

ToF方式のデプスカメラで読み取る 小型で低消費電力なタグ

真鍋 宏幸^{1,a)} 山田 渉¹ 稲村 浩^{1,†1}

受付日 2016年12月2日, 採録日 2017年7月4日

概要: 奥行き情報を取得することのできる ToF (Time-of-Flight) 方式のデプスカメラが注目されている。すでにスマートフォンへの実装も試みられており, 将来的にはデプスカメラが日常的に利用されるようになる。我々は予想している。本稿では, デプスカメラで読み取る液晶シャッターと再帰性反射材を組み合わせたアクティブタグを提案する。提案するタグは, 小型で低消費電力, 読み取り可能範囲が広く, 景観への影響が小さい, という特徴がある。プロトタイプを製作し, 1 cm 角のタグであっても 8 m の距離から読み取ることができること, 消費電力が $1.5 \mu\text{W}$ 程度と小さいことを確認した。いくつかのアプリケーション事例を通じて, 提案手法が実用的なユビキタスコンピューティング環境を構築するうえで有用であることを示す。

キーワード: デプスカメラ, タグ, 液晶, PDLC

Small and Low Powered Tags Read by ToF-based Depth Sensing Camera

HIROYUKI MANABE^{1,a)} WATARU YAMADA¹ HIROSHI INAMURA^{1,†1}

Received: December 2, 2016, Accepted: July 4, 2017

Abstract: The depth sensing cameras based on Time-of-Flight give an additional dimension to regular RGB images. It has been already equipped on the smartphone and we assume that the depth sensing cameras will become ubiquitous devices. Active tags with liquid crystal shutters and retroreflectors that are read by the depth sensing camera are proposed. The tags are small and low-powered, have a wide readable range and little impact on the environments. The experiments using several prototypes confirmed that the small tag was successfully read at 8 m and its power consumption was about $1.5 \mu\text{W}$. The proposed tag system will be effective to build a practical ubiquitous computing environment.

Keywords: depth sensing camera, tag, liquid crystal, PDLC

1. はじめに

あらゆるデバイスがインターネットに接続する IoT (Internet of Things) [3] が注目を集めている。Weiser がユビキタスコンピューティングを提唱 [34] してから四半世紀が過ぎ, ようやく身の回りにある様々なデバイスにコン

ピュータを搭載することが現実的になってきたといえるだろう。ユーザと世界中の文書や情報を結び付けた World Wide Web が現代社会に不可欠なものとなったように, 現実のオブジェクトと情報を結び付けることが, ユビキタスコンピューティングの重要な基盤となる。それにより, AR (Augmented Reality, 拡張現実感) や, ユーザの状況に応じた適切なサービスを提供できるようになる。オブジェクトと情報を結び付ける典型的な手法は, 画像を用いてオブジェクトや風景を認識することである。画像認識は古くから数多くの研究が行われており, 最近ではマーカを用いることなく高度な画像認識を行うことも可能となっ

¹ NTT ドコモ先進技術研究所
Research Labs, NTT DOCOMO, Yokosuka, Kanagawa, 239-8536, Japan

^{†1} 現在, 公立はこだて未来大学
Presently with Future University Hakodate

^{a)} manabehiroyuki@acm.org

る [5], [12], [22]. しかし, 認識率や計算コスト, 処理時間や頑強性の観点から考えると, 人工的なマーカやタグ (以降, タグで統一する) を付与したうえでオブジェクト認識を行う方が今のところ現実的である. たとえば, 商品を外装から認識することもできるが, 外装に印刷されているタグ (バーコード) を読み取るようにすれば, 安価なシステムで素早く正確に商品を認識することができる. AR アプリケーションでは, オブジェクトとの距離がある程度離れていても, 正確かつ頑強に認識できることが求められるため, 比較的大きなビジュアルタグが用いられることが多い. また, 環境中に無数に配置したカメラで常時オブジェクトをトラッキングしておくことも不可能ではないが, オブジェクトに無線タグを付与しておけば, 直接視認できなくてもつど検出できるようになり, オブジェクトを探すアプリケーション, たとえば紛失物や捜し物の検索, として有用である. これまで, 多くのタグが提案されてきており, それぞれコストや検出性能などの特性が異なっている. その中から適したタグを選択することで, 様々なアプリケーションが実現されてきた.

ここで, 多数の本が収納されている本棚の中から所望の本を探し出すアプリケーションを考える. 本の背に記載されているタイトルを目視で順次確認していくことで, 所望の本にたどり着くことができる. 画像認識技術を用いて, この作業を支援することができる. たとえば, 画像からタイトルを認識することもできるし, 図書館に配備されている本などのように, 背にラベルやタグが貼られている場合にはそれらを認識することもできる. しかし, 本の背は大きさが限られているため, そこに記載されているタイトルや貼られたラベルは比較的小さく, 画像から読み取るためには, 超高解像度のカメラを用いるか, 接近して順次画像を撮影する必要がある. そのため, 通常使われているカメラを想定した場合には, 目視で順次確認していくのとほぼ変わらない手間がかかってしまう. このアプリケーションで必要とされるのは, 遠距離からでも位置と ID の検出が可能で小型のタグであり, かつ低コストで, 誰もが利用できることである. そのようなタグがあれば, ユーザは本棚の前でタグを読み取りを行うことで, 本棚のどこに所望の本があるのかを知ることができ, 即座に本を手にすることができる. これまで様々なタグが提案されてきたが, このようなアプリケーションに適したタグはなかった. たとえば, 通常のビジュアルタグではタグの大きさと読み取り可能距離にトレードオフがあり, 無線タグは読み取り可能距離も長く小型化が可能であるが, 厳密な位置の特定ができないという欠点がある.

本稿で提案するタグは, 液晶シャッタと再帰性反射材および電源を備えたアクティブタグであり, それを ToF (Time-of-Flight) 方式のデプスカメラで読み取る. このタグは, 情報を時間軸上に埋め込んでいるため, 小型化しても

遠距離から読み取ることができる. また, タグは安価に製作することが可能であり, 低消費電力であるためメンテナンスコストも低い. 我々は, ToF 方式のデプスカメラは将来すべてのスマートフォンなどに実装され, 日常的に利用されると予想しており, タグを読み取るための専用のリーダを持ち歩く必要がない. 本稿では, 提案するタグの動作原理, 製作したプロトタイプを用いた性能評価, そして提案タグを用いることで実現されるアプリケーションについて述べる. なお, 本研究の一部は国際会議で発表済み [17] であり, 本稿ではその内容に加え, タグの改良, 具体的には読み取り可能範囲の拡大および消費電力の低減, について報告する.

2. 関連研究

提案手法は, 液晶シャッタを用いたアクティブタグと ToF 方式のデプスカメラの組合せであり, 関連研究もタグとデプスカメラ (奥行き情報の取得) の 2 つの領域にまたがっている. 以下で, それぞれの関連研究について述べる.

2.1 タグ

情報を視覚的に伝えるビジュアルタグは, すでに世の中で広く利用されている. たとえば, バーコードや QR コード [1] などは, 多くの商品パッケージに印刷されているほか, それらをディスプレイに表示して機械可読な情報提示手段としても利用されている. これらのタグは安価であり, カメラがあれば容易に利用可能できるため, AR [10], [28], [30] や屋内測位 [21] などへの応用も行われてきた. しかし, 画像から情報を読み取るためにはタグが数十ピクセル各の大きさで撮影される必要があり, 遠距離からの読み取りが困難であるという欠点がある. また, 通常のビジュアルタグは暗い環境では読み取ることができなくなることや, タグの人工物的, 機械的な見た目が周囲の環境と調和しにくいという欠点もある. 不可視なタグ [21] を用いることもできるが, 遠距離からの読み取りが困難であることは変わらない.

RFID や Bluetooth, WiFi などの無線技術を用いたタグは, 小型化が可能, オクルージョンに対しても頑強という特徴があり, さらに, 広く普及しているスマートフォンで読み取ることができるという利点もある. インタラクションへの応用 [25], [31] のほか, 測位 [13], [29] にも利用することができる. タグと読み取り機との位置関係がある程度推定することはできるが, 身の回りにあるオブジェクトを用いた AR や前述した本探しのように厳密な位置検出が要求されるアプリケーションに適用することはできない.

LED (light emitting diode) を組み込んだタグを用いて光通信を行う手法も提案されてきた [15], [18]. 通常のビジュアルタグが空間的に情報を埋め込んでいるのに対し, 光通信では時間軸上に情報を埋め込む. そのため, 画像中で LED が 1 ピクセルでしか検出されない場合であっても

情報を読み取ることができ、読み取り可能距離を延ばすことができる。また、無線タグが位置関係を推定できないのに対し、光通信を用いればタグの正確な位置を検出することができる。これらの特性はARアプリケーションに適しているが、光源の消費電力が大きく、タグの小型化に限界がある。タグの点滅周期を高速化することで情報量あたりの消費電力を削減することができるが、読み取りに高速カメラが必要になってしまう。また、一般的にLEDの指向性は狭いため、読み取り可能な角度に制限が生じるという課題もある。CMOSのラインスキャン特性を利用することで、通常のカメラを用いて高速な光通信を行う方法[2]も提案されているが、画像上の広い領域で同一の光を受け取る必要があり、遠距離にある小型オブジェクトへの適用は難しい。外部環境にある光源からの光を受け取るタグも提案されている[14], [25], [26]。タグが光源を持たないため、消費電力の削減が期待できるが、タグには光通信の読み取り機能と読み取った結果を通知する機能が必要であり、省電力化をとともなう小型化は難しい。再帰性反射材と液晶シャッタを組み合わせたタグも提案されている[20], [23], [33]。光源はタグ読み取り機に設置されており、光源からの光を液晶シャッタで変調することでタグの情報を伝達する。液晶シャッタは低消費電力で駆動することができるため、太陽電池モジュール[20]やRFIDリーダ[23]から供給される電力でタグを駆動することができる。この手法の課題は、タグリーダに光源が必要であるという点である。通常のカメラを使う場合にはフラッシュを常時点灯させておかなければならず、電源容量に制限のあるスマートフォンなどで利用することは難しい。また、通常の液晶では透明な状態であっても光の透過率は50%以下になってしまうため、光の利用効率が低いという課題もある。この課題に対して、PDLC (polymer dispersed liquid crystal. 高分子分散型液晶)を用いる方法がある。PDLCは、光の拡散と透過を制御する液晶の一種であり、50%以上の透過率を得ることができる。通常はプライバシガラスとして利用されることが多いが、動的に制御可能なスクリーン[8]やプログラマブルな窓[27]にも適用されてきた。また、PDLCをシャッタとして利用することもでき[6], [24]、PDLCと再帰性反射材の組合せを他の手法と比較した研究[32]も行われている。

他にも、Mohanらが提案したBokode[19]がある。これは、人の目には点光源にしか見えないが、情報を空間的に埋め込んでいるユニークなタグである。タグが疎に配置されている場合には有効であるが、密に配置されている場合には複数のタグが(読み取り面上で)重畳してしまう。また、読み取り可能な角度も 20° までに制限されてしまうという欠点がある。

2.2 奥行き情報の取得

通常の画像に奥行き情報を加えることで、より高度なイ

ンタラクションを実現することができる。たとえば、オブジェクト表面へのマルチタッチ入力[7]、高精細な屋内環境の3次元構造を素早く取り込み、実環境全体を使ったARアプリケーション[9]が可能となる。ステレオカメラを使うことで奥行き情報を取得することができるが、1台のカメラで撮影した動画から奥行きを検出することもできる[5], [12], [22]。また、赤外光を利用したデプスカメラによって奥行き情報を取得することもできる。たとえば、MicrosoftのKinect version 1は、赤外光を用いてランダムなドットパターンを描き、そのパターンを読み取ることで奥行き情報を取得している。SoftKineticのDS325では、照射した赤外光がオブジェクトで反射して戻ってくるまでの時間から奥行き情報を取得している(ToF方式)。すでに、Googleはデプスカメラを実装したスマートフォンやタブレットのプロトタイプを製作しており*1、Lenovoはデプスカメラを実装したスマートフォンを2016年に市販するとアナウンスしている*2。現在市販されているデプスカメラでは、奥行き情報を取得するカメラと色情報を取得するRGBカメラとが個別に実装されているが、両カメラを統合することもすでに試みられている[11]。

3. 提案手法

前述した本探しアプリケーションで要求されるタグは、遠距離からでも位置と情報の読み取りが可能、小型かつ低コスト、誰もがいつでも利用できることが必要である。既存のタグを用いた場合、要件の一部を満たすことはできるが、すべてを満たすことできない。たとえば、ビジュアルタグでは遠距離から読み取れない、無線タグでは正確な位置検出が行えない、LEDを組み込んだ光通信タグでは小型化が困難、液晶シャッタと再帰性反射材を用いたタグでは常時照明光を発するリーダが必要である。

ここで、我々はその有用性から今後広く普及すると考えられるToF方式のデプスカメラに着目する。すでにスマートフォンへの実装が行われており、対応するアプリケーションが増えていくことで、デプスカメラを搭載したスマートフォンの数も増えていくだろう。さらに、RGBカメラと統合されたデプスカメラモジュールが量産されていけば、将来すべてのスマートフォンに搭載されているカメラ、またスマートフォン以外に用いられているカメラの多くが、統合されたデプスカメラに置き換わっていくことも考えられる。そのような将来では、誰もがいつでもどこでも気軽にデプスカメラを利用することができるようになる。

奥行き情報を取得するセンサであるデプスカメラの計測原理は、RGBカメラとは異なっており、短い時間幅のパ

*1 Google, Tango. <https://get.google.com/tango/> (2016年10月にアクセス)

*2 Lenovo, Phab 2 Pro. <http://shop.lenovo.com/us/en/tango/> (2016年10月にアクセス)

ルス光を散発的に照射しているというユニークな特徴がある。この光を利用して、液晶シャッタと再帰性反射材を用いたタグを撮影すれば、タグを点滅する点として観察することができる。点滅のパターンにタグの情報を埋め込めば、デプスカメラを用いてタグから情報を読み取ることができる。

つまり提案手法は、ToF方式のデプスカメラと、液晶シャッタと再帰性反射材を用いたタグの組合せである。提案手法は、本探しアプリケーションの要求事項を満たす。また、奥行き情報の取得とタグの読み取りはそれぞれ異なる原理に基づいて行われるため、両者を同時に行うことができる。それだけでなく、デプスカメラが赤外光を利用していることから、タグを人の目から隠蔽することもできる。さらに、液晶シャッタにPDLCを用いることで光の利用効率が向上し、読み取り可能距離が拡大するとともに、後述するように、タグが動作しているときでも目障りではなく、人に対して常時視覚情報を提示することもできる。

このタグは環境光も変調するため、通常のRGBカメラを用いても読み取りが可能である。すでに人々はスマートフォンに搭載されたカメラを常時持ち歩いているという要件にも合致する。しかし環境光のみを用いた場合には、カメラが受け取る光量の変化が小さいため、タグの発見や長距離での読み取りが困難となる。カメラのフラッシュなどカメラ側の光源を使うことで光量の変化を増大させることができるが、フラッシュを常時点灯しておく必要があり、消費電力や周辺環境との調和の観点から現実的ではない^{*3}。また、赤外線光源と赤外線カメラを用いた場合に、タグの発見が困難になることはすでに文献[17]で報告している。ToF方式のデプスカメラを用いれば、上記の問題が生じないだけでなく、タグの3次元位置計測や長距離での読み取りも可能となる。

3.1 PDLC とタグの構成

PDLCの様子(左がON, 右がOFF)を図1に示す。上段図は、PDLCがONとOFFのときの遠方背景の見え方の違いを示している。ONのときには光が透過するために背景が明瞭に見えるが、OFFのときには光が拡散するために背景は見えなくなる。中段図は、PDLCの直下に紙に印刷したビジュアルタグ、白および赤の再帰性反射材を配置したときの様子を示す。PDLCに近接している場合には、ONでもOFFでも見え方に大きな変化は見られない。再帰性反射材がある場合には、照明光と観察位置の関係によって見え方が変化する場合があるが、少なくとも色情報は保持される。一方、通常の液晶シャッタの直下に白および赤

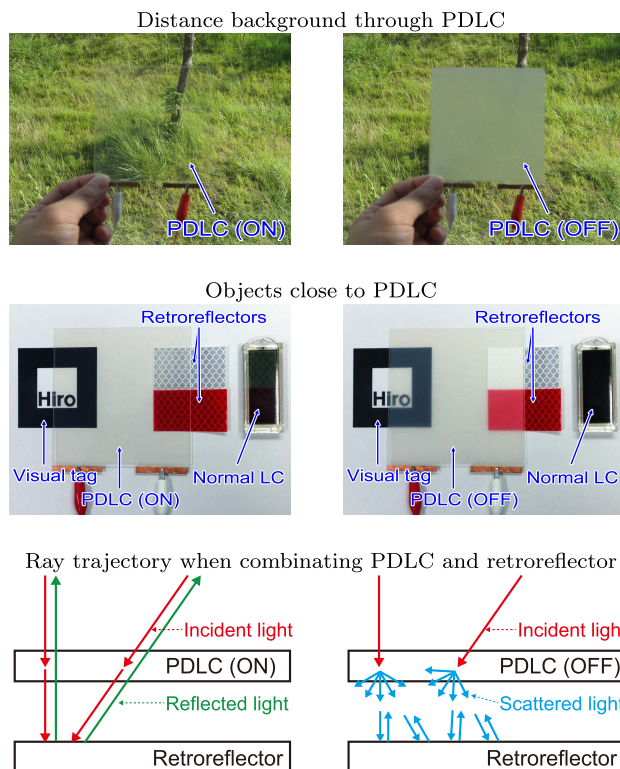


図1 PDLCがON(左)とOFF(右)のときの違い。PDLCがONのとき、遠方の背景ははっきりと見えるが、OFFのときには背景は見えない(上段図)。対象物が接近している場合、PDLCを用いたときにはONでもOFFでも見え方はあまり変わらないが、通常の液晶シャッタではOFFのときに色情報が失われる(中段図)。提案するタグの構成であるPDLCと再帰性反射材を組み合わせた場合、ONのときには強い光が光源に戻る(下段図)。なお、本図はPDLCおよび提案タグの動作を表したものであり、デプスカメラで撮影したときの様子は図5で示す

Fig. 1 PDLC operation. The left figures correspond to ON state (transparent), the right OFF state (scattering).

の再帰性反射材を配置した場合(左右の中段図の右端)には、ON時であっても光の透過率が低く、OFF時には黒一色となり色情報が失われることが分かる。つまり、PDLCを用いることでシャッタ動作にともなう外観上の変化を軽減することができ、直下に配置されている文字やピクトグラムなどの視覚的な情報を提示し続けることができる。

図の下段には提案タグの構成を示した。分かりやすくするために、図ではPDLCと再帰性反射材の間に空間を設けているが、実際のタグでは両者は接触している。PDLCがONのときには強い光が光源に戻るが、OFFのときにはPDLCで2回拡散することになるため、光源に戻る光はごくわずかとなる。

PDLCは数十Vの電圧で駆動させることが多いが、タグに適用することを考えると駆動電圧は低い方が望ましい。そこで、バッテリーでも駆動できる低電圧型のPDLC^{*4}を用いることとした。図2に、中心電圧が0Vとなる60Hzの

^{*3} 厳密には、フラッシュの点灯はカメラの露光時間の間だけで十分である。しかし一般に、人間が視聴する動画を撮影するために用いられるRGBカメラの露光時間は、ToF方式のデプスカメラよりもはるかに長い。

^{*4} 正興電機製作所が製造。

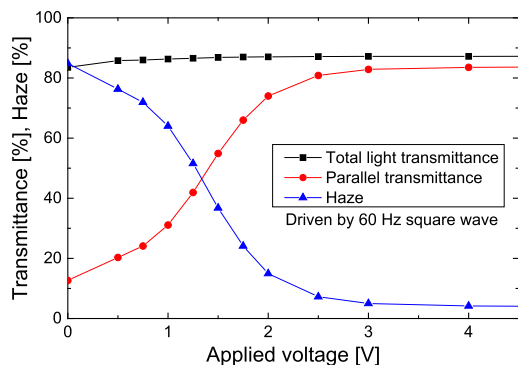


図 2 用いた PDLC の光学特性. 3V (6V_{p-p}) 以上の電圧を印加すれば, 平行光線透過率は 80%以上となり, バッテリでも十分に駆動可能である

Fig. 2 Optical characteristics of the PDLC used in the tag.

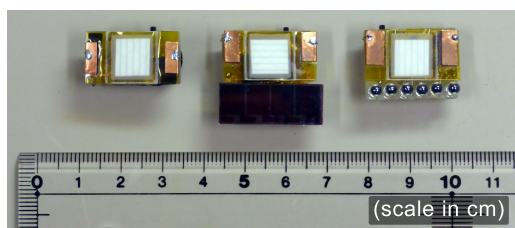


図 3 初期プロトタイプ. 左から, リチウムコイン電池, アモルファス太陽電池, 単結晶シリコン太陽電池で駆動する

Fig. 3 Developed initial tags.

矩形波で PDLC を駆動したときの, 印加電圧と透過率 (全光線, 平行光線) およびヘイズを示す. 3V (6V_{p-p}) 以上の電圧を印加したときの平行光線透過率は 80%を超えており, バッテリでも十分に駆動できることが分かる.

3.2 実装

PDLC を用いたタグの実装を行った. 2段階の実装を行い, 動作確認のための初期プロトタイプと, タグの性能向上を目指した改良型プロトタイプを製作した. いずれのプロトタイプもマイコン*5を内蔵しており, PDLC の ON/OFF の制御を自由に行うことができる.

初期プロトタイプを図 3 に示す. 3種類のタグは電源が異なっており, 左からリチウムコイン電池*6, アモルファスシリコン型太陽電池*7, 単結晶シリコン型太陽電池*8で駆動する. 2種類の太陽電池を用いたのは赤外光に対する発電能力が異なるためであり, 単結晶シリコン型太陽電池ではデプスカメラが照射する赤外光が発電に寄与する可能性がある. PDLC が有効に機能する領域は 9~10mm 角であり, その直下に 8mm 角の再帰性反射材を配置してある.

図 4 に, 改良型プロトタイプを示す. 左から, 初期プロトタイプに対応するタグ (標準タグ), 正面に標準タグを配

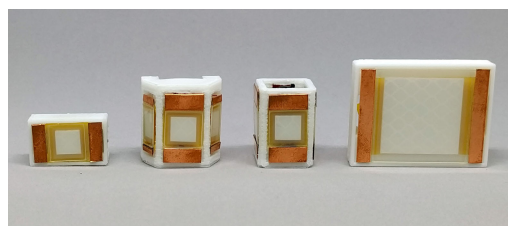


図 4 改良型プロトタイプ. 左から, 初期プロトタイプ相当の標準タグ, 3面タグ, 4面タグ, 大型タグ

Fig. 4 Improved tags.

置し, 60度傾いた左右2面に小型 PDLC と 4×8mm の再帰性反射材を配置した 3面タグ, 4面に標準タグを配置した 4面タグ, そして大型 PDLC と 25×25mm の再帰性反射材を配置した大型タグである. 改良型プロトタイプはすべてリチウムコイン電池で駆動し, 後述する消費電力を削減する PDLC 駆動方式を適用することができる.

コイン電池駆動の初期プロトタイプと改良型プロトタイプでは, 3V の電源電圧を使い, PDLC の両端の電位を 0 もしくは 3V にすることで, 6V_{p-p} の矩形波駆動を可能としている. 一方, 太陽電池で駆動する 2種類の初期プロトタイプでは, 屋内の照度から直接 3V を得ることができないため, 昇圧回路を用いて PDLC を駆動する電圧を得ている. また, 電圧のモニタリングを行い, 電圧が高い場合にはマイコンのペリフェラル回路を起動することで消費電力を増大させて電源電圧を低下させ, 電圧が低い場合には PDLC の駆動を停止して電圧の回復を待つ機能を組み込んでいる.

タグの読み取りには, 市販されている ToF 方式のデプスカメラ, Softkinetic の DS325 を用いた. デプスカメラの画角は 74×58 度であり, 解像度は 320×240 ピクセル, フレームレートは 60 fps まで対応している. データシートに記載されている奥行き検出距離は 0.15 から 1.0m である. なおこれは, 奥行き検出が可能な対象物までの標準的な (高い信頼度をともなって計測可能な) 距離であり, その範囲外には赤外光が届かない, 奥行きをまったく計測できないということではない. 同カメラは RGB カメラも備えており, 通常の RGB 画像と奥行き情報を画像化したデプスマップを同時に出力できる. さらに, 各ピクセルごとの奥行き情報の信頼度を画像化した信頼度マップ*9や, ピクセルごとに測定値が飽和しているかどうかの判定結果*10 (以下, 飽和マップ) を得ることができる. ただし, 赤外線反射光の強度画像そのものを取得することはできない. 画角内のすべての対象物が適切な距離にある場合, 信頼度

*9 Texas Instruments 社 (TI) の資料 (Introduction to the Time-of-Flight (ToF) System Design) によれば, 信頼度は反射光の強度を表す. ただし, TI のこの信頼度と用いたデプスカメラが出力する信頼度が一致するかどうかは不明である.

*10 前述の TI 社の資料によれば, 反射光強度が強く, well capacity と呼ばれる閾値を超える場合には, 測定値が飽和する. 用いたデプスカメラでは, 飽和したピクセルはデプスマップ上で特定の値をとる.

*5 Microchip, PIC12LF1840
 *6 CR1025
 *7 パナソニック, AM-1456
 *8 スフェラーパワー, スフェラーワン

マップ上のすべてのピクセルの値一定値以上となる。デプスマップ上のピクセルは、データシートに記載の奥行き検出距離（～1m）を超えた値をとりうるが、距離が離れるほど測定値の信頼度が失われ、信頼度マップ上の対応ピクセルの値が低下する。つまり、デプスカメラの奥行き検出距離を超えた領域からであっても情報を取得することが可能である。一方、近すぎる対象物に対しては、デプスマップ上のピクセルは飽和を意味する値となり、奥行き情報を取得することはできない。このとき、信頼度マップ上の対応ピクセルの値は0となる。

4. 評価

製作したプロトタイプを用いて、読み取り可能範囲および消費電力の評価実験を行った。

4.1 デプスカメラから見るタグ

初期プロトタイプを用いて、PDLCがONおよびOFFのときに得られる信頼度マップを図5に示す。タグは、その正面がカメラ画像の中央に写るように配置した。一般に、対象物で反射した光が強いほど、検出した奥行き情報の信頼度が向上するので、信頼度マップは反射光の強度を表す指標として利用することができる。信頼度マップは各ピクセルの値を0から255の値に正規化して8ビット画像としており、タグとデプスカメラ間の距離を0.5から10mまでの5通りに変化させている。距離が2.5m以上の場合には、PDLCがONのときにタグは明るく、OFFのときには暗く観測される。10mの距離であっても、PDLCのONとOFFの間で信頼度に変化が見られる。デプスカメラの距離検出範囲は1mまでであるにもかかわらず、それよりもはるかに遠い位置にあるタグの状態検出が可能である。また、デプスカメラの画角と画素数から計算すると、初期プロトタイプの再帰性反射材（8mm角）は約1.7m離

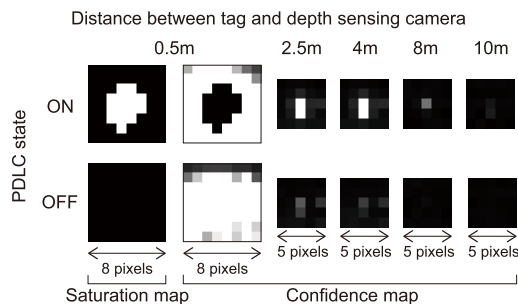


図5 PDLCがONおよびOFFのときの信頼度マップ。タグとデプスカメラの距離が2.5m以上の場合には、PDLCがONのときにはタグが明るく見え、OFFのときには暗く見える一方、距離が0.5mである場合には、反射光強度が強すぎるために測定値が飽和し信頼度が反転する。距離が0.5mの場合に飽和マップで観察すると、距離が長いときの信頼度マップと同様な結果が得られる

Fig. 5 Examples of the images (maps) in various distances.

れたときに画像中の1ピクセルの面積に相当し、4, 8mの距離ではそれぞれ0.2, 0.05ピクセル程度となる。このことから、タグの物理的な大きさが画像中の1ピクセルよりも小さくても、デプスカメラではその状態変化をとらえることができることが分かる。

一方、距離が0.5mの場合には、信頼度マップの状態が反転しており、PDLCがONのときに暗く、OFFのときに明るく観測される。この現象は、以下のように解釈することができる。0.5mの距離はデプスカメラの距離検出範囲内であり、通常の物体表面であっても高い信頼度が得られる。PDLCがOFFのときには、通常の物体表面とほぼ同等になるので、タグは明るく観測される。一方、PDLCがON時には、再帰性反射材で反射した光が強すぎるためにダイナミックレンジを超過してしまい、結果的に信頼度は低下する。図には、0.5mの距離での飽和マップの結果も示している。飽和しているピクセルを255、飽和していないピクセルを0（以下、これを飽和値と呼ぶ）として画像化している。この飽和マップを用いれば、距離が長いときの信頼度マップと同様な結果が得られる。

PDLCのONとOFFを0.5秒おきに切り替えたときに観測される信頼度の時系列変化を図6に示す。PDLCの動作に応じて信頼度が変化していることが分かる。ただし距離が2.5mの場合には、ON時には信頼度が上限で飽和しており、OFF時であっても比較的高い値となるため、ONとOFFの差は4mのときと比べて小さくなっている。また、PDLCのOFFからONへの状態変化は素早く行われるが、ONからOFFへの変化は遅いということも分かる（別な計測を用いて、前者が約20ms、後者は約170msであることを確認している）。先に示したように、距離が0.5mのときには信頼度の変化が反転しており、上図に示した飽

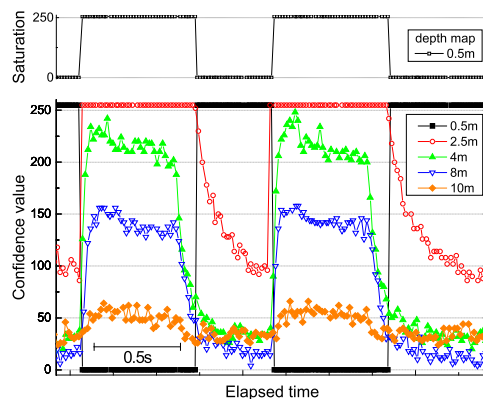


図6 0.5秒おきにPDLCの状態を変化させたときに観測される信頼度の時系列変化。PDLCの状態変化に合わせて信頼度に変化している。0.5mの距離では信頼度が反転しているが、上図に示す飽和値では同様な結果となる。また、今回用いたPDLCには、OFFからONへの変化は速いが、ONからOFFへの変化は遅いという状態遷移速度の非対称性がある

Fig. 6 Confidence value during the tag continued to be switched ON and OFF.

和値では他の距離の信頼度と同様な変化が見られる。

4.2 タグの読み取り

PDLCの状態変化をデプスカメラで観測することができることが明らかになった。そこで、PDLCのONとOFFの2つの状態を用いて情報を伝達することを考える。様々な情報符号化手法が考えられるが、ONからOFF、OFFからONへの状態遷移にビットを割り当てるマンチェスター符号を用いることとした。マンチェスター符号では同じ状態が長く連続することがないため、タグが頻繁に点滅し発見しやすくなることや、PDLCのON状態を維持するための駆動電圧の極性反転をあまり考慮しなくてもよいという利点があるためである。

ビットレートは、PDLCの反応速度とカメラのフレームレートによって制約される。今回使用したPDLCの反応速度は遅いため、ビットレートの上限は数bps程度となる。一方、使用したデプスカメラのフレームレートは最大60fpsであるため、今回のプロトタイプでは律速とはならない。初期プロトタイプを2.1秒間で5ビット送信するよう設定した(2.4bps相当)。スタートビットに1ビットを割り当てているため、有効な情報量は4ビットとなる(以降、タグが送信する情報をタグIDと呼ぶ)。0から15までのタグIDを順次インクリメントしていき、それを2回繰り返したときに正しくタグIDを読み取れた回数をカウントすることで、読み取り性能を評価する(全試行回数32回)。なお、PDLCの反応速度には非対称性があるので(図6参照)、それを補償するようタグ側でONとOFFのタイミング調整を行った。

タグをデプスカメラの画角中央に配置し、タグとデプスカメラ間の距離および角度を変化させたときの、タグID読み取り結果を図7に示す。8mの距離であっても、タグがカメラのほぼ正面であればタグIDを読み取ることができた。タグがカメラに近づくに従い、読み取り可能な角度範囲が拡大しており、2.5mの距離では60度傾いていてもタグIDを読み取ることができる。一方、0.5mの距離では信頼度マップを用いた場合と飽和マップを用いた場合とで読み取り可能な範囲が異なっており、タグが30から60度傾いている場合にはいずれの方法であっても読み取ることができないことが分かる。

同様のタグID読み取り評価を改良型プロトタイプにおいても行った。ただし、改良型プロトタイプではより実践的な設定となるよう、パリティビットを1ビット加えた6ビットを送信することとし、ビットレートも上昇させた(2.2秒で6ビット、2.7bps相当)。図8にその結果を示す。25×25mm角の再帰性反射材を有する大型タグをそのまま利用したときと、大型タグに15×15mmの開口部を設けた紙を貼り付け、擬似的に製作した15×15mmのタグの結果もあわせて示す(以下、両者を区別するために

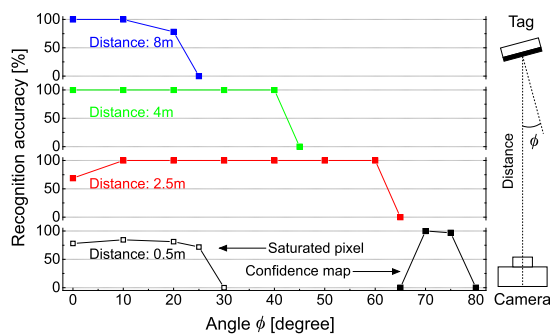


図7 初期プロトタイプを用いたタグの読み取り結果(2.4bps, 5ビット)。タグとカメラの距離が離れるほど、読み取り可能な角度の範囲が狭くなっていくが、8m離れていてもタグから情報を読み取ることができる。一方、0.5mの距離のときには、信頼度を用いた場合と飽和値を用いた場合とで読み取り範囲が異なっており、読み取れない角度範囲が存在する

Fig. 7 Readable range of the initial tag.

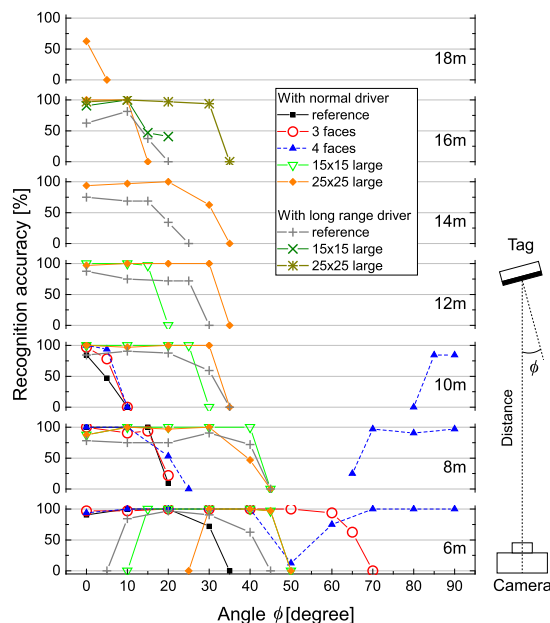


図8 改良型プロトタイプを用いたタグの読み取り結果(2.7bps, 6ビット)。デプスカメラに面している再帰性反射材の面積が大きくなればなるほど、読み取り可能距離が伸びる。また、多面化することで読み取り可能な角度範囲を広げることができる。デプスカメラに長距離用ドライバを適用した場合、標準タグであっても16mの距離からタグIDを読み取れることがある

Fig. 8 Readable range of the improved tags.

25×25mmタグ、15×15mmタグと表記)。予想されどおり、デプスカメラから見える再帰性反射材の面積が拡大することで、読み取り可能範囲が拡大している。たとえば、標準タグの読み取り可能範囲は8から10m程度であるのに対し、15×15mmタグでは12m、25×25mmタグでは16m離れた距離からでも読み取ることができている。多面化することで読み取り可能な角度範囲が広がっており、6mの距離であれば標準タグが30度までなのに対し、3面タグが60度まで、4面タグでは50度を除いたほぼ全域で

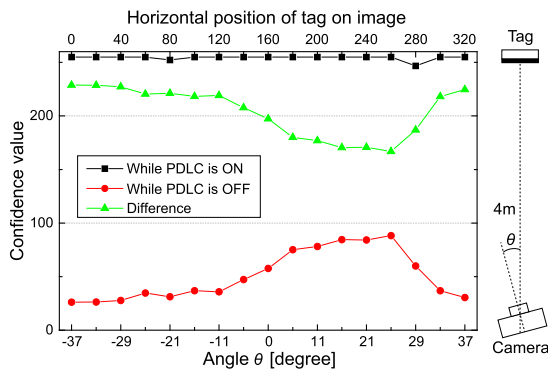


図 9 画像中のタグの位置を変化させたときに観測される信頼度。タグの位置によらず十分な差が確保されている

Fig. 9 Confidence value when the tag located horizontally various positions on the image.

読み取りが行える。図にはデプスカメラのドライバを長距離用のもの*11に差し替えた場合の結果の一部も示す。このドライバはデプスカメラのフレームレートを 60 fps から 15 fps へ低下させる代わりに、奥行き情報取得範囲を 0.7 から 2.5 m へと拡張する（通常のドライバでは 0.15 から 1.0 m）。長距離用ドライバを適用することで、タグの読み取り範囲も格段に広がっており、標準タグであっても 16 m の距離から読み取れることがある。25 × 25 mm タグであれば、16 m の距離からであっても 30 度までの範囲でタグ ID の読み取りに成功している。なお、図には示していないが、15 × 15 mm タグは 20 m、25 × 25 mm タグは 26 m の距離からでも読み取れることを確認している。

これまで行ってきた実験では、タグをデプスカメラの画角中央に配置しており、タグ読み取りに有利な条件である可能性がある。たとえば、照明光に指向性があったり、指向性の補正を行っていないかたりする場合には、画像中のタグの位置によって得られる結果が変わることが予想される。そこで、画像中のタグの位置を変化させたとき（物理的にはカメラを回転させたとき）に得られる、PDLC が ON および OFF のときの信頼度を記録した。結果を図 9 に示す。タグの位置が変化しても、PDLC の状態に応じて異なった信頼度が得られており、画像中のどこにタグがあっても、十分な差が確保されている。照明光の指向性を考慮しなくてもよいことは、デプスカメラを用いることの利点の 1 つでもある。

4.3 消費電力

消費電力は小型化するうえで重要な要素である。提案タグは液晶を駆動すればよいため、消費電力が低いことが期待できる。改良型プロトタイプを用いて、タグ ID として 101110 の 6 ビットを送信しているときの、PDLC に印加する電圧（上図）と、タグに流れる電流（下図）の一例を図 10 に示す。図では、3 種類の駆動方式（図中の Regular

*11 このドライバは開発元から提供された非公式なドライバである。

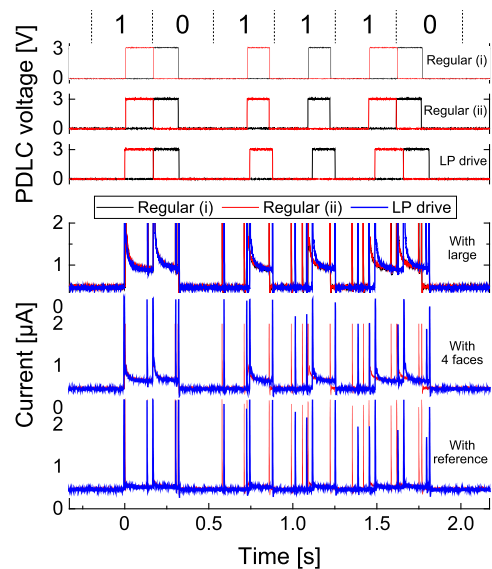


図 10 改良型プロトタイプにおける PDLC の両端電位（上図）とタグに流れる電流（下図）の例。PDLC の両端電位は 0 もしくは 3 V であり、タグ ID 送信中に極性反転を行っている。3 種類の駆動方式の違いについては 4.3.1 項を参照。タグ ID の送信中に見られる突発的な大電流は、印加電圧を変更した際に PDLC に流入する電流と、マイコンのスリープからの復帰に要する電流である。平均電流は 0.5 から 0.8 μA 程度であり、小さなコイン電池でも長時間稼働させることができる

Fig. 10 Voltage of the improved tag (upper) and current flowing to the tag (lower).

(i), Regular (ii), LP drive) を用いた場合の電圧変化と、3 つのプロトタイプに 3 種類の駆動方式を適用した際の電流変化を示した。3 種類の駆動方式については後述することとし、ここではいずれにも共通する事項について述べる。電圧は PDLC の両端それぞれの電圧を表しており、PDLC から見たときの印加電圧は $-3, 0, 3\text{ V}$ のいずれかとなる。マンチェスター符号を用いているため、PDLC に連続的に駆動電圧を印加している時間は長と短の 2 種類あり、長は短の 2 倍となっている（PDLC の反応速度の非対称性を補償するために、この値は多少前後する）。PDLC に限らず多くの液晶では、ON 状態を維持するために印加電圧の極性を反転させ続ける必要がある。しかし、極性反転時には大きな電流が流れるため、頻繁な極性反転は消費電力の増加を招く。そこで、短い電圧印加時間を最小単位として、次の電圧印加時に極性反転するよう設計している。

図 10 の下図は、3 つの改良型プロトタイプに流れる電流を表している。表示の都合上、 $2\ \mu\text{A}$ 以上の範囲については記載していない。一般に液晶はコンデンサと同様な構造をしており、電気特性もコンデンサとほぼ同等である。つまり、印加電圧を変化させる瞬間に大きな電流が流れ、電圧を印加し続けている間はリーク電流が流れる。また、マイコンの間欠動作は消費電力を低減させる有力な方法の 1 つであり、このタグにおいてもマイコンは必要な場面以外ではスリープしている。そのため、タグに流れる電流は次の

4種類に分類することができる。(1)マイコンのスリープ中に流れる電流、(2)マイコンのスリープからの復帰時に要する瞬間的な電流、(3)PDLCをOFFからONに変更する、もしくは極性反転を行う際の瞬間的な電流、(4)PDLCのリーク電流。図から、(1)は約 $0.5\mu\text{A}$ であり、(4)はPDLCの大きさに依存しているが大型タグの場合、約 $0.5\mu\text{A}$ であることが分かる。突発的な大電流は、PDLCがOFFからONに変わるときおよびON状態での極性反転時に見られる(2)と(3)の組合せと、PDLCがONからOFFに変わるときおよびタイミング調整のためにマイコンが一時的に復帰するときに見られる(2)に対応する。

タグID送信中に流れる電流の平均値は、標準タグが約 $0.5\mu\text{A}$ 、4面タグが約 $0.6\mu\text{A}$ 、大型タグが約 $0.8\mu\text{A}$ であった。タグの消費電力はタグIDの送信頻度に依存し、たとえば4秒に1回送信する場合(1.8秒間スリープ、2.2秒間ID送信)を考えると、平均で1.5から $2\mu\text{W}$ 程度となる。これは計算上、公称容量が30mAhのCR1025を用いた場合に5年以上の連続稼働が可能であることを意味しており、提案タグが実用的であることを示唆している。また、より小型のバッテリーを用いることで、タグの小型化を進めることも考えられる。それだけでなく、環境発電を用いてタグを駆動させる場合には、小さな発電モジュールを利用できたり、より条件の悪い環境下でもタグを駆動させたりすることができるようになる。たとえば、アモルファスシリコン型太陽電池を利用した初期プロトタイプは60lx、単結晶シリコン型では320lxの照明光下でも、タグIDの送信が可能であった。さらに、単結晶シリコン型太陽電池を利用した初期プロトタイプは、デプスカメラが照射する赤外光で発電することができるため、0.5lxの照明光下であってもデプスカメラとの距離が20cm以内であれば、タグIDを送信できることを確認することができた。

4.3.1 消費電力の低減

タグの消費電力が小さいことは確認できたが、さらに低消費電力化することでタグの小型化や薄型化が期待できる。マイコンがスリープ中に消費している電力量がタグの消費電力量の大半であり、それを削減することが最も効果的である。そのために、マイコンの改良や駆動電圧の引き下げなどの方法が考えられるが、それらは提案タグに限らず一般的なことであり、本タグにも効果的な手法を適用すればよい。そこでここでは、PDLCを駆動するために必要な電力に絞る、その削減手法について検討する。

図10には、3種類の駆動方式の結果を示している。3種類の違いは極性反転時にあり、通常駆動1(図中のRegular(i))では即座に極性を反転させているのに対し、通常駆動2(同Regular(ii))では極性反転時にPDLC両端を短絡させるステップを挿入する。低消費電力駆動手法(同LP drive)は我々が文献[16]で提案した手法であり、極性反転時に(1)PDLCと外部コンデンサとを接続、(2)PDLC

両端を短絡、(3)外部コンデンサを反転させてPDLCを接続、(4)極性反転した電圧をマイコンから印加、というステップを踏む。このステップを実行することで、PDLCに帯電した電荷を外部のコンデンサに回収し、再利用することができる。理想条件を想定すると、通常駆動1と比較して通常駆動2は電流を半分に、低消費電力駆動手法は最大でさらに半分まで削減することができる。文献[16]では、PDLCを常時ONとするために行う定期的な極性反転に適用し、消費電力の削減効果を示した。提案タグにおいても、極性反転を含みON状態が継続する場面では、突発的に流れる電流が通常駆動1、通常駆動2、低消費電力駆動の順に小さくなることを確認することができた(図には示していない)。しかし、提案タグでは常時ONとはならず、タグID送信中であってもOFFとなる期間がしばしば発生し、しかも動作全体で見ればOFFである時間の方が長い。低消費電力駆動を用いた場合、OFFからONに切り替わる場合であっても消費電力低減効果が期待されるが、既存研究[16]ではそれを確認していなかった。図11に、OFFからONに切り替わる場面でのPDLC両端電圧とタグに流れる電流を示す。本図は、図10の0秒付近を拡大した図に相当する。電流には2つのピークが見られるが、 -0.4 から -0.3ms 付近のピークはマイコンがスリープから復帰する際に流れる電流、 0.1ms 付近のピークはPDLCに流れ込む電流に対応している。下図の通常駆動1と通常駆動2は重なっており、両者の間に違いは見られない。一方、低消費電力駆動を用いた場合には、PDLCに供給する

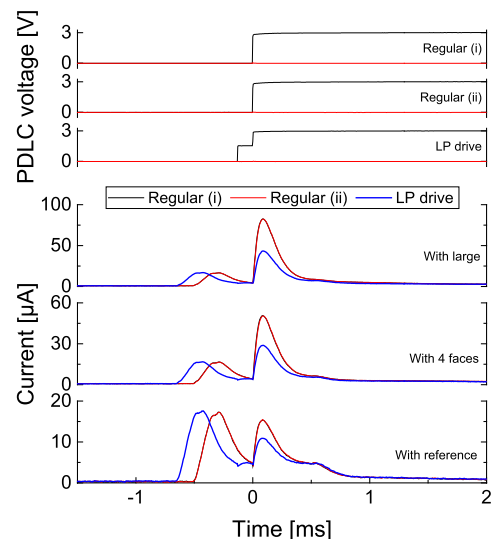


図11 3種類の駆動方式を用いてPDLCをOFFからONに変更するときの電圧と電流。通常駆動1と2ではPDLCに流入する電流は変わらないが、低消費電力駆動を用いた場合には少ない電流でPDLCを駆動することができる。サイズの大きなPDLCでは全体の消費電力を削減することができるが、小さなPDLCではマイコンの駆動時間延長にともなう消費電力増加と相殺される

Fig. 11 Voltage and current with the three driving techniques.

電流が低く抑えられている。PDLC のサイズが大きく流入する電流が大きい場合には、低消費電力駆動を行うことによって全体の消費電力を低減させることができるが、サイズが小さい場合にはマイコンの駆動時間が延長することにもなう消費電力の増加分と相殺されてしまい、全体の消費電力を削減することはできていない。しかし、将来的にマイコンの消費電力がきわめて小さくなっていけば、この低消費電力駆動の有用性が増していくはずである。また、外部コンデンサを利用した低消費電力駆動を適用した場合、ステップ数が増えるため極性反転に時間がかかるようになるが、設定したビットレートであればその影響は軽微であり、特に読み取りプログラムのパラメータを変更することなく、読み取り可能であることを確認した。

5. 議論

これまでの実験により、提案したタグは読み取り可能範囲が広く、小型であっても遠距離から読み取ることができること、そしてタグの消費電力は低く、小さなバッテリーを用いることによる小型化や、環境発電を用いた駆動も可能であることが確認できた。ここでは、タグのさらなる展開を見据え、タグ性能の向上とアプリケーションの2つの側面から議論する。

5.1 タグ性能の向上

提案したタグは読み取り可能範囲は広いが、ビットレートが低いことや、動きに対して弱いという欠点がある。伝達できる情報量、読み取りの即時性、タグの発見や追跡の容易さの観点から、ビットレートは高いことが望ましい。現状のビットレートはPDLCの反応速度に律速されており、より高速なPDLCを用いることでビットレートを向上させることができる。たとえば、高い駆動電圧が必要になるものの、1ms程度の高速な応答を示すPDLC [4] もすでに開発されており、ビットレートの高速化は可能である。一方、日常生活の中で広く使用されるカメラのフレームレートは30から60fps程度であり、将来的に広く利用されると想定しているデブスカメラにおいても大きな変化は生じないだろうと考えている。そのため、ビットレートの大幅な向上は見込みにくい。しかし、ビットレートが低いことの欠点の一部は、読み取り可能範囲の広さによって補償することができる。たとえば、道路標識や屋内の看板などにタグを設置し、歩行者のナビゲーション支援を行うアプリケーションを考えた場合、ユーザが視認できないうちからタグIDを読み取り始め、情報を提示する適切なタイミングまでの間にタグIDの読み取りを完了すればよい。さらに、複数のタグを同時に読み取ることができることを考えれば、タグ1つあたりの読み取りに要する時間を低下させ、実効的なビットレートを向上させることもできる。たとえば、本探しアプリケーションでタグがISBNを送信する場

合、読み取りには最低でも13秒程度かかる計算となるが、多数の本を一度に読み取れば、1冊1冊を目視やバーコードで読み取っていくよりも読み取り完了までの時間を短縮できる。また、デブスカメラが環境認識に有効であることを考えれば、タグIDと環境情報の2つを用いてタグを特定することもできる。このような実装を用いれば、情報伝達量が少ないことの制約を緩和し、実効的なビットレートを向上させることができる。

また今後、デブスカメラそのものが改良されていくことで、タグの読み取り性能を向上させることができる。第1に解像度の増大にもなう性能向上があげられる。今回用いたデブスカメラの解像度は低いため、隣接したタグを読み取ることは難しく、一度に読み取れるタグの数にも制限がある。隣接したタグが何ピクセル以上離れていれば両者を正しく読み取れるのかについて、さらなる調査が必要であるが、たとえばタグを10ピクセルの間隔で並べたことを想定すると、それは5mの距離であれば20~30cm間隔に、1mの距離であれば4~6cm間隔に相当する(この場合、読み取り可能なタグの最大数は $32 \times 24 = 768$ となる)。これではまだ、先に述べた本探しアプリケーションを実現するのに十分であるとはいえない。デブスカメラの解像度が上がっていくことで、高密度に配置したより多くのタグを読み取れるようになる。それだけでなく、タグの物理的な大きさが1ピクセル以下となった場合でも読み取れることを考えれば、高解像度化することで1ピクセルに占めるタグの物理的な大きさの割合が上昇し、さらに遠距離からでもタグを読み取れるようになると期待できる。このことは、同距離であればより小型のタグでも読み取れるようになることを意味する。

タグ読み取り性能を向上させるデブスカメラの改良点は他にもある。実験で使用したデブスカメラは赤外光強度画像そのものを出力できないため、代わりとなる信頼度マップを使用した。その結果、近距離での読み取り可能範囲に制限が生じた。今後、タグ読み取りに適したデブスカメラの出力画像が得られたり、パラメータ調整などが行えたりするようになれば、提案システムの性能向上が可能になると考えられる。

今回の実験では、基礎的な性能評価を行うためタグとカメラいずれも固定していたが、現実のアプリケーションに適用する場合、動きに対する頑強性が求められる。そのための方法として、たとえば、デブスカメラもしくはRGBカメラで取得した画像を、画像処理技術を用いて安定化することが考えられる [5], [9]。また、機械的な手ぶれ防止機構も有効であろう。今後、既存技術を活用しながら動きに対する頑強性を確保していくことが必要である。

また、今回の実験により、単結晶シリコン型太陽電池を電源に用いた場合、距離が近ければデブスカメラからの赤外光だけでも駆動できることが分かった。デブスカメラか



図 12 提案タグを用いたアプリケーションの例。常時人への情報提示が可能なタグ (左), QR コードと組み合わせ、距離に応じた情報を提示するタグ (中), タグ ID とタグまでの距離の同時読み取り (右)

Fig. 12 Application examples. Combination with human-visible information (left), QR code (middle), and depth sensing (right).

らの照射光は発電量を増強させるだけでなく、デプスカメラからタグへの情報伝達に利用することもできると考えられる。この機能を使えば、タグとデプスカメラで双方向通信が可能となり、アプリケーションの適用範囲を広げることができる。また、デプスカメラからトリガがかかったときにだけタグ ID を送信するようにすれば、タグの消費電力を削減することもできる。

5.2 アプリケーション

提案手法の特徴は、小型で低消費電力かつ環境中に溶け込みやすいタグを広範囲から読み取ることができると、タグの位置情報 (2 次元もしくは 3 次元) も取得できること、(将来的には) ユーザが常時持ち歩いているデバイスを用いていつでもどこでもタグの読み取りができるようになることなどである。現在の実装ではビットレートが低く、短時間に多くの情報を伝えることができないが、すでに述べたように実効的なビットレートを高める方法がいくつか考えられる。以下で、これらの特徴を活かしたアプリケーションについて議論する。

今後デプスカメラの性能が向上していけば、カメラやオブジェクトに動きが少ない場面、たとえば店舗や博物館などでの物品管理や冒頭で述べた本探しアプリケーションでは、提案したタグシステムを容易に適用することができる。提案タグは激しい動きをとまなうアプリケーションへの適用は難しいが、前述したように、ある程度の範囲までの動きであれば頑強性を確保できると考えている。たとえば屋内測位、歩行者やロボットなどのナビゲーションにも適用することができるだろう。動作中であっても目立ちにくく環境になじみやすいという特徴は、それらのアプリケーションに適している。

アプリケーションのデザインスペースを探求するために作成した 3 つの事例を図 12 に示す。図中の左は、デプスカメラで読み取るタグ ID に加え、ユーザへの情報提示も常時行うタグである。PDLC の動作状況にかかわらず、ユーザは PDLC の直下にあるオブジェクトを視認することが

できる。色つきの再帰性反射材を用いれば、効率を低下させることなく、ユーザへの情報提示が可能であり、屋内標識への適用が考えられる。すでに再帰性反射材が用いられている交通標識の表面に PDLC を配置すれば、標識としての役目を果たしつつ、デプスカメラでタグ ID を読み取ることができるようになる。自動車用センサとして赤外光を用いた Lidar (light detection and ranging) が注目されているが、原理的には Lidar を用いても提案タグを読み取ることができると考えられ、交通標識への適用は有望である。

提案タグを単独で用いるのではなく、他のタグと組み合わせることもできる。図の中央は、QR コードと組み合わせた例である。提案タグの表面に赤外光透過フィルムを配置すれば、可視光領域では黒く見える。この可視域での黒を QR コードの黒い領域に利用することで、遠方からは提案タグのタグ ID が、接近すると QR コードによる情報を読み取ることができる。オブジェクトまでの距離に応じた情報提示に利用することや、タグ ID を用いて QR コードの存在をカメラに積極的に通知することもできる。Bluetooth タグなどの無線タグと組み合わせた場合にも、それぞれの特徴を同時に活かしたアプリケーションを実現することができるだろう。

図中の右は、タグ ID とタグまでの距離を同時に取得している様子 (PC 画面のスクリーンキャプチャ) を示す。すでに述べたように、タグ ID の読み取りと奥行き情報の取得はそれぞれ独立な原理に基づいて行われており、同時に行うことが可能である。つまり、オブジェクトの 3 次元位置とタグ ID の両方を同時に活用することができる。色や立体形状からオブジェクトを認識するのではなく、タグ ID を用いてオブジェクトを特定することで、より実用的なユビキタスコンピューティング環境を構築できるようになると考えられる。さらに、前述したような双方向通信を実装することで、手の届く範囲にあるオブジェクトとインタラクティブなアプリケーションも考えられるだろう。

提案手法は、デプスカメラ画像上のタグ位置を特定することができる。AR をはじめとする多くのアプリケーショ

ンでは、タグ位置をデプスカメラ画像上ではなく RGB 画像に重畳し、ユーザにタグ位置を正確に提示することが重要となる。今回用いたデプスカメラ (SoftKinetic DS325) では、デプスカメラと RGB カメラは異なる位置に配置されている。そのため、タグがデプスカメラの奥行き計測範囲内にあり、その 3 次元位置を求めることができた場合には、RGB 画像上の正確なマッピングができるが、そうでない場合には RGB 画像へのマッピングは不正確なものになってしまう。後者の場合であっても、デプスカメラで取得した (タグ以外の) 奥行き情報と RGB 画像 (もしくは RGB 動画から求めた 3 次元の環境情報) を比較したり、信頼度の変化量からタグまでの大まかな距離を推定したりすることで、RGB 画像上へのマッピング精度を向上させることは可能であると考えられる。しかし、そのそもこの問題は 2 種類のカメラが異なる位置に配置されているために生じている。すでに両カメラを統合することは可能であり [11]、将来的にそのような統合されたカメラモジュールが広く利用されるようになることで、RGB 画像への正確なマッピングが自然に実現されていくと考えている。

6. 結論

ToF 方式のデプスカメラが日常的に利用できる環境を想定し、デプスカメラで読み取る小型で低消費電力なタグを提案した。タグは PDLC を用いた液晶シャッタと再帰性反射材から構成されており、デプスカメラから照射される赤外光の強度を変調することで、タグ ID を送信する。複数種類のプロトタイプを製作し、小型のタグであっても読み取り可能範囲が広く、消費電力が低いことを確認した。奥行き情報の取得とタグ情報の読み取りを同時に行うことができ、環境中に溶け込みやすいという特徴もあり、様々なアプリケーションへの適用が期待できる。提案手法は、将来の実用的なユビキタスコンピューティング環境の構築に貢献すると考えられる。

参考文献

- [1] QR Code 2005 bar code symbology specification, ISO/IEC 18004:2006 (2006).
- [2] Aoyama, H. and Oshima, M.: Visible light communication using a conventional image sensor, *Proc. IEEE CCNC '15*, pp.103–108 (2015).
- [3] Atzori, L., Iera, A. and Morabito, G.: The Internet of Things: A survey, *Computer Networks*, Vol.54, No.15, pp.2787–2805 (2010).
- [4] Date, M., Hisaki, T., Naito, N., Nakadaira, A., Suyama, S., Tanaka, H., Uehira, K. and Koshiishi, Y.: 52.3: Direct-viewing Display Using Alignment-controlled PDLC and Holographic PDLC, *SID Symposium Digest of Technical Papers*, Vol.31, No.1, pp.1184–1187 (2000).
- [5] Davison, A.: Real-time simultaneous localisation and mapping with a single camera, *Proc. CVPR '03*, Vol.2, pp.1403–1410 (2003).
- [6] Drzaic, P.S.: Polymer dispersed nematic liquid crystal

- for large area displays and light valves, *Applied Physics*, Vol.60, No.6, pp.2142–2148 (1986).
- [7] Harrison, C., Benko, H. and Wilson, A.D.: OmniTouch: wearable multitouch interaction everywhere, *Proc. UIST '11*, pp.441–450 (2011).
- [8] Izadi, S., Hodges, S., Taylor, S., Rosenfeld, D., Villar, N., Butler, A. and Westhues, J.: Going beyond the display: A surface technology with an electronically switchable diffuser, *Proc. UIST '08*, pp.269–278 (2008).
- [9] Izadi, S., Kim, D., Hilliges, O., Molyneaux, D., Newcombe, R., Kohli, P., Shotton, J., Hodges, S., Freeman, D., Davison, A. and Fitzgibbon, A.: KinectFusion: Real-time 3D reconstruction and interaction using a moving depth camera, *Proc. UIST '11*, pp.559–568 (2011).
- [10] Kato, H. and Billinghurst, M.: Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system, *Proc. IWAR '99*, pp.85–94 (1999).
- [11] Kim, S.-J., Kang, B., Kim, J.D.K., Lee, K., Kim, C.-Y. and Kim, K.: A 1920x1080 3.65 μm -pixel 2D/3D image sensor with split and binning pixel structure in 0.11 μm standard CMOS, *Proc. IEEE Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers*, pp.396–398 (2012).
- [12] Klein, G. and Murray, D.: Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces, *Proc. ISMAR '07*, pp.225–234 (2007).
- [13] Kulyukin, V., Gharpure, C., Nicholson, J. and Pavithran, S.: RFID in robot-assisted indoor navigation for the visually impaired, *Proc. IROS '04*, Vol.2, pp.1979–1984 (2004).
- [14] Lee, J.C., Dietz, P.H., Maynes-Aminzade, D., Raskar, R. and Hudson, S.E.: Automatic Projector Calibration with Embedded Light Sensors, *Proc. UIST '04*, pp.123–126 (2004).
- [15] Ma, H. and Paradiso, J.: The FindIT Flashlight: Responsive tagging based on optically triggered microprocessor wakeup, *Proc. UbiComp '02*, pp.160–167 (2002).
- [16] Manabe, H., Date, M., Takada, H. and Inamura, H.: Low-Power Driving Technique for 1-Pixel Display Using an External Capacitor, *IEICE Trans. Electronics*, Vol.E98-C, No.11, pp.1015–1022 (2015).
- [17] Manabe, H., Yamada, W. and Inamura, H.: Tag System with Low-powered Tag and Depth Sensing Camera, *Proc. UIST '14*, pp.373–382 (2014).
- [18] Matsushita, N., Hihara, D., Ushiro, T., Yoshimura, S., Rekimoto, J. and Yamamoto, Y.: ID CAM: A smart camera for scene capturing and ID recognition, *Proc. ISMAR '03*, pp.227–236 (2003).
- [19] Mohan, A., Woo, G., Hiura, S., Smithwick, Q. and Raskar, R.: Bokode: Imperceptible visual tags for camera based interaction from a distance, *ACM Trans. Graph.*, Vol.28, No.3, pp.98:1–98:8 (2009).
- [20] Nakamura, Y., Nishimura, T., Itoh, H. and Nakashima, H.: ID-CoBIT: A battery-less information terminal with data upload capability, *Proc. IEEE IECON '03*, Vol.3, pp.2511–2516 (2003).
- [21] Nakazato, Y., Kanbara, M. and Yokoya, N.: Localization system for large indoor environments using invisible markers, *Proc. VRST '08*, pp.295–296 (2008).
- [22] Newcombe, R.A. and Davison, A.: Live dense reconstruction with a single moving camera, *Proc. IEEE CVPR '10*, pp.1498–1505 (2010).
- [23] Noonpakdee, W., Liu, J., Hyun, K.D. and Shimamoto, S.: Hybrid RFID employing optical wireless communication, *Proc. IEEE ICWITS '10*, pp.1–4 (2010).

- [24] Petti, L., Mormile, P. and Blau, W.: Fast electro-optical switching and high contrast ratio in epoxy-based polymer dispersed liquid crystals, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol.39, No.3, pp.369-377 (2003).
- [25] Raskar, R., Beardsley, P., van Baar, J., Wang, Y., Dietz, P., Lee, J., Leigh, D. and Willwacher, T.: RFIG Lamps: Interacting with a self-describing world via photosensing wireless tags and projectors, *ACM Trans. Graph.*, Vol.23, No.3, pp.406-415 (2004).
- [26] Raskar, R., Nii, H., deDecker, B., Hashimoto, Y., Summet, J., Moore, D., Zhao, Y., Westhues, J., Dietz, P., Barnwell, J., Nayar, S., Inami, M., Bekaert, P., Noland, M., Branzoi, V. and Bruns, E.: Prakash: Lighting aware motion capture using photosensing markers and multiplexed illuminators, *ACM Trans. Graph.*, Vol.26, No.3 (2007).
- [27] Rekimoto, J.: Squama: Modular visibility control of walls and windows for programmable physical architectures, *Proc. AVI '12*, pp.168-171 (2012).
- [28] Rekimoto, J. and Ayatsuka, Y.: CyberCode: Designing augmented reality environments with visual tags, *Proc. DARE '00*, pp.1-10 (2000).
- [29] Rekimoto, J., Miyaki, T. and Ishizawa, T.: LifeTag: WiFi-Based Continuous Location Logging for Life Pattern Analysis, *Proc. LoCA '07*, pp.35-49 (2007).
- [30] Rekimoto, J. and Nagao, K.: The World Through the Computer: Computer augmented interaction with real world environments, *Proc. UIST '95*, pp.29-36 (1995).
- [31] Rekimoto, J., Ullmer, B. and Oba, H.: DataTiles: A Modular Platform for Mixed Physical and Graphical Interactions, *Proc. CHI '01*, pp.269-276 (2001).
- [32] Schultz, P., Cumby, B. and Heikenfeld, J.: Investigation of five types of switchable retroreflector films for enhanced visible and infrared conspicuity applications, *Applied Physics*, Vol.51, No.17, pp.3744-3754 (2012).
- [33] Swenson, C.M., Steed, C.A., De La Rue, I.A. and Fugate, R.Q.: Low-power FLC-based retromodulator communications system, *Proc. SPIE*, Vol.2990, pp.296-310 (1997).
- [34] Weiser, M.: The computer for the 21st century, *Scientific american*, Vol.265, No.3, pp.94-104 (1991).



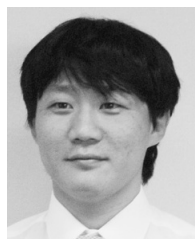
山田 渉 (正会員)

2010年東京理科大学工学部経営工学科卒業。2012年東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻博士前期課程修了。同年株式会社NTTドコモ入社。2017年東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻博士後期課程入学。ユーザインタフェース研究および機械学習に関する研究開発に従事。ACM会員。



稲村 浩 (正会員)

1990年慶應義塾大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。1998年よりNTTドコモ。2016年より公立はこだて未来大学教授。博士(工学)。モバイルネットワーク、スマートデバイスのシステムソフトウェアに関する研究開発に従事。電子情報通信学会、ACM、IEEE各会員。本会業績賞。



真鍋 宏幸 (正会員)

1976年生。1999年東京工業大学工学部卒業。2001年同大学大学院修士課程修了。同年(株)NTTドコモ入社。以来、ウェアラブル/ユビキタスコンピューティング、生体信号を用いた入

力インタフェースの研究に従事。博士(工学)。ACM会員。