

長距離・高分解能・リアルタイム 3D レーザー センサー

亀山 俊平・平井 暁人・小竹 論季・辻 秀 伸
今城 勝治・高林 幹夫・平野 嘉仁

Long Range, High-Resolution, and Real-Time 3D Laser Sensor

Shumpei KAMEYAMA, Akihito HIRAI, Nobuki KOTAKE, Hidenobu TSUJI, Masaharu IMAKI, Mikio TAKABAYASHI and Yoshihito HIRANO

3D laser sensor is the real-time remote sensor which offers 3D images of the scene. We have developed original methods of this sensor; the linear array receiver type and the scan-less receiver type, especially for long range, high-resolution, and real-time imaging. The system configuration and the development of key components are introduced, and some imaging results are demonstrated using the developed systems.

Key words: 3D imaging, laser sensor, array, scan-less

3D レーザーセンサーは、対象物上多点に対しレーザー光を送受し、その往復時間から測距を行い、測距値および対応するレーザー送受信方向から対象物の 3D 形状を計測するものである。この技術に関しては 1970 年代後半から報告されており、当初はロボット制御を目的としたものであった¹⁾。その後、3D マッピング、侵入監視、自動車自律走行といった種々の用途向けに開発が行われるようになり、現在に至っている。このセンサーは、可視カメラ、赤外線カメラ、およびステレオカメラといった画像センサーと比較して、以下の点において優位である。

- ・レーザー光をアクティブに送受するため、昼夜不問の撮像が可能
- ・変調光を用いているため太陽光との分別が可能であり、昼間の撮像における太陽光による受信飽和の問題が回避可能
- ・対象物までの距離を計測するため、赤外線カメラでは困難な、背景と対象物との温度差がない場合における対象物撮像が可能
- ・ステレオカメラと異なり、レーザー光の往復時間から

対象物上多点までの距離を直接的に計測するため、3D 画像化における複雑な信号処理が不要であり、リアルタイムな 3D 撮像が可能。また、計測精度が視差に依存しないため、長距離撮像において優位

3D レーザーセンサーの測距方式にはいくつかの方式が存在するが、従来の多くにみられる送受同軸・二次元スキャン方式^{1,2)}では、受信 SN 比を高くするために受信開口を大きくすると、この開口サイズ相当の大きなスキャナーが必要となり、スキャンした際の機械的負荷が増大する。これにより、高速スキャンによるリアルタイム撮像が困難という課題があった。これに対し、受信系を二次元アレイ化し、視野内にビームを広げて照射してスキャンレスで撮像する二次元アレイ受信方式³⁻⁷⁾が存在するが、この方式では、特に長距離撮像を実現する上で次の課題があった。まず、1 回の光送受信によりすべての画素で所要受信 SN 比を得ることが必要なため、特に長距離撮像を実現するにはジャイアントパルスレーザーが必要であり、装置が大型化するという課題があった。また、多画素の二次元アレイ受光素子を用いると、この後段に必要な ROIC (read-

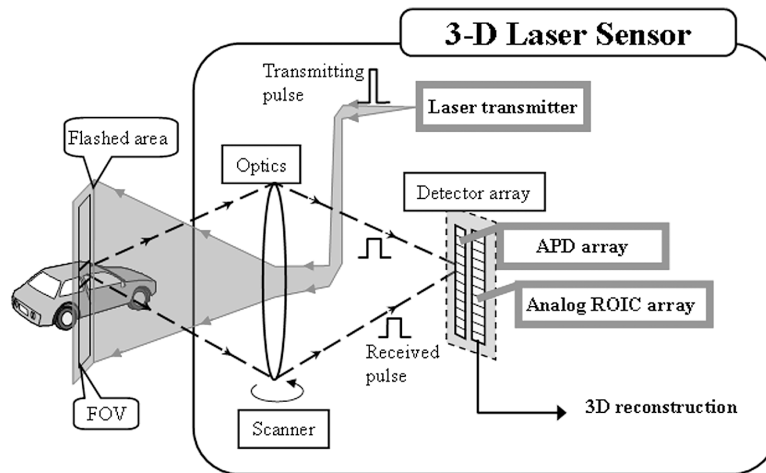


図1 リニアアレイ型装置構成.

out integrated circuit) に関しても画素数分のアレイ化が必要となり、IC 各素子のサイズが大きく制限を受ける。同じ機能で比較した場合、IC の性能はサイズに対し比例的に直結するため、二次元アレイ化による受信性能の低下が避けられなかった。

われわれは上記課題を克服できる独自方式として、後述するリニアアレイ受信型および受信スキャンレス型の3Dレーザセンサを考案し、上記の独自方式用要素デバイスを開発するとともに、従来にない長距離、高分解能(多画素)、かつリアルタイムな3D撮像を実現してきた⁸⁻¹⁰⁾。ここでは、開発の概要およびいくつかの撮像結果を紹介する。

1. リニアアレイ受信型

1.1 装置構成

リニアアレイ受信型のシステム構成を図1に示す。パルスレーザから送信パルスをAPD (avalanche photo diode) リニアアレイの受信視野にあわせてライン状に照射し、各位置における反射光を上記アレイの各素子で受信する。ROIC アレイの各素子は受信パルスのピーク強度と時間を検出し、照射ライン上の距離を瞬時計測する。この撮像ラインを一次元に高速走査して広範囲に送受信を行い、高速三次元撮像を行う。

本システムはリニアアレイ受信型であるため、二次元アレイ受信方式と比較して、パルスレーザの所要ピークパワーを低く抑えることができる。例えば、 $N \times N$ 画素(N は整数)の撮像を行う場合、リニアアレイ型の所要ピークパワーは二次元アレイ型の $1/N$ である。逆に繰り返し周波数に関し N 倍が必要となるため、平均パワーとしては同じ所要値となるが、低ピーク・高繰り返しのほうがレー

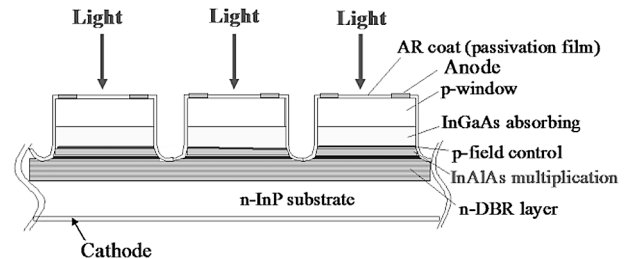


図2 InAlAs-APD アレイの構造.

ザ光源の効率やサイズの点で優位である。また、ICのサイズに関しても、リニアアレイ方式とすることで大面積化が可能となり、各素子の受信性能においても優位である。また、二次元アレイ方式では、撮像視野が送受信光学系で固定されているが、本システムは一次元の走査光学系により走査方向の撮像範囲を可変できる。さらに、本システムで用いる受光素子アレイ、ROICアレイといったアレイデバイスの歩留まりが、二次元アレイに対して高いことも利点である。われわれは、これらすべての要素デバイスの開発と並行し、システム実証をあわせて行っている。

1.2 要素デバイス

以下では、受光素子、ROICの各々について開発の概要を紹介する。

1.2.1 APDアレイ

受光素子は、InAlAs増倍層を用いた雑音特性にすぐれたAPDアレイで構成する。図2に、開発した256素子のInAlAs-APDアレイの断面構造を示す。APDアレイは、n型InP基板上に分子線エピタキシャル法を用いてn型半導体多層反射膜層、InAlAs増倍層、電解緩和層、InGaAs吸収層、窓層の順に成長させたウェハを用いて試作を行った。光入射面には、AR (anti-reflection) コートを兼ねた

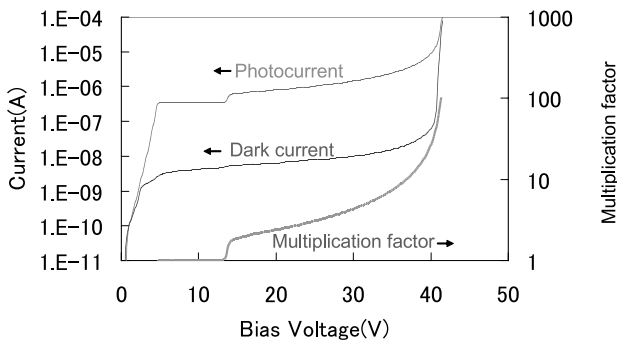


図3 電流-電圧特性.

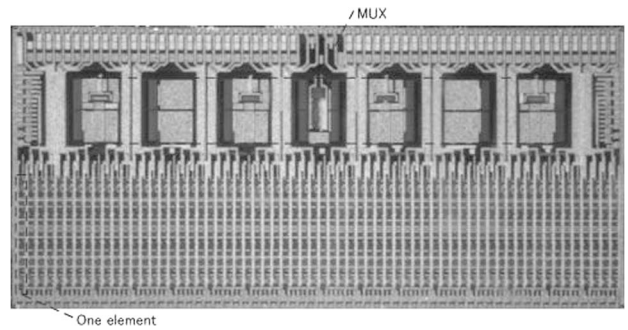


図5 ROIC アレイの外観.

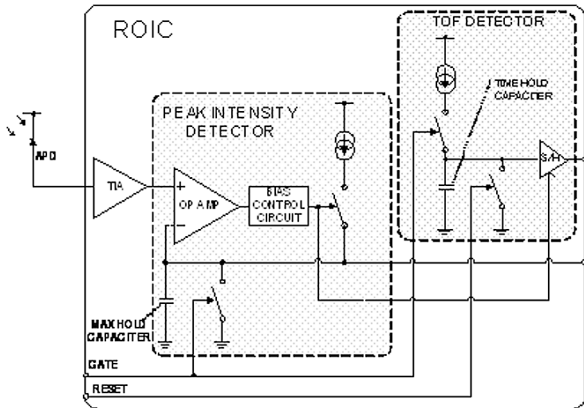


図4 ROICの構成.

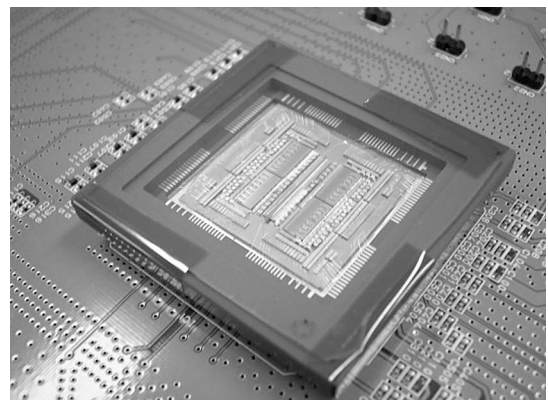


図6 パッケージ外観.

パッシベーション膜を形成した。受光領域は $50\ \mu\text{m} \times 35\ \mu\text{m}$ であり、素子間のピッチは $50\ \mu\text{m}$ である。

図3に、開発したAPDアレイの1素子の電流-電圧特性を示す。暗電流が $10\ \mu\text{A}$ のときの電圧（ブレイクダウン電圧 V_{br} ）は約 $40\ \text{V}$ であり、 V_{br} の90%時の暗電流 I_d は室温で $30\ \text{nA}$ 以下である。また、最大増倍率は100である。受光感度は $1\ \text{A/W}$ 、ブレイクダウン電圧 V_{br} の90%時の1素子あたりの接合容量は周波数 $1\ \text{MHz}$ のとき $0.3\ \text{pF}$ 、カットオフ周波数は増倍率10のとき $1\ \text{GHz}$ である。低雑音指数の特長を維持しつつ、かつ短パルスを検出するに十分な周波数応答性を有している。

1.2.2 ROIC アレイ

ROICの1チャンネルの回路構成を図4に示す。各チャンネルは、トランスインピーダンスアンプ、ピーク検出回路、および時間検出回路を有している。

ピーク検出回路はオペアンプとピークホールドコンデンサーからなる。オペアンプはゲート間におけるトランスインピーダンスアンプからの入力電圧と、ピークホールドコンデンサーの電極間電圧との差分に利得を乗じた電圧を出力する。上記差分が正の場合のみ、トリガー生成回路が動作するとともにオペアンプ直後のスイッチがオンとなり、電流源からピークホールドコンデンサーに電荷が充電され

ることで、入力電圧とピークホールドコンデンサーの電極間電圧が一致する。この動作をゲート時間にて繰り返すことにより、結果としてピーク電圧を検出する。時間検出回路では、ピーク電圧を検出した時刻における時間ホールドコンデンサーの電極間電圧を出力する。この動作をゲート時間にて繰り返すことにより、結果として最大ピークをもつパルスが入射した時間に相当する電圧を検出する。検出したピーク電圧、時間電圧については、マルチプレクサーによりチャンネルを切り替えながら読み出す。

測距を高精度化するためには、短パルスへの高速応答性と、小振幅のパルスを検出できる高ダイナミックレンジが必要となる。オペアンプに関して、入力インピーダンスを高く保持しつつ短パルスへの応答性を向上させるため、入力段にNMOS差動増幅回路を、出力段にバイポーラトランジスタを用いた構成としている。さらに、オペアンプ出力にオフセット回路を設け、スイッチの入力オフセット電圧をスイッチのスレッシュホールド電圧に近づけることで、小振幅入力時の感度を上げ、高ダイナミックレンジ化を図っている。

$0.18\ \mu\text{m}$ SiGeBiCMOSプロセスを用い、図4の構成に基づき回路の試作を行った。図5にROICアレイのチップ写真、図6にROICアレイとAPDアレイを収納したパッケージ

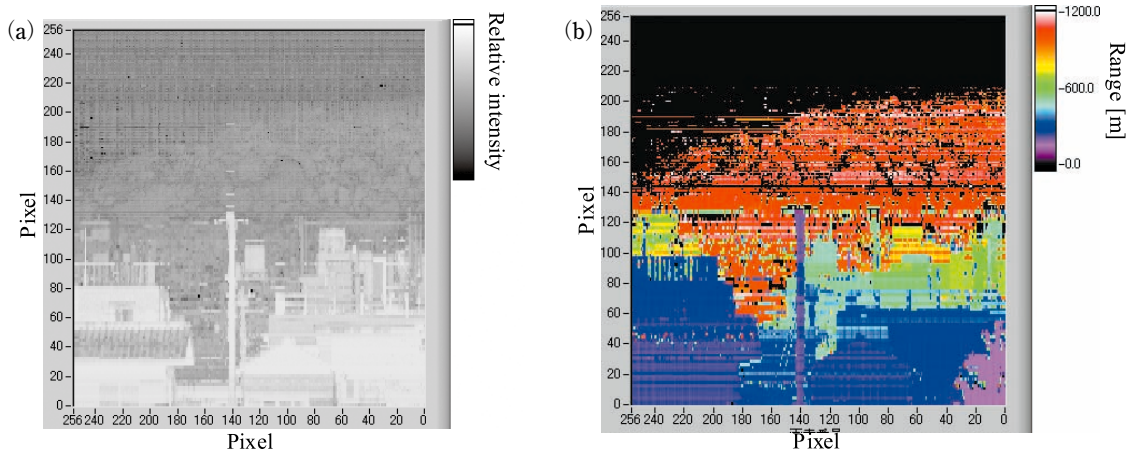


図7 長距離撮像結果. (a) 強度画像, (b) 距離画像.

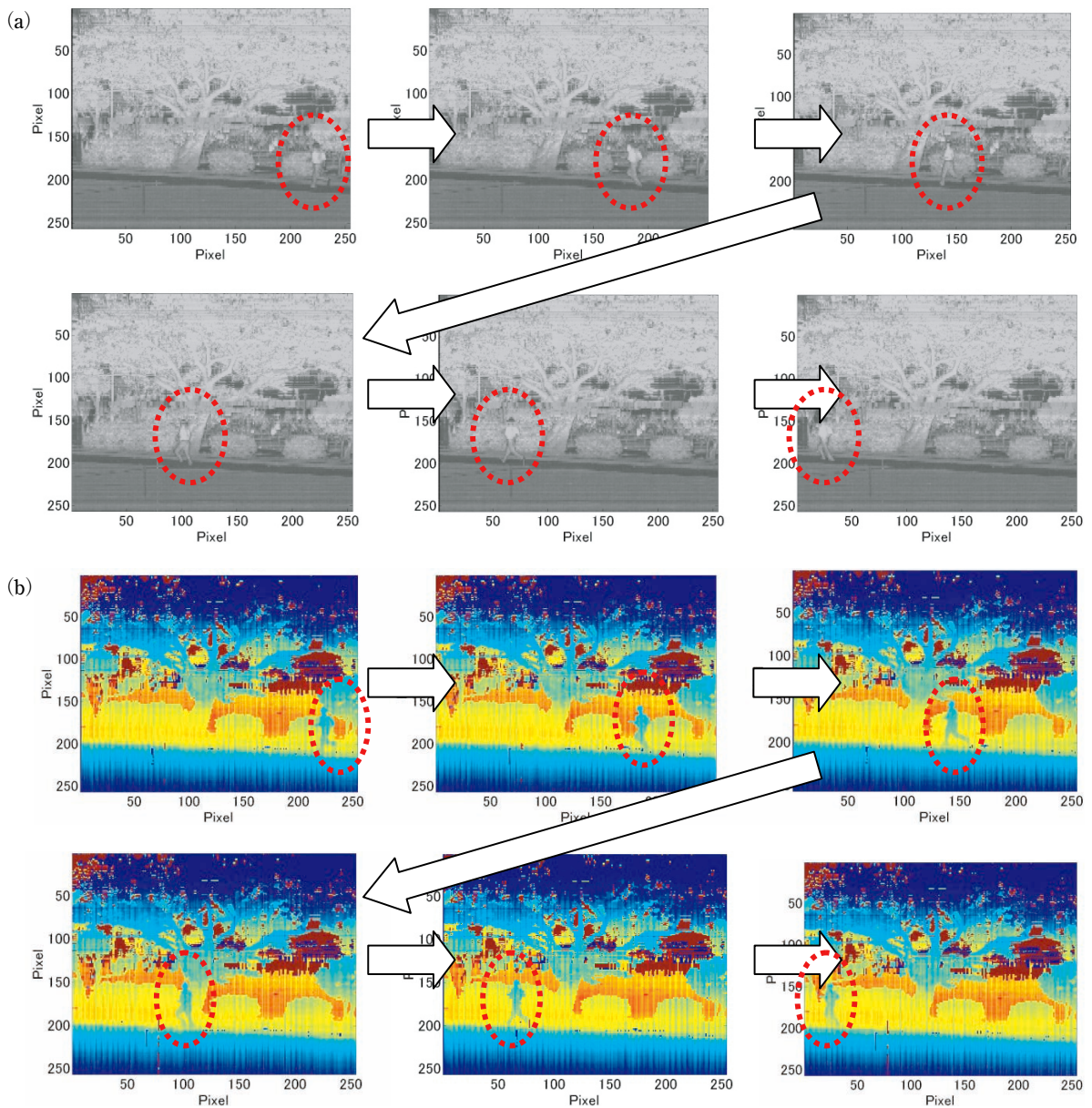


図8 走行する人物のリアルタイム撮像結果. (a) 強度画像, (b) 距離画像.

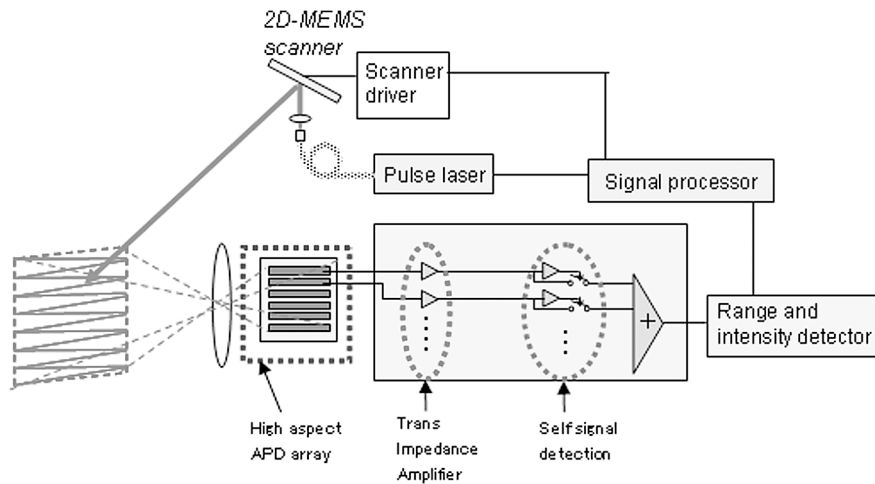


図9 受信スキャンレス型装置構成.

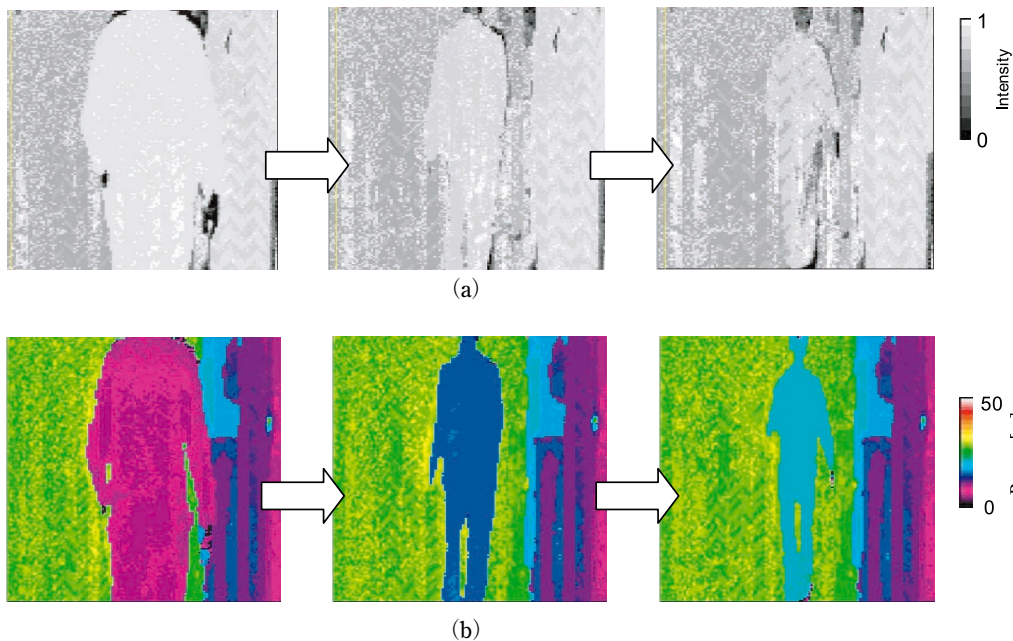


図10 歩行する人物の撮像結果. (a) 強度画像, (b) 距離画像.

ジ写真を示す. チップサイズは $6\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ であり, 1チップ64素子である. このチップを256素子APDアレイの両側に2個ずつ配置することで, 256素子のアレイ受信機としている.

1.3 撮像結果

本装置のベンチトップ実験系を構築し, 開発したAPDアレイ, ROICアレイを組み込んで撮像実験を行った. レーザー光源にはNd:YAG Qスイッチパルスレーザーを用いた. 取得された画像は 256×256 画素, 10 Hz相当の撮像速度であり, 図7は距離1 km以上の景観を撮像した結果である. また, 図8は距離200 m先の人間が撮像領域を通過する様子を撮像し, それを時系列順に示したものであ

る. 円は目標である人間を表す. 図7, 8において, 距離画像と各画素に対応する送受角度から, 3D形状の取得が可能となる. 両図ともに良好な撮像結果が得られ, 従来にない距離, 画素分解能(多画素), かつリアルタイムな3D撮像を実証した.

2. 受信スキャンレス型

前章で述べたリニアアレイ受信方式では, 受信系を実現するための多画素のアレイ素子, およびこれらの実装が必要であり, 受信系が複雑化する課題があった. これに対しわれわれは, 受信系を単一に保持し上記の複雑さを回避しつつ, かつ高速撮像を実現できる, 受信スキャンレス方式

を新規に考案し、この開発も並行して進めている。ここでは、この方式および撮像結果について紹介する。

2.1 装置構成

装置構成を図9に示す。この方式では、上述した単一受信系での高速撮像を実現するため、次に示す工夫を施した。まず、長尺型 APD をリニアアレイ化して広い受光面とすることで、スキャンレスでの 2D 視野を実現した。この視野内において送信ビームを 2D スキャンし、物体上各点に関する受信強度および距離を、距離・強度検出回路において瞬時計測する形とした。この構成では、スキャンするのは直径 1 mm 程度の送信ビームのみであり、小型 MEMS ミラーを用いることで高速スキャンを実現できる。序章で述べたように、送信ビームと受信視野の両方をスキャンする構成であれば、高速スキャンする際に、機械的負荷低減のため受信開口サイズに大きな制限が生じる。しかしこの構成では受信視野をスキャンする必要がないため、所要の受信視野を確保する限りにおいて受信開口サイズを最大限大きくとることができる。したがって、受光量を向上させることで撮像の長距離化を実現できる。本装置において、受光素子である長尺型 APD はリニアアレイであるが、後段の受信 IC において各素子の出力を加算回路により単一化した。これにより、加算回路後段の距離・強度検出回路をアレイ化する必要がなく、回路構成を単純化できる。また、単一の広面積 APD では素子の電気的容量が大きく、本装置の測距に必要な短パルスへの応答性が低下する。この低下を回避するため、2D の面積をアレイ化により分割し、各素子の電気的容量を低下させることで逆に短パルスへの応答性を確保した。さらに、各素子からの出力を単に加算すると、素子数分の TIA からの雑音が重畳され SN 比が低下するが、自己検出回路により所望信号が得られている素子からの信号のみを出力する形とし、この問題を回避した。上記装置構成を実現するため、長尺型 APD リニアアレイおよび受信 IC を新規開発した。これらの要素デバイスでは、1 章に示した APD および IC の技術をベースとしている。特に本センサー用として、APD に関しては素子の長尺化、IC に関しては加算回路、自己検出回路の新規開発を行った。

2.2 撮像結果

開発した要素デバイスを用いて装置試作を行い、撮像を行った。受信強度画像および距離画像の一例を図 10 に示す。図 10 の距離画像から 3D 画像の生成が可能である。画素数：160×120、フレームレート：8 Hz、視野 6°、距離：約 50 m であり、歩行する人物を良好に撮像できている。

われわれが開発しているリニアアレイ受信型、受信スキャンレス型のリアルタイム 3D レーザーセンサーについて紹介した。両方式とも、独自のシステム方式とデバイス開発により、従来にない長距離・高分解能・リアルタイムな撮像を実現できるものである。また、受光素子、受信 IC といった要素デバイスを自社開発している点が特長である。リニアアレイ受信型に関しては、撮像距離 1 km 以上、256×256 画素、フレームレート 10 Hz 以上、受信スキャンレス型に関しては、距離 50 m、160×120 画素、フレームレート 8 Hz と、従来にない長距離、高分解能、かつリアルタイムな 3D 撮像を実証した。これらについては、今後さらなる撮像長距離化、撮像高速化を行う予定である。ここで紹介したリアルタイム 3D レーザーセンサーが、冒頭に述べた各種用途に広く適用されることを期待する。

文 献

- 1) R. A. Jarvis: "A perspective on range finding techniques for computer vision," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-5* (1983) pp. 122-138.
- 2) E. Garcia and E. Lamela: "Low-cost three-dimensional vision system based on a low-power semiconductor laser rangefinder and a single scanning mirror," *Opt. Eng.*, **40** (2001) 61-66.
- 3) B. Stann, M. M. Giza, D. Robinson, W. C. Ruff, S. D. Sarama, D. R. Simon and Z. G. Sztankay: "Scannerless imaging lidar using a laser diode illuminator and FM/cw radar principles," *Proc. SPIE*, **3707** (1999) 421-431.
- 4) R. Stettner, H. Bailey and R. Richmond: "Eye-safe laser radar 3-D imaging," *Proc. SPIE*, **5412** (2004) 111-116.
- 5) M. Browder, B. Evans, J. Beck, M. Blessinger, W. Blattner, R. LeBlank and B. Miles: "Three-dimensional imaging sensors program," *Proc. SPIE*, **4377** (2001) 73-83.
- 6) C. Andressen, D. Anthony, T. DaMommio, D. Halsey, C. Lawton, J. Neisz, T. Perona and D. Steinmehi: "Tower test results for an imaging LADAR seeker," *Proc. SPIE*, **5791** (2005) 70-81.
- 7) M. A. Albota, R. M. Heinrichs, D. G. Kocher, D. G. Fouche, B. E. Player, M. E. O'Brien, B. F. Aull, J. J. Zayhowski, J. G. Mooney, B. C. Willard and R. R. Carlson: "Three-dimensional imaging laser radars with a photon-counting avalanche photodiode array and microchip laser," *Appl. Opt.*, **41** (2002) 7671-7678.
- 8) S. Kameyama, M. Imaki, Y. Tamagawa, Y. Akino, A. Hirai, E. Ishimura and Y. Hirano: "3D imaging LADAR with linear array devices: Laser, detector, and ROIC," *Proc. SPIE*, **7382** (2009) 738209.
- 9) S. Kameyama, M. Imaki, A. Hirai, H. Tsuji, N. Kotake, M. Takabayashi, K. Asaka and Y. Hirano: "Development of long range, real-time, and high resolution 3D imaging LADAR," *Proc. SPIE*, **8192** (2011) 819205.
- 10) 辻 秀伸, 亀山俊平, 今城勝治, 小竹論季, 平井暁人, 高林幹夫, 平野嘉仁: "送信 2D スキャン・受信スキャンレス型 3D Imaging LADAR の開発", レーザーセンシングシンポジウム予稿集 (2011) pp. 62-63.

(2012 年 1 月 13 日受理)