

フィールド科学のためのアップル LiDAR 測量 Part 1

木庭元晴

はじめに

退職して、これまで使ってきたノンターゲット対応の光波測距儀が使えなくなって、ライカを騙る中国製の機器購入などを考えていたがドブにお金を捨てるようにも思えて、決しかねていた。2021年春調査中に iPhone 7 Plus をサンゴ礁のグループに過って落としてしまった。すぐに全裸で数メートル潜って何とか回収した。その後、トラブルなどもあり、型落ちした iPhone 11 の購入も考えたが、最新の iPhone 12 Pro には LiDAR が付属しているという。当時、地形計測ツールとして利用するというようなウェブコンテンツを目にしなかったが、光波測距儀に替わり得る可能性を信じて、水没後一週間のちには当時の最新機種 iPhone 12 Pro を手にしたのである。

2年経過して本書のタイトル「フィールド科学のためのアップル LiDAR 測量」の手法を手に入れたので、学生さんだけでなく研究者の皆さんにもお伝えしたい。

本題に入る前に、まずはアップルの LiDAR システムそのものを知る必要性を感じてこの第1章を作成した。筆者の学びにもなった。そして改めてアップルの新たな市場開拓能力に驚く結果となった。何と言っても独占企業ゆえの利潤追求の姿勢はあるが、AR 市場の展開を見据えた商品故に、フィールド科学のツールとしても新たな分野を切り開くものであり、廉価で優れたものと改めて感じた次第である。次号 Part 2 で本題を論じる。

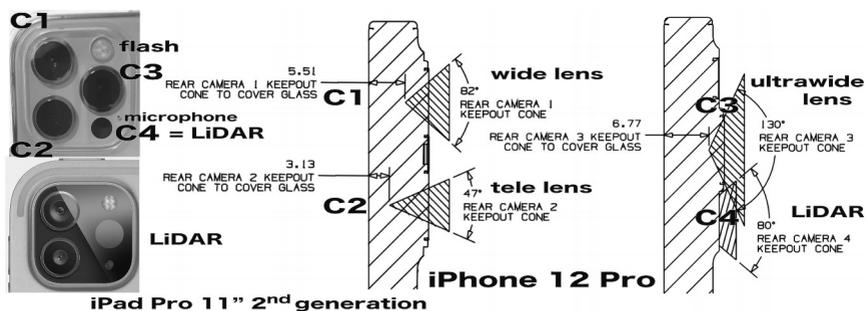


図1 iPhone 12 Pro のレンズ構成¹⁾

I 2020年アップル LiDAR デバイスの理解

I.1 2020年 iPad Pro - iPhone Pro に搭載された LiDAR スキャナー

iPhone 12 Pro²⁾ は2020年10月に発売され、LiDAR が搭載された初めての iPhone となった。LiDAR は、これに先だって iPad Pro 11” 2nd generation³⁾ に搭載されており、アップル関係のニュースとしてはかなりエポックメイキングなものであったようだ。今後、両機を指す場合、2020年アップル LiDAR デバイスと仮称する。ネット上には、これに関するコンテンツは数多い。日本のネット情報の特徴とも言えるが、仕組みの説明は中学校の技術家庭の教科書のようにその内容は浅い。文系のライターが読者にわかりやすく広報するサイトが人気で Google 検索すると、この種のサイトが上位に並ぶ。その好例 KDDI トビラ⁴⁾の文脈を使って、修正の上、常識的知識をまずは概観したい。

LiDAR は、Light Detection and Ranging 光検出と測距、の略語であり、レーザー光を利用して離れた対象物の距離を測ってその形態を捉える仕組みとされる。距離測定には〔光源〕から光を照射し対象物から〔センサー〕に戻ってくるまでの時間を計測する ToF (Time of Flight, 飛行時間) という方式が用いられている。ToF 方式には、光が反射して戻ってくるまでの時間を直接計測

し対象物との距離を計算するダイレクト ToF (dToF) 法と、反射した光の位相差から距離を求めるインダイレクト ToF (iToF) 法の二種があり、2020年アップル LiDAR デバイスには前者の dToF 法が採用されている。

dToF 法は、屋外の外光による劣化程度が低く、比較的長い距離の計測が可能ではあるが、計測精度に限界があり高精度化（高解像度化）は難しいものとされてきた。アップルはその限界を超える技術をソニーから得た。両機に搭載されている LiDAR スキャナーのセンサーはソニー製である⁵⁾。この2023年秋発売予定の iPhone 15までソニー製の採用が決まっている。よく調べてみるとソニーが元々開発したものではないが、培ってきた生産基盤を利用して経済性を獲得して、それをアップルがいち早く採用したと言えよう。

2020年アップル LiDAR デバイスでは、LiDAR スキャナーによる距離計測の限界値は5メートルに過ぎない。これはアップルの経営的観点から選択されたものである。強力なレーザー光ほど装置は大型化し、電力消費量も増大する。

ToF 方式の原理は1960年代に誕生し1970年代さらには1990年代には宇宙分野で実用化されてきた。USA や中国などでは、自動運転車の環境認識にも LiDAR スキャナーが実用化されている。

アップル製品に LiDAR がはじめて搭載されたのは前述のように iPad Pro 11" 2nd generation であり、この LiDAR 機能の情報がネット上に拡がった。図 2 には iPad Pro 11" 2nd generation の LiDAR スキャナーの外観を示すが、iPhone 12 Pro の LiDAR スキャナーの理解の必要性から図 1 も用意した。

アクセサリなどを製造するサードパーティへのアップルの指示書⁶⁾を参考に、この図 1 には iPhone 12 Pro の 4 種の背面カメラの配置や画角などを示している。カメラは C1~C4 (筆者の仮のラベル付け) の 4 種あって、C4 の LiDAR スキャナーもその一つとされる。つまり光から周辺環境を捉える手法の一つとして、LiDAR スキャナーが加わったのである。この導入の効果は、光量の少ない夕方や夜間の写真撮影の際に、直接実感することができた。iPhone 12 Pro の写真アプリで写真撮影すべく、画面上のシャッターボタンを

押すと、グググッとレンズが動き、周辺の光環境を徐々に捉えて、そしてシャッターが下りる。図1右図のC4を見ると、レンズアングルが 80° となっている。つまり、iPhone 12 ProのLiDAR スキャナーの場合、この画角(写角 angle of field)で近赤外線の送受信が実施されているのである。なお、iPad Pro 11" 2nd generation では、図2(c)に示すように、送受信画角はほぼ 78° ⁷⁾になっている。

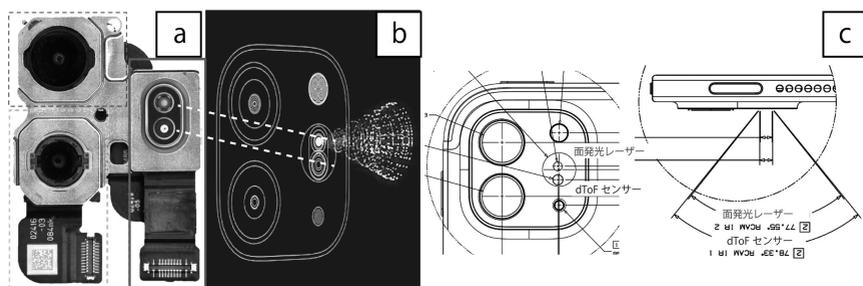


図2 iPad Pro 11" 2nd generation のLiDAR モジュール⁸⁾

なお、図1右図のC3とC4ではその画角域が重なっているが、C3は可視光を受信し、C4は近赤外線を受信するので、問題がない。互いに干渉しあわない。アップルの(公開)資料には出会っていないが、このC3とC4の重なりが、LiDAR スキャナーの限界を補う「3D とRGB 情報の融合」を可能にしているように思う。後述するLiDAR スキャナーアプリのScaniverse や Polycam などの高い3D 検知能力を支えているように感じている。最初に発売されたiPad Pro 11" 2nd generation と、iPhone 12 Pro の間でのこの違いの実質的効果については把握していない。図2には、iPad Pro 11" 2nd generation のカメラを示しているが、直接C3にあたるものは無いが他のレンズ系が機能しているものだと思う。

図1左図下にはiPad Pro 11" 2nd generation カメラ部分の外観を示す。図2

には、LiDAR スキャナーのハードウェア構成を示す⁹⁾。この (a) 図は裏蓋を外した際のカメラ部分の外観で、この右手の (原図では) 赤枠で囲んだ部分が LiDAR スキャナーにあたる。(b) 図の赤外線放出部分の設計図が (c) 図にあたる。この左の立面図には、近赤外線放出部 (面発光レーザー) が上部に、受信センサー (dToF センサー) が下部に配されている。

アップルの “AR in Business”¹⁰⁾ サイトを見ると LiDAR が iPad と iPhone に組み込まれた理由がわかる。この AR in Business コンテンツは、2020年春、iPad Pro 11” 2nd generation の発売に合わせて作成されている。このページの最初に、日本語には違和感があるが、「拡張現実 (AR) のための世界最大のプラットフォームで、社員とお客様の可能性を高めましょう。Apple のハードウェアとソフトウェアは、最初から、最高の AR 体験を実現するために作られています。iPhone と iPad の AR は、これまで不可能だった方法でワークフローを動かします。」とある。

例えば AR 導入事例の一つ、リモートコンサルティングでは (これも日本語表現が壊れてはいるが)、「Stream Interactive Video Calls¹¹⁾ アプリケーションは、LiDAR によって提供される刻々と変化する空間認識結果を使って、リモートコンサルティングとサービスを促進します。お客様は iPad Pro の LiDAR スキャナーを使って、自分がいる空間の詳細な 3D マップを作成します。離れた場所にいるコンサルタントは、この 3D マップを使って空間を詳しく測定し家電を配置できるので、現場を訪問する回数を減らすことができます。お客様は自分の空間でモデルを確認できるので、選んだものが自宅でどのように見えるか正確に知ることができます。」などとある¹²⁾。

アップルの iPad と iPhone への LiDAR スキャナー搭載の目的はまさに AR 世界の一般的な普及であって、本報告のフィールドツールとしての利用は、アップルの主要な関心事ではない。

I.2 ソニー製 LiDAR スキャナーの性能

ウェブページ Apple LiDAR Demystified: SPAD, VCSEL, and Fusion…¹³⁾を読んで、iPad と iPhone に搭載されている LiDAR スキャナーのセンサーがソニー製であることを知った。そして、マスコミにリリースされたソニー（ソニーセミコンダクタソリューションズ）の技術報告（News Releases, 2021年2月）¹⁴⁾を読み、本報告で示す測量利用に問題がないことを知った。ここではこのソニーの「技術報告」と2022年4月発行『応用物理』に掲載された「研究紹介」¹⁵⁾から、本報告と繋がる情報をここで紹介したいと思う。デバイスやアプリの限界と可能性を知ることなく、LiDARによる測量の結果を評価することはできないのである。

なお、既に述べたように2020年アップル LiDAR デバイスは2020年春と秋に発売されたものであり、ここで取り上げるソニーの技術報告と研究紹介はそれに遅れて1～2年後に出版されたものである。ウェブページ Apple LiDAR Demystified: SPAD, VCSEL, and Fusion…の検証を参照すると、このデバイスと両報告内容の間に基本的違いは無いことがわかった。

光の量は、電磁場の量子化によって現れる電磁相互作用を媒介する素粒子（ゲージ粒子）の数で求めることができ、その計測は、SPAD（Single Photon Avalanche Diode - 単一光子アバランシェダイオード）で実現できるという研

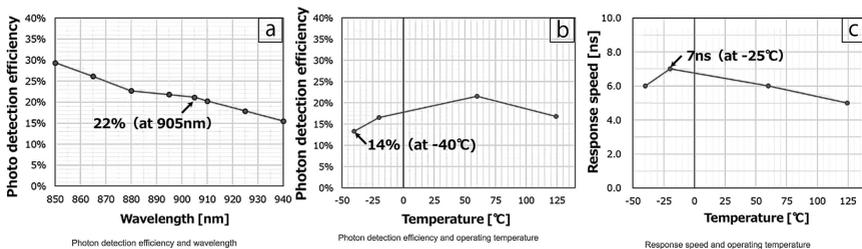


図3 (a) 波長 (nm)-光子検知効率 (%) (b) 気温 (°C)-光子検知効率 (%)
(c) 気温 (°C)-応答速度 (ns)

究の流れがある。ソニーセミコンダクタソリューションズは2021年2月、世界に流布する諸製品に比べて、低コストでより高性能な製品を生み出すことに成功した。「近赤外線905 nm の波長で22%を超える高い光子検出率（図3(a)）などを実現した。実証実験用 SPAD LiDAR システムでは、117 klux の太陽光条件¹⁶⁾で200 m 先の95% 反射率のターゲットを距離測定誤差0.1%で測距可能なことを実証した」（一部省略、研究報告）のである。

図3では、(a) 近赤外線（700～2500 nm）のうち850～940 nm の波長域の光子検知効率（%）、(b) 光子検知効率（%）の気温（℃）依存性、(c) 応答速度（ns）の気温（℃）依存性、が示されている。人間の視覚上限値は760～830 nm にあり、この可視光域を超える、つまり人間の眼にとって安全な850～940 nm の波長域の近赤外線が使用されている。地表の幅広い気温環境下で、レーザー発光源からの近赤外線が対象物に反射して戻った光子の検知効率を実用可能なレベルに向上させたのである。対象物にレーザー光が当たって、発光源に近接して配置されているセンサーに到達する過程を考えると、空気中の微粒子による拡散、対象物による吸収などがあり、対象物から反射してもいわば点に近いセンサーにその反射光が捉えられる確率を想像すると、図3(b) に示された光子検知効率には驚かざるを得ない。図3(c) の応答速度の単位は ns（nanosecond, 10億分の1秒）で応答時間と表現すべきところであろうが、この研究分野では慣習的に Response speed と表現されている。マイナス25度の環境下で最も遅くて7 ns ということであり、応答時間が7 ns より少ないということが保証されているということになる。応答速度については SPAD のデッドタイム dead time のことであるが、後述する。

図4は、マスコミにリリースされたソニーの4ページに満たない「技術報告」に掲載されている二つの図から作成したものである。掲載されている図の鮮明度は低く、Adobe Photoshop で彩度調整とトーンカーブのツールを使って補正した。報告文中に特にこの画像の説明はないが両図（原図はカラー）を使って解説したい。

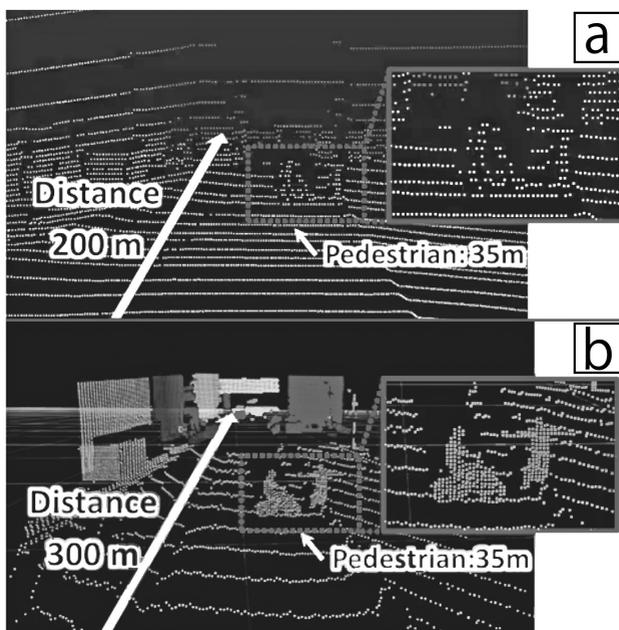


図4 ポイントクラウドの比較 (a) 従来センサー (b) 新センサー

図4 (a) はソニー旧来のセンサーの結果で、(b) は新たに開発されたセンサーの結果である（原典でのタイトルは、Point cloud [Left ((a) 図に対応) Conventional LiDAR, Right ((b) 図に対応) LiDAR with new development]）。両図の水平×垂直範囲は本来同じであり、(a) 図と (b) 図の奥行きにはそれぞれ200 m, 300 m の違いがある。検知深度の拡大故である。センサーから35 m に位置する pedestrian の枠には、バイク運転者と歩行者が見える。(b) 図では認知されるが、(a) 図では認知困難であったろう。

図中の点の集まりはポイントクラウド (point cloud 点群) と呼ばれる。両図で、水平および垂直の平面座標中の点の密度に差が無いように見えるが、pedestrian に対してはポイントが集まってクラウドが生成されている。(b) 図ではひとまとまりの対象については、クラウド毎に色分けがなされていて (原

図はカラー)、pedestrian 同様、クラウド、言い換えると面群の類別がなされている。画像上で区別された対象物に、ポイントクラウドが割り当てられているとも理解できるのである。

pedestrian として想定される背丈サイズは50~200 cm ほどなので、画像処理で人物と判断できた場合、それに LiDAR で取得したポイントクラウドが付加されて、その対象の画素範囲が認定されるものと考えられる。LiDAR 情報だけでは無い。なお、夜間については赤外線写真が併用されているのではないか。

I.3 ソニー製実証実験用 MEMS SPAD LiDAR システム

ソニーチームの田代と伊東による応用物理学会誌の「研究紹介」¹⁷⁾ を LiDAR 利用者の観点から眺める。この田代・伊東 (2022) の情報もアップルの LiDAR システムを理解する手がかりになると思う。

図5のシステムは、自動運転実用化に向けて実証実験のために当時開発されたものである。左右二カ所の PLD¹⁸⁾ — MEMS ミラー¹⁹⁾ を通じて発射されたレーザー光が対象物から反射して戻って来た光を、カメラとその内部の SPAD dToF 深度センサーで受信して、図4 (b) のように、道路、歩行者、他車などを認識する。もちろん、図5に示されたモデルの視野は極めて狭く、実際の自動運転にはこの種のシステムが前方だけでなく側方や後方にも装着される必要がある。2023年7月現在で、ソニーのホーム>分野>モビリティ>車載用カメラ/LiDAR²⁰⁾ などのウェブページを見て理解できるが、ここで紹介しているセンサーがソニーの主力製品になっておりこの分野での世界シェア一位を謳っている。アップルデバイスに供給されていることに拠るものである。

PLD (Pulsed Laser Diode)²¹⁾ は、波長905 nm/ピークパワー45 W/パルス幅4.5 ns のナノ秒レーザー光を対象物に照射する。太陽光スペクトルは大気圏上層部で水蒸気吸収によって減少するが、特に905, 940, 1550 nm で大きく減少

し、図3(a)のように、905 nmでの光子検知効率22%が実現されている。ソニーでは自動運転分野でこの波長が、スマートフォンでは940 nmが採用されている。

このLiDARシステムの空間検知範囲は、画角で見ると、水平 25.2° 、垂直 9.45° で、角度分解能は水平垂直ともに 0.15° である。図5では右上のスクリーン状の矩形域に当たっている。距離300 mの矩形域は、水平方向 $2 \times 300 \times \tan(25.2^\circ/2) = 134.1$ m、垂直方向 $2 \times 300 \times \tan(9.45^\circ/2) = 49.6$ mで、 6651 m^2 にあたる。

「PLDは水平方向の画角内にライン上（著者注記：プレーン状）にレーザー光の照射を行い、MEMSミラーを用いて照射方向を垂直方向に1Dスキャンすることで上記画角内へのレーザー照射を行う。」という。これは、ソリッドステート型のうちのフラッシュ型にあたる²²⁾。

「ソリッドステート型のもう1つの代表的なタイプはフラッシュ型です。他のタイプはレーザー光を局所的に照射するのに対して、フラッシュ型は一度に広範囲に照射します。そうすると、物体で反射したレーザー光が複数方向から1度に戻ってきます。それに対して、受信部に複数の光センサーを2次元アレ

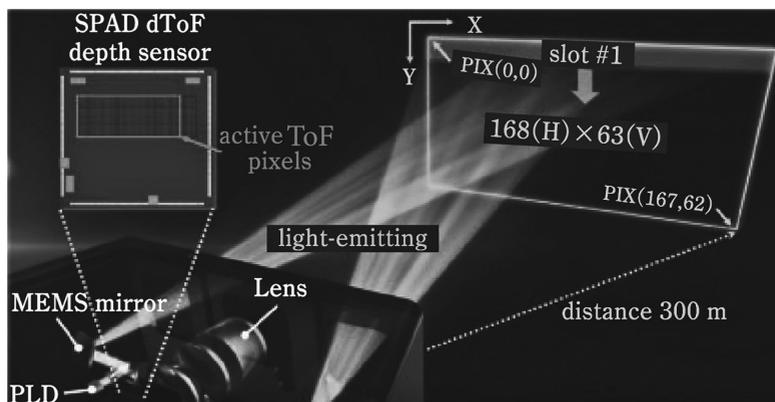


図5 実証実験用 MEMS SPAD LiDAR システム²³⁾

イ状 (ピクセル状) に並べておいて、同時に複数方向からのレーザー光を検出します。これは、通常の可視光向けのカメラでフラッシュをたいて撮像するのと同じ仕組みです。異なるのは、通常のカメラでは各ピクセルで受けた光の光量を測定するのに対し、フラッシュ型の LiDAR ではピクセルごとに光を検出したタイミング (時間) を測定するという点です。ToF の原理による測定を複数同時に行う、という構成です。」 (下線は著者による)

図5左下隅に見える左側の PLD-MEMS mirror のレーザー (原図ではオレンジ色) の光幅の変化を見ると、MEMS mirror から放射状に幅が広がっており、これ自体にフラッシュ型またはこれに類するレーザー光の拡散機構が組み込まれている。

水平軸 1 本分のレーザー光がシーン scene 方向に照射されると、反射して戻ってくる光子をまとめて捉えるセンサーが必要になる。それが図5の Lens 後背に配置されている SPAD dToF depth sensor であり、その中の active ToF pixels が「2次元アレイ状 (ピクセル状)」部分である (図6 (a1)(a2))。田代と伊東によれば、「センサー側では、1つのマクロピクセルは 3×3 SPAD で構成されており、同時に水平方向168個、垂直方向1個のマクロピクセルを露光して測距動作を行う。MEMS ミラーで垂直方向にレーザー照射角を変えながら、センサー側では個々のマクロピクセルで露光を63回繰り返すことで1フレーム分 (「水平」方向168点, 「垂直」方向63点, 計10,584点) の距離画像が得られ、この動作を20 fps (frames per second 映画などの1秒当たりのフレーム数) 行う」のである (() 内の注記は著者による)。もちろん、このフレーム間の連続性をトレースし記憶してゆく必要がある。

study-robot.jp によると、「自動運転自動車などの自律走行ロボットで3D LiDAR を利用する際には、point cloud のデータから距離が近い点を集めて塊を作り、1つの障害物と認識する処理を行います。この処理の中身は、幾何学的な計算だったり、ディープラーニングによるニューラルネットワークによる演算だったり、人工知能技術の1つのクラスタリング処理だったりします。障

害物を表現する塊の形は、障害物がすっぽりと収まる直方体が一般的です。障害物の種類が自動車や人間の場合には直方体で十分です。」とある。

SPAD LiDAR で取得したポイントクラウドとは別に、図5の Lens つまりカメラを通じて、鳥瞰図、信号光強度、背景光画像、2次元中心投影画像を取得している。ポイントクラウドだけでなく写真情報も加えて、最大300mの奥方向まで、歩行者、自動車、縁石、樹木、建物などの対象物が検出されるのである。

I.4 SPAD ToF 方式距離センサーの構造と計測原理

アップルデバイスのLiDARシステムの説明に入る前に、本節を用意した。図5のように、PLD (Pulsed Laser Diode) からレーザー光が車前方に発射される場合を考えて見る。図5では、二カ所のPLDからそれぞれ単独のレーザー光が発射され、MEMSミラーから面状に拡がってフラッシュ型に変更されている。図5左隅をよく見ると、左側のPLDから発射されたレーザー光は1本であるが、MEMSミラーへ直角に進行方向が変わるところで、1本のレーザー光がまずはスプリットされているようである。

MEMSミラーからレーザー光がフラッシュ型に拡散する場合、いわば同時に発射された多数のレーザー光が前方のシーン scene に広がるオブジェクト群に照射される。さらに、個々のオブジェクトから反射されたレーザー光は用意されたSPADセンサーによって受信される。レーザー光の発射時刻とSPADセンサーへの到着時刻は記録されるのでLiDARシステムからの距離を求めることはできる。しかし、個々のオブジェクトの反射点の位置ベクトルを求めるにはセンサーで個々のSPADへの入射角度が必要なのでないか。そう考えて文献調査をしたがそういう情報が無い。個々のレーザー光の軌跡を個々に求めるという過程を想像してしまうのである。

LiDAR は“Light Detection And Ranging” または “Laser Imaging

Detection and Ranging”を省略した造語とされるが、現在、前者が定着している。いわばぼくは不覚にもこれに騙されたのである。後者がより適切だと思う。LiDAR よりも LIDAR がより適切だと思う。通常のスチール写真はカメラで風景を撮影すると、微細なハロゲン銀粒子の一粒一粒にシーンと相似する位置情報とその RGB や輝度などの情報が取得される。LIDAR はこのフィルムの写像の集まりに深度が付加されるのである。実際、これまで iPhone 12 Pro+LiDAR で測量してきたファイルには点群 point cloud の空間位置情報さらには点群の各点の RGB 情報も組み込まれているのである。

I.4.a SPAD ToF 方式距離センサーの構造と動作原理

ここでは²⁴⁾、2020年アップル LiDAR デバイスに搭載されている SPAD ToF 方式距離センサーの構造について図6などを使って述べる。同デバイスに組み込まれている LiDAR のセンサーはこれまで述べてきたように、ソニー（ソニーセミコンダクタソリューションズ）の技術報告（News Releases, 2021年2月, 国際学会 IEDM にて2020年12月発表）に該当するもので、2022年5月にはサンプル出荷されている²⁵⁾。

図6下段左の(c)は公開されている動画の一部を切り取ったイメージ図である。シーンのターゲットから乱反射された近赤外線が SPAD ToF 距離センサーに戻って来た様子がイメージされている。上段と下段の半導体素子 chip は (a1) 図, (a2) 図に対応している。(a1) 図左側の上段は SPAD 画素群で、下段のロジックチップでは SPAD 画素群から取得した RAW 情報を距離情報に変換し出力するところまで、各画素に対応してセンサー内で実現している。両チップは (a1) 図右側または (b1) 図の垂直断面図の下部に見えるように、ロジックチップ (見えないが図の下方) と Cu-Cu 接合されている。SPAD アレイ array は、(a2) 図のピクセルチップ情報のように189 (H) × 600 (V) (計 114,400) の SPAD からなっている。

特に記述されていないが距離情報だけでなく、反射光の出所のシーン上の二

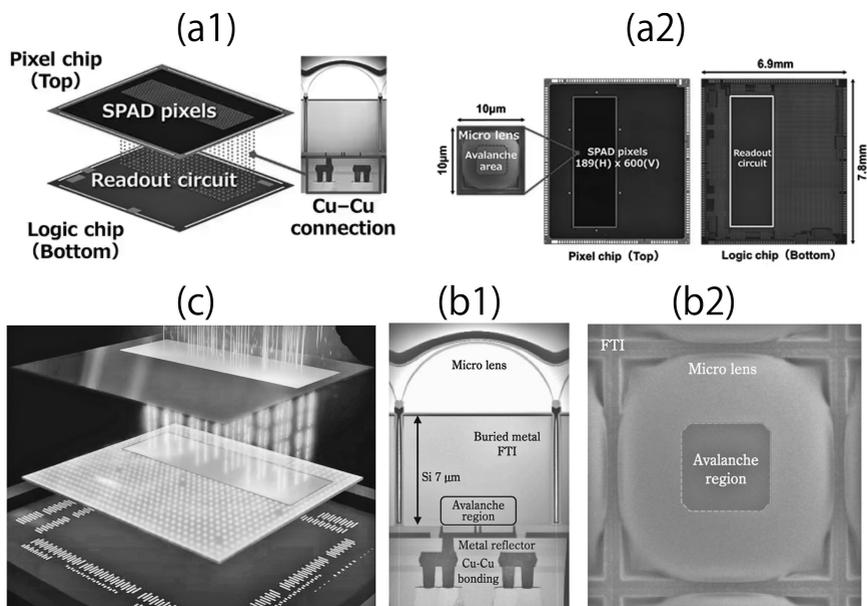


図6 ソニー車載LiDAR向けSPAD ToF方式距離センサー²⁶⁾

次元位置ベクトル情報が併せてロジックチップで処理されている筈である。これが「フラッシュ型によるレーザー光の面状同時発信による多数のターゲットの位置ベクトルの決定プロセス」が実現する条件である。

図5のシーンには平面画像枠 (X軸 [水平軸] 方向, Y軸 [垂直軸] 方向) = (168ピクセル, 63ピクセル) が示されている。田代・伊東 (2022) の「表2 LiDAR システムの特性比較」には, ソニーの ISSCC (国際固体回路会議) の 2013, 2018, 2019, 2020で発表したシステムと This work (今回) のシステムがまとめられている。パラメータのうち, RX scanningの項には, 2013, 2018は Mechanical, 2019は Flash, 2020, This workは Scanning となっている。RXは Receiverで, TXの Transmitter に対応している。パラメータ RX scanningでの scanningは, 189 (H) × 600 (V) (計114,400) それぞれの座標

点に対してセンサーのマクロピクセルを対応させる走査をしているということだろう。更には言えば、パルスレーザーの照射点も、平面画像枠 (X 軸 [水平軸] 方向, Y 軸 [垂直軸] 方向) = (168ピクセル, 63ピクセル) も固定されていることになるのではないか。パルスレーザーの照射点を絞るのは難しいことではない。

水平軸方向にはフラッシュ型 (プレーン), 垂直軸方向には63ステップでスキャンされて、一つのフレームが構成されて、毎秒フレーム数は20フレーム (fps) となっている。一つのフレームは $168 \times 63 = 10,584$ ポイントからなる。同時に照射されるパルスレーザー光のポイント数は168個である。二カ所の PLD から同時にパルスレーザーが発射されているだろうから、168個の反射光が同時にセンサーに届く可能性が高い。

前述の田代・伊東 (2022) の記述を再掲すると、「センサー側では、1つのマクロピクセルは 3×3 SPAD で構成されており、同時に水平方向168個、垂直方向1個のマクロピクセルを露光して測距動作を行う。MEMS ミラーで垂直方向にレーザー照射角を変えながら、センサー側では個々のマクロピクセルで露光を63回繰り返すことで1フレーム分 (著者注記: 「水平」方向168点, 「垂直」方向63点, 計10,584点) の距離画像が得られ、この動作を20 fps (著者注記: frames per second 映画などの1秒当たりのフレーム数) 行う」。

一つのマクロピクセル内の $3 \times 3 = 9$ 個の SPAD は、光子が届いても同時に露光されず、SPAD 特有のリチャージの必要性がなく、SPAD アレイのいわば同じ位置で9回、ほぼ同時に届く光子を捉えることができる。それゆえ、二カ所の PLD から同時に照射されても問題が無く、空間情報をより正確に捉えることができるのである。二カ所の PLD から同時にパルスレーザーが発射されているので、データ点数は $10,584 \times 2$ 点となる。

SPAD アレイは、図 6 (a2) に見えるように、189 (H) \times 600 (V) ピクセルの SPAD からなる。マクロピクセルは9ピクセルから構成されるので、マクロピクセル数は $189 \times 600 / 9 = 12,600$ となる。1本の水平軸方向のフラッシュか

ら生じる反射の受信には、168個のマクロピクセルが必要だから、 $12,600/168 = 75$ となって、垂直成分63回と比べると、ここで用意されている SPAD アレイには2割近く余裕がある。この程度の余裕は運用上、必要なものとも考えることもできる。言い換えると、用意された SPAD アレイは1フレームの処理が可能と言える。2次元位置と深さ情報の処理は各 SPAD で処理された後、1フレーム全体の画素情報から1シーンの個々のオブジェクトが求められるのである。1秒間に20コマ中の個々のシーンのオブジェクト群が再生されて行くのである。

I .4.b SPAD ToF 方式距離センサーの動作原理

LiDAR 技術のうち、ここ数年、市場で大きな展開を見せているのは、ソニーの SPAD (Single Photon Avalanche Diode 単一光子アバランシェダイオード) である。図7を使って、動作原理 working principle を示す。

図7(a)²⁷⁾ はパルス LiDAR 機構の概略を示している。PLD (Pulsed Laser Diode パルスレーザーダイオード) から近赤外線905 nm のレーザー光が発射されている。この発射時刻は TDC (Time to Digital Converter) に記録される。

図6の積層型 BI SPAD アレイ (back illuminated 10 μ m SPAD pixel array)²⁸⁾ は、117 klux²⁹⁾ という真夏の海岸であっても図3(a)のように、このレーザー光を20%余り捉えることができる。

図6(b1)には SPAD 画素の垂直断面が見える。光子は集光を考慮した半球状の microlens を通過して受光面以下の積層型 BI SPAD の領域に入る。一粒の光子は、7 μ m 厚の結晶シリコン層を駆け抜け、このシリコン層の底の金属反射板に近い場で、電子雪崩を生み出す。(b1) 及び (b2) 図の [Avalanche region] とされている付近での現象である。この電子雪崩現象のお陰で、微少な一つの光子だけを検知することができるのである。

この電子雪崩現象が SPAD の逆電圧でプラス印加されたカソード (陰極) 端子からインバーター inverter 回路を介して TDC に伝わるのである。PLD

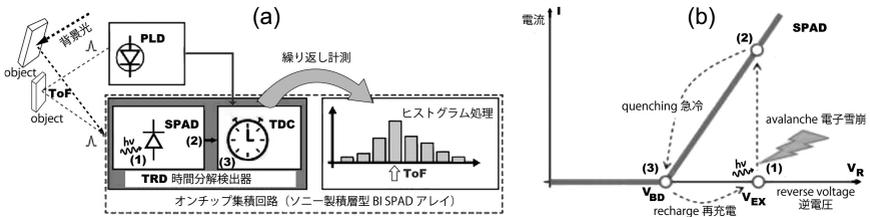


図7 (a) パルス LiDAR 機構 (b) SPAD の動作原理

からパルスレーザー発射の情報は前もって TDC には伝わっているので、レーザー光の往復時間を求めることができる。

とはいえ、1 回切りでは無い。SPAD の Maximum output count rate は、60 M (cps) である。前項 I.4.a (第 1 章第 4 節第 a 項) で述べたように、パルスレーザー光は、1 プレーン 168 画素に向かって同時に発射される。63 プレーンで 1 フレームになり、毎秒 20 フレームが取得される。単純に考えると、1 プレーン当たり、 $1/20/63$ 秒 = 794 マイクロ秒が割り当てられている。単純に SPAD のカウントの能力を見ると、 $60 \text{ M (}/\text{秒)} \times (1/20/63) \text{ (秒)} = 47,619$ 回となるが、2 カ所の PLD からパルスレーザーが発射されるので、能力としては、 $47,619/2 = 23,809$ 回となる。TDC など他の要素もあって単純ではないが、SPAD の能力はこのシステムの制限要因にはなっていないことがわかる。

SPAD はシーン scene の画素毎に多数の計測結果をロジックチップに送って確率論を使って ToF を得ている。図 7 (a) には、TDC からヒストグラム処理への過程が模式的に示されている。ヒストグラムの横軸は ToF 値で、縦軸はその頻度である。数十回程度の測定値が得られるとポアソン分布になる。この分布から最も適当な ToF を得るロジックやハードウェアとの統合的視点での手法なども発表されている³⁰⁾。前掲の田代・伊東 (2022) の記述にあるように個々の積層型 BI SPAD では、図 7 (a) の機構図に示したオンチップ集積回路の役割が果たされているのである。

図 7 (b) には、SPAD (Single Photon Avalanche Diode 単一光子アバラン

シェダイオード)の計測原理を示している。次の(1)~(3)は図7(a)(b)のものと対応している。

(1) 初期状態(光が入射していない状態)では、SPADの陰極(カソード cathode)端子にはプラス印加され、ブレイクダウン電圧 V_{BD} よりも数ボルト高い電圧(過剰エクセスバイアス電圧 V_{EX})の逆バイアス電圧 V_R (reverse voltage)が印加されている。この初期状態で一つの光子が侵入すると、結晶シリコン層の下部で電子雪崩が発生し、電流が急増して、その情報がカソード端子からインバーターを介してTDCに伝わる。

(2) その様子を示すのが(b)図の(1)から(2)に垂直に伸びる…➡である。SPADには直列に抵抗素子(クエンチング抵抗)が追加されているので、抵抗×電流の効果でバイアス電圧が下がる。

(3) 逆バイアス電圧が低下すると電子雪崩が弱まって、発生電流が減少して、逆バイアス電圧 V_R がブレイクダウン電圧 V_{BD} に到達して電流の発生が止まる。この過程をクエンチングと呼んでいる。電流の発生が止まるとクエンチング抵抗による電圧降下がなくなり、SPADが再充電されて、逆バイアス電圧は初期状態(1)に戻る。

初期状態に戻って新たな光子入射の受け入れることができるまでの時間を dead time という。このソニーのSPADの場合、図3(c)のように7 ns 以下であり極めて短い。

I.5 アップル LiDAR システムの特性

以上を理解した上で、アップル製品のLiDARシステムの特性をここに示したいと思う。アップルから技術情報はネット上には公開されておらず、ネット上の他のソースからの情報も浅く、唯一4D Sensing & AIoT³¹⁾が手がかりとなった。

アップルのLiDARシステムは、カメラの一部として拡張現実(AR)を実

現すべく、携帯ツールに組み込まれた。撮像可能距離 5 m はこの目的と他の経済的かつ技術的観点からすると妥当な選択である。このことから自動運転のための LiDAR とは異なる設計となっている。

前述のソニーの自動運転用 LiDAR システムでは、レーザー発光源は二つで、個々の水平軸上の168点についてはフラッシュ型で、垂直方向にはミラーを使って63ステップ回転され、短時間に矩形1フレーム3D域(水平方向168点×垂直方向63点=10,584点)が照射される。受信側のセンサーについても、1フレーム分を構成する照射ステップに対応してすべての SPAD が用意されている。

アップルの LiDAR システムには、レーザー照射とセンサー受信の間に DOE (Diffractive Optical Element, 回折光学素子) が介在している。4D Sensing & AIoT では、回路の分解などでおよその枠組みを明らかにしている。利用者の観点から参考になる部分を紹介したいと思う。

アップルの LiDAR システムは、2020年発売の iPad Pro 11" 2nd generation と iPhone 12 Pro 以来、主要な携帯デバイスに装備された³²⁾。それを支える技術の重要な一つがソニーの SPAD アレイにある。その電子工学的機能はこれまで簡潔に紹介してきた。アップルの LiDAR システムはマトリクス型 dToF に属しており、これは「複数のレーザー光を同時に投光し、その反射光をマトリクス上の SPAD を用いて取得し複数点の距離を同時に測定するシステム」³³⁾とされる。

I.5.a 垂直共振器面発光レーザー+DOE

発光部には垂直共振器面発光レーザー VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser ヴイクセル) が使用されている。ヴィクセルは現在、レーザーダイオードの主流になっていて、従来の端面発光レーザーに比べて、低コスト、低消費電力、高速変調などで優れている³⁴⁾。この世界最大のメーカーにあたる Lumentum 社³⁵⁾ 製である。アップルデバイスには標準モードと省力

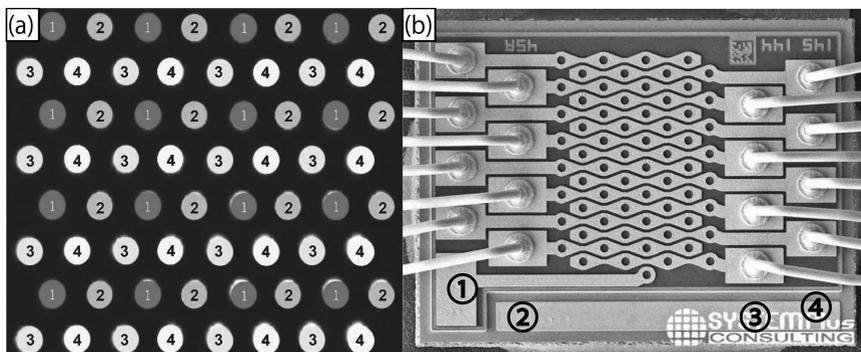


図8 iPad dToF 送信 (a) ドットマトリックス (b) VCSEL アレイ³⁶⁾

モードがあり、発光点数はそれぞれ576と144と明瞭に異なる。次号で紹介するように、3D スキャナーアプリ Scaniverse（現在は暫定的に無料）では使用開始後10分ほども立たないうちに強制的に省電力モードになって粗雑な空間情報しか取得できなくなる。決定権はアプリ側にあり、有料アプリであってもスキャン10分間の限定を外しているものは数点に限られ、その使用料金は個人ユーザーからすると高額になる。

標準モードでの稼働状態を超高速度撮影した結果（4D Sensing & AIoT による）を見ると、発光点は4グループに別れており、交互に発光していることがわかった。それを図化したのが図8 (a) に当たる。

図8 (a) では、 $8 \times 8 = 64$ 点は4グループに別れ、色分けされている。奇数行では1と2、偶数行では3と4からなり、前者では1-2-1-2、偶数行では3-4-3-4などと繰り返される。この点灯は図8 (b) に示すように、①～④それぞれに対応する $16 \times 4 = 64$ 点のVCSELの電子回路で実現されている。

このVCSELアレイに更に、Himax³⁷⁾製DOE（diffractive-optical element, 回折光学素子）が加わり、図9のような $64 \times 9 = 576$ 点の送信ドットマトリックスが実現している。一つ一つの発光が9点に回折拡散しているのである。

図9中央の64点は0次、周辺8カ所の64点は±1次の回折像に当たってい

る。この図9の回折像では VCSEL アレイの中央からの位置が不明のため³⁸⁾、一次オーダー first order の符合は省略した。参考のために、同図右下に回折パターンを示して、ドット密度の対応関係を示している。

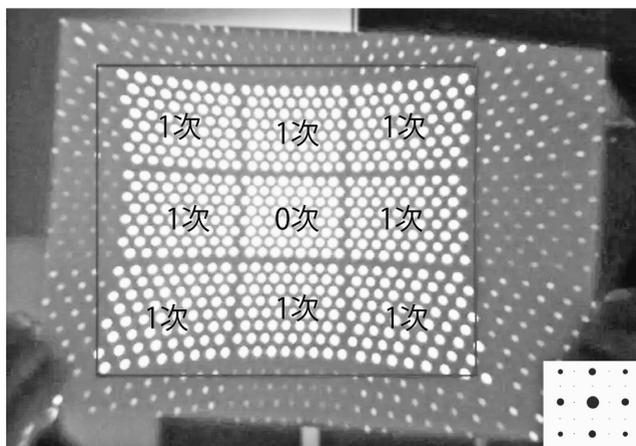


図9 格子状の回折パターン³⁹⁾

I .5.b アップルのソニー製 SPAD 採用

アップルの LiDAR センサーの点群 point cloud の位置把握精度は高くなく、点密度も低い。だが、デバイス内の他のカメラや、デバイス内の LiDAR 以外のセンサーの、Accelerometers⁴⁰⁾、Gyroscopes⁴¹⁾などが深度図 depth map の精度を向上させている。センサー関連でも公開されていないアップルの US 特許技術がある。

4D Sensing & AIoT は、前項 I .5.a で示した面発光レーザー + DOE からの発光を受信する能力に期待しているが、同時に発光された複数の信号の受信方法については言及していない。ソニーが ISSCC2021⁴²⁾ で発表したセンサーに搭載している SPAD は $189 \times 600 = 113,400$ 個であり、iPad Pro 11" 2nd generation の LiDAR センサーに対して、 $(8 \times 3) \times (8 \times 3) = 24 \times 24 = 576$

個の SPAD からなる SPAD アレイが装着されていると考えることは容易なことである。

センサーの方では、面発光レーザーからの発光点とその発光時刻などの情報はもちろん共有しており、576点の SPAD が図 8 (a) のように 4 グループを構成しつつ複数同時の発光を捉える技術は可能と考えられるのである。

I.6 ターゲットシーン全域検出を可能にしたフラッシュ LiDAR システム +DOE

ここでは2020年アップル LiDAR デバイスで使用されているフラッシュ LiDAR システム +DOE を確認したい。光学系システムのハードソフト両方を手がけるメーカー Zemax⁴³⁾ は、「個体光学エレメント solid-state-optical-element を使用して、ターゲットシーン全体に検出可能なポイントのアレイを生成する上で『フラッシュ LiDAR』ソリューションが活躍してい」として、シミュレーションソフト「Modeling a Flash Lidar System フラッシュライダーシステムのモデル化」⁴⁴⁾ の使用法を示している。アップルデバイスの設定と多少は異なるが、アップル LiDAR を理解する上で参考になるので紹介したい。

このシミュレーションでは、VCSEL などの光源アレイの前にコリメーター光学系群、そして更にその前には回折光学エレメント (DOE: diffractive-optical element) が配されて、図 9 同様の格子状回折パターンが前面のシーン上に投影される。

一例⁴⁵⁾を次に示す。図10(a) の左下にはこういった LiDAR システムが配置されていて (図中では点のよう)、シーンにはタッチレスタッチスクリーン touchless touchscreen 技術⁴⁶⁾などで使用されるジェスチャー認識での使用が想定されている。手などを代表する拳 (こぶし) の代わりに、ここでは球が使われている。例えば、空 (くう) で画面を見ながら手を動かすと、この球が動いて、テーブル上のコップを持ってコップに水を注ぐなどのこともできるわけである。

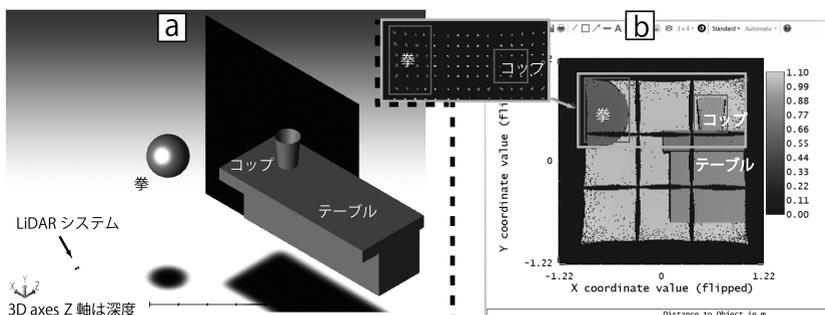


図10 (a) ジェスチャー認識の例
(b) スマートフォン画面 (左上付：回折パターン上の位置)

図10(b) は、LiDAR で取得された画像情報である。左上には格子状の回折パターンの一部が示されている。ここでは、色の違い（原図はカラー）でオブジェクトの判別は可能ではある。拳とコップの位置が矩形枠で表示されているが、テーブル部分も一部、見える。

図10(b) 右の主要画像はスマートフォンの画面に対応しているが、実際のスマートフォンの操作画面では 3D 表示される。ここでは、右端のスケールに対応して色調でオブジェクトの深さがわかる形になっている。

図11は図10(b) の結果を得る前の光線追跡 ray trace 作業結果を示している。元々カラースケールでの表示なので判別しにくいだが、(a) 図は XY 平面上での Z 軸の色分けで、(b) 図は 3D 表示の鳥瞰図である。回折後のシーン枠上のレーザー照射点はすべて正しく認識され、それぞれの点の深さも再現されているのである。このフラッシュ LiDAR+DOE システムは、レーザー光の軌跡を正しく捉えているのである。

この手法は一般にはタッチレスタッチスクリーンや顔認識などに使用されている。ソニーは、アップルデバイスやスマートフォンで使用可能な「ToF (Time of Flight) AR ツールキットとサンプルコード」⁴⁷⁾ を公開していて、この LiDAR システムを消費者自らが関心に沿う形で利用できる段階に入ったと

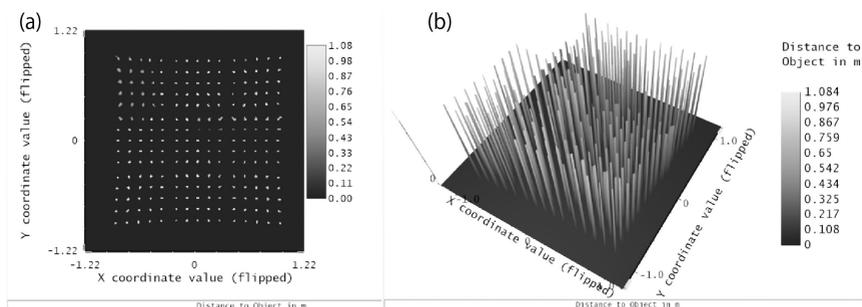


図11 光線追跡後の深度計算結果 (a) XY 平面上の深度分布 (b) 鳥瞰 3D 図

言える。

I.7 2020年アップル LiDAR デバイスの空間追尾評価

vGIS⁴⁸⁾ は、GIS (Geographical Information System, 地理情報システム), BIM (Building Information Modeling, ビルディングインフォメーションモデリング), 3D スキャンデータなどの空間データ上に高精度な拡張現実 (AR: Augmented Reality) を表すプラットフォームの一つである。この開発サイトに掲載されている当該アップル 2 機種, Galaxy Note 10+⁴⁹⁾, Pixel 4XL の計 4 機種に関する空間追尾機能の評価報告 (iPhone and iPad LiDAR spatial tracking capabilities: second test⁵⁰⁾) を紹介する。これを通じて、アップル LiDAR の可能性と限界を知り、正しく利用できると考える。4 機種の機能などは省略して、評価結果を簡潔に示す。なお、vGIS アプリと他のアプリで多少異なる結果をもたらす可能性もある。

この検証では、accuracy 正確度と precision 精度が区別されている。日立ハイテクのサイト⁵¹⁾に的確と思える説明があり多少修正して図12を掲載した。この図には頻度分布図と的的の矢跡の分布図が示されている。日立ハイテクの半導体精密測定器に対して求められるのは accuracy, precision 両面であるが、本

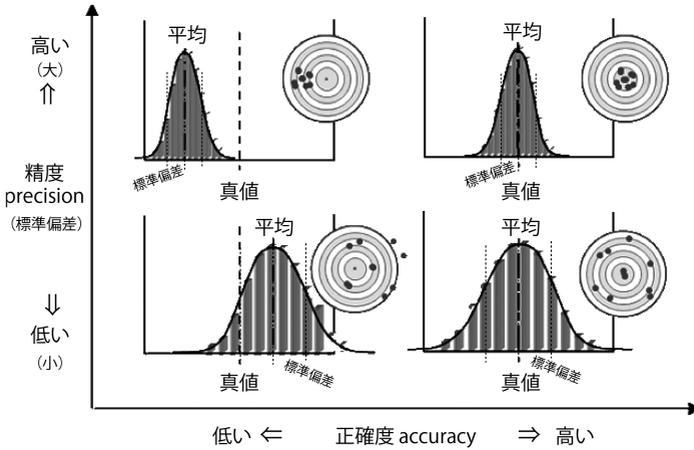


図12 正確度 accuracy と精度 precision

稿の主題である測量ツールについても同様のことが言える。なお、正確度という用語は一般化しておらず精度で代用される場合も多く、日本語では混乱が生じる。

表面の垂直高度分布の追尾：

AR 利用のためには、高い表面識別力が求められる。vGIS のこの検証では、表面属性のうち数値化が容易な垂直高度分布を問題にしており、本稿の求めにも合う。4 機種の評価結果が表にまとめられているが、アップル 2 機種に限定してここでは表 1 に示す。この両機種の評価結果は一致して他の 2 機種に比べて高い再現性を示している。

ただ、2 番目の「デバイスに近接したテーブル面」についての検出能力は、アップル 2 機種には全く無かった。アップルの LiDAR 使用の説明では（使用可能距離）最大 5 メートルまでとなっているが、可能な近接性についての公式発表は無い。この検証では 1 メートルほど離れているテーブルトップも検知できなかつたようだ。Galaxy Note 10+ では問題なく検知できている。同機は 1 番目の Glossy hardwood の方に多少問題があった。

表1 表面の垂直高度分布追尾の精度

		iPad Pro 11" 2 nd , iPhone 12 Pro		
		Detection 検出	Accuracy 正確度	False-positive 誤検出
Glossy hardwood	光沢のある硬木張りのフロア	100%	high	0%
Nearby surfaces	30cmそばのテーブルトップ	0%	low	100%
Non-reflective	目立った特徴のある非反射フロア	100%	high	0%
Complex grass surface	種々の雑草地	100%	high	0%
Concrete	目立った特徴のあるコンクリート面	100%	high	0%
Even pavement	目立った凹凸の無い舗装道路	100%	high	0%

表2 直線距離, 往復距離, ドリフト補正

		iPad Pro 11" 2 nd generation			iPhone 12 Pro		
		Accuracy	Precision	Rate	Accuracy	Precision	Rate
Straight-line distance tracking (50m)	直線50m	1.8 m	1.2 m		1.9 m	1.2 m	
Closed-loop distance tracking	往復100m, 閉ループ 200m	0.9 m	0.8 m		0.9 m	0.8 m	
Drift-correction capabilities	ドリフト補正性能			< 20 %			< 20 %

直線距離50 m 追尾：

表2に関わる水平距離については、GNSS Leica FLX100⁵²⁾で別途、真値が求められている。表2の1番目のStraight-line distance tracking (50 m)を見ると、アップル両機は一貫して、真値に比べて1.8 mまたは1.9 mのマイナス値を示しており、他の2機種に比べて正確度 accuracy は低い。Galaxy Note 10+ は正確度0.7 m, 精度 precision 1.1 m に達している。

閉じたループの距離追尾：

表2の2番目のテーマの評価には、二つのルートが用意された。一つは上記直線50 mの往復(計100 m)である。もう一つは、約200 mの閉ループである。往復ルートはデバイスが往路の情報を記憶しているのにより容易になる筈である。片道50 mでトップだったGalaxy Note 10+については正確度 accuracy 0.8 m, 精度 precision 1.4 mとなり、精度はアップル両機の0.8 mより低いが、vGISはGalaxy Note 10+を最優秀としている。これは、ここで採用されている評価基準では、正確度がより重視されていることを示しているのである。

ドリフト補正性能：

ドリフト補正とは、計測値の真値からの揺らぎを補正するという意義で、その性能を知るには、① 同じ場所を複数回計測した際に、真値に近づくかどうかを調べれば良い筈である。上記の「閉じたループの距離追尾」では、② 直線50 m の片道よりも往復した結果が真値に近づけばドリフト補正性能が高いと考えて良い筈である。

この①と②の指標の間に trade off (二律背反) の関係があるという。一つは、過去のより多くの情報を維持していること、もう一つは、能力を維持するためにメモリーを開放することである。この二律背反は、スキャン機能自体ではなくて、むしろ如何に異なった構想 framework が、記録し維持し情報を解除するかに由来するという。

Galaxy Note 10+ は、95%を超えている。アップル両機は20%にも満たない。この違いはアップルが AR の新たな環境の把握を重視し、主要な利用目的を狭い屋内をターゲットにしているからだと言う。凱歌は Galaxy Note 10+ に捧げられた。自然界の測量にも Galaxy Note 10+ が最適と考えられているのである。

弱い光の環境での信頼性：

この評価は数値には表されていない。余りにアップル両機が圧倒的に優れているからである。Android の AR は暗い環境では全く機能しない。アップル両機は完全に暗闇であっても機能する。LiDAR を持たない他の機種でも20 m 以内であればアップルデバイスは機能しているという。

当該 4 機種での完全な暗闇での撮影記録がムービーとして示されているが、アップル 2 機種はスムーズに空間を記録しており、他の 2 機種は完全に停止状態なのである。

筆者の iPhone 12 Pro による LiDAR 測量の多くの体験では、夕方になると LiDAR 測量が不可能であった。これを筆者は LiDAR の能力を反映していると考えていたが誤解であった。アプリ開発企業がアップルデバイスの能力を使

用していないのか、アップルがブレーキを掛けている可能性もある。

AR 機能：

vGIS はアップル 2 機種と Galaxy Note 10+ の AR 機能について、次のように評価している。Galaxy Note 10+ は、AR 利用の当初はアップル 2 機種と同様のパフォーマンスを示したが、時間の経過または距離の増加とともに、画質が急激に粗くなって、ついにはフレーム（コマ）がフリーズし飛んでしまったと。

結局、Galaxy Note 10+ について、ドリフト補正性能が優れているという評価が裏目に出た形だ。測量の点でも結局、この問題が現れる筈であって、アップル 2 機種が Galaxy Note 10+ を超える可能性が高いと思われる。

最終的評価：

以上、幾つかの性能が見られてきたのであるが、vGIS はアップル 2 機種の圧倒的パフォーマンスに衝撃すら受けている。そしてアップル 2 機種の高い AR パフォーマンスを絶賛している。だが、アップル社のモノポリーの体質と開発者にとって不親切な iOS に敵意すら感じているのである。

おわりに

本論 Part 1 は研究的視点から見ると全く独創性に欠ける。本論作成中、何度も筆を折ることを考えた。しかし、本論が言及してきた内容の大半は、フィールドワークでアップルデバイスを使って LiDAR 測量をする際には、不可欠の情報であると思っている。本論作成過程での当方の学びを踏まえた測量手法の議論を次の Part 2 で論じたいと思っている。

注

- 1) iPhone 12 Pro のレンズ構成を次の pdf を参考にして示した。 <https://developer.apple.com/accessories/Accessory-Design-Guidelines.pdf> 45.24 iPhone 12 Pro, 2 of 2, p.234

比較のため、左下に iPad Pro 11" 2nd generation のレンズ部の写真 (出典アップル) を掲載している。iPhone 12 Pro のレンズ部の写真は当方所有のものである。

- 2) アップルプレスリリース2020.10.13「Apple, 5G 対応の iPhone 12 Pro と iPhone 12 Pro Max を発表」 <https://www.apple.com/jp/newsroom/2020/10/apple-introduces-iphone-12-pro-and-iphone-12-pro-max-with-5g/>
- 3) アップルプレスリリース2020.3.18「Apple, LiDAR スキャナを搭載した新しい iPad Pro を発表, iPadOS でトラックパッドに対応」 <https://www.apple.com/jp/newsroom/2020/03/apple-unveils-new-ipad-pro-with-lidar-scanner-and-trackpad-support-in-ipados/>
- 4) KDDI トピラ (文: 山本竜也) <https://time-space.kddi.com/ict-keywords/20201204/3020> アップロード2020.12.04 iPhone 12 Pro / Pro Max に搭載の『LiDAR スキャナ』とは? その仕組みや機能について解説。
- 5) DigiTimes asia, II-VI to enter supply chain for iPhones with LiDAR sensors, sources say, 2020.12.18. <https://www.digitimes.com/news/a20201218PD201.html>
なお、面レーザー発光レーザーはすべて Lumentum 社から供給されている。
- 6) <https://developer.apple.com/accessories/Accessory-Design-Guidelines.pdf> 45.24 iPhone 12 Pro, 2 of 2, p. 234
- 7) <https://developer.apple.com/accessories/Accessory-Design-Guidelines.pdf>, pp. 304-305.
この図では面発光レーザー, dToF センサーに対してそれぞれ RCAM IR2, 同 IR1 と表記されている。
- 8) 図 2 (a) (b) は次の url から編集した。この元データは次の url を参照。新型 iPad Pro の「LiDAR」スキャナの仕組みと応用 2020.07.06 https://recruit.gmo.jp/engineer/jisedai/blog/ipadpro_lidar/ 図 2 (c) は次の url <https://developer.apple.com/accessories/Accessory-Design-Guidelines.pdf> の pp. 304-305 から。
- 9) 新型 iPad Pro の「LiDAR」スキャナの仕組みと応用2020.07.06 https://recruit.gmo.jp/engineer/jisedai/blog/ipadpro_lidar/
- 10) アップルの AR in Business のリンク先:
https://www.apple.com/jp/business/site/docs/resources/AR_in_Business_JP.pdf
- 11) <https://www.streem.com/> Streem[®]
- 12) 例えば、3D 制作経験の無い者にも、無料の AR 制作ツール Reality Composer がアップルストアから提供されている。<https://apps.apple.com/jp/app/reality-composer/id1462358802> 拡張現実の世界に飛び込もう <https://developer.apple.com/jp/augmented-reality/> では、「世界最大の AR プラットフォームである iOS と iPadOS で、何億人ものユーザーに向けて、他に類を見ない拡張現実体験を構築しましょう。ARKit や RealityKit のようなパワフルなフレームワークと、Reality Composer や Reality Converter といったクリエイティブなツールが揃った今、かつてないほど手軽に AR で

アイデアを形にすることができます。」などとあり、例えば自宅の設計図内に自らをその場に置いて導線沿いの景観なども得ることができる。

- 13) <https://4da.tech/?p=582>
- 14) Sony News Releases, Feb. 18, 2021. Sony Develops a Stacked Direct Time of Flight Depth Sensor for Automotive LiDAR with SPAD Pixels, an Industry First. <https://www.sony.com/en/SonyInfo/News/Press/202102/21-016E/>
- 15) 田代睦聡・伊東恭佑, 2022. 車載 LiDAR 向け SPAD ToF 方式距離センサ. 応用物理, Vol. 91, No. 4, pp. 220-223. https://www.jstage.jst.go.jp/article/oubutsu/91/4/91_220/_pdf
- 16) 大阪市立科学館の照度と明るさの目安 <http://photon.sci-museum.kita.osaka.jp/publish/text/koyomi/66.html> を参考にこの117 klux を評価すると、晴天昼太陽光が100 klux 相当で、最大の>100 klux 該当するのは、雪山や真夏の海岸であって、117 klux はこれに当たる。西日本を対象にしているのかはわからないが目安として利用できると思っている。
- 17) 田代睦聡・伊東恭佑, 2022. 車載 LiDAR 向け SPAD ToF 方式距離センサ. 応用物理, Vol. 91, No. 4, pp. 220-223. https://www.jstage.jst.go.jp/article/oubutsu/91/4/91_220/_pdf/-char/ja
- 18) Pulsed Laser Diode (パルス状レーザー、PLD) は、半導体レーザーに Pulsed が冠せられている。PLD は、周期的に短時間レーザーを最大放射する。このパルス列 pulse train はシャープなピークが断続的に続く。この対立用語として、Modulated Laser Diode (変調レーザー、MLD) があるが、これは連続波の意ではなく、パルス列 pulse train は、所定の強度まで達したら一定時間 ON を継続し、OFF を挟んでまた同様の ON が継続してゆく形である。
参考にした文献は、markettech の Overview of Modulated and Pulsed Diode Laser Systems. <https://www.markettechinc.net/wp-content/uploads/2018/05/Modulated-and-Pulsed-Diode-Lasers.pdf>
- 19) MEMS ミラーについて解説したい。MEMS は、microelectromechanical system の略で、微小電子機械システムのこと。MEMS は、電子回路に加えて、センサーやアクチュエーターなどの可動部を動かすための立体構造を備える。これにはジャイロ스코プ、加速度センサー、気圧センサーなどがある。MEMS ミラーは古くからスキャナーやプロジェクターなどで使用されてきた。最近では LiDAR などでの活用が進み、自動車の完全自動運転を実現するのに必要不可欠な技術と言われている。
- 20) <https://www.sony-semicon.com/ja/application/mobility/camera.html>
- 21) Pulsed Laser Diodes at 905 nm in Laser Components
LASER COMPONENTS Germany GmbH

<https://www.lasercomponents.com/de-en/product/pulsed-laser-diodes-at-905-nm/>

- 22) [study-robot.jp https://study-robot.jp/overview/index/](https://study-robot.jp/overview/index/), ホーム>センサー>LiDAR。
- 23) 田代・伊東 (2022) の図 8。
- 24) ソニーはカーナビやスマートフォンでの経済性の高い SPAD 技術を開発実用化しているが、キャノンは2020年6月には100万画素の SPAD イメージセンサーを発表し、2021年12月には320万画素のものを発表している。日経クロステックによれば、2023年発売予定の世界初の SPAD センサー搭載カメラ (レンズ交換式超高感度カメラ MS-500) では、これに望遠端2000 mm (35 mm 換算で約8000 mm) の放送用レンズに組み合わせて、10 km 先を約45 m 幅の画角で撮影できる。周囲が暗くても被写体の船舶の種類の識別も可能になり、監視カメラとしての利用が期待されている。
- 25) 車載 LiDAR 向け SPAD ToF 方式距離センサーを商品化——SPAD 画素と測距処理回路を積層して1チップ化
ソニー https://engineer.fabcross.jp/archive/210907_sonysemicon.html
- 26) ソニーの2件の報告書に掲載されている画像を利用した。
Sony New Releases: Sony develops a stacked direct time of flight depth sensor for automotive LIDAR with SPAD pixels, an industry first. Feb., 2021
<https://www.sony.com/en/SonyInfo/News/Press/202102/21-016E/>
田代睦聡・伊東恭佑, 2022. 車載 LiDAR 向け SPAD ToF 方式距離センサ. 応用物理, Vol. 91, No. 4, pp. 220-223.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/oubutsu/91/4/91_220/_pdf/-char/ja
- 27) Sesta, V. et al., 2023. Time-to-digital converters and histogram builders in SPAD arrays for pulsed-LiDAR. Measurement, 212, 112705, pp. 1-12. この Fig. 1 を下地に使用。
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224123002695>
- 28) Ito, K., et al., 2020. A back illuminated 10 μm SPAD pixel array comprising full trench isolation and Cu-Cu bonding with over 14% PDE at 940 nm. 2020 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), Date of Conference: 12-18 December 2020, Date Added to IEEE Xplore: 11 March 2021. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9371944>
裏面照射型 CMOS イメージセンサーの原理と構造のわかりやすい説明は次のウェブページにある。2023.6.13の書き込みである。
<https://semi-journal.jp/basics/device/image-sensor/bi-cis.html>
- 29) 照度と明るさの目安
<http://photon.sci-museum.kita.osaka.jp/publish/text/koyomi/66.html>
- 30) 特に参考になったものを次に。
Altmann, Y. et al., Nov., 2019. Fast online 3D reconstruction of dynamic scenes from individual single-photon detection events. IEEE Transactions on Image Processing, Vol.

- 29, pp. 2666-2675. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8897087>
- Tontini, A. et al. Sep., 2020. Numerical model of SPAD-based direct Time-of-Flight flash LIDAR CMOS image sensors. *Sensors* 2020, 20, 5203, 19 p.
<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/18/5203>
- Mahmoudi, H., et al., Mar. 2021. Optical and Electrical characterization and modeling of photon detection probability in CMOS Single-Photon Avalanche Diodes. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 21, Is. 6, pp. 7572-7580. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9321377>
- Sun, M. et al., 2023. Multi-scale histogram-based probabilistic deep neural network for super-resolution 3D LiDAR imaging. *Sensors* 2023, Vol. 23, Iss. 1. 10 p.
<https://www.mdpi.com/1424-8220/23/1/420>
- 31) 4D and AIoT, February 28, 2021. Apple LIDAR Demystified: SPAD, VCSEL, and Fusion… なお, シャープ <https://jp.sharp/business/solution/aiot/whatis/> によれば, 「AIoTとは, AI (Artificial Intelligence: 人工知能) と IoT (Internet of Things: モノのインターネット) を組み合わせてシャープが作った造語です。単にモノがインターネットに接続してデータをやり取りするだけでなく, 人工知能によって学習し, 成長するシステムを目指しています」とある。 <https://4da.tech/?p=582>
- 32) Sony d-TOF Sensor found in Apple's new LiDAR camera
<https://www.techinsights.com/ja/node/33570>
- 33) 鈴木雅人, 藤本大介, 林 優一, 2022. マトリクス型 Direct ToF Lidar の攻撃耐性評価環境の構築. 電子情報通信学会技術研究報告 (Web), No. 121, pp. 164-169.
- 34) リアル2,400 dpi 高画質を実現する面発光レーザー走査技術
https://www.fujifilm.com/fb/company/technical/production/digital/vcsel_ros.html
- 35) <https://www.lumentum.com/en>
- 36) 4D and AIoT, February 28, 2021. Apple LIDAR Demystified: SPAD, VCSEL, and Fusion… <https://4da.tech/?p=582> (a) Figure 5. iPad DTOF transmission dot matrix sequence diagram に数字2~4を強調, (b) Figure 6 VCSEL array … omitted.
- 37) <https://www.himax.com.tw/>
- 38) Palmer, C., 2020. *Diffraction Grating Handbook*. 251p., Richardson Gratings™, MKS Instruments, Inc. [https://www.edmundoptics.jp/ViewDocument/MKS_Diffraction_Grating_Handbook_\(8th_edition\).pdf](https://www.edmundoptics.jp/ViewDocument/MKS_Diffraction_Grating_Handbook_(8th_edition).pdf)
- 39) 4D and AIoT, February 28, 2021. Apple LIDAR Demystified: SPAD, VCSEL, and Fusion… <https://4da.tech/?p=582> Figure 7. The lattice diffraction pattern of the iPad DTOF emission の9格子に次数を入れ, diffraction pattern のモデルを追加した。
- 40) Accelerometers: Apple Developer のコンテンツに示されている。
Getting raw accelerometer events: Retrieve data from the onboard accelerometers.

https://developer.apple.com/documentation/coremotion/getting_raw_accelerometer_events

XYZ 軸個々方向の加速度 (数値の単位は重力加速度 $1G=9.8 \text{ m/sec/sec}$) が加速度センサーで取得できる。設計上, 例えば, ユーザーが iPhone を縦持ち静止している (0, -1, 0) のか, ホームボタンを右に横持ち静止している (-1, 0, 0) のか, 水平な場所に画面を表に置いている (0, 0, -1) のか, などを知る必要がある。

- 41) Gyroscopes: Apple Developer のコンテンツに示されている。
Getting raw gyroscope events: Retrieve data from the onboard gyroscopes.
https://developer.apple.com/documentation/coremotion/getting_raw_gyroscope_events
XYZ 軸周りの回転率 (radians per second) が角速度センサーで取得できる。
- 42) https://issuu.com/underlinescience/docs/isscc2021_demohandout
7.3 A 189×600 back illuminated stacked SPAD direct Time-of-Flight depth sensor for automotive LiDAR systems, by Kumagai et al, Sony Semiconductor Solutions, Japan, 2021.
- 43) <https://www.zemax.com/>
- 44) 英語版と日本語版それぞれに, ウェブページ 3 本が用意されている。両版パート 1 だけをここに掲載する。Modeling a Flash Lidar System - Part 1 <https://support.zemax.com/hc/en-us/articles/4408930472467-Modeling-a-Flash-Lidar-System-Part-1>
フラッシュ ライダー システムのモデル化—第 1 部 <https://support.zemax.com/hc/ja/articles/4408930472467-フラッシュ-ライダー-システムのモデル化-第-1-部>
- 45) Modeling a Flash Lidar System - Part 2 <https://support.zemax.com/hc/en-us/articles/4408931542163-Modeling-a-Flash-Lidar-System-Part-2>
- 46) 例えば次の文献 Gagana, H. et al., 2018. Innovation of Touchless Touchscreen Technology in Automotive User Interface. Journal of Data Mining and Management, Vol. 3, Iss. 2, 9 p. <https://matjournals.in/index.php/JoDMM/article/view/2648>
- 47) <https://developer.sony.com/ja/tof-ar/downloads/> 2023年7月での最新は, TofAR_V1.3.1. zip, 2023.5.30 413.6 MB である。
- 48) <https://www.vgis.io/> vGIS AR は, 2023年8月時点でアップルストアからダウンロードできるようになったが高額である。
- 49) 本機種は Samsung 製である。 <https://www.samsung.com/jp/>, Galaxy Note10の+には ToF (Depth Vision) カメラが付属している。アップル 2 機種とは異なる高い性能を持っている。発売は2019年10月で価格は11万円余り。2023年現在のメーカーでの新品価格は5万円余り。
- 50) <https://www.vgis.io/2020/12/02/lidar-in-iphone-and-ipad-spatial-tracking-capabilities-test-take-2/>

- 51) <https://www.hitachi-hightech.com/jp/ja/knowledge/semiconductor/room/manufacturing/accuracy-precision.html>
- 52) <https://leica-geosystems.com/ja-jp/products/gis-collectors/smart-antennas/leica-flx100>