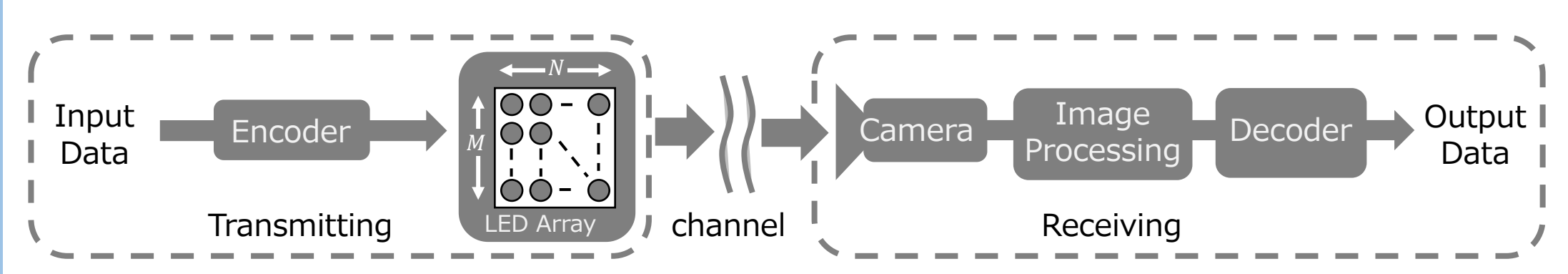


回転式LED送信機を用いたイメージセンサ通信におけるAlamouti型時空間符号化の実験評価

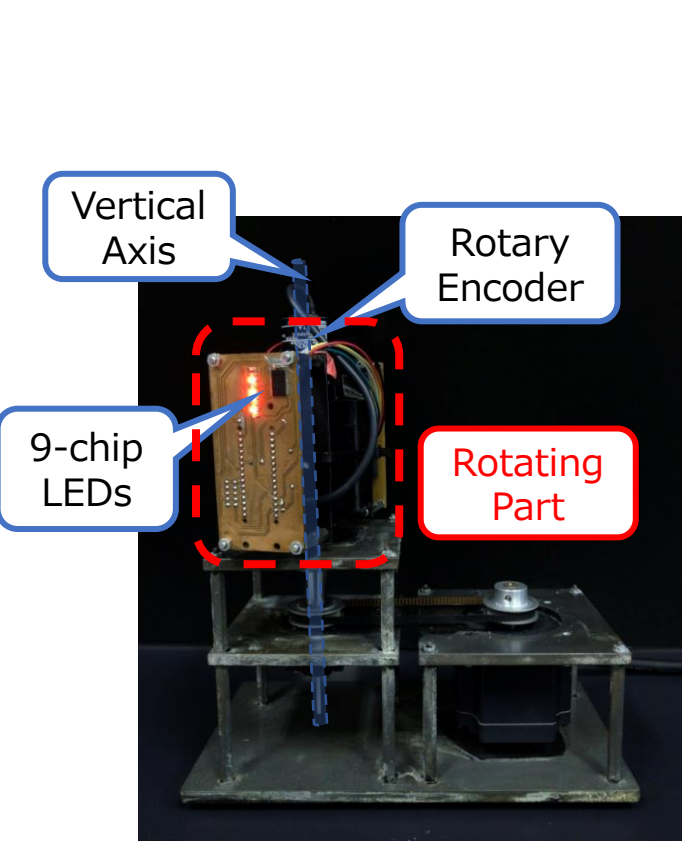
唐 正強・荒井 伸太郎（岡山理科大学） 山里敬也（名古屋大学）

研究背景 イメージセンサ通信 (ISC) [1]

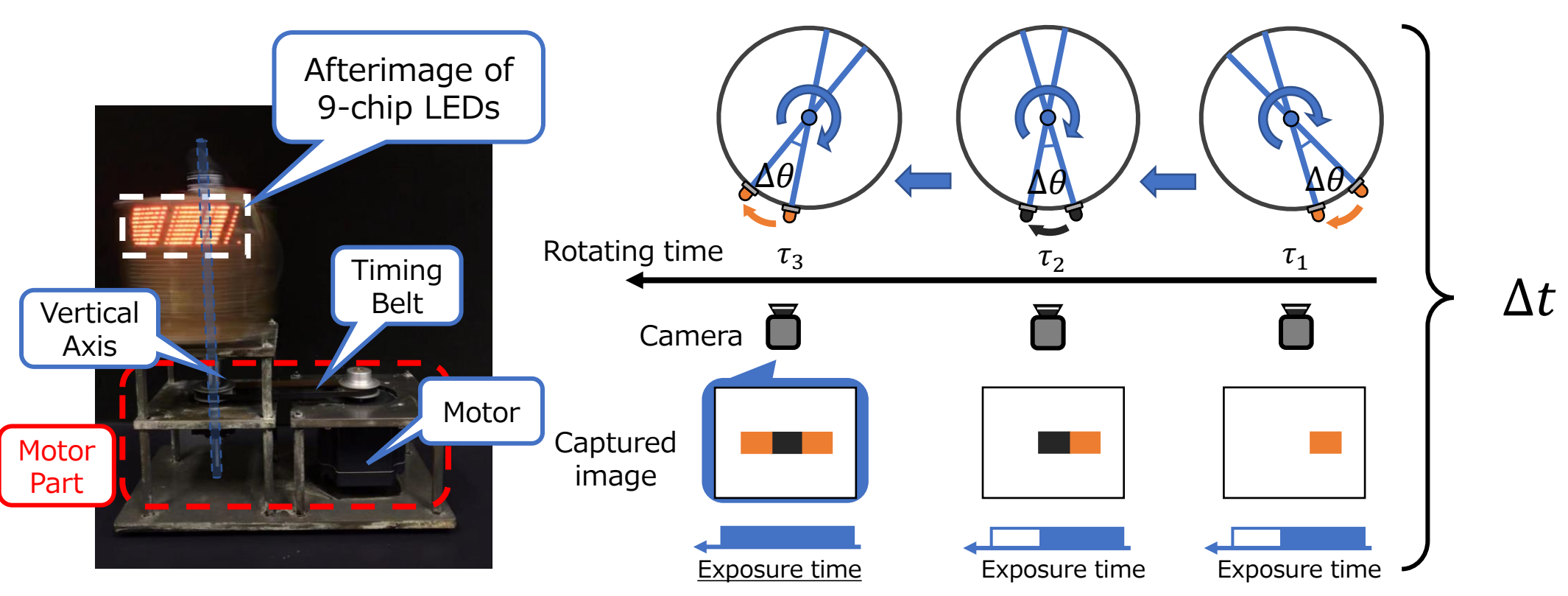


- 長所**
1. 画像空間分離能力
 2. 情報を並列に伝送する
 3. 高精度な位置推定
- 短所**
- 通信の高速化が困難
 - ISCの通信速度はカメラの撮影速度に依存する
- 60 bps

先行研究 回転式LED送信機を用いたISC [2]

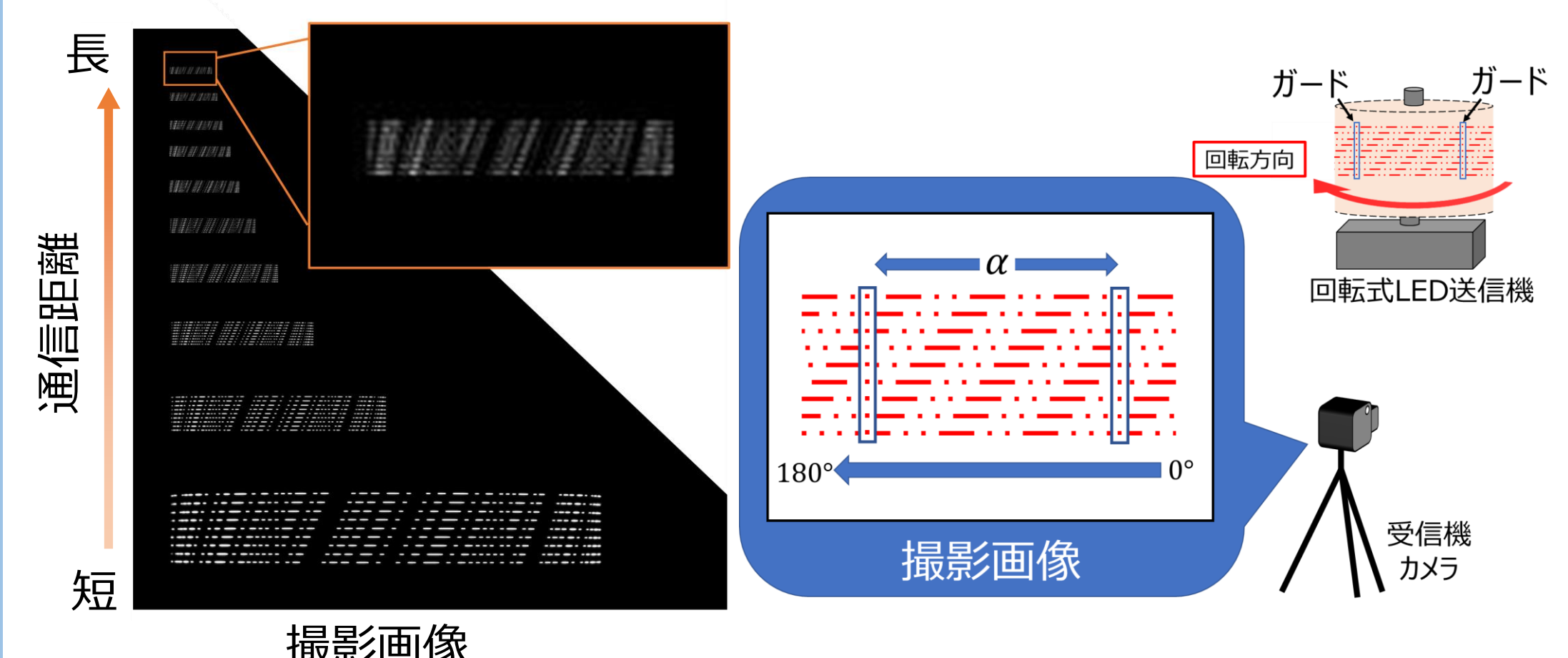


- ### 送信機の動作
1. 回転部は垂直軸を中心にロータリーエンコーダと共に回転する
 2. 9個のLEDはエンコーダで生成されたクロックに応じて点滅する



- 点滅しているLEDを回転させて、撮影画像に大量の残像が捉える
- 画像当たりのデータ量が増加することで通信速度の向上を実現する

先行研究 回転式LED送信機を用いたISC [2]

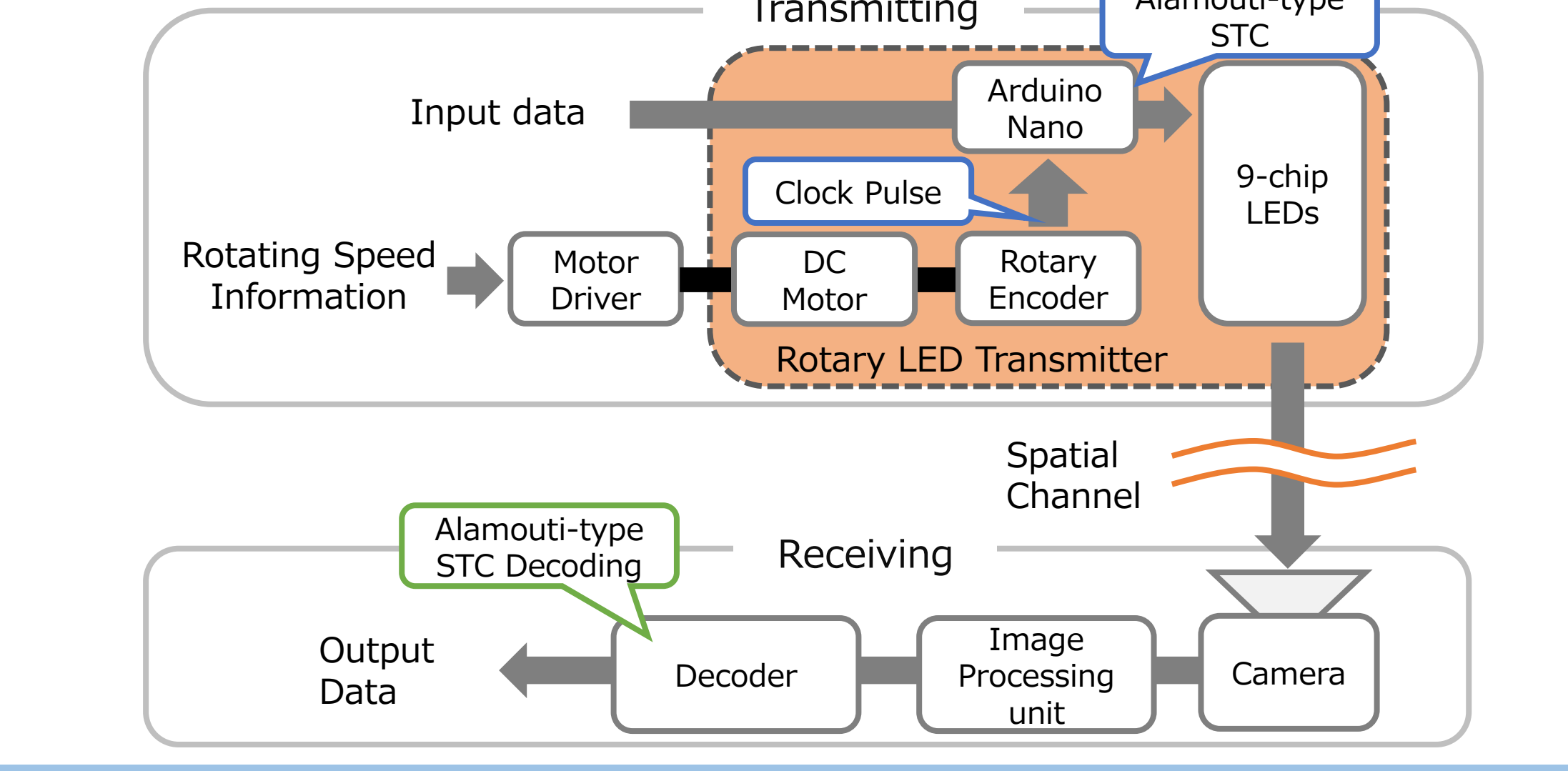


- 通信距離が長くなると、受信画像が劣化して、復調性能が低下する

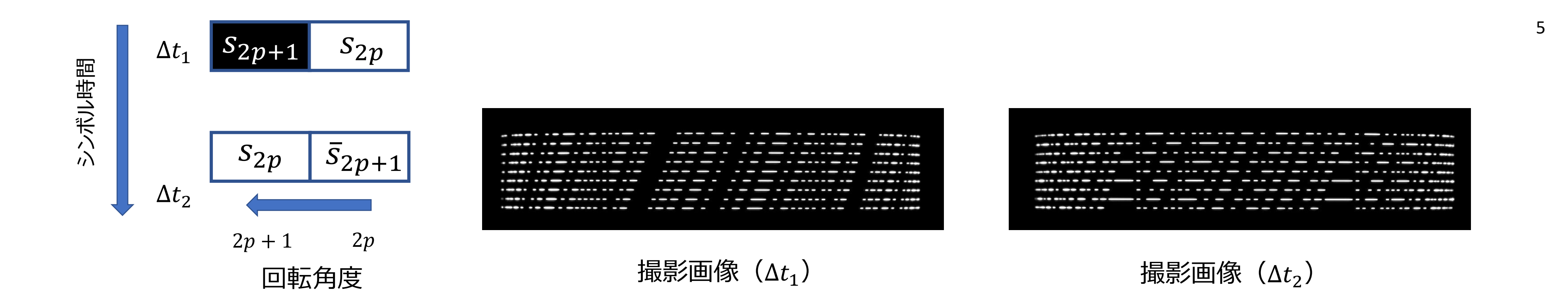
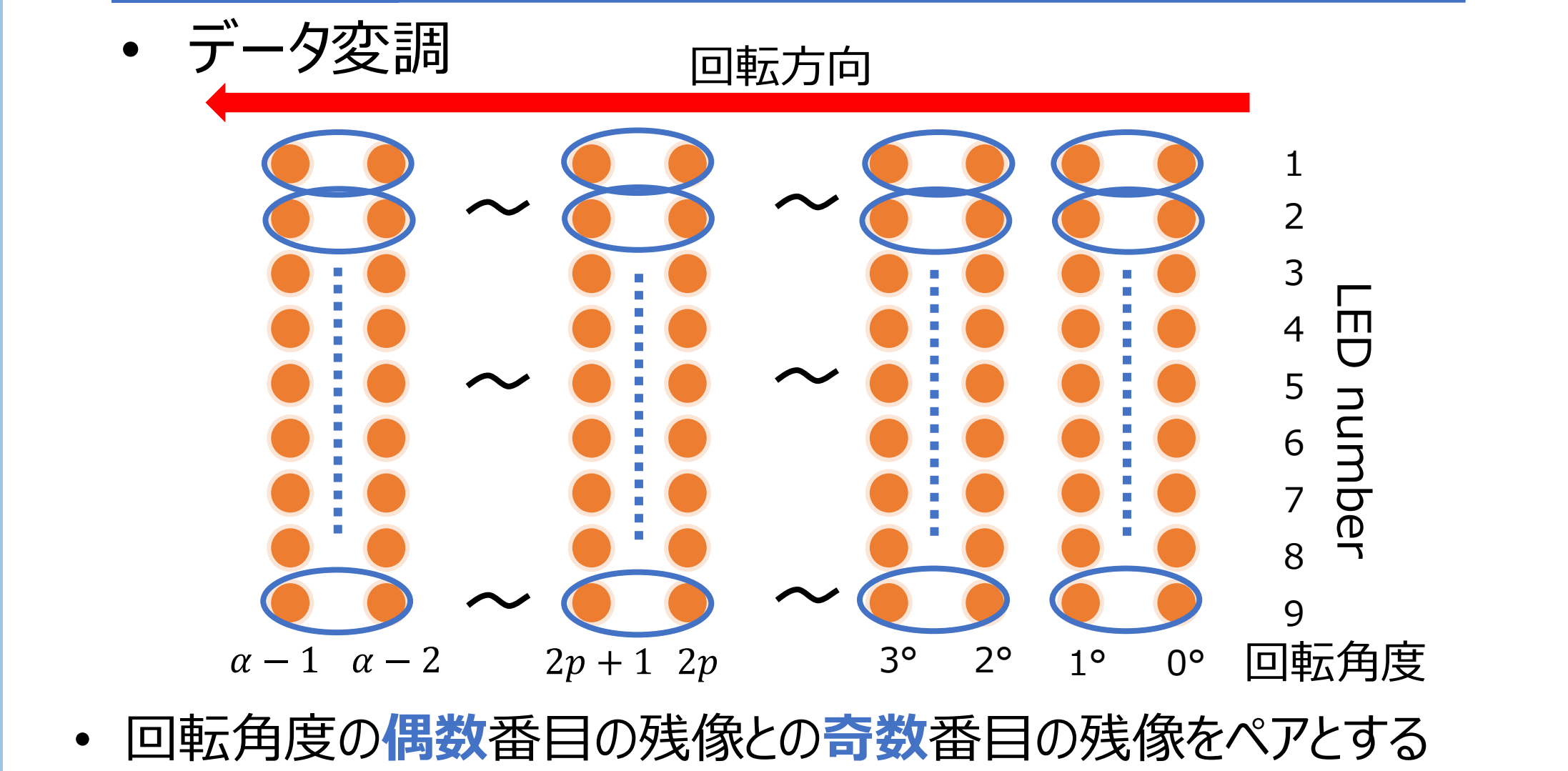
目的 回転式LED送信機を用いたISCの通信性能の改善

手法 光の残像に基づいたAlamouti型時空間符号化

システムモデル



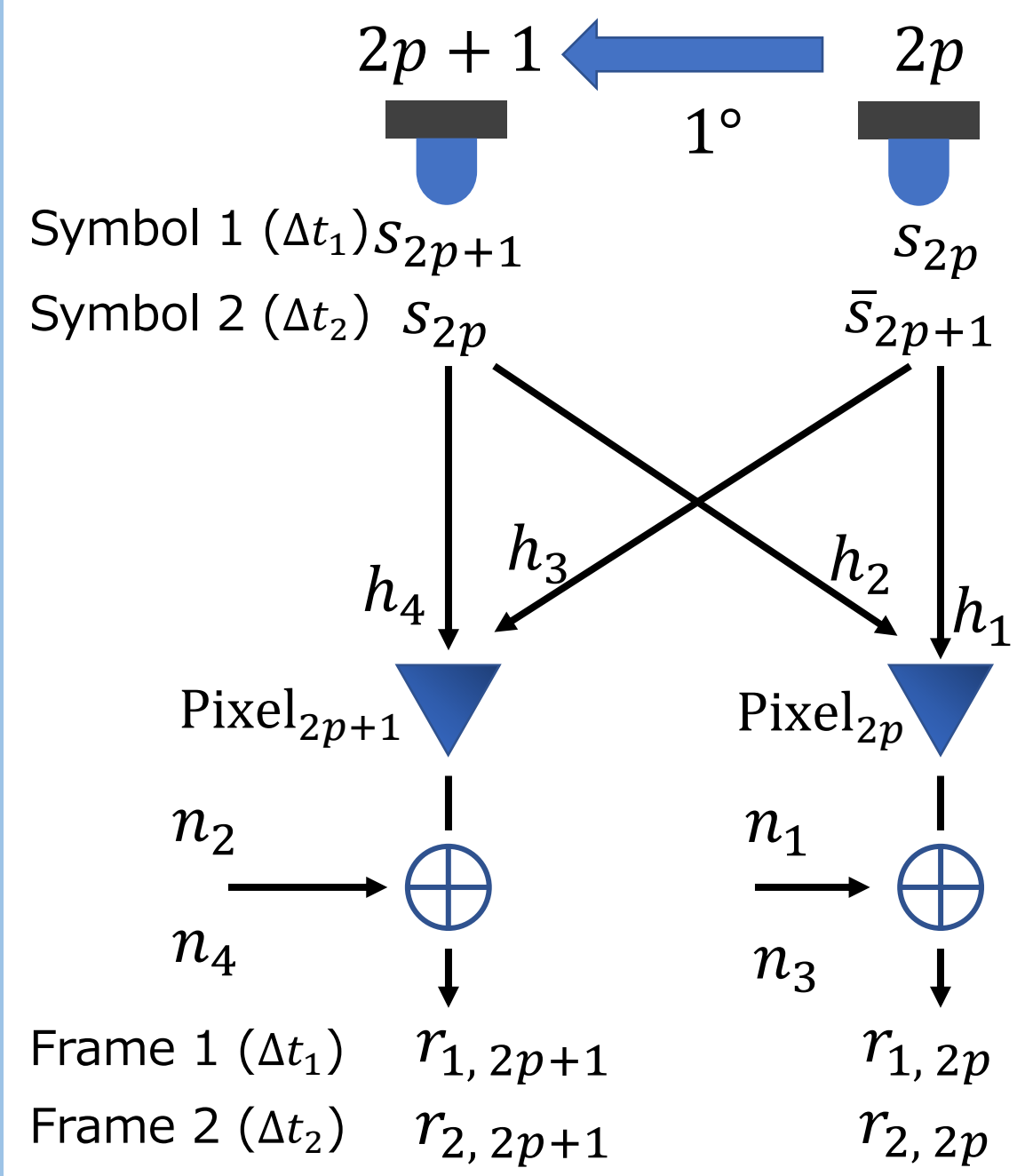
提案手法 光の残像に基づいたAlamouti型時空間符号化



- ニシンボル時間にわたってデータを伝送する
- 第1シンボル時間 (Δt_1) では、回転角度によって生じる信号をそのまま送信する
- 第2シンボル時間 (Δt_2) では、組付けしたペア内の各回転角度で伝送する信号を入れ替え、片方の信号は強度（輝度）が反転した状態で送信する

[1] H. B. C. Wook, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Visible light communication with LED traffic lights using 2-dimensional image sensor," *IEICE Trans. Fund.*, vol. E89-A, no. 3, pp. 654--659, Mar. 2006.
 [2] S. Arai, Z. Tang, A. Nakayama, H. Takada, and T. Yendo, "Implementation Experiment of a Rotary LED Transmitter for Improving the Transmission Rate for Image Sensor Communication," *2020 IEEE GC Wkshps (OWC)*, Dec. 2020.

データ復調



受信信号 (r)

$$\begin{cases} r_{1,2p} = h_1 s_{2p} + h_2 s_{2p+1} + n_1 \\ r_{1,2p+1} = h_3 s_{2p} + h_4 s_{2p+1} + n_2 \\ r_{2,2p} = h_2 s_{2p} - h_1 s_{2p+1} + h_1 A + n_3 \\ r_{2,2p+1} = h_4 s_{2p} - h_3 s_{2p+1} + h_3 A + n_4 \end{cases}$$

シンボル判定量 (s̃) の計算

短距離STC ($h_2 = h_3 = 0, h_1 = h_4$)

$$\begin{cases} \tilde{s}_{2p} = r_{1,2p} + r_{2,2p+1} \\ = 2h_1 s_{2p} + n_1 + n_4 \\ \tilde{s}_{2p+1} = r_{1,2p+1} - r_{2,2p} + h_1 A \\ = 2h_1 s_{2p+1} + n_2 - n_3 \end{cases}$$

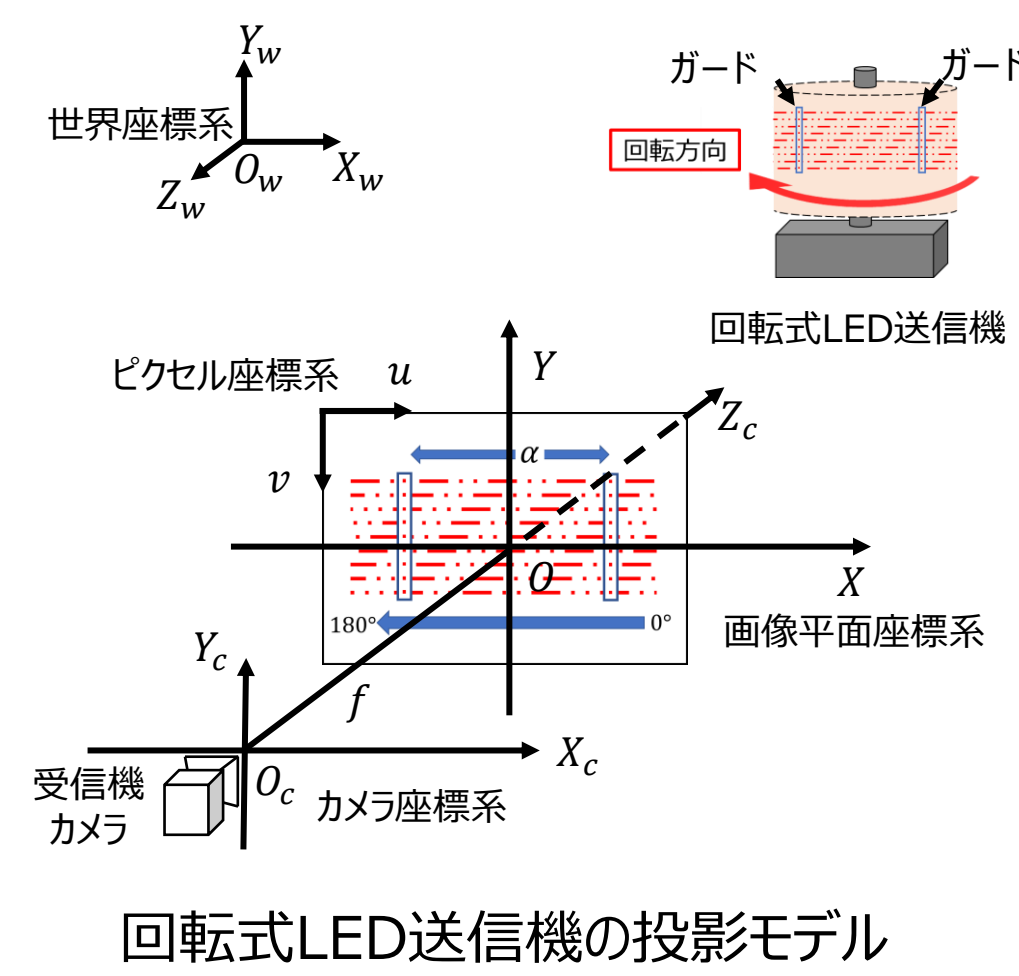
長距離STC ($h_3 = h_4 = 0, h_1 = h_2$)

$$\begin{cases} \tilde{s}_{2p} = r_{1,2p} + r_{2,2p} - h_1 A \\ = 2h_1 s_{2p} + n_1 + n_2 \\ \tilde{s}_{2p+1} = r_{1,2p} - r_{2,2p} + h_1 A \\ = 2h_1 s_{2p+1} + n_1 - n_2 \end{cases}$$

シンボル判定量 (s̃) を閾値判定する

- s̃は閾値 ($h_1 A / 2$) より大きい場合は“1”,小さい場合は“0”と復号される

短距離STCと長距離STCの判定



L_w [mm]: 送信機側のガード間の物理距離
 L_i [mm]: 画像に写るガード間の物理距離
 L_p [pixels]: L_i をピクセル単位で換算した距離
 k_x [μ m]: ピクセルの一边の長さ
 D [m]: 通信距離
 f [mm]: 焦点距離

$$\frac{L_w}{D} = \frac{L_i}{f} = \frac{k_x \cdot L_p}{f}$$

- ガード内の点滅をピクセル単位で区別できるかどうか
 - 短距離STCまたは長距離STCを選ぶ
- 受信可能範囲の境目距離 (D_b)

$$D_b = \frac{L_w \cdot f \cdot \Delta\theta}{k_x \cdot \alpha}$$

実機実験

実験条件

表1. 実験諸元

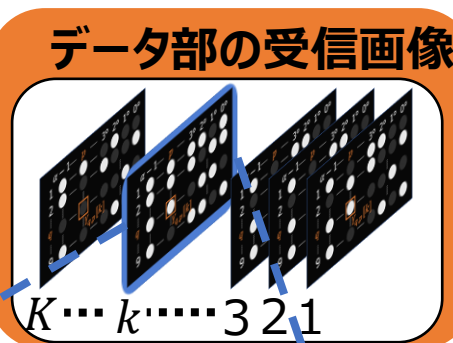
LEDの数 (N_L)	9
点滅角度 ($\Delta\theta$)	1°
データ伝送範囲 (α)	60°
回転速度 (S_r)	300 rpm
回転半径	58 mm
カメラ	UI-3250ML
レンズの焦点距離	35 mm
絞り値	F4, F8
カメラの撮影速度	5 fps
フィルター	ND8
通信距離	1.0~10.0m
BER測定のデータ量	10,240 bits



実験風景

実機実験

受信LED輝度値の正規化



$Y_{q,p}[k]$: 第k番目の受信画像に縦q行目、回転第p度のLED輝度値
 $E_{q,p}$: $Y_{q,p}[k]$ の平均値
 $V_{q,p}$: $Y_{q,p}[k]$ の分散
 $\hat{Y}_{q,p}[k]$: $Y_{q,p}[k]$ の正規化した輝度値

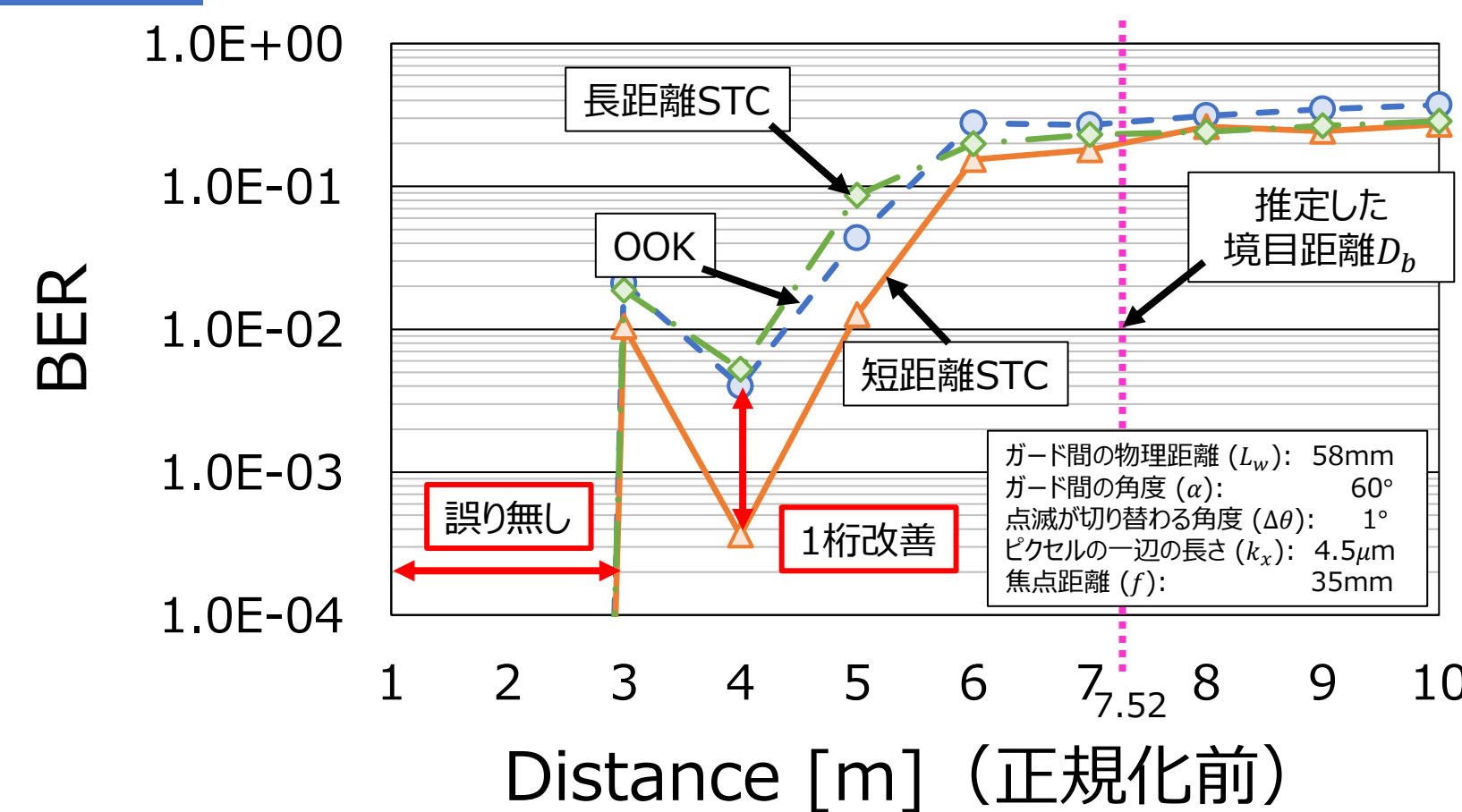
$$E_{q,p} = \frac{\sum_{k=1}^K Y_{q,p}[k]}{K}$$

$$V_{q,p} = \frac{\sum_{k=1}^K (Y_{q,p}[k] - E_{q,p})^2}{K}$$

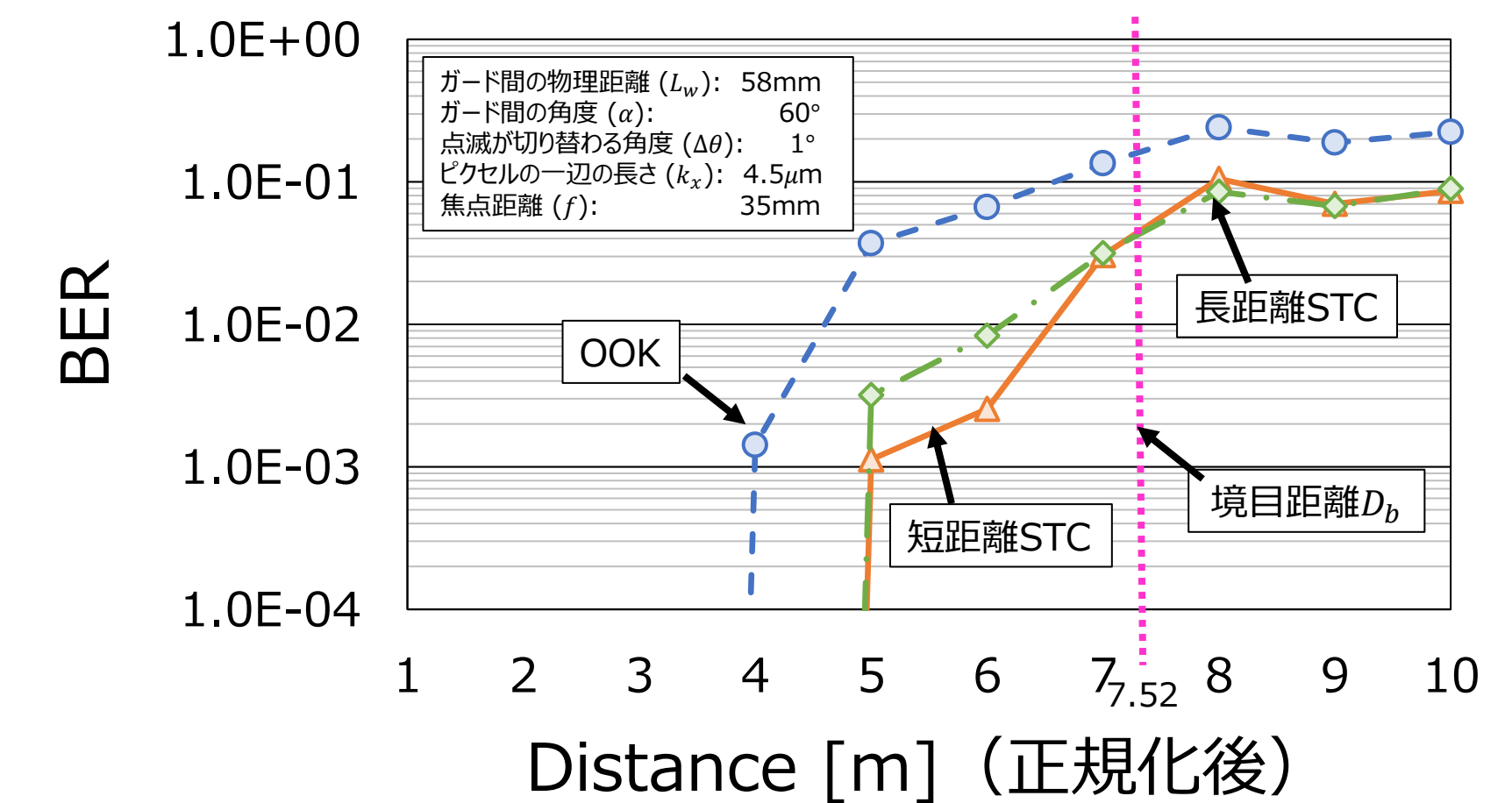
$$\hat{Y}_{q,p}[k] = \frac{Y_{q,p}[k] - E_{q,p}}{\sqrt{V_{q,p}}}$$

$\hat{Y}_{q,p}[k] \geq 0$: データを“1”と復調
 $\hat{Y}_{q,p}[k] < 0$: データを“0”と復調

実験結果 絞りF4の時の復調性能

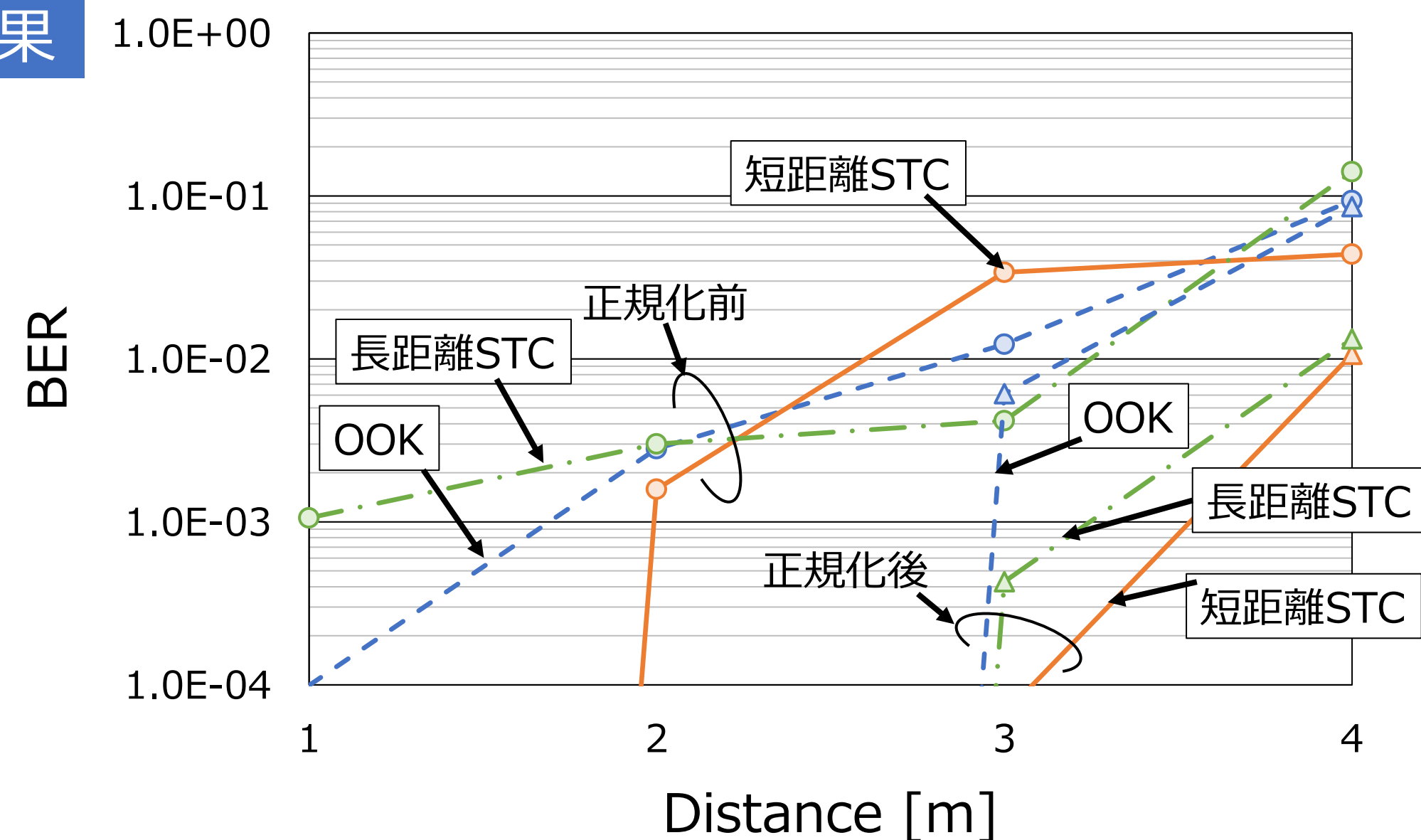


- 従来手法であるOOKと比べて、BERを最大1桁ほど改善した
- 距離が6.0m以降からBERがほぼ飽和しており、大きな変化が生じていない



- 従来手法OOKと比べて、誤りなくデータ伝送距離が1.0m延長した
- 長距離STCのBERは 10^{-1} 以下であり、復調性能が向上した

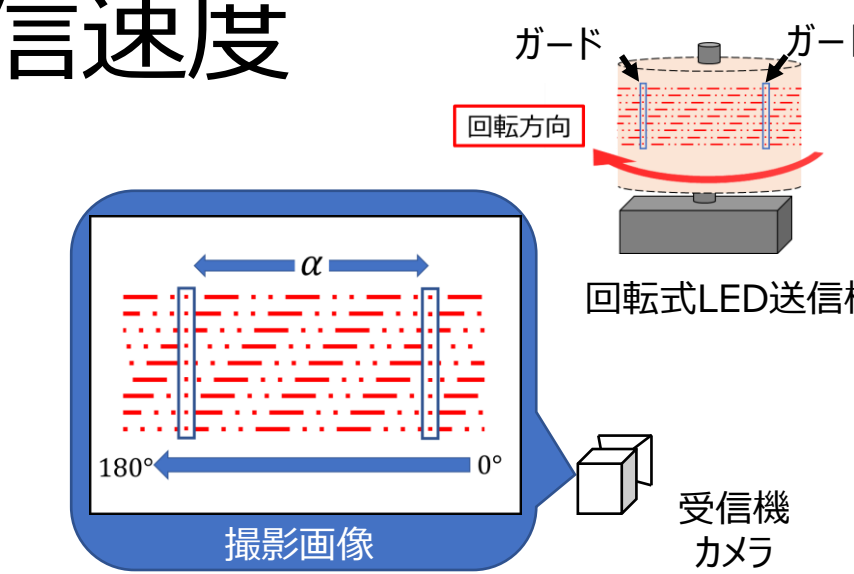
実験結果



絞りF8の時の復調性能

- レンズの絞り値を変更しても、輝度値の正規化は復調性能の向上に役に立つ
- 本実験では、絞り値を小さくすることでデータの復調性能が向上する

通信速度



- 1つのシンボル時間: Δt
- 送信機のLEDの数: N_L
- データ伝送角度範囲: α
- 点滅切り替わる角度: $\Delta\theta$
- STCのデータレート: R_{STC}
- OOKのデータレート: R_{OOK}

データレート

$$R_{STC} = \frac{N_L \cdot \alpha}{2\Delta t \cdot \Delta\theta}$$

回転速度	Δt	N_L	P	R_{STC}	R_{OOK}
300 rpm	0.2 s	9	60°	1,350 bps	2,700 bps

- STCは単位時間のうちに伝送するデータ量が少なくなる
- その代わりに、復調性能は大幅に向上した