

高度道路交通システムのための可視光通信における 非情報源の誤認識率改善

白木 康建[†] 山里 敬也[†] 荒井伸太郎^{††} 圓道 知博^{†††} 岡田 啓[†]
藤井 俊彰[†]

[†] 名古屋大学 〒464-8603 名古屋市千種区不老町
^{††} 香川高等専門学校 〒769-1192 三豊市詫間町香田 551
^{†††} 長岡技術科学大学 〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1
E-mail: †shiraki@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp

あらまし LED を高速点滅させることで情報伝送を行う可視光通信において、LED 信号機や LED テールランプから車両へ情報伝送を行う高度道路交通システム (ITS) のための路車間可視光通信が注目されている。本研究では、ITS のための可視光通信において、自車に搭載された高速度カメラで複数情報源を同時に認識する状況を想定する。情報源でないものを情報源だと誤認識する確率を低減する手法を提案し、走行実験により提案手法の性能を評価する。

キーワード LED, 可視光通信, ITS, 複数認識, ブロックマッチング

Decline in Probability of False Recognition of Non-Information Sources in Visible Light Communication for Intelligent Transport System

Yasutake SHIRAKI[†], Takaya YAMAZATO[†], Shintaro ARAI^{††}, Tomohiro YENDO^{†††}, Hiraku OKADA[†], and Toshiaki FUJII[†]

[†] Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603, JAPAN
^{††} Kagawa National College of Technology, 551 Kouda, Takuma-cho, Mitoyo, 769-1192, Japan
^{†††} Nagaoka University of Technology, 1603-1 Kamitomioka-machi, Nagaoka, 940-2188, Japan
E-mail: †shiraki@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp

Abstract Visible light communication systems which enable data transmission by blinking LEDs at fast rate attract attention for their applications to Intelligent Transport Systems (ITS). In this paper, we assume that there are multiple information sources and we recognize them with on-vehicle high-speed camera in such systems. To lower probability of false recognition which represents how often non-information sources are recognized as information sources, we propose an improved multiple sources recognition method. We evaluate the proposed method by performing experiments.

Key words LED, Visible Light Communication, ITS, Multiple LED Arrays Recognition, Block Matching

1. まえがき

LED は白熱灯に比べ長寿命で消費電力が低く、視認性に優れ発熱が少ないなどの利点を持つため、信号機や照明などに LED が用いられるようになった。LED 照明は急速に普及が進んでおり、今後あらゆる所で用いられる可能性が高い。LED は高速点滅が可能な半導体であるため、人間の目に絶えず光って見える程の速さで点滅させる事で照明や表示として使うと同時に音声情報やデジタル情報を送信する通信機器として使うこと

も可能である [1]。可視光を高速に変調させて行う無線通信を可視光通信と呼ぶ。LED を単なる照明として用いるだけでなく情報伝送デバイスとしても用いることができればユビキタス通信の実現につながるかと期待されている [2]。

可視光通信の応用として、高度道路交通システム (ITS) に適用することが考えられている。ITS とは、情報通信技術を用いて道路交通における問題を解決し、交通の快適性の向上を目的とする交通システムである。システムの例として、ドライバーに対する交通情報や運転支援情報の提供を目的とした車両同

士の通信(車々間通信)や道路インフラと車両との通信(路車間通信)などがある。ITSのための可視光通信として、送信機にLED信号機、受信機に車載高速度カメラを用いた路車間可視光通信システムについて研究が行われている[3]。LED信号機に通信機能を付加することにより、信号機を設置している付近の道路状況等をドライバーにリアルタイムに提供することが実現可能であると考えられる[4]。従来研究では実際に走行実験も行われ、路車間可視光通信システムの有効性が示されている。

従来では通信対象は1機のLED信号機だけであると想定して研究し、通信実験が行われてきた。しかし、LEDテールランプを利用して可視光通信を車々間通信へ応用すること等も考慮に入ると、通信対象が複数存在する場合を考慮する必要がある。具体的には、通信対象とそうでないものを区別するだけでなく、通信対象同士を区別して通信するということが課題となる。そこで本研究ではLED信号機やLEDテールランプ等の複数のLED光源が同時に通信対象となり、通信するという状況を考える。通信対象が複数存在する場合に考えられる問題としては、受信機側では通信対象の数や形状、大きさについての情報を持っていないことや、撮影画像上で複数の通信対象を統合して認識するということが考えられる。本稿ではブロックマッチング[5]を利用することにより、複数の通信対象を認識する[6]。

本稿は以下のように構成されている。第2章で本研究で想定する可視光通信のシステムモデルについて説明し、第3章ではブロックマッチングを用いた複数情報源の認識手法を説明し、第4章で非情報源の誤認識率を改善するための手法を説明する。第5章で実験により誤認識率の改善手法を評価し、最後に第6章でまとめる。

2. システムモデル

図1にシステムモデルを示す。送信側では、LED信号機などの、大きさや形状の異なる送信機が複数存在すると想定する。図2はパケットフォーマットである。ヘッダ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特定の系列であり、情報源のLEDの全点灯・全消灯のパターンを組み合わせることで、時間方向でon/offの系列を構成する。データ部については、各送信機はそれぞれ独立に入力データから情報源を持つ個々の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ことでデータを送信する。受信側では高速度カメラにより送信機を撮影する。撮影画像には複数の送信機が同時に写る場合を考えているため、図3に示す画像処理により各送信機を認識・区別した後、個別に受信データを復号する。

画像処理は複数情報源認識、情報源検出、情報源追跡、LED位置推定、輝度値抽出の処理に分かれている。撮影画像内に通信対象が1つだけしか存在しないのであれば従来の方法で情報源を検出・追跡することにより通信が可能である[7]。そこで、複数情報源認識において撮影画像内に写っている複数の通信対象を図4のように空間的に分離することを考える。撮影画像から各通信対象を1つずつ含む小さな領域(図中の枠で囲まれた領域)を切り出し、各領域で独立に追跡・復号を行うことで、通

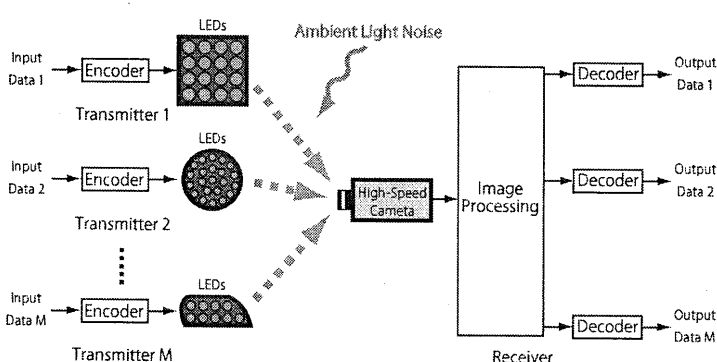


図1 システムモデル

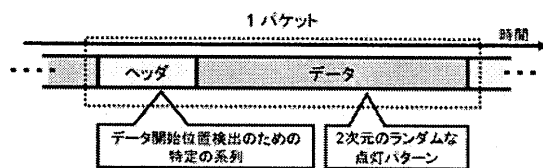


図2 パケットフォーマット

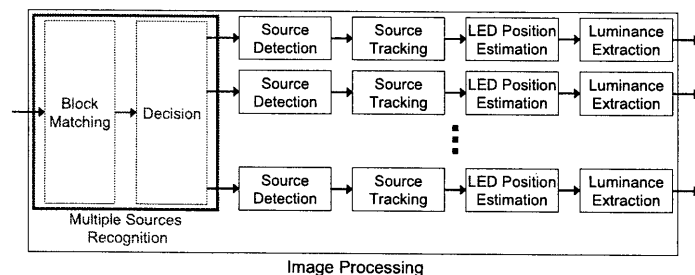


図3 画像処理

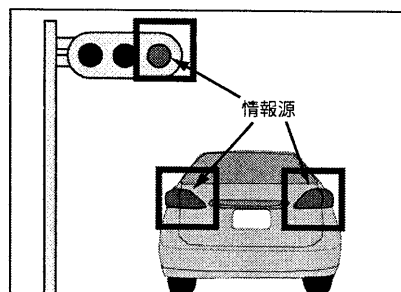


図4 情報源の空間分離

信対象が複数の場合でも、通信対象が1つだけの場合と同じようにデータを復号できると考えられる。複数情報源認識により個々の情報源が区別された後、情報源検出では個々の情報源の領域内から送信データのヘッダ部を検出することにより、情報源でないものを完全に除外しデータの開始位置を見つける。次の情報源追跡では、走行環境で撮影画像上での位置が変化する情報源を追跡する。撮影画像からデータを取り出すためには情報源の個々のLEDの輝度値を得る必要であるため、LED位置推定で個々のLEDの位置を決定する。輝度値抽出で、推定した個々のLEDの位置に対応するピクセルから輝度値を得る。

この方法で独立に情報を取得する場合に重要となるのは、各通信対象を正確に空間的に分離することである。ここでは、空間的分離を行う複数情報源認識の方法としてブロックマッチング

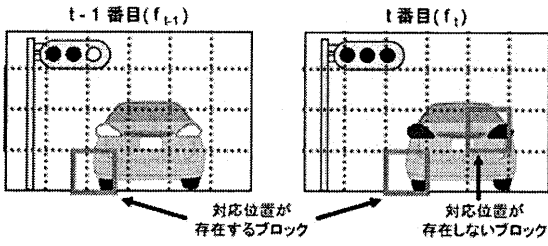


図 5 ブロック単位での対応位置探索

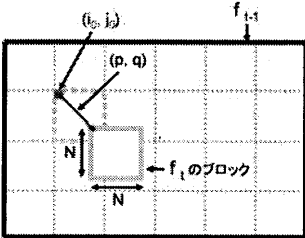


図 6 ブロックマッチング

を用いる。

3. 複数情報源の認識手法

本章では図 3 の画像処理の最初の処理にあたる、提案する複数認識手法についてブロックマッチングと情報源判定の 2 つに分けて説明する。

3.1 ブロックマッチング

ブロックマッチングとは、画像間の対応位置を求めるための手法であり、動画像符号化やパターン認識などの分野で応用されている。複数情報源の認識にブロックマッチングを適用する方法を以下で説明する。

ここでは図 5 に示すような 2 連続画像 f_{t-1} , f_t 間についての処理を考え、まず情報源が画像内に含まれない場合を考える。高速度カメラで撮影していることから、画像内に写っているものは f_{t-1} , f_t 間ではほとんど変化がないといえる。さらに、 f_t 上の小さな領域(ブロック)に注目した場合、ブロック内に写っているもの全ての f_{t-1} , f_t 間での移動量は同じだとみなせる。そこで、 f_t を複数のブロックに分割してブロック単位で f_{t-1} と比較した場合、ブロック毎に f_{t-1} 上に極めて類似した場所が存在することになる。

次に、情報源(LED)が画像内に存在する場合について考える。情報源以外の背景に関しては前述の理由により f_{t-1} , f_t 間で対応する位置が存在するが、情報源については高速に点滅しているため、 f_{t-1} , f_t 間でも画像上での点滅パターンが異なる。そのため f_t をブロック単位で f_{t-1} で比較した場合、情報源を含むブロックは f_{t-1} 上に類似した場所が存在しなくなる。

以上のことから、 f_{t-1} , f_t 間でブロック単位で類似する点が見つかるかどうかでブロック毎に情報源が存在するかどうかを判定できると考えられる。 f_{t-1} , f_t 間のブロック単位での対応点を探索する方法としてブロックマッチングを用いる。

ブロックマッチングでは、まず f_t を小さなブロックに分割する。次に各ブロック毎に、 f_{t-1} 上のどこに対応するのかわを示す

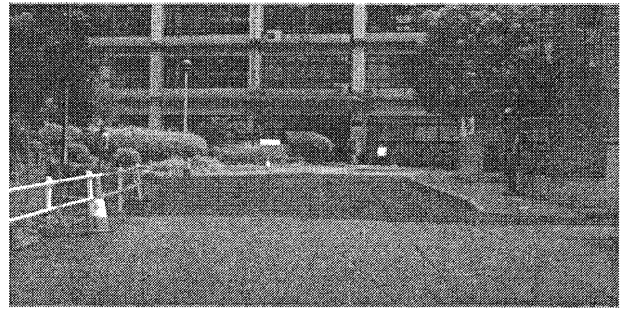


図 7 ある時刻での撮影画像

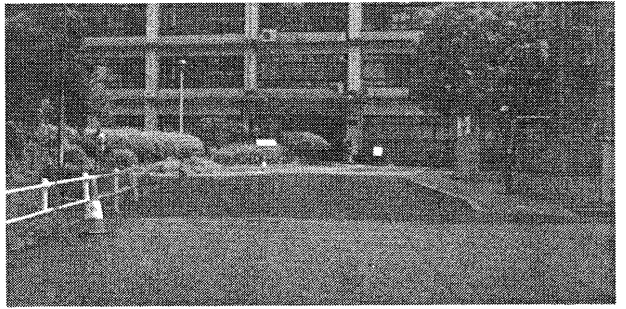


図 8 図 7 から 2ms 後の撮影画像

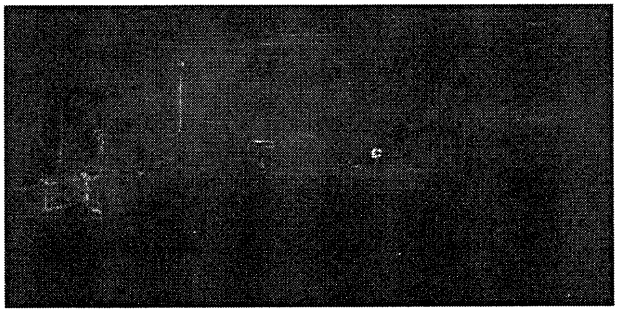


図 9 2 連続画像(図 7, 8)間の差分画像

位置(動きベクトル)を計算する。動きベクトルを求めるにあたり f_{t-1} のブロックと f_t 間の類似度(相違度)を求めるための評価指標が必要となる。ここではその評価指標として下式で表現される絶対差の総和(SAD:Sum of the Absolute Differences)を用いる。

$$SAD(p, q) = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} |f_{t-1}(i_0 + i, j_0 + j - q) - f_t(i_0 + i, j_0 + j)| \quad (1)$$

ここで、 (p, q) は対応位置候補の動きベクトル、 N はブロックサイズ(ブロックの 1 辺のピクセル数)、 (i_0, j_0) はブロックの左上のピクセルの座標、 t はフレーム番号であり、 f は画像上の対応するピクセルの輝度値を表す関数となる(図 6)。動きベクトル探索範囲 R 内において $SAD(p, q)$ が最小となる (p_{min}, q_{min}) をそのブロックの位置ベクトルとする。これを式で表すと以下となる。

$$(p_{min}, q_{min}) = \underset{(p, q) \in R}{\operatorname{argmin}} SAD(p, q) \quad (2)$$

ブロックマッチングを情報源認識に適用する場合には動きベク

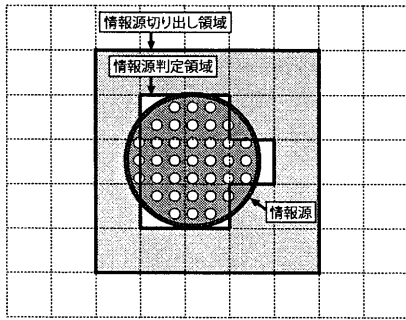


図 10 情報源判定領域と情報源切り出し領域 (破線の格子がブロック)

トルではなく f_{t-1} のブロックと f_t 間の相違度を求めるための評価指標が重要となる。この位置ベクトルを決定するための式 (2) 内の値 $\min_{(p,q) \in R} SAD(p,q)$ を情報源判定に用いる。

3.2 情報源判定

情報源を含まない背景のみのブロックに注目した場合には、 f_{t-1} , f_t 間でほとんど変化がないため式 (2) においてブロック毎での評価指標の最小値である $\min_{(p,q) \in R} SAD(p,q)$ は小さな値をとる。しかし、情報源が含まれるブロックに注目した場合には f_{t-1} , f_t 間で情報源の点滅パターンの差があるため $\min_{(p,q) \in R} SAD(p,q)$ の値は大きくなる。情報源判定の評価指標を $\frac{\min_{(p,q) \in R} SAD(p,q)}{N^2}$ 、情報源が含まれるブロックかどうかを判定する閾値を T をとすると、 $T > \frac{\min_{(p,q) \in R} SAD(p,q)}{N^2}$ のときブロック内に情報源が含まれないと判定し、 $T \leq \frac{\min_{(p,q) \in R} SAD(p,q)}{N^2}$ のときブロック内に情報源が含まれていると判定する。このとき、判定閾値 T はブロック内におけるピクセル当たりの 2 連続画像間での輝度値差分を見る閾値を意味する。高速度カメラで取得できる最大輝度値は 255 であるため判定閾値 T の範囲は $0 \leq T \leq 255$ である。この判定閾値 T をどのように設定するかにより情報源の見逃し率と非情報源の誤認識率が変化するため、この判定閾値 T の変化に対する見逃し率と誤認識率の関係を評価する必要がある。

情報源からデータを受信することを考慮すると、ブロック毎に情報源判定を行った後に、情報源領域を情報源が欠けることなく切り出さなくてはならない。

ブロックサイズよりも画像上での情報源の大きさが大きい場合などでは、図 10 のように情報源が複数のブロックにわたる。そのため、情報源を含むと認識されたブロックの中で隣接するブロック同士は結合し、大きな 1 つの情報源判定領域として扱う。また、情報源の端を含むブロックは情報源の中央部に対応するブロックよりも情報源を見逃しやすいため、情報源判定領域は実際の情報源よりも小さい場合がある。そこで、情報源を切り出す際には図 10 のように判定領域に外接する矩形よりも一回り大きな情報源切り出し領域を選択する。

4. 非情報源の誤認識率の改善

上記の手法は、2 連続画像間でブロック単位で対応位置を見つけ出して差分処理を行い、差分画像内に現れる差分輝度の大きさを見て情報源判定を行っていることと同等である。しかし、ブロックマッチングの際に 2 連続画像間の対応位置を探す指標

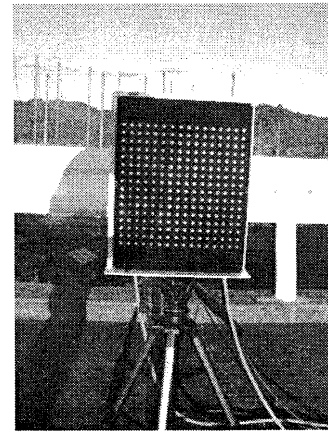


図 11 LED アレイ

として用いた SAD が 1 ピクセルより小さい移動量に対応できないため誤認識が発生する。図 7-9 のように、ブロックマッチングを行った後の差分処理では、対応しきれない画像間のずれにより背景に存在する物体の輪郭状に残った差分が残り、情報源と誤認識される。

以下では誤認識率を低減する方法を 2 種類述べる。

4.1 ヘッダを用いた情報源の認識

送信機は個々の LED の点滅を個別に制御してデータを送信するため、生成される 2 次元パターンは送信データによりランダムに変化する。このため、2 連続画像間であまり差がないような点灯パターンの組み合わせになることがあり、結果として情報源が存在するブロックにおいてもブロックマッチングでの評価指標の値が大きくなる場合がある。見逃し率を抑えるためには判定閾値を下げなければならないが、これは誤認識率を増加させることにつながってしまう。

そこで、情報源の検出精度を上げるために、差分画像で最も差分が大きくなる全消灯と前点灯のパターンの組み合わせが用いられているヘッダを利用する。ヘッダを検出できれば、後のデータ部はランダムな点灯パターンであっても情報源の追跡が可能である [7]。

4.2 空間フィルタの適用

差分画像内に現れる雑音は図 9 のように物体の輪郭状に現れやすいため、空間周波数の高周波成分を多く含んでいる。そこで、差分画像に対し 2 次元の平滑化フィルタを適用することで差分による雑音を除去できると考えられる。

一般的に画像処理で用いられる平滑化フィルタとしては、移動平均フィルタやメディアンフィルタなどがある。

5. 実験

提案手法の性能を評価するために、図 11 に示すような LED アレイを用いて走行実験を行った。実験に用いた高速度カメラの仕様を表 1 に示す。

図 12 に撮影画像の例を示す。中心の丸い白枠に囲まれたところに設置されている機器が図 11 の LED アレイである。ブロックサイズ N 、判定閾値 T について図 12 の LED アレイとそれ以外の背景 (非情報源) について見逃し率と誤認識率を実

表1 高速度カメラの仕様

カメラ型名	フォトン社製 FASTCAM-1024PCI 100K
撮像素子	CMOS イメージセンサ
レンズ型名	ニコン社製 NIKKOR 35mm f/1.4
焦点距離	35mm

表2 実験諸元

LED 点滅速度	4kHz
撮影速度	1000fps
解像度	1024 × 512 pixels
レンズの焦点距離	35mm
レンズのピント	無限遠
レンズの絞り	32
通信距離	20-80m
車両速度	30km/h
撮影フレーム数 F_{all}	525 枚
ブロックサイズ N	4, 8, 16

験から求めた。見逃し率 P_m と誤認識率 P_f をそれぞれ以下のように定義する。

$$P_m = 1 - \frac{F_{source}}{F_{all}} \quad (3)$$

$$P_f = \frac{F_{noise}}{F_{all}} \quad (4)$$

ここで、 F_{source} は LED アレイを情報源と認識したブロックが 1 つでも存在するフレーム数、 F_{noise} は非情報源を誤って認識したブロックが 1 つでも存在するフレーム数、 F_{all} は全撮影フレーム数である。

LED アレイが認識できたかどうかの判定は、図 13 のように LED アレイ領域全体を含むように提案手法が LED アレイを切り出せたかどうかで行う。図 13 の内側の白枠が LED アレイ領域であり、外側の白枠が提案手法による LED アレイの切り出し領域である。

図 14 にデータ部での見逃し率 P_m と誤認識率 P_f の関係を、図 15 に全消灯と全点灯のパターンを組み合わせた場合での見逃し率 P_m と誤認識率 P_f の関係を示す。図中の線は、ブロックサイズ N 毎に判定閾値を変化させることで描かれている。図 14 のデータ部の場合では、見逃さずに認識できている場合もあるが、図 15 の全消灯と全点灯を用いた場合と比べると特性が悪い。また、図 15 の全消灯と全点灯を用いた場合において、 $N = 4, 8$ の場合では、見逃し率 P_m が 0 のときに誤認識率 P_f も 0 を達成している。この結果から、データ部での見逃し率・誤認識率の特性は、ヘッダ部を用いれば問題にならないといえる。

次に図 16 に全消灯と全点灯のパターンを組み合わせた場合での見逃し率 P_m と 1 フレーム当たりの最大誤認識数の関係を示す。図中の線は図 15 と同様に、ブロックサイズ N 毎に判定閾値を変化させることで描かれる。 $N = 4, 8$ の場合では誤認識率 P_f の結果からも分かる通り、見逃し率 P_m が 0 のときにフレーム当たり最大誤認識数も 0 を達成している。 $N = 16$ の場合でも見逃し率 P_f が 0 のときではフレーム当たり最大誤認識

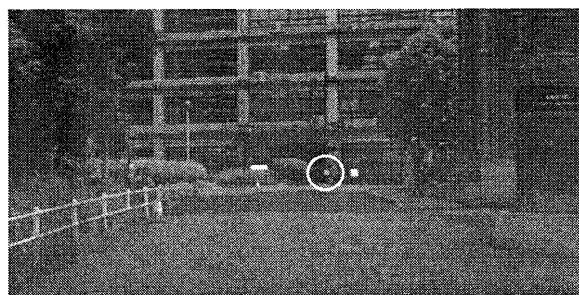


図 12 撮影画像

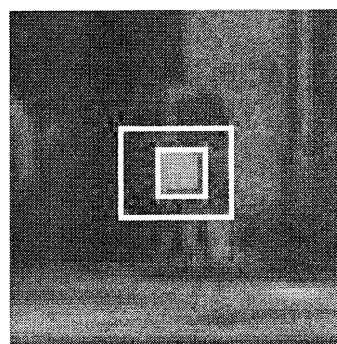


図 13 LED アレイ領域と LED アレイの切り出し領域

数を 1 まで抑えることができています。

ブロックサイズ N が情報源よりも小さく、情報源で占められているブロックが少なくとも 1 つ存在する場合には、誤認識が起こらないくらい判定閾値を高く設定してもそのブロックについては情報源を見逃しにくい。実験環境では撮影距離は最も離れている地点で 80m であり、そのときであっても画像上での LED アレイの大きさは 8 ピクセル程度あるため、 $n = 4, 8$ では見逃し率・誤認識率共に 0 を達成できたと考えられる。

全消灯と全点灯のパターンを組み合わせる方法により、非情報源の誤認識率・見逃し率共に 0 にすることができ、十分に改善できているため、差分画像処理後に平滑化フィルタを導入する必要はないといえる。

6. まとめ

本稿では、複数情報源が存在する場合での可視光通信について、撮影画像からブロック単位で複数情報源を認識する手法の誤認識率を改善する方法を述べた。

送信パターンの中でもデータ部で複数認識処理を行った場合、情報源でないものまで情報源であると誤認識してしまい、低い見逃し率を達成するためには高い誤認識率が課題となっていた。

点灯パターンに全消灯と全点灯を組み合わせることで、見逃し率が 0 となる閾値でも誤認識率を 0 にすることができた。

今後の課題は、文献 [7] で提案されている情報源追跡手法で情報源毎に追跡できることを示すことである。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、適切なアドバイスと有意義な議論を頂いた名古屋大学エコトピア科学研究所片山正昭教授及び小林健太郎助教に感謝する。本稿の一部は科学技術振興機構の

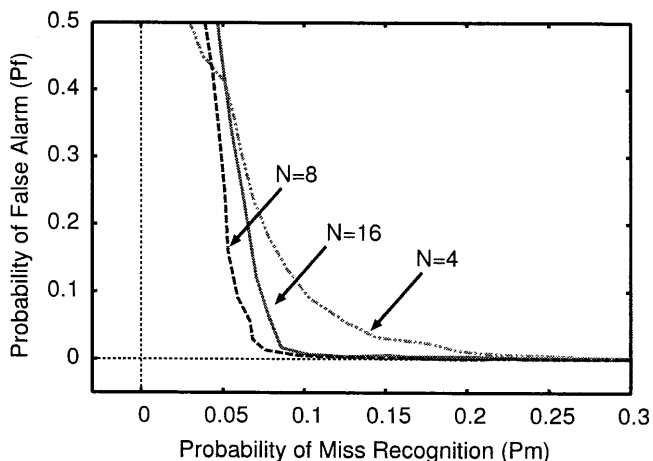


図 14 点灯パターンが全消灯・全点灯の組み合わせの場合での見逃し率 P_m と誤認識率 P_f

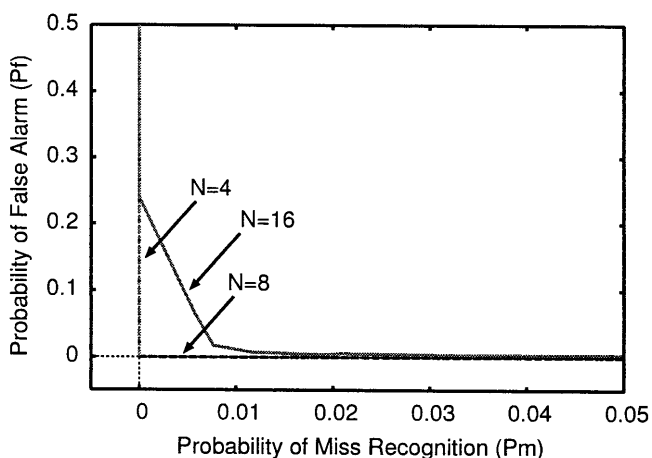


図 15 データ部での見逃し率 P_m と誤認識率 P_f

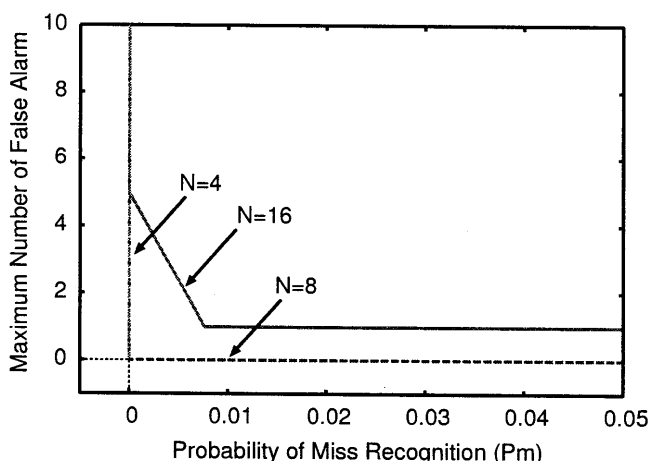


図 16 点灯パターンが全消灯・全点灯の組み合わせの場合での見逃し率 P_m とフレーム当たり最大誤認識数

A-STEP 及び科研基盤 (c) の助成を受けて行われたものである。記して謝意を表する。

文 献

[1] G. Pang, T. Kwan, H.Liu, Chi-Ho Chan, "LED wireless," IEEE Industry Applications Magazine, vol. 8, no. 1, pp. 21-28, Jan./Feb. 2002.

[2] 中川正雄, "ユビキタス可視光通信," 電子情報通信学会 B, 通信, Vol.J88-B, No.2, pp.351-359, 2005 年 5 月.

[3] S. Arai, S. Mase, T. Yamazato, T. Endo, T. Fujii, M. Tanimoto, K. Kidono, Y. Kimura, and Y. Ninomiya, "Experiment on hierarchical transmission scheme for visible light communication using LED traffic light and high-speed camera," Proc. of 1st IEEE International Symposium on Wireless Vehicular Communications, Sep. 2007.

[4] 山里敬也, "LED アレイと高速度カメラを用いた可視光通信への応用," 電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ誌, Vol.3, No.2, pp.45-53, 2009 年 10 月.

[5] 古閑敏夫, 平野昭, 大木淳一, 飯沼一元, "会議テレビ信号の動き補償フレーム間符号化," テレビジョン学会技術報告, Vol.5, No.9, pp.85-90, 1981 年 7 月.

[6] 白木康建, 山里敬也, 荒井伸太郎, 圓道知博, 岡田啓, 藤井俊彰, "高度道路交通システムのための可視光通信におけるブロックマッチングを用いた複数情報源の認識手法," 電子情報通信学会技術研究報告, USN2011-18, pp. 73-78.

[7] 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, Sep. 2010.