

走行車両が高速度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

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

Multiple Information Sources Recognition Method for Ubiquitous Visible Light
Communication Using on-Vehicle High-Speed Camera

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

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は、あらゆる照明・表示機器に通信機能を付加できるためユビキタス通信技術として注目されている。中でも本論文では、LED 信号機や LED テールランプから車両へ情報伝送を行う可視光通信に着目し、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。従来研究では情報源の一つと想定していたため、新たに複数情報源を認識する処理が必要となる。本論文ではブロックマッチングに基づく複数情報源認識手法を提案する。走行実験により情報源が複数存在する場合でも同時に認識でき、更に情報源でないものを誤認識する確率が改善することを確認した。

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

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もつため、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、今後あらゆるところ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ことで、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。可視光を発する部品をもつ製品は

多岐にわたり、照明をはじめ、信号機やテールランプ、電光掲示板、携帯電話など無数に存在する。LED の普及に伴い、これらのあらゆる機器を可視光通信を行う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と期待されている [2]。

可視光源の遍在性のため、あらゆる場面において可視光通信の適用を考えることができるが、本論文では走行車両が情報を受信する状況での可視光通信に着目する。図 1 は実際に走行時に車両内から撮影された画像である。この画像を見ても分かるように、走行時の車両からは数多くの信号機やテールランプ、外灯、表示などの光源を同時に確認することができる。例えば、LED 信号機や LED テールランプなどに可視光通信機能を付加すれば、信号機を設置している付近の道路状況や前方車両からの情報をドライバーにリアルタイムに提供するといった、高度道路交通システム (ITS) のためのユビキタス可視光通信が実現可能であると考えられる [3]。

可視光通信の受信機としてフォトダイオード (PD) を用いるものと、高速度カメラを用いるものが考えられる。PD の場合は外乱光の影響が大きいため混信や

[†] 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, 1603-1, Kamitomioka, Nagaoka-shi, 940-2188 Japan

^{†††} 香川高等専門学校, 三豊市

Kagawa National College of Technology, 551 Kohda, Takuma-cho, Mitoyo-shi, 769-1192 Japan

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

干渉が問題となるが、高速度カメラであれば他の光源があったとしても、ピクセル単位で分離できれば混信や干渉は起こらない。様々な可視光源との通信を想定すると、複数の情報源から同時に情報を受信する場面が考えられる。特に車両走行時では、次から次に現れて通り過ぎていく無数の情報源と通信を行うことになる。この点において、LED 信号機や LED テールランプなど複数の LED 光源との可視光通信を想定する場合は、並列に受信することが可能な高速度カメラの方が有利である。

走行中に同時に複数の情報源が高速度カメラで撮影されるような状況では、情報源とそうでないものを区別するだけでなく、複数の情報源同士を区別してそれぞれと通信するということが課題となる。車両走行時には時間とともに情報源の位置も変化していくため、逃さないように追跡していく必要がある。

従来研究では、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の研究が行われている [3]~[7]。文献 [4], [6] では実際に走行実験も行われ、その有効性が示されているが、送信機 (情報源) は 1 機の LED 信号機だけであると想定しており、複数情報源の存在は考えられていない。また、LED 信号機を認識できずに見逃す確率と、誤って LED 信号機でないものを情報源と認識する確率についての評価も十分ではなかった。

本論文では走行中に複数の情報源が同時に通信対象となるという状況を考える。複数情報源を認識する手法として撮影画像を小さな領域 (ブロック) に分割し、ブロック単位で情報源の有無を判定する手法を提案する。更に、ブロックごとでの認識処理にブロックマッチング [8] を導入することにより、車両走行時の環境において情報源以外のものを誤って情報源として認識する確率を低減する手法を提案し、従来のフレーム間

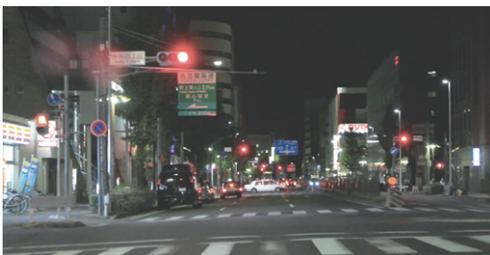


図 1 車両走行時に車内から撮影された画像

Fig. 1 Captured image from vehicle while driving.

差分法と比較して改善することを示す。

本論文は以下のように構成されている。2. では、本研究の想定するシナリオ及び関連研究について述べる。3. で本論文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、4. では提案する複数情報源の認識手法を説明する。5. で実験により提案手法を評価し、最後に 6. でまとめる。

2. 想定するシナリオと関連研究

2.1 本研究の想定するシナリオ

本研究では、図 2 に示すように、路車間可視光通信による交差点支援システムを想定し、道路に設置された LED サイネージ、LED 信号機から車両に向かってデータ伝送を行う。

例えば、交差点の中央で右折待ちをしている車両へ LED 信号機から運転支援情報を伝送することを考える。交差点の中央から LED 信号機までの距離を 9.5m、信号機の高さを 5m、カメラの高さを 0.5m とすると、垂直方向の画角は $\phi_{max} = \arctan \frac{5.0-0.5}{9.5} = 25.34^\circ$ となる。同様に LED 信号機が道路の端から 1m 離れて設置され、車両の右端が道路の中央に接し、車両の中央にカメラを設置したとすると、水平方向の画角は $\theta_{max} = \arctan \frac{7.0-1.0-0.75}{9.5} = 28.92^\circ$ となる。これより、カメラの解像度が 1024 × 1024 ピクセル、レンズの焦点距離が 35 mm のとき、前方上方にある LED 信号機は問題なく撮影できる [9]。ここで、運転支援情報

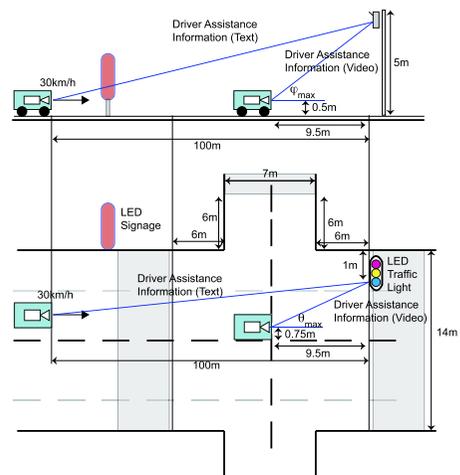


図 2 路車間可視光通信による交差点支援システム

Fig. 2 Driver assistant system by road-to-vehicle visible light communication.

として、LED 信号機の上部に設置したインフラカメラの映像をドライバーに伝送することを考えると、データ伝送速度としては 64 kbit/s 以上は必要になる。音声情報であれば 32 kbit/s もあればよい [6], [10].

続いて、交差点を通過する場合を考える。文献 [11] によると、車両が安全に交差点を通過し得るために LED 信号機を視認できるための距離は、時速 30 km/h では 100 m 以上である。この場合、ドライバー支援情報として画像は適切ではなく、テキスト情報が十分である。したがって、100 m 先から数 kbit/s のテキスト情報が伝送できればよい [6], [10].

以上を踏まえ、高速カメラを用いた可視光通信における、複数情報源の認識のための画像処理の条件について述べる。当然のことながら、複数情報源の認識処理においては、情報源の見逃し率及び誤認識率が低いことが望ましい。また、走行時の車両の振動等によって伴う情報源のぶれも考慮する必要がある。文献 [12] によると交通監視、マシビジョン、自動車衝突実験で必要とされるフレームレートは 100~1000 fps とある。詳細は、4.2.2 で述べるが、時速 30 km/h で走行する車両では、1000 fps で撮影された画像であっても、2 ピクセル程度のぶれが生じている。これより、フレームレートとしては少なくとも 1000 fps は必要になる。

更に、本研究では、送信機がもつ個々の LED から独立した別々の情報を伝送する並列光通信を行うことを想定している [3]~[7]. そのため、個々の LED の位置を高精度に推定する必要がある、その前処理にあたる情報源認識手法との親和性が高いことが望ましい。以上をまとめると、本研究で想定する複数情報源認識処理の要求条件は、

- 車両振動に伴う取得画像のぶれがあったとしても、見逃し率及び誤認識率が低い
 - 処理が高速である
 - 後段の処理となる各 LED の位置を推定するアルゴリズムとの親和性がよい
- となる。

2.2 関連研究

高速なイメージセンサを用い、複数情報源の認識を行っている研究としては、文献 [13]~[15] がある。これらは、高速に点滅するパターンを時間相関をとることで情報源の検出を行っている。このため、撮像形の限界に検出性能が依存せず、ロバストな検出が可能である。しかし、本論文で想定しているような車両への伝送を目的としておらず、よって、そのまま適用でき

るかどうか不明である。また、検出性能として重要な指標である見逃し率、誤認識率の評価もない。

車車間通信向けの高速イメージセンサには、文献 [16] がある。走行時でも、10 Mbit/s の伝送を実現しており、種々の車両情報や動画 (QVGA, カラー, 7.8 fps) が伝送できることを報告している。この文献では LED のもつ「輝度が鋭く高い」特徴を利用し、コンパレータのスレッシュホールドを高く設定することで、背景から対象とする LED のみを分離することで高速検出を実現している。しかし、この高速検出機能はデバイスに組み込まれたものであり、そのまま適用するのは困難である。また、見逃し率、誤認識率の評価もない。

3. システムモデル

図 3 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 (情報源) が複数存在すると想定する。図 4 はパケットフォーマットである。

本研究のヘッダ部には、まず、受信機側で時間同期をとるための、全点灯と全消灯が繰り返される点滅パターンを挿入し、その後、他光源と区別するための識別に用いる on/off の Barker 系列を挿入する。本研究では、文献 [7] で述べられた、13 bit の系列 (1111100110101) の Barker 系列を用いる。データ部については、各情報源はそれぞれ独立に入力データから情報源がもつ個々の LED の点滅パターンを個別に決定し、二次元

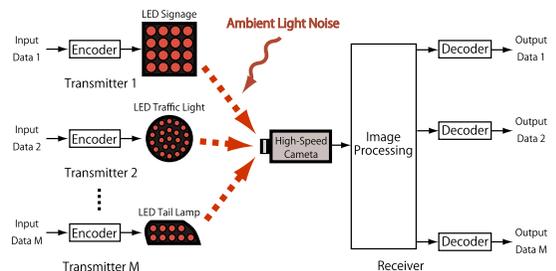


図 3 システムモデル
Fig. 3 System model.

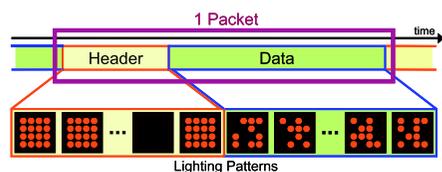


図 4 パケットフォーマット
Fig. 4 Packet format.

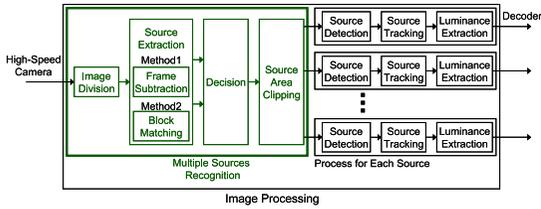


図 5 画像処理

Fig. 5 Image processing unit.

の点滅パターンを生成することでデータを送信する。例えば、文献 [3], [4], [6], [10] で検討されている階層的符号化により各々の LED の点滅パターンが決定される。更に、送信情報から生成した各二次元点滅パターンに対して LED の点き方が反転した反転パターンを生成して、元の点滅パターンと交互に現れるように挿入する [5], [7]。

受信側では受信機として高速度カメラを用いる。撮影画像には複数の情報源が同時に写る場合を考えている。図 5 に示す画像処理により各情報源を認識・区別した後、個別に受信データを復号する。

ここで、送受信機間の同期について述べる。本研究では、受信機に高速度カメラを用いているため、送信機での LED の点滅との同期（時間方向の同期）、及び、送信機（情報源）の認識・追跡のための同期（空間方向の同期）の 2 種類の同期が存在する。そこで、時間方向と空間方向、それぞれ分けて同期について説明する。

まず、時間方向の同期について述べる。LED の点滅とカメラの撮影のタイミングを全く同じにさせることは、車両が走行している環境では物理的に困難である。そこで、LED の点滅速度に対し、カメラの撮影速度を少なくとも LED 点滅周波数の 2 倍以上と設定することで、LED とカメラ間の同期がとれていない場合に対応する。本研究では、先に述べたとおり、カメラの撮影速度を 1000 fps としているため、LED の実効の点滅速度を 500 Hz と設定する。時間同期は、ヘッダ部で確立し、それ以降のデータ部については、ヘッダ部で確立した同期タイミングで動作させる。具体的には、上述した全点灯と全消灯が繰り返される点滅パターンを用いて時間同期の確立を行っている。更に、ヘッダ部の Barker 系列を検知することで、情報源の光源かどうかの識別を行うことができる。

次に、空間方向の同期について述べる。空間方向では、情報伝送時においても、移動体と光源間の位置間

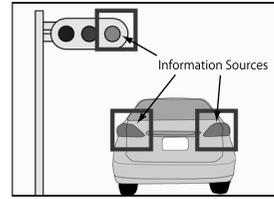


図 6 空間分離による情報源認識

Fig. 6 Multiple information sources recognition by separating them spatially.

係が刻々と変化するため、時間同期のようにヘッダ部で確立した光源位置を認識するだけでは不十分である。そのため、情報伝送を行っているデータ部でも光源追跡が必要になる。特に、本研究で対象としている自動車のように、移動体が振動する場合は数ピクセル単位での変化を追跡する必要がある。そこで、本研究では、先に述べた反転パターンを利用してデータ部での空間方向の同期をとる。

この検出・追従手法は点滅パターンによらず適用できる。例えば、距離の変化によって光源の大きさが変化し、撮影画像上での点滅パターンの見え方が異なる場合でもロバストに動作し、光源が複数存在する場合においても変わらずに適用可能であることが文献 [5], [7] で確認されている。

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。複数情報源認識では、撮影画像内に写っている複数の情報源を、図 6 のように大まかに情報源を含む領域で区切る。本論文では、このように領域で切り出すことで各情報源を空間的に分離することを認識と呼ぶ。次章で複数認識を実現するための提案手法を説明する。各情報源を分離することができれば、それぞれを一つずつ扱うことで従来研究の想定に当てはめられるため、Barker 系列を用いた情報源検出と、反転信号を用いた情報源追跡を各情報源ごとに行うことより通信が可能となる [5], [7]。情報源検出はヘッダ部を用いて行うため、その前段の処理である複数情報源認識ではヘッダ部の先頭または前パケットのデータ部において認識ができていなければならない。

情報源追跡ができれば個々の LED の位置を推定することは容易である。その後、推定した個々の LED 位置に対応するピクセルから輝度値を抽出し、その値をもとにデータの復号を行う。

この処理の流れで情報源ごとに独立に情報を取得す

る場合に重要となるのは、複数情報源認識で情報源を見逃さないことや空間的に分離されていることである。更に、データを復号するためには情報源がもつ全てのLEDの点滅を見なければならぬため、各情報源が複数情報源認識で選択された領域内に欠けることなく全体が収まっていることも大事である。

4. 複数情報源認識手法

本章で提案する図5の複数情報源認識手法で行われる処理は、画像分割、情報源抽出、情報源判定、情報源領域切出しの4段階に分けられる。

複数認識を可能にするのは画像分割処理であり、その後の情報源抽出、情報源判定、情報源領域切出しは情報源の認識精度に影響する処理である。

4.1 画像分割

複数の情報源を認識するためには、画像を部分的に見て走査していき、情報源が存在するかどうかを順次判定すればよい。そこで、画像を部分的に見るために、まず、撮影画像を $m \times n$ 個の小さな領域（ブロック）に分割する。次にブロックごとに情報源が含まれるかどうかの判定を行うことで、情報源の存在をブロック単位で判定できる。本論文ではブロックが一定の大きさの正方形となるように画像を格子状に分割する。

以下では、ブロックごとに情報源が含まれるかを判定する手法として従来用いられてきたフレーム間差分法をそのまま適用する場合と、提案するブロックマッチングを用いた認識手法について説明する。

4.2 情報源抽出と情報源判定

情報源抽出では情報源が高速点滅しているという可視光通信の特徴を利用し、各ブロック内について情報源が含まれるかどうかを判定する。撮影画像の各ブロックについて情報源を抽出する手法を2種類説明する。一つ目のフレーム間差分法はブロック単位で処理を考えること以外は、従来研究[5]で行われてきた情報源抽出方法と同じである。二つ目のブロックマッチングはフレーム間差分法で生じる問題を解決するために本論文で提案する情報源抽出手法である。

4.2.1 フレーム間差分法（従来手法）

フレームとは動画を構成する画像系列に含まれる1枚1枚の画像のことである。図7の左上と右上の画像は受信機の高速カメラで2ms間隔で撮影された2連続画像である。撮影画像系列の $t-1$ 番目の画像（図7左上）と t 番目（図7右上）の画像を比較すると情報源（図の中央の楕円内に2機存在）以外の背景

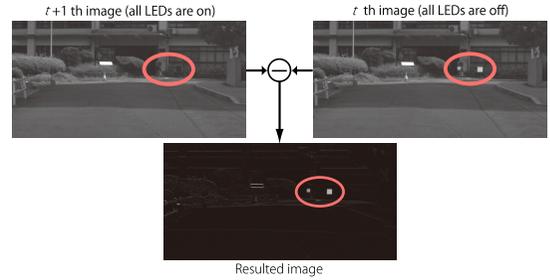


図7 2連続画像間の差分画像

Fig. 7 Resulted image by subtracting t th image from $t-1$ th image.

はほとんど変化しておらず、中央で高速点滅する情報源のみ点滅パターンが変化していることが分かる。

そこで、2連続画像間で輝度の絶対差の計算（差分処理）を行うことにより、図7の下の差分画像のように、変化の少ない背景を除去し、点滅パターンが高速に変化する情報源を取り出すことができる。これを k 行 l 列目 ($0 < k \leq m, 0 < l \leq n$) のブロックについて考えると、差分画像のピクセルの輝度値は以下のように表される。

$$f'_t(i_{k,l} + i, j_{k,l} + j) = |f_{t-1}(i_{k,l} + i, j_{k,l} + j) - f_t(i_{k,l} + i, j_{k,l} + j)| \quad (1)$$

ここで、 $(i_{k,l}, j_{k,l})$ は k 行 l 列目のブロックの原点となるピクセルの座標、 t は画像番号、 $f(\cdot)$ 、 $f'(\cdot)$ はそれぞれ撮影画像と差分画像の対応するピクセルの輝度値を表す関数となる。

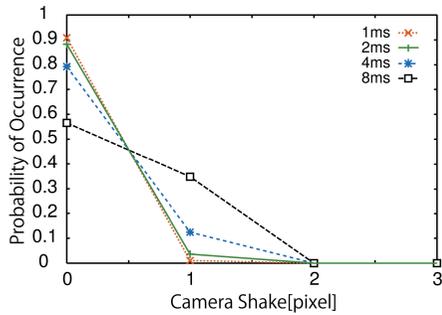
差分画像内で情報源が含まれるかどうかの判定は、ブロック内の差分輝度値の総和に基づく指標と、判定しきい値 T を比較することで行う。言い換えると、以下の条件を満たすときに k 行 l 列目のブロックに情報源が含まれると判定する。

$$T \leq \frac{1}{N^2} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} f'_t(i_{k,l} + i, j_{k,l} + j) \quad (2)$$

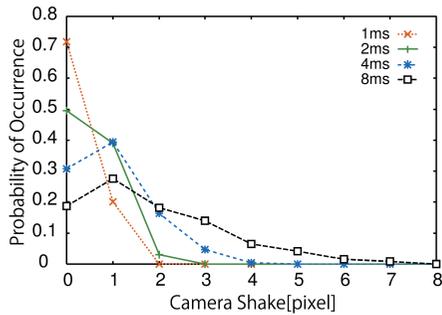
このとき、 N はブロックサイズ（ブロックの1辺のピクセル数）、判定しきい値 T は2連続画像間でのブロック内における差分輝度値の平均値を見るしきい値を意味する。

4.2.2 ブロックマッチング（提案手法）

フレーム間差分法を用いる場合は、2連続画像間では背景にほとんど変化がないことを前提としている。実際には車両走行時に撮影される画像は2ms間であつ



(a) 左右方向のぶれ.



(b) 上下方向のぶれ.

図 8 車両走行時における画像 (LED アレー) の移動量 (30 km/h, 通信距離 50 m)

Fig. 8 Vehicle vibration in the received images in driving situation.

でも情報源以外の部分で大きな差分値が現れることがある。これは、車両自体の振動やハンドル操作、撮影画像内に写っているものがそれぞれ車両に対し個別の相対速度で移動していることなどが原因で、2連続画像間で無視できないだけのずれが生じ、差分処理で情報源以外を効果的に除去できないためである。

図 8 に車両走行時における画像 (LED アレー) の移動量を示す。ここで示した実測結果は、車両が時速 30 km/h で走行し、通信距離が 50 m での左右方向 (図 8(a)) 及び上下方向 (図 8(b)) のピクセル単位での画像変化 (移動量) を示しており、高速度カメラで異なる撮影間隔 (1 ms, 2 ms, 4 ms, 8 ms) の場合について示している。

なお、通信距離 50 m のデータを示した理由は、通信距離 50 m で道路に凹みがあり、その影響で画像変化が最も大きくなっていたためである。これは、図 8(b) の上下方向のぶれが特に大きいことから確認できる。

この図より分かるように、撮影間隔を短く、すなわちフレームレートを高速にすることで、ぶれは小さく

なる。しかし、1 ms でも 1 ピクセルのぶれは生じており、このぶれを完全に取り除くことは困難である。

2連続画像間でのずれによって大きな差分値が現れやすいものとしては、夜の外灯や、昼間の太陽光を反射する看板などがある。これらは周囲の背景に比べ極めて高い輝度値をもつため、少しのずれでこれらの高い輝度値をもつ部分と周囲の暗い部分との間で差分が計算されてしまう。

以上より、車量の振動が激しい場合や、撮影画像内に高速で移動する物体が存在する場合にフレーム間差分法を用いると、判定しきい値 T を高く設定しても情報源ではないものが情報源だと誤って認識される。この問題を解決するために、ブロックマッチングを導入する。

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。2連続画像間の対応位置が求められれば、フレーム間差分法で問題になっていた2連続画像間のずれを補正することができる。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。

ブロックマッチングは、分割された t 番目の撮影画像 f_t の各ブロックが $t-1$ 番目の撮影画像 f_{t-1} 上のどこに対応するのかを示す位置 (動きベクトル) を計算する。 f_{t-1} の k 行 l 列目のブロックについて動きベクトルを求めるにあたり、 f_t 上の任意の $N \times N$ ピクセルとの類似度 (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。

$$SAD(p, q) = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} |f_{t-1}(i_{k,l+i}, j_{k,l+j}-q) - f_t(i_{k,l+i}, j_{k,l+j})| \quad (3)$$

ここで、 (p, q) は対応位置候補の動きベクトルである (図 9)。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。

$$(p_{min}, q_{min}) = \underset{(p,q) \in R}{\operatorname{argmin}} SAD(p, q) \quad (4)$$

ブロックマッチングを情報源認識に適用する場合には、動きベクトルではなく、 f_{t-1} のブロックと f_t

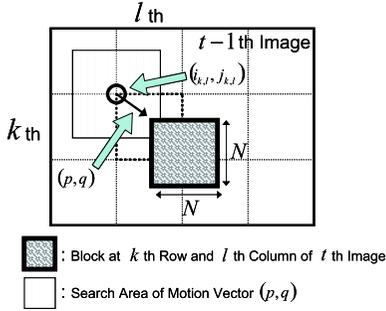


図9 ブロックマッチング
Fig. 9 Block matching.

間の相違度を求めるための評価指標が重要となる。この動きベクトルを決定するための式 (4) 内の値 $\min_{(p,q) \in R} SAD(p,q)$ は、対応位置で差分処理を行ったときのブロック内の差分輝度値の総和を表しているため、フレーム間差分法における式 (1) に対応する。そのため、フレーム間差分法の場合と同様にして、 $\min_{(p,q) \in R} SAD(p,q)$ と判定しきい値 T を比較することにより判定を行う。以下の条件を満たすときに情報源が含まれると判定する。

$$T \leq \frac{1}{N^2} \min_{(p,q) \in R} SAD(p,q) \quad (5)$$

ブロックマッチングを用いた方法ではブロック単位で2連続画像間の対応位置を探すため、撮影画像内の局所的な移動量をピクセル単位で補正できる。したがって、撮影画像内に写っているものが車両に対しそれぞれ異なる相対速度で動いていても、それぞれの移動量を補正することができるため、走行環境に有効な手法といえる。しかし、実際には物体は撮影画像上でピクセル単位で移動するわけではないため、ブロックマッチングで計算した移動量と実際の移動量は異なり、サブピクセルレベルの誤差が生じる。ブロックマッチングを用いても情報源以外の物の誤認識を完全に抑えられるわけではない。

4.3 情報源切出し

本システムでは、各情報源は備え付けられている個々のLEDの点滅を個別に制御してデータを送信している。そのため、情報源からデータを受信することを考慮すると、複数情報源認識で選択される領域は図6のように、情報源が部分的に領域から外れることなく、情報源の全てのLEDを含んでいなければならない。

画像上での情報源の大きさがブロックサイズより大

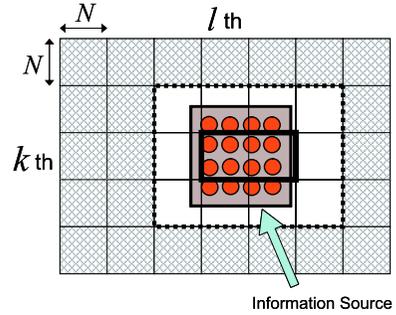


図10 情報源切出し領域の選択
Fig. 10 Information source area clipping.

きい場合には、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、情報源抽出処理において情報源を含むと判定されたブロックの中で、隣接するブロック同士は結合して扱い、一つの情報源を含む大きな領域とする。

図10において、太線で囲まれた k 行 l 列目と $k+1$ 行 l 列目のブロックのみが情報源を含む領域と判定され、結合されるとすると、この結合された領域は情報源全体を含んでいない。情報源の端を含むブロックはLEDを部分的にしか含んでいないため、判定しきい値 T が高いと情報源を含むと判定されにくい。この情報源の端を含むブロックを情報源抽出の段階で情報源を含むと判定させるためには、判定しきい値 T を大きく下げなければならないが、これは情報源でないものを誤って認識させる確率を高めることになる。そこで、情報源を含む領域を切り出す際には、情報源を一つだけ含むとして結合された領域をもとに、図10の破線で囲まれた領域を選択する。具体的には、情報源を一つだけ含むとして結合された領域に外接する方形領域を考え、その領域を更に周囲1ブロック分拡大させた領域を選択する。これにより、判定しきい値 T を下げることなく情報源の端を含むように領域を切り出すことができる。

5. 実験

提案する複数情報源認識手法の性能を評価するために走行実験を行った。実験に用いた高速カメラの仕様を表1に、実験諸元を表2にそれぞれ示す。

本実験環境では通信距離40m程度で1個のLEDが1ピクセルに対応する大きさとなるため、この通信距離40mが個々のLEDの検出限界となる[7]。しかし、実際にはヘッダの全点灯パターンを検出できれば

表 1 高速度カメラの仕様
Table 1 Specifications of high-speed camera.

カメラ型名	フォトロン社製 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 35 mm f/1.4

表 2 実験諸元
Table 2 Experimental parameters.

LED アレー	16 × 16 の LED を正方格子上に配置
LED 間の距離	20 mm
LED の実効の点滅速度	500 Hz
撮影速度	1000 fps
解像度	1024 × 512 pixels
レンズの焦点距離	35 mm
レンズのピント	無限遠
レンズの絞り	8
通信距離	30 ~ 150 m
車両速度	30 km/h
撮影フレーム数 F_{all}	12800 枚
ブロックサイズ N	4, 8, 16
動きベクトル探索範囲 R	$-3 \leq p \leq 3, -3 \leq q \leq 3$

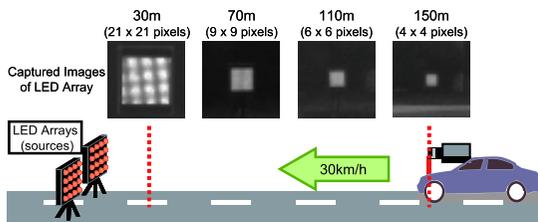


図 11 実験環境
Fig. 11 Experimental situation.

よいため、個々の LED を検出する場合に比べ容易になる。本実験で用いる LED アレーは、一辺に 16 個の LED が取り付けられているため、単純に計算して、個々の LED の検出限界である 40 m の 16 倍の距離となる 640 m が、LED アレーの検出限界となる。これは、通信可能な距離に比べ、光源を検出可能な距離の方がはるかに大きいため、通信するには十分な光源の検出性能を達成できると考えられる。

5.1 実験環境

本実験は、名古屋大学敷地内で実施された。図 11 のように、LED アレー 2 機を車両から等距離になるように配置し、150 m 離れた地点から 30 m の距離まで時速 30 km/h で車両を近づけながら車載高速度カメラで撮影した。なお、本研究では、2 機の LED の設置間隔を 1.6 m とした。本研究で用いた LED アレーは、16 × 16 の正方行列上に配置された 256 個の LED で構成されている。各 LED 間の距離は、実際の LED 信号機と同じ 20 mm としている。受信機である高速



図 12 複数情報源認識手法の結果
Fig. 12 Example of result of multiple information sources recognition.

度カメラは車両内のダッシュボード上に設置し、送信機と受信機の高さがほぼ水平となるようにした。

図 11 の上部の画像が距離ごとの実際の LED アレーの撮影画像である。実験は昼間の晴天時に行われ、LED アレー以外の背景が十分に写るように絞りを調整した。

情報源認識の後段の処理である情報源検出を行うためには、情報源認識の段階でヘッダが認識できればよい。そこで、走行実験での LED アレーの点滅パターンは文献 [5] でヘッダ部の最初に用いられる全消灯と全点灯の組合せを繰り返すのみのパターンとした。

5.2 複数情報源認識結果

まず、複数情報源認識処理内の画像分割により複数情報源を空間的に分離できるかどうかを確認した。図 12 は認識結果の例である。中心の二つの白枠は認識の切出し結果であり、2 機の LED アレーをそれぞれ分離して切り出すことに成功している。どちらの白枠も LED アレー全体を欠けることなく含んでいるため、ブロック単位で情報源判定を行う手法は複数情報源の同時認識に成功していることが分かる。撮影距離が 150 m ~ 30 m のどの距離においても 2 機の LED アレーを分離して認識できていることを確認した。また、複数情報源認識に関して、情報源抽出でフレーム間差分法とブロックマッチングのどちらを適用しても 2 機の LED アレーを分離して認識できることを確認した。

5.3 見逃し率と誤認識率

図 12 の LED アレーとそれ以外の背景について、判定しきい値 T を変化させた場合の見逃し率と誤認識率の関係をブロックサイズ N 、撮影距離ごとについて実験から求めた。ここで見逃しとは、LED アレーの全体を含むように領域を切り出すことができないことであり、誤認識とは LED アレー以外のものを認識し切り出すことである。見逃し率 P_m と誤認識率 P_f をそ

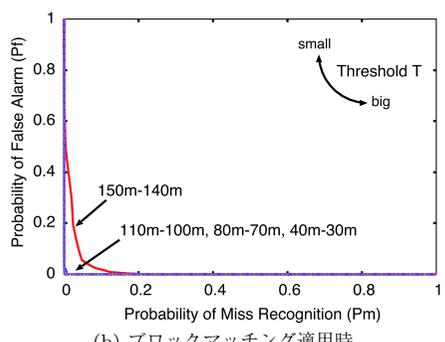
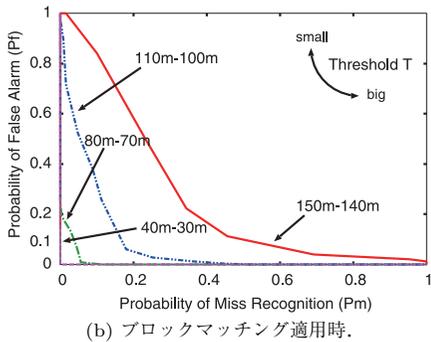
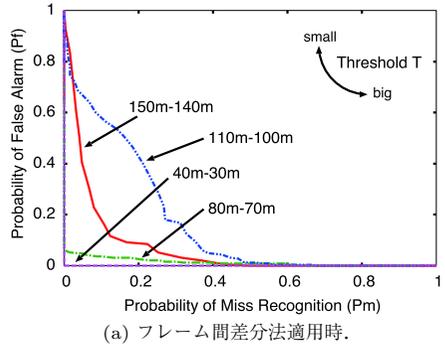
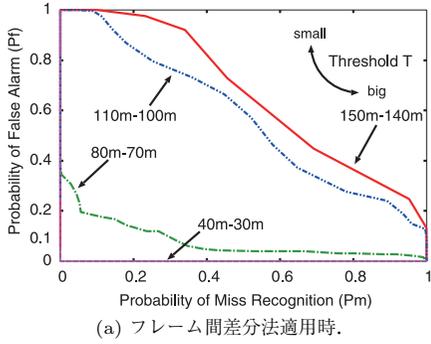


図 13 複数情報源認識手法における見逃し率 P_m と誤認識率 P_f (ブロックサイズ $N = 16$)

Fig. 13 Characteristic of miss recognition and false alarm (block size $N = 16$).

図 14 複数情報源認識手法における見逃し率 P_m と誤認識率 P_f (ブロックサイズ $N = 8$)

Fig. 14 Characteristic of miss recognition and false alarm (block size $N = 8$).

それぞれ以下のように定義する.

$$P_m = 1 - \frac{F_{source}}{F_{all}}, \quad P_f = \frac{F_{noise}}{F_{all}} \quad (6)$$

ここで, F_{source} は LED アレーを情報源と認識したブロックが一つでも存在する画像数, F_{noise} は情報源でないものを誤って情報源と認識したブロックが一つでも存在する画像数, F_{all} は全撮影画像数である.

情報源抽出においてフレーム間差分法を用いる場合とブロックマッチングを用いる場合について, 見逃し・誤認識率の特性比較を行った.

5.3.1 フレーム間差分法 (従来手法) の適用結果

図 13(a), 図 14(a), 図 15 に情報源抽出手法としてフレーム間差分法を適用した場合のブロックサイズごと ($N = 16, 8, 4$) の見逃し率 P_m と誤認識率 P_f の関係を示す. 各図中の線は, 異なる撮影距離の画像に対して判定しきい値 T を変化させて処理を行うことで描かれており, 撮影距離が 150 m ~ 140 m, 110 m ~ 100 m, 80 m ~ 70 m, 40 m ~ 30 m の 4 段階であるときに注目して結果を載せている. 各図の横軸は見逃し率 P_m , 縦軸は誤認識率 P_f を示しており, 判定しき

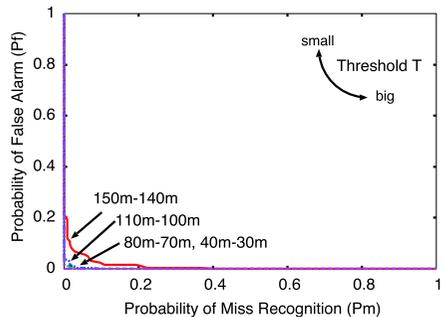


図 15 フレーム間差分法を適用した場合の見逃し率 P_m と誤認識率 P_f (ブロックサイズ $N = 4$)

Fig. 15 Characteristic of miss recognition and false alarm with frame subtraction method (block size $N = 4$).

い値 T が大きくなると見逃し率 P_m が増加し, 誤認識率 P_f が減少する. 逆に判定しきい値 T が小さくなると見逃し率が減少し, 誤認識率が増加する.

ブロックサイズ N が情報源よりも小さく, 図 10 のように LED アレーで占められているブロックが少なくとも一つ存在する場合は, そのブロックについて

は情報源を極めて見逃しにくく、判定しきい値を高く設定しても問題ないため特性がよい。各ブロックサイズについて、撮影画像上でのLEDアレーの大きさがブロックサイズと同程度の大きさとなるとき、どのブロックに含まれるLEDアレーも部分的となりやすく、見逃しが発生しやすい。撮影距離が40m~30mではLEDアレーの大きさは16~21ピクセル程度であり、ブロックサイズ N が16のときにはLEDアレーとブロックサイズは同程度の大きさにもかかわらず誤認識率・見逃し率共に0を達成している。これは撮影距離が近い場合にはLEDの輝度値が高いためにLEDが部分的にしか含まれなくても大きな差分輝度値が得られ、見逃しが発生しにくいからと考えられる。

撮影距離が近い程特性が良くなるという傾向が必ずしも見られるわけではなく、ブロックサイズ N が8の場合では撮影距離が150m~140mのときよりも110m~100mのときの方が特性が悪くなっている。これは、走行中に周囲の景色が変化したことによって、撮影画像内に写るものも変化し、その中に誤認識されやすいものが現れたためと考えられる。誤認識されやすいものは1度現れると後の撮影画像においても継続的に誤認識される上に判定しきい値 T の値を多少上げた程度では誤認識を防ぐことができない。そのため、ブロックサイズ N が8で、撮影距離が110m~100mのときに判定しきい値 T の変化に対して誤認識率の低下が緩やかであると考えられる。

5.3.2 ブロックマッチング (提案手法) の適用結果

図13(b)、図14(b)にブロックマッチングを適用した場合のブロックサイズごと($N=16, 8$)の見逃し率 P_m と誤認識率 P_f の関係を示す。ブロックサイズ N が4の場合については図で結果を示していないが、どの撮影距離でも誤認識率・見逃し率共に0を達成している。また、どのブロックサイズにおいてもフレーム間差分法を用いる場合に比べ特性が改善している。これはブロックマッチングにより、車の振動や撮影画像内に写っているものの局所的な動きにより生じる差分輝度値を低減することができるため、誤認識が起りにくくなるからである。また、周囲の景色の変化により誤認識が起りやすいものが現れても、ブロックマッチングでは誤認識を抑えることができるため、撮影距離が近づくに従って特性が良くなる傾向となっている。

以上の結果より、ブロックマッチングに基づく複数情報源認識手法は複数情報源を区別して認識できるだけでなく、走行環境での画像のぶれや局所的な変化、

表3 平均計算時間の比較

Table 3 Comparison of average calculation time.

ブロックサイズ	フレーム間差分法	ブロックマッチング
4 pixels	0.037 ms	0.108 ms
8 pixels	0.016 ms	0.047 ms
16 pixels	0.011 ms	0.036 ms

周囲の景色の変化に対して有効な認識手法だといえる。

5.4 ブロックサイズごとの各認識手法の平均計算時間の比較

本研究で用いたPCの性能は、CPU: Intel Core i7 (動作周波数3.20 GHz)、メモリ: 8 GByteである。このPCを用いた場合、2msの画像間での認識にかかる平均計算時間は表3となる。ブロックマッチングを用いることでフレーム間差分法に比べ3倍程度の計算時間がかかるが、ブロックマッチングを用いた場合でも0.1msで計算できるため、リアルタイムでも十分処理できるものと考えられる。

6. むすび

本論文では、ユビキタス通信技術として期待される可視光通信において、高速度カメラを搭載した車両が走行時に複数情報源から情報を受信する状況を想定し、各情報源を撮影画像からブロック単位で認識可能な手法を提案した。

ブロック単位で情報源が含まれるかどうかを判定することで複数情報源を分離して認識することができ、更にブロックマッチングを導入することで走行環境での画像のぶれや局所的な変化による情報源以外のものの誤認識を低減し、誤認識しやすいものが現れてもその影響も緩和できることを走行実験により確認した。ブロックサイズ N が4のときでは撮影距離が150m~30mの間で誤認識率・見逃し率共に0を達成した。

今後の課題としては、車両の移動速度やカメラのフレームレートを変化させた実験と通信特性の評価、更に、2機のLED送信機の設置間隔を変えた場合、とりわけ、隣接させた場合での受信機のアルゴリズムの評価の検討が挙げられる。

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。本論文の一部は科研基盤(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, and C.-H. 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,” 信学論 (B), vol.J88-B, no.2, pp.351–359, Feb. 2005.
- [3] 山里敬也, “LED アレイと高速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・境界ソサイエティ誌, vol.3, no.2, pp.45–53, Oct. 2009.
- [4] S. Arai, S. Mase, T. Yamazato, T. Yendo, T. Fujii, M. Tanimoto, and Y. Kimura, “Feasible study of road-to-vehicle communication system using LED array and high-speed camera,” Proc. 15th World Congress on ITS, Nov. 2008.
- [5] 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,” Proc. ISWCS’10, pp.765–769, Sept. 2010.
- [6] 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リアルタイム伝送,” 信学技報, USN2011-89, Jan. 2012.
- [7] 名倉 徹, 山里敬也, 荒井伸太郎, 岡田 啓, 圓道知博, 藤井俊彰, “車両走行時の路車間可視光通信のための LED アレイ追跡手法,” 信学論 (B), vol.J95-B, no.2, pp.326–336, Feb. 2012.
- [8] 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,” テレビ学技報, vol.5, no.9, pp.85–90, July 1981.
- [9] H.B.C. Wook, S. Haruyama, and M. Nakagawa, “Visible light communication with LED traffic lights using 2-Dimensional image sensor,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E89-A, no.3, pp.654–659, March 2006.
- [10] T. Yamazato and S. Haruyama, “Visible light communications,” IEEE International Conference on Communications, June 2011.
- [11] 山梨県道路工事設計マニュアル道路編, 第 13 章交差点設計, 2012 年 3 月.
- [12] 須川成利, “CMOS イメージセンサにおける高速化技術の動向,” 映情学誌, vol.66, no.3, pp.174–177, March 2012.
- [13] 松下伸行, 日原大輔, 後 輝行, 吉村真一, 暦本純一, “ID Cam: シーンと ID を同時に取得可能なスマートカメラ,” 情処学論, vol.43, no.12, pp.3664–3674, Dec. 2002.
- [14] 香川景一郎, 浅津博昭, 川上智朗, 西村智博, 池内隆志, 藤内亜紀子, 太田 淳, 布下正宏, 渡辺國寛, “イメージセンサを応用した空間光伝送用受光デバイスの設計・試作,” 映情学誌, vol.58, no.3, pp.334–343, March 2004.
- [15] 伊藤禎宣, 岩澤昭一郎, 土川 仁, 篠沢一彦, 角 康之, 間瀬健二, 鳥山朋二, 小暮 潔, 萩田紀博, “IrID: 赤外線 LED による小型位置取得装置の実装と運用,” 情処学論, vol.49, no.1, pp.83–95, Jan. 2008.
- [16] 高井 勇, 原田知育, 安藤道則, 川人祥二, “空間光通信イメージセンサによる車車間通信システムの開発,” 信学技報, ITS2011-39, Feb. 2012.

(平成 24 年 2 月 1 日受付, 6 月 4 日再受付)



白木 康建 (学生会員)

平 22 名大・工・電子情報卒. 平 24 同大大学院修士課程了. 在学中, ITS 無線技術, 可視光空間通信の研究に従事. IEEE 学生会員.



山里 敬也 (正員)

昭 63 信州大・工・電子卒. 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, 平 16 同大・エコトピア科学研究機構, 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. 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. 平 7 本会学術奨励賞受賞. 平 17 本会基礎・境界ソサイエティ特別功労賞受賞. 平 17, 平 19 本会通信ソサイエティ活動功労賞受賞. IEEE Communications Society 2006 Best Tutorial Paper Award 受賞. 平 23 より通ソ副編集長.



岡田 啓 (正員: シニア会員)

平 7 名大・工・電子情報卒. 平 9 同大大学院博士課程前期課程了. 平 11 同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・超域研究機構・助教, 平 21 埼玉大・理工学研究科・准教授. 平 23 年名大・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 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 14, 平 18, 平 21 本会通信ソサイエティ活動功労感謝状受賞.



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 名古屋大学大学院工学研究科電子情報学専攻教授. 三次元映像通信, 三次元映像システム・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.



圓道 知博 (正員)

平 8 東工大・工・制御卒. 平 10 同大学院博士前期課程了. 平 13 同大学院博士後期課程了. 博士 (工学). 平 10 TAO・3D プロジェクト研究員. 平 14 JST・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. 三次元映像の撮影・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.



荒井伸太郎 (正員)

平 16 徳島大・工・電気電子卒. 平 18 同大学院修士課程了. 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.