

THE IEICE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS (JAPANESE EDITION)

IEICE 電子情報通信学会 **B** 論文誌

通 信

VOL. J97-B NO. 7

JULY 2014

本PDFの扱いは、電子情報通信学会著作権規定に従うこと。
なお、本PDFは研究教育目的（非営利）に限り、著者が第三者に直接配布することができる。著者以外からの配布は禁じられている。

通信ソサイエティ

一般社団法人 **電子情報通信学会**

THE COMMUNICATIONS SOCIETY

THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

路車間可視光通信のための時空間勾配を特徴量とした LED アレイ捕捉手法

白井 俊亮^{†a)} 山里 敬也[†] 岡田 啓[†] 藤井 俊彰[†]
高橋 桂太[†] 圓道 知博^{††} 荒井伸太郎^{†††}

A New LED Array Acquisition Method Focusing on Time-Gradient and Space-Gradient Values for Road to Vehicle Visible Light Communication

Syunsuke USUI^{†a)}, Takaya YAMAZATO[†], Hiraku OKADA[†], Toshiaki FUJII[†],
Keita TAKAHASHI[†], Tomohiro YENDO^{††}, and Shintaro ARAI^{†††}

あらまし 本論文では送信機として 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に着目する。この通信ではデータ復号前に、撮影された画像に画像処理を施し、画像のどこに送信 LED アレイがあるのかを捕捉する必要がある。従来の捕捉手法ではバケットフォーマットのデータ部において正確な捕捉が行えなかった。本論文ではこの問題に対し以前明らかにした撮影画像中の LED アレイが時間方向と空間方向に特徴的な勾配値をもつという性質を利用する。二つの勾配値を散布図として描くことにより、LED アレイ捕捉を、LED アレイ部分と非 LED アレイ部分を判別する 2 クラス判別問題として考える。判別関数としては直線を採用し散布図中の判別直線よりも上の領域を LED アレイとする捕捉手法を提案する。更に判別直線のパラメータを実験的に検討し、提案捕捉手法がデータ部においても捕捉が可能となることを示す。

キーワード 可視光通信, 時空間画像, 画像処理, 線形判別分析

1. ま え が き

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を集めている [1]~[5]。その中でも本論文では路車間可視光通信に着目する。この通信は送信機として 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ものである。路車間可視光通信の利点として LED 光の高い指向性によって他の送信光源と混信しにくい点、既存の LED 光源を送信機として用いるので送信機の設置コストが少ない点、カメラを受信機として用いるので複数の送

信機との通信が容易に行える点が挙げられる [6]。

路車間可視光通信においてデータは LED 光の輝度の強さで変調され、LED アレイの点滅パターンで表現される。そのため撮影画像から LED アレイ部分の輝度を抽出し、点滅パターンを解析することでデータの復号が行われる。LED アレイ部分の輝度を抽出するために、事前に撮影画像に画像処理を施し LED アレイの位置を探しだすことが必須となる。本論文ではこの工程を LED アレイ捕捉と呼称する。捕捉が失敗した場合、データの復号を行うことができない。そのため 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もつといえる。LED アレイを捕捉するにあたり、「見逃し」と「誤判別」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、誤判別とは送信 LED アレイ以外のものを誤って LED アレイと判別してしまうことを表す。

LED アレイ捕捉とは、撮影画像中で LED アレイのみを抜き出すことに他ならない。通常、LED アレイ

[†] 名古屋大学, 名古屋市
Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya-shi, 464-8603 Japan

^{††} 長岡技術科学大学, 長岡市
Nagaoka University of Technology, Nagaoka-shi, 940-2137 Japan

^{†††} 香川高等専門学校, 三豊市
Kagawa National College of Technology, Mitoyo-shi, 761-8058 Japan

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

のもつある特徴量に着目し、撮影画像中の非 LED アレイ部分から分離することで LED アレイ捕捉を行う。例えば文献 [6] では、LED アレイが高速に点滅している点と、高速度カメラで撮影した画像では非 LED アレイ部分はほとんど変化がないことに着目している。これにより、隣接フレーム間差分を取ることで、LED アレイのみを浮かき上がらせて LED アレイ捕捉を実現している。しかしこの手法は車両振動の影響を多く受け、結果として捕捉性能が低下することが明らかになっている。この問題を解決するための改良手法が白木らにより提案されている [7]。この手法では 2 枚の画像間のずれをピクセル単位で計算するブロックマッチングという画像処理手法を用いて車両振動の影響から生じるずれを計算・補正し、振動の影響を低減するものである。これら従来手法は、LED アレイの時間変化、すなわち時間勾配に着目し、それを特徴量として LED アレイ捕捉を行う手法と言える。

一方 LED アレイはある程度の大きさをもっており、また、その輝度値は他の背景より高い。したがって、撮影画像のあるフレームに渡って重ね合わせた時空間画像を LED アレイが存在する断面で切り出した時空間断面画像で解析を行うと、LED アレイの幅をもつ時間変動が見て取れる [8]。詳細は後述するが、これは時間勾配だけでなく、空間勾配も LED アレイ捕捉のための特徴量として利用できることを示唆している。

LED アレイ捕捉は、LED アレイ部分の特徴量と非 LED アレイ部分の特徴量とを比較し判別する、2 クラス判別問題として考えることができる。一般に、最適な判別関数は LED アレイ部分と非 LED アレイ部分を分け、それぞれの分布を見ることで決定することができる。本論文では判別関数として直線を用いることで LED アレイ捕捉を行う。判別直線のパラメータを事前に定める際、パラメータ最適決定の代表的な手法として、フィッシャーの線形判別分析が挙げられる [9]。しかし、非 LED アレイ部分の散布特性からこの手法では正確な捕捉が行えない。そこで本論文では、実験的手法を用いて判別直線のパラメータ検討を行う。

本論文では、LED アレイの新しい捕捉手法を提案する。具体的には、撮影画像の画素の時間勾配と空間勾配を特徴量として LED アレイ捕捉を行う。このために事前検討として、時間方向と空間方向の勾配を散布図として描き (時空間勾配散布図)、それらの勾配特徴から判別直線のパラメータを抽出する。そして、これらのパラメータを用いることで、時間勾配のみに着

目した従来手法に比べ、空間勾配にも着目した提案手法は、従来手法では困難であったパケットフォーマット中のデータ部での捕捉も確実にできることを示す。

本論文の構成は以下のとおりである。2. では路車間可視光通信のシステムモデルを示す。3. では時空間画像を用いた解析を行う。4. では撮影画像の時空間勾配散布図を描き、それを用いた解析を行う。5. では提案する LED アレイ捕捉手法を説明する。6. では実験を行い捕捉手法の評価検討を行う。最後に 7. で本論文のまとめを述べる。なお本論文は、筆者らの国際会議における報告 [8] を発展させたものである。

2. システムモデル

システムモデルを図 1 に示す。送信機は 256 個の LED を 16×16 の正方形に配置した LED アレイと ON-OFF 変調器で構成される。入力データを 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、復調器で構成される。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。画像処理部では撮影画像中の送信 LED の位置を算出し、その部分の輝度を抽出する。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。

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、輝度正規化の四つのブロックで構成される。本論文では LED アレイ捕捉部分に着目する。他の部分の詳細は文献 [10] で述べられている。LED アレイ捕捉部では撮影画像中の LED アレイを含

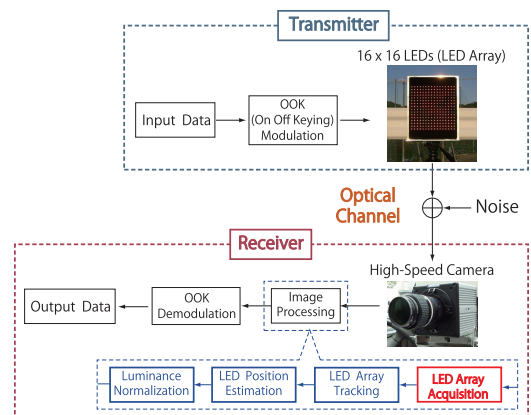


図 1 システムモデル
Fig. 1 System model.

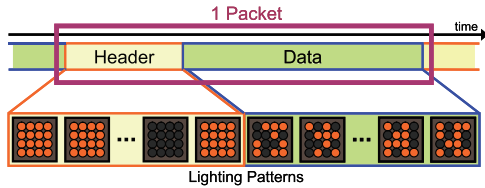


図2 パケットフォーマット
Fig. 2 Packet format.

む部分を別の画像として切り出し(切り出し画像の生成), LED アレイ追従部に引き渡す. 切り出し画像中に LED アレイが完全に収まっていれば後の処理部により輝度の抽出が可能となる.

図2はパケットフォーマットである. ヘッダ部は受信側でデータ開始位置を検出できるようにするために挿入する系列であり, LEDの全点灯・全消灯のパターンを組み合わせることで構成される. データ部については, 入力データから個々のLEDの点滅パターンを個別に決定し, 2次元の点滅パターンを生成する. ヘッダ部での捕捉位置を用いてもデータ部の間にLEDアレイの画像中の位置は変わってしまう. このためデータ部の間でも正確な捕捉が必要となる.

3. 時空間断面画像を用いた解析

本章では時空間断面画像を用いて撮影画像中のLEDアレイは勾配に特徴的な値をもつことを示す. なお, より詳細な解析は文献[8]に記述されている.

3.1 時空間画像と時空間断面画像

図3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もち, OFFの場合低い輝度値をもつことが分かる. この撮影画像を図4(左)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4(右)のような (x, t) の二次元の画像を時空間断面画像と呼ぶ. 時空間断面画像を用いることで動画の時間方向の動きを画像として見る事が可能となる.

3.2 撮影画像中の輝度値の勾配

まずLEDアレイの時間方向の動きに着目する. LEDアレイは高速で点滅を繰り返す. そのため, LEDアレイ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4(右)の時空間断面画像からも見ることができる. このことからLEDアレイは時間方向の勾配が高いといえることができる.

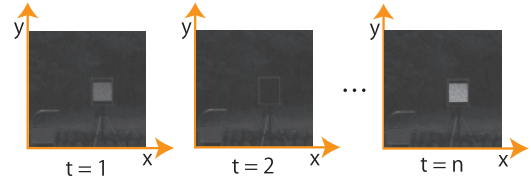


図3 時系列に並んだ撮影画像
Fig. 3 Captured images in time series.

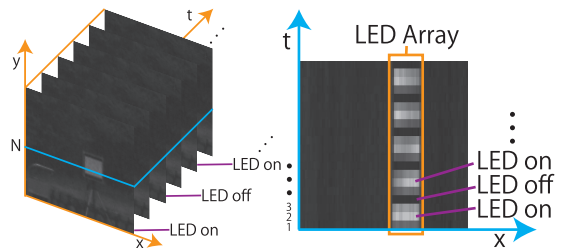


図4 時空間画像と時空間断面画像
Fig. 4 Spatio-temporal image and Spatio-temporal cross-section image.

次にLEDアレイの空間方向の動きに着目する. LEDアレイは撮影画像中である程度の大きさをもつ. LEDアレイは図4(右)のように, その大きさの分, 同程度の輝度値をもつ. 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.

以上から撮影画像中のLEDアレイの時間方向と空間方向の勾配は特徴的な値をもつことが分かる.

4. 時空間勾配散布図を用いた解析

4.1 時空間勾配散布図

撮影画像中の時間方向勾配と空間方向勾配は画像にフィルタをかけることで算出できる. 算出手法は5.1において詳細に記述する.

算出した時空間勾配値の散布図をLEDアレイ部分とその他の部分に分けて描く. この散布図を図5に示す. 散布図の縦軸(G_t)は時間勾配の値, 横軸(G_s)は空間勾配の値を示している. 使用した画像は走行状態で撮影されたものである. LEDアレイとカメラの間の距離は90mであり, LEDアレイはデータ伝送を想定し, 各LEDがランダムに点灯している. 散布図中のLEDアレイ部分とLEDアレイ以外の部分は撮影画像から目視によって判別した.

時空間勾配散布図を用いる利点は大きく二点ある. 一点目は撮影画像中の画素がもつ時間方向・空間方向の勾配値を同時に見る事ができ, LEDアレイとその

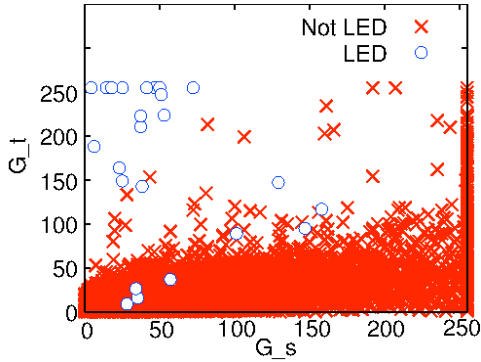


図 5 時空間勾配散布図

Fig. 5 Scatter diagram of time/space gradient value.

他の部分の勾配値を解析しやすくなるという点である。二点目は時空間勾配散布図から LED アレイ部分のみが存在する領域を抜き出し、その部分を中心とした切り出し画像を生成することで LED アレイの捕捉が可能となるという点である。二点目の利点によって「LED アレイの捕捉」を「時空間勾配散布図から LED アレイ部分のみを抜き出すこと」という 2 クラス判別問題とみなすことが可能となる。

図 5 の散布図から LED アレイとその他の部分が混同していることが分かる。理由は以下の二点が考えられる。一点目は光の反射、車両振動の影響により非 LED アレイ部分も高い時間方向勾配をとるという点である。二点目は点灯パターンによっては連続して点灯・消灯を繰り返すため LED アレイ部分の時間方向勾配が高くない画素が存在するという点である。このままでは 2 クラスの正確な判別は困難である。これを解決する手法を次節で述べる。

4.2 時空間勾配値の過去フレームとの平均

時間方向、空間方向のそれぞれの勾配値を過去のフレームと平均を取ることによって LED アレイ部分のみを含む領域を抜き出しやすくなると考えられる。カメラによる撮影は 1000fps という高速で行われるので、その結果短いフレーム間では撮影画像中の LED アレイはほとんど動かないとみなすことができる為である。また、LED アレイ部分と誤判別されやすい部分も平均を取ることによって判別しやすくなると考えられる。光の反射による影響は一瞬であることや、車両振動が上下方向、左右方向ともに満遍なく起こるためである。

過去 10 フレーム分の時間、空間勾配のそれぞれの平均を取った散布図を図 6 に示す。ここから LED ア

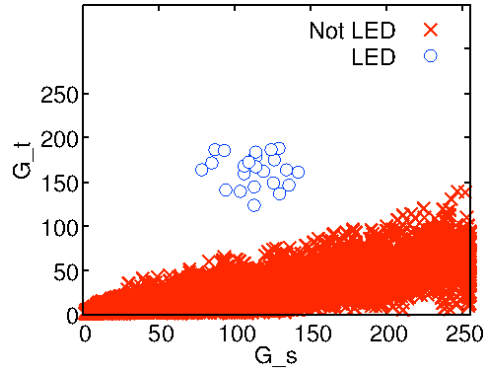


図 6 10 フレーム分平均を取った時空間勾配散布図

Fig. 6 Scatter diagram of time/space gradient value (averaging 10 frames).

レイ部分と非 LED アレイ部分が判別しやすくなったことが分かる。よって平均を取ることによって LED アレイ部分のみを含む領域を抜き出しやすくなるといえる。

図 6 での散布状況から散布図中に判別直線を引き、その直線より上の部分、すなわち散布図中の

$$G_t - a * G_s - b \geq 0 \quad (1)$$

となる部分ならば LED アレイ部分のみを抜き出すことが可能であると考えられる。ここで a は判別直線の傾きを、 b は G_t 軸の切片の値を表す。

5. 提案 LED アレイ捕捉手法

本章では提案 LED アレイ捕捉手法について説明する。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、過去 k フレーム分の平均を取った後、散布図中の判別直線よりも上の部分を LED アレイと判別する手法である。

5.1 時間・空間勾配計算

はじめに撮影画像の時間方向勾配値と空間方向勾配値を計算する。時空間勾配値は入力画像 $I(x, y, t)$ 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。

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

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

$$G_{t2} = \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 s_1(k, l) I(x, y + k, n + l) \quad (2)$$

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

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

$$G_{s2} = \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 s_2(k, l) I(x + k, y + l, n) \quad (3)$$

ここで $s_1(k, l)$ と $s_2(k, l)$ は Sobel 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。

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

$$s_2(k, l) = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

5.2 時空間勾配平均

次に過去 k フレーム分の時空間勾配を計算する。時間方向勾配平均値 $\overline{G}_t(x, y, n)$ 及び空間方向勾配平均値 $\overline{G}_s(x, y, n)$ はそれぞれ以下のように計算される。

$$\overline{G}_t(x, y, n) = \frac{1}{k} \sum_{l=0}^{k-1} G_t(x, y, n - l) \quad (5)$$

$$\overline{G}_s(x, y, n) = \frac{1}{k} \sum_{l=0}^{k-1} G_s(x, y, n - l) \quad (6)$$

5.3 LED アレイ判別

時空間勾配平均値を基に LED アレイの判別を行う。判別画像 $D(x, y, n)$ は以下の式に従い生成される。

$$D(x, y, n) = \begin{cases} 255 & (A \text{ satisfied}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (7)$$

$$A: \overline{G}_t(x, y, n) - a \times \overline{G}_s(x, y, n) - b \geq 0$$

a, b は判別直線のパラメータである。散布図内では a は直線の傾きを、 b は G_t 軸の切片の値を表す。 $D(x, y, n)$ の値が 255 の部分が LED アレイと判別された部分である。LED アレイが単数の場合、 $D(x, y, n)$ 内に LED 部分の画素が一画素のみ残っていれば捕捉は可能である。しかし、複数の場合は各 LED アレイ部分の画素を $D(x, y, n)$ 内に残す必要がある。そのため複数の LED アレイを捕捉するためには判別画像 $D(x, y, n)$ は以下に示す条件を満たす必要がある。

(1) LED 以外の部分を候補として残さない

(2) 条件 1 を満たした上でできる限り多く LED 部分の画素を残す

5.4 切り出し画像生成

判別画像 $D(x, y, n)$ の値が 255 の部分のラベリングを行い、ラベルごとに重心を取り、重心を中心とした $c \times r$ pixel の切り出し画像を生成する。この切り出し画像内に LED アレイが完全に収まっていれば捕捉成功となる。

6. 実験

本章では 5. で提案した捕捉手法で用いられる三つのパラメータの値について検討し、その後検討の結果得たパラメータを用いて従来手法と比較評価を行い、提案手法の有効性を示す。

三つのパラメータとは平均フレーム数 k 、散布図中の判別直線の傾き a 、 G_t 軸の切片の値 b である。

なお、この実験において選定された各パラメータは「十分な捕捉性能を達成できる値」であり、「最適・最良の値」ではないことを先に記載する。

6.1 一般的な最適決定手法の不適切性

判別直線の傾き a 、切片 b の決定に関して、最適な手法として分布の統計的性質を用いるフィッシャーの線形判別分析がある [9]。この手法を多数の散布図に用い a, b の統計を取ることで a, b の値を決定できる。

図 6 の散布図にフィッシャーの線形判別分析を用いると傾き $a = 0.18082$ 、切片 $b = 73.344$ という値を得る。この a, b を用いて図 6 の散布図に判別直線を描いたものを図 7 に示す。この図から判別直線より上の領域に、非 LED アレイ部分の画素が存在していることが分かる。このような結果になる理由を以下に示す。非 LED アレイ部分中の LED アレイと誤判別されやすい部分は画素数にして 50pixel 程度なのに対して、されにくい部分 50 万 pixel 程度と圧倒的に多い。そのため非 LED アレイ部分の統計的性質は誤判別されにくい部分が支配的となり、この手法で決定した a, b の値では誤判別が起こってしまう。

また、散布図中の 2 クラスの分布の距離として、KL 情報量という指標がある [9]。平均フレーム数 k に関して、多数の散布図に対して LED アレイ部分と非 LED アレイ部分の KL 情報量を求め、それが最大となる、すなわち分布の分離が最もしやすくなる k の値の統計を取ることで k の値を決定することは可能である。しかしこの手法で決定した k でも前述の理由から誤判別

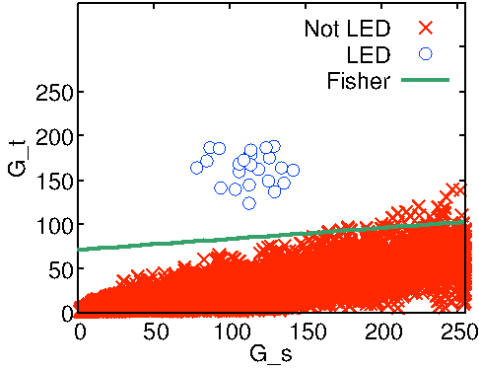


図7 フィッシャーの線形判別分析による判別直線
Fig.7 Discriminant line by Fisher's linear discriminant.

表1 使用パラメータ諸元
Table 1 Parameters of experiment.

LED blinking frequency	500Hz
Capturing frame rate	1000fps
Distance from LED	30m・90m
LED blinking pattern	On/Off・Random
Vehicle speed	30km/h
Time・Weather	Daytime・Sunny
Image resolution	1024×512pixel

が起こってしまう。

以上の理由から直線の決定は一般的な最適決定手法では行うことができない。よって提案捕捉手法を実際に走行状態で撮影された画像に適用することで実験的に捕捉用パラメータを検討する。

6.2 使用データ諸元

実験に使用したデータの諸元を表1に示す。これは30km/hで進行する車両からLEDアレイとの距離90-30m間で撮影したものである。パラメータの検討はこの中の90m地点の部分と30m地点の部分抜き出した画像群に対して行う。これは撮影区間の一番近い部分と一番遠い部分である。距離によるLEDアレイ判別への影響は後述する。送信LEDアレイの個数は単数である。図8に90mからの撮影画像を示す。

図9に30m, 50m, 70m, 90m地点での撮影画像中のLEDアレイを示す。この画像からも分かるように、LEDアレイからの距離が遠くなればなるほど撮影画像上でのLEDアレイのサイズは小さくなる。このため一つ一つのLEDに割り当てられるピクセル数が減少し、LEDアレイ部分はぼやけた画像、すなわち空間方向の高周波成分が失われることになる。このため空間勾配が減衰し、更に空間方向の勾配減衰が時

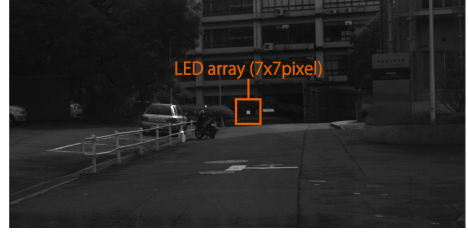


図8 距離90mからの撮影画像
Fig.8 Captured images from distance 90m.

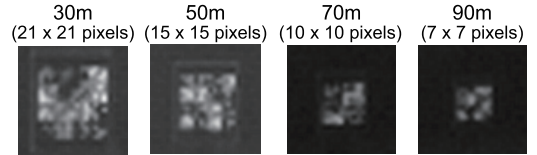


図9 距離ごとの画像上のLEDアレイ
Fig.9 LED Array at each distances.

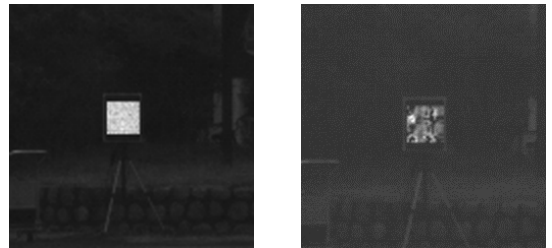


図10 LEDアレイ点灯パターン
Fig.10 Blinking pattern.

間方向にも影響を及ぼし、時間方向の勾配も減衰する。結果としてLEDアレイ部分(散布図の○部分)の分布が散布図の下方向に落ち込みLEDアレイ部分と非LEDアレイ部分の勾配分布が近づき、誤判別が発生しやすくなる。以上から距離が離れるほど、LEDアレイ判別の難易度が上がるといえる。

LEDの点滅パターンはOn/Off(図10(左))とRandom(図10(右))の二種類を用いる。On/Offはパケットのヘッダ部を想定したパターンであり、全てのLEDが同時にONとOFFを繰り返すものである。Randomはパケットのデータ部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]。

パラメータ検討のために時空間勾配平均値を計算した後、各画素ごとに以下のように定義する評価値Sを計算する。

$$S(x, y, n) = \overline{G_t}(x, y, n) - a \times \overline{G_s}(x, y, n) \quad (8)$$

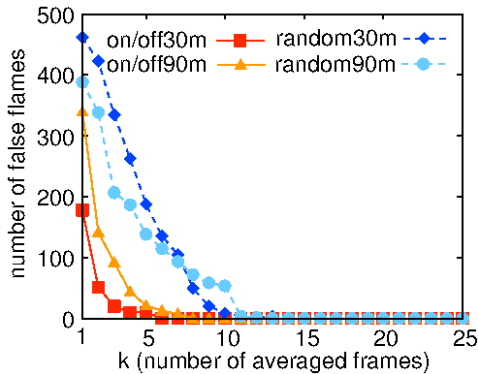


図 11 誤判別発生フレーム数と k の比較
Fig. 11 Number of false frames versus k .

更に切片 b の値は今後以下のように算出する。

$$b = \varphi \times \max\{\overline{G}_t(x, y, n) - a \times \overline{G}_s(x, y, n)\} \quad (9)$$

これは全画素で最大となる評価値 S の φ 倍の値である。このように b を定める理由は二点ある。一点目は観測した散布図の全てにおいて、最大となる評価値 S は LED アレイ部分の画素であった点である。このため、LED アレイ部分の画素が少なくとも 1 ピクセルは確実に LED アレイとして判別される。二点目は散布図ごとに LED アレイ部分の分布が異なるため、 b に固定値を用いることができないという点である。

6.3 平均フレーム数 k の検討

4.2 で示したように、時間・空間方向の勾配を平均することで車両振動の影響及び点灯パターンの偏りの影響を低減させることができる。平均フレーム数を増やすとこの低減の影響が強くなり、LED アレイ部分と非 LED アレイ部分の分布がより収束する。しかしその一方で増やし過ぎた場合平均を取る時間の間に画像上の LED アレイの位置が大きく動いてしまい逆に捕捉精度が低下してしまう上、捕捉にかかる時間も増大してしまう。このため平均フレーム数は捕捉が完全に成功するという条件を満たしつつできる限り少なくすることが望まれる。

平均フレーム数検討は以下のように行う。 a , φ をある値に固定し、平均フレーム数 k を変化させながら各シーケンス 500 フレーム分の画像に判別を行い、誤判別が発生したフレーム数で評価を行う。ここでは $a = 0.7$, $\varphi = 0.7$ という値を用いる。これらの値は本節、6.4, 6.5 で行った検討を繰り返すことのできた値である。

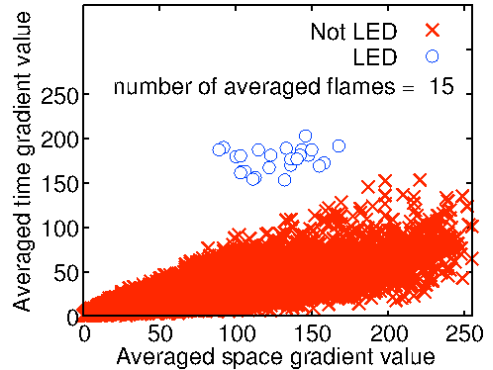


図 12 点灯パターン *Random*, 距離 30m における散布図
Fig. 12 Scatter diagram (Blinking pattern *Random*, distance 90m).

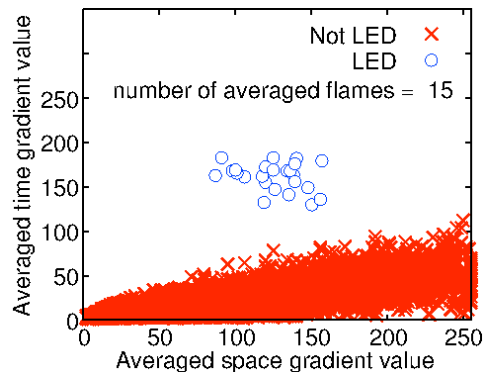


図 13 点灯パターン *Random*, 距離 90m における散布図
Fig. 13 Scatter diagram (Blinking pattern *Random*, distance 90m).

図 11 に結果を示す。ここから分かるように $k \geq 14$ ならば誤判別は発生しないという結果となった。若干の余裕をもたせ本論文では今後 $k = 15$ という値を採用する。

点灯パターンが *Random* の場合、撮影距離が遠い 90m の方が特性が良好な部分が存在する。この理由を以下に説明する。点灯パターン *Random* を撮影したシーケンスでは、20m 地点に水溜まりが存在し、それが太陽光を反射させ、撮影画像中で高い時間・空間勾配を取っていた。このような時間勾配が高い物体が撮影画像中に写っていた場合、非 LED アレイ部分 (×の部分) の分布が上昇し、LED アレイ部分と非 LED アレイ部分の勾配分布が近づく。この様子は図 12, 図 13 に示す点灯パターン *Random*, 平均フレーム数 15 の散布図からも見て取れ、撮影距離 30m の方が 90m のものよりも非 LED アレイ部分の分布が上にあること

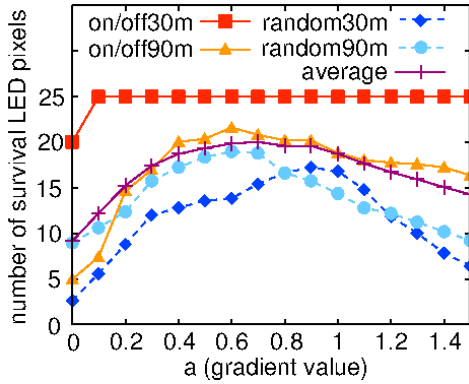


図 14 a と生き残り画素数の比較
Fig. 14 Survival LED pixels versus a.

が分かる。この結果、誤判別が発生しやすくなる。以上から撮影距離が離れるだけでなく、撮影画像中に時間勾配が高い物体が多く写っていた場合も判別の難易度が上がるという性質があるといえる。こういった状況は撮影距離に依存せず発生する。

6.4 直線の傾き a の検討

撮影画像中の LED アレイ部分の 5×5 pixel を抜き出した部分と非 LED アレイ部分について式 (8) で示した評価値 S を算出する。

非 LED アレイ部分の S の最大値より大きい S をもつ LED 部分の画素数 (生き残り画素数) で比較を行う。「生き残り」という言葉は「全ての非 LED アレイ部分を誤判別しない」という条件を課した状況でも判別可能であるという意味合いであり、生き残り画素数は全ての非 LED アレイ部分を誤判別しないという条件を満たした場合の判別可能な LED アレイ部分の画素の最大値を表している。(5.3, 条件 (1)・(2))

平均フレーム数を 15 に固定し a を変化させて生き残り画素数を算出する。各シーケンス事に 10 回分の計算を行い、生き残り画素数の平均値で評価を行う。

結果を図 14 に示す。average は全てのシーケンスの結果を平均したものである。シーケンスごとに最適な a の値に変化が見られるが、average の値から $a = 0.7$ という値を用いるのが適当であると言える。

6.5 G_t 軸切片 b の検討

$a = 0.7$, $k = 15$ とし、式 (9) における φ を変化させて各シーケンス 500 フレーム分の画像に判別を行い、誤判別が発生したフレーム数で φ の評価を行う。

結果を図 15 に示す。 $\varphi \geq 0.7$ ならば全てのシーケンスにおいて誤判別が発生しなくなることが分かる。

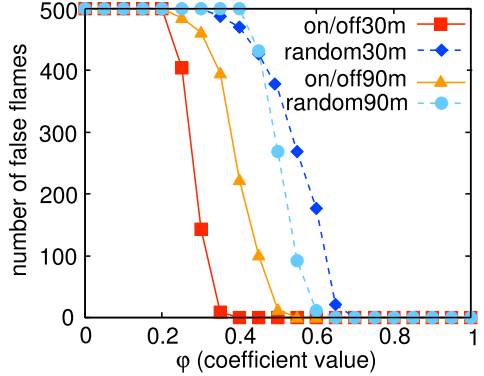


図 15 誤判別発生フレーム数と φ の比較
Fig. 15 Number of false frames versus φ .

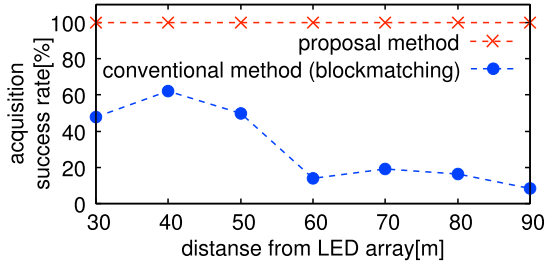


図 16 従来手法との比較結果
Fig. 16 Result of comparing with conventional method.

φ の評価においても点灯パターンが *Random* の場合、撮影距離が遠い 90m の方が特性が良好な部分が存在する。この理由は 6.3 の平均フレーム数検討で記載したものと同様である。

6.6 従来手法との比較評価実験

提案手法と従来手法の捕捉性能比較実験を行う。提案手法のパラメータには先程検討した $a = 0.7$, $k = 15$, $\varphi = 0.7$ という値を用いる。比較対象の従来手法は文献 [7] で示されたブロックマッチングを用いた捕捉手法である。

実験は表 1 に示された諸元で撮影されたデータを、10m ごとに 500 フレームずつ抜き出し、各距離ごとに捕捉手法を適用させることで行われる。性能評価の指標としては捕捉成功率を用いる。これは「見逃し」と「誤判別」が共に起こらなかった場合を捕捉成功とし、500 フレームの内の捕捉成功フレームの割合のことである。

点灯パターンが *on/off* の場合は図で結果を示していないが、従来手法・提案手法共に本実験では全ての距離において捕捉成功率 100% を達成した。

点灯パターンが *Random* の場合の結果を図 16 に示す. 従来手法は捕捉成功率が最大で 62%, 最低で 11% となっている. これはブロックマッチングを用いて LED アレイ部分のずれを計算する際に LED 点灯パターンの変化を車両振動によるずれと混同し, ずれ量の計算に誤りが生じ, 結果的に捕捉精度が低下したためである. 一方提案手法はデータ部を模したランダムな点灯パターンでも本実験では全ての距離において捕捉成功率 100% を達成していることが分かる.

7. む す び

本論文では路車間可視光通信における LED アレイ捕捉のために, 撮影画像中の LED アレイは時間方向と空間方向の勾配値に特徴的な値をもつことを用いた. また, 撮影画像中の LED アレイ部分と非 LED アレイ部分を分けて時空間勾配散布図を描くことにより, LED アレイ捕捉を 2 クラス判別問題とみなし. 散布図中の判別直線よりも上の領域を抽出すれば LED アレイの捕捉が可能となる事を示した. その後判別直線よりも上の領域を LED アレイとする LED アレイ捕捉手法を提案し, 判別直線のパラメータを実験的に検討するとともに, 提案手法はデータ部においても正確な捕捉が達成できることを示した.

今後の展開として車両速度・撮影フレームレート・LED アレイ点灯速度などの実験環境を変化させることで, 十分な捕捉性能を達成するために必要な平均フレーム数及び判別直線のパラメータに影響が及ぶかについて検討を行う予定である.

謝辞 本研究の一部は, JSPS 科研費基盤 (C) (23560449) 及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.

文 献

- [1] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol.50, no.1, pp.100–107, 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 Trans. Ind. Appl.*, vol.37, no.2, pp.534–540, March/April 2001.
- [3] H.-S. Liu and G. Pang, "Positioning beacon system using digital camera and LEDs," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 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," *信学技報*, CS2005-131, March 2006.
- [5] M. Akanegawa, Y. Tanaka, and M. Nakagawa, "Basic study on traffic information system using LED traffic lights," *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, vol.2, no.4, pp.197–203, Dec. 2001.
- [6] M. Wada, T. Yendo, T. Fujii, and M. Tanimoto, "Road-to-vehicle communication using LED traffic light," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2009*, 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ユビキタス可視光通信のための複数情報源認識手法," *信学論 (B)*, vol.J95-B, no.11, pp.1517–1528, Nov. 2012.
- [8] S. Usui, T. Yamazato, S. Arai, T. Yendo, T. Fujii, and H. Okada, "Utilization of spatio-temporal image for LED array acquisition in road to vehicle visible light communication," *ITS WORLD CONGRESS TOKYO 2013*, Oct. 2013.
- [9] C.M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, Springer, 2006.
- [10] Y. Shiraki, T. Nagura, T. Yamazato, S. Arai, T. Yendo, T. Fujii, and 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.
- [11] W.K. Pratt, *Digital image processing*, Wiley-Interscience publication, New York, 1978.
- [12] T. Nagura, T. Yamazato, M. Katayama, T. Yendo, T. Fujii, and 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.

(平成 25 年 10 月 29 日受付, 26 年 2 月 24 日再受付)



白井 俊亮 (学生員)

平 24 名大・工・電子情報工卒. 現在, 同大学院博士課程前期課程在学中. ITS 無線技術, 可視光空間通信の研究に従事. IEEE 学生員.



山里 敬也 (正員:フェロー)

昭 63 信州大・工・電子工卒。平 2 同大大学院修士課程了。平 5 慶大大学院博士課程了。工博。同年名大・工・電子情報・助手。平 10 同大・情報メディア教育センター・助教授。平 19 同大・エコトピア科学研究所・准教授。平 22 同大・教養教育院・教授。現在に至る。平 9 より平 10 まで、ドイツカイザースラウテルン大・客員研究員。平 25 本会フェロー称号受賞。センサネットワーク、可視光通信、ITS、e ラーニングなどの研究に従事。映像情報メディア学会、IEEE 各会員。



圓道 知博 (正員)

平 8 東工大・工・制御工卒。平 10 同大学院博士前期課程了。平 13 同博士後期課程了。博士(工学)。平 10TAO・3D プロジェクト研究員。平 14JST・CREST 研究員。平 16 名大院・工学研究科助手。平 19 同助教。平 23 長岡技科大・電気系・准教授。3次元映像の撮影・表示、可視光通信の研究に従事。平 23 船井情報科学振興財団・船井学術賞受賞。映像情報メディア学会、日本 VR 学会、IEEE 各会員。



岡田 啓 (正員:シニア会員)

平 7 名大・工・電子情報学専攻卒。平 9 同大大学院博士課程前期課程了。平 11 同大大学院博士課程後期課程了。工博。同年日本学術振興会特別研究員。平 12 名大・助手。平 18 新潟大・超越研究機構・助教授。平 21 埼玉大・理工学研究科・准教授。平 23 名大・エコトピア科学研究所・准教授。現在に至る。パケット無線通信、マルチメディアトラヒック、符号分割多元接続方式、マルチホップネットワーク等の研究に従事。IEEE、ACM 各会員。平 8 電気・電子情報学術振興財団・猪瀬学術奨励賞。平 10 本会・学術奨励賞。平 25 本会・通信ソサイエティ ComEX Best Letter Award。



荒井伸太郎 (正員)

平 16 徳島大・工・電気電子卒。平 18 同大大学院修士課程了。平 21 同大学院博士課程了。博士(工学)。同年、愛知工科大・ITS 研究所・研究員。平 23 香川高専・通信ネットワーク工学科・助教。現在に至る。カオスの通信システムへの応用、可視光通信システムの ITS への応用、マシンビジョン技術を用いた ITS に関する研究に従事。平 20 本会学術奨励賞受賞。IEEE 会員。



藤井 俊彰 (正員)

平 2 東大・工・電子卒。平 7 同大大学院博士課程了。同年名古屋大学大学院工学研究科電子情報学専攻助手。平 15 同助教。平 20 東京工業大学大学院理工学研究科集積システム専攻准教授。平 23 名古屋大学大学院工学研究科電子情報学専攻准教授。平 24 同教授。現在に至る。3次元映像通信、3次元映像システム・映像処理、その ITS への応用に関する研究に従事。平 8 年度本会学術奨励賞受賞。博士(工学)。映像情報メディア学会、IEEE 各会員。



高橋 桂太 (正員)

平 13 東大・工・電子情報卒。平 18 同大大学院情報理工学系研究科博士課程了。博士(情報理工学)。日本学術振興会特別研究員、東京大学 IRT 研究機構特任助教、電気通信大学大学院情報理工学研究科助教などを経て、現在、名古屋大学大学院工学研究科准教授。3次元映像処理、画像認識などの研究に従事。