

## 路車間並列光通信の通信路特性と受信システム Channel Characteristics and Receiving System of Road-vehicle Communication

増田 幸仁<sup>†</sup> 圓道 知博<sup>†</sup> 山里 敬也<sup>†</sup> 岡田 啓<sup>††</sup>  
 メヒルダドパナヒプルテヘラニ<sup>†</sup> 藤井 俊彰<sup>†††</sup> 谷本 正幸<sup>†</sup>  
 Takato MASUDA<sup>†</sup> Tomohiro Yendo<sup>†</sup> Takaya YAMAZATO<sup>†</sup> Hiraku OKADA<sup>††</sup>  
 Mehrdad Panahpour TEHRANI<sup>†</sup> Toshiaki FUJII<sup>†††</sup> and Masayuki TANIMOTO<sup>†</sup>

### 1. まえがき

高度道路交通システム(ITS)は、情報化、知能化などのIT技術を駆使して交通事故や渋滞などといった様々な交通問題の解決を図るために提案された。車載カメラやインフラカメラを利用した画像処理技術も重要な役割りを果たしている。特に安全性の向上という面においては、車両・歩行者・障害物の検出、交通信号機・交通標識の認識などが研究されており、その一部はすでに実用化されている。その中で車載カメラを用いて路車間での無線通信を行う可視光路車間通信が提案されている。可視光通信とは文字通り目に見える光を用いた通信方式であり、LEDなどの光源を送信機としその輝度によって情報を表現するものであるため、車載カメラを受信機として用いる。本研究では、LED式交通信号機を送信機に、車載高速度カメラを受信機に用いた路車間並列光通信システムを提案し研究を進めてきた。[1]

並列光通信は複数のLEDを用いて同時に複数のデータを通信する手法であり、可視光を用いることでカメラで受信している。そのためLED式交通信号機と高速度カメラとの距離が長くなるにつれてサンプリング幅が大きくなり、高周波成分が再現できなくなる。そこで階層的符号化を用いて低周波成分に優先度の高いデータ、高周波成分に優先度の低いデータを割り当てる方法が提案されている。[2]しかし、送受信間の距離と画像の劣化との関係はいまだ不明である。またサンプリングの影響で画像にモアレ信号が発生し、通信に誤りが生じる。

そこで、本研究ではこの通信システムの符号化を考えるために、通信システムの特長解析を行い、かつモアレの影響をなくすことを目指す。

### 2. 通信システムの概略

送信するデータ列から受信するデータ列までの経路は以下のとおりである。

- データ列の階層的符号化を行い、点灯データに変換する
- 点灯データに基づき、LEDが点灯または消灯する
- LEDから出た光がカメラのレンズを通る

<sup>†</sup>名古屋大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Nagoya University

<sup>††</sup>埼玉大学大学院理工学研究科 Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

<sup>†††</sup>東京工業大学大学院理工学研究科 Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

- 撮像面に結像した光が画素としてサンプリングされる
- 得られた画像からLEDの輝度値を推定する
- 復号化を行い、データ列に変換する

この中で、送信データの周波数分布を $F(u, v)$ 、LEDの空間周波数特性を $LED(u, v)$ 、カメラレンズの空間周波数特性を $LENS(u, v)$ 、画素内の開口部形状による空間周波数特性を $A^*(u, v)$ 、画素の並びを表す関数を $B(u, v)$ とすると、画像の周波数分布 $G(u, v)$ は、

$$H(u, v) = F(u, v) \cdot LED(u, v) \cdot LENS(u, v) \cdot A^*(u, v)$$

$$G(u, v) = H(u, v) * B(u, v)$$

で表される。よって各空間周波数特性をモデル化することで、データ列から画像までの経路全体をモデル化できる。

### 3. 提案手法

#### 3.1 モデル化方法

##### 3.1.1 画素サンプリングのモデル化

画素サンプリングとはつまり、デジタルカメラやデジタルビデオで撮影するということである。画素内の開口部形状はカメラによって異なり、カメラに入る全ての光が受光されるわけではない。また画素ピッチもカメラにより異なる。そのため今回用いたカメラの画素内の開口部形状から導出する。

##### 3.1.2 カメラレンズのモデル化

CZP(Circular Zone Plate)を図1に示す。CZPとは円形ゾンプレートと呼ばれ、正弦(もしくは余弦)曲線を2次元表現したものである。ある点を原点とする同心円が幾重にも並び、中心から外側に向かって空間周波数が高くなっていき、ピッチが細くなるものである。式では

$$f(x, y) = \sin(c_x x^2 + c_y y^2)$$

で表される。 $c_x = \pi / \text{画像の横幅}$ 、 $c_y = \pi / \text{画像の縦幅}$ 。

このCZPを今回用いる高速度カメラで撮影し、得られた画像の周波数分布を求める。ただし、得られた画像の周波数分布にはレンズによる影響と画素サンプリングの影響を受けている。そのため先に求めた画素サンプリングの影響を除いた周波数分布から、各周波数成分の再現性をみる。モデルはガウス型点広がり関数を用いる。レンズの空間周波数特性 $LENS(u, v)$ は

$$LENS(u, v) = \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{2\sigma_{lens}^2}\right)$$

で表されるため $\sigma_{lens}$ を得られた周波数分布から求める。

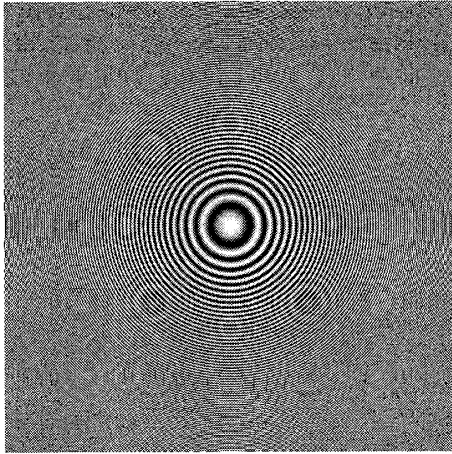


図1 CZP(Circular Zone Plate)

3.1.3 カメラレンズのモデル化

LED1 個を今回用いる高速度カメラで撮影し、得られた画像の周波数分布を求める。ただし、得られた周波数分布は画素サンプリング、カメラレンズの影響を含むのでこれらを除き、光の広がり方をみる。モデルはガウス型点広がり関数を用いる。LED の光の広がり方を  $led(x, y)$  とすると

$$led(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_{led}^2}\right)$$

で表される。LED とカメラの距離が離れるにつれ LED は撮影した画像には小さく写る。よってカメラ側から見た LED の空間周波数特性は距離に依存する。よって、空間周波数特性  $LED(u, v)$  は

$$LED(u, v) = \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{2} \sigma'^2\right)$$

$$\sigma' = \frac{f}{l-f} \sigma_{led}$$

で表されるため、 $\sigma_{led}$  を得られた周波数分布から求める。ここで  $f$  はレンズの焦点距離を、 $l$  は LED とカメラ間の距離を表す。

3.2 モアレの削減

モアレとはある連続信号をサンプリングするとき、ナイキスト周波数以上の信号がナイキスト周波数以下の周波数に折り返され、足し合わされるため、本来存在しない信号が観測される現象であり、この信号をモアレ信号と呼ぶ。図2 ナイキスト周波数とはサンプリング周波数の半分の周波数である。

この通信システムでは高周波成分が残り、ナイキスト周波数以上の周波数が折り返し歪み(モアレ)になる。これを防ぐためにわざとぼかす(焦点ズレ)ことで光学的にローパスフィルタをかけ、高周波成分をカットすることを考える。

ぼかしのモデルは単位体積を持つガウス型点広がり関数  $blr(x, y)$  を用いる。

$$blr(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_{blr}^2}\right)$$

一般に、ぼけの広がり大きさ  $\sigma_{blr}$  は以下の式で成り立つ。

$$\sigma_{blr} = \rho\gamma v \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{v} - \frac{1}{l}\right)$$

$f$  は焦点距離、 $l$  はレンズ主点から物体までの距離、 $v$  はレンズ主点から撮像面までの距離、 $\gamma$  はレンズの開口径、 $\rho$  はレンズに依存する定数である。図3に焦点ズレによってぼけが生じている場合の光学系を示す。レンズに依存する定数  $\rho$  以外は既知の情報なので、この  $\rho$  を求める。

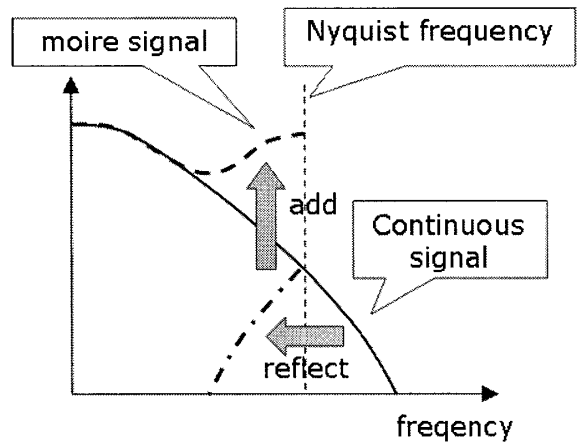


図2 モアレ信号

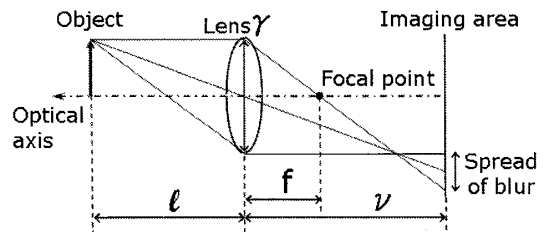


図3 ぼけが生じている場合の光学系

4. 階層的符号化

信号機と自動車の距離は常に変化するため、受信データのエラー率は距離に依存する。距離が長くなると信号機は高速度カメラに小さく映りこむので、距離が長くなるにつれて点灯データの高周波数成分が受信できなくなると考えられる。そこで、データに優先度をつけ優先度の高いデータはより遠くからでも受信できるように、送信データを信号機の点灯データの周波数帯に階層的にマッピングすることを考える。

今回、信号機に  $16 \times 16$  個の LED が並んだ信号機を用

いている。そこで送信するデータ列から点灯データに変換する際に2次元高速ハール・ウェーブレット逆変換(2DFHWT)を用いる。図4に示すように2DFHWTを行うとx方向、y方向ともに高周波数成分と低周波数成分に分けられ、4つの周波数帯に分かれる。よって、送信するデータ列を順に16×16の2次元に優先度別に8×8ずつマッピングし、2DFHWTを行う。これにより、信号機と高速度カメラの距離が長くなった場合でも低周波数成分にのせた高優先度情報が送られることを狙う。

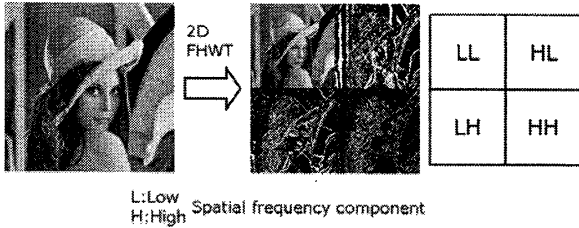


図4 2次元高速ハールウェーブレット変換

また、送信データは(0, 1)の2値のデータであるため、2DFHWTを行うと、点灯データとして5値のデータが出力される。ただ、今回用いた信号機のLEDはONまたはOFFのどちらかの状態しかとれないためPWM制御をすることで5値を表現する(図5に示す)。また受信画像からLEDの輝度値を推定するために線形補間法を用いる。これは得られた画像を16×16分割し、得られたアドレスが受信画像の画素位置に一致しない場合、近傍の4個の画素からの距離の比を求め、この比率で輝度値を推定するものである。求めたい座標(x, y)の輝度値をd(x, y)とすると、
$$d(x, y) = (1-p)(1-q) \cdot d([x], [y]) + p(1-q) \cdot d([x]+1, [y]) + (1-p)q \cdot d([x], [y]+1) + pq \cdot d([x]+1, [y]+1)$$
で求められる。[x], [y]はそれぞれx, yを超えない整数をあらわす。p, qなどは図6を参照。

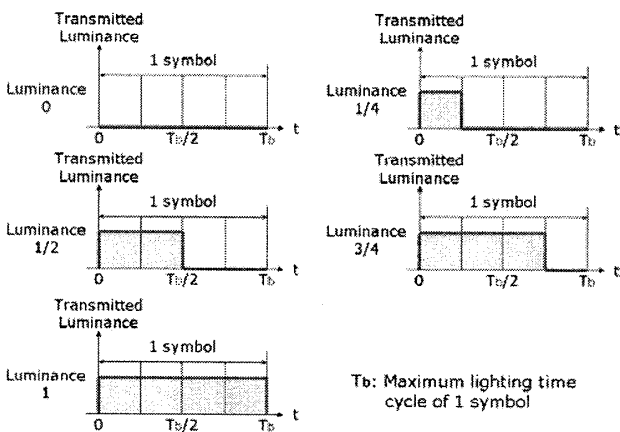


図5 信号機LED点灯のPWM制御

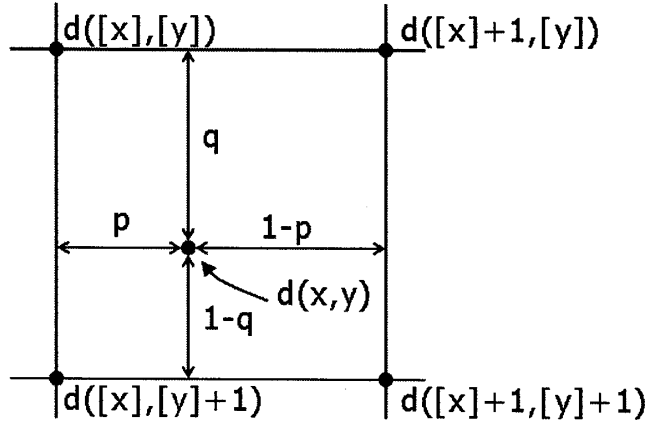


図6 線形補間法

## 5. 実験

### 5.1 実験条件

実験条件は以下の通りである。

- 高速度カメラ: Photron FASTCAM 1024PCI (解像度:1024×1024 焦点距離:35mm しぼり:8)
- レンズ: ニコン社製 Ai Zoom Nikkor
- LED: 直径5mm, 赤色

### 5.2 実験方法

- ① 画素内開口部形状から  $A(u, v)$  を導出する。
- ② CZPをカメラ間距離3ヶ所(1.8m, 2.5m, 4.6m), 各1000枚ずつ撮影し、画素サンプリングの影響を除き、周波数成分の分散  $\sigma_{lens}^2$  を求める。
- ③ LED1個をカメラ間距離4ヶ所(0.89m, 0.97m, 1.06m, 1.17m), 各1000枚ずつ撮影し、画素サンプリング、レンズの影響を除き、輝度値の分散  $\sigma_{led}^2$  を求める。
- ④ LED1個をカメラ間距離4ヶ所(15m, 20m, 25m, 30m), ぼかし各5種類(以下の距離の物体にピントを合わせた状態: 1.2m, 1.4m, 1.7m, 1.9m, 2.1m)で撮影し、画素サンプリング、レンズ、LEDの影響を計算で除き、周波数成分の分散を求める。距離やピント距離(ピントを合わせた距離)からレンズに依存する定数  $\rho$  を求める。
- ⑤ 16×16個LEDが並んだ信号機を用いて、点灯パターン8種類、距離3ヶ所(30m, 35m, 40m), ぼかし各3種類(以下の距離の物体にピントを合わせた状態: 1.2m, 1.7m, 5.0m)で撮影し、画像の周波数分布とモデルを用いて計算したシミュレーション値とを比較する。
- ⑥ 求めたモデルをもとに、送信データから受信データまでのシミュレーションを行い、BERを測定しぼかし方による影響を見る。階層的符号化には2DFHWTを使用し、カメラ間

距離 41ヶ所(20m から 60m まで 1m 間隔), ぼかし各 5 種類(以下の距離の物体にピントを合わせた状態: 2.35m, 3.40m, 4.40m, 10.00m, 無限遠), 送信データビット数 128000 ビットで行う。

5.3 実験結果

(1) 実験①, ②, ③, ④ の結果

- 画素サンプリングの振幅特性を図 7 に示す。
- 各距離での分散値を表 1 に示す。これらの平均からレンズの分散は  $\sigma_{lens}^2 = 0.404[\text{cycle}^2 / \text{pixel}^2]$
- 各距離での分散値を表 2 に示す。これらの平均から LED の分散は  $\sigma_{led}^2 = 0.404[\text{mm}^2]$
- 各 LED との距離, 各ピント距離でのレンズに依存する定数の結果を表 3 に示す。これらの平均からぼかしのレンズに依存する定数は  $\rho = 1.005$  となった。

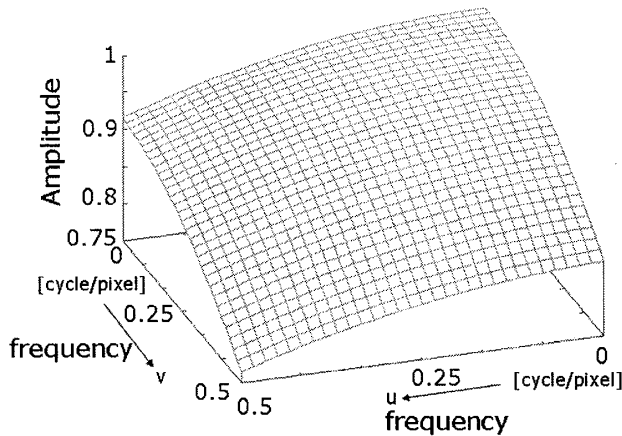


図 7 実験①振幅成分

表 1: 各距離でのレンズの分散  $s_{2 lens}$  結果

| 距離   | x 方向  | y 方向  |
|------|-------|-------|
| 1.8m | 0.414 | 0.400 |
| 2.5m | 0.395 | 0.416 |
| 4.6m | 0.401 | 0.398 |

単位[ $\text{cycle}^2/\text{pixel}^2$ ]

表 2: 各距離での LED の分散  $s_{2led}$  結果

| 距離    | 分散    |
|-------|-------|
| 0.89m | 1.094 |
| 0.97m | 1.145 |
| 1.06m | 1.085 |
| 1.18m | 1.062 |

単位[ $\text{mm}^2$ ]

表 3: 各距離でのぼかしのレンズに依存する定数  $r$

|     | 1.2m  | 1.4m  | 1.7m  | 1.9m  | 2.1m  |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 15m | 0.971 | 1.061 | 0.965 | 0.984 | 1.082 |
| 20m | 0.991 | 1.057 | 0.980 | 0.968 | 1.045 |
| 25m | 0.946 | 1.028 | 0.966 | 1.021 | 1.065 |
| 30m | 0.969 | 0.990 | 0.987 | 1.007 | 1.006 |

横:ピント距離 縦:LED との距離

(2) 実験⑤の結果

図 10 に実験 5 の結果の一例を示す。これは、直流成分で正規化したグラフである。モアレを含む画像(図 8)の周波数分布には、信号機で出力した信号には含まれない周波数成分を含んでいる(0.25 [cycle/pixel] 付近)。しかし、モアレを含まないようにぼかした画像(図 9)の周波数分布には含まれていない。また、どちらの周波数分布もシミュレーション値は非常に近い値で再現されている。

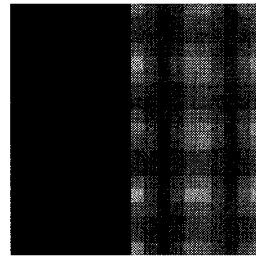


図 8 モアレあり

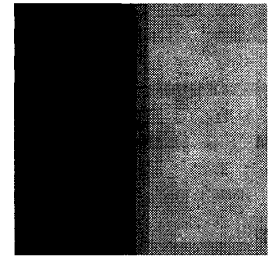


図 9 モアレなし

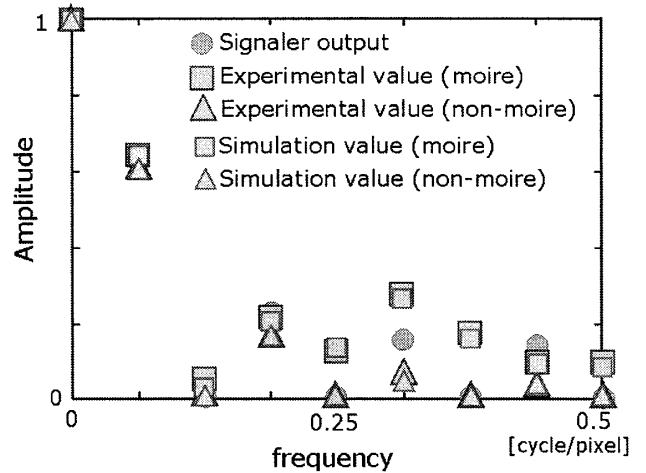


図 10 実験⑤結果グラフ(一例)

(3) 実験⑥の結果

図 11 に高優先度情報の BER 結果を, 図 12 に低優先度情報の BER 結果を示す。低優先度情報より高優先度情報のほうがエラー率は低いことが見て取れる。また各グラフでピント距離が無限遠の場合よりぼかしたときのほうが BER が良いことが分かる。これは、ぼかしたこ

とによりモアレの影響が出にくくなったからだと考えられる。ただ、ピント距離が 2.35m であったときはぼかしすぎたため、得られた画像からデータ推定ができなくなり BER が悪くなったと考えられる。

#### 謝辞

本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) によって行われた。

#### 参考文献

- [1] 岩崎, 圓道, 藤井, 谷本, "路車間可視光通信のための高速画像処理受信システム" 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J91-D, No. 8, pp. 2024- 2025 2008.
- [2] S. Masc, S. Arai, T. Yamazato, T. Yendo, T. Fujii, M. Tanimoto, Y. Kimura, "Error Correcting Scheme for Road-to-Vehicle Visible Light Communication using LED Array" IEEE International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems
- [3] 牛山, 草川著. "シミュレーション光学 多彩な光学系設計のために" 東海大学出版会, 2003.
- [4] BB.K.P.Horn 著, NTT ヒューマンインターフェース研究所訳. "ロボットビジョン機会は世界をどう見るか" 朝倉書店, 1993.
- [5] 安藤, 菰淵著. "固体撮像素子の基礎" 日本理工出版会, 1999
- [6] 長谷川著. "画像工学" コロナ社, 1983.
- [7] 井上, 八木, 林, 中須, 三谷, 奥井著. "C 言語で学ぶ実践画像処理" オーム社, 1999.

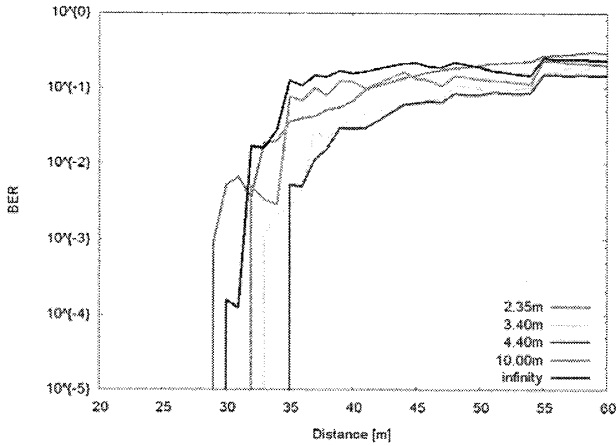


図 11 実験⑥BER(高優先度情報)

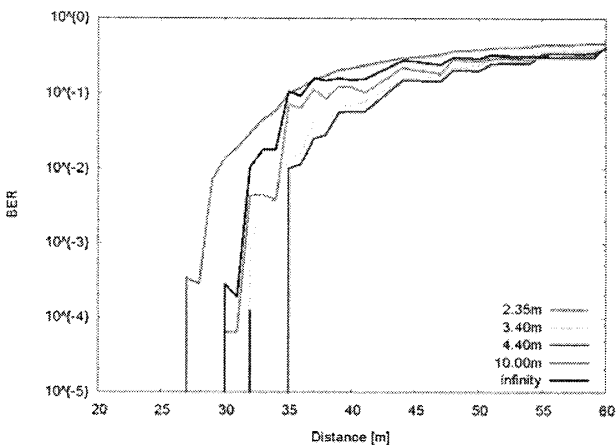


図 12 実験⑥BER(低優先度情報)

## 6. むすび

LED と高速度カメラを用いた路車間並列光通信の通信路のモデル化方法を提案し、モアレ削減のためのぼかしを含めたデータ列から画像までの経路全体のモデル化を行った。結果、LED とカメラの距離、ピント距離と周波数特性との関係が明らかになった。

また、シミュレーションによりピント距離を 4.40m にすることで 35m まではエラーフリーで通信が行えることを確認した。今後は、実際の実験を行い、シミュレーションとの比較を行うことと、このモデルをもとに高優先度情報をより遠くから通信が行え、かつ近距離で高レート of 通信が行える階層的符号化方式の検証と、通信時の最適ピント距離の検証を行うことが課題である。