

視覚的情報を利用した指向性電波無線通信システムのための 点滅点光源追跡手法の実装

石川晃平^{1,a)} 石原進^{2,b)}

概要：アンテナの指向性を動的に変更可能なアンテナ～スマートアンテナ～を用いた電波無線通信においては、通信相手の端末と通信可能なアンテナ方向の特定が必須である。電波によって端末の位置を特定する方法では、アンテナ方向の決定のために電波資源を使用するため、それに伴うオーバーヘッドを無視できない。筆者らは、端末に点滅点光源を搭載し、無線 LAN アクセスポイント側に設置したカメラによって撮影した画像によって端末位置を特定してビーム方向を決定するシステムを想定し、移動する点滅点光源を追跡する手法の開発・実装を行っている。本稿では、光源検出手法を改良し、録画動画、リアルタイム動画撮影双方の実験を行いその性能を評価した。実験結果から一般的な生活環境であればリアルタイムに 40% 程度の精度で光源検出が可能であることを確認した。

キーワード：スマートアンテナ、点滅光源、位置検出、無線 LAN

Implementation of a blinking light tracking method for a directional radio communication system assisted by visual information

KOHEI ISHIKAWA^{1,a)} SUSUMU ISHIHARA^{2,b)}

Abstract: In the communication using antennas which can change the directivity of a radio wave dynamically (smart antenna), terminals have to know their locations each other. For detecting the positions of other nodes using radio signals, the overheads caused by sending radio signal to detect the position of nodes is negligible. We implemented a blinking light tracking method for a directional radio communication system assisted by visual information. This system selects beam directions according to the node positions, estimated from video data taken by a camera equipped to wireless LAN access point. In this paper, we propose an improved method for tracking blinking lights. We also present the result of experiments for evaluating the accuracy of the method by using recorded video and a real time system. The result show that the method can track blinking lights at about 40% accuracy in real time.

Keywords: Smart antenna, Flashing light, Localization, Wireless LAN

1. はじめに

近年、イメージセンサ技術の向上により、カメラを受信デバイスとして使用した可視光通信や、マーカをカメラで

撮影する事で ID やマーカの位置を特定する手法が注目されている。イメージセンサを用いて可視光通信の光源を撮影した場合、画像上の光源の位置を調べる事で観測者から見た相対的な位置を特定する事が出来る。そこで筆者らは通信相手の位置情報の把握に視覚情報を用いた指向性無線通信システム FLiSA [1] を提案している。FLiSA はスマートアンテナの仕様を前提とした無線通信システムである。スマートアンテナは電波の指向性を制御する事が可能なアンテナであり、スマートアンテナを使った電波通信システム

¹ 静岡大学大学院システム工学専攻
Graduate School of Engineering, Shizuoka University

² 静岡大学創造科学技術大学院
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

a) ishikawa@ishilab.net

b) ishihara@ishilab.net

ムや通信プロトコルが数多く提案されている。しかしながら、移動体に対してスマートアンテナを用いた無線通信を行う場合、通信相手の位置情報を把握し、通信相手にビームを向けるように制御する必要がある。しかしながら、従来のスマートアンテナを使った電波通信システムや通信プロトコルの多くは、位置情報を付加したビーコンのやり取りなどで通信相手の位置情報を把握しており、その電波自体が干渉の原因となる恐れがある。そこで、FLiSA では通信端末に点滅光源を付加し、イメージセンサを使用して点滅光源を検出する事で通信相手の位置の把握を行う。また、通信端末毎に異なる点滅パターンを持った点滅光源を付加する事で、パターン認識による個別検出を可能とする。

本システムにおける点滅光源検出手法では、不規則な移動をする個別の点滅パターンを持った複数の光源を同時に検出するため、撮影画像を数個の領域に分割する。各領域の代表値（例えば平均輝度値）の時間軸上の変化をフーリエ変換し、パワースペクトルを各領域毎に計算する。特定の周波数のパワースペクトルが閾値以上であれば点滅光源が存在している領域であると推定できる。また、各端末の光源に異なる発光周波数を与えておくことで、複数の光源を個別に検出する事が可能である。

筆者らの事前の研究 [1] では、実際にカメラで撮影した動画による検証の結果、太陽光や照明などの環境光により光源の検出が困難になる、光源以外の物体の移動による誤検出が存在する、といった課題が確認されている。この問題の解決策として分割領域をオーバーラップさせることによる耐移動性の向上や、背景画素の排除による環境光の影響の軽減等の改良が加えられている。しかしながら、検証の結果、環境光の影響が依然強く、昼間に照明をつけたような明るい環境において十分な検出精度が確保されていない事を確認している。この原因のひとつは、領域の代表値として領域毎の平均輝度値を用いていたため、太陽光や照明の影響により画像全体の平均輝度値が高いと相対的に光源の点滅による輝度値の振幅が小さくなり、領域毎の平均輝度値を取ると、さらに光源の点滅による輝度値の振幅が代表値上で表れにくくなることである。その結果、時間軸上の周波数スペクトルに光源の点滅の特徴が表れにくくなり、結果的に光源を検出しづらくなってしまふ。

そこで、本稿では従来の光源検出手法に加え、輝度値と光源を含む画素集合からなる連結成分の大きさに基づく光源の存在位置候補の絞り込みによる新たな代表値の設定手法を提案する。また、文献 [1] では録画した動画画像を用いてその性能評価を行っていたが、本稿では実際に運用する環境を想定したリアルタイム動画画像処理を行う実験により、提案手法の性能をより詳細に評価する。

以下、2章で関連研究について述べ、3章では提案する指向性無線通信システム FLiSA の概要と点滅光源検出手法の動作について説明する。また、光源部分の絞り込みを利用した新たな代表値設定手法についての詳細を述べる。4章では実験概要とその結果について述べ、最後に5章で

本論文のまとめを述べる。

2. 関連研究

スマートアンテナを用いた無線電波通信を行うためには、指向性ビームを通信端末に向けるビームステアリングが必要となる。これまでに、ビームステアリングを適用したメディアアクセス制御 (MAC) のプロトコルが提案されている [6][7][8]。SAND[7]では、通信を行う際にビームを旋回させることで通信相手を探査する。しかしながら、ビーム旋回中はデータ通信を行う事が出来ないため、これはスループット低下の原因となる。DMAC[6]、SWAMP[8]では端末が自分の位置情報を含んだパケットをブロードキャストする事で互いの位置を把握している。そのため、同手法では位置情報の同期後に端末が移動した場合に対応出来ないで、端末が移動する場合に適さない。また、全ての通信端末がGPSを搭載している事が前提とし、この用途は屋外での使用に限られる。これらのプロトコルの多くは通信相手の検出に電波を用いることを前提としており、本研究の目標である電波利用効率の向上に適していない。

電波利用効率を向上するためには、電波を用いずに通信相手の位置情報把握を行う手法が望まれる。近年では、CMOSセンサ等のイメージセンサ技術の向上により可視光通信が注目を集めている。Visual-MIMO (multiple-input multiple-output)[9]では、CMOSセンサを搭載したカメラを用いる事で高速な電子シャッターによる高フレームレートでの動画撮影が可能となり、移動体間の通信へも応用可能であるとされている。しかしながら、高フレームレートでの動画撮影が可能カメラは高価であるため、システムが大規模になると運用は難しくなる。

一方で、文献 [10] の様に専用のイメージセンサではなく市販のカメラを使用したシステムの開発も進められている。このシステムでは、大規模災害において、傷病者のIDを迅速に医師が確認するため、傷病者に専用のLEDタグを付加し、携帯端末でLEDを撮影する事でLEDの点滅からIDを認識する。LEDはIDをマンチェスター符号化したパターンで点滅を行い、受信端末はYCrCbの各成分がLED光に近い画素をLEDとみなす。LEDの点滅や画像の取得を正確に一定間隔で行うのは困難であるため、実際の経過時間とシステム内の経過時間では誤差が存在し、この誤差によってビットを誤って検出する場合がある。そこで、このシステムでは1ビットごとに送受信期間の同期を取る事で誤差の蓄積を回避しIDの認識精度を向上させている。このシステムでは約4.5秒ほどでIDの認識が可能であり、特定の環境では94パーセントの精度でIDを正しく復号できる事が示されている。しかしながら、LEDが移動をしている場合の評価はなされていない。

点滅光源による個別位置検出を使用しているアプリケーションとしてピカピカカメラ [12] が挙げられる。ピカピカカメラは、カシオ計算機から提供されているスマートフォン向けのARアプリケーションである。ピカピカカメラではス

スマートフォンの液晶画面上で赤、青、緑の3色の光源を点滅させ、その光源をカメラで撮影する事で光源を検出した位置に、光源の色の変化パターンに応じたARコンテンツを提供する。また、提供するARコンテンツとしてURL等を提供する事も可能であり、街中での大型ディスプレイ等にピカピカカメラのARタグを付加する事で、関連したWebコンテンツを利用する事も出来る。しかしながら、ピカピカカメラではスマートフォンで利用する場合1, 2m程度の距離での利用を前提としており、大型ディスプレイ等で利用する場合は相応に大きな光源が必要となる。

本研究では移動する点滅光源の位置と点滅パターンを特定出来る手法の開発を目標としている。また、光源検出システムは市販のWebカメラ等を用いて安価に構成出来る事を目指す。

3. FLiSA(Flashing Light and Smart Antenna assisted mobile communication)

本章ではまず、提案する視覚情報による端末位置検出を用いた指向性無線通信システムFLiSA(Flashing Light and Smart Antenna assisted mobile communication)の概要を説明し、システムの重要な構成要素の一つである点滅光源の検出手法について述べ、その課題を示す。また、本手法の最大の課題である環境光の影響の軽減のための代表値設定手法の概要を説明する。

3.1 システム概要

図1にFLiSA(Flashing Light and Smart Antenna assisted mobile communication)のシステム概要を示す。提案システムは室内での運用を想定し、運用する空間全体を見渡せるカメラが設置されているものとする。撮影した画像から点滅光源を検出し、点滅光源の位置を推定してそこに向けて電波ビームを制御する。点滅光源を付加する移動体としては歩行者を想定し、端末の移動速度を5km/h程度と想定する。また、端末は不規則な移動をするものと想定する。

使用するスマートアンテナが比較的容易に構成可能な複数枚のパッチアンテナによる構成であると仮定した場合、アンテナの制御可能なビーム幅には限界がある。このた

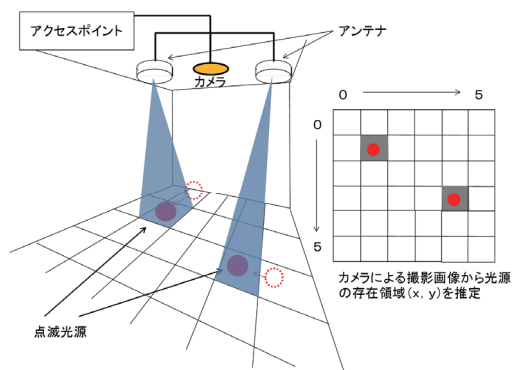


図1 FLiSAのシステム概要

め、提案システムで許容される点滅光源の位置推定精度は、制御可能なビーム幅に合わせて分割した運用空間の中から光源が存在している領域を特定出来る程度でよいと考えられる。

従って本システムでは、運用空間を複数の領域に分割し、各領域で点滅光源が存在しているか否かの判定を行うことで光源の位置推定を行うこととする。また、運用空間内に複数の光源が存在する事も想定されるため、各光源に個別な点滅パターンを持たせ、光源の検出と同時に点滅パターンを認識する事で複数光源の同時個別検出を可能とすることを旨とする。

3.2 点滅光源検出手法

本システムでは、不規則な移動をする個別の点滅パターンを持った複数の光源を、撮影画像を区分した領域単位で検出可能であることが求められる。本手法では撮影画像を数個×数個の領域に分割し、各領域毎の代表値を取得する。この領域毎に計算した代表値の時間変化 $x(t)$ から、その周波数スペクトルを計算する。これより各周波数のパワースペクトルを得る。特定の周波数のパワースペクトルが閾値以上であれば点滅光源が存在している領域であると推定できる。各端末の光源に固有の発光周波数を与えておくことで、複数の光源を個別に検出する事が可能である。

使用する光源の点滅パターンは、光源の検出にフーリエ変換を使っているという本手法の特性上、1Hzや2Hzといった極端な低周波を使用すると、人の動き等を含むノイズとの差別化が難しい。そのため本研究では光源の点滅周波数を3Hz以上とした。また、使用できる周波数の上限は撮影可能なフレームレートで決定される。ナイキスト定理よりフレームレートの半分が使用可能な周波数の上限となる。今日安価に入手可能な動画撮影可能なカメラは30fpsのものが多いため、利用可能な点滅周波数は限定される。限られた周波数の点滅パターンのみでより多くの端末を識別するため、周波数を周期的に変更し、その組み合わせで識別する手法や、複数の光源を端末に付加し、各光源の周波数の組み合わせで識別する等の手法が考えられる。

3.3 点滅光源検出手法の課題とその解決手法

点滅光源検出手法を設計する上で考慮すべき項目として以下の4つが挙げられる。(i)環境光の影響による点滅光源検出精度の低下、(ii)領域分割数の増加による計算時間の増加 (iii) 領域分割数の増加による光源の移動に対する耐性の低下、(iv) 光源以外の移動物体の誤検出の4つの課題である。本稿ではこれら各課題に対して以下に解決策を示す。

- (i) 環境光の影響による点滅光源検出精度の低下に対しては、各領域の代表値設定手法の改善を行う。文献[1]では領域の平均輝度値を代表値として使用しているため、代表値内に背景画素も含まれ光源部分の画素の輝

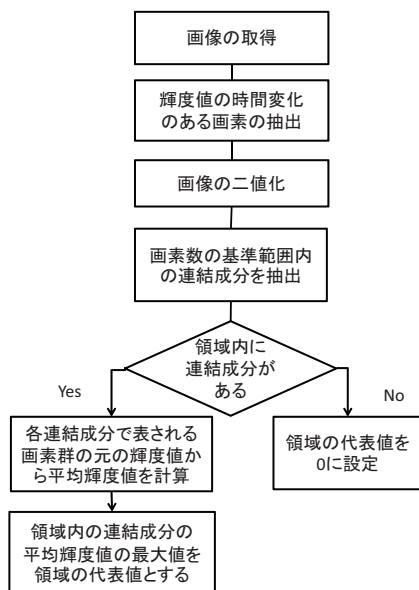


図 2 代表値設定手法のフローチャート

度値変化が代表値に現れにくくなっている。そこで、光源部分の輝度値に基づく閾値を設定し、閾値以上の輝度値をもつ画素のみを抽出するようにする。光源周辺の画素のみを代表値に反映させるようにする。

- 領域分割数の増加に対する課題は次の改良により解決する。(ii) 領域分割数の増加による計算時間の増加に関しては、上記の点滅光源への絞り込み処理により、光源が存在しないと推定された領域ではフーリエ変換処理を行わないようにする事で計算量を削減する。(iii) 光源の移動に対する耐性の低下に関しては、領域の分割を各領域が隣接領域とオーバーラップするようにすることで改善する。
- (iv) 光源以外の移動物体の誤検出は点滅光源以外のスペクトルの特徴に基づいてノイズの区別を行う事で解決する。

以下、各解決手法の詳細を述べる。

3.4 輝度値による二値化と連結成分サイズに基づくフィルタリングを用いた代表値設定手法

光源を含む画素は、時間軸上で見て輝度値の変化がありかつ、光源点灯時には輝度値が比較的大きい。また、光源を含む画素の連結成分の大きさは、光源のサイズに応じたものになる。そこで、輝度値の時間的変化の有無と、輝度値の大きさ、光源の画像上のサイズに基づいて、光源を含む画素の集合を抽出する。図 2 に画像取得から代表値設定までのフローチャートを示す。画像を分割した各領域において、光源を含む画素の集合に対して輝度値の平均をとり、それを各領域の代表値とする。光源と見なせる画素の集合(連結成分)が、同じ領域に複数存在する場合、各画素集合の平均輝度値の大きい方をその領域の代表値とする。また、領域に光源と見なせる画素の集合を含まない場合、その領域の代表値を 0 とする。

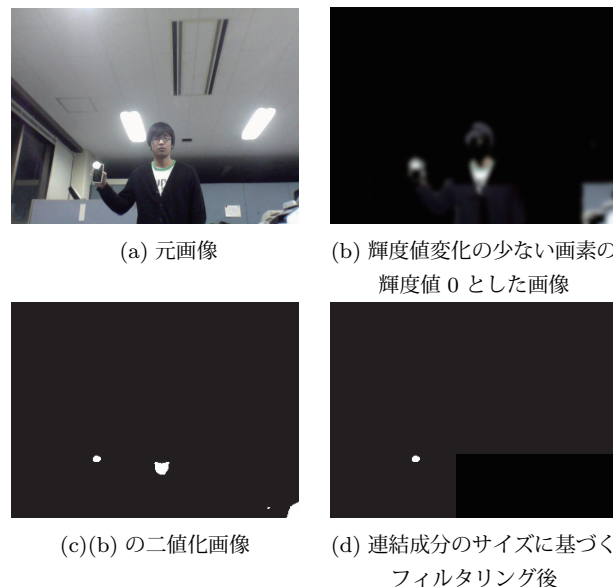


図 3 代表値設定手法の例

3.4.1 輝度値の時間的変化に基づくフィルタリング

各画素について、注目画素の最新フレームでの輝度値を I 、注目画素における輝度値の過去 D フレーム分の平均を \bar{I} とし、輝度振幅の初期値 σ を以下の式で定義する。

$$\sigma = \sqrt{2 \times (I - \bar{I})^2} \quad (1)$$

計算した輝度振幅を用いて画像の各画素について以下の式に基づいて輝度値変化の少ない画素の除去を行う。

$$\bar{I} - \omega < I < \bar{I} + \omega \quad (2)$$

輝度値 I が式 (2) の条件を満たす場合、その画素は輝度値変化が少なく、点滅光源である可能性は低いとして輝度値を 0 とする。

3.4.2 連結成分サイズによるフィルタリング

前節の輝度値の時間的変化によるフィルタリングによって抽出された画素に対し、事前の実験に基づいて定めた輝度値に関する閾値に基づく閾値処理をすることで、明るくかつ輝度値の変化がある画素の集合を得て、この結果を表す二値画像(1画素が光源を含む画素の候補)をつくる。

この二値画像における各 4 連結成分に含まれる画素数を調べ、その画素数がある範囲内 $[S_{min}, S_{max}]$ に収まった場合のみ、光源を含む画素であるとみなす。4 連結成分に含まれる画素数の範囲は、実験的に求める。図 3 に例を示す。同図 (a) に示す画像から輝度値変化の大きい画素のみ抽出した画像が同図 (b) である。輝度値変化の小さい画素は輝度値を 0 としている。その画像を輝度値の閾値 200 で二値化して得た二値画像が同図 (c) である。この二値画像に含まれる 4 連結成分のうち、画素数 10~300 の範囲のものを抽出したものが、同図 (c) である。

画像を分割した各領域で、領域内に含まれる同図 (c) で抽出した光源の候補となる 4 連結成分の画素の平均輝度値をその領域の代表値とする。領域内に複数の光源の候補となる連結成分がある場合は平均輝度値の高い方を領域の代

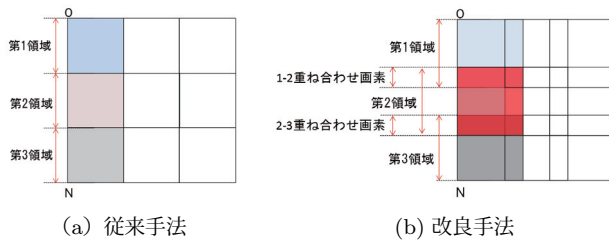


図 4 領域分割手法

表値とする。領域内に光源の候補となる連結成分が存在しない場合は領域の代表値は 0 とする。

以上の処理を各フレームに対して行い、領域毎に代表値のウィンドウ数分の時間的変化を取得する。

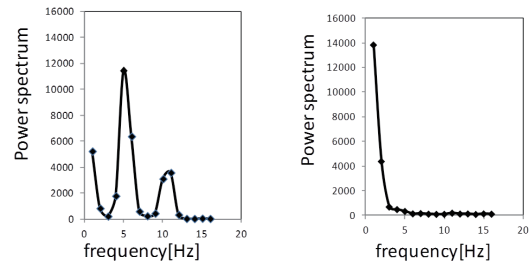
3.5 領域分割数の増加による問題とその解決策

本手法では、領域分割数が増える事で領域一つ当たりの画素数が少なくなり、その領域内における光源が存在する画素の割合が多くなるため、領域の代表値に光源の点滅による輝度値の変化の特徴が強く表れるようになる。このため、領域分割数を増加させる事で点滅光源検出の精度の向上が期待できる。一方で、領域分割数を増加させる事による課題もいくつか存在する。文献 [1] ではそれらの課題に対する解決手法を提案している。以下その課題と解決手法の概要を示す。

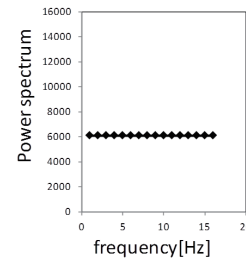
領域分割数の増加による課題の一つは計算量の増加である。本手法では領域毎に代表値の時間軸上の変化をフーリエ変換する処理を行っているため、領域分割数が増加すると、その増加数に応じてフーリエ変換処理の回数も増加し、計算量の増加につながる。領域分割数の増加による計算量の増加を防ぐため、3.4 節に示される処理で、フーリエ変換に用いるウィンドウサイズ分のフレームで光源の候補となる連結成分が検出されなかった領域では、光源が存在していないと想定し、フーリエ変換処理を行わない。

領域分割数の増加によるもう一つの課題は、これによって高速移動する物体を検出しづらくなる事である。この理由は以下の通りである。領域分割数の増加により領域一つ当たりの画素が少なくなると、移動する光源がその領域に滞在する時間が少なくなる。光源を検出するためには少なくとも光源の点滅 1 周期分以上に相当する時間よりも長い間光源が領域に滞在している必要がある。そのため、単純に領域の画素数を小さくすると、移動する光源を検出できなくなる可能性がある。

この問題に対する対策として、改良手法では隣接する領域とオーバーラップするように領域を分割する事で、領域分割数が増加した場合でも移動する光源の検出に必要な画素数を確保するようにする。撮影画像を単純に $n \times n$ で分割する場合、光源が領域間の移動をした際に、点滅光源が持っている点滅パターン 1 周期分のフレーム数を移動先の領域で取得するまで、光源の検出が出来ない時間が存在する。改良手法では図 4(b) の様に、画像を隣接する領域がそれぞれ一部分が重なるように領域区分する事で、光源



(a) 5[Hz] 光源スペクトル (b) 低周波ノイズ



(c) 一様に高いノイズ

図 5 スペクトルの特徴

が領域間の移動をする際に、あらかじめ数フレーム分の光源を含む画像を取得しておくことを可能とする。

本手法では点滅パターン 1 周期分のフレームを取得する事で光源の検出が可能となるため、光源が隣接領域間の重なった領域に含まれている間に点滅パターン周期分のフレームが撮影されるように重なった領域のサイズを決定する。対象となる画像の 1 辺の長さの画素数を P 、運用空間の実際の距離を L [m]、使用する光源の点滅パターンの最小の周波数を f_{\min} [Hz]、光源の移動速度を V [m/s]、領域の分割数を $N \times N$ とし、 x, y 各方向で n 番目の領域の x, y 座標の範囲 $P_n = [P_s, P_e]$ を以下の式で定義する

- $n = 1$ の時

$$P_1 = \left[0, \frac{P}{N} + \frac{p}{2} \right] \quad (3)$$

- $n = 2 \sim (N - 1)$ の時

$$P_n = \left[\frac{n-1}{N}P - \frac{p}{2}, \frac{n}{N}P + \frac{P}{2} \right] \quad (4)$$

- $n = N$ の時

$$P_n = \left[\frac{n-1}{N}P - \frac{p}{2}, N \right] \quad (5)$$

ここで、 p は隣接領域間のオーバーラップさせる画素数であり以下の式で定義する。

$$p = \frac{VP}{Lf_{\min}} \quad (6)$$

この値は点滅パターン 1 周期分の時間に光源が移動する距離を画素数で表した値である。

3.6 スペクトルの特徴に基づく光源誤検出領域の除去

本手法では光源以外の物体の動きによる輝度値の変化を光源の点滅であると誤検出してしまう場合がある。文献 [1]

では、点滅光源が存在する領域で示されるスペクトルの特徴と、光源以外の物体の動きにより高いパワースペクトルが示された領域のスペクトルの特徴の差異から、検出すべき光源であるかノイズであるかを判別する手法を提案している。

点滅光源が存在する領域では、光源が持っている周波数にピークを持つスペクトルが出力される図 5(a)。また、光源が持っている周波数の倍数のスペクトルでも高いスペクトルが検出される。光源以外の物体の動きにより時間軸上での輝度値変化がある場合には 1Hz 程度の低周波にのみピークを持ち、それ以外の周波数ではパワーが低下するような特徴を持つスペクトル (図 5(b))。あるいは、広い範囲で一様に高いパワーを持ったホワイトノイズスペクトル (図 5(c)) になる可能性が高い。各領域毎のスペクトル特徴から、光源を検出した領域のうち、ピークが低周波である領域、ピークのパワーと平均パワーの差が少ない領域では光源以外の物体による誤検出であると判断し排除する。周期的な輝度値の増減をする光源以外の物体 (点滅光源の反射等) も存在するが、この手法では考慮していない。

4. 性能評価実験

提案した点滅光源検出手法の性能評価を行うため録画動画で行う基礎実験とリアルタイムで撮影しながら行う実験を行った。以下その実験方法と結果の考察を行う。

4.1 録画動画を用いた基礎実験

4.1.1 実験条件

予め画面内に移動する点滅光源を含んだ動画を用意し、その動画中の光源を検出する事で光源検出手法の基礎的な性能を評価した。また、本稿で提案した代表値設定手法と、文献 [1] で提案した平均輝度値を用いた代表値設定手法を比較し、その効果を示す。実験用動画は横 6m、縦 2.5m の空間内で、カメラに対して正面を向いて光源を手に持った歩行者を撮影したものである。光源の向きは常にカメラを向いている事とした。歩行者は 3 秒間の静止の後、1 秒間で腕を動かさず歩いて 1m 水平移動する動きを繰り返す。移動範囲はカメラの中心から 2m とし、移動範囲の端に達したら腕を動かして光源を上下に 1m 程度移動させ、再び歩いて水平移動する。移動速度は上下移動、水平移動共に 1m/s とした。

点滅光源として iPhone4 の LED ライトを用いた。SANYO 製カメラ Xacti DMX-CG100 を用い、歩行者は撮影位置から 5m の位置を移動した、画素数は 320 × 240、フレームレートは 30fps である。動画はフルカラーで撮影された動画各フレームを 256 階調の輝度値グレースケール画像に変換して使用した。この実験では単純な点滅光源検出精度のみを評価するため、床と水平にカメラを設置し、光源を持った歩行者を撮影する事とした。フーリエ変換におけるウィンドウサイズを 30 フレーム、撮影時間は 1000 フレームとした。

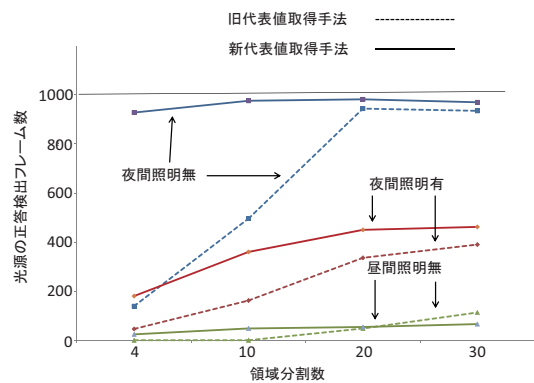


図 6 光源の正答検出フレーム数

以上の条件の下、背景の明るさによる検出精度の影響を評価するため、昼間に照明をつけていない場合、夜間に照明をつけている場合、夜間に照明をつけていない場合の 3 つの環境で実験を行った。実験は全て室内で行った。式 (1) に用いる D の値は 30 とした。二値化の閾値は 200 とし、光源候補とする連結成分の大きさの基準は $S_{min}=10$, $S_{max}=200$ とした。実験では式 (6) での p の計算に用いる V の値を 1.4[m/s], f_{min} の値を 3Hz とした。そのため、領域間でオーバーラップさせる画素数は 12 画素である。使用する光源は 5[Hz] で点滅しているものとした。

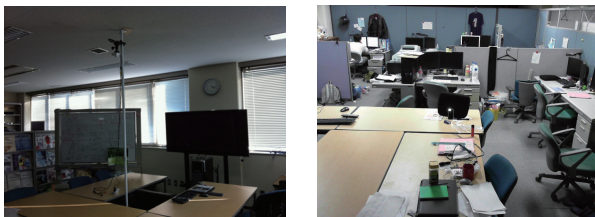
4.1.2 光源の絞り込みを利用した代表値設定手法の効果

本稿で提案した代表値設定手法と、従来の平均輝度値を用いた代表値設定手法を比較するため、1000 フレーム中での光源の正答検出フレーム数を測定した。正答検出フレーム数は光源の位置に正しく検出処理がされているかを目視で確認し測定し、光源の検出が確認されたフレーム数の合計である。この際、各フレーム数は以下の 3 種類に大別する。

- 完全正解フレーム: 光源を含む領域のみで検出
- 部分正解フレーム: 光源を含む領域だけでなく、異なる領域でも光源を検出
- 不正解フレーム: 光源を含む領域で検出がされていない

完全正解フレーム数と部分正解フレーム数を足した値を光源の正答検出フレームとした。領域分割数と光源正答検出数の関係を図 6 に示す。同図から、新代表値設定手法では全体的に従来手法と比較して、光源の正答検出数の 50% 程度の向上が確認できるが、領域分割数が少ない場合その効果は特に顕著である。これは、従来手法では領域の平均輝度値を代表値とするため、領域の画素数と光源部分の画素数の差に依存しているのに対して、新手法では予め絞り込んだ光源部分周辺を代表値としているため領域分割数による光源検出精度への影響が少ないためだと考えられる。

夜間照明有の環境では正答検出フレーム数の内、部分正解フレームが 70% 以上を占めていた。点滅光源の反射等の影響によるものもあるが、手や足の動きに起因するものもあり、除去しきれっていないノイズが残っていることが分かる。また、領域分割数 10 × 10 の場合に注目すると、新手法では領域分割数 20 × 20 の場合との差が小さくなって



(a) 実験環境 (b) 撮影画像

図 7 実験環境と撮影画像

いる。この結果から、本手法では、領域分割数を 10×10 以上とすることで本手法本来の性能を発揮できると考えられる。

4.1.3 処理時間

システムをリアルタイムで運用するためには、処理時間がフレームレートより短い必要がある。フレームレートを 30fps と仮定した場合、1 フレーム分の処理にかけられる時間は 3.33ms である。同様にフレームレートを 16fps と仮定した場合、1 フレーム当りの処理時間は 6.25ms である。本手法では領域分割数によって処理時間は変動するため、領域分割数に対応したフレームレートを設定する必要がある。そこで、1000 フレーム分の処理時間を領域分割数毎に測定し、その 1000 分の 1 の値を 1 フレーム当りの平均処理時間として、領域分割数に対応したフレームレートを決定した。検証を行った PC の CPU は intel Core i7 1.8GHz であり、RAM 容量は 4GB である。動画サイズは 320×240 のものを使用した。検証の結果、領域分割数 10×10 では 1 フレーム当りの処理時間が 5.98ms、領域分割数 20×20 では 6.83ms であった。このことから、現状のシステムでは 30fps でのリアルタイム処理の実現は難しいと考えられる。また、領域分割数 20×20 では 16fps の処理も難しいと考えられるため、リアルタイムでシステムを運用する場合は領域分割数 10×10 、フレームレート 16fps を使用した。

4.2 実環境を想定したリアルタイムな動画撮影による実験

この実験では、カメラで動画を撮影すると同時にリアルタイムに処理をする事で、実際にシステムを運用する環境に近い環境での光源検出手法の性能を評価する。

4.2.1 実験条件

運用する空間としては一般的なオフィスを想定し、筆者らの研究室の学生部屋を用いた。撮影対象の空間は縦 13m、横 6m であり。基礎実験の結果から領域分割数は 10×10 、フレームレートは 16fps とした。カメラは一般的な Web カメラである Microsoft Lifecam studio を用いた。Web カメラは室内の端から部屋全体を見渡せるように設置した。3. 4 節で述べた光源とみなす 4 連結成分に含まれる画素数の範囲 $[S_{min}, S_{max}]$ に関しては、事前実験により、表 1 のように定めた。その他のパラメータは基礎実験と同様である。

4.2.2 光源検出率と誤検出率

一般的な生活環境を想定した中で、静止している光源の検出精度と、光源以外の動体による誤検出の頻度を評価する。光源はカメラから 2m、5m、10m の位置にそれぞれ固

表 1 光源とみなす画素数の範囲

フレームサイズ	カメラ・光源間距離	S_{min}	S_{max}
320×240	2m	10	300
320×240	5m	10	200
320×240	10m	5	100

表 2 光源検出率と誤検出率

カメラからの光源の距離	2m	5m	10m
光源検出率	44%	36%	2%
誤検出率	13%	16%	11%

定し、その光源の点滅パターンを検出したフレーム数を測定した。実験空間内には 4 名の人物が存在しており、自由に動いてもらった。光源が存在していない領域での検出は全て誤検出であるとした。以上の環境の下、10 分間の動画撮影と光源検出処理を行い、光源の検出率と誤検出の頻度を評価する。光源検出率は光源の位置に正しく検出出来ていたフレーム数を処理フレーム数で割った値である。誤検出率は光源の位置を含む領域以外に検出がされた領域数を処理フレーム数と全領域数を掛けた値で割った値である。実験は夜間に照明をつけた状態で行った。

実験結果を表 2 に示す。Web カメラでは撮影距離 2m において 44% の検出率であった。光源部分の検出は高い精度でできており、光源の点滅パターンの認識精度が光源検出率を下げているものと考えられる。また、光源が検出出来ないフレームは連続して発生していた。5m の距離においては検出精度は下がるものの、2m の場合と同様の傾向が見られた。10m の距離では光源部分が小さくなり光源検出精度が大幅に下がってしまった。誤検出率は 15% 程度であった。誤検出の主な原因はディスプレイ画面や、白い服を着た人物の動きであった。また、光源の机への反射を検出してしまっているフレームも確認できた。これらの誤検出は二値化の閾値や、光源部分の絞り込みの際の画素数をさらに検証する事で軽減できるものと考えられる。

5. まとめ

本稿ではカメラで撮影した画像から点滅光源を検出し、その位置情報を利用するスマートアンテナを用いた指向性無線通信システム FLiSA (Flashing Light and Smart Antenna assisted mobile communication) におけるシステムの主要構成要素の一つである点滅光源検出手法の改良方法を述べた。事前の研究では領域の代表値として領域の平均輝度値を使っていたため、背景画素の影響を強く受け、夜間に照明がない場合以外では、検出精度の向上が出来ていなかった。また、領域の画素数に代表値が依存していたため、領域分割数が少ない場合に光源検出精度の低下を招き、領域分割数を増加させることによる処理時間の増加を招いていた。本稿では代表値として、予め光源部分の画素を、輝度値の時間的変化、輝度値の高さ、大きさで絞り込み、光源部分周辺の画素のみを代表値としてする事により検出精度の向上を行った。また、従来の研究では録画済の動画

を用いた実験により手法の性能評価を行っていたのに対して、本稿では実環境を想定したリアルタイムな動画撮影と光源検出処理により、手法の性能を評価した。

録画動画を用いた実験結果から、新代表値設定手法では、光源検出精度が夜間照明無、夜間照明有の二つの環境において約 50% 程度の光源検出精度の向上を確認した。また、領域分割数が少ない場合での光源検出精度の低下を抑制し、処理時間の減少も確認した。また、解像度 320 × 240、フレームレート 16fps、の動画をリアルタイムに撮影し、CPU は Intel Core i7 1.8GHz、RAM 容量が 4GB の PC で処理した実験結果から、点滅光源を 2m の距離で 44%、5m の距離で 36% の精度で検出する事が確認出来た。また、誤検出率は 15% 程度であり、点滅光源の反射や手や足の動きに起因する輝度値変化を除去しきれていない事が分かった。

今後は、連結領域を光源とみなすための画素数や二値化処理の閾値等を環境に合わせて動的に変更する手法の開発や GPU の使用やアルゴリズムの工夫によるシステムの高速度化に取り組む予定である。

謝辞 本研究は、科学研究費補助金基盤研究 (A) 「アンテナの指向性を利用するユビキスタスインフラストラクチャに関する実証的発展研究」の助成によるものである。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- [1] 石川晃平, 石原進: “点滅光を利用した指向性無線通信システムのための点滅光源検出手法の基礎評価,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム論文集, Vol.2012, No.1, pp. 1986–1994 (2012-7).
- [2] Mizushima, S., Watanabe, T.: Octagonal ESPAR with Cone Reflector, Korea–Japan Microwave Conference, CD-ROM, FR2–4–1 (2011).
- [3] Kohmura, N., Mitsuhashi, H., Watanabe, M., Bandai, M., Obana, S., Watanabe, T.: Unagi: A Protocol Testbed with Practical Smart Antennas for Ad hoc Networks, *Mobile Computing and Communications Review*, Vol. 12, No. 1, pp. 59–61 (2008).
- [4] 掛橋孝夫, 三上 博, 鈴木茂之, 永元直樹: 可視光通信による三次元写真解析システムの開発, 三井住友建設技術開発センター報告, Vol. 7, pp.89–91 (2009).
- [5] 鶴飼正人, 長峯 望: 画像認識による特殊信号発光機の視認確認手法, *RTRI Report*, Vol. 25, No. 5, pp.41–46 (2011).
- [6] Choudhury, R., Yang, X., Ramanathan, R., and Vaidya, N.: Using Directional Antennas for Medium Access Control in Ad Hoc Networks, *ACM Mobicom'02*, pp. 59–70 (2002).
- [7] Felemban, E., Murawski, R., Ekici, E., Park, S., Lee, K., Park, J. and Hameed, Z.: Sand: Sectorized-antenna neighbor discovery protocol for wireless networks, *Sensor Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), 2010 7th Annual IEEE Communications Society Conference on*, IEEE, pp. 1–9 (2010).
- [8] 高塚雄也, 長島勝城, 高田昌忠, 代雅希, 渡辺 尚: 指向性アンテナのマイナーローブを考慮したアドホックネットワーク MAC プロトコル, *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J92-B No. 3, pp. 540–554 (2009).
- [9] Ashok, A., Gruteser, M., Mandayam, N., Silva, J., Varga, M., and Dana, K.: Challenge: Mobile Optical Networks Through Visual MIMO, *ACM MobiCom'10*, pp. 105–112 (2010).
- [10] 平尾隆智, 内山彰, 山口弘純, 東野輝夫: 傷病者 ID 認識のための携帯端末向けイメージセンサ通信方式の開発, *情報処理学会研究報告*, Vol. 2012-DPS-150, No. 9, pp. 1–8, (2012).
- [11] <http://oshiro.bpe.es.osaka-u.ac.jp/people/staff/imura/products/labeling>
- [12] <http://www.casio-isc.com/ja/> (2012).
- [13] 森田真司, 山澤一誠, 寺沢征彦, 横矢直和: 全方位画像センサを用いたネットワーク対応型遠隔監視システム, *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J88–D–2, No. 5, pp. 864–875, (2005).