

## 光ビーコンのロバストなトラッキングと点滅周波数の推定

小林 政善† 桐島 俊之† 香川 景一郎†† 太田 淳††  
† 奈良工業高等専門学校  
†† 奈良先端科学技術大学院大学

概要：本報告では、入力動画像中から光ビーコンを検出・追跡し、光ビーコンの点滅周波数を推定する手法を提案する。従来の光ビーコンシステムをカメラが移動するような状況で使用するためには、動体の影響で生じる輝度変化と光ビーコンの信号とを区別して光ビーコンを追跡しなければならないという課題がある。提案手法は、(1) 入力から光ビーコンの候補となる領域を抽出する処理、(2) 抽出した候補領域に基づいて、光ビーコンの追跡を行う処理、(3) 光ビーコンのオンオフを記録し、点滅周波数を推定する処理、以上の三段階の処理により構成される。提案手法を実装し評価を行ったところ、提案手法の有効性が確認された。

### Image-based robust tracking and frequency estimation of flashing optical beacons

Masayoshi Kobayashi† Toshiyuki Kirishima† Keiichiro Kagawa†† Jun Ohta††  
†Department of Electrical Engineering, Nara National College of Technology  
††Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

We propose a method that detect and track the optical beacons from image sequence and estimate a blinking frequency of its beacons. The existing optical beacon systems in the environment of a moving camera have a issue that differentiate the signal of the optical beacon from a brightness change occurring under influence of the moving body. Our approach has three process that,(1) pick out optical beacon's candidate areas from input,(2) track the optical beacons from its candidate areas,(3) record the ON/OFF of the optical beacon and estimate its blinking frequency. We show tha effectiveness of our method by experimental results.

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景

実世界の情報に仮想世界の情報を付与することを可能とする拡張現実システム (AR: Augmented Reality) の分野では、ユーザの位置や移動、周囲の事物などを認識することが非常に重要である。このため、検出対象の ID と位置を同時に特定する目的で、様々な ID タグとその検出方法に関する研究・開発が活発である。

現在、AR への応用を視野に入れて開発されている ID タグを大別すると、

- RFID のような無線利用型のもの<sup>1)</sup>
- 二次元コード形式で ID を表現したイメージ利用型のもの<sup>2)</sup>
- 光源の点滅パターンを ID として用いる光源利用型のもの<sup>3)~8)</sup>

などがある。

RFID タグは受信機から見たタグとの距離や方向といった空間的な関係を特定することが困難である。イメージ

利用型の ID タグ (ビジュアルタグ) は、イメージセンサとタグとの距離が遠くなるにつれてセンサで撮像されるタグのサイズが小さくなるため、近距離での利用に限定される。これらの特性は、AR での用途には向いていない。そこで、ID タグに点滅する光源を用いる方法が検討されている<sup>3)~8)</sup>。点滅する光源を用いた ID タグを、本報告では光ビーコンと呼ぶことにする。ビジュアルタグでは色信号に ID 情報をエンコードしていたが、光ビーコンでは、光源の点滅周波数を ID 情報として用いる方法<sup>7)</sup>や、光源の点滅パターンに ID 情報をエンコードする方法が採られる。これをイメージセンサで撮像することにより、ID タグの位置と同時に ID 情報を得ることができる。光の点滅は、色信号に比べて距離が離れても信号の劣化が少ないため、ビジュアルタグよりも離れた距離での検出が可能である。

現在までに提案されている光ビーコンシステムでは、光ビーコンの検出にフレームごとの輝度変化を利用していった。しかし、カメラや背景が移動することを想定した状況においては、光ビーコン以外の領域にも頻繁に輝度変

化が生じてしまう。このため、背景やカメラ自身の移動の影響で生じる輝度変化と光ビーコンとを見分けることが難しい。

また、光ビーコン方式ではID情報が光源の点滅によって表現されているため、少なくともID情報がデコードできるだけの期間は光ビーコンを捉え続けなければならない。したがって、カメラや背景が移動することを想定した状況では、光ビーコンを追跡する必要がある。しかし、光ビーコン方式の『点滅する』という特性は、光源が消灯している期間があるということを示している。つまり、出現と消失を繰り返している対象を追跡し続けることが要求される。

## 1.2 本研究における課題

前節で述べたように、光ビーコンシステムは

- 動体の影響で生じる輝度変化と光ビーコンの信号とを区別する必要がある
- 光ビーコンを追跡する必要がある

という課題を抱えている。これらの課題をソフトウェア的なアプローチで解決することができれば、市販のカメラを利用した安価な光ビーコンシステムへの可能性が広がる。特に、現在までに提案されているARシステムには、小型カメラを頭部や手持ちの小型端末に付けることでユーザの周囲の状況を認識する技術への要求が多くある。光ビーコンをこのようなシステムへ適用するためには、カメラや背景が移動する状況においても、動体の影響で生じる輝度変化と光ビーコンの信号とを区別し、ロバストに光ビーコンを検出する性能が要求される。そこで本報告では、カメラや背景が移動するような状況においてもロバストに光ビーコンを検出・追跡した後、そのID情報を得る手法を提案する。

## 2. 光ビーコンシステム

イメージセンサを用いて光ビーコンを撮像し、ID信号とタグの位置を同時に検出するシステムとして、さまざまな方式が提案されている。この章では、既存の光ビーコンシステムについて述べる。

### (1) 低速光ビーコン方式<sup>3)4)</sup>

30fps以下のイメージセンサで検出が可能な周波数で点滅する、単眼の光ビーコンを用いる方式である。NTSC規格のカメラが使用できるので、非常に安価かつシンプルにシステムを構築することができる。

カメラや背景が移動することを想定した状況では光ビーコン以外の領域に多くの輝度変化が生じてしまうため、単純なフレーム間差分処理によって光ビーコンの信号のみを取り出すことはできない。また、光ビーコンの点滅周波数として設定できるのは理論的には最高で15[Hz]であり、光ビーコンが消灯している間に移動する距離が長いために光ビーコンを追跡し続けることが難しい。

### (2) マトリクス光ビーコン方式<sup>5)6)</sup>

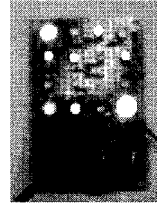


図1 マトリクス光ビーコンの例<sup>6)</sup>

30fps以下のイメージセンサで検出が可能な周波数で点滅する複数の光ビーコンをマトリクス状に配置し、四隅の光源をクロック信号として単純に点滅させ、その他の光源によって信号を発信する方式である。その一例を図1に示す。ビジュアルタグと同様の特徴を併せ持ち、タグの見え方から、センサとタグの距離や角度などといった情報も読取ることができる。

ビジュアルタグと同様の短所として、遠距離からの検出が困難であるという問題がある。VCC(Visual Computer Communication)<sup>6)</sup>では、光源としてLEDを用いたマーカでは、問題なく検出できる距離限界がマーカサイズの約15倍であったとされている。この方式では使用できるシーンが限定されてしまう。

### (3) 高速光ビーコン方式<sup>7)8)</sup>

高速で点滅する光ビーコンを、高速な読出しが可能な独自のイメージセンサで撮像する方式である。たとえば、ID Cam<sup>8)</sup>では4[kHz]で点滅する光ビーコンを用いている。光ビーコンの点滅が非常に高速であるため、可視光を用いた光ビーコンであっても人間の目にはただ点灯しているだけのように見える。この特性を利用して、照明器具や信号機、ディスプレイ広告などへの応用が期待されている。また、高速光ビーコン方式では、移動に対して十分に高速なイメージセンサを用いることで、光ビーコンシステムの課題の一つである光ビーコンの追跡を不要なものにしている。

一方、この方式を実現するためには、専用に設計された高速なイメージセンサが必要不可欠であり、専用機材によるシステムの煩雑化、高コスト化につながってしまう。

以上のようにそれぞれの方式は一長一短であり、どの方式を選ぶかは構築したいシステムの要求による。

本研究では(1),(2)に示した30fps以下のイメージセンサと低速な光ビーコンを用いた方式を対象とする。(3)の方式においても、たとえば携帯情報端末への搭載を想定したオプトナビシステム<sup>7)</sup>では、低速な点滅(5[Hz]程度)に高速な点滅(1[kHz]程度)を重畳させた光ビーコンを、部分的な高速読出しが可能なビジョンチップと呼ばれるCMOSイメージセンサで読込むという方式を採用することで、

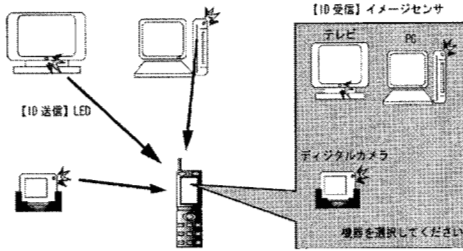


図2 オプトナビシステムの概要<sup>7)</sup>

携帯情報端末に向けた低消費電力での光ビーコンシステムを実現している(図2)。オプトナビシステムでは、部分的な高速読出しを実行する領域を決定するために、30fps程度の動画像から低速な光ビーコンを検出する必要がある。このようなシステムにおいては、高速光ビーコン方式でありながら前章で述べたような課題が残されており、提案手法の適用対象にできると考えられる。

### 3. 提案手法

#### 3.1 システム要件

本手法が必要とする機器は、IDタグとして光ビーコン、光ビーコンを撮像するためのイメージセンサ、処理を行うための計算装置である。光ビーコンは、光源および点滅を制御するためのユニットで構成される。光ビーコンの光源としては可視光LEDを想定している。実装では、最も汎用的な赤色LEDを使用した。点滅を制御するユニットとしては、マイコンが適当である。イメージセンサは特別なものではなく、通常の30fpsのカメラでよい。30fpsのカメラを用いる場合、使用できる点滅周波数は理論的には最高で15[Hz]である。

#### 3.2 光ビーコンのID情報

光ビーコンのID情報としては、点滅周波数を用いる方法や、マンチェスター符号化したIDを点滅パターンに当てはめる方法などが考えられる。今回は点滅周波数をID情報として用いることにした。

30fpsのイメージセンサを用いた方式では、光ビーコンの点滅を媒体として連続的なデータの送受信を行おうとすると、転送レートが非常に低く実用的でない。検出対象との通信には、たとえばBluetoothをはじめとする無線通信手段を併用する方法を想定している。

#### 3.3 処理の流れ

本報告で提案する手法は、

- 入力から光ビーコンの候補となる領域を抽出する処理
- 抽出した候補領域に基づき、光ビーコンの追跡を行う処理
- 光ビーコンのオンオフを記録し、点滅周波数を推定する処理

という三つの処理により構成される。以下に、それぞれの処理について解説する。

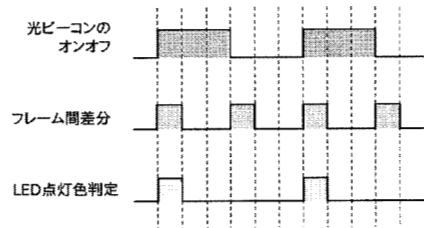


図3 光ビーコン候補領域の抽出

#### 3.3.1 光ビーコン候補領域の抽出方法

光ビーコンの検出には、通常はフレーム間差分処理を用いることが多い。ここで、抽出の精度はしきい値の値に依存する。光ビーコンとして用いられるLEDは点灯時と消灯時の輝度の差が大きいため、しきい値を高い値に設定することが可能である。しきい値が高いほど、ノイズへの耐性が高くなる。

ところが、本研究ではカメラや背景が移動することを想定しているため、カメラや背景の移動により輝度変化が生じ、そのうちのいくつかの領域はフレーム間差分処理のしきい値を越えてしまうことがある。これが、動きの含まれる入力から光ビーコンの領域のみを抽出することが難しい理由である。

そこで、光ビーコンとして用いられる可視光LEDが、固有色かつ一定の色で発光することに着目した。フレーム間差分処理に加えてLED点灯時の色を条件とした判定を行うことで、点灯しているLEDのみを抽出することが可能となる。実際には、フレーム間差分処理の結果画像と入力画像とを論理和した画像に対してLED点灯色を条件とした抽出処理を行う。その結果、前フレームと比べて十分に大きな輝度変化があり、かつLED点灯時の色をした領域のみが光ビーコン候補領域として抽出される(図3)。

LED点灯色の判定には、HLS表色系を用いることにした。入力として得られる色情報はRGBデータであるが、RGB表色系では特定の色を抽出するといった色彩に関する処理を行うことは難しい。そこで、RGBデータを色相H・輝度L・彩度Sの三属性から構成されるHLS表色系に変換し、LED点灯色の判定を行う。

#### 3.3.2 光ビーコン追跡領域の生成と更新

光ビーコンをIDタグとして利用するためには、光源の点滅パターンからID情報を読取らなければならない。つまり、ID情報を読取れるだけの期間は、光ビーコンを追跡していなければならない。しかし、前節の抽出は結果的には光ビーコンが点灯した瞬間を検出しているに過ぎず、図3のLED点灯色判定に示されているような数フレームに一度しか出現しない領域を追跡する必要が生じる。

ここで、カメラや光ビーコンの移動が極端に速いものでないかぎり、光ビーコン候補領域は、数フレーム前の出現位置の近くに現れるはずである。この条件を利用して、光ビーコンを追跡する処理を行う。

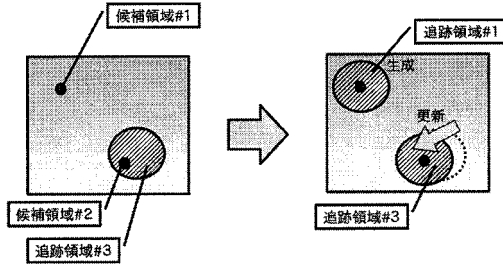


図4 光ビーコン追跡領域の生成と更新

まず、前節で得られた光ビーコン候補領域の画像に対してラベリング処理を行う。この処理を行うことで、複数の光ビーコンが検出された場合に対応でき、またそれぞれの領域を独立して扱うことができる。次に、ラベル付けされた光ビーコン候補領域の中心座標を中心としたある一定の範囲を、光ビーコン追跡領域として生成する。そして以降の処理で、光ビーコン追跡領域内に光ビーコン候補領域が新たに検出されたならば、これらは同一の光ビーコンであると考えられるので、追跡領域の中心を、検出された候補領域の中心座標に更新する(図4: 候補領域#2および追跡領域#3)。どの追跡領域にも含まれない候補領域は、新しく画面内に出現した光ビーコンであると考えられるので、新規に光ビーコン追跡領域として生成する(図4: 候補領域#1および追跡領域#1)。追跡領域の大きさについては、何フレームごとに候補領域の抽出が期待できるかと、その間に何画素程度の移動が加わるかの度合いに依存する。

以上の処理で、光ビーコンの追跡を行う。光ビーコンが画面内から消えるなどして追跡が不可能になった場合に光ビーコン追跡領域が残ってしまうことを防ぐため、ある一定フレーム間更新のなかった光ビーコン追跡領域を破棄する処理を加える。

### 3.3.3 点滅周波数の推定方法

前節までの処理によって求まる光ビーコン追跡領域内に、光ビーコンが存在しているはずである。したがって、それぞれの光ビーコン追跡領域内の輝度値を調べることで、その光ビーコンが点灯(オン)しているのか消灯(オフ)しているのかがわかる。各光ビーコン追跡領域について光ビーコンのオンオフを記録していくことで、点滅周波数を推定する。周波数推定の手法としてはフーリエ変換などが一般的であるが、本研究では処理の簡単さを優先し、連続点灯時間に基づく点滅周波数推定を行う。

ある光ビーコンの点滅周波数を  $fb[Hz]$  とする。このとき光ビーコンの点滅周期  $T[ms]$  は、

$$T = \frac{1000}{fb} [ms] \quad (1)$$

で表される。ここで、カメラのフレームレートを  $fc[frame/sec]$  とすると、一周期の間に撮像されるフレームの枚数  $N[frame]$  は

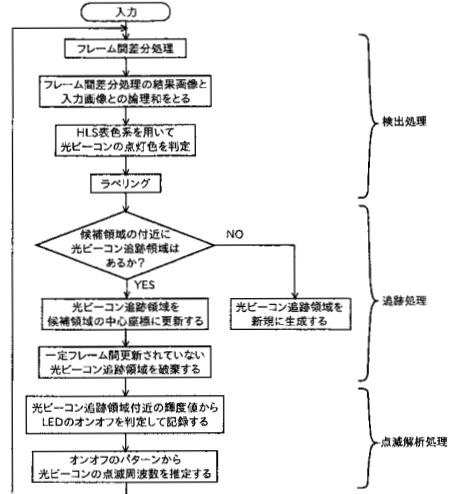


図5 処理の流れ

$$N = \frac{T}{\frac{1000}{fc}} = \frac{fc}{fb} [frame] \quad (2)$$

となる。これを变形して

$$fb = \frac{fc}{N} [Hz] \quad (3)$$

を得る。以上の式を利用して、光ビーコンの点滅周波数を推定する。具体的な手順は、まず光ビーコンが消灯状態から点灯状態に移るタイミングを調べる。つぎに、このタイミングから一周あたりのフレーム数  $N[frame]$  を算定し、誤差対策のため今までの  $N[frame]$  と平均をとる。最後に、式(3)を計算して点滅周波数  $fb[Hz]$  を得る。

以上の処理により、光ビーコンやイメージセンサが移動するような環境においてもロバストに光ビーコンを検出・追跡し、そのID情報を得ることが可能となる。詳細な処理の流れを、図5に示す。

## 4. 実験および考察

### 4.1 提案手法の実装

イメージセンサとして小型のCCDカメラを用い、30[frame/sec]のフレームレートでキャプチャを行った。光ビーコンは、AVRマイコンを用いて任意の点滅周波数に設定できるようなものを作成した。計算機は、PentiumD 2.8GHz、メモリ2GB、OSにWindowsXPを搭載したPCを用いた。提案手法のプログラムはC++で実装した。

### 4.2 評価実験

実装した提案手法の動作を評価する実験を行った。なお、以下の実験環境は全て室内で、照明は通常の蛍光灯である。外から直射日光が差し込むことはない。

#### 4.2.1 検出評価

カメラや背景が動くことで生じる輝度変化と光ビーコンの信号とを区別できているかを確認した。カメラを意



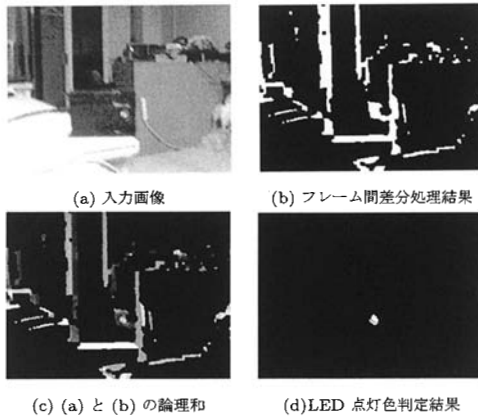


図 6 LED の検出処理



図 7 点減周波数推定処理の評価

図的に動かしたときのフレーム間差分処理の結果画像と、フレーム間差分画像と入力画像の論理和をとった画像に対し LED 点灯色判定を行った画像とを比べることで、意味のない輝度変化と光ビーコンの点滅とを区別できているかがわかる。この結果を、図 6 に示す。フレーム間差分処理の結果画像 (図 6(b)) はカメラの動きの影響を受けて光ビーコン以外の領域も多く抽出してしまっているが、そこからさらに LED の点灯色のみを抽出した画像 (図 6(d)) は光ビーコンの領域のみを抽出できている。

#### 4.2.2 点減周波数推定処理の評価

提案手法によって光ビーコンの点減周波数推定が実現できているかを確かめるために、光ビーコンとカメラを固定した状態で実装したシステムを動かし、目視により確認した。そのときの出力を図 7 に示す。検出した光ビーコンの位置に円を描き、求めた点減周波数をその近くに重ね合わせている。複数の光ビーコンについてもそれぞれに所望の周波数が得られていることがわかる。

#### 4.2.3 距離評価

カメラと光ビーコンの距離を変えていき、どの程度離れた場所から検出が可能であるかを調べた。その結果、3[m]程度の距離までならばほぼ確実に光ビーコンを検出し、所望の点減周波数を得ることができた。5[m]程度の距離でも、LED 光の直進性を考慮して光ビーコンをカメラの法

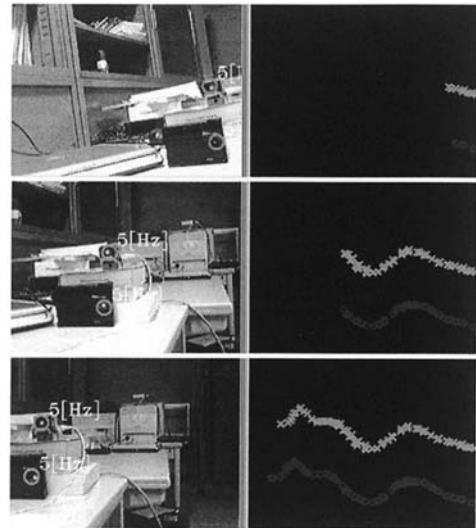


図 8 追跡評価

線方向に設置すれば、検出および点減周波数推定は可能であった。これにより、カメラや光ビーコンが移動しない状況においては、確実に光ビーコンを検出し、正しい点減周波数を得ることができているといえる。

#### 4.2.4 追跡評価

追跡が連続して正しく行われているかを確認するために、カメラを手で持って動かし、光ビーコン追跡領域が更新されるたびにその座標をマークすることで、光ビーコンの軌跡を描いた。このときの出力を図 8 に示す。2つの光ビーコンの軌跡を『○』と『×』で示した。それぞれの領域について、追跡が行われていることが見て取れる。また、正しい周波数が得られていることから、カメラが動いているような入力に対しても光ビーコンを検出し、追跡しながら点減周波数を求めることができていることがわかる。

#### 4.2.5 AR への適用

提案手法を AR へ適用することの有効性を見るために、簡単な評価用デモを作成した。このデモでは、検出した光ビーコンの点減周波数を ID として用い、光ビーコンの検出位置に点減周波数によって異なるアイコン画像を重ねあわせて出力する。環境内に異なる周波数で点滅する光ビーコンを複数設置し、動作を確認した。この様子を図 9,10 に示す。なお、点減周波数としては 5[Hz], 7.5[Hz], 12[Hz] を用いた。カメラを手を持って動かしても、アイコン画像は逐次そのときの光ビーコンの位置に重ね合わせられる。

#### 4.3 考察

前節の実験の結果、提案手法が本研究の目的をほぼ達成していることが確認できた。頭部に小型カメラを取り付けるタイプの AR システムや、小型の携帯端末に搭載されたカメラの入力から光ビーコンを検出して ID タグと

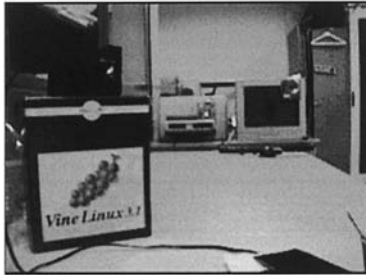


図9 ARへの適用例(入力画像)



図10 ARへの適用例(出力画像)

して利用するようなシステムに対して、十分に適用可能である。

ただし、手に持ったカメラに対して振るような激しい動きを加えた際には光ビーコンが正常に検出・追跡できなかった。このような激しい動きがカメラに加わることを想定したシステムへは提案手法を適用することはできず、現状では高速光ビーコンと高速イメージセンサを用いる他ない。

また、推定された点滅周波数に正しい点滅周波数を中心として $\pm 0.5[\text{Hz}]$ 程度のばらつきが観測されることがあった。この原因としては、撮像が行われるタイミングと光ビーコンの点滅とが同期されていないことや、提案手法における処理フレームレートが完全には安定していないことが挙げられる。カメラと光ビーコンの同期をとることは検出率の向上にも役立つと考えられるが、システムが複雑になってしまい、特殊なカメラを用意しなくても光ビーコンシステムの構築が可能であるという本研究のメリットを損ないかねない。よって、この課題についてはフレームレートを安定させる処理を加えた上で、改めて評価を行う予定である。

## 5. むすび

本報告では、拡張現実感 (AR: Augmented Reality) への応用に向けた光ビーコンシステムについて、カメラが移動するような状況においてもロボストに光ビーコンを検出・追跡した後、その点滅周波数を推定する手法を提案した。

提案手法を市販の CCD カメラとパーソナルコンピュー

タを用いて実装し、評価実験を行った。その結果、光ビーコンをカメラの法線方向に設置すれば、 $5[\text{m}]$ 程度の距離があっても光ビーコンを検出し、点滅周波数を推定できることを確認した。また、カメラに意図的な動きを加えた場合にも、提案手法が物体の影響で生じる輝度変化と光ビーコンの信号とを区別し、ロボストに光ビーコンを追跡できることを確認した。カメラや背景が移動することを想定した光ビーコンシステムを、市販のカメラを用いて構築することが可能になれば、光ビーコンシステムを安価な構成で利用できるようになる。特に、小型カメラを頭部や手持ちの小型端末に付けることでユーザの周囲の状況を認識する技術へ要求がある AR システムにおいて、その適用範囲を広げることができる。

一方で、手に持ったカメラに対して振るような激しい動きを加えた際には光ビーコンが正常に検出・追跡できず、このような激しい動きがカメラに加わることを想定したシステムへは提案手法が適用できないことが明らかになった。また、評価実験の際、推定された点滅周波数に $\pm 0.5[\text{Hz}]$ 程度のばらつきが観測されることがあった。この現象は提案手法における処理フレームレートが安定していないことが原因と考えられる。この課題についてはフレームレートを安定させる処理を加えた上で、改めて評価を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 椎尾一郎. RFID タグを利用したインタフェース. 情報処理学会研究報告, Vol.45, No.2, pp.160-163, 2004.
- 2) 暦本純一. 2次元マトリックスコードを利用した拡張現実感の構成手法. インタラクティブシステムとソフトウェア IV, pp199-208, 1996.
- 3) D.J.Moore, R.Want, et al. Implementing Phicons: Combining Computer Vision with Infrared Technology for Interactive Physical Icon. Proceedings of ACM UIST '99, Ashville, N.C., November 8th-10th, pp.67-68, 1999.
- 4) 田浦善弘. テンプレート追跡による光学タグ認識. 北陸先端科学技術大学院大学 知能社会システム学専攻 修士論文. 2004.
- 5) 青木恒. カメラで読み取る赤外線タグとその応用. インタラクティブシステムとソフトウェア VIII, pp.131-136, 2000.
- 6) 岸野泰恵, 塚本昌彦, 坂根裕, 西尾章治郎. ウェアラブル環境のための LED を用いたビジュアルマーカ. 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.12, pp.3188-3196, 2003.
- 7) 山本幸司, 香川景一郎, 前田勇希, 政木康生, 三宅康也, 田邊英樹, 布下正宏, 太田淳. 「オプトナビ」システム: ID 受信可能な CMOS イメージセンサを用いた情報家電用ビジュアルマルチリモコン. 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, Vol.2005 年通信, No.2(20050907) pp. 287. 2005.
- 8) 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イメージセンサ. インタクション 2002, pp.9-16, 2000.