

ワイドバンドシステム研究会

位相変調方式を用いたカメラ通信に おける同期と多元接続手法

長岡技術科学大学

松永 宏章 , 圓道 知博

アウトライン

1. 研究背景・目的
 1. 可視光通信について
 2. 想定するシステム
 3. 先行研究
 4. 本研究の目的
 5. 実現のためのアイデア
2. 通信方法
 1. 基となる過去の研究について
 2. 実現方法とプロトコル
3. 実験
4. まとめ

可視光通信

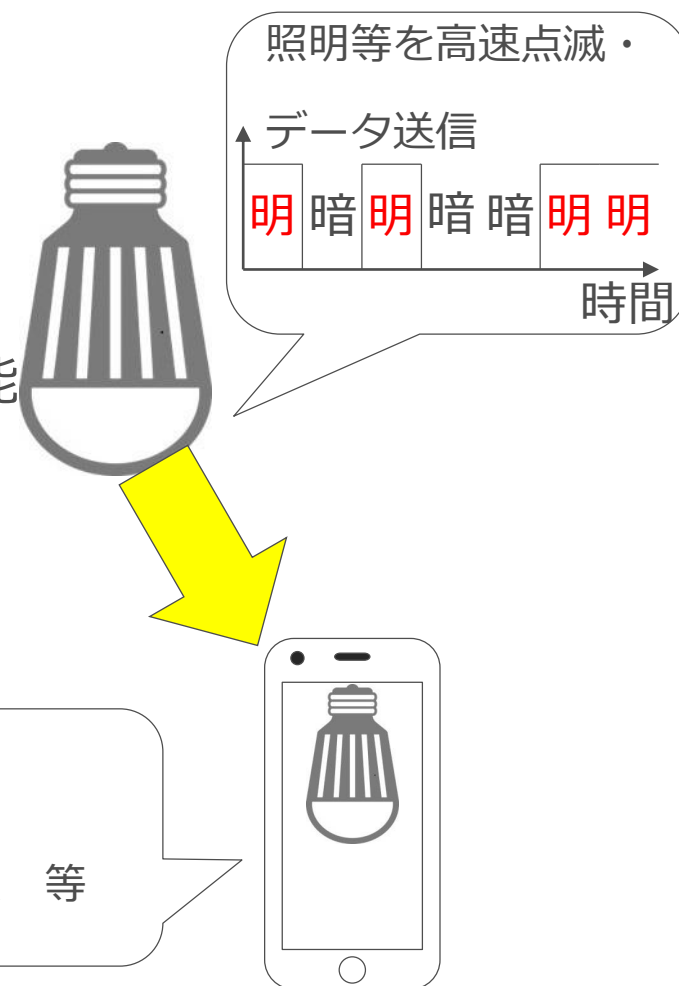
人の目に見える光を用いた無線通信技術

カメラ通信

受信デバイスとして**カメラ**を使用

<利点>

- ・ 照明や電光掲示板等でデータ送信機能を付加可能
- ・ 電波を利用できない場所で利用可能
工場、病院等



想定する可視光通信システム

送信機：

点光源・自由な形状の光源

- ✓ 光源のサイズによらず送信が可能
- ✗ カメラ通信で高速サンプリングを実現可能なローリングシャッター現象は使用不可

ちらつきを抑えた光源

- ✓ 照明に通信機能を付加できる
- ✗ 高い周波数での点滅が必要
(100Hz以上^[1])



受信機： 低フレームレートカメラ (60fps以下)

- ✓ 既に普及しており手軽に使用可能
- ✗ 高速点滅の波形を直接観測することは不可能



課題

- LEDの高速点滅の変化を低フレームレートカメラで読み取る手法

[1] C. S. Herrmann et.al. "Human EEG responses to 1-100 Hz flicker: resonance phenomena in visual cortex and their potential correlation to cognitive phenomena", Experimental Brain Research, April 2001, Volume 137, Issue 3-4, pp 346-353

先行研究

高速点滅を低フレームレートカメラで受信するための先行研究：

手法	概要
UDPSOOK ^[2]	露光時間：点滅周期の 数十分の1 に設定 →点滅位相/振幅変化が画素値変化として現れる (位相：2値、振幅：多値)
UQAMSM ^[3]	
木原らの手法(2LED) ^[4]	露光時間：点滅周期の 1/2 や 1/2前後 に設定 →点滅位相・振幅変化が画素値変化として現れる (位相・振幅共に多値)
木原らの手法(2カメラ) ^[5]	
丸山らの手法 ^[6]	
SW-QAM ^[7]	
発表者らの過去の研究 ^[8]	露光時間を点滅周期の 1/2 に設定+ フレームトリガ制御 →点滅位相変化が画素値変化として現れる (位相のみ変調・多値)

[2] N. Liu et al. "Undersampled differential phase shift on-off keying for optical camera communications", Journal of Communications and Information Networks, Vol.2, No.4, pp 47-56, Dec. 2017

[3] P. Luo et al. "Experimental Demonstration of a 1024-QAM Optical Camera Communication System", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, Vol.28, No.2, 139-142, 2016

[4] W. Kihara, T. Yendo, Y. Shiraki, T.G. Sato, T. Moriya, "PSK modulation in camera based VLC for receiving from distributed transmitters", International Conference and Exhibition on Visible Light Communications 2018, Mar. 2018.

[5] W. Kihara, T. Yendo, S. Arai, T. Yamazato, H. Okada, and K. Kamakura, "A Modulation Method to Detect Phase Shift from Asynchronous Camera Image for Visible Light Communication," Proc. 2017 RISP Int. Work. Nonlinear Circuits, Commun. Signal Process. 133-136 (2017).

[6] S. Maruyama, T. Yendo, Y. Shiraki, T. G. Sato and T. Moriya, "Phase Estimation Method Using Multiple Frames in Image-Sensor-Based Visible Light Communication," 2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA, 2019, pp. 1-4.

[7] S. A. I. Alfarozi, K. Pasupa, H. Hashizume, K. Woraratpanya, and M. Sugimoto, "Square Wave Quadrature Amplitude Modulation for Visible Light Communication Using Image Sensor," IEEE Access, vol.7, pp.94806-94821, 2019.

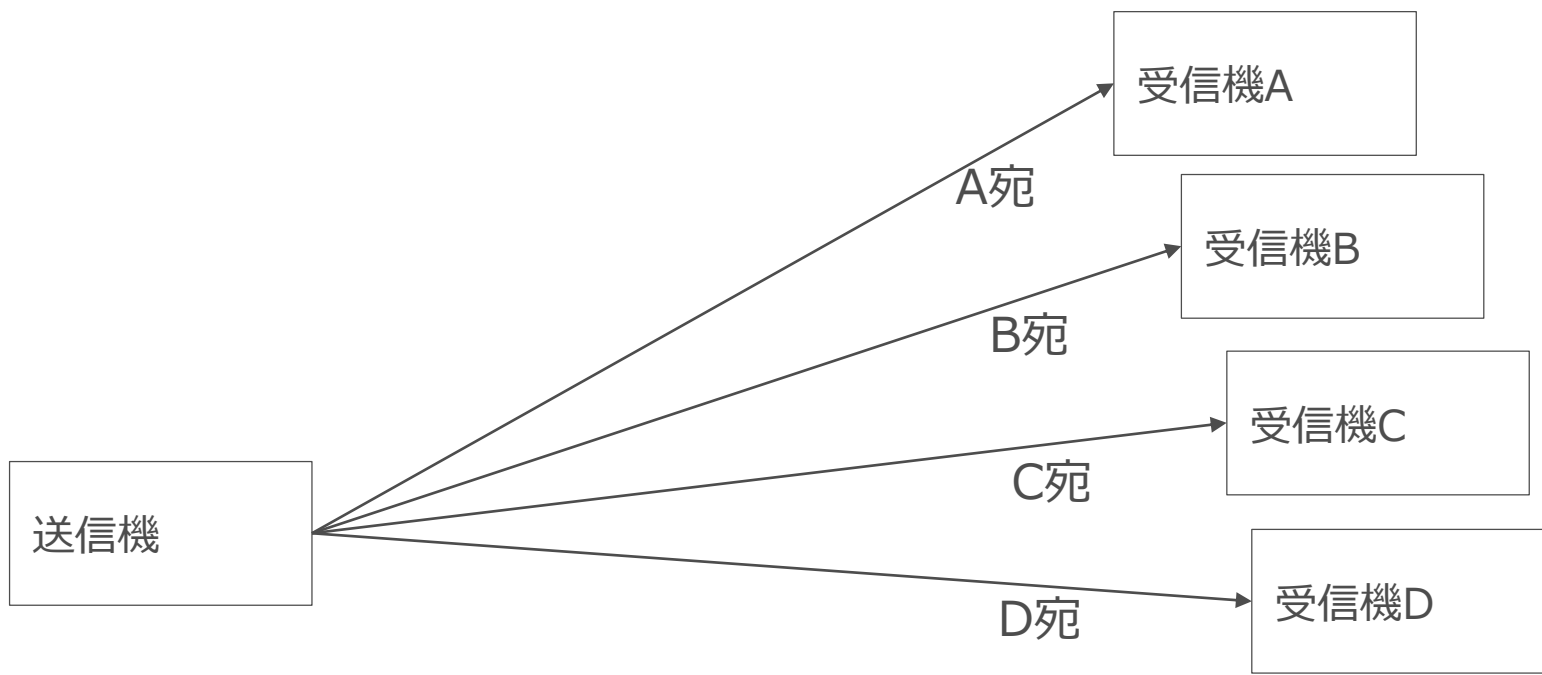
[8] H. Matsunaga, T. Yendo, "Exposure Synchronization for Resource Saved Image-Sensor-Based Visible Light Communication Using Phase Shift Keying", 1st Work. on Optical Wireless Communication for Smart City, Dec. 2019.

本研究の目的

目的： **低フレームレートカメラ**による可視光通信に**多元接続**の機能を追加する

- ・低フレームレートカメラでの可視光通信で、複数受信機への情報を同時に送信
- ・従来法から通信速度を落とさずに多元接続の機能を追加

→ 多元接続の手段として、時分割による方法を採用

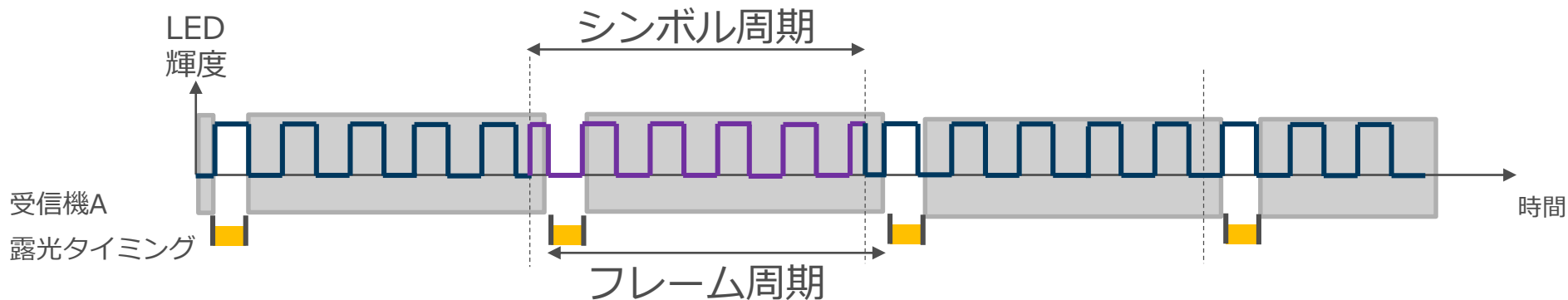


多元接続実現のアイデア

低フレームレートカメラによる通信：

シンボルレートがフレームレート以下となるため
通信速度が非常に低速（数十bps程度）

→ 通信速度低下は極力避けたい

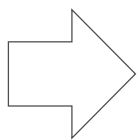


一方で…

従来の手法：

点滅周波数に対してフレームレートが低いため、
点滅位相・振幅の変化を捉えるために露光時間を短くしていた

受信機で一切露光に影響しない**無駄な時間**（空き時間）**が生じる**



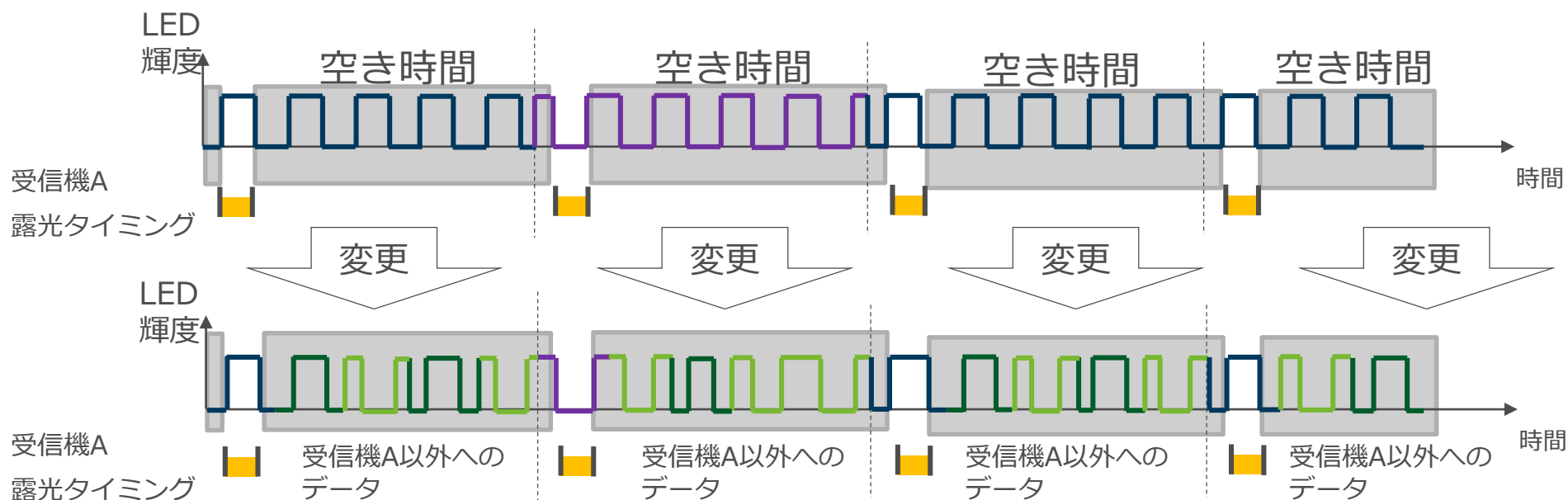
多元接続のため、この空き時間を活用できると良い

多元接続実現のアイデア

多元接続に「空き時間を活用」

受信画素値を変えることなく送信側の点滅を変更し、
他の送信機向けの情報を送信することになる

もし送信機が受信機の露光タイミングを知っていたなら



露光時間内のLED点滅波形は変わらない

しかし…

多元接続実現のアイデア

・送信側：

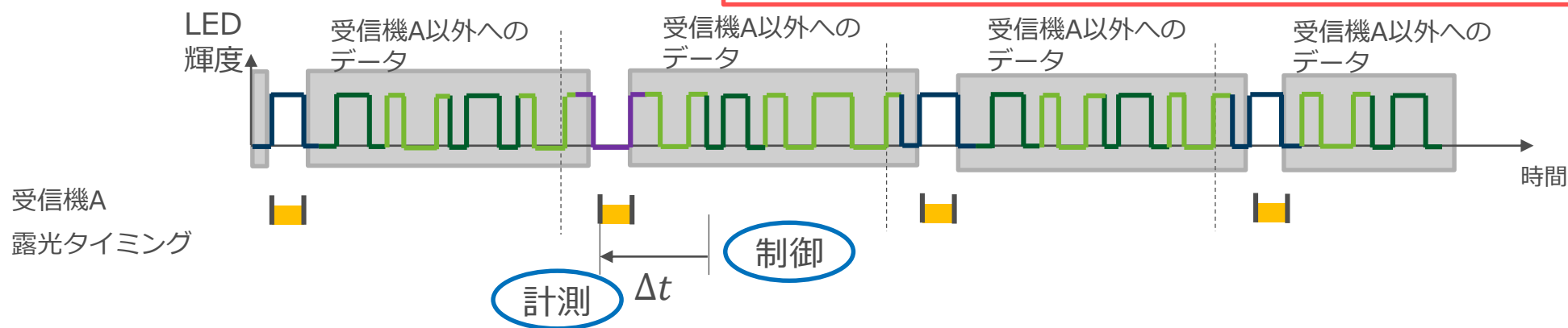
送信機から受信機への一方的な通信を想定

→ 受信機の露光タイミングを知ることができない

「空き時間」を送信機側で設定、受信機側で合わせる必要あり

この手法が無かったため

「空き時間」を他の用途に使うことができなかった



本研究の方針：

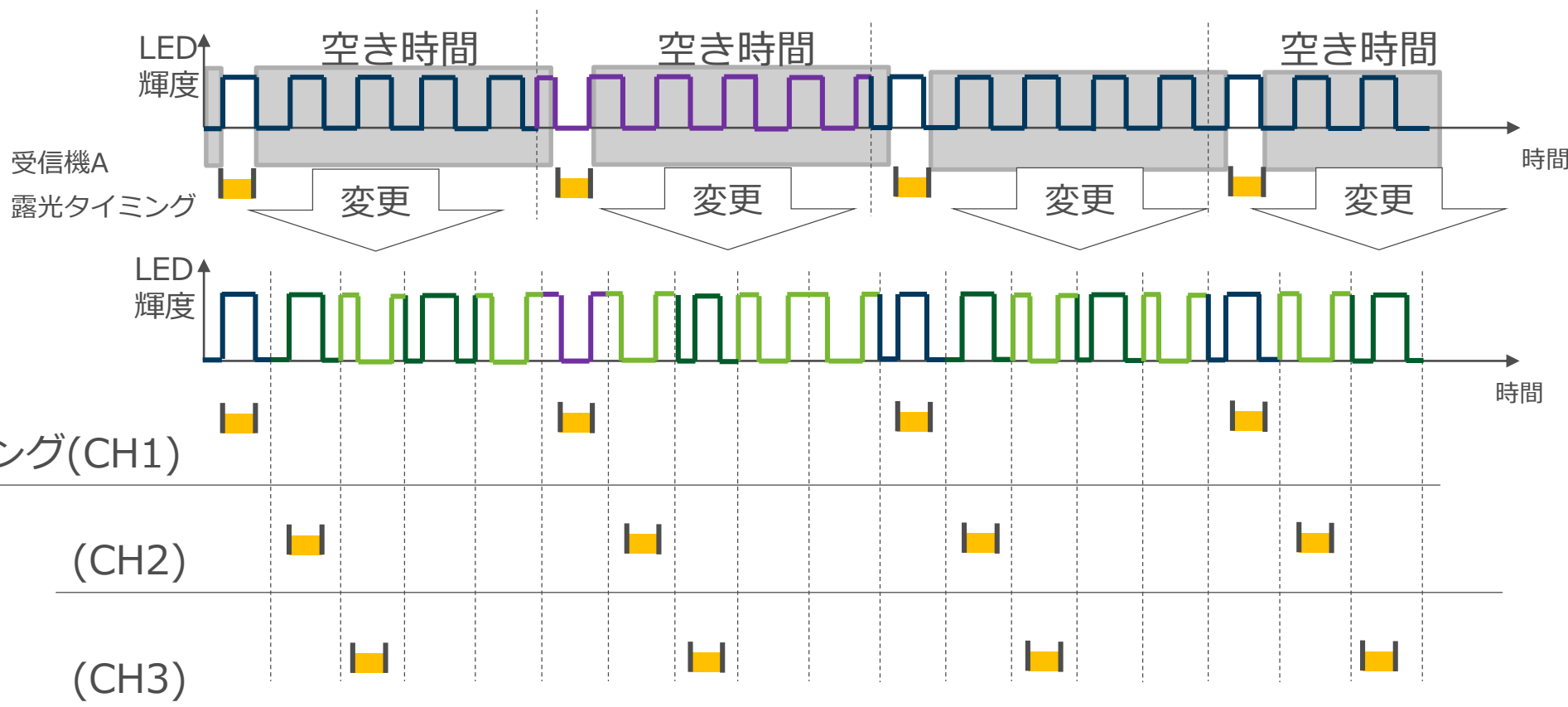
受信側で1シンボル周期の中での露光タイミングを計測・制御し、
送信機で定めた露光タイミングで信号を受信できるようにする

→**時分割による多元接続 (= TDMA) の実現**

基本的なTDMA実現方法

点滅位相を1点滅周期ごとに変更

→露光タイミングを合わせる時間によって受信チャンネルを決定する



⋮

TDMA実現方法

高速点滅を低フレームレートカメラで受信するための先行研究：

手法	概要
UDPSOOK ^[2]	露光時間を点滅周期の数十分の1に設定 →点滅位相/振幅変化が画素値変化として現れる (位相：2値、振幅：多値)
UQAMSM ^[3]	
木原らの手法(2LED) ^[4]	露光時間を点滅周期の1/2前後に設定 →点滅位相・振幅変化が画素値変化として現れる (位相・振幅共に多値)
木原らの手法(2カメラ) ^[5]	
丸山らの手法 ^[6]	
SW-QAM ^[7]	
発表者らの過去の研究 ^[8]	露光時間を点滅周期の1/2に設定 + フレームトリガ制御 →点滅位相変化が画素値変化として現れる (位相のみ変調・多値)

送信機・
受信機は
独立して動作
↓
露光タイミング
制御不可

露光タイミングを制御するハードウェアは発表者らの過去の研究で既に実現
→ この方法をベースに低速カメラでのTDMAを実現した

[2] N. Liu et al. "Undersampled differential phase shift on-off keying for optical camera communications", Journal of Communications and Information Networks, Vol.2, No.4, pp 47-56, Dec. 2017
 [3] P. Luo et al. "Experimental Demonstration of a 1024-QAM Optical Camera Communication System", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, Vol.28, No.2, 139-142, 2016
 [4] W. Kihara, T. Yendo, Y. Shiraki, T.G. Sato, T. Moriya, "PSK modulation in camera based VLC for receiving from distributed transmitters", International Conference and Exhibition on Visible Light Communications 2018, Mar. 2018.
 [5] W. Kihara, T. Yendo, S. Arai, T. Yamazato, H. Okada, and K. Kamakura, "A Modulation Method to Detect Phase Shift from Asynchronous Camera Image for Visible Light Communication," Proc. 2017 RISP Int. Work. Nonlinear Circuits, Commun. Signal Process. 133-136 (2017).
 [6] S. Maruyama, T. Yendo, Y. Shiraki, T. G. Sato and T. Moriya, "Phase Estimation Method Using Multiple Frames in Image-Sensor-Based Visible Light Communication," 2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA, 2019, pp. 1-4.
 [7] S. A. I. Alfarozi, K. Pasupa, H. Hashizume, K. Woraratpanya, and M. Sugimoto, "Square Wave Quadrature Amplitude Modulation for Visible Light Communication Using Image Sensor," IEEE Access, vol.7, pp.94806-94821, 2019.
 [8] H. Matsunaga, T. Yendo, "Exposure Synchronization for Resource Saved Image-Sensor-Based Visible Light Communication Using Phase Shift Keying", 1st Work. on Optical Wireless Communication for Smart City, Dec. 2019.

アウトライン

1. 研究背景・目的

1. 可視光通信について
2. 想定するシステム
3. 先行研究
4. 本研究の目的
5. 実現のためのアイデア

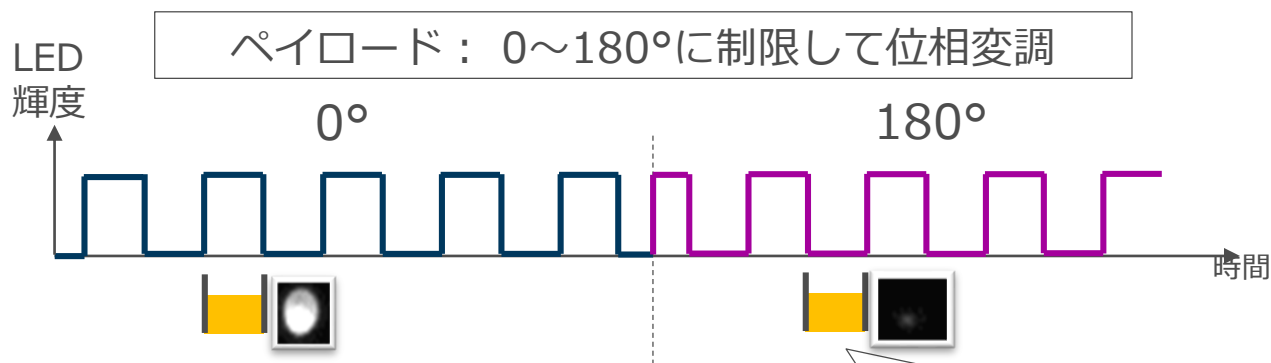
2. 通信方法

1. 基となる過去の研究について
2. 実現方法とプロトコル

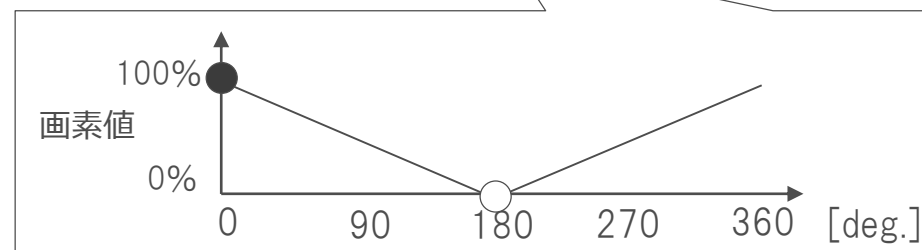
3. 実験

4. まとめ

過去の研究の紹介



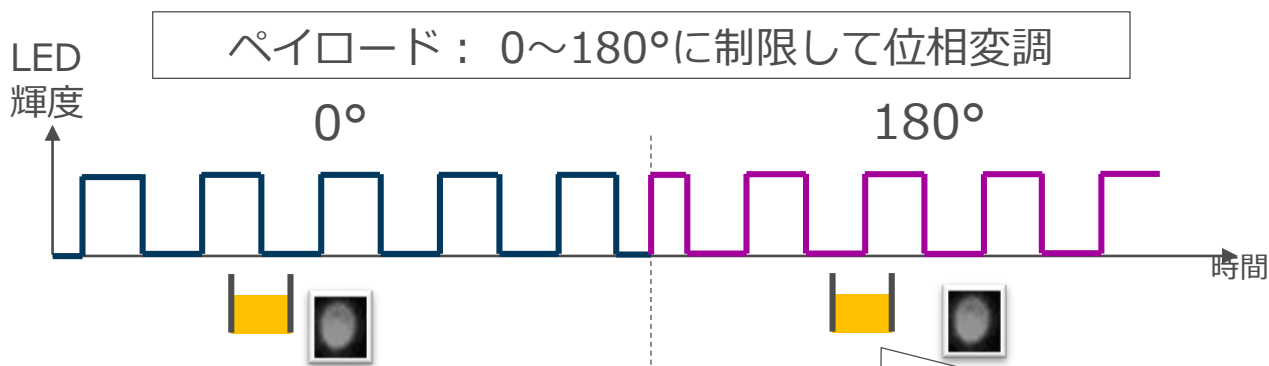
- 露光時間：点滅周期の1/2に設定
→ 位相変化が画素値変化として測定可能に
- 送信側で0~180°に制限して位相変調



→ 画素値と点滅位相が一意に対応するため画素値から復調可能となる

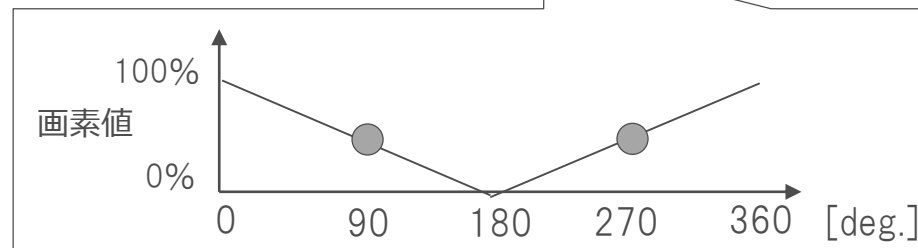
しかし...

過去の研究の紹介



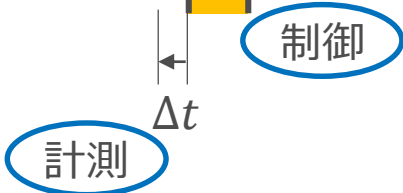
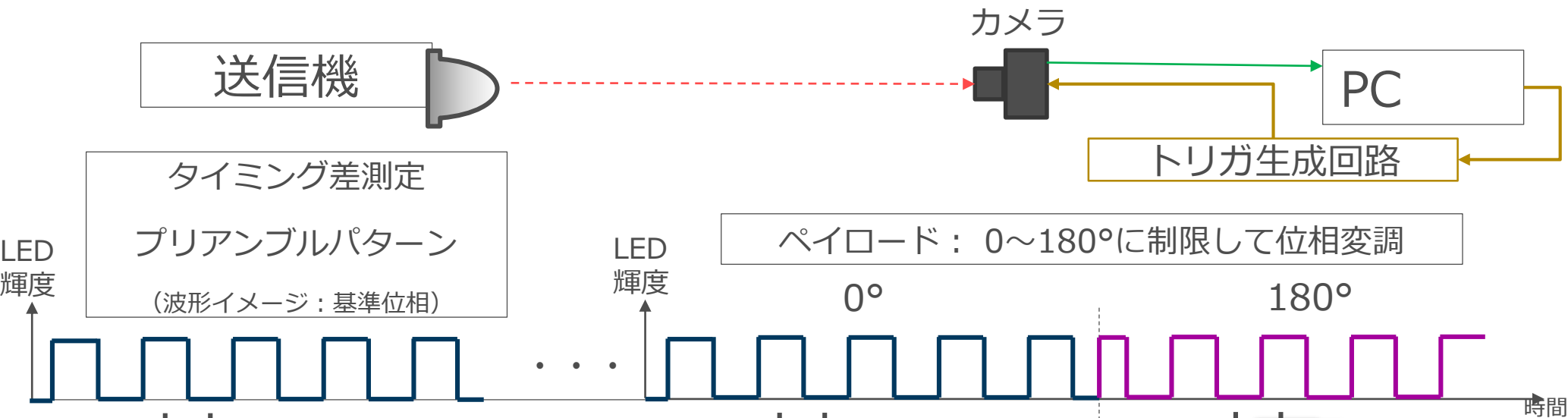
送信機・受信機を独立に動作させた場合

→露光のタイミングがシフトし、
1つの画素値からでは
シンボル推定できない場合が生じる



そこで

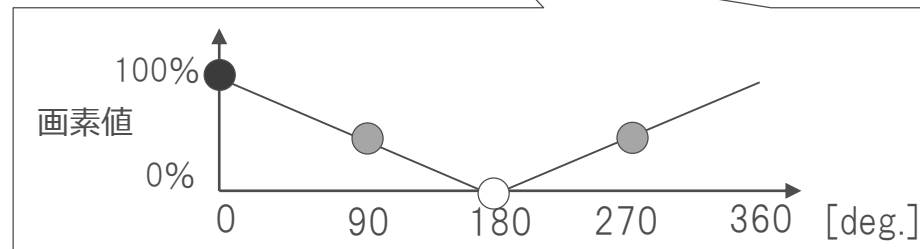
過去の研究の紹介



露光タイミングを定めるトリガ信号を制御
(専用ハードウェア作成)

+

露光タイミングのシフト量 (タイミング差) を測定する
既知系列を作成

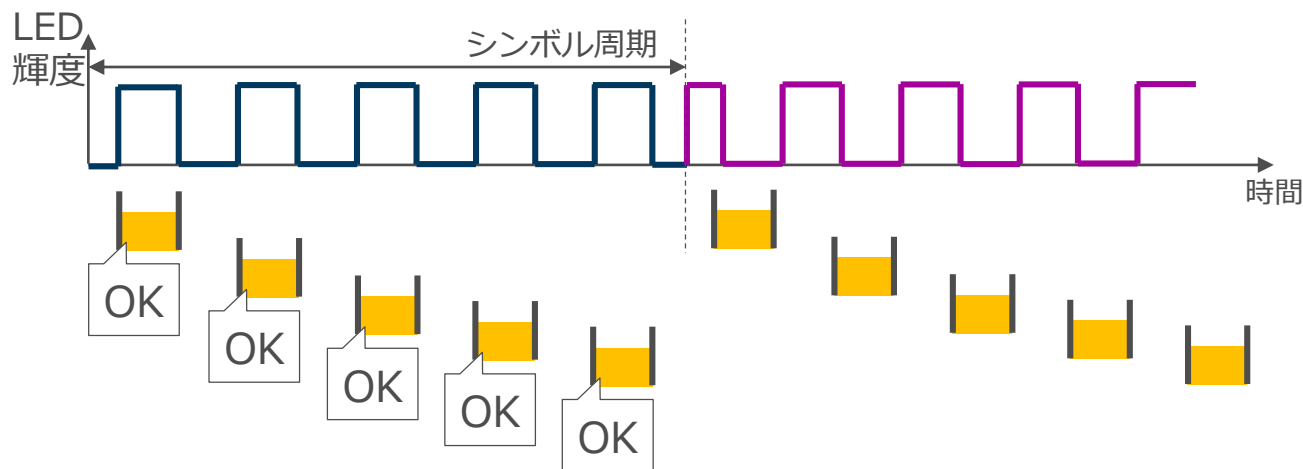


位相変調による信号の
受信が可能となった

TDMAチャンネル選択

過去の研究：

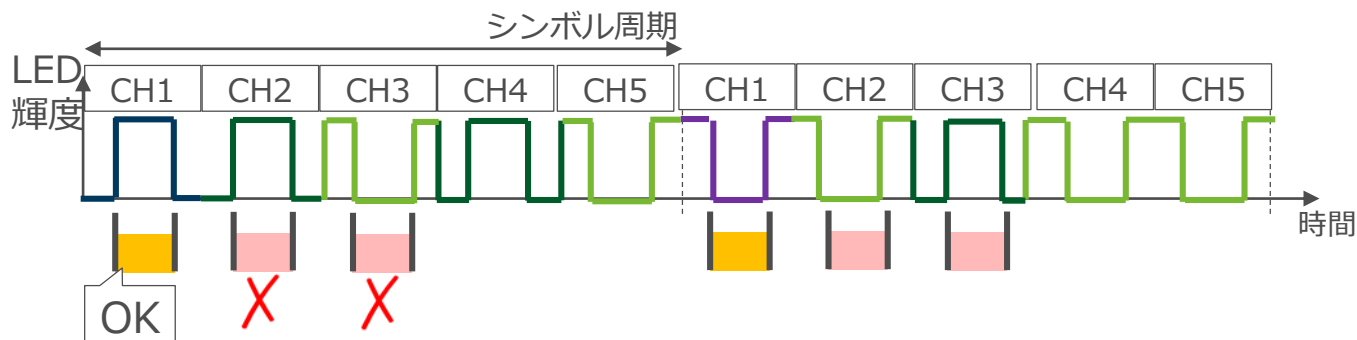
- ・点滅位相を正しく読み取れるよう制御
- ・シンボル期間中の露光タイミングは制御しない



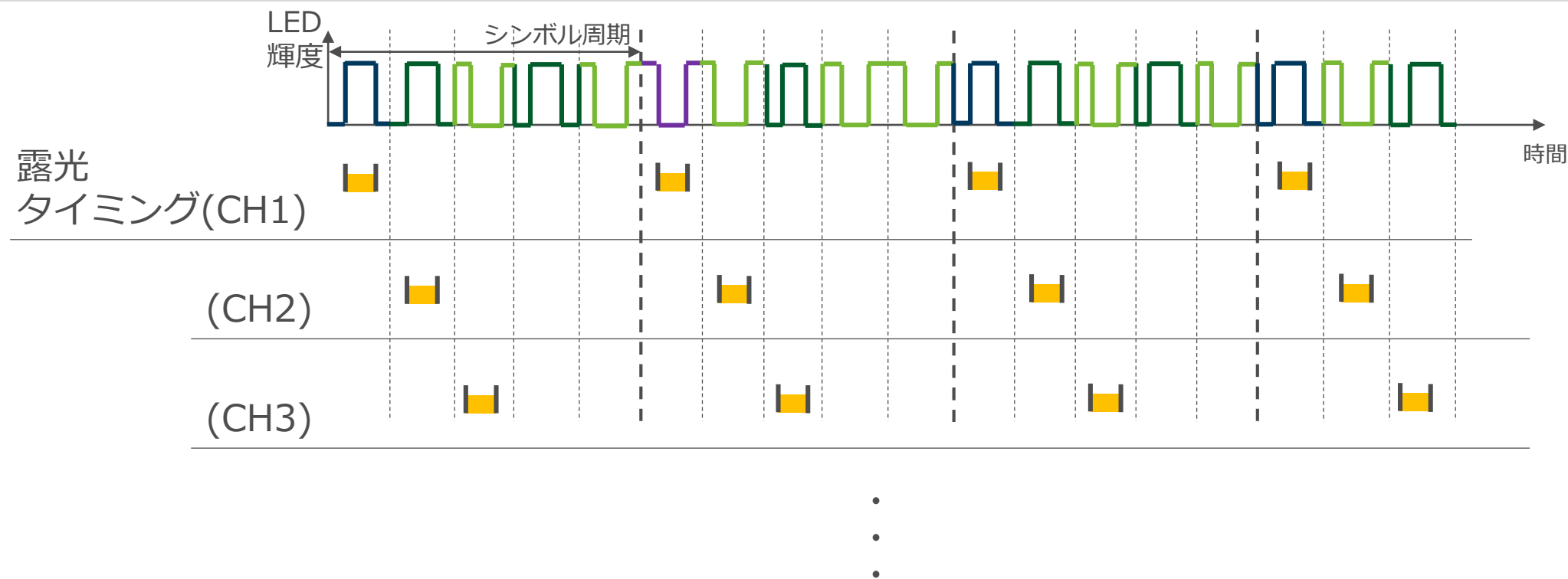
今回：

希望のチャンネルの信号を受信するために
点滅位相を測定するための露光タイミング制御に加えて
シンボル期間中の露光タイミングを制御する必要がある

CH1を受信
(設定)



シンボル期間中の露光タイミング制御のための手段



➤ チャンネル変更：シンボル周期中の露光タイミングを制御することで実現

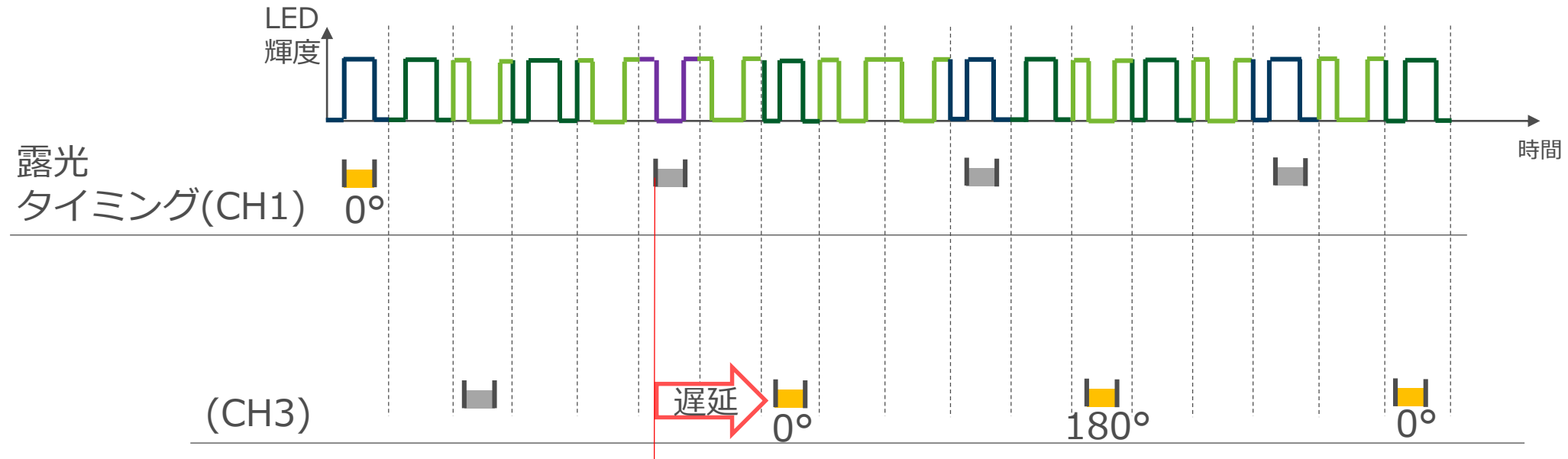
1. 露光タイミングを変更する手段
2. 現在受信中のチャンネルを知る手段

シンボル期間中の露光タイミング制御のための手段

1. 露光タイミングを変更しチャンネルを変更する手段

過去の研究で用いていたトリガ信号制御ハードウェアを利用することで容易に実現

トリガ信号制御ハードウェア：露光タイミングを遅延させることが可能



例：CH1→CH3に変更

希望のチャンネルは
現在の露光タイミングからどれだけ
ずれているか測定が必要

シンボル期間中の露光タイミング制御のための手段

2. 現在受信中のチャンネルを知る手段

露光タイミング変更のため、
希望のチャンネルは現在の露光タイミングから
どれだけずれているか測定が必要

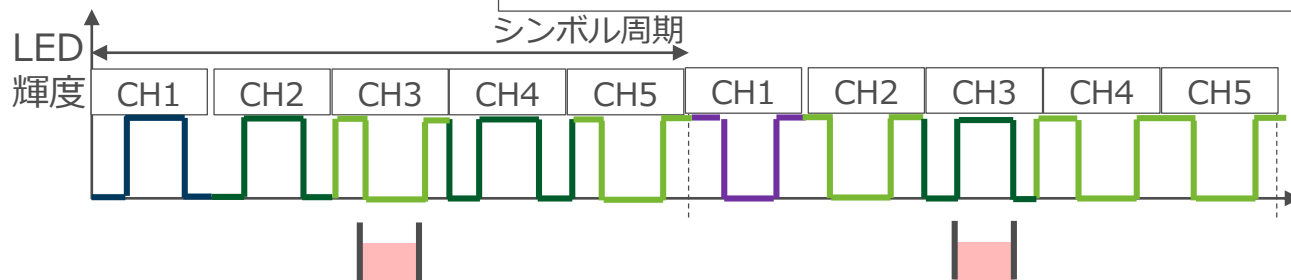
露光タイミング同期を一度行うことで
受信しているいずれかのチャンネルの信号がPSKにて受信できる状態になる

→送信機にて

既知系列（プリアンブル）期間中に露光タイミング同期用パターンを送信した後
TDMAチャンネルごとに別々の既知系列を送信

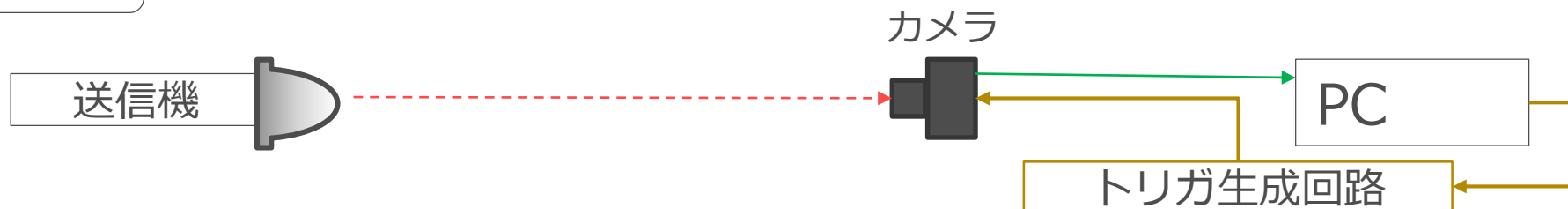
現在受信中のチャンネルがわかり、
希望のチャンネルとの露光タイミング差が計算可能に

CH1を受信
(設定)



受信の装置構成と受信処理の流れ

装置構成



受信処理の流れ

パケット先頭を見つける

① 露光タイミング差検出・変更

② 受信中のTDMA検出・変更

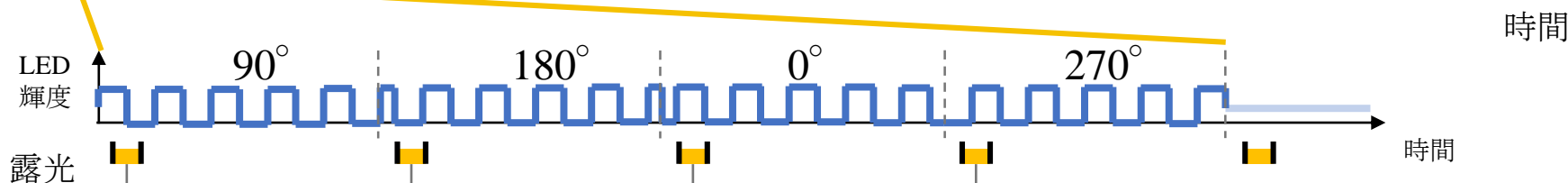
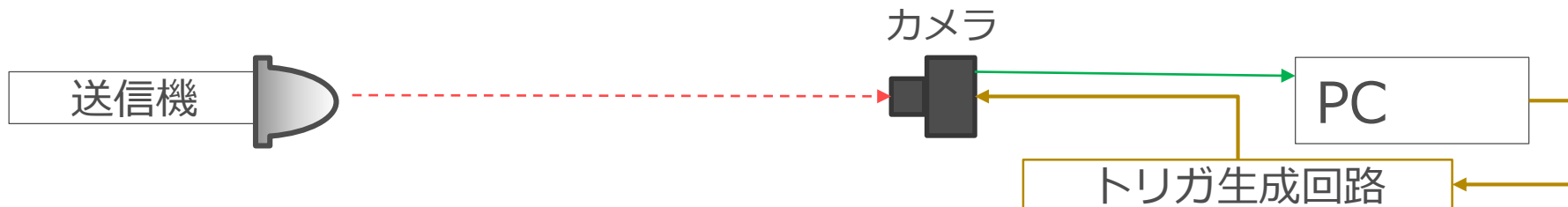
データ受信

点滅位相を用いた通信が出来るようになる
(過去の研究にて実現済み)

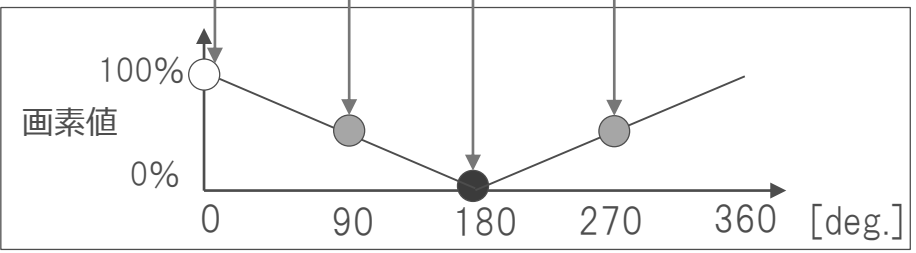
TDMAチャンネルをPSKで通知
→受信し希望のチャンネルに切替

TDMA実現のための通信プロトコル

露光タイミング差検出 : 連続する複数画素値を組み合わせて実現



露光タイミング差：
検出される位相の
オフセットとして現れる



- ・ 4シンボルの位相関係を固定
- ・ 4つの画素値を使用
- 一意に位相オフセット特定

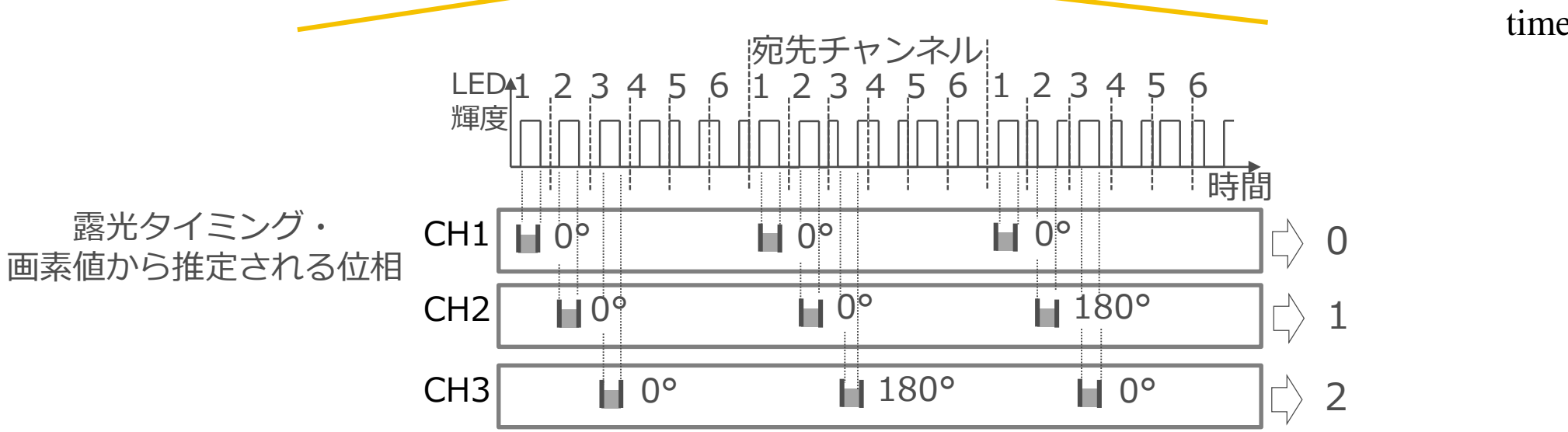
トリガ生成回路を操作して補正

TDMA実現のための通信プロトコル

TDMAチャンネル検出 : チャンネルごとに別々の既知系列を送る



プリアンブル (固定パターン 18 シンボル)					ペイロード (40 シンボル)
検出パターン (半輝度点灯)	位相 検出	ダミー	シンボル 同期	TDMAヘッダ	位相範囲を制限したPSKをTDMA化



BPSKで各チャンネルに対してチャンネル番号を送信
「現在受信しているチャンネル番号」が得られる

トリガ生成回路を操作して
チャンネル切替

アウトライン

1. 研究背景・目的
 1. 可視光通信について
 2. 想定するシステム
 3. 先行研究
 4. 本研究の目的
 5. 実現のためのアイデア
2. 通信方法
 1. 基となる過去の研究について
 2. 実現方法とプロトコル
3. 実験
4. まとめ

実験

➤ TDMAチャンネル切り替えの確認

- ・全6チャンネル
- ・チャンネルごとに異なる
ランダムデータ
- ・BPSK



通常照明下である廊下にて実験

LED 点滅周波数	300 Hz
フレームレート	50 fps
通信距離	5 m
データシンボル	12000 シンボル
シンボルレート	50 sps
露光時間	1.668 ms

送信機	
LED	Cree CLP6C-FKB-CK1P1G1BB7R3R3
LED ドライバ	Texas Instruments TLC5922
制御ボード	FTDI Morph-IC-II (Cyclone-II)
受信機	
カメラ	Point Grey Research Flea3 FL3-U3-13S2M
カメラレンズ	SPACECOM JHF8M-MP
マイコン (トリガ信号生成回路)	Microchip PIC16F18854
USB シリアル変換器 (トリガ信号生成回路)	FTDI UM232H

TDMAチャンネル切り替えの確認

距離を固定した際の受信チャンネル設定ごとのエラー数

結果

- BERは多い場合で 1.8×10^{-3} 程度だった
→ **任意のチャンネルを選んだ通信が可能**
- BER悪化原因として、プロトコルが原因でTDMAチャンネル変更時に誤りが生じていると考えられる
(TDMAヘッダ直後にペイロードが送信されており、露光タイミング変更中に受信する可能性がある)
→ プロトコル変更により改善の余地あり

ランダムビット列12000シンボル(12000bit)送信

CH	エラー数(BER)	損失ビット数
1	2 (1.7×10^{-4})	0
2	1 (8.3×10^{-5})	0
3	2 (1.7×10^{-4})	0
4	22 (1.8×10^{-3})	40
5	1 (8.3×10^{-5})	0
6	0	0

まとめ

低速カメラを用いた可視光通信におけるTDMA通信の実現

- ・ シンボル周期に対し露光時間が短いことを利用
- ・ 露光タイミング同期を用いた手法をベースに実現

今後の課題

エラー低減のためのパケット構成の最適化