

[ポスター講演] 路車間可視光通信における
時空間画像を基にしたLEDアレイ捕捉手法白井 俊亮[†] 山里 敬也[†] 荒井伸太郎^{††} 圓道 知博^{†††} 藤井 俊彰[†]
岡田 啓[†][†] 名古屋大学

〒 464-8603 名古屋市千種区不老町 C3-1(631)

^{†††} 長岡技術科学大学

〒 940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1

^{††} 香川高等専門学校

〒 769-1192 香川県三豊市詫間町香田 551

E-mail: †usui@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp

あらまし 本稿では高度道路交通システム (ITS) のための路車間可視光通信に着目する。この通信では送信機としてLEDアレイを、受信機として高速度カメラを用いる。路車間可視光通信を行うには、高速度カメラで撮影された画像中のどこに送信LEDアレイがあるのかをデータ復号前に捕捉する必要がある。正確なLEDアレイの捕捉を目指し、本稿では時空間画像を用いてLEDアレイの解析を行う。その結果時空間画像においてLEDアレイは高い時間方向勾配値と低い空間方向勾配値を持つことを示す。その後、これらの特徴的な勾配値を用いたLEDアレイ捕捉手法を提案する。

キーワード 可視光通信, 高速度カメラ, 画像処理, 時空間画像

LED array acquisition method based on Spatio-temporal image
in Road to Vehicle Visible Light CommunicationSyunsuke USUI[†], Takaya YAMAZATO[†], Shintaro ARAI^{††}, Tomohiro YENDO^{†††}, Toshiaki
FUJII[†], and Hiraku OKADA[†][†] Nagoya University

Furo-cho Chikusa-ku Nagoya-shi, 464-8603, JAPAN

^{†††} Nagaoka University of Technology^{††} Kagawa National College of Technology

E-mail: †usui@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp

Abstract In this paper, we focus attention on road-to-vehicle visible light communication(R2V-VLC) in intelligent transport systems. This system uses an LED array as a transmitter and a high-speed camera as a receiver. To implement R2V-VLC, it is necessary to acquire the target LED array from the captured images at receiver before data demodulation. To achieve accurate acquisition, we analyze LED array by use of Spatio-temporal image. As the result of the analysis, we show the LED array in the spatio-temporal image has high time-gradient value and low space-gradient value. After that we propose a new LED array acquisition method using such characteristic gradient values.

Key words Visible Light Communication, High-Speed Camera, Image Processing, Spatio-temporal Image

1. まえがき

照明・表示板のための光源として LED 光源が現在広く普及している。LED は半導体デバイスであり、人間の目には見えない程に高速で点滅させることができる。そのため LED を高速で点滅させて照明・表示として併用しつつ、情報を送信させることが可能となる。この利点から LED を用いた可視光通信が新たな通信システムとして注目されている [1]- [5]。

LED を用いた可視光通信の応用先として高度道路交通システムが挙げられ、注目を集めている [3]- [5]。その中でも本研究では送信機として LED 信号機や LED 表示板等の LED アレイを、受信機として車載高速度カメラを用いる路車間可視光通信に着目する。受信機に高速度カメラを利用する利点として、LED アレイの認識や位置の特定が容易であるという点や一度に複数の送信機と通信が可能であるという点がある [6]。

路車間可視光通信においてデータは LED アレイの点滅パターンで表される。そのためデータの復号は撮影画像から送信機の部分の輝度を抽出し、点滅パターンを解析することで行われる。この事から復号前に受信機では撮影画像から LED アレイの位置を捕捉することが必要となる。捕捉の失敗があった場合は復号を行うことができないため、LED アレイ捕捉は路車間可視光通信において非常に重要な役割を持つといえる。LED アレイを捕捉するにあたり、「見逃し」と「誤捕捉」という二つの問題を予防することが必要となる。見逃しとは送信 LED アレイを捕捉できないこと、誤捕捉とは送信 LED アレイ以外のものを誤って捕捉してしまうことを表す。

従来手法として撮影画像の隣接フレーム間差分を取る手法が提案されていた [6]。高速度カメラは各画像を高いフレームレートで撮影するため、LED アレイ以外のほとんどの物体は差分を取ることで消失し、捕捉が可能となる。しかし、車両振動の影響で背景の物体が差分を取っても消失せず、結果として誤捕捉が起こってしまうことが明らかになっている。振動の影響を低減するため、白木らはブロックマッチングを用いた捕捉手法を提案した [7]。この手法は隣接したフレームの画像間の位置関係を導出し移動度を計算し、隣接フレーム差分を取る際に移動度の分だけ補正をかけるというものである。この手法で誤捕捉を低減することができた。しかし LED アレイ部分の移動度の計算に誤りが生じ、見逃しが増大してしまうという欠点がある。

本稿では時空間画像と時空間断面画像を用いて撮影画像中の LED アレイの解析を行う。時空間画像とは撮影された画像を時系列に並べることで作成される三次元画像空間であり、動画像解析の手法として用いられる [8]。LED は高速で点滅するので、時間方向の輝度値の変化が激しい。よって時空間画像内の LED は時間軸方向で非常に高い偏微分値 (勾配値) を持つといえる。また、LED は同期して ON/OFF の切り替えを行うため、空間方向での輝度値の変化は少ない。よって時空間画像内の LED は空間方向で低い偏微分値 (勾配値) を持つといえる。このことから本稿では時間軸方向と空間軸方向の二つの特徴的な値を用い、「見逃し」「誤検出」を共に低減することができる LED アレイ捕捉手法を提案する。

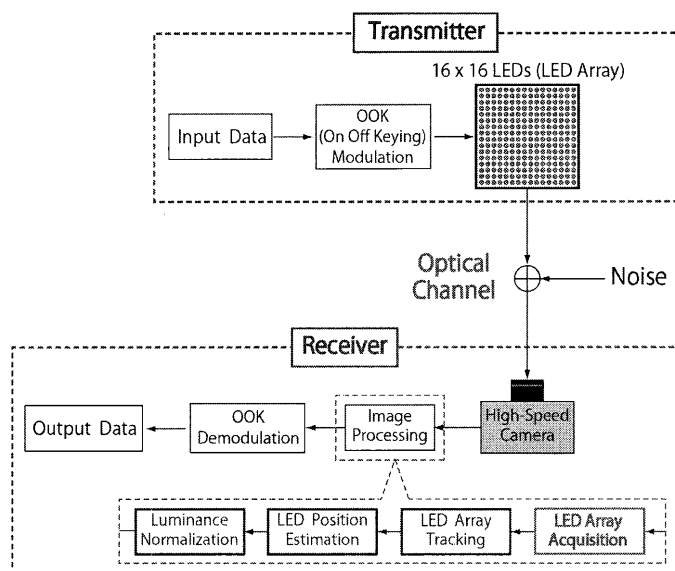


図 1 システムモデル

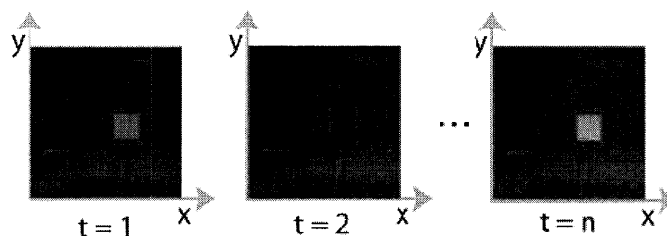


図 2 時系列に並んだ撮影画像

本稿の構成は以下の通りである。2 節では路車間可視光通信のシステムモデルを示す。3 節では時空間画像を用いて撮影画像中の LED アレイ解析を行う。4 節では提案する LED アレイ捕捉手法を説明する。5 節では実験を行い提案手法の評価を行う。最後に 6 節で本稿のまとめを述べる。

2. システムモデル

図 1 にシステムモデルを示す。送信機は 16×16 の計 256 個の正方形の LED アレイと変調器で構成される。送信機ではデータを ON-OFF 変調 (OOK) し、各 LED を OOK 信号に対応して点滅させる。

受信機は高速度カメラ、画像処理部分、復調器で構成される。受信機ではまず高速度カメラで LED アレイを撮影し、撮影フレームレートと同じ間隔で画像を出力する。画像処理部では送信 LED の画像中の位置を算出し、輝度を抽出する。画像処理部は LED アレイ捕捉、LED アレイ追従、LED アレイ位置推定、輝度正規化の 4 つのブロックで構成される。本稿ではこの中の LED アレイ捕捉部分に着目する。LED アレイ捕捉部では受信機は撮影画像中から LED アレイを検出する。他の部分の詳細は文献 [9] で述べられている。画像処理部で抽出された輝度は OOK 復調器を用いて復調され、最終的な送信データを得る。

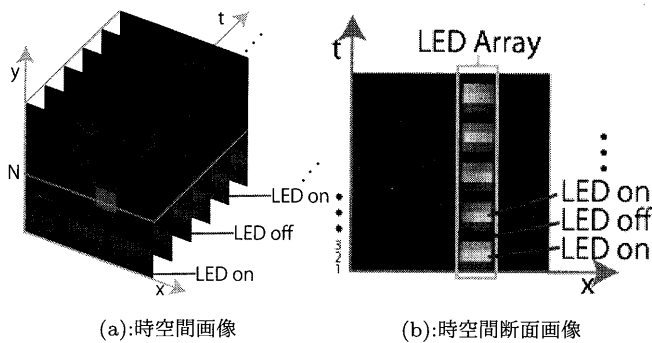


図3 時空間画像と時空間断面画像

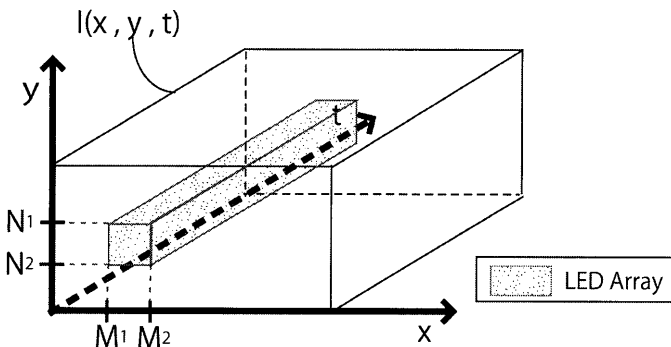


図4 LED アレイを含んだ時空間画像のモデル

3. 時空間画像を用いた解析

3.1 時空間画像と時空間断面画像

図2に時系列に並んだ撮影画像を示す。ここからLEDはONの場合画像内で高い輝度値を持ち、OFFの場合低い輝度値を持つことが分かる。

図2に示された撮影画像を図3(a)のように重ねることを考える。この三次元離散空間を時空間画像と呼ぶ。また、時空間画像を $y = N$ という平面で切り取った図3(b)のような (x, t) の二次元の画像を時空間断面画像と呼ぶ。

今、LEDアレイが高速で点滅し、さらに各LEDが同時にON-OFFの点滅を繰り返しているとする。LEDアレイを含んだ時空間画像のモデルを図4に示す。時空間画像が持つ輝度値を $I(x, y, t)$ とし、LEDアレイは時空間画像内の領域 $D\{x|M_1 \leq x \leq M_2, y|N_1 \leq y \leq N_2\}$ で静止しているとする。

3.2 輝度値の時間方向での偏微分値

ここではまずLEDアレイの時間方向の動きに着目する。2.節で述べたように、LEDはONの時に高い輝度値をOFFの時に低い輝度値を持つ。そのため、LEDの輝度値は時間軸方向で激しく変動しているといえる。この特徴は図3(b)の時空間断面画像からも見る事ができる。このことからLEDアレイは時間方向の勾配が高いということもできる。

つまり、 $\frac{\partial}{\partial t} I(x, y, t)$ を $I(x, y, t)$ の時間方向偏微分値とすると、 $\frac{\partial}{\partial t} I(x, y, t)$ は高い値を取るといえる。

3.3 輝度値の空間方向での偏微分値

次にLEDアレイの空間方向の動きに着目する。3.1節での仮定から、各LEDは図3(b)のように同程度の輝度値を持つ。

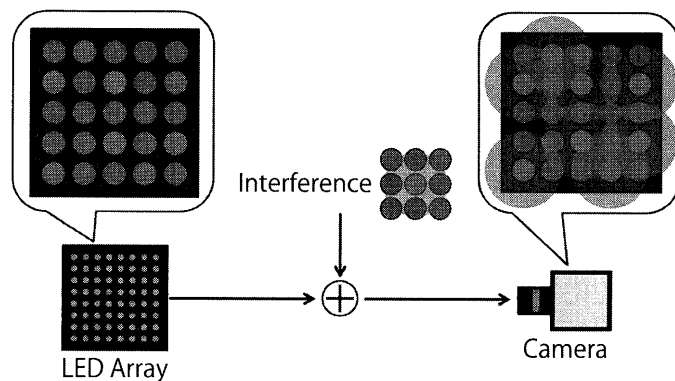


図5 干渉のイメージ図

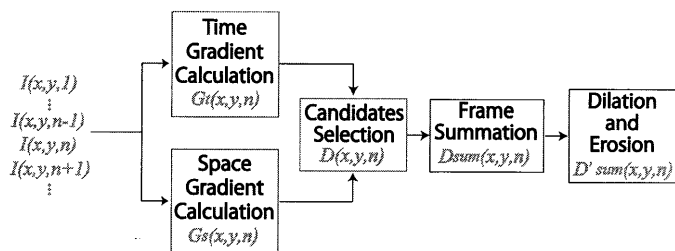


図6 提案LEDアレイ捕捉手法のブロック図

このことからLEDアレイは空間方向の勾配が低いといえる。

つまり、 $\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} I(x, y, t)$ を $I(x, y, t)$ の空間方向偏微分値とすると、 $\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} I(x, y, t)$ は低い値を取るといえる。

3.4 LED光拡散の影響

撮影画像上においてLEDが他のLEDの近くにある場合、LED光の拡散の影響でLEDの光線が他のLEDの光線と干渉してしまうことが知られている[10]。図5にこの干渉のイメージ図を示す。干渉の影響により、LED光は自身が属する画素だけでなく、周りの画素にも影響を及ぼしてしまう。そのため、撮影画像におけるLEDアレイの輝度分布が平坦になってしまう。結果として時間方向の勾配値が高くなる、または空間方向の勾配値が低くなる可能性がある。

4. 提案LEDアレイ捕捉手法

本節では提案LEDアレイ捕捉手法について説明する。手法のブロック図を図6に示す。この手法は撮影画像の時間方向勾配値と空間方向勾配値を算出し、時間方向勾配値が高く、空間方向勾配値が低い部分をLEDアレイと判定する手法である。

4.1 時間・空間勾配計算

この手法では、まず時間方向勾配値と空間方向勾配値を計算する。計算は入力画像 $I(x, y, t)$ にフィルタリング処理を行うことで計算される。本手法ではフィルタリングにSobelオペレータを用いる。Sobelオペレータは画像処理の分野でエッジ検出に用いられるものである[11]。

$t = n$ において時間方向勾配値 $G_t(x, y, n)$ と空間方向勾配値 $G_s(x, y, n)$ は以下の式で計算される。

$$G_t(x, y, n) = \sqrt{\{G_{t1}\}^2 + \{G_{t2}\}^2}$$

$$G_{t1} = \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 s_1(k, l) I(x+k, y, n+l)$$

$$G_{t2} = \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 s_1(k, l) I(x, y+k, n+l) \quad (1)$$

$$G_s(x, y, n) = \sqrt{\{G_{s1}\}^2 + \{G_{s2}\}^2}$$

$$G_{s1} = \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 s_1(k, l) I(x+k, y+l, n)$$

$$G_{s2} = \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 s_2(k, l) I(x+k, y+l, n) \quad (2)$$

ここで $s_1(k, l)$ と $s_2(k, l)$ はソーベルオペレータのフィルタカーネルであり、以下の式で与えられる。

$$s_1(k, l) = \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$s_2(k, l) = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

4.2 LED アレイ候補判定

3. 節での議論から LED アレイは高い時間勾配値と低い空間方向勾配値を持っていることが分かる。よって、 n フレーム目における LED アレイ候補判定画像 $D(x, y, n)$ は以下の式で与えられる。

$$D(x, y, n) = \begin{cases} 255 & (G_t(x, y, n) > \varphi_t \cap G_s(x, y, n) < \varphi_s) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 φ_t は時間領域の閾値、 φ_s は空間領域の閾値を表す。(4) 式から分かるように $D(x, y, n)$ は二値画像となり、画像内の白色の部分が LED アレイと判定された部分となる。

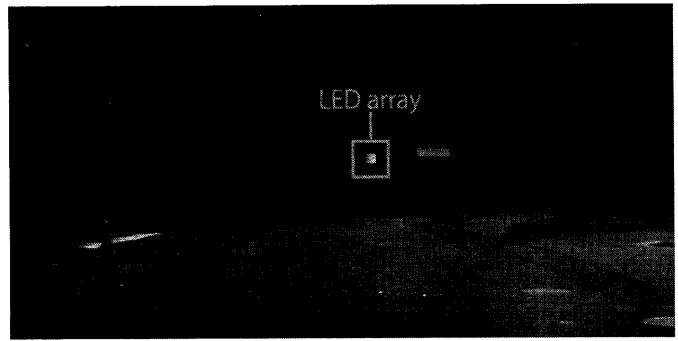
φ_t と φ_s の両方を判定に用いる利点を説明する。図 7(a) に LED アレイを含んだ撮影画像を示す。図 7(b) に判定に φ_t のみを用いた場合の候補判定結果を示す。この場合候補判定画像 $D(x, y, n)$ は以下の式で与えられる。

$$D(x, y, n) = \begin{cases} 255 & (G_t(x, y, n) > \varphi_t) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (5)$$

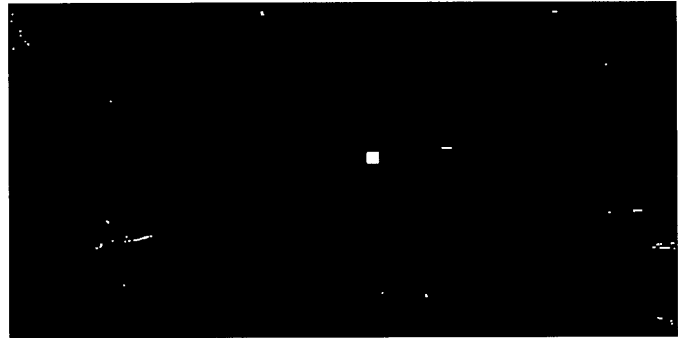
また、図 7(c) に判定に φ_s のみを用いた場合の候補判定結果を示す。この場合候補判定画像 $D(x, y, n)$ は以下の式で与えられる。

$$D(x, y, n) = \begin{cases} 255 & (G_s(x, y, n) < \varphi_s) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (6)$$

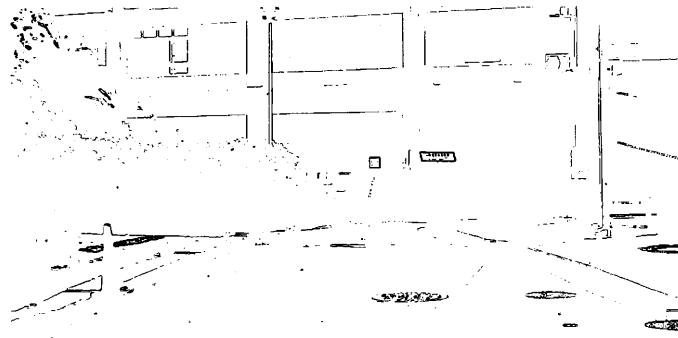
図 7(b) と図 7(c) から分かるように、 φ_t のみ、 φ_s のみの判定では、LED アレイ以外の部分も値が 255 となっており、誤捕捉が起きていることが分かる。一方、図 7(d) が示すように φ_t と φ_s の両方を判定に用いた場合は誤捕捉が発生していない。このことから、 φ_t と φ_s の両方を用いた判定は誤捕捉を抑制することができているといえる。しかし、見逃しについては発生す



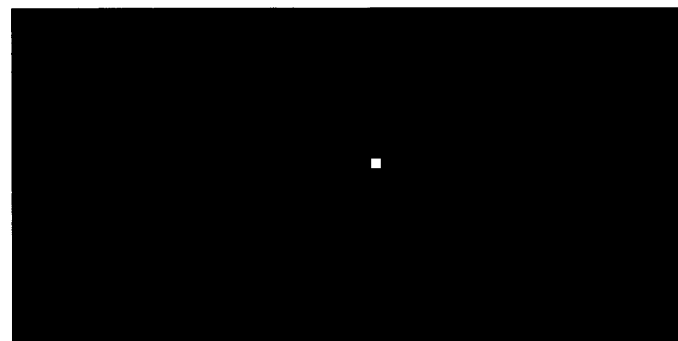
(a) 撮影画像



(b) φ_t のみを用いた候補判定結果



(c) φ_s のみを用いた候補判定結果



(d) φ_t と φ_s の両方を用いた候補判定結果

図 7 候補判定結果

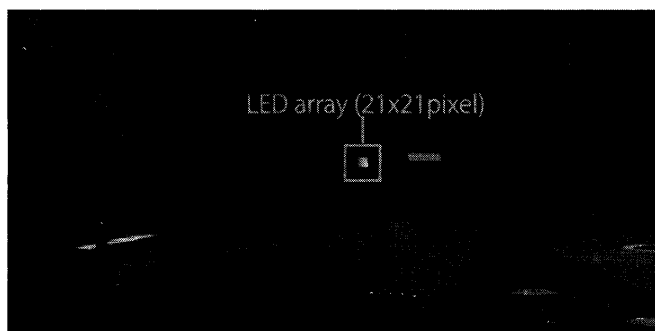
る可能性が未だ残されている。これについての評価は 5. 節で行う。

4.3 フレーム足し合わせ・膨張収縮

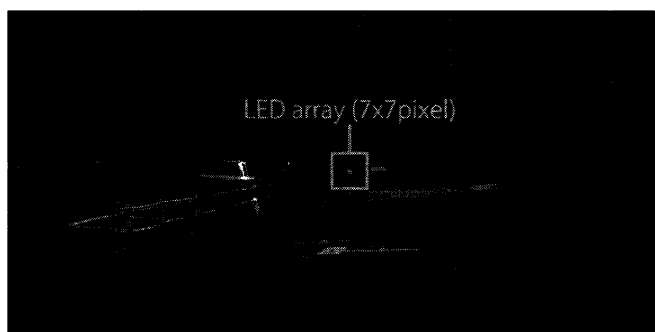
$t = n$ での候補判定結果 $D(x, y, n)$ で見逃しが発生していても、 $t = n + 1$ での候補判定結果 $D(x, y, n)$ では捕捉できている可能性がある。その為 LED アレイをより正確に判定するた

表 1 使用パラメータ諸元

LED 点灯速度	500Hz	点灯パターン	<i>On/Off, Random</i>
撮影速度	1000fps	車両測速	30km/h
撮影距離	30m, 90m	日時/天候	日中/晴天
使用フレーム数	200frame	画像解像度	1024 × 512pixel



(a) 撮影距離 30m



(d) 撮影距離 90m

図 8 異なる距離からの撮影画像

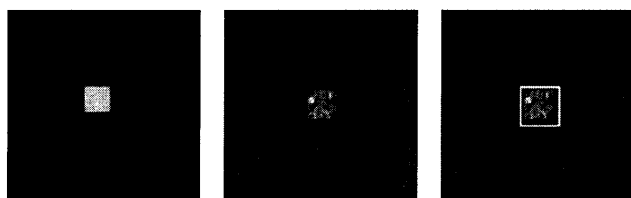
(a):*On/Off* (b):*Random* (c):捕捉成功例

図 9 点灯パターンと捕捉成功例

め、候補判定画像 $D(x, y, t)$ を $t = n$ から $t = n - k$ まで足し合わせ、 $D_{sum}(x, y, n)$ を生成する。 $D_{sum}(x, y, n)$ は以下の式で与えられる。

$$D_{sum}(x, y, n) = D(x, y, n) \cup D(x, y, n-1) \cup \dots \cup D(x, y, n-k) \quad (7)$$

\cup は OR 演算子 (論理和) である。本稿では $k = 4$ を用いる。フレーム足し合わせの処理の後、 $D_{sum}(x, y, n)$ に対しノイズ処理である膨張収縮処理を行ない $D'_{sum}(x, y, n)$ を得る。最終的に $D'_{sum}(x, y, n)$ の値が 255 の部分を LED アレイとみなす。

5. 実験

5.1 諸元

提案手法の評価を行うため、走行環境下で撮影された画像に

対して捕捉手法を適用する。用いたパラメータの諸元を表 1 に示す。また、図 8 に 30m からの撮影画像と 90m からの撮影画像を示す。距離 30m では LED は画像中で 21x21pixel の大きさを持ち、距離 90m では 7x7pixel の大きさを持つ。

捕捉手法の評価は判定閾値 φ_t と φ_s を変化させた場合の見逃し率を変化を見ることで行う。見逃し率 P_m を以下の式で定義する。

$$P_m = 1 - \frac{F_{correct}}{F_{all}} \quad (8)$$

F_{all} は撮影された全フレーム数、 $F_{correct}$ は捕捉に成功したフレーム数を表す。また、捕捉成功条件を以下に定義する。捕捉結果画像 $D'_{sum}(x, y, n)$ の値が 255 の領域の外接矩形を撮影画像上に描き、LED アレイが外接矩形内に完全に収まっていれば捕捉成功とする。捕捉成功例を図 9(c) に示す。

LED の点滅パターンは *On/Off*(図 9(a)) と *Random*(図 9(b)) の二種類を用いる。*On/Off* は全ての LED が同時に ON と OFF を繰り返すものである。*Random* はデータ伝送を想定したパターンであり、各 LED はランダムに点滅する。*Random* には LED アレイ追従用の反転信号が含まれている [12]。

4. 節で示したように、 φ_t もしくは φ_s のみの捕捉では多くの誤捕捉が生じてしまう。そのため本実験では φ_t もしくは φ_s のみの捕捉手法は評価しない。一方 φ_t と φ_s の両方を持ちいた提案捕捉手法では P_m は閾値 φ_t と φ_s に依存する。そのため、本実験ではそれぞれの距離、点灯パターンにおいて φ_t と φ_s をそれぞれ個別に変化させた場合の P_m の変化を評価する。 φ_t の影響を評価する場合は $\varphi_s = 80$ とする。 φ_s の影響を評価する場合は $\varphi_t = 180$ とする。また φ_t と φ_s はそれぞれ $110 \leq \varphi_t \leq 250$, $5 \leq \varphi_s \leq 145$ とし、値の刻みは 5 ずつとする。

5.2 結果

図 10 に結果を示す。まず時間勾配閾値 φ_t が P_m に及ぼす影響を見る。この結果を図 10(a) に示す。点灯パターン *On/Off* の場合、全ての φ_t で $P_m = 0\%$ となった。ここから点灯パターン *On/Off* の LED アレイは非常に高い時間勾配閾値を持つことが分かる。一方、点灯パターン *Random* の場合、距離 30m では $\varphi_t \leq 220$ で $P_m = 0\%$ となり、距離 90m では $\varphi_t \leq 150$ で $P_m = 0\%$ となった。ここから点灯パターン *Random* の LED アレイは点灯パターン *On/Off* のものと比較して低い時間勾配閾値を持つことが分かる。これは LED 間の干渉が原因と考えられる。

次に空間勾配閾値 φ_s が P_m に及ぼす影響を見る。この結果を図 10(b) に示す。点灯パターン *On/Off* の場合、距離 30m では $\varphi_s \geq 15$ で $P_m = 0\%$ となり、距離 90m では $\varphi_s \geq 45$ で $P_m = 0\%$ となった。点灯パターン *Random* の場合、距離 30m では $\varphi_s \geq 70$ で $P_m = 0\%$ となり、距離 90m では $\varphi_s \geq 90$ で $P_m = 0\%$ となった。点灯パターン *On/Off* の LED アレイは点灯パターン *Random* のものと比較してより低い空間勾配を持つことが分かる。これは点灯パターン *On/Off* は全ての LED が同時に ON-OFF の状態を取るためである。

撮影画像中の LED アレイの大きさは距離 30m では 21x21pixel、距離 90m では 7x7pixel と非常に小さい。それ

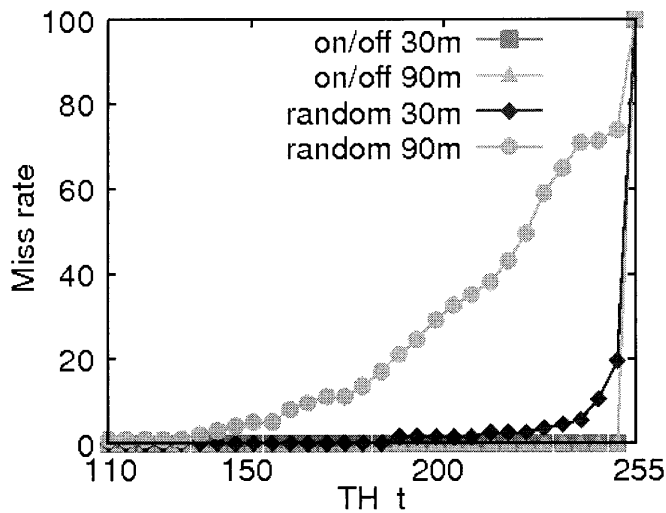
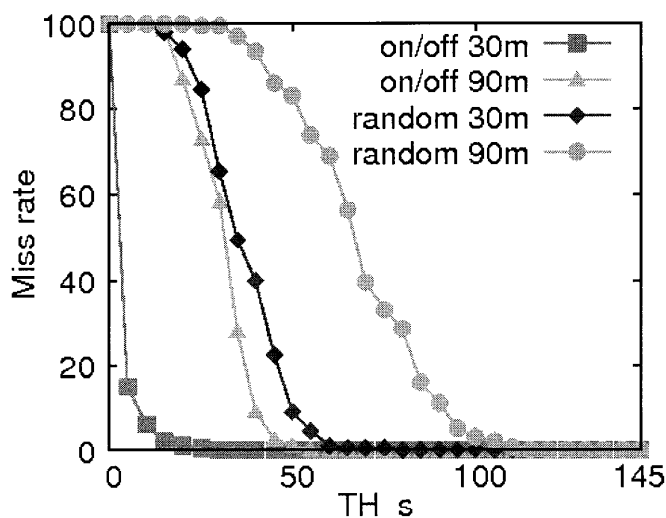
(a): φ_t を変化させた場合の P_m の変化 ($\varphi_s = 80$)(a): φ_s を変化させた場合の P_m の変化 ($\varphi_t = 180$)

図 10 実験結果

にも関わらず、適切な φ_t と φ_s を設定することで、見逃しなく LED アレイを捕捉することができた。このことから、LED アレイは高い時間勾配値と低い空間勾配値を併せ持つという考えは正しいと結論づける。

6. むすび

本稿では路車間可視光通信における LED アレイ捕捉のために、時空間画像と時空間断面画像を導入し、時空間画像内の LED アレイは高い時間方向勾配値と低い空間方向勾配値を持つことを示した。また、これら二つの勾配値を利用した LED アレイ捕捉手法を提案した。走行環境での実験の結果、適切な判定閾値 φ_t と φ_s を設定することにより、車両が振動する環境下においても LED アレイの見逃し率 P_m が 0% となることを示した。

文 献

- [1] T.komine and M.nakagawa, "Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System using LED Lights", IEEE Transaction on Consumer Electronics, vol.50, pp.100-107, no.1, Feb.2004.
- [2] G.-K.-H.Pang, C.-H.Chan and T.T.O.Kwan, "Tricolor Light-Emitting Diode Dot Matrix Display System with Audio Output", IEEE Transaction on Industry Application, vol.37, no.2, pp.534-540, Mar/Apr.2001
- [3] H.-S,Liu and G.Pang, "Positioning beacon system using digital camera and LEDs", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.52, no.2, pp.406-419, March.2003
- [4] 斎藤翼, 春山真一郎, 中川正雄, "LED テールランプとイメージセンサを用いた可視光車車間通信および測距方式の検討", 電子情報通信学会技術研究報告, CS, vol.105, no.538, pp.121-126, 2006年2月
- [5] M. Akanegawa, Y. Tanaka, M. Nakagawa, "Basic study on traffic information system using LED traffic lights", IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, vol.2, no.4, pp.197-203, Dec.2001
- [6] M. Wada, T. Yendo, T. Fujii, M. Tanimoto, "Road-to-vehicle communication using LED traffic light", Intelligent Vehicles Symposium 2009 IEEE, pp. 179-184, June 2009
- [7] 白木康建, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 圓道知博, 荒井伸太郎, "走行車両が高速カメラを用いて情報を受信するコピ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, vol.J95-B, no.11, pp.1517-1528
- [8] 松生智博, 石井亮司, 前田真一郎, 岡田至弘, "時空間画像処理による類似動画検索", 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU, パターン認識・メディア理解 107(427), pp.299-304, 2008年1月
- [9] Y. Shiraki, T. Nagura, T. Yamazato, S. Arai, T. Yendo, T. Fujii, H. Okada, "Robust Receiver Design for Road-to-Vehicle Communication System Using LED Array and High-Speed Camera", 18th World Congress on Intelligent Transport Systems, Oct. 2011
- [10] 笠嶋達也, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 圓道知博, 荒井伸太郎, "LED アレイと高速カメラを用いた路車間可視光通信のための符号間干渉の除去手法", 電子情報通信学会技術研究報告, ITS2011-38, pp.129-134
- [11] William K. Pratt, "Digital Image Processing", New York: a Wiley-Interscience publication, 1978.
- [12] T. Nagura, T. Yamazato, M. Katayama, T. Yendo, T. Fujii, H. Okada, "Tracking an LED Array Transmitter for Visible Light Communications in the Driving Situation", IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS2010), pp.765-769 Sept. 2010.

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費基盤 (C) (23560449) および豊田中央研究所の助成を受けて行われたものである。記して謝意を表す。また、本研究を進めるにあたり熱心にご指導くださった名古屋大学エコトピア科学研究所教授片山正昭先生、助教小林健太郎先生に感謝する。