

# 複合現実感応用に向けた高速・低輝度IDビーコン検出イメージセンサ

## Smart Image Sensor with High-speed High-sensitivity ID Beacon Detection for Augmented Reality System

学生会員 大池 祐輔<sup>†</sup>, 池田 誠<sup>†,††</sup>, 浅田 邦博<sup>†,††</sup>

Yusuke Oike<sup>†</sup>, Makoto Ikeda<sup>†,††</sup> and Kunihiro Asada<sup>†,††</sup>

**Abstract** In this paper, we present a smart image sensor with high-speed and low-intensity ID beacon detection for an augmented reality (AR) system. AR systems are designed to provide an enhanced view of the real world with meaningful information on a computer. Our target AR system uses an optical device with an ID beacon such as a blinking LED. Our sensor architecture simultaneously achieves analog readout for 2-D image capture and high-speed digital readout for ID beacon detection. The pixel circuit has a logarithmic-response photo detector and an adaptive modulation amplifier to detect the low-intensity ID beacon with a wide range of background illumination. We developed and successfully tested a 128×128 smart sensor. It achieves 20 bytes/ID-frame with a 40 kHz carrier at 30 fps, and less than -10.0 dB signal-to-background ratio (SBR) with more than 40 dB background illumination in robust ID-beacon detection.

キーワード：複合現実感応用，拡張現実システム，光ビーコン，スマートイメージセンサ

### 1. ま え が き

近年，携帯電話やPDAをはじめとする情報端末機器の普及と，そのネットワークインフラの整備により，実世界の情報とコンピュータ世界の情報は，密接に結び付きつつある．そして，実世界とコンピュータ世界の情報を効果的に結び付け提供する拡張現実 (Augmented Reality, AR) システムが注目されている．拡張現実システムでは，我々の活動を支援するための有益な情報をコンピュータ世界から引き出し，実世界へ付加する．そのため，実世界から取得した情報を利用してコンピュータ上のデータベースにアクセスし，得られたコンピュータ世界の情報を効果的にユーザに提供するシステムを実現する必要がある．そして，このような拡張現実システムを実現するいくつかの手法がこれまでに考案されている．ID情報を有する2次元のビジュアルコードを対象に付加するシステム<sup>1)</sup>では，イメージセンサを用いてビジュアルコードからIDを読み取り，認識結果を取得画像に付加する．シーン画像と同時に複数の対象を認識することも可能であ

るが，空間的に情報を有するコードの読み取りは，対象との距離が離れることで測定範囲が広がると困難になる．RF-IDを利用した拡張現実システム<sup>2)</sup>は，対象に多くの情報を付加できる優れたシステムである．一方で，ID読み取り器をタグに近づける必要があるため，その応用範囲は限られており，対象の位置情報をユーザに提供することは困難である．

広範囲にわたるシーン画像と複数対象のIDを同時に取得可能なシステムとして，発光デバイスによる光ビーコンを利用する拡張現実システムが考案されている<sup>3)-5)</sup>．図1に示すように，現在広く使われつつあるLEDなどを中心とした発光デバイスの点滅にID情報をビーコンとして乗せ，イメージセンサを用いてシーンの画像と同時にID情報を取得する．これにより，対象のID情報とともに位置情報を得ることで，取得したシーン画像に付加することで，効果的にコンピュータ上の情報をユーザに提供できる．対象に付加した赤外線ビーコンを通常の30 fpsで動作するイメージセンサで取得するシステム<sup>3,4)</sup>では，十分な情報を高速に取得することが難しく，ビーコン源とイメージセンサを同期させることができて，最大で30 bpsの情報しか受信することはできない．このような通常のイメージセンサでの複数のフレームを用いて，光ビーコンを認識するシステムは，動いている物体を見失う可能性が高いため，対象の移動が限定された環境でのID認識システムに向いているといえる．また，

2003年10月31日受付，2004年1月28日再受付，2004年2月20日採録

<sup>†</sup> 東京大学 大学院 工学系研究科

(〒113-8656 文京区本郷 7-3-1, TEL 03-5841-6719)

<sup>††</sup> 東京大学 大規模集積システム設計教育研究センター

(〒113-8656 文京区弥生 2-11-16, TEL 03-5841-8901)

<sup>†</sup> Department of Electronic Engineering, University of Tokyo

(7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656)

<sup>††</sup> VLSI Design and Education Center (VDEC), University of Tokyo

(2-11-16 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656)

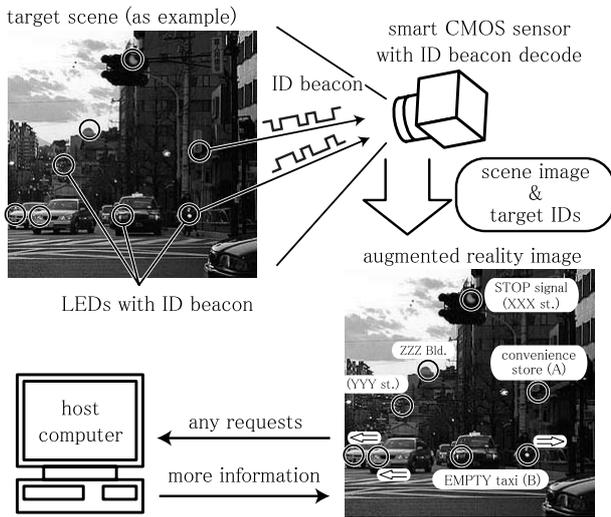


図1 発光デバイスを利用した拡張現実システムの例  
An example of augmented reality system with active optical devices.

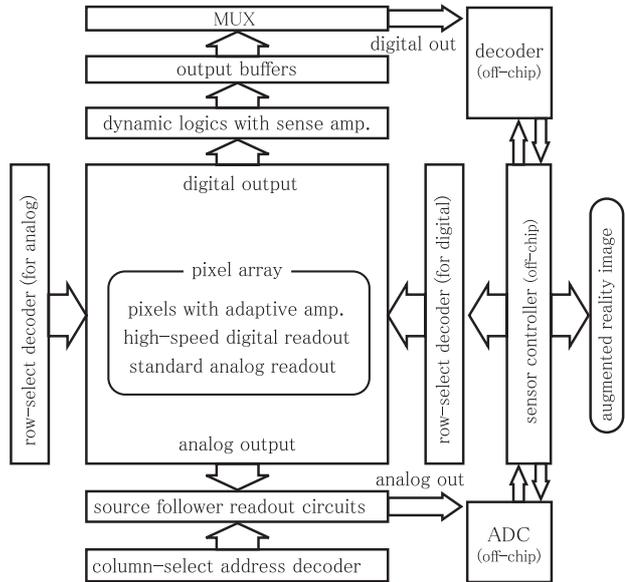


図2 スマートイメージセンサのブロック図  
Block diagram of the smart image sensor.

同期して順次点滅する光ビーコンを、高速イメージセンサを用いて取得するモーションキャプチャ<sup>67)</sup>が商用として存在するが、これらはすべての発光源とイメージセンサが同期していることを前提としている。このため、閉じた空間での高速・高精度な位置情報の取得には有効なシステムだが、多数の発光源と多数のカメラの存在が前提となる、広範囲な拡張現実システムには向いていない。

こういった背景から、シーン画像とは別にシーン上の輝度の変化を高速に検出するスマートイメージセンサ<sup>8)</sup>を用いた拡張現実システム<sup>5)</sup>が提案されている。4 kHzのキャリアを用いた繰り返しパケット伝送により、シーン上の非同期光ビーコンを120 b/ID・sで取得可能である。これは15 fpsのシーン画像へ8ビットのID情報を付加できる速度であり、ある程度限られた種類の対象物体を認識することが可能である。一方で、図1に示したような複数のユーザが広範囲で持ち歩き、数多くの対象を認識すべき拡張現実システムの実現には、シーン画像とともにより多くの情報を実時間で取得する必要がある。

本稿では、実用的な拡張現実システム実現の次のステップとして、高速かつ低輝度な光ビーコンを取得可能なスマートイメージセンサを提案する。複数の非同期光ビーコンをセンサ面上で独立に取得するには、従来の信号変化を同期検波により蓄積して、高感度に検知する手法<sup>9)-12)</sup>では実現できない。そのため、本イメージセンサでは、シーン画像の取得と同時に、微弱な輝度の変化を効果的に増幅し、画素内でデジタル化して高速に読出すことで、実時間で多くのID情報を伝送することができ、実世界での様々な対象の認識を可能とする。さらに、対数応答型の受光部と背景光の適応抑圧回路によって、屋内外での高感度ビーコン検出を実現する。提案手法および回路方式を用いた128×128画素イメージセンサの性能評価と従来技術との比較を報告する。

## 2. センサアーキテクチャ

実時間でのシーン画像取得と、シーン上に点在する光ビーコンの高速な取得には、アナログ/デジタルの2系統の読出しが必要である。シーン画像を得るには、画素値をアナログで読出す必要があるため、高速化には限界がある。一方で、光ビーコンの送信する情報はデジタルであるため、画素内で輝度の変化を効果的に検出することができれば、画素アレイからデジタルで読出すことが可能となり、高速化が期待できる。提案するイメージセンサは図2に示すように、画素アレイ、アナログ/デジタル読出し用の行デコーダ、アナログ出力回路と列デコーダ、デジタル読出し用の列並列センスアンプ、出力バッファ、マルチプレクサから構成される。ID信号の復号処理、センサ制御系、AD変換はセンサ外部に実装される。画素内部では、対数応答型の受光部と背景光の適応抑圧回路によって、広い背景光範囲での高感度ビーコン検出を実現する。増幅されたIDビーコン信号は、画素選択時の読出しとともにデジタル化され、センスアンプを用いて高速に取得される。本センサのデジタル読出し手法は、コンパクトな画素回路での高速な信号サンプリングと低輝度ビーコンの検出を提供する。

## 3. 回路構成

### 3.1 画素回路の構成と動作

図3に画素回路の構成を示す。対数応答型の受光部では、入射光強度によって発生した光電流 $I_{pd}$ に従い、 $V_{pd}$ を出力する。対数応答型の受光回路は広いダイナミックレンジを有し広範囲な環境に適用可能であり、リセット動作が不要なため、非同期の光ビーコン検出にも向いている。シーン画像の取得には、ソースフォロア回路を介

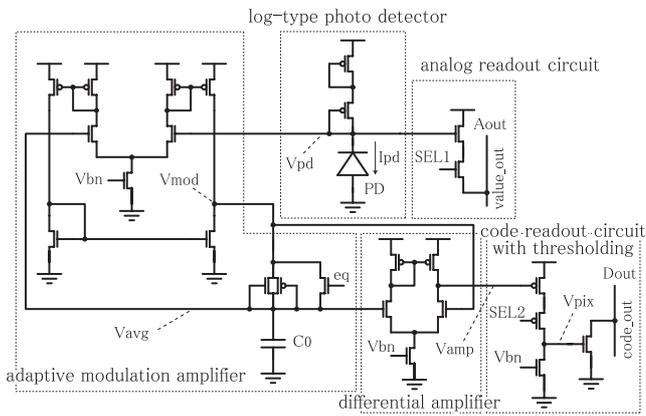


図3 画素回路の構成  
Pixel circuit configuration.

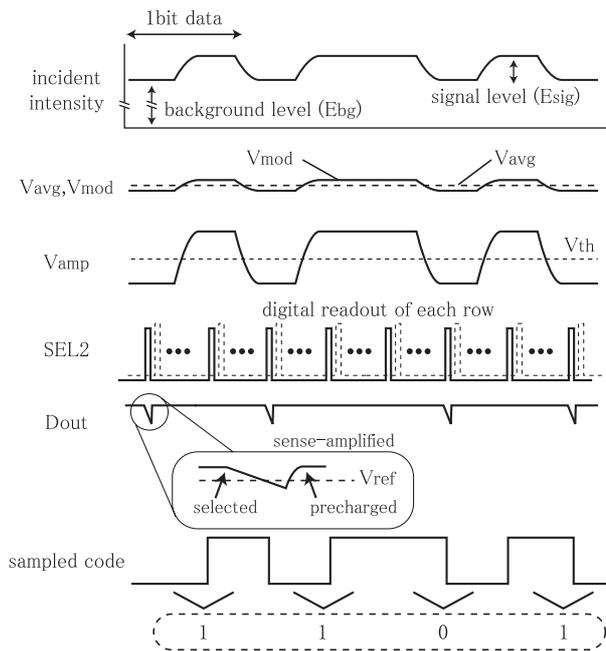


図4 画素回路の動作タイミング図  
Timing diagram of the pixel circuit.

して  $A_{out}$  から  $V_{pd}$  の値を出力する．対数応答の2次元画像は一般的に画質が悪いが，高いコントラストを有するシーンの中で，対象の認識をすることを目的とした拡張現実システムには十分な画像を提供できる．

受光部の出力  $V_{pd}$  は，シーン画像の出力として使われる一方で，背景光の適応抑圧回路へ入力される．適応抑圧回路では， $V_{pd}$  の平均値  $V_{avg}$  を生成し， $V_{pd}$  との差分を取ることで，光ビーコンによる微弱な輝度の変化を増幅する．対数応答型の受光部と適応抑圧回路により，広い背景光範囲で飽和を防ぎながら，信号増幅をすることができる．容量  $C_0$  は，背景光外乱として想定される周波数 0 ~ 100 Hz を通過し，キャリア周波数である数 10 kHz を遮断できる値を持つ．出力振幅  $V_{mod}$  は参照電位  $V_{avg}$  を用いて再び増幅される．画素が  $SEL2$  によって選択されると，バイアス電圧  $V_{bn}$  によって制御された電流との

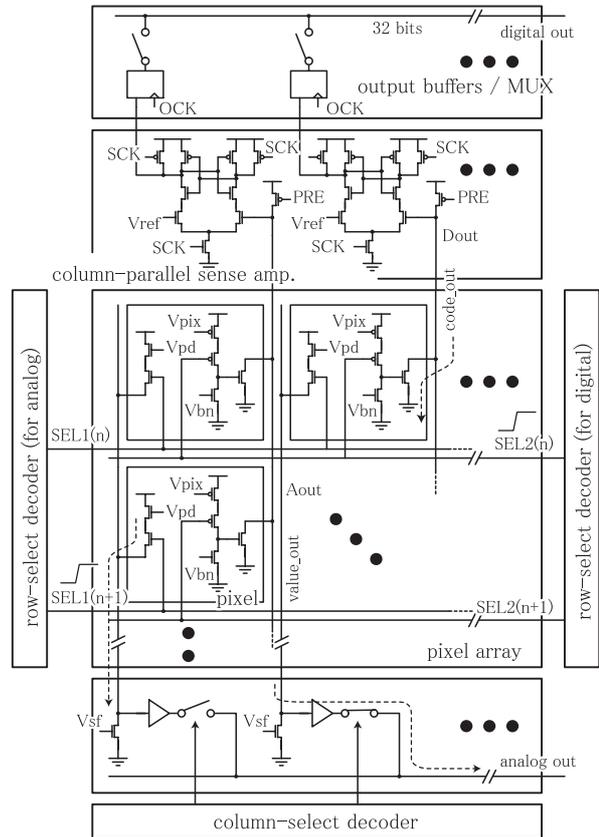


図5 アナログ/デジタル読出し回路  
Analog/digital readout circuit.

比較によって  $V_{pix}$  が決定し，それと同時にプリチャージされた  $D_{out}$  が変化する．列並列センスアンプで出力の変化を検出することで，高速に光ビーコンのデジタル信号を取得する．

図4に光ビーコン検出のタイミング図を示す．発光デバイスを用いた拡張現実システムでは，光ビーコン信号による  $E_{sig}$  と，背景光による  $E_{bg}$  が入射光に含まれる．背景光は太陽光や街灯，室内灯などのシーン全体を照らす光であり，一般的に直流成分あるいは 100 Hz 程度の低い周波数成分である．画素回路は，光ビーコン信号による高速な輝度の変化を背景光成分を抑圧しながら増幅する．差動アンプの出力  $V_{amp}$  のバイアス点は，最終段の2値化の閾値  $V_{th}$  に設定される．また，デジタル信号読出しにおける参照電位  $V_{ref}$  は，センスアンプのプロセスばらつきとノイズに対する余裕を確保するため，プリチャージ電圧よりも 200mV 低い 4.0V に設定されている．この背景光抑圧には， $E_{bg} + E_{sig}$  の平均  $V_{avg}$  が必要であるため，光ビーコン信号は 50% の Duty 比を維持しなければならない．このため，1ビットのデータを伝送するのに，2サイクル分のキャリアを用いるマンチェスタ符号化を適用する．つまり，‘01’ と ‘10’ を伝送することで，それぞれを ‘1’ と ‘0’ と認識する．

### 3.2 アナログ/デジタル読出し回路の構成と動作

図5に，アナログ読出し回路およびデジタル読出し

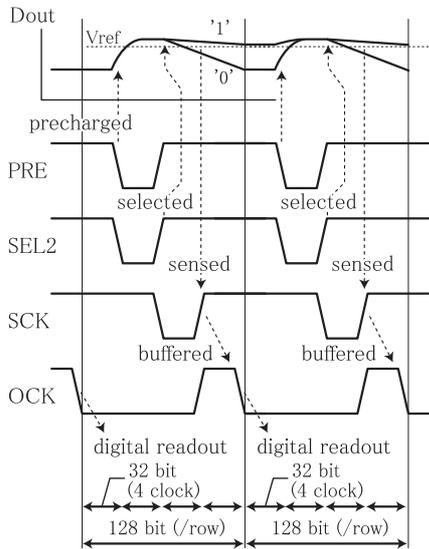


図6 デジタル読出し動作のタイミング図  
Timing diagram of digital readout.

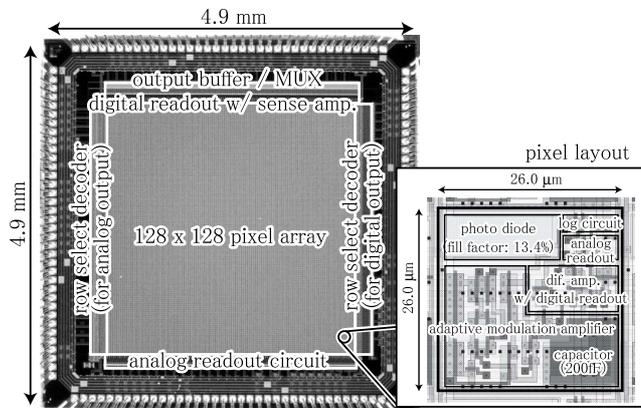


図7 試作チップ  
Chip microphotograph and pixel layout.

回路の構成を、図6にその動作タイミング図を示す。各列の出力  $D_{out}$  を  $PRE$  信号によってプリチャージし、画素を行単位で選択する。 $D_{out}$  の電位はセンスアンプによって  $V_{ref}$  と比較され、行選択直後の  $SCK$  信号で2値化される。デジタル読出し結果は、 $OCK$  信号により出力バッファに転送され、次の読出しサイクルの間に32ビットずつID復号回路へ出力される。回路シミュレーションでは、 $128 \times 128$ 画素イメージセンサで読出し制御のクロックサイクルは、列出力信号線をプリチャージするのに要する時間で律速され、最大100MHzであった。非同期光ビーコン信号をキャリアの2倍の周波数でサンプリングする場合、約100kHzのキャリア周波数を利用することが可能である。

#### 4. 試作イメージセンサ概要

128×128画素の解像度を有するイメージセンサを、0.35  $\mu\text{m}$  CMOS プロセスを用いて試作した\*。図7に試

表1 試作センサの諸元  
Parameters of the fabricated sensor.

Process	0.35 $\mu\text{m}$ CMOS 3-metal 1-poly-Si
Chip size	4.9 mm $\times$ 4.9 mm
# pixels	128 $\times$ 128 pixels
Pixel size	26.0 $\mu\text{m}$ $\times$ 26.0 $\mu\text{m}$
Fill factor	13.4 %
Power Dissipation	682 mW (@40MHz, 4.2V)

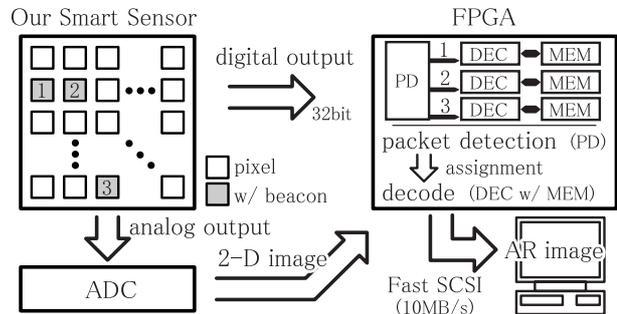


図8 測定システムの構成  
Measurement system structure.

作チップの写真と画素レイアウトを示す。画素サイズは26.0  $\mu\text{m}$   $\times$  26.0  $\mu\text{m}$ であり、開口率は13.4%であった。フォトダイオードは  $n^+$  拡散と  $p$  基板のPN接合で形成されている。図3における容量  $C_0$  は200 fFである。試作センサの諸元を表1に示す。対数応答型受光部における十分な出力電圧範囲を確保するため、ここでは4.2Vの電源電圧で実験を行った。消費電力は、電源電圧4.2V、40MHzでの動作で682mWであった。画素サイズは従来のスマートイメージセンサ<sup>8)</sup>の1/4程度であり、高い解像度の実現に有利である。

#### 5. システム概要

図8に、試作センサを用いた計測システムの構成を示す。レンズを搭載した試作センサ、外部AD変換IC、FPGA、ホストPCから構成される。センサ制御とID復号、ホストPCへのデータ転送を実行するFPGAは40MHzで動作した。また、発光デバイスとして波長620nmのLEDを利用した。シーン画像はAD変換ICを介してデジタル信号としてFPGAに取り込まれる。また、センサで取得された光ビーコン信号に対しては、パケット検出を行い、有意な信号であれば復号し、位置情報とともにメモリーに格納する。シーン画像と取得したID情報は、FPGA上に実装されたFast SCSIインタフェースでホストPCへ転送される。

図9に、光ビーコンの符号化手法とパケットフォーマットを示す。試作センサは、背景光抑圧のためにDuty比を50%程度にする必要があるため、図9に示すような、マンチェスタ符号化を適用する。'1'および'0'のID情報を伝送するのに、'01'および'10'の信号を送信する。

\* 本チップ試作は東京大学 大規模集積システム設計教育研究センタを通し、

ローム(株)および凸版印刷(株)の協力で行われたものである。

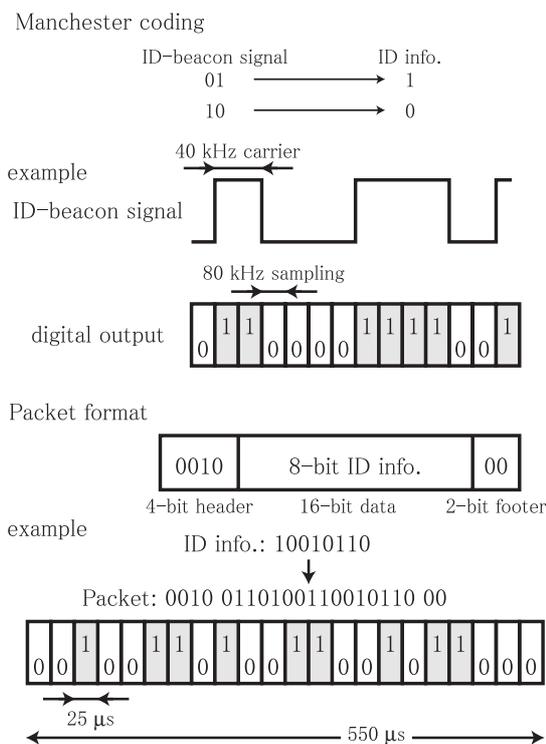


図9 符号化手法とパケットフォーマット  
Coding method and packet format.

また、40 kHz のキャリアに対して 80 kHz でサンプリングを行う。このときのデジタル読出しは、80k fps に相当する。従来のスマートイメージセンサを用いた拡張現実システム<sup>5)</sup>においても、センサ<sup>8)</sup>が光ビーコン信号の立ち上がりのみを検出するため、マンチェスタ符号化が用いられている。このため、同様のパケットフォーマットによる非同期通信が可能である。本計測システムでは、4 ビットのヘッダ情報と 16 ビットのデータ信号、2 ビットのフッタ情報の計 22 ビットのパケットを構成する。比較のため、従来システム<sup>5)</sup>と同じパケット構造と、1 フレーム内に最大 3 パケット繰り返し受信する方式とした。本方式では、パケット伝送とシーン画像取得を非同期に行うことができる。

## 6. 測定結果

図 10 に光ビーコン信号が入射したときの画素内部の信号波形を示す。これらの信号は、画素アレイとは別にテスト用に画素単体で集積された回路の各ノードから得たものである。図 10 に示すように、40 kHz で入射する光ビーコン信号で発生した  $V_{pd}$  から、背景光を抑圧し  $V_{mod}$  を生成し、さらに増幅して  $V_{amp}$  を出力できている。

### 6.1 ID ビーコン検出速度とフレームレート

前述したように、試作センサはアナログ/デジタル読出しを別系統で実行する。シーン画像取得速度は最大 30 fps であった。これは外部 AD 変換 IC の性能で律速されているが、実時間の拡張現実システムとしては十分な速度である。画素解像度の増加に対して撮像速度が低下

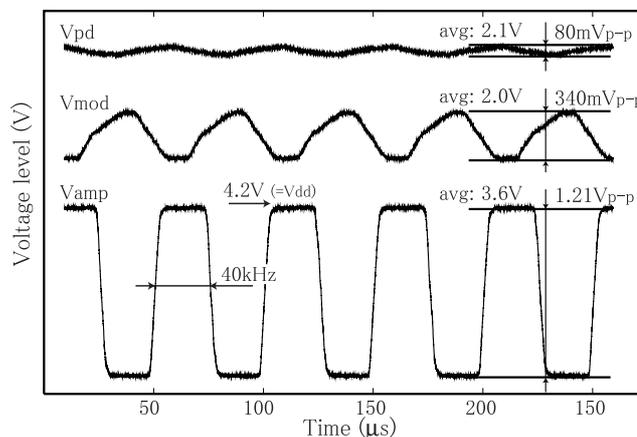


図 10 測定波形  
Measured waveforms.

するが、独立したアナログ読出し部は、一般的な CMOS イメージセンサと同様の構造・原理であるため、高速な ADC や列並列 ADC の集積などにより、30 fps の撮像速度を維持できると期待される。対数応答型受光回路を用いて得られる 2 次元画像は、トランジスタばらつきによる大きな固定パターンノイズを有しているが、ここではあらかじめ均一光の投射によってオフセットを計測し、ホスト PC 上でキャンセルすることで、シーン画像の画質を向上させている。CCD や通常の CMOS イメージセンサのような、蓄積型受光回路による画像ほど高い画質は望めないが、認識システムとして十分な画質が得られる。本計測システムでは、40 kHz のキャリアによる光ビーコン信号の取得を実現した。

図 11 は、本計測システムによって取得されたシーン画像、ビーコン位置情報および ID 情報である。ここでは、ID 情報は ASCII コードを符号化し送信している。現在のシステムでは、計測結果をホスト PC に実時間で転送することができないため、33 ms で取得したデータを FPGA 内のメモリーに格納している。光ビーコン信号のデータ転送速度は 4850 b/ID・s であり、ID 情報は 1 フレーム当り 160 ビット得ることができる。現状では、FPGA によるセンサ制御速度の制限によって、キャリア周波数は 40 kHz となっているが、高速なセンサ制御系の構築と感度の高い受光デバイスの適用によって、データ伝送速度の改善の可能性がある。

表 2 に従来技術との比較を示す。30 fps で動作する CCD イメージセンサを用いた拡張現実システム<sup>3)</sup>では、0.2 fps のシーン画像と 4 bit/ID・frame の ID 情報取得を実現している。拡張現実システムへの適用例は報告されていないが、画素並列 ADC を有する高速 CMOS イメージセンサ<sup>13)</sup>を適用した場合でも、検出可能なキャリア周波数は 5 kHz である。入射光強度の立ち上がり変化を検出できるスマートイメージセンサ<sup>8)</sup>を用いた拡張現実システム<sup>5)</sup>では、15 fps のシーン画像と 8 b/ID・frame の ID 情

表 2 従来技術との性能比較  
Performance comparison.

	# pixels	pixel size	carrier	bit rate	ID info. size	AR images/s
Standard CCD Imager <sup>3)</sup>	N/A	N/A	15 Hz	6 bit/ID-sec	4 bit/ID-frame	0.2 fps
High-Speed CMOS Imager <sup>13)</sup>	352 × 288	†9.4 × 9.4 μm <sup>2</sup>	5 kHz	N/A	N/A	N/A
ID Cam <sup>5)</sup> with Smart Sensor <sup>8)</sup>	192 × 124	‡46.4 × 54.0 μm <sup>2</sup>	4 kHz	120 bit/ID-sec	8 bit/ID-frame	15 fps
<b>Our Present Smart Sensor</b>	<b>128 × 128</b>	<b>‡26.0 × 26.0 μm<sup>2</sup></b>	<b>40 kHz</b>	<b>4850 bit/ID-sec</b>	<b>160 bit/ID-frame</b>	<b>30 fps</b>

†fabricated in 0.18 μm process. ‡fabricated in 0.35 μm process.

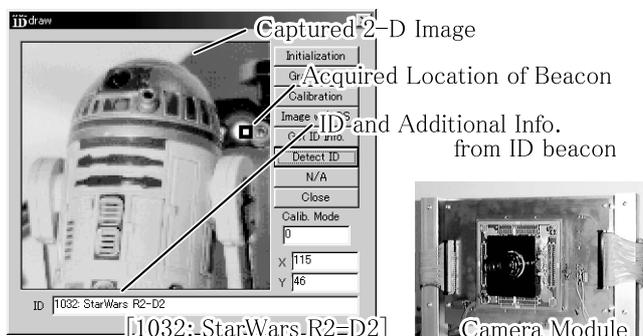


図 11 撮像および ID 検出結果  
Reproduced image with ID information.

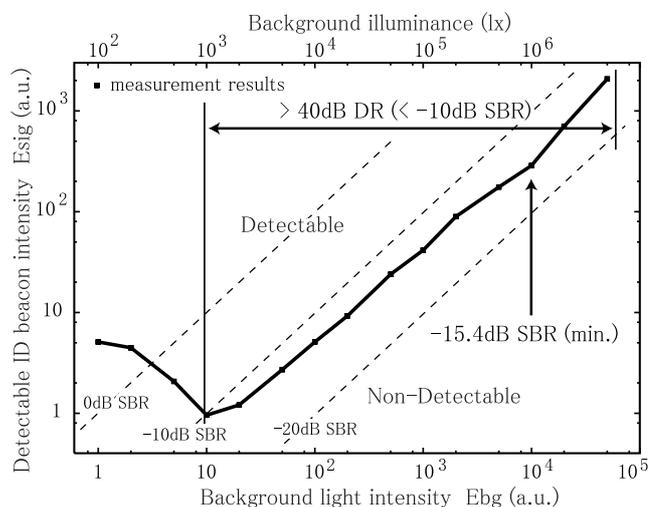


図 12 ID ビーコン検出感度とダイナミックレンジ  
Sensitivity and dynamic range of ID beacon detection.

報取得を実現している。試作センサは、高速な入射光変化の検出と読み出し回路によって、30 fps のシーン画像と 160 b/ID-frame の ID 情報を取得でき、シーン内の様々な対象から、より多くの有益な情報を AR 画像に付加することが可能である。特に車載用途など受信側が移動する場合においては、シーン内に次々と入ってくる多数の対象を判別することが可能となる。

## 6.2 検出感度とダイナミックレンジ

図 12 に光ビーコン検出感度とダイナミックレンジを示す。試作センサは画素内で広い範囲の背景光を抑圧する機能を有しているため、低輝度の光ビーコンを検出することが可能である。検出可能な光ビーコンの輝度は、テスト用に集積された単体の画素で計測されている。また、背景光および光ビーコンの輝度は、試作したフォトダイオードの光電流と比較している。背景光強度に対する検出可能な光ビーコン強度の比を、SBR(Signal-to-Background Ratio)として  $10 \log E_{sig}/E_{bg}$  で定義する。-10.0 dB SBR 以下の高感度ビーコン検出を 40 dB 以上の背景光範囲にわたり実現した。

## 7. むすび

本稿では複合現実感応用の一つである、発光デバイスを用いた拡張現実システム向けスマートイメージセンサを報告した。試作した 128×128 画素イメージセンサは、30 fps のシーン画像と 160 b/ID-s の ID 情報取得を実現する。また、40 dB 以上の背景光範囲において-10.0 dB SBR 以下の高感度ビーコン検出を可能とした。高速な光ビーコン検出は、実時間でのシーン画像とともに、対象の位置と豊富な情報を同時に取得し、ユーザに提供する

ことができ、様々な背景光下での高感度ビーコン検出は拡張現実システムの適用範囲を広げることができる。

今後の課題として、実用的な拡張現実システムの構築と適用が挙げられる。性能的には、光ビーコン復号回路の高速化・大容量化による複数対象の同時取得と、高速なインターフェースによるホスト PC への実時間転送の実現が挙げられる。また、複数光源の存在や様々な測定環境における外乱の影響、外乱に対する適用可能範囲の検討が必要である。

## 〔文 献〕

- 1) J. Rekimoto and Y. Ayatsuka, "CyberCode: Designing Augmented Reality Environments with Visual Tags," *ACM Designing Augmented Reality Environments (DARE 2000)*, pp.1 - 10, 2000.
- 2) R. Want, K. P. Fishkin, A. Gujar, and B. L. Harrison, "Bridging Physical and Virtual Worlds with Electronic Tags," *ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'99)*, pp. 370 - 377, 1999.
- 3) D. J. Moore, R. Want, B. L. Harrison, A. Gujar, and K. Fishkin, "Implementing Phicons: Combining Computer Vision with InfraRed Technology for Interactive Physical Icons," *ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'99)*, pp.67 - 68, 1999.
- 4) 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.
- 5) 松下 伸行, 日原 大輔, 後 輝行, 吉村 真一, 歴本 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*, 43, 12, pp.3664 - 3674, Dec. 2002.
- 6) Phoenix Technologies. The Visualeyes System. <http://ptiphoenix.com/>
- 7) PhageSpace, Inc. Phase Space motion digitizer. <http://www.phagespace.com/>
- 8) S. Yoshimura, T. Sugiyama, K. Yonemoto, and K. Ueda, "A 48kframe/s CMOS Image Sensor for Real-time 3-D Sensing and Motin Detection," *IEEE ISSCC Dig. of Tech. Papers*, pp.94 - 95, 2001.
- 9) Y. Oike, M. Ikeda, and K. Asada, "High-Sensitivity and Wide-Dynamic-Range Position Sensor Using Logarithmic-Response and Correlation Circuit," *IEICE*

*Trans. on Electronics*, E85-C, 8, pp.1651 – 1658, Aug. 2002.

- 10) J. Ohta, K. Yamamoto, T. Hirai, K. Kagawa, M. Nunoshita, M. Yamda, Y. Yamasaki, S. Sugishita, and K. Watanabe, "An Image Sensor With an In-Pixel Demodulation Function for Detection the Intensity of a Modulated Light Signal," *IEEE Trans. on Electron Devices*, 50, 1, pp.166 – 172, Jan. 2003.
- 11) S. Ando and A. Kimachi, "Correlation Image Sensor: Two-Dimensional Matched Detection of Amplitude-Modulated Light," *IEEE Trans. on Electron Devices*, 50, 10, pp.2059 – 2066, Oct. 2003.
- 12) Y. Oike, M. Ikeda, and K. Asada, "A 120 x 110 Position Sensor With the Capability of Sensitive and Selective Light Detection in Wide Dynamic Range for Robust Range Finding," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 39, 1, pp.246 – 251, Jan. 2004.
- 13) S. Kleinfelder, S. Lim, X. Liu and A. E. Gamal, "A 10k frame/s 0.18 $\mu$ m CMOS Digital Pixel Sensor with Pixel-Level Memory," *IEEE ISSCC Dig. of Tech. Papers*, pp.88 – 89, 2001.



おおいけ ゆうすけ  
**大池 祐輔** 2000年，東京大学工学部電子工学科卒業．2002年，同大学院工学系研究科電子工学専攻修了．現在，同大学院工学系研究科電子工学専攻博士課程在学中．CMOS イメージセンサ，アナログデジタル混載回路，機能メモリの研究に従事．学生会員．



いけだ まこと  
**池田 誠** 1991年，東京大学工学部電子工学科卒．1993年，同修士課程修了．1996年，同博士課程修了．博士（工学）．1996年4月より東京大学に任官．現在，東京大学大規模集積システム設計教育研究センター（VDEC）助教授．



あきだ くにひろ  
**浅田 邦博** 1980年，東京大学子工学博士課程修了（工学博士）．同年，東京大学に任官．現在，東京大学大規模集積システム設計教育研究センター（VDEC）教授．センター長．