED で BPSK などのアナログ変調を使用する場合, 輝度の非線形特性を考慮する必要がある。まず, オフセットと振幅の中心電圧をそれぞれ 1.9 と 0.2 (V) に設定する。LED は負ではないパルスを生成するためである。このピーク電圧には, 輝度の線形特性が含まれている。そして, 取得画像は, 飽和することなく BPSK 波形を有する。一方, ベースバンド信号を用いる通信システムの PWM 変調では, 受信機側での明確な検出を可能にするために, ポリゴンミラーによる走査歪みの影響を打ち消す程度に, 長いパルスと短いパルス(長いパルスは短いパルスの 3 倍長い)の間に大きな差を設定している [40]。PWM 変調のシンボル周期は 1/1000 s, 長パルスは 3/5000 s, 短パルスは 1/5000 s であった。PWM における復調は, PWM 信号を二値化するために閾値を利用した。閾値はピーク値の半分であった。次に, 復調器は, パルス幅を測定することによってシンボルを識別する。

受信機は, ポリゴンミラー, CCD イメージセンサ (XCG-V60E, SONY), 復調器としてのコンピュータで構成されている。ポリゴンミラーは 6 面, 内接円直径,  $\phi 25$ , 厚さ 40 mm である。ポリゴンミラーとイメージセンサとの距離は 10 mm であった。反射された光をカメラが捕らえることができる 1 面あたりの角度範囲は, 事前測定したところ,  $\pi/12$  であった。作製した送信機と受信機を用いて, 以下のように可視光通信実験を行った。送信機と受信機の両方は, 固定された状態で暗室に設置されていた。受信機は送信機の光学軸と位置合わせされていた。通信距離は 1000 mm であった。この環境では, イメージセンサの露光時間は 1/20 s で一定であった。取得画像は, ソフトウェア復調器によって処理され, 受信されたバイナリデータは, 送信されたバイナリデータと比較した。実験では, 送信データをパケットに分割し, 各パケットの送信とカメラシャッターの動きをポリゴンミラーの回転と同期させた(ミラー上に光学式エンコーダを置いて回転を検出する)。1 つのパケットには, 比較のために, BPSK および PWM, それぞれ 4 つのシンボルを含んでいる。本実験では, 送信機に変調信号用の LED とは別に, キャリア信号用の LED も用意している。これにより, 得られるデータレートは LED2 つ分によるものとなるため, LED 一つあたりのデータレートは半分となる。

### 4.3.2 信号検出の確認

パスバンド信号を用いる通信システムがベースバンド信号を用いる通信システムよりも, 取得画像内の送信信号のみを検出できることを示す。まず, PWM および BPSK 送信信号からの取得画像を使用した。また, ノイズ画像を用意した。ノイズ画像は LED を点滅させずに, 点灯を続けることで生成した。これにより, ノイズ画像として実線上の走査信号が生成される。次に, 2 つの送信された信号画像をノイズ画像と加算させる。ノイズを含むこれらの画像から, どちらが送信信号を識別しやすいかについて比較した。PWM 信号画像の解析を図 4.4 に示す。図 4.4 (a), (b), (c), (d), (e), (f) はそれぞれ, PWM 信号と線状のノイズ画像, HPF(15 kHz) を通過後, 垂直位置に平行に計算された PWM 信号画像の合計パワー, 列 ( $i = 116$ ) におけるノイズ信号のパワースペクトル密度 (PSD; Power Spectral Density Function), 列 ( $i = 206$ ) にお

表 4.1: パスバンド信号を用いる可視光通信システムにおける屋内実験の実験パラメータ

回転速度	20.94 rad/s
露光時間	1/20 s
レンズの焦点距離	8 mm
レンズのピント	Infinity
F 値	2.0
レンズとポリゴンミラーの距離	10 mm
通信距離	1000 mm
撮影解像度	640 × 480
カメラが取得できる反射光の一面あたりの角度	$\pi/12$

ける信号のない PSD, 列 ( $i = 330, 362$ ) における PWM 信号の PSD を示す. 水平ピクセル数  $i$  の範囲は  $0 \sim 639$ . サンプル周波数は  $45 \text{ kHz}$  であった. 図 4.4(d) は図 4.4(e), (f) と同様であることが分かった. これは, PWM 信号が周波数のノイズ信号に類似していることを意味する. しかし, 図 4.4 (a) のように HPF ( $15 \text{ kHz}$ ) を通過した場合, 図 4.4 (d) と (e) のように各信号の低周波成分がカットされてしまう. したがって, 図 4.4 (b) に示すように, HPF を使用しても PWM 信号のみを判別することは困難である. 一方, BPSK 信号画像の解析を図 4.5 に示す. 図 4.5 (a), (b), (c), (d), (e), (f) はそれぞれ, BPSK 信号と線状のノイズ画像, HPF ( $15 \text{ kHz}$ ) を介して垂直位置に平行に計算された BPSK 信号画像の合計パワー, 列 ( $i = 206$ ) におけるノイズ信号の PSD, 列 ( $i = 206$ ) における信号のない PSD, 列 ( $i = 295$ ) におけるキャリア信号の PSD, および列 ( $i = 327$ ) における BPSK の PSD を示す. キャリア信号と BPSK 信号は高周波成分を有する (図 4.5 (e), (f)) 一方で, 図 4.5 (d) に示すように, 雑音信号は, ほぼ直流成分のような性質を有することが分かった. 次に, 図 4.5 (a) で HPF ( $15 \text{ kHz}$ ) を通過した場合, 図 4.5 (d), (e), (f) に示すように, すべての信号の低周波成分がカットされた. したがって, BPSK 変調された信号は PWM 信号よりも高いパワーピークを有することも分かった (図 4.5 (b) と図 4.4 (b)). これは, BPSK 変調信号が PWM 信号よりも検出しやすいことを示している.

### 4.3.3 符号識別の確認

パスバンド信号とベースバンド信号を用いる通信システムを比較するためにノイズのパワーを変更して BER を測定した. 面状のノイズ画像は信号画像に加算することによって生成した. これらの画像は, ノイズ画像の強度を変えることによって変換した. 環境ノイズ源として白熱灯を使用した. 白熱灯は送信機の近くに設置し, 事前にランプを点灯させてノイズのみの画像を得た. この面状ノイズの大きさは, 走査された信号よりも大きかった. SNR は走査信号と線状ノイズとの比で定義した. 走査信号は, 最初に取得した画像にて計算した. 線状ノ

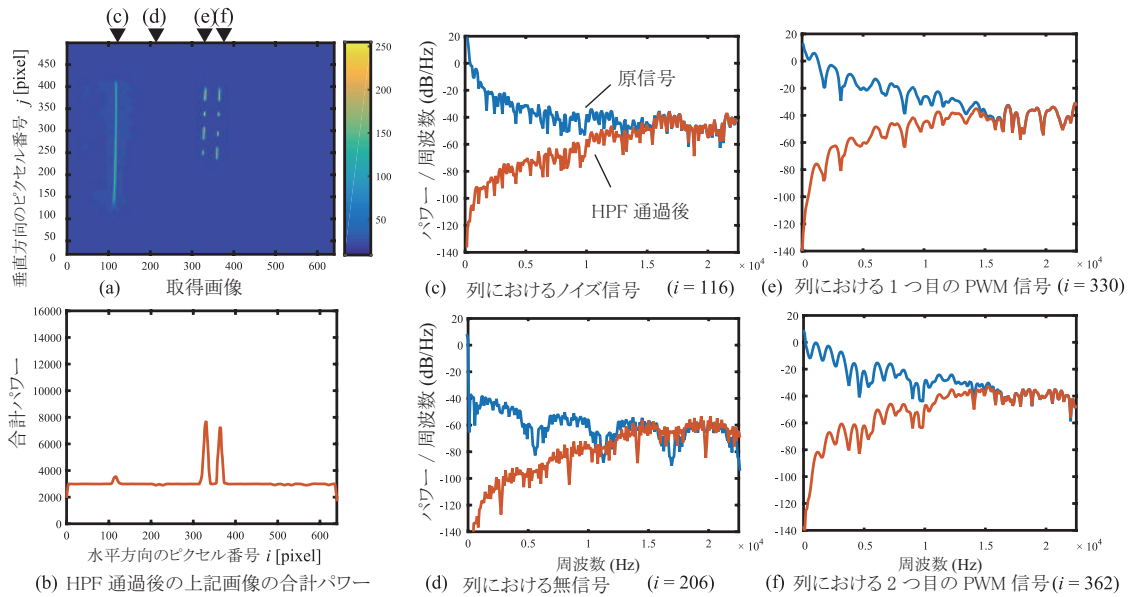


図 4.4: PWM 信号画像の分析 (a) PWM 信号と線状のノイズ画像, (b)HPF (15 kHz) を通過後, 垂直位置に平行に計算された PWM 信号画像の合計パワー, (c) 列 ( $i = 116$ ) におけるノイズ信号のパワースペクトル密度 (PSD), (d) 列 ( $i = 206$ ) における信号のない PSD, (e), (f) 列 ( $i = 330, 362$ ) における PWM 信号の PSD, 水平ピクセル数  $i$  の範囲は 0~639, 青色のグラフは原画像からの PSD で, オレンジ色のグラフは HPF を通過した画像からの PSD

イズは, 元の撮影画像からノイズが付加された元の取得画像を減算することによって計算された. 図 4.6 は, 2 つの変調信号における SNR と BER の関係を示している. この結果から, パスバンド信号を用いる通信システムが通信品質においてベースバンド信号を用いる通信システムより優れていることがわかる. 図 4.6 に示すように, パスバンド信号を用いる通信システムの性能は, ベースバンド信号のものよりも約 20 dB 程度優れていることが分かった. この結果は, パスバンド信号の方が, 変調波形をノイズ波形から分離することが容易であったことから, 通信品質が低下しづらかったことが考えられる.

一例として, 図 4.7 は, ベースバンド信号とパスバンド信号を用いる両システムにおいて面状ノイズが付加されたときの取得画像をどのように処理しているかを示す. ベースバンド信号を用いる通信システムでは, PWM のパルス信号が面状のノイズで覆われているため, 復調器はしきい値でシンボルを判別することは困難である. 一方, パスバンド信号を用いる通信システムは, 変調信号とキャリア信号が面状ノイズで覆われていても, 変調信号とノイズの中心周波数の違いから, HPF に通過させることで, 容易にノイズを取り除くことができる. よって, 後は, 変調信号とキャリア信号を乗算し, LPF を通過させることで, 復調信号が生成できる. これにより, シンボルがノイズによって判別困難になることはない. さらに, パスバンド信号では, ノイズによってシンボルが反転することもない. PWM のようなベースバ

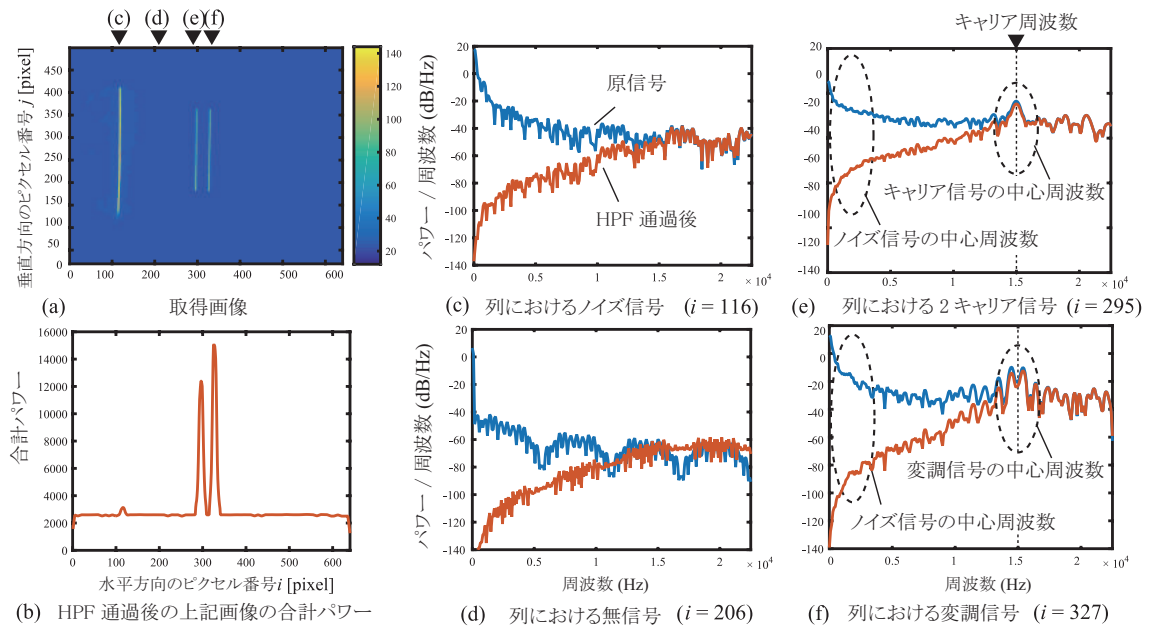


図 4.5: BPSK 信号画像の分析 (a) BPSK 信号と線状のノイズ画像, (b)HPF (15 kHz) を介して垂直位置に平行に計算された BPSK 信号画像の合計パワー, (c) 列 ( $i = 206$ ) におけるノイズ信号の PSD, (d) 列 ( $i = 206$ ) における信号のない PSD, (e) 列 ( $i = 295$ ) におけるキャリア信号の PSD, および (f) 列 ( $i = 327$ ) における BPSK の PSD, 水平ピクセル数  $i$  の範囲は 0~639, 青色のグラフは原画像からの PSD で, オレンジ色のグラフは HPF を通過した画像からの PSD

ンド信号に局所的なノイズが付加された場合, 短いパルスが長いパルスになってしまう恐れがある. 一方で, パスバンド信号では, 局所的なノイズが発生しても, 上記のように, HPF によって, 変調信号とノイズが分離できることから, 符号誤りにも繋がりにくい.

### 4.3.4 考察

パスバンド信号を本システムに導入することで, 送信信号の時系列情報をイメージセンサの空間情報にマッピングできる, 光学スキャナの特徴をそのまま活かしながらも, ノイズとの中心周波数の違いを利用できることから, 送信信号の検出, 及び, 符号識別にも優れることが明らかになった. 本実験では, パスバンド信号として最も基本的な BPSK 方式を採用したが, 理論的には PSK (Phase Shift Keying), QAM (Quadrature Amplitude Modulation) のようなデジタル変調も可能である. BPSK から QPSK (Quadrature Phase shift Keying) にすれば 1 シンボルで 4 値, 16QAM では 16 値のように, 通信速度を向上できると考えられる. しかしながら, 周波数や振幅, 位相それぞれをより細かく変化させる場合, 走査信号も同様に緻密にする必要がある. 走査信号の分解能はポリゴンミラーの回転速度と送信機の送信周期による解像点数に左右されるが, それよりも, 走査信号がマッピングされるイメージセンサの画素数が限界値となることを忘れてはならない. 実際に安定して有効に使える画素数は, 現在の

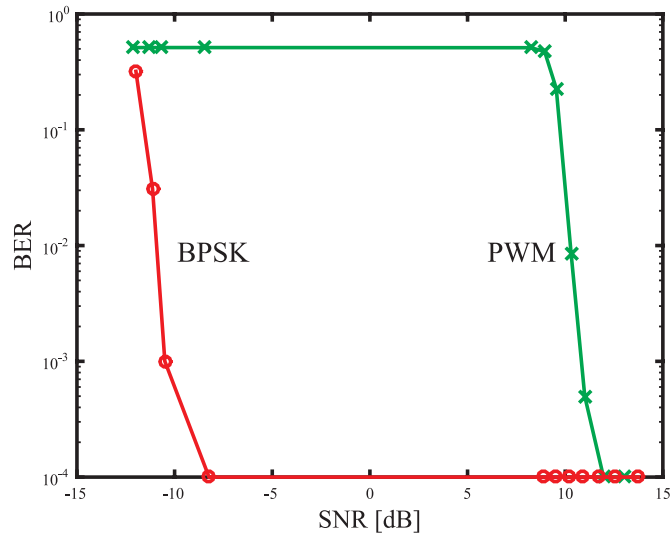


図 4.6: SNR と BER の関係

条件では長さ 100 pixel 程度であることから、100 点のサンプリング数による波形でどこまで詳細に周波数や振幅、位相を表現できるかは見極める必要がある。逆に言えば、より高度なデジタル変調を検討する場合は、画素数の大きなイメージセンサが必要になる。また、今回実装したパスバンド信号を用いたシステムはキャリア信号を生成するためにもう一つ送信機を必要としていた。これによって、実効データレートは LED1 個あたりで換算すると、半分になってしまう。1 つの LED でも搬送波再生は可能であるが、実際に設計している中では、1 つの LED からの搬送波再生では安定して復調が困難であることから、もう一つキャリア信号専用の送信機が必要になった。故に、データレートをできるだけ下げないためには、搬送波再生を必要としない DPSK (Differential Phase Shift Keying) の方が適していると考えられる。

#### 4.4 屋外におけるパスバンド変復調方式によるシステムデザイン

パスバンド信号を本システムに導入することで、ベースバンド信号を用いるシステムよりも信号検出、復号の両面において優れていることが明らかとなった。これによって、光学スキャナとイメージセンサを用いる可視光通信システムを屋外環境でも運用するにはパスバンド信号が必要であることが明らかになった。パスバンド信号による本システムのシステムデザインを改めて検討するために、「信号-雑音干渉」(図 4.8) と、光学スキャナの走査に起因する「周期的信号欠損」の 2 つの大きな問題点に着目する。「信号-雑音干渉」はパスバンド信号で、「周期的信号欠損」は第 3 章の屋外実験でも適用したデータブロック方式で、それぞれ対処可能かどうかを、実装したシステムの屋外実験によって検証する。その結果、本システムがスマートフォンのような遍在するデバイスでも光学スキャナを用いることで、長距離で、高速変調通信が可能な可視光通信システムとして確立できるかを評価する。



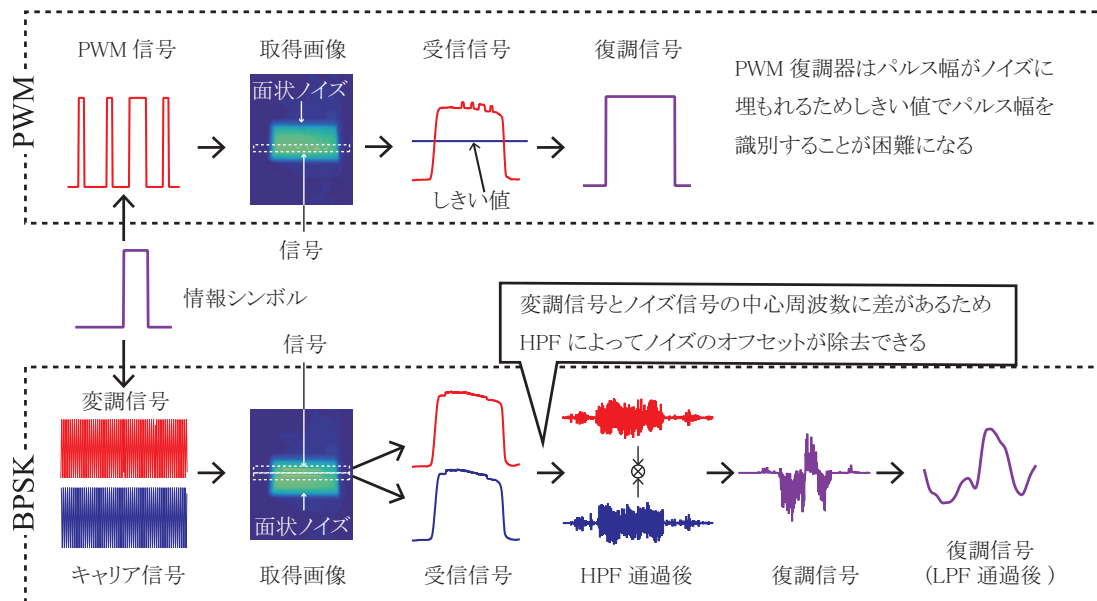


図 4.7: ベースバンド信号とパスバンド信号のシステム両方で面状ノイズを取得した画像の処理フローの例

以下にその詳細を説明する。

### 周期的信号欠損

受信機は光学スキャナ (走査周期  $T_0$ ) を用いて可視光信号を走査し、イメージセンサ (フレーム更新周期  $T_f$ ) を用いて受光する (図 4.9)。なお、光学スキャナ、および、イメージセンサは同期されている。

ポリゴンミラーを用いて可視光信号を走査する場合、実際にイメージセンサ上を信号源の像が移動する時間 (有効走査時間)  $T_e$  は  $T_0$  より小さく、イメージセンサ上に信号源の像が映らない時間がどうしても存在してしまう [49]。したがって、送信機から連続的に可視光信号を送信した場合、イメージセンサで受光される信号は周期的に欠損してしまうことから、従来は、光学スキャナ、イメージセンサに加え、送信機の同期 (光学スキャナの走査、およびイメージセンサの受光開始とともに、時間長  $T_e$  の信号を周期  $T_0$  で送信する) を行ってきた。しかし、イメージセンサによる可視光通信の特徴 (遠距離・複数情報源との同時通信) を維持するためには、送受信機の同期を行うことなく、周期的信号欠損に対応するための仕組みが必要である。

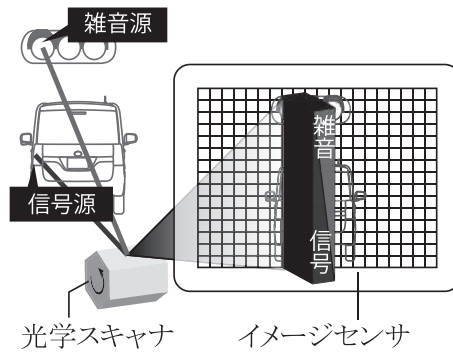


図 4.8: 光学スキャナとイメージセンサを用いた可視光通信システムの運用イメージ; 情報源と雑音源が、光学スキャナの走査方向に存在し、光学スキャナの走査によって信号と雑音の干渉が発生している例

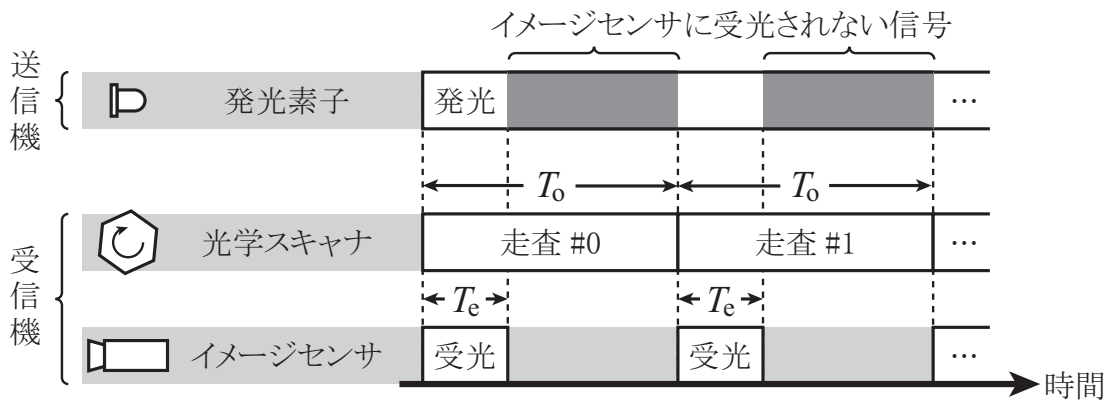


図 4.9: 光学スキャナとイメージセンサを用いた可視光通信における送信機および受信機の動作タイミング

### 信号-雑音干渉

遠距離通信では、情報源以外に、太陽や他の光源等の雑音源も多数見通し内に存在する。しかし、光学スキャナを利用する方式は、情報源と雑音源が、光学スキャナの走査方向に存在する場合、光学スキャナの走査によって信号と雑音の干渉が発生する(図 4.8, 図 4.10)。この干渉は、イメージセンサで受光された画像から、信号部を抽出することを難しくさせるだけでなく、通信品質が著しく低下することにも繋がる。したがって、信号-雑音干渉が発生したときに、信号と雑音を分離するための仕組みが必要である。

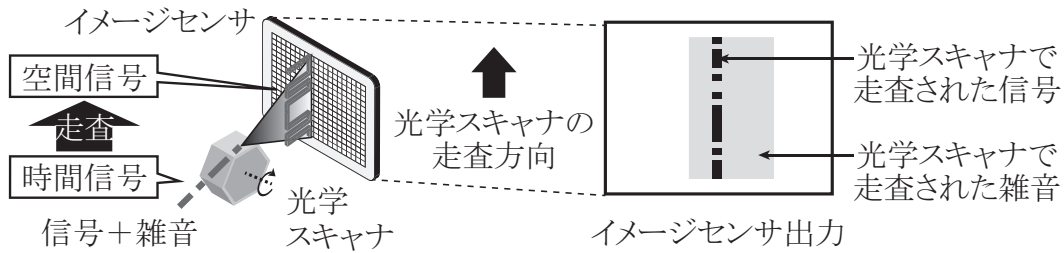


図 4.10: イメージセンサ出力における信号-雑音干渉

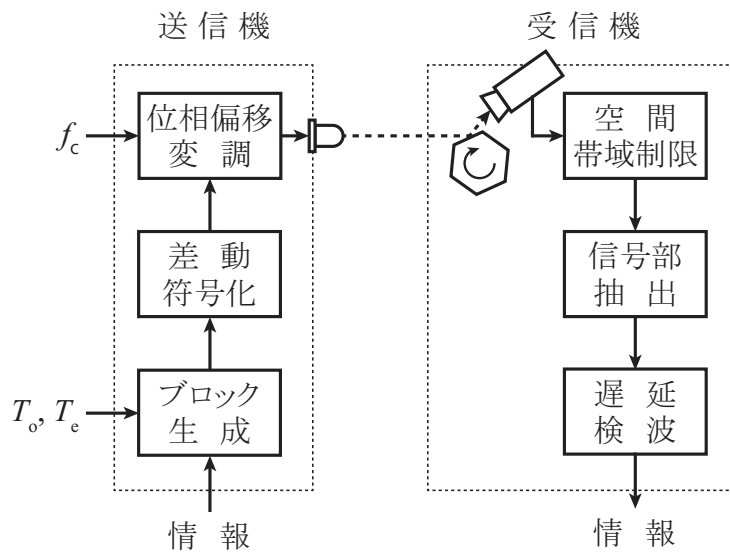


図 4.11: ブロック伝送とパスバンド信号を用いるイメージセンサによる可視光通信システムのブロック図

#### 4.4.1 システムデザイン

図 4.11 に、本論文で提案する、光学スキャナとイメージセンサを用いる可視光通信システムに対して、ブロック伝送とパスバンド信号を導入したシステムを示す。このシステムは、前章で挙げた二つの問題点を解決するために、周期的信号欠損に対応したブロック伝送方式、および、信号-雑音干渉に対応したパスバンド変復調方式を、光学スキャナを利用する方式に適用したものである。以下、送信機、および、受信機の詳細を説明する。

##### 送信機

送信機は受信機のパラメータ  $T_e, T_o$  の値を予め知っており、かつ、 $T_e, T_o$  は、 $T_o = NT_e/2$  ( $N$  は自然数、かつ、 $N \geq 3$ ) の関係が成立しているものと仮定する。送信機は、まず、入力され

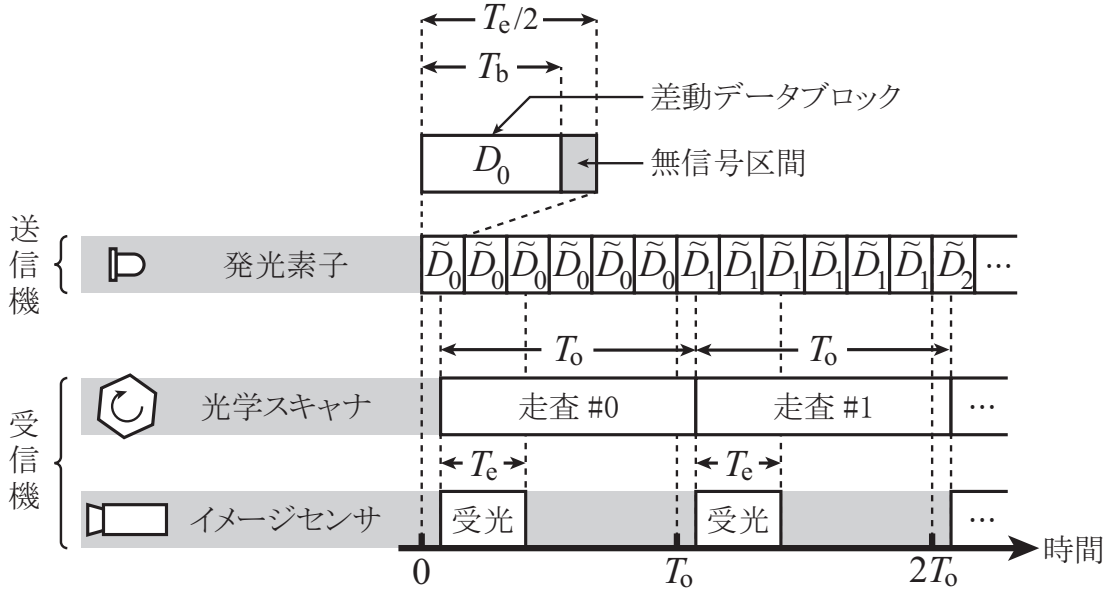


図 4.12: 送受信機が同期されていない環境におけるブロック伝送 ( $N = 6$ )

$$s(t) = \begin{cases} \Re [\exp \{j2\pi f_c t + j\pi d_{(\lfloor t \bmod T_0 \rfloor), m'}\}] + C_t, & \{(n-1)T_b \leq t \leq nT_b\} \\ 0 & (nT_b < t \leq nT_e/2) \end{cases} \quad (4.7)$$

たバイナリ情報  $a_l \in \{0, 1\}$  ( $l = 0, 1, 2, \dots$ ) を長さ  $k$  ( $k$  は自然数) 毎に区切り, 入力データブロック  $B_n$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) を生成する (式 4.7).

$$\begin{aligned} B_n &= (b_{n,0}, b_{n,1}, \dots, b_{n,k-1}) \\ &= (a_{nk}, a_{nk+1}, \dots, a_{nk+k-1}), \end{aligned}$$

を生成する. 次に, 入力データブロックを差動符号化し, 長さ  $k$  の差動データブロック

$$\begin{aligned} D_n &= (d_{n,0}, d_{n,1}, \dots, d_{n,k-1}), \\ d_{n,m} &= b_{n,m-1} \oplus b_{n,m}, \end{aligned}$$

(ただし,  $m = 0, 1, \dots, k-1$ ,  $b_{n,-1} \equiv 0$ ) を生成する (式 4.7). そして, 周波数  $f_c$  の搬送波を差動データで位相偏移変調し, 各差動データブロック間に一定長の無信号区間を挿入した時間長  $T_e/2$  の送信データブロック  $\tilde{D}_n$  を, 時間  $T_0$  に亘り,  $N$  回, LED から繰り返し出力する (図 4.12). 送信機から出力される信号  $s(t)$  は, 最終的に以下の式で表される (式 4.7).

ただし,  $T_b$  は差動データブロックの時間長,  $m' = \lfloor t' \bmod T_b/k \rfloor$ ,  $t' = t \bmod T_b$ ,  $C_t$  は LED への入力電圧を常に正とするためのオフセットである.

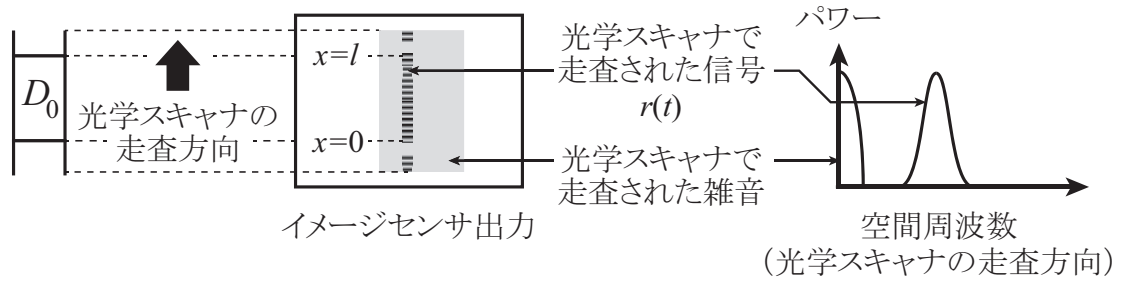


図 4.13: イメージセンサ出力におけるパスバンド信号-雑音干渉

なお、本論文では、受信機のパラメータ  $T_e, T_o$  は、 $T_o = NT_e/2$  ( $N$  は自然数、かつ、 $N \geq 3$ ) の関係が成立している必要があるが、その理由は付録において説明する。また、本論文では、送信機は受信機のパラメータ  $T_e, T_o$  の値を予め知っており、それらにジッタが存在しないことを仮定している。しかし、受信機において、 $T_e, T_o$  にジッタが存在するような場合は、安定したデータブロックのやりとりが困難になることが予想される。このような場合には、受信機側において、 $T_e, T_o$  を能動的に同期する仕組み等が必要であり [50]、今後の課題である。

### 受信機

受信機は光学スキャナを用いて可視光信号を走査し、イメージセンサを用いて受光する。この時、イメージセンサから出力された画像は、送信データブロック長を  $T_e/2$  にすることで、送受信機が同期されていなくても、送信データブロックを欠損無く含んでいることが保証されている (図 4.12)。一方、受信機は、イメージセンサから出力された画像の中から、差動データブロック  $D_n$  に相当する部分を、都度抽出する必要がある。そこで、受信機は、イメージセンサの輝度値出力から無信号区間を検出することで、差動データブロック  $D_n$  に相当する部分のみを抽出する。この時、差動データブロック  $D_n$  に相当する部分は、以下の式で表される (式 4.8)。

$$r_n(x) = \Re \left[ \exp \left\{ j2\pi f_c T_b x/l + j\pi d_{n, \lceil kx/l \rceil} \right\} \right] + C_r,$$

ただし、 $x$  は、イメージセンサ出力において、光学スキャナによって走査された信号が存在する領域における、光学スキャナの走査方向の座標 (受信データブロックの先頭位置が  $x = 0$ )、 $l$  はイメージセンサ出力における受信差動データブロック長、 $C_r$  はオフセットである。

この受信差動データブロックは、光学スキャナによる走査方向の空間周波数スペクトルが、中心周波数  $f_c T_b/l$ 、帯域幅  $k/l$  となっている<sup>1</sup>。一方、太陽や他の光源等の雑音源は、低空間周波数に分布している。そこで、受信差動データブロックの空間周波数を、雑音源の空間周

<sup>1</sup>送信された差動データブロック内には  $f_c T_b$  個の波が存在する。そして、イメージセンサ出力における受信差動データブロック長は  $l$  であることから、イメージセンサ出力における受信差動データブロックの空間中心周波数 (単位長さあたりの波数) は  $f_c T_b/l$  となる。また、信号の帯域幅は、符号 1 シンボルあたりの長さ  $l/k$  の逆数に相当することから、イメージセンサ出力における受信差動データブロックの空間帯域幅は  $k/l$  となる。

波数と十分異なる値に設定すれば、情報源と雑音源が光学スキャナの走査方向に存在し、光学スキャナの走査によって信号と雑音の干渉が発生していたとしても、空間周波数領域で分離することができる(図 4.13)。そこで、受信機は、イメージセンサから出力された信号に対し、データブロックの中心周波数、帯域幅を通過させる空間帯域制限を行った上で、 $r_n(x)$  を抽出する。最後に、受信機は  $r_n(x)$  に対し、遅延検波を行うことで、バイナリ情報  $B_n$  を得る。なお、遅延検波は、同期検波と異なり、基準搬送波の再生が不要で、受信機における信号処理が簡単であることから、本論文で想定しているアプリケーション(遍在するスマートフォンを受信機として利活用する高速可視光通信)に適している。一方、遅延検波は、受信差動データブロックの途中でビット誤りが発生した場合、その誤りが以降のシンボルに伝播してしまう(誤り伝播)が、複数の前シンボルより位相基準を抽出する多重遅延検波の実装等、同じ遅延検波方式を採用する従来システムと同様の対策が可能である [51]。

そこで、本論文では、将来的に、遍在するスマートフォンを受信機として利活用することを想定していることから、受信機における信号処理はなるべく簡単な遅延検波を採用している。なお、本論文では、受信機において遅延検波を採用しており、送信機ではそれに併せる形でデータを差動符号化しているが、原理的には受信機において同期検波を採用することも可能である。なお、本論文で提案している光学スキャナとイメージセンサを用いるパスバンド変復調型可視光通信システムは、受信機において遅延検波を採用しており、送信機ではそれに併せる形でデータを差動符号化しているが、原理的には受信機において同期検波を採用することも可能である。遅延検波は、受信データブロックの途中でビット誤りが発生した場合、その誤りが以降のシンボルに伝播してしまう(誤り伝播)問題を有しているが、同期検波と異なり、基準搬送波の再生が不要で、受信機における信号処理が簡単である特徴を有している。そこで、本論文では、将来的に、遍在するスマートフォンを受信機として利活用することを想定していることから、受信機における信号処理はなるべく簡単な遅延検波を採用している。

#### 4.4.2 屋外実験による性能評価

##### 送信機、及び、受信機の実装

図 4.14 に実装した送信機、および、受信機を示す。送信機は計算機、D-A コンバータ (USB-6212, National Instruments), および LED (OS5RKA5B61P, OptoSupply)(指向角 60 度, 最大輝度 48,000 mcd) から構成される。受信機は光学スキャナ(回転ミラー), イメージセンサ (XCG-V60E, Sony), 計算機から構成され、光学スキャナの走査周期や有効走査時間は表 4.2 に示される通りである。

送信機は、計算機上のソフトウェア (LabVIEW, National Instruments) でランダムなバイナリ情報を生成し、LED へ入力する信号  $s(t)$  を計算する。その際、受信機のパラメータに併せ、表 4.2 に示されるパラメータを、ブロックサイズ  $k$ , ブロック時間長  $T_e/2$ , ブロック送信回数  $N$  として用いている。信号  $s(t)$  は、サンプリング周波数 300 kHz で D-A コンバータから LED へ入力され、LED から可視光信号として出力される。

受信機は、光学スキャナによって走査され、イメージセンサによって受光された大きさ  $640 \times$

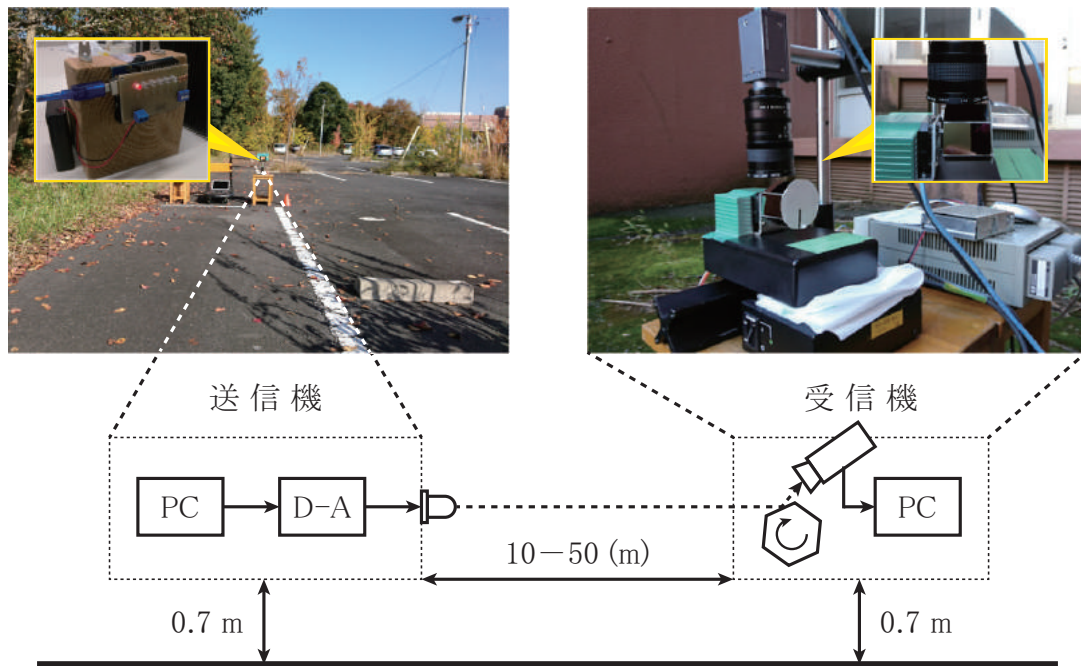


図 4.14: パスバンド信号を用いる可視光通信システムの送信機, および, 受信機の構成

480 ピクセルの画像を計算機に取り込む. そして, 計算機上のソフトウェア (LabVIEW, National Instruments) で, 画像に対し空間帯域制限を行い,  $r_n(x)$  を抽出し, 遅延検波を行うことで, バイナリ情報を得る.

### 実験環境

実装した送信機, および, 受信機を, 筑波大学構内の駐車場に設置し, 主に太陽などの自然光が雑音となる環境で, 屋外通信実験を行った. まず, 自然光が  $0 \text{ lx}$  の条件において, 送受信機を各々地面から  $0.7 \text{ m}$  の高さに設置し, 送受信機間の距離を  $10 \text{ m}$  から  $50 \text{ m}$  まで,  $10 \text{ m}$  毎に変化させながら, それぞれ,  $300$  データブロック ( $n = 0, 1, \dots, 299$ ),  $2,100$  ビットの情報を送受信することで, 光学スキャナで走査された信号を取得した.  $1$  つのデータブロックには  $7$  ビットがペイロードされているが, 差動符号化をする際に先頭ビットを固定しているため, データとして利用できるのは残りの  $6$  ビットになる. よって, 差動符号化を用いた場合のデータレート  $R$  は  $\frac{k-1}{k}$  倍される. 前述では変調信号用の LED とキャリア信号用の LED を用いていたため, LED  $1$  個あたりのデータレート  $R$  は半分になっていたが, 差動符号化を用いれば,  $1$  つの LED のみで実現できるため, LED  $1$  個あたりのデータレートにも貢献できる. 次に, 自然光が  $0, 50, 100, 300 \text{ (lx)}$  として観測される, 四通りの時間帯において, 受信機のみを動作させることで, 光学スキャナで走査された雑音を取得した. 光学スキャナで走査され



表 4.2: パスバンド信号を用いる可視光通信システムの屋外実験における実験パラメータ

パラメータ		値
送信機	ブロックサイズ $k$	7
	ブロック時間長 $T_e/2$ (ms)	2.56
	差動データブロック時間長 $T_b$ (ms)	2.11
	無信号時間長 $T_e/2 - T_b$ (ms)	0.45
	搬送波周波数 $f_c$ (Hz)	6,667
	ブロック送信回数 $N$	20
受信機	光学スキャナの走査周期 $T_o$ (ms)	51.20
	光学スキャナの有効走査時間 $T_e$ (ms)	5.12
実効伝送速度 $k/T_o$ (bps)		136.7

た信号, および, 雑音を, 画像上で合成することで, 各自然光の条件におけるイメージセンサ出力を再現し, その出力を受信機で解析することで, 光学スキャナとイメージセンサを用いるパスバンド変復調型可視光通信システムのデータブロック欠損率, および, 各データブロックのビット誤り率 (Bit error rate; BER) を求めた. また, リファレンスとして, パスバンド信号の他に, 著者の先行研究 (ベースバンド変復調型可視光通信システム) を用いた通信実験も同時に行い [40], 各データブロックのビット誤り率を求めた.

なお, 本実験では, 画像処理によって, 光学スキャナで走査された信号, および, 雑音を合成することで, 統一的な環境における性能比較ができるようにしている. これは, 本実験の実施にあたって, 予備的な検証を行ったところ, 短い時間で周囲の明るさが変化してしまうため, 送受信機間の距離を変化させながら実験を行うと, 自然光の条件や距離を比較することが難しいことが判明したためである. そこで, 画像処理によって, 光学スキャナで走査された信号, および, 雑音を合成することの妥当性を, 明るさが一定の実験室において, 別途検証した. まず, 人工光が 0 lx の条件において, 光学スキャナで走査された信号を取得した (図 4.15(a)). 次に, 人工光が 250 lx の条件において, 光学スキャナで走査された雑音を取得した (図 4.15(b)). そして, 光学スキャナで走査された信号, および, 雑音を, 画像上で合成することで, 人工光が 250 lx の条件におけるイメージセンサ出力を再現した (図 4.15(c)). なお, 光学スキャナで走査された信号, および, 雑音を, 画像上で合成する際は, 各々の輝度値を画素毎に加算した上で, 暗出力電圧に対応した輝度値  $I_b$  を差し引いている. 一方, 人工光が 250 lx の条件において, 情報を送受信することで, 人工光下における光学スキャナで走査された信号を取得した (図 4.15(d)). 画像合成によって得られた擬似的なイメージセンサ出力 (図 4.15(c)), および, 実際の人工光下で観測されたイメージセンサ出力 (図 4.15(d)) を比較すると, 両者の輝度値に大きな差は見られなかった. また, 各画像における輝度値のヒストグラムを計算したところ, 画像合成によって得られた擬似的なイメージセンサ出力, および, 実際の人工光下で観測されたイメージセンサ出力における, 各輝度値の画像内の存在頻度はよく一致していた (図 4.15(e)). したがって, 光学スキャナで走査された信号, および, 雑音



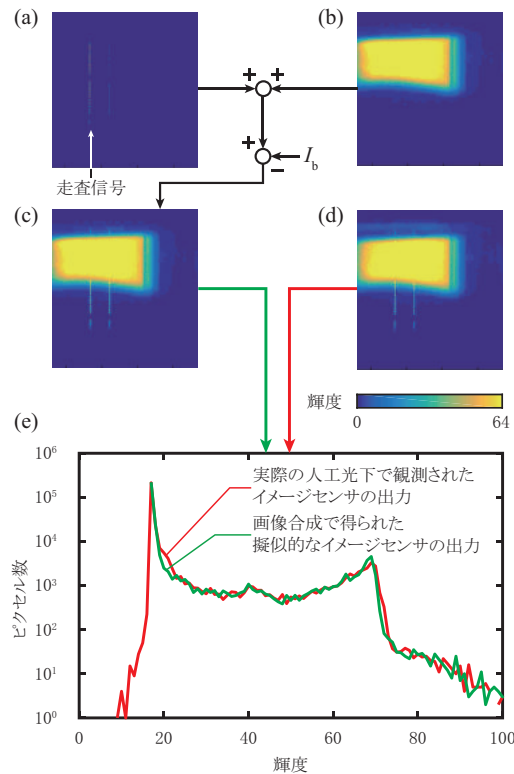


図 4.15: 画像合成によって得られた擬似的なイメージセンサ出力, および, 実際の人工光下で観測されたイメージセンサ出力の比較 (a) 光学スキャナで走査された信号, 人工光 (屋内) 0 lx, (b) 光学スキャナで走査された雑音, 人工光 (屋内) 250 lx, (c) (a) と (b) の画像合成によって得られた擬似的なイメージセンサの出力, (d) 実際の人工光下で観測されたイメージセンサ出力, 人工光 (屋内) 250 lx (e) (c) および (d) における輝度のヒストグラム

を, 画像上で合成することで, 各自然光の条件におけるイメージセンサ出力を再現し, その出力を受信機で解析することは妥当であると考えられる.

### 信号-雑音干渉の影響

まず, 信号-雑音干渉に対する, パスバンド変復調方式の有効性を検証する. 図 4.16 は, 通信距離が 10 m において観測されたイメージセンサの出力, およびその空間周波数である. まず, パスバンド信号を受信した場合の, イメージセンサの出力画像に着目する [図 4.16(a), 4.16(b) 左側]. 光学スキャナの走査方向は, 画像の上下方向であり, 受信差動データブロック (データブロック長  $l$ : 103 pixel) が輝線として, 自然光に起因する雑音が輝度オフセットとして観測されている. そして, 自然光の影響が大きくなるほど, オフセット値も大きくなっていることが確認できる.

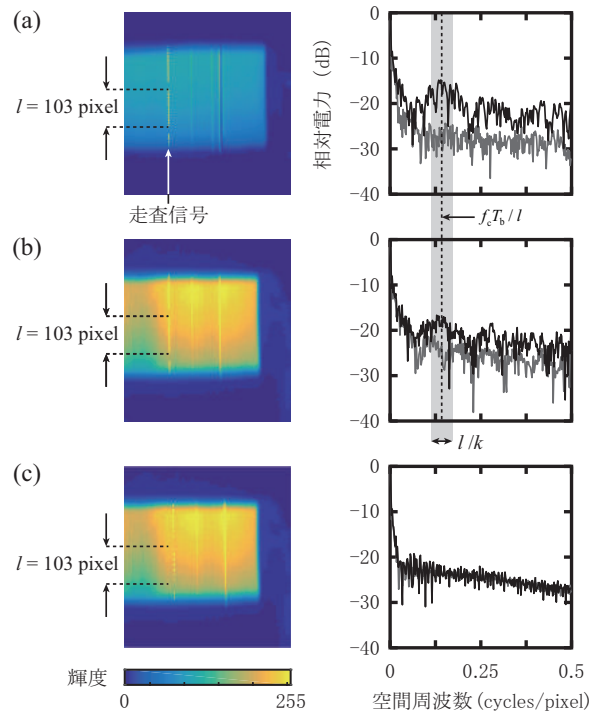


図 4.16: 距離 10 m において観測されたイメージセンサの出力, および, その空間周波数 (黒線: 信号部, 灰線: 雑音部) (a) パスバンド信号, 自然光 (屋外) 100 lx, (b) 同 自然光 (屋外) 300 lx, (c) ベースバンド信号, 自然光 (屋外) 300 lx

次に, このイメージセンサの出力信号から, 受信差動データブロックが存在する部分, および, 雑音のみが存在する部分を抽出し, フーリエ変換した結果に着目する [図 4.16(a), 4.16(b) 右側]. 4.4.1 項において述べたとおり, データブロックは中心周波数  $f_c T_b / l = 0.136$  (cycle/pixel), 帯域幅  $k/l = 0.056$  の空間周波数スペクトルを有していることが確認できる. 一方, 雑音 (本実験では主に自然光) の空間周波数スペクトルは主に直流成分であることから, 光学スキャナによる走査の過程で雑音と信号の干渉が発生していたとしても, 空間周波数領域で分離することができることが期待される.

一方, 従来手法である, ベースバンド信号を受信した場合の, イメージセンサの出力画像 [図 4.16(c) 左側], および, 受信データブロックが存在する部分, および, 雑音のみが存在する部分を抽出し, フーリエ変換した結果 [図 4.16(c) 右側] に着目すると, イメージセンサの出力画像はパスバンド信号を受信した場合と大きく変わらないが, データブロック, および, 雑音の空間周波数スペクトルが両方とも直流成分付近に集中しており, 光学スキャナによる走査の過程で雑音と信号の干渉が発生していたとしても, 空間周波数領域での分離は容易ではない.

以上より, パスバンド変復調方式は, 信号-雑音干渉に有効であると考えられる. 以降, パスバンド変復調方式を用いる受信機は, イメージセンサから出力された信号に対し, データ

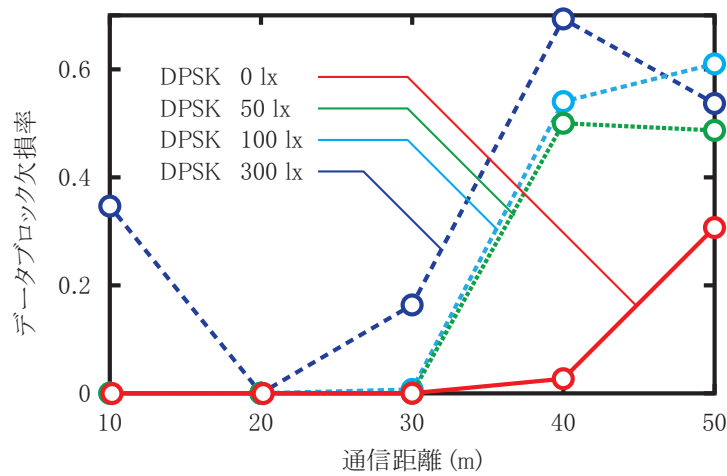


図 4.17: データブロック欠損率

ブロックの中心周波数，帯域幅を通過させる空間帯域制限を実施する。

#### 周期的信号欠損の影響

次に，周期的信号欠損に対する，ブロック伝送方式の有効性を検証する．図 4.17 は，様々な自然光の条件，通信距離において計測された，光学スキャナとイメージセンサを用いるパスバンド変復調型可視光通信システムのデータブロック欠損率である．図に示されるとおり，通信距離が 30 m 以内，かつ，自然光が 100 lx 以下であれば，データブロック欠損率はほぼ 0 であり，周期的信号欠損に対する，ブロック伝送方式が有効であることがわかる．一方，通信距離が 30 m より大きな場合，また，自然光が 300 lx の場合，データブロックの欠損が発生している．これは，送受信機間の距離が大きくなるにつれて，光学スキャナによって走査された信号の輝度値が小さくなる，もしくは，自然光の大きさが大きくなることにより，信号電力対雑音電力比 (Signal-to-noise ratio; SNR) が悪化し，受信機がデータブロックの抽出に失敗しているためである．したがって，ブロック伝送方式は，イメージセンサで受光された信号の輝度が十分に確保されている環境であれば，周期的信号欠損に有効であると考えられる．

#### 距離 - BER 特性

最後に，光学スキャナとイメージセンサを用いるパスバンド変復調型可視光通信システムの距離-BER 特性を検証する．図 4.18 は，様々な自然光の条件において計測された，光学スキャナとイメージセンサを用いるパスバンド変復調型可視光通信システムの距離-BER 特性である．また，図 4.19 は，同条件における，光学スキャナとイメージセンサを用いるベースバ

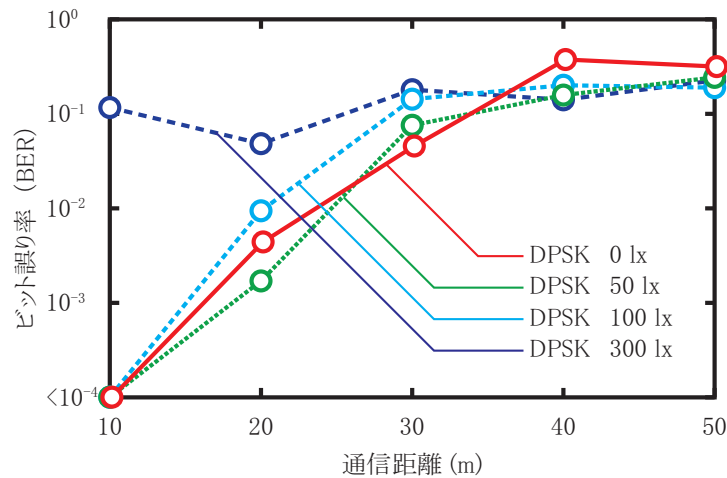


図 4.18: パスバンド信号を用いる可視光通信システムの距離-BER 特性

ンド変復調型可視光通信システムの距離-BER 特性である。なお、BER は、受信機がデータブロックの抽出に成功した場合のみをカウントしている。

図 4.18 と図 4.19 を比較すると、本論文で提案しているパスバンド変復調型可視光通信システムは、ベースバンド変復調型可視光通信システムと比較して、距離-BER 特性が大幅に改善していることがわかる。図 4.18 に示されるとおり、本論文で提案しているパスバンド変復調型可視光通信システムは、通信距離が 10 m 以内、かつ、自然光が 100 lx 以下であれば、BER は  $10^{-4}$  未満、通信距離が 20 m 以内、かつ、自然光が 100 lx 以下であれば、BER は  $10^{-2}$  未満の、良好な通信品質を達成している。一方、図 4.19 に示されるとおり、従来のベースバンド変復調型可視光通信システムは、同様の BER を達成するためには、通信距離が 20 m 以内、かつ、自然光が 0 lx、もしくは、通信距離が 10 m 以内、かつ、自然光が 50 lx 以下が必要である。

一方、本論文で提案しているパスバンド変復調型可視光通信システムは、通信距離が 30 m より大きな場合、また、自然光が 300 lx の場合は、BER が  $10^{-1}$  付近に留まることも明らかになった。これは、4.4.2 項と同様、送受信機間の距離が大きくなるにつれて、イメージセンサで受光された信号の輝度値が小さくなる、もしくは、自然光の大きさが大きくなることにより、SNR が悪化しているためである。

以上より、本論文で提案している光学スキャナとイメージセンサを用いるパスバンド変復調型可視光通信システムは、高速な変調光に対応可能であり、かつ、イメージセンサで受光された信号の輝度が十分に確保されている環境であれば、遠距離に存在する情報源との通信を、良好な品質で実現できることを確認した。

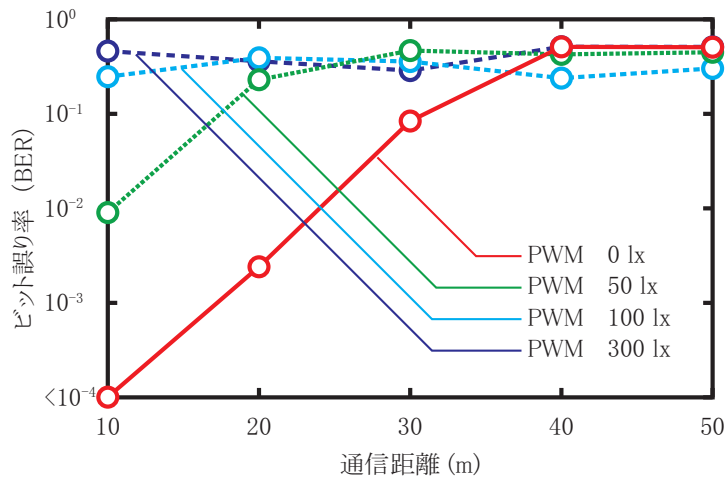


図 4.19: ベースバンド信号を用いる可視光通信システムの距離-BER 特性

### 考察

屋外実験の結果、本システムは通信距離が 20 m 以内、かつ、自然光が 100 lx 以下の条件のもと、良質な通信品質を達成することが明らかになった。これは、本システムがパスバンド変復調方式を採用することで、可視光信号と熱雑音を空間周波数の違いによって分離し、フィルタによって熱雑音を大きく軽減することが可能になったことが起因している。しかしながら、自然光 100 lx は晴天の夕方程度の明るさに相当し、晴天時の日中の明るさは 1,000–10,000 (lx) にまで上る。現状のシステムデザインでは、日中程度の明るさでは、信号を受信することが困難であることがわかっている。これは、本システムが光学スキャナによって周囲の光を画像中で積分していることが要因である。送信機の発光素子の明るさの面積に対して、周囲の背景の明るさの面積が圧倒的に大きい。イメージセンサのフレーム上に発光素子が写り、それらの上部、あるいは下部に明るめの背景がある場合、ポリゴンミラーの走査方向からして、発光素子と背景の明るさは垂直方向に位置しているため、走査結果は背景の明るさが、発光素子の明るさを塗りつぶすように走査される。これは、発光素子の明るさが画素上では最大値の明るさでも、多数の明るい背景の画素の積分値が優に超えてしまうためである。よって、現状のシステムデザインが担保できる明るさは、ポリゴンミラーの走査によっても、発光素子の明るさが背景の明るさの積分値を超える程度になる。本システムが日中程度の明るさ、さらには、周囲が開けた環境においても十分に長距離で良質な通信品質を達成するには、背景の明るさそのものを取り除く工夫が必要である。

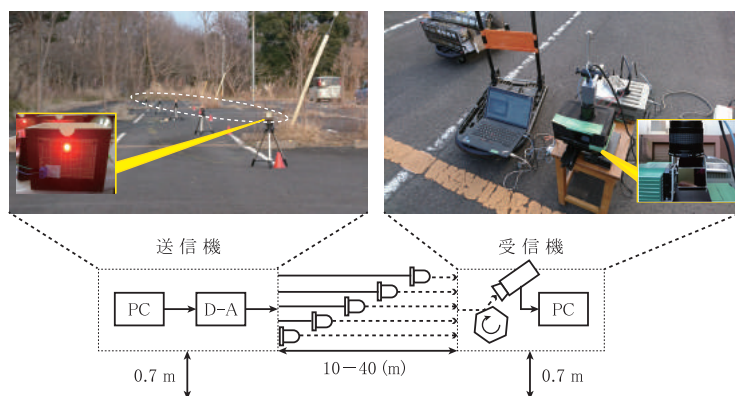


図 4.20: 並列可視光通信システムの実験系

#### 4.4.3 並列送信による屋外実験

前述の屋外実験では、実験中の短い時間で周囲の明るさが変化してしまうことから、そのままの環境で距離-BER 性能を評価することが困難だった。そこで、画像処理によって、雑音を合成することにより、擬似的に通信システムの耐雑音性能を評価していた。ここでは、実験系を改良することで、画像合成に頼ることなく、本システムの距離-BER 性能を評価することを目指した。

##### 実験環境

本システムは受信機にイメージセンサを用いていることから、複数の光源を送信機として容易に利用可能である特徴を利用した。各通信距離地点において設置した送信機が同時に信号を送信することで、一回の実験で各通信距離地点からの走査信号が取得できるようにした。このときの実験系を図 4.20 に、実験パラメータを表 4.3 に示す。送受信機の構成は前述と同様のブロック伝送とパスバンド信号を用いる通信システムであり、変調方式も同様にパスバンド信号に差動符号化を用いている。実装した送信機、および、受信機を、筑波大学構内の駐車場に設置し、主に太陽などの自然光が雑音となる環境で、屋外通信実験を行った。送受信機を各々地面から 0.7 m の高さで、送受信機間の距離を 10 m から 40 m まで、7.5 m 毎の地点にそれぞれ設置した。それらから、同時に 612 データブロック ( $n = 0, 1, \dots, 611$ ), 合計 4284 ビットの情報を送受信することで、光学スキャナで走査された信号を取得した。1 ブロックには 7 ビットがペイロードされているが、差動符号化による復号のため、先頭ビットを固定しているため有効に使えるデータの数は前述と同様、6 ビットである。取得したときの明るさはそれぞれ、0, 52, 174 (lx) であり、前述の屋外実験と異なり、画像合成を用いずに、屋外環境の明るさそのまま取得画像に反映されている。取得画像は受信機で解析することで、パスバンド信号を用いる通信システムの各データブロックのビット誤り率 (BER) を求めた。

表 4.3: パスバンド信号を用いる可視光通信システムの屋外並列実験における実験パラメータ

パラメータ		値
送信機	ブロックサイズ $k$	7
	ブロック時間長 $T_e/2$ (ms)	2.56
	差動データブロック時間長 $T_b$ (ms)	2.11
	無信号時間長 $T_e/2 - T_b$ (ms)	0.45
	搬送波周波数 $f_c$ (Hz)	3,333
	ブロック送信回数 $N$	20
受信機	光学スキャナの走査周期 $T_o$ (ms)	51.20
	光学スキャナの有効走査時間 $T_e$ (ms)	5.12
	レンズの焦点距離	8 mm
	レンズのピント設定	Infinity
	レンズの F 値	4
実効伝送速度 $k/T_o$ (bps)		136.7

## 実験結果

図 4.21 に本実験で得られた並列可視光通信システムの取得画像を示す。いずれの取得画像にも送信信号が 5 本，街灯による走査信号が 2 本受信している。送信信号は右から 10, 17.5, 25, 32.5, 40 (m) で並んでいる。街灯は常に点灯しているとみなして，実線状の走査信号になっている。2, 52, 174 (lx) と順に面状ノイズの輝度が大きくなっていることがわかる。街灯の走査信号が受信している原因として，送信機の付近に街灯があることが起因している。図 4.22 に背景画像の例を示す。図の画像は光学スキャナによって上下が反転していることに注意すると，実際には送信機の頭上に 2 つの街灯が位置していることがわかる。このように，本システムでは複数の光源を送信機として容易に利用可能であると同時に，送信機以外の光源も紛れる恐れがある。図 4.23 に本実験による距離-BER 特性を示す。図 4.23 から，通信距離が 25 m 以内，かつ，自然光が 174 lx 以下であれば，BER は  $10^{-2}$  未満の，良好な通信品質を達成している事がわかる。

## 考察

並列可視光通信システムによる屋外実験の結果，本システムは通信距離が 25 m 以内，かつ，自然光が 172 lx 以下の条件のもと，良質な通信品質を達成することが明らかになった。本実験では，街灯のような送信機とは別の光源が取得画像に混じっていたが，送信信号が，ノイズのような直流成分を多く含む信号よりも，高い周波数成分を含んでいるために，街灯による走査信号とも分離が可能であったことも示されている。前述の実験では，対雑音性能においては，画像処理によって妥当性を加味した上での評価であったが，本実験によって，ほぼ実際の屋外環境と同等の条件による通信-BER 特性が算出できた。ゆえに，本実験の結果が，



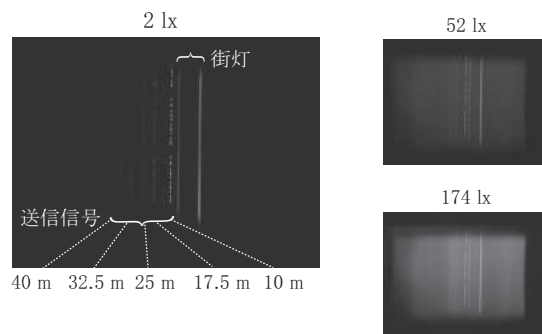


図 4.21: 並列可視光通信システムの取得画像

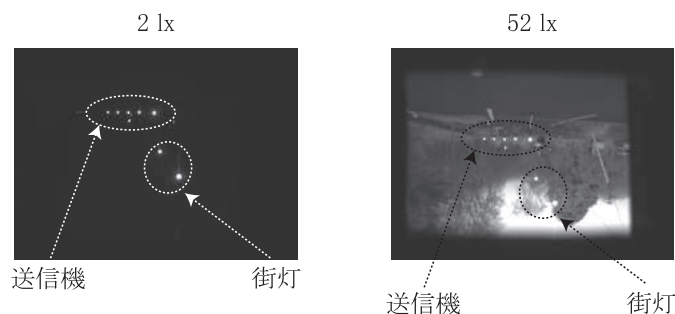


図 4.22: 並列可視光通信システムの背景画像

本システムの最終的な距離-BER 性能であるとも言える。

しかしながら、本システムは十分な輝度が取得画像にあれば、長距離通信が可能なシステムであることから、より高輝度な LED や、より集光性の高い光学系で設計することで、通信距離を大きくすることは可能であると考えられる。一方、耐雑音性能はパスバンド信号を採用することで、送信信号とノイズとの分離は容易になったが、それだけでは、夕方程度の明るさ程度までしか通信品質を保証できない。夕方以上の明るさでも通信品質を保証するには、画像処理によって背景差分を取るなど、光学スキャナで走査する前で対策が必要になる。これらは、従来の画像処理技術で検討が可能であるが、スマートフォンのような遍在するデバイスの持つ演算能力では、処理負荷が大きくなってしまふ。このことから、より明るい屋外環境下で本システムを利用する際は、高速度カメラと高速演算が可能な計算機を用いて、画像処理を組み込んだシステムによって、可視光通信を運用することが望ましい。一方で、比較的暗い環境においては、スマートフォンのような遍在するイメージセンサを主体に、本論文が提唱する仕組みを用いれば、数十 m 程度の可視光通信が実現できると言える。

本システムの屋外環境における応用例として、車々間通信や路車間通信に適用した場合を考える。まず、本システムを車載カメラやスマートフォンカメラに接合する。適用した例を図 4.24 に示す。受信機は前方車両のテールランプや信号機の LED を検出し、それらと可視光通



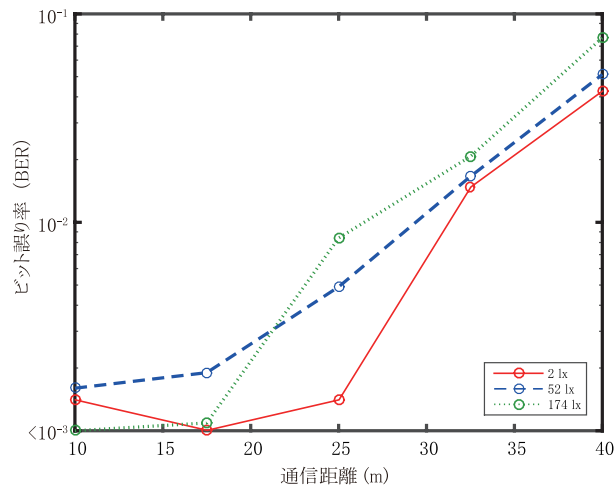


図 4.23: パスバンド信号を用いる並列可視光通信システムの距離-BER 特性

信を実施する。これまでの実験で得られた提案システムの通信範囲の結果である，図 3.13 を用いて，本システムのサービスエリアを算出すると，図 4.25(a) のようになる。車々間通信の場合なら，光軸がずれない位置関係なら車間距離 20 m，光軸がずれる場合は，水平方向 6 m までのズレが直線距離 20 m の範囲内において，十分な通信品質で通信可能なサービスエリアと想定できる。一般的な道路の車線の幅員は 2.75~3.75 (m) であるため，十分カバー可能な範囲である。路車間通信の場合なら，信号機との通信を想定して，図 4.25(b) のようなサービスエリアになる。信号機は，一般的に 5 m 程度の高さで設営されているため，本システムを搭載した車両は 20 m の距離で十分な通信品質で通信が可能になる。

しかしながら，車々間通信や路車間通信は一般に移動体通信であるため，通信の実現の前に，送信機の検出が問題になる。現状のシステムでは，簡易的な画像処理を用いて，走査信号の範囲を検出している。今以上に検出アルゴリズムが高度化したり，雑音処理を追加すると，一般的なイメージセンサのフレームレート 10~60 (fps) では実時間検出の実現が困難になる。先行研究では，移動体通信を考慮した可視光通信システムを検討するために，高速かつ正確な LED や検出技術の確立が進められるほど，活発な分野になっている [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 50, 52, 53].

## 4.5 まとめ

本章では，屋外環境での運用に適した信号変復調方式や，データ伝送方式を検討した。そして，PSK (Phase shift keying)，および，ブロック伝送が適していることを明らかにしたと共に，それらを可視光通信システムとして実装した。そして，屋外における実験を実施し，提案システムが一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ，高速な変調光に対応可能で，かつ，遠距離に存在する情報源との通信を実現できることを明らかにした。

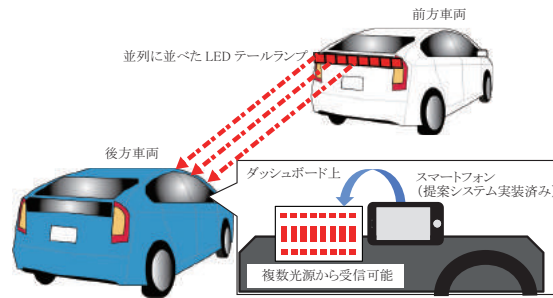


図 4.24: 提案システムを車載した場合の例

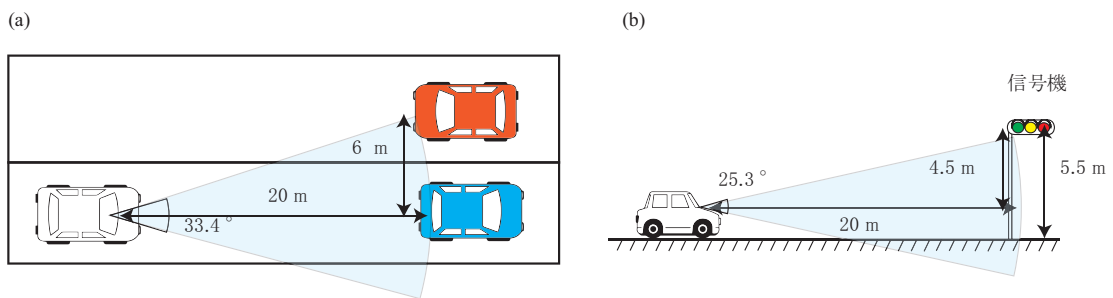


図 4.25: 提案システムを車々間、路車間通信に適用した場合のサービスエリア

前半では、屋外環境での運用に適するパスバンド信号を、本研究で提案する可視光通信システムに導入し、屋内環境においてパスバンド信号を用いたシステムの性能を確認した。従来のベースバンド信号を用いるシステムでは、信号検出の段階では線状のノイズが混在すると識別が困難であること、そして、信号復調の段階では、走査信号が面状のノイズに埋められると、パルス幅の輝度差がなくなることと、ノイズの形状によってそれぞれ問題があった。一方、パスバンド信号は、特定の空間周波数帯域においてピークを持ちながら、信号内に輝度差が殆どないことから、線状、面状それぞれのノイズとの分離が可能になる。この性質を利用したシステムを構築し、屋内環境において、信号検出、及び、信号復調において、ベースバンド信号を用いる方式と比べて優れていることを実験によって明らかにした。後半では、パスバンド信号を用いたシステムを屋外環境において実際に運用することを検討した。その際、提案システムが持つ、2つの大きな問題点である、「信号-雑音干渉」、「周期的信号欠損」に着目し、これらを改善するシステムデザインを行った。「信号-雑音干渉」にはパスバンド信号の性質で、「周期的信号欠損」にはブロック伝送方式で、それぞれ対策可能であることを、実装したシステムによって屋外実験を行い、ベースバンド信号によるシステムよりも改善された

ことを明らかにした。この結果、ブロック伝送とパスバンド信号を用いる可視光通信システムは、高速な変調光に対応可能であり、かつ、イメージセンサで受光された信号の輝度が十分に確保されている環境であれば、遠距離に存在する情報源との通信を、良好な品質で実現できることを明らかにした。

## 第5章 結論

本論文では、可視光通信にこれまで用いられてこなかった光学スキャナを活用することで、新しい特徴を有する可視光通信システム（一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ、高速な変調光に対応可能で、かつ、遠距離に存在する情報源との通信を実現する通信システム）を確立することを目的とした。その指標として、光学スキャナとイメージセンサを用いる可視光通信システムが屋外環境においても、長距離で、高速変調通信が可能であることを目標にシステムデザインと実験を重ねた。

第1章では、序論として、本研究の背景、及び、目的を説明している。本研究の対象である可視光通信システムと、その発展の歴史を受信機ごとに振り返ることで、本研究が既存のシステムでは実現されていなかった、遍在的に存在するイメージセンサを用いつつ、遠距離に存在する情報源から送信された高速な変調光の受信を可能とする技術を確立することを提案している。

第2章では、本研究で提案する可視光通信システム（送信機、および、受信機）の概要と、基本的な通信原理を説明した。そして、先行研究との相違点を踏まえつつ、本研究で提案する可視光通信システムは、原理的には、一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ、高速な変調光に対応可能で、かつ、遠距離に存在する情報源との通信が実現できることを示した。

第3章では、光学スキャナとイメージセンサを利用する可視光通信システムを設計した。まず、光学系（発光素子、光学スキャナ、および、イメージセンサ）に必要な条件を整理した上で、実際に送信機と受信機を構築した。そして、最も基本的な変復調方式であるPWM（Pulse width modulation）を用いて通信システムの性能評価実験を行った。システムの構成要素のパラメータの関係性を整理したところ、本システムの通信品質には、ポリゴンミラーの走査周期とイメージセンサの露光時間の関係、通信速度にはポリゴンミラーの有効走査回転角と送信機の送信周期の関係が重要であることを明らかにした。これらを踏まえて、本システムの基礎的な通信原理を紹介することで、イメージセンサを用いる可視光通信システムとしての実用性を示唆した。

第4章では、屋外環境での運用に適した信号変復調方式や、データ伝送方式を検討した。そして、PSK（Phase shift keying）、および、ブロック伝送が適していることを明らかにすると共に、それらを可視光通信システムとして実装した。そのために、本システムが抱える「信号-雑音干渉」と「周期的信号欠損」の問題について向き合った。問題点に対しては、パスバンド信号とデータブロック方式による信号処理技術で解決を試みるシステムデザインを提案し、最終的に、屋外での長距離通信実験によって本システムの性能評価を行った。屋外実験

の結果、本システムは、通信距離 20 m において、所望の通信品質を達成できることを明らかにした。この結果、提案システムが一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ、高速な変調光に対応可能で、かつ、遠距離に存在する情報源との通信を実現できることを明らかにした。

本論文において、使用したカメラのフレームレートは最大 20 fps と、いわゆる、スマートフォンのような遍在するデバイスと同等の性能である。さらに、本システムは、屋外において長距離で、かつ、送信機の搬送波周波数が 6 kHz を超える高速変調に対応できた。これらを加味すると、研究目的に据えた、スマートフォンのような遍在するデバイスに光学スキャナを用いることで、長距離で、高速変調通信が可能な可視光通信システムの構築が確立できたといえる。よって、提案システムは、これまでの既存のイメージセンサを用いる可視光通信システムに光学スキャナと呼ばれるアタッチメントを付加した、これまでにない可視光通信システムとして新しい位置づけになると言える。

本システムの今後の展望としては、(1) 長距離化、(2) 高速化、(3) 小型化、(4) 頑健化が掲げられる。(1) 長距離化については、送受信機の通信運用距離をより長距離にすることを旨とする。現状よりも長距離で通信を行うためには、より「信号-雑音干渉」の問題を改善する必要がある。第 4 章にて、送信信号を光学スキャナで走査する前に、背景に含まれる明るさそのものを取り除く工夫が必要であることが考察されている。よって、イメージセンサで取得した画像を画像処理などを用いることで、明るい部分を取り除く処理が今後必要になる。しかしながら、本システムをスマートフォンのような比較的演算能力の小さい計算機上で構築することを検討する際には、できるだけ計算処理が小さくなるような画像処理、及び、変復調処理が必要になることに注意すべきである。また、より送信機の光源からの信号を効率よく受信機で集光するためには、適切なレンズ設計が必要である。(2) 高速化については、一フレームあたりの取得ビット数を増やす事が考えられる。第 4 章のように、送信機を並列化して一フレームでできるだけ多くの走査信号を得る方法もあるが、光学スキャナの走査をジグザグ上にするだけでも実現可能である。光学スキャナにはポリゴンミラーのように一定の速度で一方向のみに走査をするものもあれば、MEMS ミラーのような水平、垂直方向それぞれに走査が可能なものもある。よって、MEMS ミラーを用いれば、一フレームあたりの取得ビットを 2 次元方向にまで広げることが期待できる。また、高速化の方法の一つとして、従来の無線通信システムで実績のある、変復調方式や符号化を採用することも検討できる。(3) 小型化については、本システムをスマートフォンのような遍在するデバイスに搭載することを検討する必要がある。現在のシステムは、ポリゴンミラーの大きさが内接円直径が  $\phi 25$  と、小型であるとは言えない。現在、流通しているスマートフォンにアタッチ可能な広角レンズのようなサイズまで小型化をすることを旨とするためには、光学スキャナをポリゴンミラーから MEMS ミラーにする必要がある。MEMS ミラーの大きさは  $\phi 2 \sim 3$ 、デバイス全体でも 20 mm 程度である。よって、MEMS ミラーを主体としたシステムに改良することで、本システムの小型化が期待できる。(4) 頑健化については、本システムを移動体通信で用いる場合に必要である。特に、車々間通信のような通信システムを車載して利用する場合は、システムに生じる振動や、局所的なノイズに対応する必要がある。本システムは光学スキャナとイメージセンサの

位置関係がずれると、取得画像の走査信号に影響が出てしまう。よって、振動に対しては、加速度センサーなどの姿勢を計測できるセンサーを用いて、姿勢に応じた補正をする必要がある。また、振動や局所的なノイズで生じた走査信号のエラーは誤り訂正符号などの符号化によって対策することで、信頼性の高い通信システムに改良することが望まれる。

## 謝辞

筑波大学システム情報系知能機能工学域 准教授 海老原格先生には指導教員として研究活動のご指導にとどまらず、学生生活や就職活動、今後のキャリアなど、多方面に渡り、ご相談に乗っていただきました。中でも、私が博士前期課程で卒業し、社会人となった後も博士後期課程の機会を勧めていただき、今回このような博士論文を執筆するに至ったことは、大きな転換点となりました。博士前期課程中では、大変光栄なことに、博士後期課程への勧めを頂きつつも、自身の今後のキャリアを検討した結果、就職という道を選ばせていただきました。ご相談を頂いている間は、私の決断力の小ささに大変ご迷惑をおかけしたと存じます。ですが、この度、社会人博士を選択したことをはじめとして、通信システム研究室、ひいては、海老原先生のもとで研究活動を行えたことは、大変幸運であったと改めて感謝いたします。学部4年生から雑誌論文に挑戦させていただき、国際会議への参加にも注力していただき、非常に充実した学生生活を過ごすことができました。日頃からのご指導、ご鞭撻本当にありがとうございました。

筑波大学システム情報系知能機能工学域 教授 水谷孝一先生には、実験や論文執筆などをはじめとして、研究とは何かを常日頃からご指導いただきました。私が3年間、そして、社会人博士として1年間を大変充実して健やかに研究活動に勤しむことができたのも、音響システム研究室グループの風土と文化のお陰であると思います。ご指導、ご鞭撻厚く御礼申し上げます。

筑波大学システム情報系知能機能工学域 准教授 若槻尚斗先生には、学会論文や雑誌論文の添削にとどまらず、実験系の設営やチューニングに至るまで、多方面に渡りご指導いただきました。私が、在学中に国際学会や雑誌論文に採択できたのも、若槻先生の度重なるご協力にほかなりません。大変感謝いたします。

筑波大学システム情報系知能機能工学域 助教 善甫啓一先生には研究に関するアドバイスや学会の同行にとどまらず、昼食で一緒にさせて頂く機会があるなど、公私に渡って大変お世話になりました。感謝いたします。筑波大学システム情報系知能機能工学域 助教 前田祐佳先生には研究に関するアドバイスの他にも、お話する機会をいただき、研究生活に張りのある時間を過ごささせていただきました。感謝いたします。また、本論文を執筆するに当たり、筑波大学数理物質系物理工学域 教授 伊藤雅英先生、防衛大学校応用科学群 准教授 小笠原英子先生には、専門的な見地から大変有益な指摘をいただきました。本論文内容及び、発表内容に関しまして、丁寧にご指導いただきましたことを深く感謝申し上げます。

音響システム研究室グループに所属してから計4年間でお会いしたすべての先輩、同期、後輩に深く感謝しております。先輩方の中でも、当時、博士後期課程だった方々からは、非常

に見識のあるご指摘にとどまらず、人生の先輩として、私の相談にも非常に親切にのっていただけました。多くの博士前期課程の先輩方と充実した研究生活が過ごせたのも音響システム研究室グループの特徴であり、大変幸せな環境をいただけたこと、誠に感謝しております。後輩方では、栗本氏、飯山氏には、私の研究の引き継ぎとして大変お世話になりました。引き継ぎとはいえ、社会人博士となった環境から、満足にノウハウを教えることができず、大変申し訳ありませんでした。そんな中でも、国際会議に投稿し、大変立派な発表ができたこと聞き、非常に嬉しく思います。残りの学生生活でも、課題は尽きないかと思いますが、私で良ければ相談に乗らせていただきますので、今後とも宜しくお願いします。

博士前期課程当時は博士後期課程に進むことを拒み、社会人となった現在で、博士後期課程に進むことを選んだことは、自分の中でもなかなか整理がついていないことでもあります。ただ、一つ申し上げられることは、社会人となって初めて、自身の持つ能力や資質が見えてきたことがあります。これからの競争社会の中で、自身が生き抜くためには、自分の持つ能力、資質で戦わなくてはいけないこと、社会人一年目にて周りの同僚を見て実感しました。他人にはなくて、自分にはありそうなもの一つとして、初めて、博士後期課程の道を考えるようになり、社会人博士を選ぶことになりました。社会人博士としてのこの一年は、業務との両立が想像以上に大変であり、海老原先生には多数のお手数をおかけしました。しかしながら、改めて、研究活動をする楽しさを見出すことができた一年でもありました。研究活動は大学に所属しなければ、あまり縁がないことと考えていましたが、研究活動の考え方は、これからの生き方に知的興奮を与える指針になり、今後のキャリアがより豊かになると考えます。無論、今後の業務でも、博士として得られた知見で貢献できるように尽力する所存です。

最後に、業務が忙しい中、社会人博士に進むことを認めていただいた株式会社デンソーテンに感謝するとともに、会社の業務と学業の板挟みになった一年を心配いただいた家族に深く感謝いたします。



## 参考文献

- [1] 春山真一郎. 可視光通信の現状 (特集: led 光源応用の新しい展開-it, フォトニクスとの融合-). 照明学会誌, Vol. 98, No. 10, pp. 538–541, October 2014.
- [2] Toshihiko Komine and Masao Nakagawa. Fundamental analysis for visible-light communication system using led lights. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 50, No. 1, pp. 100–107, February 2004.
- [3] Yuichi Tanaka, Toshihiko Komine, Shinichiro Haruyama, and Masao Nakagawa. Indoor visible light data transmission system utilizing white led lights. *IEICE Transactions on Communications*, Vol. 86, No. 8, pp. 2440–2454, August 2003.
- [4] 中川正雄. ユビキタス可視光通信. 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J88-B, No. 2, pp. 351–359, February 2005.
- [5] 春山真一郎. 可視光通信. 電波航法= Electronic navigation review, No. 55, pp. 11–17, 2013.
- [6] Giulio Cossu, Amir M Khalid, Pallab Choudhury, Raffaele Corsini, and Ernesto Ciaramella. 2.1 gbit/s visible optical wireless transmission. In *European Conference and Exhibition on Optical Communication*, pp. P4–16. Optical Society of America, 2012.
- [7] Xiaohan Liu, Hideo Makino, Suguru Kobayashi, and Yoshinobu Maeda. Research of practical indoor guidance platform using fluorescent light communication. *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E91.B, No. 11, pp. 3507–3515, November 2008.
- [8] Chinnapat Serththin, Tomoaki Ohtsuki, and Masao Nakagawa. 6-axis sensor assisted low complexity high accuracy-visible light communication based indoor positioning system. *IEICE Transactions on Communications*, Vol. 93, No. 11, pp. 2879–2891, November 2010.
- [9] Xiaohan Liu, Hideo Makino, and Kenichi Mase. Improved indoor location estimation using fluorescent light communication system with a nine-channel receiver. *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E93.B, No. 11, pp. 2936–2944, November 2010.
- [10] 間邊哲也, 長谷川孝明, 松岡義大, 古川誠治, 福田朗. プラットホーム指向の歩行者 wysiwyas ナビゲーションシステムの提案. 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J95-A, No. 3, pp. 268–282, March 2012.

- [11] Masaki Waki, Shigenori Uruno, Hiroyuki Ohashi, Tetsuya Manabe, and Yuji Azuma. Optical fiber connection navigation system using visible light communication in central office with economic evaluation. *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E95.B, No. 5, pp. 1633–1642, May 2012.
- [12] 中島円, 神武直彦, 春山真一郎. 視覚障害者の屋内歩行支援を目的とした音声ナビゲーションシステムの提案と実証実験による検証. *電気学会論文誌 C*, Vol. 133, No. 5, pp. 922–929, May 2013.
- [13] 中澤陽平, 牧野秀夫, 西森健太郎, 若月大輔, 小林真, 駒形英樹. ナビゲーションを目的とした可視光通信による屋内歩行者位置計測法. *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol. J99-D, No. 2, pp. 165–177, February 2016.
- [14] M. Akanegawa, Y. Tanaka, and M. Nakagawa. Basic study on traffic information system using led traffic lights. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 2, No. 4, pp. 197–203, Dec 2001.
- [15] M Akanegawa, Y Tanaka, and M Nakagawa. Basic study on traffic information system using LED traffic lights. *Intell. Transp. Syst. IEEE Trans.*, Vol. 2, No. 4, pp. 197–203, 2001.
- [16] Shun-hsiang You, Shih-hao Chang, Hao-min Lin, and Hsin-mu Tsai. Demo : Visible Light Communications for Scooter Safety. In *Proceeding 11th Annu. Int. Conf. Mob. Syst. Appl. Serv.*, No. Iv, pp. 509–510, 2013.
- [17] 渡邊弘貴, 西井達也, 大柴小枝子. 可視光通信を用いた信号機間通信システムの雑音耐性向上による通信距離拡大に関する研究. *電子情報通信学会論文誌 B*, Vol. J98-B, No. 2, pp. 180–187, February 2015.
- [18] 増田恭一郎, 山里敬也, 岡田啓, 片山正昭. Led 信号機と車載カメラを用いた可視光空間通信における階層的符号化方式. *電子情報通信学会論文誌 A*, Vol. J90-A, No. 9, pp. 696–704, September 2007.
- [19] 山里敬也. Led アレーと高速度カメラを用いた可視光通信の its への応用. *電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review*, Vol. 3, No. 2, pp. 45–53, February 2009.
- [20] 名倉徹, 山里敬也, 荒井伸太郎, 岡田啓, 圓道知博, 藤井俊. 車両走行時の路車間可視光通信のための led アレー追跡手法. *電子情報通信学会論文誌 B*, Vol. J95-B, No. 2, pp. 326–336, February 2012.
- [21] 白木康建, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 圓道知博, 荒井伸太郎. 走行車両が高速度カメラを用いて情報を受信するユビキタス可視光通信のための複数情報源認識手法. *電子情報通信学会論文誌 B*, Vol. J95-B, No. 11, pp. 1517–1528, November 2012.

- [22] 西本早耶香, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 圓道知博, 荒井伸太郎. Led アレーと高速度カメラを用いた路車間可視光通信における遠距離データと近距離データの重畳符号化. 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J96-B, No. 2, pp. 191–201, February 2013.
- [23] 岩瀬大吾, 笠井信, 圓道知博, 荒井伸太郎, 山里敬也, 岡田啓, 鎌倉浩嗣, 藤井俊彰. 高速度カメラと led 交通信号機を用いた路車間可視光通信システムにおける通信速度の向上. 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J99-B, No. 2, pp. 97–104, February 2014.
- [24] 臼井俊亮, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 高橋桂太, 圓道知博, 荒井伸太郎. 路車間可視光通信のための時空間勾配を特徴量とした led アレイ捕捉手法. 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J97-B, No. 7, pp. 536–545, July 2014.
- [25] 天野裕太, 鎌倉浩嗣, 山里敬也. イメージセンサを用いた可視光通信における alamouti 型時空間符号化. 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J98-B, No. 3, pp. 307–318, March 2015.
- [26] 川合悠太, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 圓道知博, 荒井伸太郎, 鎌倉浩嗣. 車路間可視光通信のためのオクルージョンを考慮した led ヘッドライト追跡手法を用いたオクルージョン後の車両位置推定再開時間の短縮. 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J100-B, No. 1, pp. 30–33, January 2017.
- [27] 内山英昭, 吉野昌樹, 春山真一郎, 斎藤英雄, 中川正雄, 掛橋孝夫, 永元直樹. 光源マーカを用いた可視光通信に基づく写真測量システム. 画像電子学会誌, Vol. 38, No. 5, pp. 703–711, 2009.
- [28] 木村翔, 笈康明, 高橋桂太, 苗村健. 可視光通信プロジェクタと高速度カメラを用いたユビキタス情報環境の基礎検討. 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J91-D, No. 12, pp. 2781–2790, December 2008.
- [29] 天野準也, 和田忠浩, 椋本介士. 並列伝送型イメージセンサ可視光通信システムの構築と検証. 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J96-B, No. 7, pp. 742–752, July 2013.
- [30] C. Danakis, M. Afgani, G. Povey, I. Underwood, and H. Haas. Using a cmos camera sensor for visible light communication. In *2012 IEEE Globecom Workshops*, pp. 1244–1248, Dec 2012.
- [31] P. Ji, H. M. Tsai, C. Wang, and F. Liu. Vehicular visible light communications with led taillight and rolling shutter camera. In *2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1–6, May 2014.
- [32] Kuo Ye-Sheng, Pannuto Pat, Hsiao Ko-Jen, and Dutta Prabal. Luxapose: Indoor positioning with mobile phones and visible light. In *Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '14*, pp. 447–458, New York, NY, USA, 2014. ACM.

- [33] Chung-yen Chen and Shih-hao Chen. Enhancement of Signal Performance in LED Visible Light Communications Using Mobile Phone Camera Enhancement of Signal Performance in LED Visible Light Communications. *IEEE Phot. J.*, Vol. 7, No. 5, p. 7903607, 2015.
- [34] Peng Ji, Hsin Mu Tsai, Chao Wang, and Fuqiang Liu. Vehicular visible light communications with LED taillight and rolling shutter camera. In *IEEE Veh. Technol. Conf.*, pp. 1–6, 2015.
- [35] Pengfei Luo, Zabih Ghassemlooy, Hoa Le Minh, Xuan Tang, and Hsin Mu Tsai. Undersampled phase shift ON-OFF keying for camera communication. In *2014 6th Int. Conf. Wirel. Commun. Signal Process. WCSP 2014*, pp. 1–6, 2014.
- [36] Pengfei Luo, Min Zhang, Zabih Ghassemlooy, Hoa Le Minh, Hsin Mu Tsai, Xuan Tang, Lih Chieh Png, and Dahai Han. Experimental Demonstration of RGB LED-Based Optical Camera Communications. *IEEE Photonics J.*, Vol. 7, No. 5, pp. 1–12, 2015.
- [37] 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. *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 52, No. 7, pp. 88–97, 2014.
- [38] Pengfei Luo, Min Zhang, Zabih Ghassemlooy, Hoa Le Minh, Hsin-mu Tsai, Xuan Tang, and Dahai Han. Experimental Demonstration of a 1024-QAM. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 28, No. 2, pp. 139–142, 2016.
- [39] Y. Imai, T. Ebihara, and K. Mizutani. High-speed visible light communication with image sensor of the low frame rate and polygon mirror. In *2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp. 434–438, Oct 2014.
- [40] Yoshihito Imai, Tadashi Ebihara, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki. High-speed visible light communication using combination of low-speed image sensor and polygon mirror. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, Vol. E99.A, No. 1, pp. 263–270, January 2016.
- [41] Yoshihito Imai, Tadashi Ebihara, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki. Performance evaluation of high-speed visible light communication combining low-speed image sensor and polygon mirror in an outdoor environment. In *Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2016 Eighth International Conference on*, pp. 51–55. IEEE, 2016.
- [42] 今井義人, 栗本竜之介, 海老原格, 水谷孝一, 若槻尚斗. ブロック伝送とパスバンド信号を用いる可視光イメージセンサ通信システムの構築と屋外における性能評価. 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. 101, No. 2, pp. 111–121, 2018.

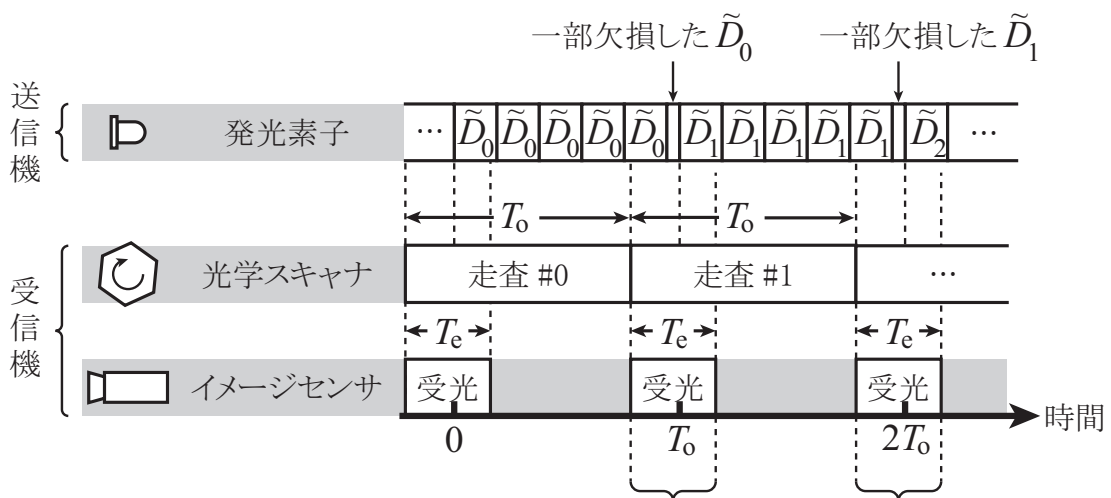
- [43] Haswani Binti Che Wook, Shinichiro Haruyama, and Masao Nakagawa. Visible light communication with led traffic lights using 2-dimensional image sensor. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, Vol. E89-A, No. 3, pp. 654–659, March 2006.
- [44] Sayaka Nishimoto, Takaya Yamazato, Hiraku Okada, Toshiaki Fujii, Tomohiro Yendo, and Shintaro Arai. High-speed transmission of overlay coding for road-to-vehicle visible light communication using LED array and high-speed camera. In *2012 IEEE Globecom Work. GC Wkshps 2012*, pp. 1234–1238, 2012.
- [45] Shintaro Arai, Yasutaka Shiraki, Takaya Yamazato, Hiraku Okada, Toshiaki Fujii, and Tomohiro Yendo. Multiple LED arrays acquisition for image-sensor-based I2V-VLC using block matching. In *2014 IEEE 11th Consum. Commun. Netw. Conf. CCNC 2014*, pp. 605–610, 2014.
- [46] オプトロニクス社編集部. 光学系の仕組みと応用：主要光デバイスにおける光学系機構と応用の実際. オプトロニクス社, 2003.
- [47] H.Segawa. Optical System of Laser Printer (in Japanese). *Study of Laser*, Vol. 6, No. 3, pp. 251–260, 1978.
- [48] C. S. Herrmann. Human EEG responses to 1-100 Hz flicker: Resonance phenomena in visual cortex and their potential correlation to cognitive phenomena. *Exp. Brain Res.*, Vol. 137, No. 3-4, pp. 346–353, 2001.
- [49] Gerald F. Marshall, Glenn E. Stutz(編集) (編) . *Handbook of Optical and Laser Scanning*, 第4章, p. 272. CRC Press, 第2版, 2011.
- [50] 近藤那樹, 北岡涼太郎, 水野翔太, 中條渉. 逐次推定法を用いたイメージセンサ可視光通信の同期方式. *電子情報通信学会論文誌 B*, Vol. J100-B, No. 2, pp. 77–89, February 2017.
- [51] 岡崎彰浩. 「知識ベース」4群. 電子情報通信学会, 2010.
- [52] 原俊樹, 圓道知博, 藤井俊彰, 谷本正幸. 動的環境におけるカメラとフォトダイオードを用いたハイブリッド型長距離可視光通信システム. *電子情報通信学会論文誌 A*, Vol. J90-A, No. 11, pp. 883–884, November 2007.
- [53] 大平祐生, 荒井伸太郎, 圓道知博, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 鎌倉浩嗣. Led と高速度カメラを用いた可視光通信における劣化画像からの信号復号手法. *電子情報通信学会論文誌 B*, Vol. J98-B, No. 7, pp. 696–706, July 2015.

## 付録A 受信機のパラメータ $T_e, T_o$ の関係について

本論文では、受信機のパラメータ  $T_e, T_o$  は、 $T_o = NT_e/2$  ( $N$  は自然数、かつ、 $N \geq 3$ ) の関係が成立していることを仮定している。上記の条件が満たされると、時間  $T_o$  内に、長さ  $T_e/2$  のデータブロックが丁度  $N$  個存在するため、送受信機が同期されていなくても、送信データブロックを欠損無く含んでいることが保証されている (図 4.12)。この場合、受信機は、簡単な処理 (イメージセンサの輝度値出力から無信号区間を検出する) によって、差動データブロック  $D_n$  に相当する部分を抽出することができるため、本論文で想定しているアプリケーション (遍在するスマートフォンを受信機として利活用する高速なイメージセンサを用いる可視光通信) に適している。

一方、上記の条件以外では、受信機における追加の信号処理が必要になる。4.4 で述べたとおり、本論文では一般的に普及しているイメージセンサの利用を想定しているため、条件として  $T_e < T_o$  が必要であることから、 $N > 2$ 、かつ、自然数でない場合を想定する。この時、時間  $T_o$  内に、長さ  $T_e/2$  のデータブロックが  $\lfloor N \rfloor$  個、および、長さが一部欠損したデータブロック 1 個が周期的に送信される。そして、受信機における光学スキャナの走査、および、イメージセンサの受光タイミングによっては、差動データブロック  $D_n$  に相当する部分は二つの受信データブロックにまたがる事がある (図 A.1)。この場合、受信機は 2 つの受信データブロックから差動データブロック  $D_n$  に相当する部分を別途求める必要があり、受信機の複雑度が大きくなってしまう。

したがって、本論文では、最小限の複雑度で受信機を構成するために、 $T_o = NT_e/2$  ( $N$  は自然数、かつ、 $N \geq 3$ ) の関係が成立しているものとしている。



各受信データブロックには、送信データブロックの一部が含まれている。受信機は2つの受信データブロックから、 $\tilde{D}_1$ を別途求める必要がある

図 A.1: 送受信機が同期されていない環境におけるブロック伝送 ( $N = 5.3$ )