

周囲光消去型距離画像センサ

3D Real-Time CCD Image Sensor Using Background-Level Subtraction Scheme

橋本 裕介* · 常定 扶美* · 村上 憲一* · 今井 憲次** · 岸田 貴司**
 Yusuke Hashimoto Fumi Tsunesada Ken-ichi Murakami Kenji Imai Takashi Kishida

TOF (Time-Of-Flight) 方式の距離画像センサにおいて、信号光を受光する CCD の画素ごとにフローティングディフュージョン (FD) 構造を設けることで、画素上に複雑な回路を構成することなく周囲光による過剰電荷を排除しながら信号光電荷のみを集積する周囲光消去型距離画像センサを開発した。

本開発により、強い周囲光によって各画素のポテンシャル井戸が飽和する問題を解決し、晴天時の屋外直射日光下の照度に対応する周囲照度 10 万 lx における距離画像センシングを実現した。

In the field of 3D-TOF (Time-Of-Flight) image sensors, a novel image sensor based on ambient-level-subtraction scheme that integrates only signal electrons generated by signal light while eliminating excess electrons generated by ambient light has been developed by providing a floating diffusion (FD) structure in each pixel of the CCD without using a complicated circuit.

This development solves the problem of saturation of the potential well in each pixel caused by receiving strong ambient light, thereby enabling 3D sensing under the illumination level of 100 klx, equivalent to the situation under bright sunlight in outside.

1. ま え が き

近年、ロボティクス、自動車、セキュリティー、アミューズメントなど多くの分野において、リアルタイムに空間の3次元情報（距離画像）を得る距離画像センサ技術が注目されている。とくに近赤外光を用いて単眼で距離画像を得る TOF (Time-Of-Flight) 方式は、ステレオ視やレーザスキャン方式などの他の方式と比べて小型で低コストなシステムが実現可能なため、その応用が期待されている^{1), 2)}。

しかし TOF 方式は、直射日光のような強い周囲光下において、撮像素子の画素上に過剰に発生する受光電荷（周囲光電荷）により画素を構成するポテンシャル井戸が飽和して距離の検出が困難になる問題を抱えている。

本稿ではこれらの問題を解決するため、画素上にフローティングディフュージョン（以下、FD と記す）構造を配置したシンプルな構成によって周囲光電荷を除去する周囲光消去型距離画像 CCD を提案する。この CCD は、周囲光の強度に応じて FD 部の電位を変化させることで、これに連動する電荷転送路上のポテンシャル障壁の高さを制御し、電荷転送時に周囲光電荷を除去するものである。

2章では周囲光消去型 CCD の基本原理および構造について、3章では本 CCD を用いた周囲光消去型距離画像センサの構成、周囲光下における距離測定性能、およびセンサの応用例について報告する。

2. 周囲光消去型 CCD の基本原理

2.1 従来技術（TOF方式の距離画像センサ）^{1), 2)}

始めに、TOF 方式の原理に基づく一般的な距離画像センサの構成を図 1 に示す。

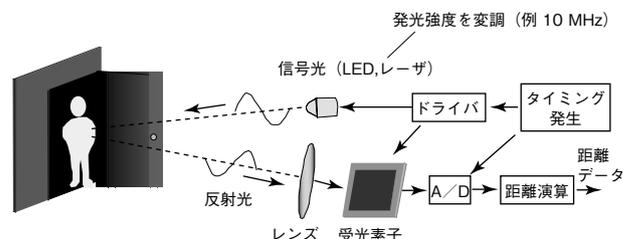


図 1 TOF 方式距離画像センサ

このセンサは、発光強度が変調された信号光を空間に放射し、反射光の位相遅延を受光素子の画素ごとに検出して

* 情報機器事業本部 情報機器 R & D センター Research & Development Center, Information Equipment & Wiring Products Manufacturing Business Unit

** 新規商品創出技術開発部 New Product Technologies Development Department

距離情報を得るものである。

しかし前章で述べたように、太陽光のような強い周囲光の下では信号光を検出できない場合がある。

2.2 周囲光電荷の消去「量り取り駆動」の概念

図2を用いて周囲光消去の概念を説明する。

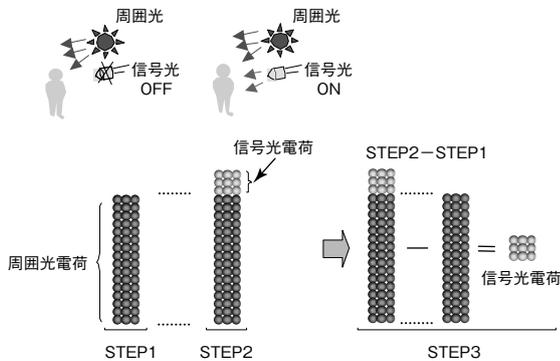


図2 周囲光電荷の消去「量り取り駆動」の概念

まず、信号光を照射しないで周囲光によって発生した電荷（周囲光電荷）を集積する（STEP1）。次に、信号光を照射してこれによる発生電荷（信号光電荷）と周囲光電荷を同時に集積する（STEP2）。最後に、STEP2で得られた電荷量からSTEP1で集積した電荷量を差し引いて信号光電荷のみを残留させる（STEP3）。これらの動作を繰り返すことで、信号光電荷のみを集積することができる。

周囲光によって発生した電荷量を全体の電荷量から差し引く動作は、店頭で顧客の必要量に応じて食材を販売する量り売りの概念に似ており、筆者らはこの動作を「量り取り駆動」と呼んでいる。

図3は画素における電荷移動を説明するためのポテンシャル井戸モデルである。

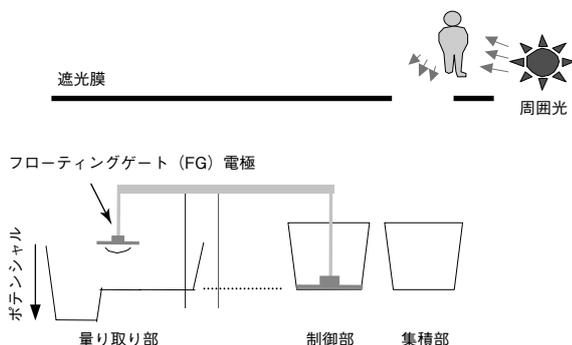


図3 ポテンシャル井戸モデル

撮像素子は周囲光や信号光により発生した電荷を集積する集積部、集積した電荷から周囲光電荷相等量の電荷を量り取る量り取り部、および量り取る電荷量の制御を行う制御部とからなる。集積部以外の基板表面は遮光膜に覆われている。量り取り部の基板表面には、制御部と電気的に

接続されたゲート（フローティングゲート：以下、FGと記す）電極が形成されており、制御部の周囲光電荷量に応じてFG電極下の電位障壁が変化する仕掛けになっている。このポテンシャル井戸モデルを用いて電荷移動を詳細に説明する（図4）。

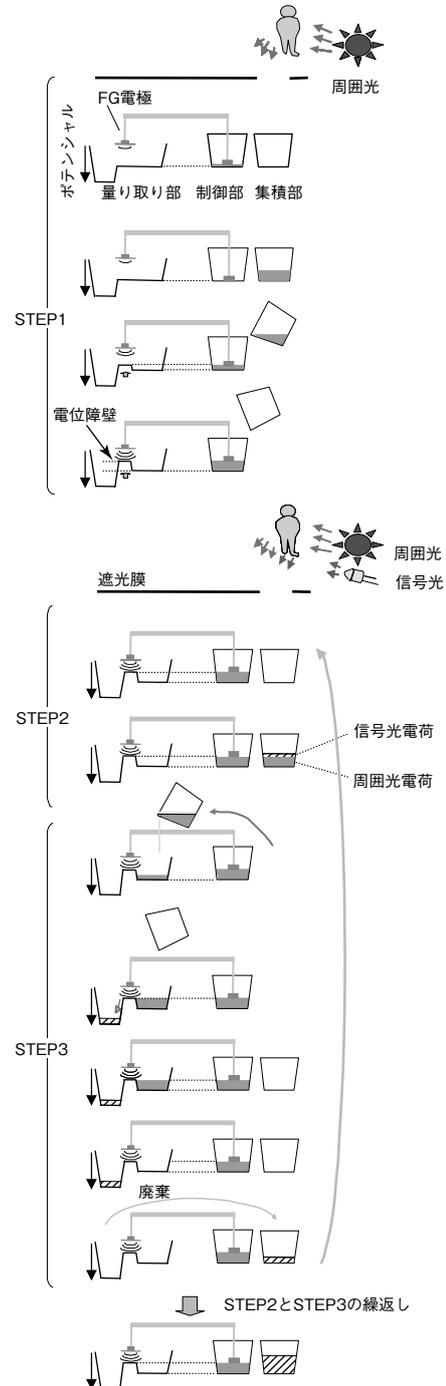


図4 電荷移動の概念

STEP1では、信号光を照射せずに周囲光のみによる発生電荷を集積する。集積部に残留された周囲光電荷は制御部に転送され、制御部の電位変動に応じて量り取り部のFG電極下部に電位障壁が形成される。電位障壁の高さは制御部に流入した電荷量に比例する。すなわち、周囲光量に比

例して FG 電極下部の電位障壁が成長する。

STEP2 では、信号光を照射して周囲光電荷と同時に信号光電荷を集積する。ここでは信号光の復調動作を行うが、詳細シーケンスについては次節で説明する。集積された電荷は STEP3 で量り取り部に転送され、STEP1 で形成された電位障壁によって周囲光電荷と信号光電荷とに分離され、周囲光電荷が量り取られる。

すなわち、STEP2 で集積された電荷が量り取り部の右側のポテンシャル井戸に投入されると、ポテンシャル井戸の飽和電荷量分の電荷が電位障壁の右側に残り、あふれた電荷が電位障壁の左側に流れ出る。ここで、STEP1 の障壁形成過程における周囲光電荷の集積に要する時間を調整することにより、STEP3 で量り取り部の右側の井戸に残る電荷量と周囲光電荷量とをおおむね一致させる。

電位障壁の右側に残った電荷はドレーンに廃棄され、左側の井戸にあふれ出た信号光電荷は再度集積部に転送される新しい電荷蓄積法を採用している。

STEP2 および STEP3 を複数回繰り返すことで、周囲光による画素の飽和を防ぎながら信号光電荷のみを集積部に集積することができる。

2.3 撮像素子構造と「量り取り駆動」

画素構造図および対応するポテンシャル図を用いてさらに具体的に説明する。図5に周囲光消去型 CCD の撮像素子の構造を示す。

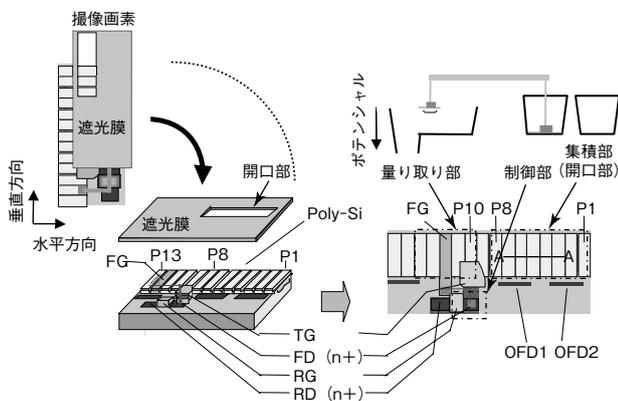


図5 周囲光消去型 CCD の撮像素子の構造

撮像素子の基板表面には 13 個の Poly-Si ゲートが形成されており、そのうち P1 ~ P8 ゲート以外は Al 遮光膜に覆われている。図5中に図3記載の集積部、制御部、量り取り部を示す。制御部は p 型基板中の n-well 拡散層で形成した FD、その初期電位を設定するためのリセットドレーン (RD)、およびリセットゲート (RG) から成る。FD の基板表面は量り取り部の FG 電極と電気的に接続されている。

FD への電荷転送は、P10 との間に形成されたトランスファゲート (TG) の駆動によって行う。量り取った周囲

光電荷は、ドレーン (OFD1, OFD2) に廃棄する。

図6に図5中の A-A 部の Poly-Si ゲート電圧とゲート下部の基板表面のポテンシャル構造を示す。Poly-Si ゲートに印加する電圧 (0 V, 10 V) を切り替えることで基板表面の電荷の集積や転送を行う。

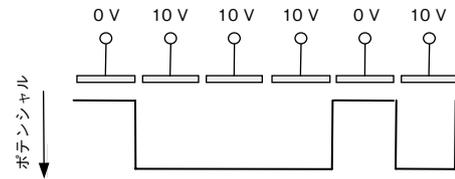


図6 A-A部のゲート電圧と基板表面のポテンシャル

以下、図7、図8、図9を用いて撮像素子の駆動アルゴリズムを説明する。

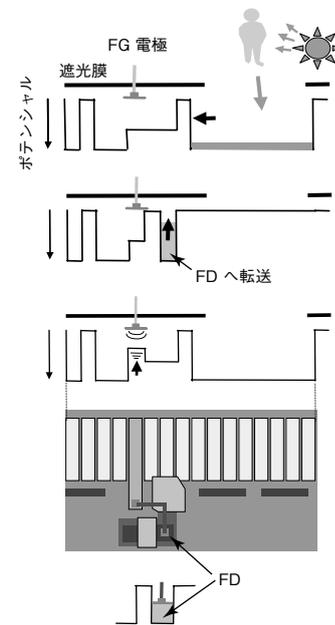


図7 周囲光電荷の集積と障壁形成 (STEP1)

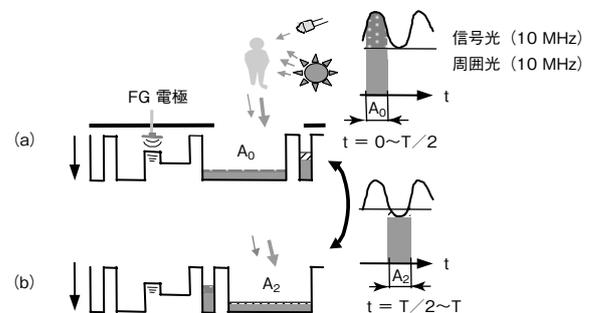


図8 信号光の復調 (STEP2)

周囲光電荷の集積と障壁形成 (STEP1) では、図5の P1 ~ P8 ゲートに 10 V を印加することで図7に示すように開口部全体で周囲光を集積した後、TG を介して FD に転送する。その際、FD 電位の低下に伴って FG 電極下に

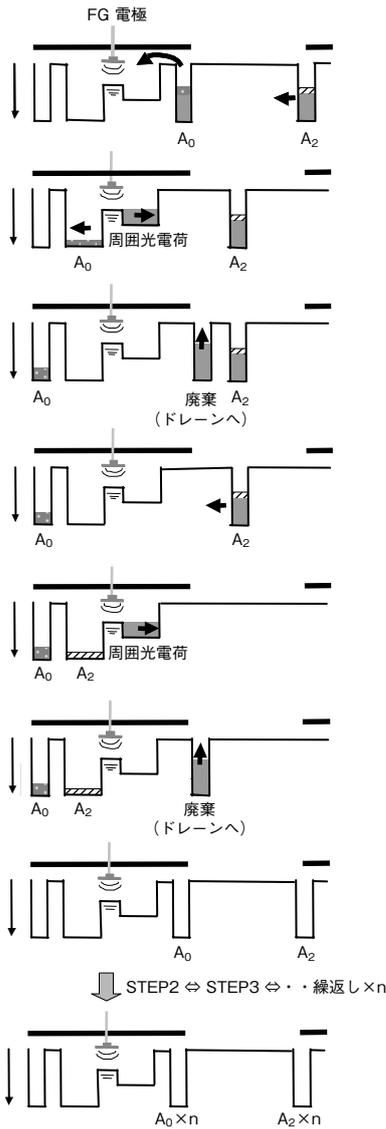


図9 周囲光電荷の量り取り (STEP3)

ポテンシャル障壁が形成される。

信号光の復調 (STEP2) では、図8に示すように、照射した信号光の強度変調周期 (T) の半周期ごとに図5記載のP1～P8ゲートに印加する電圧 (0 V, 10 V) を切り替えることで図8 (a), (b) のようにポテンシャル形状を切り替える。(a) の状態では強度変調周期の0～T/2の間の受光電荷A₀を集積し、(b) の状態ではA₀の電荷を保持した状態でT/2～Tの間の受光電荷A₂を集積する。

周囲光電荷の量り取り (STEP3) では、STEP2で集積した電荷のうち、周囲光電荷のみを量り取り、廃棄する。図9に示すように、A₀, A₂の2種類の電荷を順次FG電極下に転送し、STEP1で形成したポテンシャル障壁によって周囲光電荷を分離する。ここで、この処理を行うためには、ポテンシャル障壁の右側のポテンシャル井戸の飽和電荷量とA₀, A₂に含まれる周囲光電荷量とを概略一致させることが必要である。これについては次節で詳細に説明する。

分離した周囲光電荷を図5のOFDに廃棄した後、残留した信号光電荷を再び集積部に転送し、STEP2からSTEP3の動作を複数回繰り返して信号光電荷のみを集積する。

反射光の位相φの検出には、変調周期の1周期当たり少なくとも3回以上のタイミングで信号光をサンプリングする必要がある³⁾。本稿では、STEP2, STEP3の過程を複数回繰り返すことで集積したA₀, A₂電荷にくわえ、図10に示すように、信号光の変調を1/4周期遅らせて集積した受光電荷A₁, A₃を用いて式(1)から位相検出を行う。

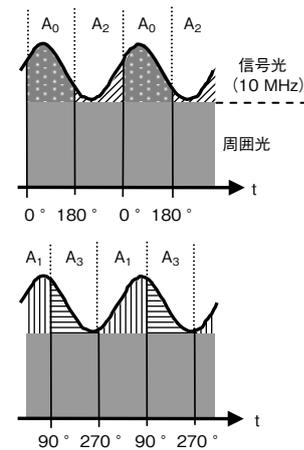


図10 復調動作 (A₀, A₁, A₂, A₃電荷の集積)

$$\phi = \frac{A_3 - A_1}{A_0 - A_2} \quad (1)$$

3. 周囲光消去型距離画像センサ

3.1 センサの構成と囲光下における距離測定性能

図11に試作した周囲光消去型距離画像センサの外観およびブロック図、表1にその仕様を示す。

このセンサは、LED基板、CCD基板、FPGA基板、および電源基板の四つから成る。LEDから照射する信号光は10 MHzで正弦波状に変調されている。FPGA基板は、LED, CCDの駆動制御, CCD出力信号の取込み, 距離演算を行う。

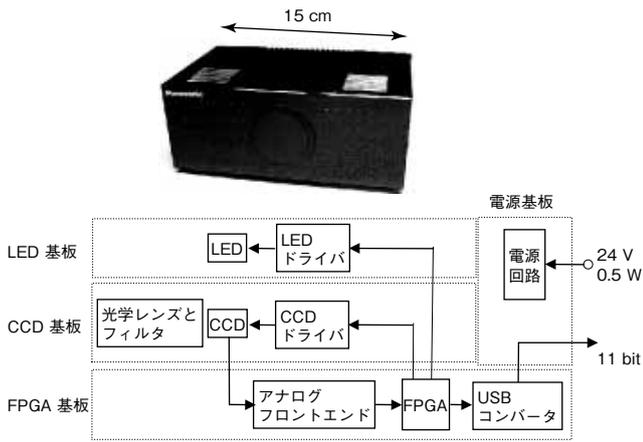


図 11 周囲光消去型 CCD を搭載した距離画像センサの外観とブロック図

表 1 周囲光消去型距離画像センサの仕様

| | |
|-----------|-------------------------|
| 撮像サイズ | H3.8×V2.7 mm (1/3.7インチ) |
| 有効画素数 | H160×V120 |
| 画角 | H50° ×V36° |
| 変/復調周波数 | 10 MHz |
| LED 発光波長 | 870 nm |
| LED 発光パワー | 0.5 W (平均) |
| 応答速度 | 12 fps |

図 12 に試作した距離画像センサで「量り取り駆動」を行った際の CCD 出力電圧と周囲光照射度との関係を示す。この駆動を行わない従来の電荷集積動作の場合は 2 万 lx 付近で画素が飽和するが、「量り取り駆動」を行った場合は画素が飽和することなく照度 0 ~ 10 万 lx の範囲で信号光電荷 A_0 、 A_2 を保持することができる。「量り取り駆動」を行った場合に残留している周囲光電荷については、式 (1) の演算 $A_0 - A_2$ によってキャンセルされる。なお、10 万 lx という照度は晴天時の直射日光下の照度に匹敵し、通常的生活環境において考えられる最大の照度である。

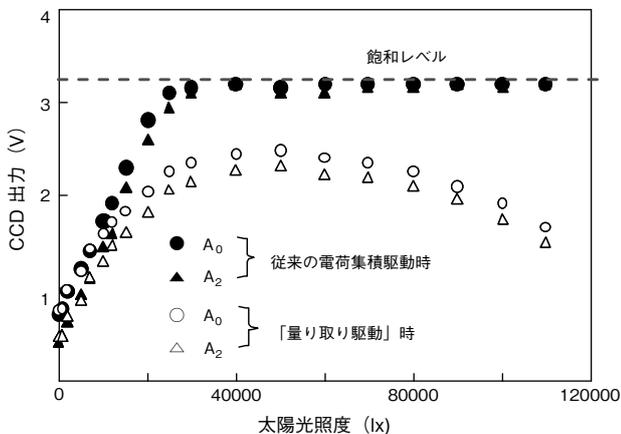


図 12 「量り取り駆動」による信号光電荷の保持

図 13 にこの最大照度である 10 万 lx の環境において、

反射率 90 % の被写体に対して距離測定を行った結果を示す。値は繰返し 100 回測定の平均値，エラーバーは標準偏差 ($\pm \sigma$) である。距離 0.8 ~ 8 m の範囲で，平均値と実際の距離との差異は ± 4 % 以下である。

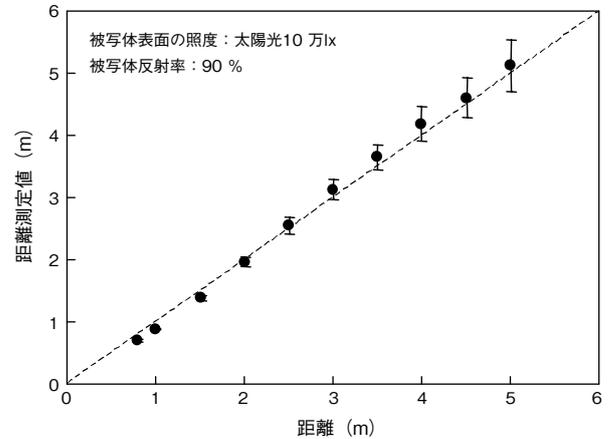


図 13 太陽光 10 万 lx 環境における距離測定結果

図 14 に取得した距離画像を示す。測定時の天候は晴，照度は 9 ~ 10 万 lx である。屋外の直射日光下においても距離画像を取得できていることがわかる。

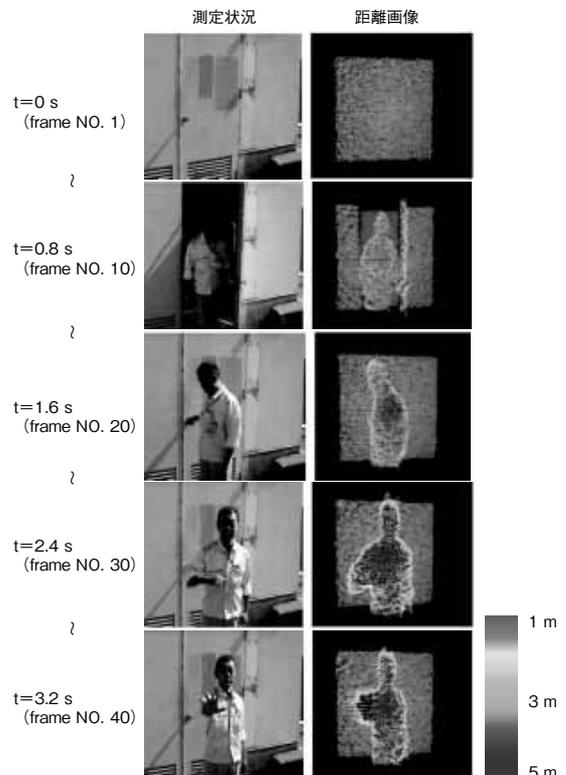


図 14 屋外直射日光下において取得した距離画像

3.2 距離画像センサの応用例

図 15 に距離画像センサの応用例を示す。リアルタイムに 3 次元情報を得ることは，同図のようにさまざまな場面

で有用であり、筆者らは本センサの応用可能性が広がると考えている。

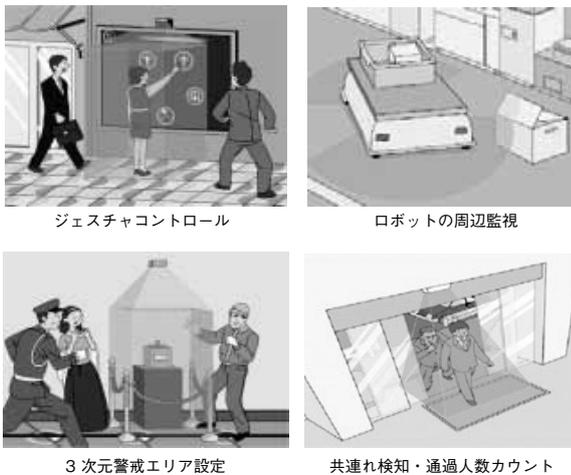


図15 距離画像センサの応用例

4. あとがき

本稿では、周囲光に起因する TOF 方式距離画像センサの問題点（周囲光による画素の飽和）を解決する周囲光消去型距離画像 CCD を提案した。信号光を受光する CCD の画素ごとに FD 構造を設けた本 CCD は、画素上に複雑な回路構造を用いることなく周囲光電荷を排除しながら信号光電荷のみを集積する。本 CCD の提案により、周囲照度 0～10 万 lx の範囲で距離画像情報を得ることが可能となった。

*参考文献

- 1) R. Lange, P. Seits : A Solid state time-of flight range camera, IEEE Journal of Quantum Electronics, No. 37, P. 390 (2001)
- 2) R. Jeremias, W. Brockherde, G. Doemens, B. Hosticka, L. Listl, P. Mengel : A CMOS photosensor array for 3D imaging using pulsed lasers, IEEE International Solid-State Circuit Conference, ISSCC (2001)
- 3) K. Creath : Phase measurement interferometry techniques, Prog. Opt., Vol. 26, P. 350-393 (1988)

◆執筆者紹介



橋本 裕介

情報機器 R & D センター



常定 扶美

情報機器 R & D センター



村上 憲一

情報機器 R & D センター



今井 憲次

新規商品創出技術開発部



岸田 貴司

新規商品創出技術開発部