

# イメージセンサを用いた路車間可視光通信 距離延長のためのピクセル間干渉除去技術

電子情報システム専攻 片山研究室  
博士課程 前期課程2年  
笠嶋 達也

# 路車間可視光通信

- 送信機: LED信号機
  - LEDは高速点滅が可能のため可視光通信へ応用可能
  - 既存のインフラを利用できる
- 受信機: 車載イメージセンサ(カメラ)
  - 複数光源を分離できる
  - LEDの数だけ情報を受信可能
  - 背景光雑音の影響が少ない



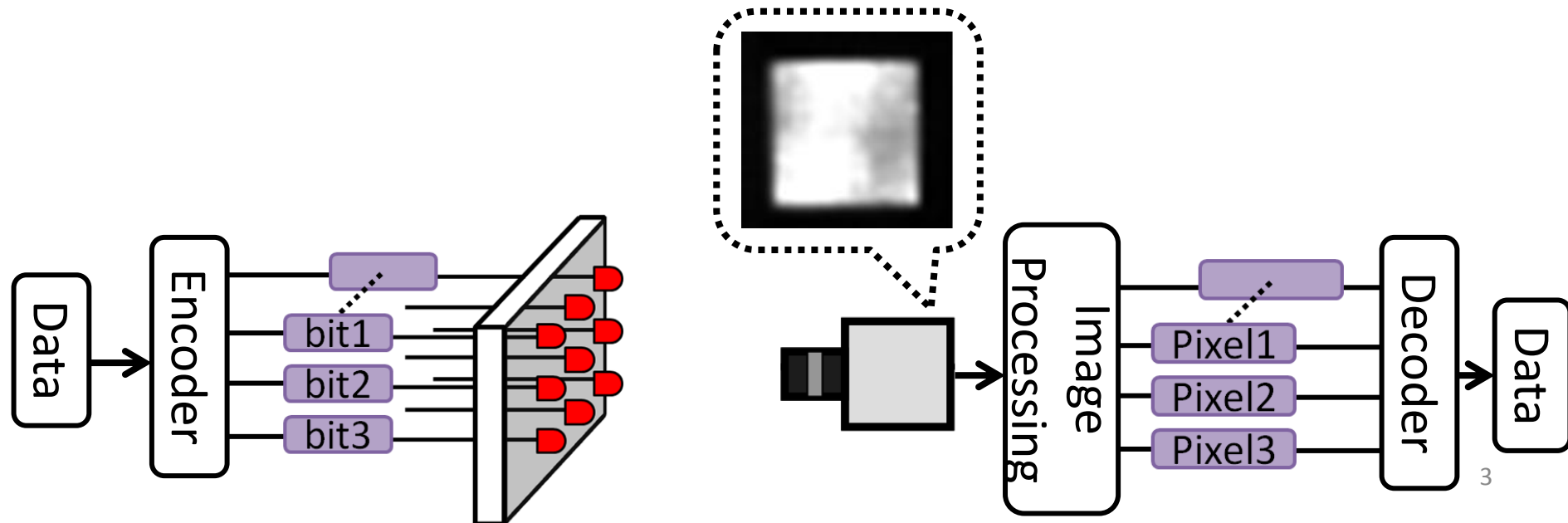
# イメージセンサを用いた 可視光通信における課題

送信機: LED毎に情報を送信

受信機: 画像のLEDに対応するピクセルから復号

- 距離により受信画像が劣化...誤り率特性の劣化
  - 解像度の不足
  - LED光の干渉

長距離

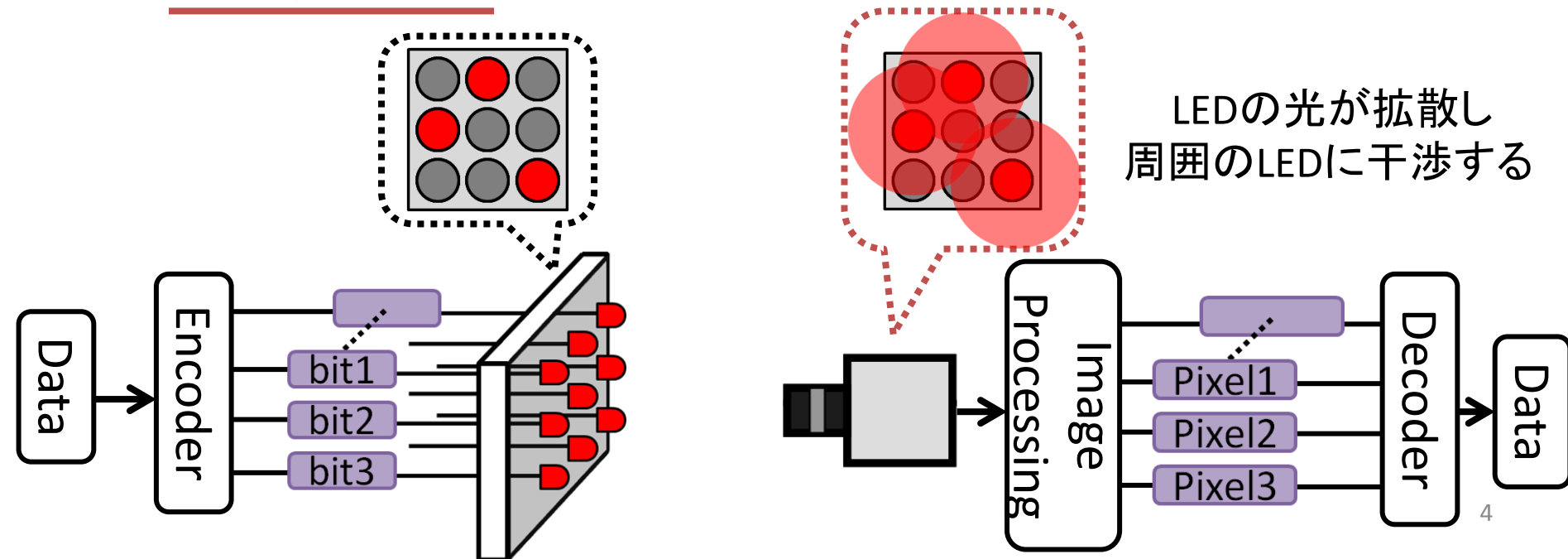


# イメージセンサを用いた 可視光通信における課題

送信機: LED毎に情報を送信

受信機: 画像のLEDに対応するピクセルから復号

- 距離により受信画像が劣化...誤り率特性の劣化
  - 解像度の不足
  - LED光の干渉



# イメージセンサを用いた 可視光通信における課題

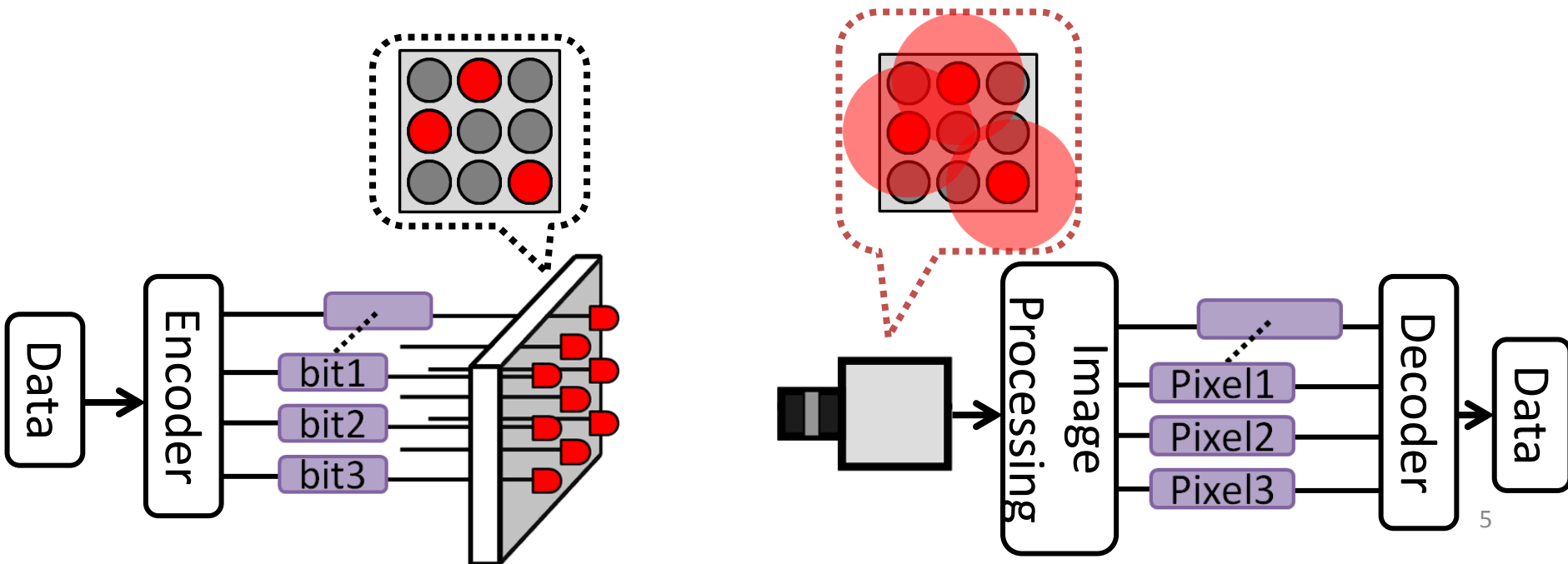
## 関連研究...干渉を除去する手法は未検討

- 隣接LEDの干渉に耐性を持つ階層的符号化の提案[1]

[1]K. Masuda, et al, " Hierarchical Coding Scheme for Optical Wireless Communication using LED Traffic Light and High-Speed Camera", IEICE Trans. Fundamentals, Sep. 2007

- 反転信号により隣接LEDの干渉の影響を抑制できる[2]

[2]T. Nagura, et al, "LED Array Tracking Method for Road-to-Vehicle Visible Light Communications in the Driving Situation", IEICE Trans. Commun, Feb. 2012

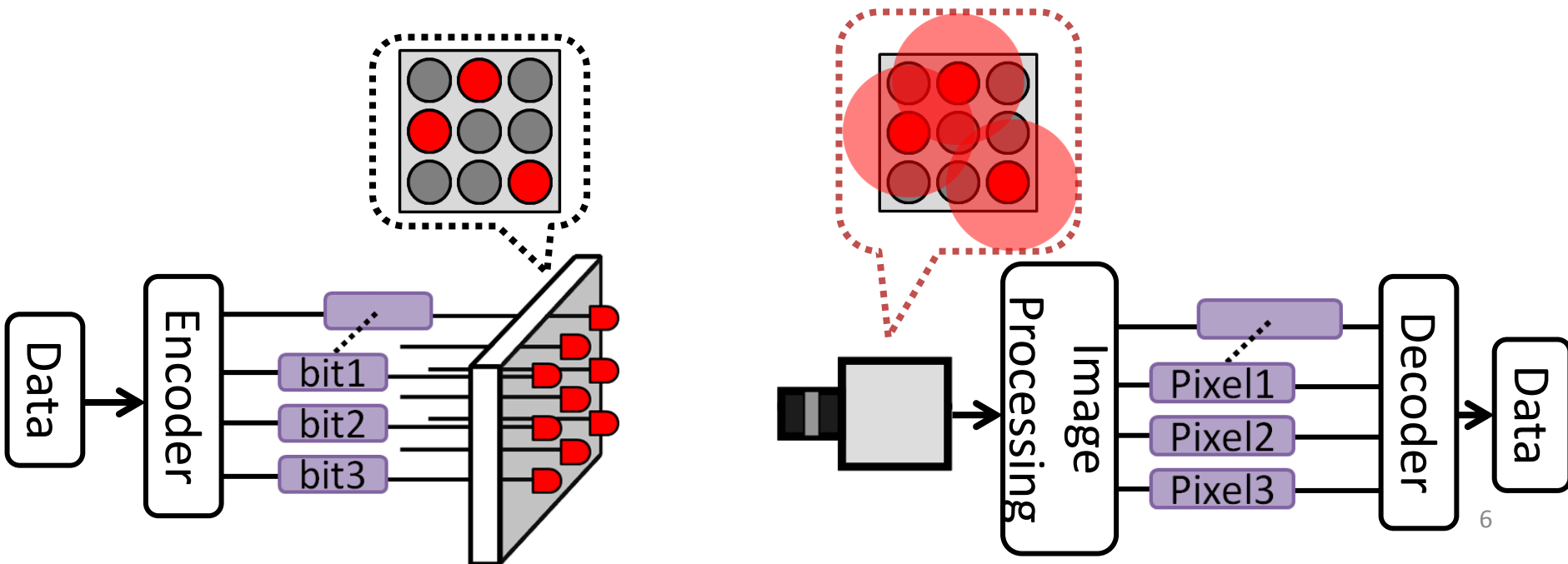


# イメージセンサを用いた 可視光通信における課題

関連研究...干渉を除去する手法は未検討

通信距離伸長のためには  
LED光の拡散による干渉の除去が必要

[2]T. Nagura, et al, "LED Array Tracking Method for Road-to-Vehicle  
Visible Light Communications in the Driving Situation", IEICE Trans. Commun, Feb. 2012



# 研究目的

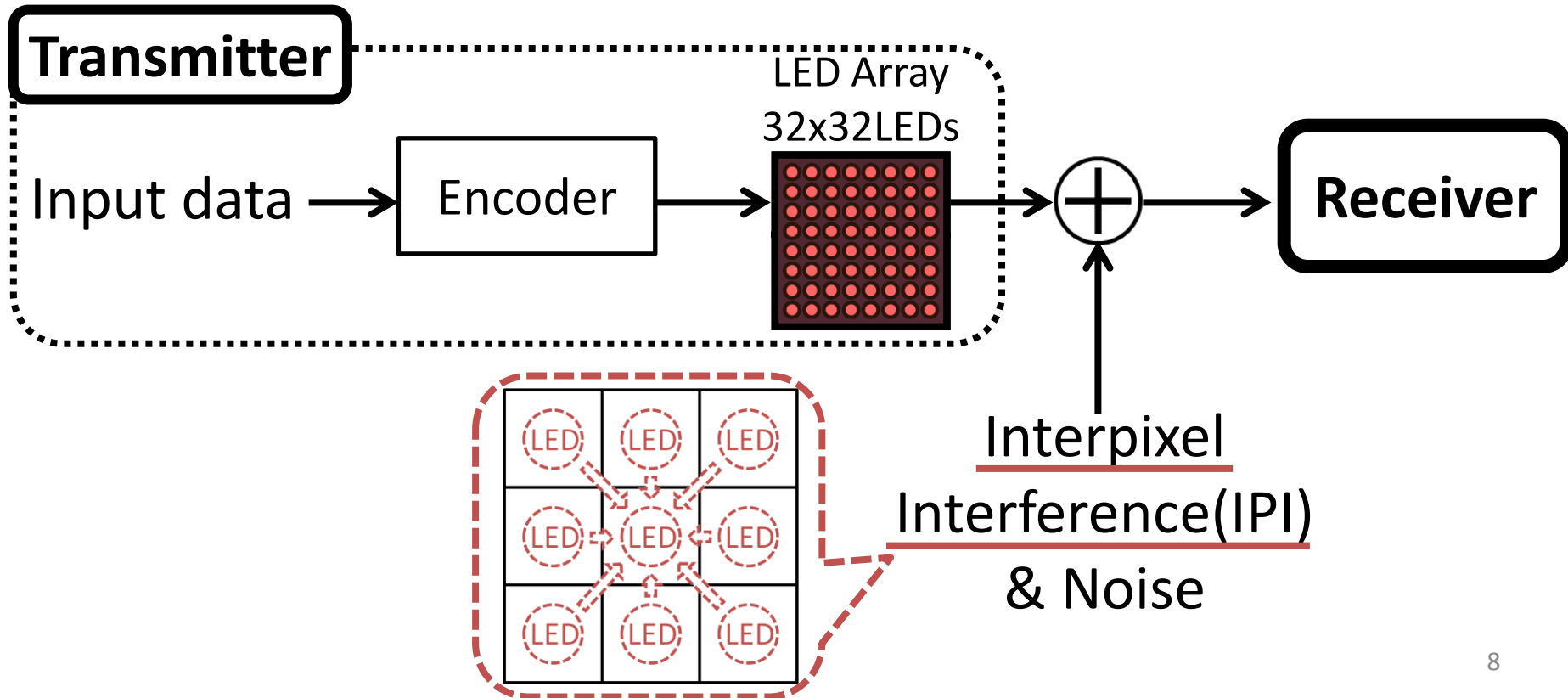
LED光の拡散による干渉をピクセル間干渉と定義

ピクセル間干渉の除去による  
通信距離の延長

- リサンプリング処理の改善手法の提案
  - 不均一なリサンプリング処理の改善
- ピクセル間干渉に関する検討
  - ピクセル間干渉を考慮した際の受信ピクセルの数式化
  - ピクセル間干渉の除去手法
  - 最適な拡散係数 $h$ の推定手法(省略)
- 提案手法の有効性の評価

# システムモデル

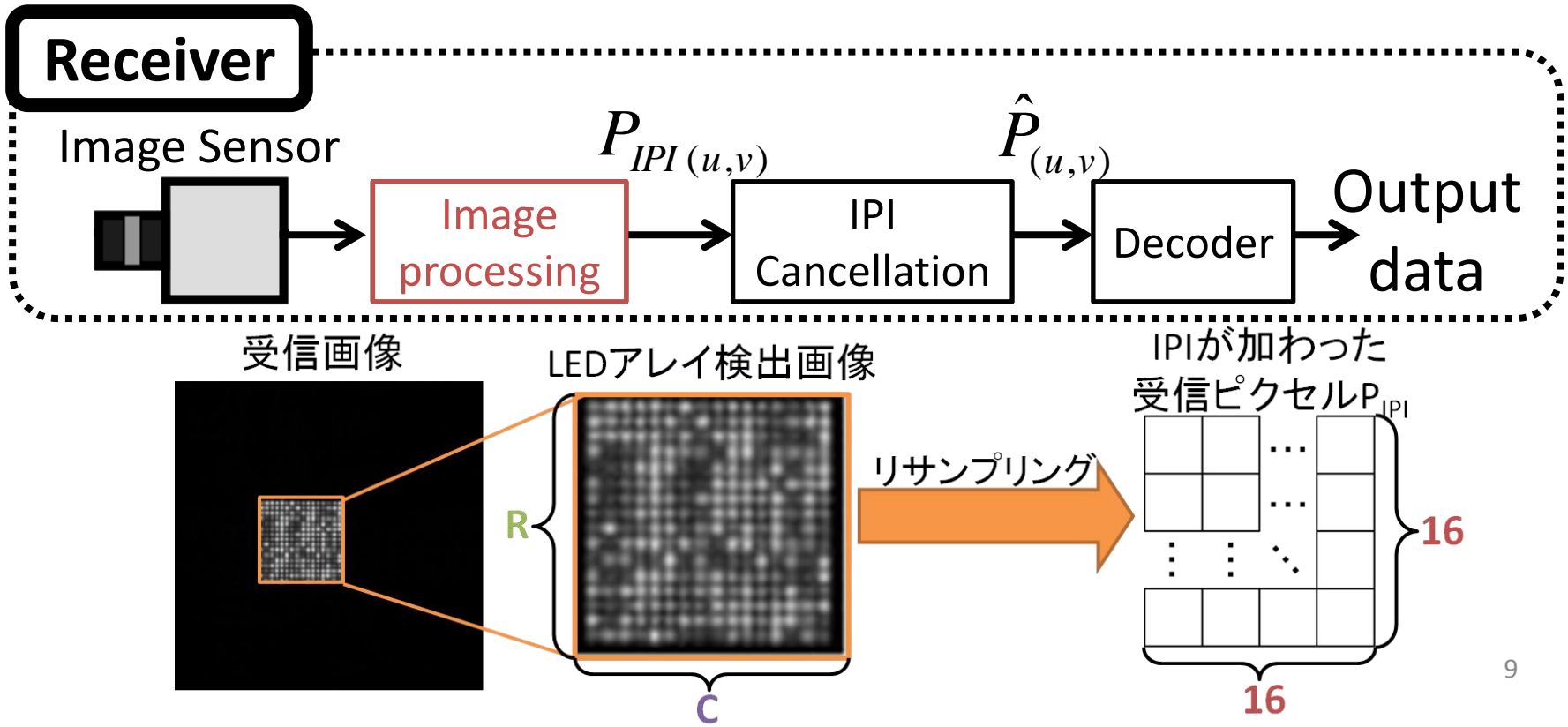
- 符号化したデータをLEDアレイで一度に $16 \times 16$ ビットを送信
  - $2 \times 2$  LEDに1ビットを割り当て
- 送受信間でピクセル間干渉や雑音加わり受信機に入力





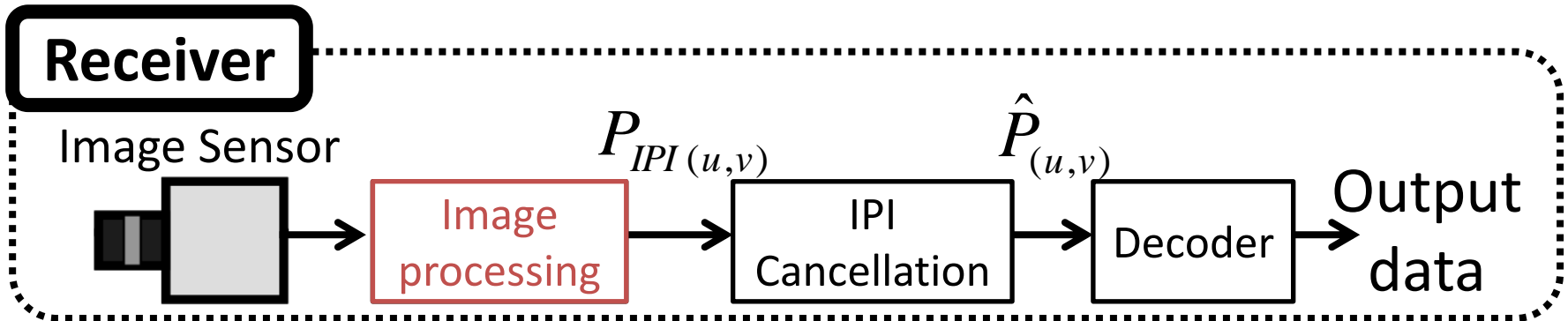
# システムモデル

1. 受信画像を処理し $16 \times 16$ ピクセルのデータ $P_{IPI}$ に変換
  - i. LEDアレイ領域 $R \times C$ ピクセルを検出し切り出す ※ $R, C \geq 16$
  - ii.  $R \times C$ ピクセルを $16 \times 16$ ピクセルにリサンプリングする



# システムモデル

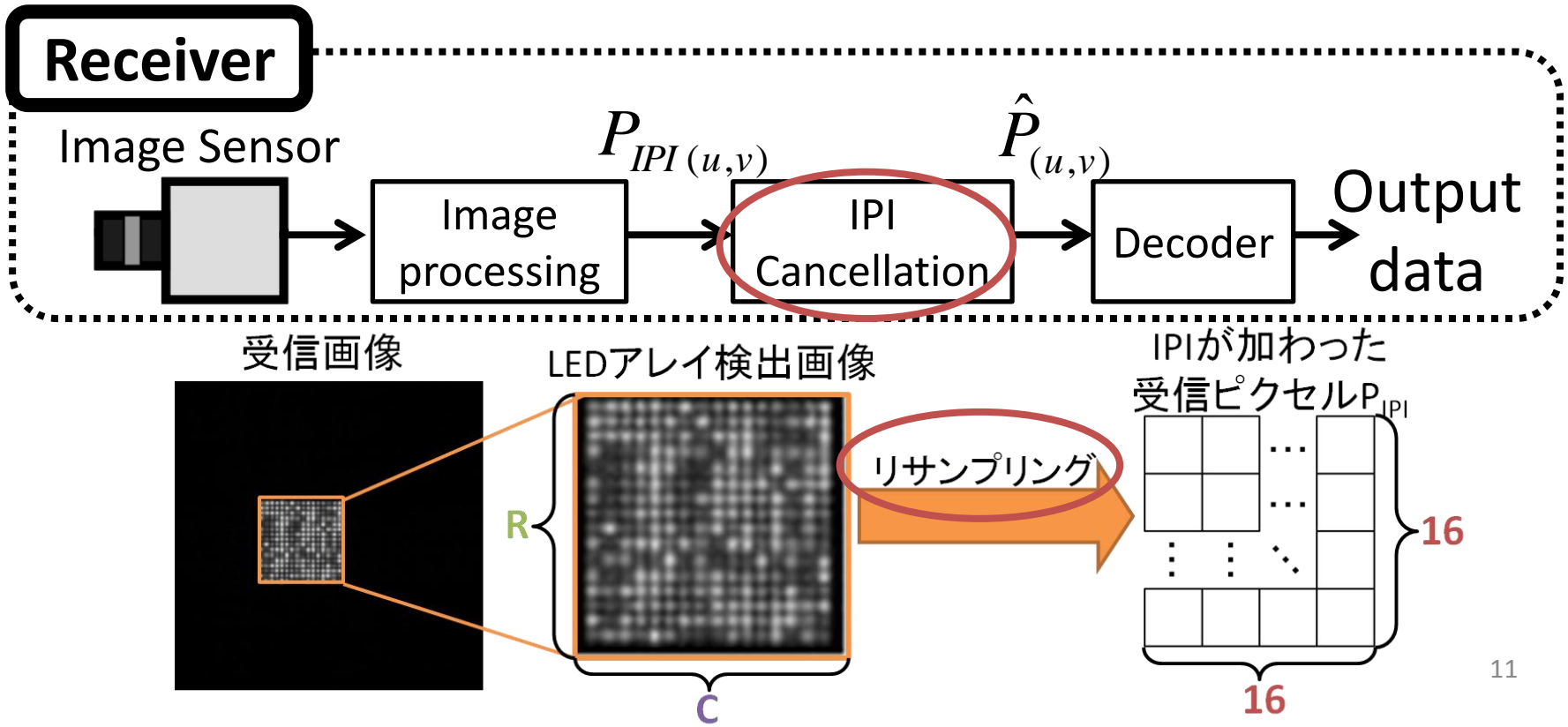
1. 受信画像を処理し $16 \times 16$ ピクセルのデータ $P_{|P|}$ に変換
  - i. LEDアレイ領域 $R \times C$ ピクセルを検出し切り出す ※ $R, C \geq 16$
  - ii.  $R \times C$ ピクセルを $16 \times 16$ ピクセルにリサンプリングする



2.  $P_{|P|}$ に対してピクセル間干渉を除去を行う
3. 復号を行いデータ取得

# システムモデル

1. 受信画像を処理し $16 \times 16$ ピクセルのデータ $P_{IPI}$ に変換
  - i. LEDアレイ領域 $R \times C$ ピクセルを検出し切り出す ※ $R, C \geq 16$
  - ii.  $R \times C$ ピクセルを $16 \times 16$ ピクセルにリサンプリングする



# 研究目的

LED光の拡散による干渉をピクセル間干渉と定義

ピクセル間干渉の除去による  
通信距離の延長

- リサンプリング処理の改善手法の提案
  - 不均一なリサンプリング処理の改善
- ピクセル間干渉に関する検討
  - ピクセル間干渉を考慮した際の受信ピクセルの数式化
  - ピクセル間干渉の除去手法
  - 最適な拡散係数 $h$ の推定手法(省略)
- 提案手法の有効性の評価

□電子情報通信学会 ITS研究会(2012/2)

# 改善リサンプリング手法の提案

従来のリサンプリング手法の問題

1. **不均一**にリサンプリング処理してしまう
2. 画像の補間手法の中では**低品質**

それぞれの問題を改善するリサンプリング手法を提案

- 1.の改善手法: 面積平均法
- 2.の改善手法: バイリニア補間、バイキュービック補間

例: 4ピクセル⇒3ピクセル



# 改善リサンプリング手法の提案

従来のリサンプリング手法の問題

1. **不均一**にリサンプリング処理してしまう
2. 画像の補間手法の中では**低品質**

それぞれの問題を改善するリサンプリング手法を提案

- 1.の改善手法: 面積平均法
- 2.の改善手法: バイリニア補間、バイキュービック補間

例: 4ピクセル⇒3ピクセル



- 全く使われないピクセルが存在してしまう
  - 同じピクセル複数回を使ってしまう
- ⇒ 干渉除去が効果的に行えない

# 面積平均法 (Area Average)

面積平均法：変換前と後での面積比を考慮し平均する手法

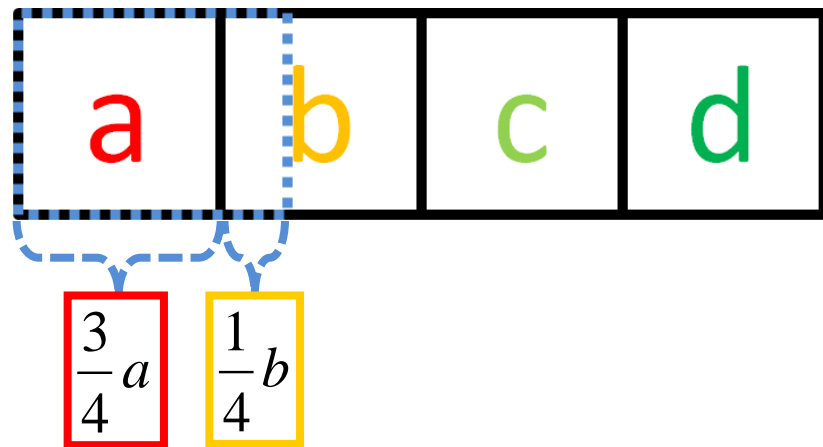
例：4ピクセル⇒3ピクセル

$$Dst(n) = \frac{N}{L} \sum_{m=\frac{L}{N}(n-1)+1}^{\frac{L}{N}n} Src\left(\left\lfloor \frac{M}{L}(m-1) \right\rfloor + 1\right)$$

Src(m)：変換前のm番目のピクセル( $1 \leq m \leq M$ )

Dst(n)：変換後のn番目のピクセル( $1 \leq n \leq N$ )

L：MとNの最小公倍数



1ピクセルに1LEDが含まれるようにリサンプリングできる

# 面積平均法 (Area Average)

面積平均法：変換前と後での面積比を考慮し平均する手法

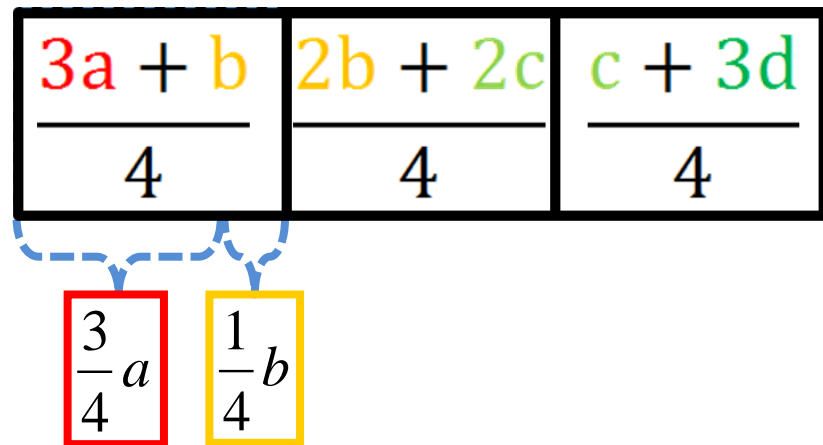
例：4ピクセル⇒3ピクセル

$$Dst(n) = \frac{N}{L} \sum_{m=\frac{L}{N}(n-1)+1}^{\frac{L}{N}n} Src\left(\left\lfloor \frac{M}{L}(m-1) \right\rfloor + 1\right)$$

Src(m)：変換前のm番目のピクセル( $1 \leq m \leq M$ )

Dst(n)：変換後のn番目のピクセル( $1 \leq n \leq N$ )

L：MとNの最小公倍数



1ピクセルに1LEDが含まれるようにリサンプリングできる



# 面積平均法 (Area Average)

面積平均法：変換前と後での面積比を考慮し平均する手法

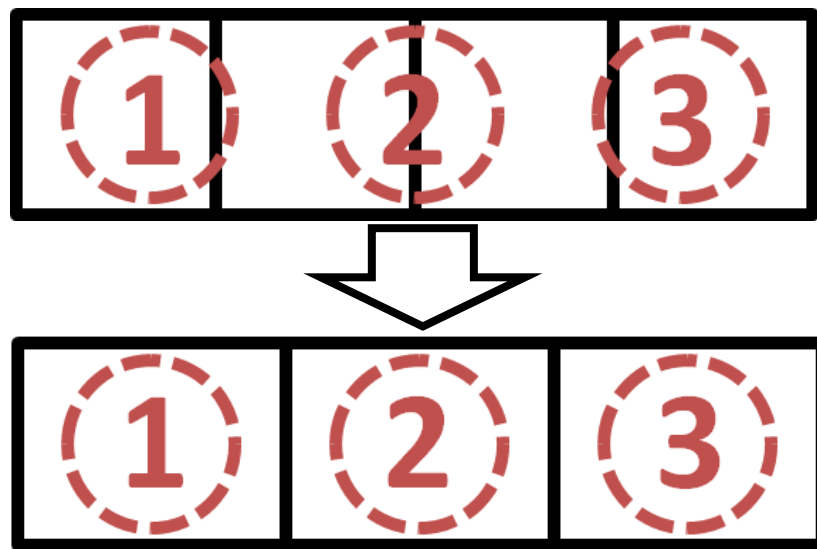
例：4ピクセル⇒3ピクセル

$$Dst(n) = \frac{N}{L} \sum_{m=\frac{L}{N}(n-1)+1}^{\frac{L}{N}n} Src\left(\left\lfloor \frac{M}{L}(m-1) \right\rfloor + 1\right)$$

Src(m)：変換前のm番目のピクセル( $1 \leq m \leq M$ )

Dst(n)：変換後のn番目のピクセル( $1 \leq n \leq N$ )

L：MとNの最小公倍数



1ピクセルに1LEDが含まれるようにリサンプリングできる

# 研究目的

LED光の拡散による干渉をピクセル間干渉と定義

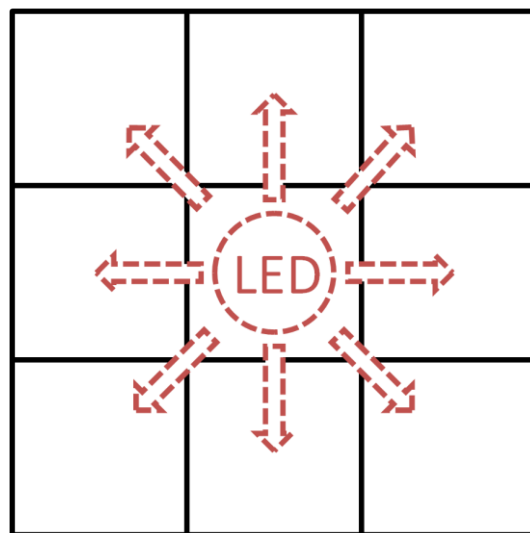
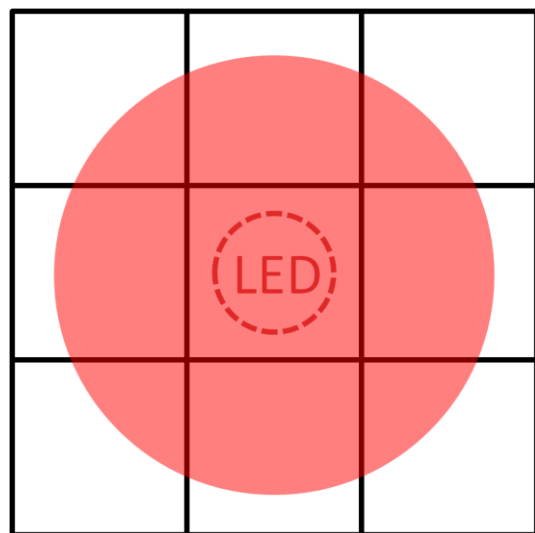
## ピクセル間干渉の除去による 通信距離の延長

- リサンプリング処理の改善手法の提案
  - 不均一なリサンプリング処理の改善
- ピクセル間干渉に関する検討
  - ピクセル間干渉を考慮した際の受信ピクセルの数式化
  - ピクセル間干渉の除去手法
  - 最適な拡散係数 $h$ の推定手法(省略)
- 提案手法の有効性の評価

□国際会議 IEEE WiVEC(2013/6 採択決定済)  
□論文 IEICE Trans. Communications(投稿中)

# LED光の拡散モデル

- LED光の拡散により隣接8ピクセルの輝度値が増幅
  - 実測を基にLEDの光の拡散を簡易的にモデル化
1. LEDの映るピクセルの輝度値 :  $P_0$
  2. 隣接8ピクセルの輝度値 :  $P_0$ と**拡散係数 $h$** の乗算



$\frac{h}{\sqrt{2}} P_0$	$hP_0$	$\frac{h}{\sqrt{2}} P_0$
$hP_0$	$P_0$	$hP_0$
$\frac{h}{\sqrt{2}} P_0$	$hP_0$	$\frac{h}{\sqrt{2}} P_0$

# ピクセル間干渉

## Interpixel Interference(IPI)

IPIが加わったピクセルの輝度値 $P_{IPI(u,v)}$ は  
LED単体の輝度値 $P_{(u,v)}$ と拡散係数 $h$ の畳み込みで表す

IPIの加わったピクセル  
の輝度値 $P_{IPI(u,v)}$

	$P_{IPI(u,v)}$	

=

LED単体の輝度値 $P_{(u,v)}$

$P_{(u-1,v-1)}$	$P_{(u-1,v)}$	$P_{(u-1,v+1)}$
$P_{(u,v-1)}$	$P_{(u,v)}$	$P_{(u,v+1)}$
$P_{(u+1,v-1)}$	$P_{(u+1,v)}$	$P_{(u+1,v+1)}$

\*

LED光の拡散モデル

$\frac{h}{\sqrt{2}}$	$h$	$\frac{h}{\sqrt{2}}$
$h$	1	$h$
$\frac{h}{\sqrt{2}}$	$h$	$\frac{h}{\sqrt{2}}$

# ピクセル間干渉除去フィルタ

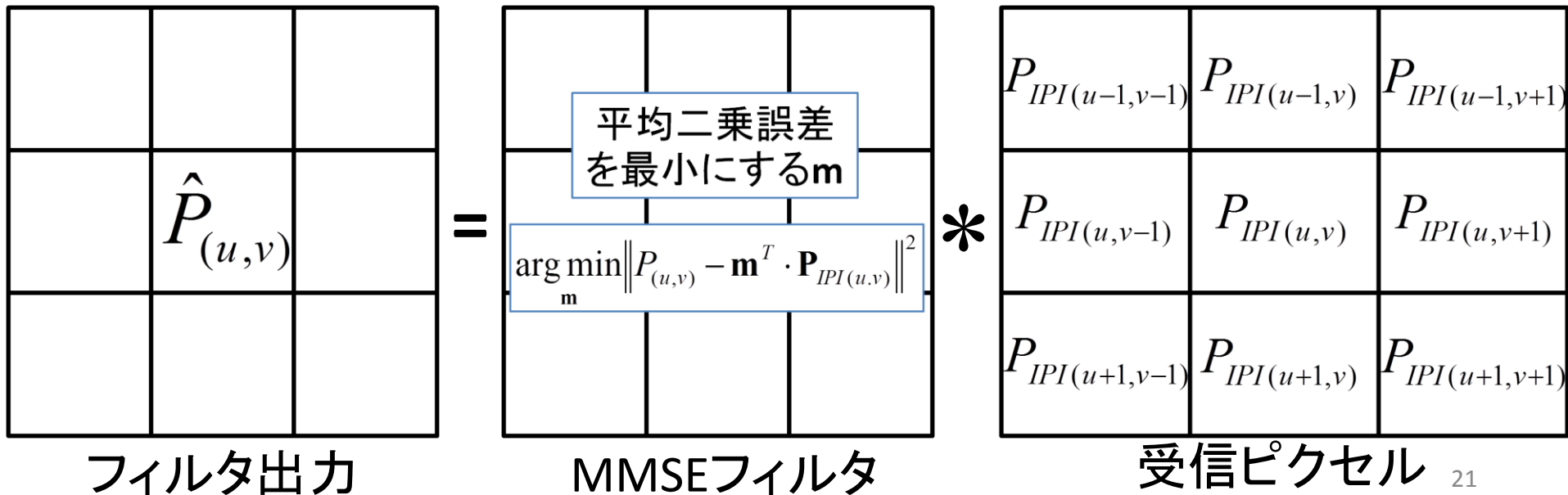
## MMSEフィルタ

ピクセル間干渉の除去手法として2つのフィルタを提案

### 1. MMSEフィルタ

平均二乗誤差を最小にする $\mathbf{m}$ で畳み込む

$$\mathbf{m} = \arg \min_{\mathbf{m}} \left\| P_{(u,v)} - \mathbf{m}^T \cdot \mathbf{P}_{IPI(u,v)} \right\|^2$$



# ピクセル間干渉除去フィルタ 逆フィルタ

ピクセル間干渉の除去手法として2つのフィルタを提案

## 2. 逆フィルタ

LEDの光の拡散分を減算するフィルタ

雑音がない場合のMMSEフィルタとほぼ同様の出力

MMSEフィルタと比べ計算時間が少ない

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline & & \\ \hline & \hat{P}_{(u,v)} & \\ \hline & & \\ \hline \end{array} = \frac{1}{\sqrt{1+6h^2}} \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline -\frac{h}{\sqrt{2}} & -h & -\frac{h}{\sqrt{2}} \\ \hline -h & 1 & -h \\ \hline -\frac{h}{\sqrt{2}} & -h & -\frac{h}{\sqrt{2}} \\ \hline \end{array} * \begin{array}{|c|c|c|} \hline P_{IPI(u-1,v-1)} & P_{IPI(u-1,v)} & P_{IPI(u-1,v+1)} \\ \hline P_{IPI(u,v-1)} & P_{IPI(u,v)} & P_{IPI(u,v+1)} \\ \hline P_{IPI(u+1,v-1)} & P_{IPI(u+1,v)} & P_{IPI(u+1,v+1)} \\ \hline \end{array}$$

フィルタ出力
逆フィルタ
受信ピクセル

# 研究目的

LED光の拡散による干渉をピクセル間干渉と定義

ピクセル間干渉の除去による  
通信距離の延長

- リサンプリング処理の改善手法の提案
  - 不均一なリサンプリング処理の改善
- ピクセル間干渉に関する検討
  - ピクセル間干渉を考慮した際の受信ピクセルの数式化
  - ピクセル間干渉の除去手法
  - 最適な拡散係数 $h$ の推定手法(省略)
- 提案手法の有効性の評価

# BER特性評価実験 実験諸元

- 各手法の有効性を評価するためビット誤り率(BER)特性を測定

LEDの個数と配置	32 × 32の格子型(LED間隔15mm)
使用カメラ	Photoron FASTCAM 1024PCI 100k
使用レンズフィルタ	ND4Lフィルタ※光量を1/4化
レンズ焦点距離/絞り	35mm / 11
通信距離/撮影環境	30m-65m(5m間隔) / 静止環境
誤り訂正符号	ターボ符号
拡散係数h	0.1

LED Array

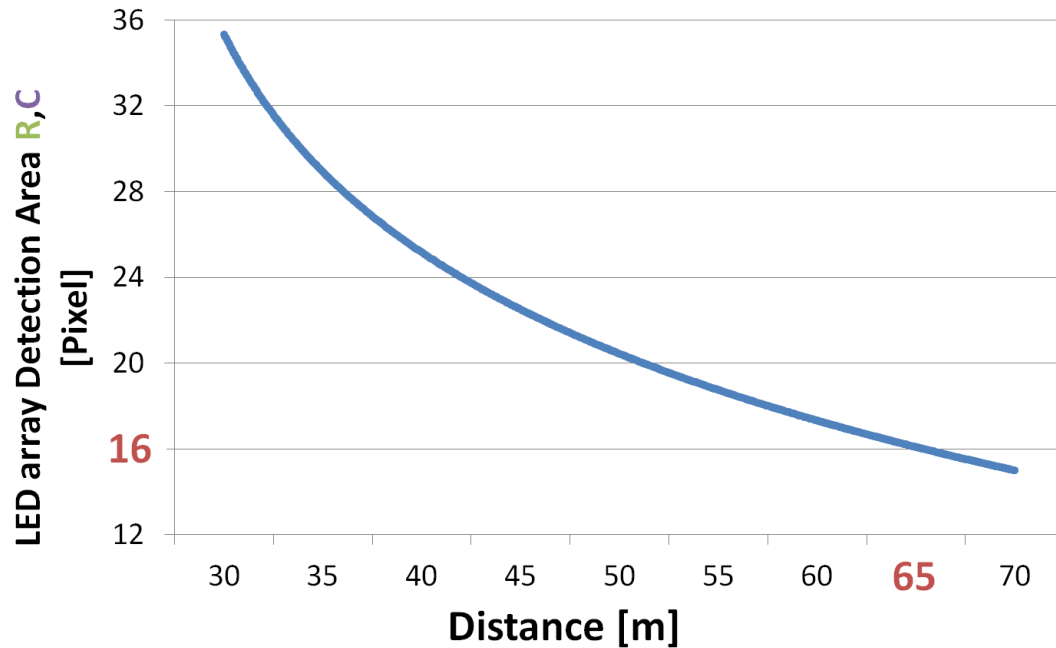


Image Sensor

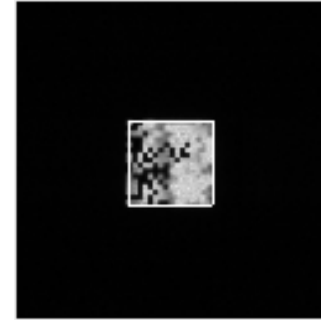




# 実験諸元における 通信距離の限界

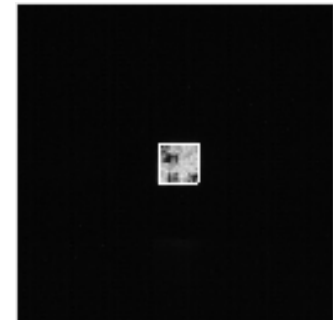


受信画像(30m)



LEDアレイサイズ  
35x35ピクセル

受信画像(65m)



LEDアレイサイズ  
16x16ピクセル

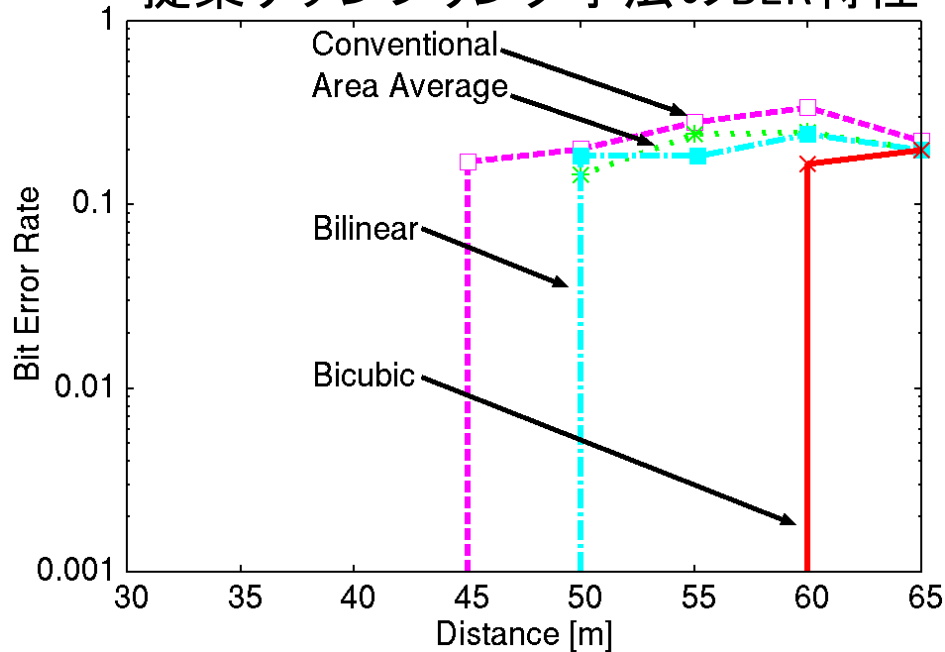
65m地点でLEDアレイは16x16ピクセルで検出  
⇒65m以上では1ビットに割り当てられるピクセルが1以下

65mが誤り無しで通信できる距離の限界

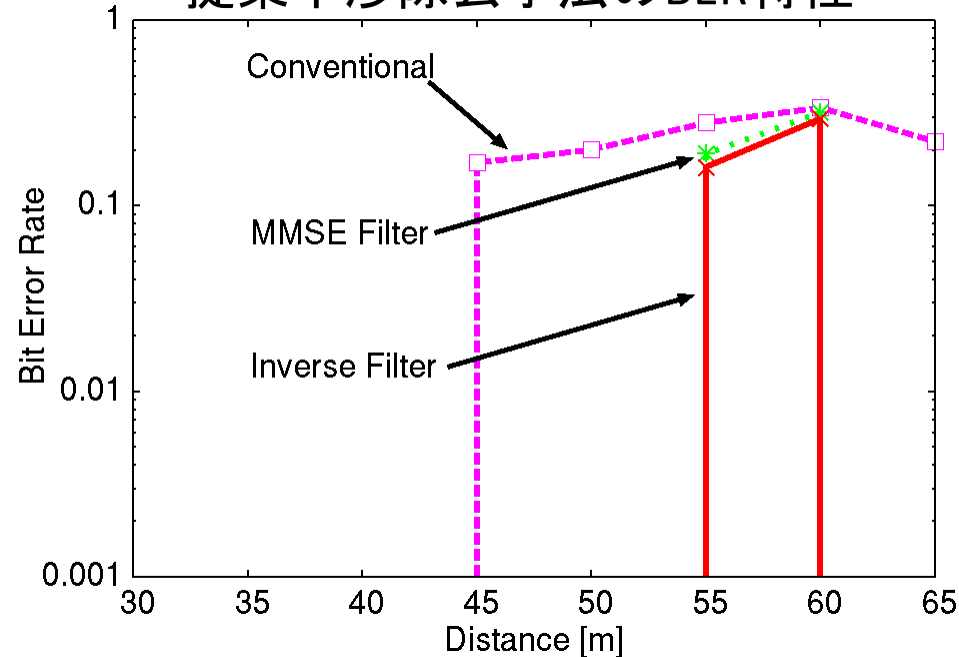
# BER特性評価実験

## 各提案手法単体での比較

提案リサンプリング手法のBER特性



提案干渉除去手法のBER特性



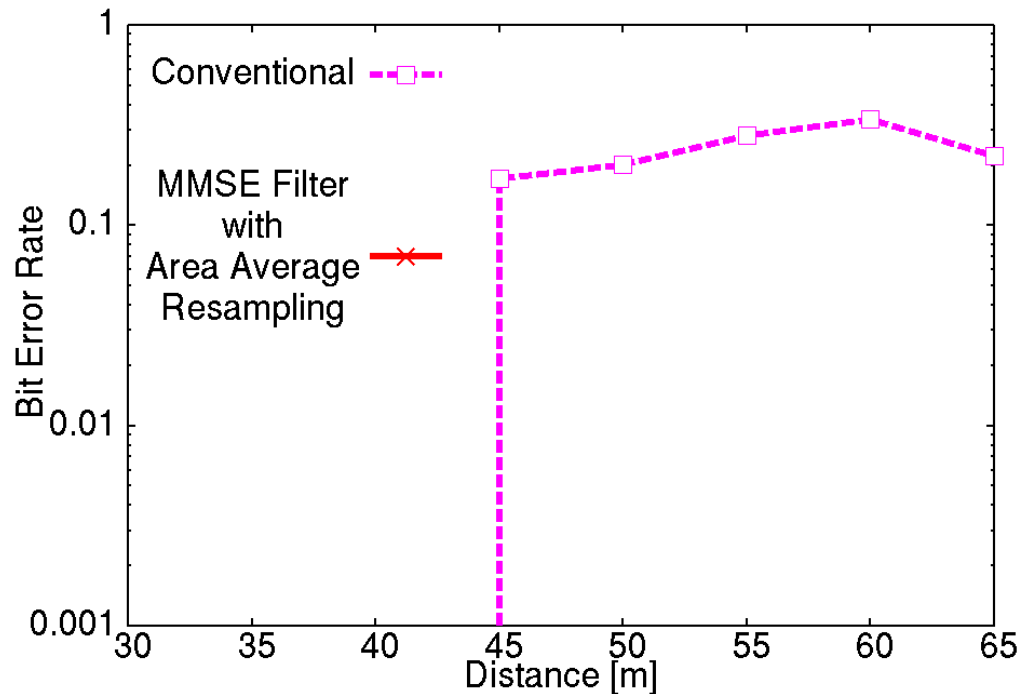
全ての提案手法においてBER特性が向上

- 面積平均法とバイリニア補間はほぼ同性能
- バイキュービック補間が最も特性が向上

- MMSEフィルタと逆フィルタはほぼ同性能

# BER特性評価実験

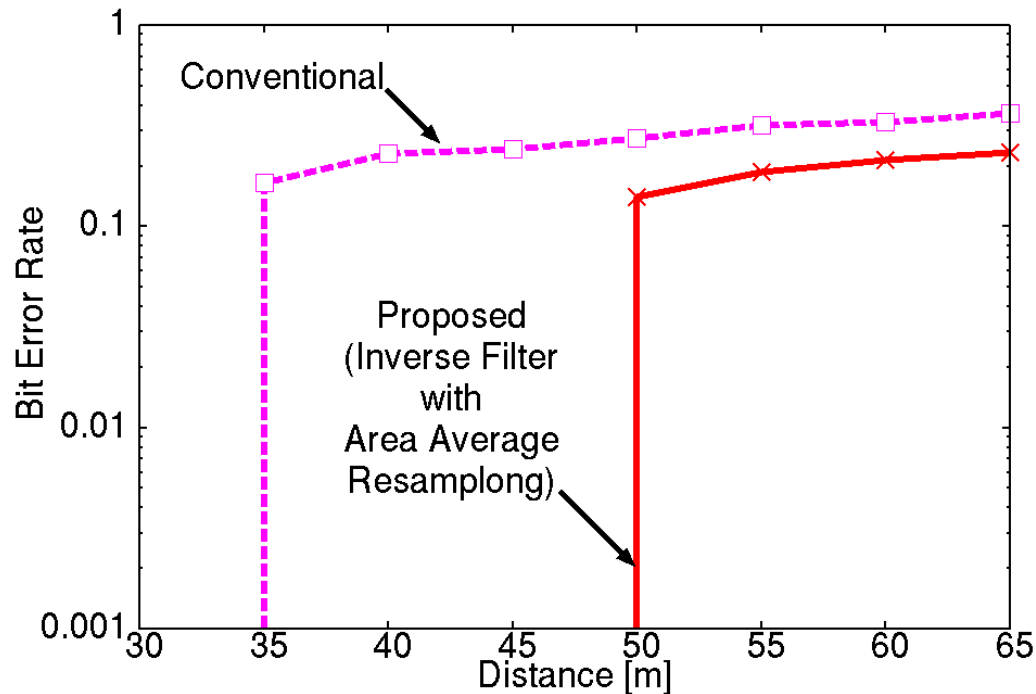
## 各提案手法複合時の評価



提案手法を両方適用することで  
通信距離の限界までエラーフリーを達成

•他提案手法でも同等の性能が得られた

# 走行環境での BER特性評価実験



走行環境においてBER特性が向上  
エラーフリーとなる距離を15m伸長できた

20km/h

# まとめ

## ピクセル間干渉の除去による 通信距離の延長

- 改善リサンプリング手法を提案
- ピクセル間干渉を定義し、除去手法などを提案
- 静止環境: 通信限界距離までエラーフリーを達成
- 走行環境: エラーフリー距離を15mの伸長を達成

業績

- 電気情報通信学会 USN研究会 (2012/1)
- 電気情報通信学会 ITS研究会 (2012/2)
- 国際会議 IEEE WiVEC (2013/6 採択決定済)
- 論文 IEICE Trans. Communications (投稿中)