

はまぎんこども宇宙科学館での ホログラム作成実習教室実施報告

森田正紀

＊実施趣旨：昨今、ホログラムの定義や意味が正しくない方向で使われ、次世代への情報継承やその撮影技術・現像処理技術などにも触れる機会が皆無となっている事を懸念し、しかし、学術的で難解で高次な解説や技術の伝承ではなく、小中学生にも楽しく、興味深くホログラムや光の事を知って貰いたい、という趣旨で、親子参加型実習教室としてスタートした。

＊実施月日： 第四回教室 2021 年 10 月 24 日（日）&30 日（土）

＊主催：はまぎんこども宇宙科学館

＊指導スタッフ：元湘南工科大学教授 佐藤 甲癸先生

元多摩美大准教授 桧山 茂雄先生

(有)石川光学造形研究所 代表 石川 洵氏

上記 3 名の指導スタッフを中心とし、その趣旨に賛同するボランティア 6 名。

(運営スタッフとして 森田 正紀 協力)

＊参加者数：10/24 午前 3 組午後 5 組（親子 2 名/組）

10/30 午前 3 組午後 3 組（密状態回避の為、日/最大 12 組までと限定）

(1 ページにつづく)

目 次

- | | |
|---|------------|
| 1. 巻頭言：はまぎんこども宇宙科学館でのホログラム作成実習教室実施報告 | 森田正紀 表紙 |
| 2. サスペンション・フリー型ミラーアレーデバイスで 3 次元分野で活かすには | 南條 健 2 |
| 3. 自動運転における LiDAR での自己位置推定とその課題 | 柳瀬 龍 10 |
| 4. コヒーレント差分吸収ドップラーライダーによる風・水蒸気分布計測技術 | 青木 誠, 他 16 |
| 5. レーザーで取得された 3 次元データによる森林解析 | 加藤 顕 22 |
| 6. 次回研究会のお知らせ | 巻末 |

*使用器材・感材等

(有)石川光学造形研究所製 ホログラムカメラ ES-45-i-B 改
フランス製感光材料・処理薬品類 Ultimate U08M-R70-2.4x2.4-G.
(専用現像&漂白剤含む)

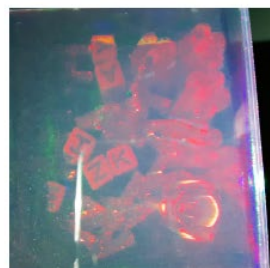
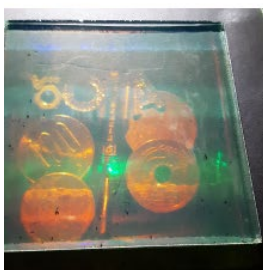
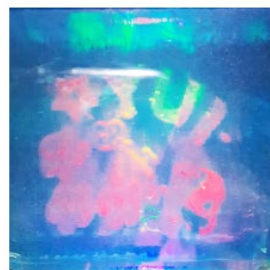
ES-45-i-B 改に内蔵された 632.8 nm He-Ne で撮影、完成後は明るい黄緑色を呈した画像で提供・観察する為。

*作業内容概要：佐藤・桧山両先生による定義と理論の簡易説明。スタッフによる干渉実験。石川氏のホログラムカメラ基本原理とセッティング・撮影の実際。密状態回避の為暗室内見学は一部短時間に止め、替わりに DVD 動画説明とし、撮影後のデニシユクモノカラーホログラム(約 6cm 角/1 枚)をお持ち帰り頂く。アナログによる記録撮影方法と現像処理工程など初めて目にする機会を得て、参加者の親子共々強い興味と好印象を示された。

*反響：本年度から難解な説明を省いたルビ付簡易説明資料とし、解説内容も改善した結果、多くの子供達から「楽しかった」という感想を得られた事は大きな前進となった。が、子供達を飽きさせないさらなる工夫の必要性から今後も検討を進める事となる。

佐藤先生考案のフレーム基本構造もご担当者の創意工夫でより良い改良が実現できた。

ホログラムの完成率は、本年度も変わらず 100%を達成でき喜んで頂いた。



サスペンション・フリー型ミラーアレイデバイスを3次元分野で活かすには

Utilization of suspension-free mirror array device in the 3D field

南條 健

Takeshi Nanjo

株式会社リコー 先端技術研究所 HDT 研究センター

Ricoh Company, Ltd. Advanced Technology R&D Division Human Digital Twin Institute

概要:

サスペンション・フリー型の2次元ミラーアレイデバイスを開発し、その構造での光偏向を確認した。固定されていないミラーを静電力により2方向に傾斜させ2値を出力するデバイスであり、ミラーの微細化や光偏向動作の高速性に関し従来のミラーデバイスに比べて優れることを確認した。その利点を活用するデバイスの応用例として3次元空間の LIDAR 検出光学系とホログラフィックディスプレイ光学系を提案した。

ABSTRACT:

We developed a suspension-free two-dimensional mirror array device and confirmed the light deflection in the structure. It is a device that outputs binary values by tilting an unfixed mirror in two directions by electrostatic force, and that it was superior to the conventional mirror device in terms of miniaturization of the mirror and high speed of light deflection operation. We have proposed LIDAR optical system and holographic display optical system in a three-dimensional space as application examples that utilize the advantages.

1. はじめに

微細加工技術が発展している現在、MEMS 技術によるデバイスを用いた製品が数多く市場に登場している。例えば、テキサスインスツルメンツの DMD (Digital Mirror Device) は上市されてから長く時間が経過しその分野で代表的な方式として認識されている。我々はミラーデバイスとして、全く固定箇所を持たないサスペンション・フリー型ミラーを用いた光偏向素子を提案しその開発を行った。

従来のミラーデバイスは捻じり梁又は片持ち梁という板バネで吊られたミラーを静電力で駆動する方式が用いられ、映像を表示するミラーデバイスではフィルファクターを向上するためにミラー下に捻じり梁又は片持ち梁を形成する複雑な構造がとられているのが一般的である^{1), 2)}。それらのデバイスではその構造ゆえに $5\mu\text{m}$ 程度が最小サイズであり約 $10\mu\text{sec}$ の LSB が最速であり 30V 以上の高い駆動電圧が必要である。我々が開発したデバイスは、基板と接続された固定箇所を持たないミラーを2方向に傾斜させ光偏向させることを特徴としているため、フリーモード (Free MODE: Free Mirror device for Optical DEflection の略称) と呼んでいるデバイスであり、ミラーが固定されておらず形状が平板なので素子の微細化が容易であり、梁による復元力が無いので残留振動が短く高速な応答が可能であり低電圧駆動が可能である^{3), 4), 5), 6), 7)}。

図1に、我々のデバイスの概略図を示す。図1(a)は1素子の概略図であり、図1(b)はアレイの概略図である。図

1(a)において、ミラーは周囲に固定箇所を持たずにポストとストップにより位置を制約されて配置している。ミラーの傾斜は対面する2個の電極1及び電極2とミラー電極との電位差による静電引力により2方向に傾斜し、その方向がON方向とOFF方向に該当する。その傾斜角度はミラーとピボット、ポスト、ランディングパッドとの接触により決定され、例えばミラー

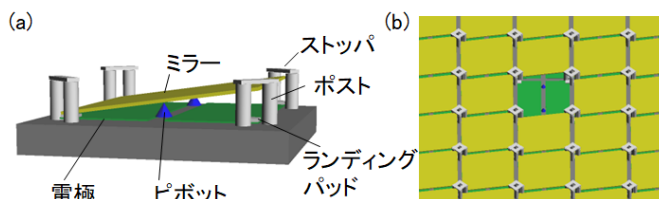


図1 フリーモードの概略図

辺長が $10\mu\text{m}$ であり支点はミラーの中央に配置され基板からの高さが $1\mu\text{m}$ でありポスト側面が支点中央から $5.2\mu\text{m}$ の位置に配置されランディングパッド高さが基板高さと同じで構成されていた場合、傾斜角 θ は $\tan\theta=1/5.2$ で計算される。

このデバイスは、ミラーが固定されていないことに起因してあらゆる利点を有している。ミラーの大きさは製造する半導体製造技術の解像度にも依存するので微細化が容易であり、高速な光偏向や低電圧での駆動が可能である。又、シリコン半導体プロセスそのままで作製でき、かつ機械的に変形する部位を持たないので高い信頼性を有する。

2. デバイスの駆動方式

このデバイスは上記のように多くの利点を有しているが、そのミラーへの電位の付与が課題であった。実際に開発の過程でフローティングポテンシャル方式とコンタクトバイアス方式による駆動を検討し、ともに安定した駆動が可能であることを確認した³⁾。以下にコンタクトバイアス方式による駆動を説明する。

本デバイスは一言でいうとシーソーであり、重力以外に変位に応じて戻ろうとする力が作用しないことが特徴である。遊技場にあるシーソーをイメージしてもらって解るが、より軽いシーソーであれば小さい子供でも向きを変えることが出来ることを想像できる。重要なことは以下にミラーに力を作用させるかであり、その方式としてミラーと対向する電極との間に生じる静電引力を採用した。そのため、ミラーに特定の電位を付与することが必要になり、ピボットと称する支点を経由して接触による電位の付与を行う方式がコンタクトバイアス方式である。図2(a)はその方式のON動作させている時の1素子の断面図と上面図(ミラー無)であり、図2(b)はOFF動作の1素子の断面図と上面図(ミラー無)でる。同図は簡略に示した図であり、ミラーと対向する基板上の一方の電極に電位Vを付与し、他方の電極をミラーと同電位(図では0V)にすることにより、電位を付与した方の電極側にミラーが傾斜する。一方へのミラーの傾斜をONとし他方へのミラーの傾斜をOFFとすることにより2値の動作が可能となり、これが本デバイスでの唯一の動作である。容易に

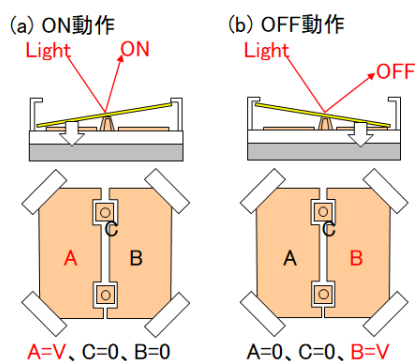


図2 コンタクトバイアス駆動

想像される危惧としてはピボットとミラーが離れた場合の電位の付与である。しかしミラーがピボットから離れた場合、ミラーと対面して基板上に形成された2つの電極間の電界分布によりミラーにはその電位差の中間の電位が付与

される。故にミラーが離れた場合は対向する電極側に引き寄せられることになり、ピボットとの接触に至る。それによりミラーへの電位の付与が容易に起こり安定したミラーの傾斜方向の制御が可能となることを実デバイスで確認した。

次に上記コンタクトバイアス方式によるミラーの ON/OFF 動作におけるミラーの応答性を評価した結果を図3に記載する。図3の応答性の評価結果は、ミラーサイズが $8\mu\text{m}$ 辺長であり、ミラー傾斜角は $\pm 7.5^\circ$ 、駆動電圧 30V 、駆動周波数 10kHz での ON/OFF 動作である。該仕様において、復元力が作用しないので $0.6\mu\text{sec}$ の高速応答が確認され、かつサスペンション・フリー型なので残留振動も $1.8\mu\text{sec}$ と少ない結果が得られている。該評価は複数の素子を並列で動作させるパッシブマトリクス駆動により行った。次に電圧印加時間を短縮させる駆動方式での応答性の評価結果を図4に記載する。図4は過去にソフトランディング駆動と称して紹介した駆動方式³⁾であり現在はショートタイムバイアス駆動 (Short Time Bias driving) と呼んでいる駆動方式である。図4はその駆動方式における電圧印加に応じたミラーの変位を評価した結果である。ミラーサイズが $5\mu\text{m}$ 辺長であり、ミラー傾斜角は $\pm 12^\circ$ 、駆動電圧 max. 32V 、駆動周波数 10kHz での ON/OFF 動作である。この駆動方法は当初ミラーの傾斜時の固着原因の一つである衝突固着の影響を下げる目的で実施し、ミラー傾斜開始後に電圧を大幅に下げることを試みたものであるが、図4に記載のように高電圧印加時間 $0.2\mu\text{sec}$ に対し、ミラー傾斜は高電圧印加終了後も継続し、目的の傾斜を $1.8\mu\text{sec}$ で終了している。つまり実際にミラー傾斜終了前の短時間の高電圧印加により正常な ON/OFF 動作が可能であることが確認された。この結果は、後述するホログラフィックディスプレイの光学システムにおいて、フリーモードが有効なデバイスであることを示すものである。

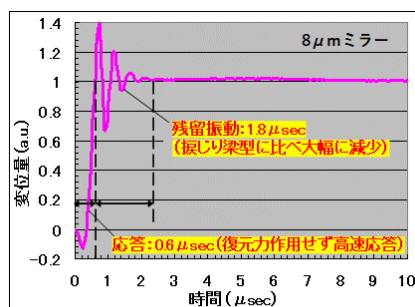


図3 コンタクトバイアス方式の応答波形

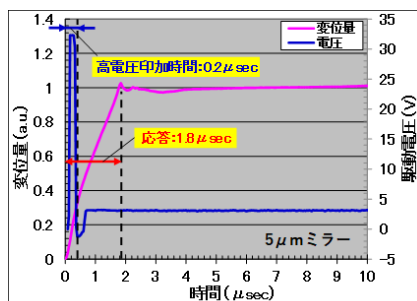


図4 ショートタイムバイアス駆動の
応答波形と駆動電圧波形

3. デバイス構成

フリーモードのデバイス構成としては、サスペンション・フリー型のミラーが適正な位置に保持されるためにポストとストッパが必要である。その配置場所としてピボットと同一線上に配置したシャフトベアリング型とミラー周辺に配置したコーナーストッパ型の両方のデバイスを作製し、ともに正常な ON/OFF 動作は確認された。以下では四角形の平板が使用できるコーナーストッパ型について説明する。さらにその構造にてデバイスの課題であった固着³⁾を抑制し 5V の低電圧でのミラーの ON/OFF 動作を確認した⁷⁾。

コーナーストッパ型はミラーの容易な位置決めと開口率向上を狙って四角形のミラーの四隅にポストとストッパを

配置した構成である。該構成において、作製可能な最小のミラーサイズ($5\mu\text{m}$ 辺長)までの安定した ON/OFF 動作を確認したが、ミラーサイズの大小に応じて作製の困難さに違いは見られなかった。デバイスの駆動において、ミラーの重量や傾斜角、ミラーと対向する電極の面積に応じて応答速度の違いが確認され、機械的な破壊は観察されなかった。主に観察された不具合はミ

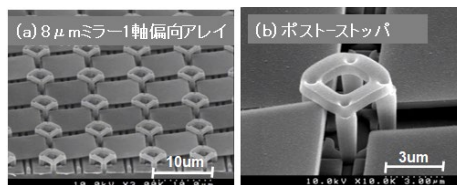


図5 デバイスのSEM像

ラーの固着による動作停止である。図5は、コーナーストップ型のミラーデバイスの SEM 観察結果である。代表的に $8\mu\text{m}$ ミラーアレイデバイスの外観図とポストストップの拡大図を示したが、目的のデバイス構造が作製されていることが分かる。又ミラーが薄膜で形成されていることも見て分かるが、ミラーは反射率が高いことに加えて軽い膜が静電力で引き寄せられやすく応答性が良いので薄膜が望まれ、動作に応じた変形を抑制するために弾性率が高いことが望まれる。図5に示したミラー構成もそれに基づいて選択した材料で構成されている。一方、ポストやストップはシリコン半導体プロセスとの適合性と光の透過性を目的にシリコン酸化膜にて形成されている。開発の過程で該構成部を導電性材料に変更しミラー電位と同電位とすることにより帯電固着を抑制し、反射型のミラーデバイスでは従来の DMD (実質的な電圧は 40V 程度が必要) に比べて大幅に低



図6 5VでのON/OFF動作の確認

電圧の 5V での光偏向動作を確認した⁷⁾。図6がその ON/OFF 動作時の光学顕微鏡像である。開発途中のため全素子で ON/OFF 動作を確認したのではなく一部素子で確認されたに過ぎないが、 $10\mu\text{m}$ 辺長のミラーデバイスで傾斜角 $\pm 12^\circ$ の仕様での ON/OFF 動作を 5V で確認したことは従来に無い結果である。

4. デバイスの応用

上記のように、開発を行ったデバイスは従来のミラーデバイスに比べ、微細なデバイスの制約が少なく、かつ高速な応答性が得られ、低電圧駆動が可能であることを確認できた。その利点を活かしたアプリケーションへの活用として、以下の2つの3次元分野への展開を提案する。

まず第一に、現在市場が要求され立ち上がりつつある LIDAR 市場である。LIDAR 市場ではその機器の構造に応じて、 360° の回転機構を有するメカ方式と半導体技術により作製された solid state 方式に分けられ、さらに solid state 方式は1軸又は2軸の MEMS スキャナーを用いる MEMS 方式、可動部を全く持たないフラッシュ方式やフェーズドアレイ方式に分類される。それぞれの構造により適正な用途があるが、望ましくは遠方までの測距を壊れにくかつ高分解能で高速、広範囲で行われ、それが小型で容易に提供されることが求められている。それを可能とする方法として、従来の方式に本デバイスを組み込む方式を提案する。この時容易に組み込むためにデバイスは直下にトランジスタを持たないパッシブマトリクス駆動により動作させる。

第1の LIDAR の光学システムを図7に記載した。この光学システムは、solid state 方式の1軸 MEMS スキャナーを用いる方式であり機械的な回転機構を持たず半導体技術により作製されているので、相対的に良い信頼性が

期待できる。905nm のレーザー光を1軸 MEMS スキャナーと整形レンズや拡大レンズを通して、縦長なレーザー走査線として放射し水平方向に走査させることは従来の送信器と同様である。測距空間に放射された縦長なレーザー光線はそれぞれの物体に反射して送信器近くに配置した受信器のレンズに入射する。入射した検出光はフリーモード表面で結像

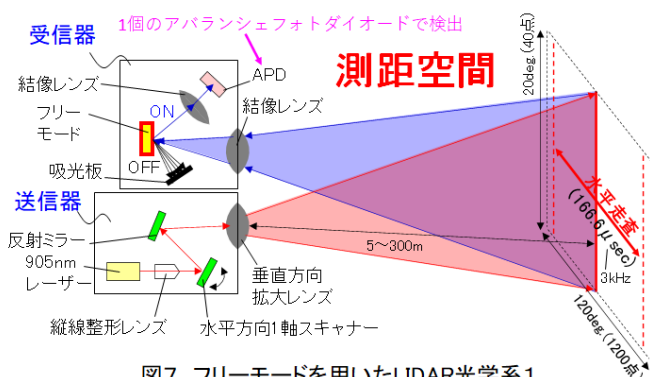


図7 フリーモードを用いたLIDAR光学系1

し、特定の ON している素子のみの反射光を1個のアバランシェフォトダイオードに向けるように構成してある。図8はミラーアレイ表面を抽出したモデル図であり、黄色で示したミラーが ON しているミラーであり、赤点線が縦長なレーザー光線に相当する水平方向の検出位置である。概念的に水平方向1列の複数のミラーが同時に ON し、それが時間順次にパターン1からパターン 40まで縦方向に推移することにより、スキャナーの動作とフリーモードの動作の組み合わせにより3次元的な測距を可能とする。この時、記載した仕様を満たすミラーの ON/OFF 動作は $4\mu\text{sec}$ の高速な動作が必要であり、これはミラーアレイデバイスがフリーモード故に可能な動作である。ミラーは事前に決められた配置の複数のミラーを同時に動かすパッシブマトリクス駆動で良いので直下にトランジスタが不要になり、小型で高性能な LIDAR 機器を容易に提供することが出来る。

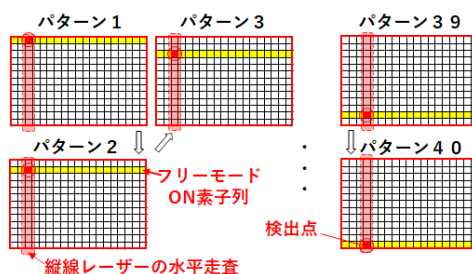


図8 フリーモードでの検出パターン

次に第2の LIDAR の光学システムを図9に記載した。この光学システムは、solid state 方式の可動部を全く持たないフラッシュ方式でありながら遠方の測距を高解像度で可能とすることを目的とした方式である。具体的には、同軸系検出 LIDAR の主要な構成部である2軸スキャナーの代わりにフリーモードを用いている。1個のレーザー光源から発せられたレーザー光がプリズムレンズを経由してフリーモード全面に入射される。フリーモード上の決められた複数の素子を同時に ON し、ON している各ミラー面からの反射光を測距空間に拡大放射させる。それぞれの方向にある物体からの反射光をフリーモードの ON している複数の素子の表面に結像させプリズムレンズを通過させて相対的に粗なアバランシェフォトダイオードアレイに入射させる。フリーモードの ON 素子は時間順次に切り替わ

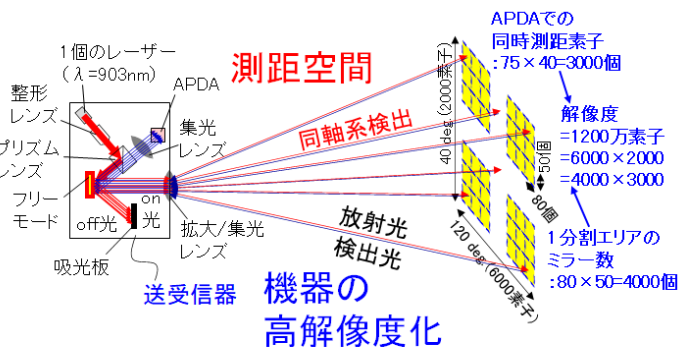


図9 フリーモードを用いたLIDAR光学系2

り、比較的粗なアバランシェフォトダイオードアレーを構成する1個のアバランシェフォトダイオードにて異なる位置の測距を行う。この動作を、アレーを構成する複数のアバランシェフォトダイオードで同時に行うことにより高解像度な検出を可能とする。図10に案2におけるミラーの動作による空間での測距を模式的に示した。この時使用するフリーモードも案1同様にあらかじめ決

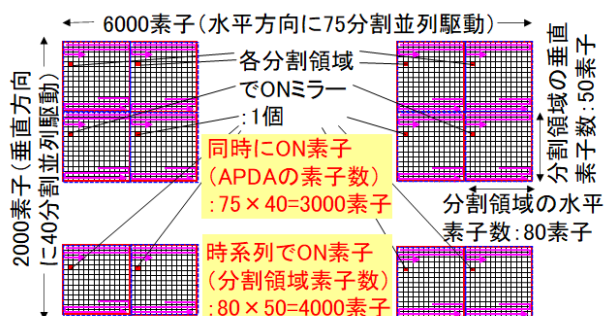


図10 LIDAR光学系2における空間での測距

められた順番で複数の素子が同時に ON/OFF するため、直下にトランジスタを持たないパッシブマトリクス駆動により動作させるので容易なデバイスで提供できる。ミラー数は 1200 万素子必要であるが、下部にトランジスタを持たないので工数が大幅に少なく歩留が良いことが期待される。又 3000 素子のアバランシェフォトダイオードにて 1200 万の分解能が得られる性能が期待される。案2は同軸系の検出方式なので外来光の影響を受けにくく、かつ1個のアバランシェフォトダイオードにて並んでいる複数の素子の測距を順番に行うので ON しているミラーとアバランシェフォトダイオードの出力により隣接素子の分離が容易である。以上が LIDAR に用いる場合のフリーモードの応用例である。

次に、長く製品化が待たれているホログラフィックディスプレイ市場に向けた応用を提案する。一般的にホログラフィックディスプレイに用いる光偏向器は干渉縞を表示させることが必要であり、その干渉縞の幅は可視光の波長に近い素子サイズが望まれる。例えば素子サイズを $1\mu\text{m}$ とすると視域角は約 30° が得られる⁸⁾。それにより両眼で見る実像は立体的に空中に浮かんで見えると言われ、実際に $1\mu\text{m}$ 素子サイズの光偏向器も開発されている⁸⁾。しかし、大きな立体像を動画として空中に浮かべる技術はまだ確立されているとは言えない。図11にフリーモードをホログラフィックディスプレイへ応用した場合の光学システムのモデル図を示す。この図を簡単に説明すると、コヒーレント性の良いレーザー光源からの可視光をフリーモードの2次元ミラーアレーで構成される光偏向器に全面入射させ、各素子をアクティブマトリクス駆動により ON/OFF 方向に傾斜させて干渉縞を表示させる。この時 ON 方向に反射された1次回折光を2軸スキャナーのミラー面に入射させる。2軸スキャナーのミラー面からの反射光は時間順次で水平方向と垂直方向に走査され、ミラー面から反射された1次回折光が大きなディスプレイ上に場所を変えながら入射する。ディスプレイ上の1次回折光が観察者から見えるようにディスプレイは曲面で形成されている。光偏向器により形成される1次回折光像(以後波面と称す)は、ディスプレイ上の各点において異なる像が表示されることが必要であり、それに応じて光偏向器を構成するフリーモードは数十 nsec の高速な動作が必要である。又、 $1\mu\text{m}$ の素子サイズにより作製される波面をそのままの大きさで空中に投

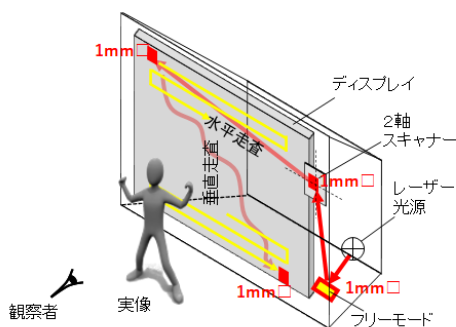


図11 フリーモードを用いたホログラフィックディスプレイ光学系

影させることにより視域角が 30° の大きさを維持できるので、波面の拡大縮小を行わないことも重要である。国内外の各大学においては、1 軸スキャナーや、複数の光源や、X 軸スキャナーと Y 軸スキャナーの併用により、空中に波面を並べて(一般的にタイリングと称される)立体的な空中映像を表示することが試みられている^{9), 10), 11)}が、使用される光偏向器の視域角が不十分であるため表示サイズを縮小することが必要であり、大きな画像でのホログラフィックディスプレイは困難である。

図11に示したフリーモードを用いたホログラフィックディスプレイにおける重要な点としては、表示させる波面の大きさを作製から表示に至るまで大きさを変えないことにあり、大きな視域角を維持し立体的に見える像を大きく表示させることにある。図12では、波面の作製から表示に至るまで波面の大きさを変えずに表示させる方法を記載している。図 12(a)において、RGB 各色用の SLM に表示された $1\mu\text{m}$ 幅の干渉縞により形成された波面が合波プリズムにより RGB 纏まった光束として2軸スキャナーのミラー面に放射される。その後図12(b)において、スキャナーのミラー面方向を2軸方向に変え、その反射光が大きなディスプレイ上の各点に向けて時間順次に放射される。この時ディスプレイ上の各

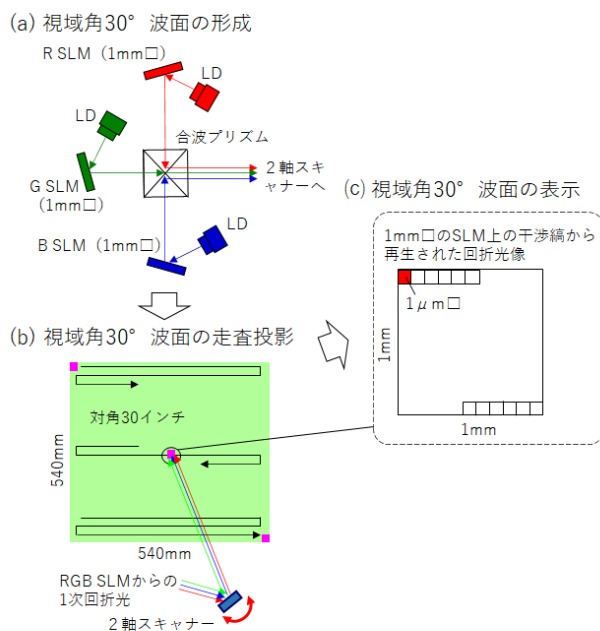


図12 波面の作製から表示まで

点では波面の大きさを変えずに結像させることが重要であり、省略しているが経路上レンズは必要である。図12(c)に記載のようにディスプレイ上の各点に放射された波面は、例えば 1mm 角の光偏向器により形成された波面がディスプレイ上の各点に大きさを変えずに並べられ、 $1\mu\text{m}$ 幅の干渉縞により再生された1次回折光像により視域角 30° を有する大きな再生像が空中に実像として浮かぶこととなる。

この時光偏向器としてフリーモードを用いることによりショートタイムバイアス駆動が可能となり、ミラー傾斜が終了する前に電圧印加を終了し、次の素子へと移動することが出来る。例えばアクティブマトリクス駆動で1個のフリーモード素子を動作させるための電圧印加時間 11.4psec において 40nsec のミラー傾斜時間を達成することが出来る。本システムで要求される1素子の表示時間 114nsec の内ミラーの傾斜時間を除いた 74nsec での表示が可能となる。私の経験では、この時間は2軸スキャナーを用いた HUD (Head-Up Display) の1素子の表示時間と比べて大差無いことから観察者が容易に視認することが出来る。

結論として提案する光学系により、立体視が可能な視野角で大面積のホログラフィックディスプレイを提供することが出来ると考えている。

5. まとめ

以上纏めると、サスペンション・フリー型の2次元ミラーアレーデバイス フリーモードを開発した。その動作性能より、従来のデバイスに対する複数の利点 小型化、高速性、低電圧駆動を確認した。

その利点を活用するデバイスの応用例として3次元分野での展開を目指し、2つの LIDAR 検出光学系と1つのホログラフィックディスプレイ光学系を提案した。

文 献

- 1) L.J. Hornbeck, “Digital Light Processing: A New MEMS-Based Display Technology” Technical Digest of the IEEE 14th Sensor Symposium, pp. 297-304, Kawasaki, Japan (June 4-5, 1996).
- 2) Richard Stahl et al, “Modular sub-wavelength diffractive light modulator for high-definition holographic displays” 9th International Symposium on Display Holography (ISDH 2012), Journal of Physics: Conference Series 415 (2013) 012057
- 3) T. Nanjyo, “固定されていないミラーによる二次元アレイ” SEMI テクノロジー シンポジウム (STS) 2009 (DECEMBER 2009)
- 4) K. Ohtaka et al, “A two-Dimension MEMS mirror array device based on a new structure” Smart Systems Integration 2007 PARIS-FRANCE pp. 375-382 (27-28.03.2007)
- 5) T. Nanjyo et al, “Free mirror array device for spatial light modulator” 2007 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (2007 IMFEDK)
- 6) S. Kato et al, “A two-dimensional MEMS mirror array device based on new structure” RICOH Technical Report No.33 (DECEMBER 2007)
- 7) T. Nanjo, “Light Modulation Element with Suspension-free Mirror” IEEE Transactions on Sensors and Micromachines Vol.140 No.2 pp.50-58 (FEBRUARY 2020)
- 8) 菊池 宏, “ホログラフィー立体表示用デバイスの研究動向” pp.18-25 NHK 技研 R&D/No.151/2015.5
- 9) D. E. Smalley et al, “Anisotropic leaky-mode modulator for holographic video displays” 20 June 2013 vol 498 NATURE P313-318, MIT Media Lab
- 10) 松田篤史 松島恭治, “光源スイッチング方式時分割ホログラフィックディスプレイ” 電子情報通信学会論文誌 D Vol.J96-D No.3 pp381-388 2013, 関西大学
- 11) Y. Takagi and Y. Tanemoto, “Modified resolution redistribution system for frameless hologram display module” 10 May 2010 Vol.18 No.10 OPTICS EXPRESS pp10294-10300, 東京農工大学

自動運転における LiDAR での自己位置推定とその課題

LiDAR-based Localization in Autonomous Driving and the Issues

柳瀬 龍*

Ryo YANASE*

要旨 自動運転自動車にとって自己位置推定は重要な技術の 1 つであり、高精度な位置推定を成立させるための代表的なセンサとして LiDAR が挙げられる。本稿では、LiDAR による自己位置推定技術とその技術的課題について解説する。

Abstract Localization is one of the most important technologies for autonomous vehicle, and LiDAR is a sensor which can achieve accurate position estimation. This paper presents LiDAR-based localization methods and the technical issues currently under development.

1. はじめに

自動運転自動車は「認知・判断・操作」のプロセスを繰り返すことによって自動走行を実現する。特に、認知のプロセスの結果に基づいて判断・操作が行われるため、周辺環境認識は重要な技術である。その中でも、自車両の位置を特定する技術である自己位置推定は安全な走行を行うために必要不可欠であり、高い推定精度や頑健性の高さが要求される。

自己位置推定には、大きく分けて GNSS/INS (Global Navigation Satellite System/ Inertial Navigation System) による推定とマップマッチングによるものがある。GNSS/INS は、トンネルや山間部、高層ビル街など電波の受信状況が悪化する状況において正確な位置が得られず、単体で自動運転に十分な位置推定を行うには課題がある。そのため、マップマッチングとの併用によって継続的かつ高精度に位置を求めることが必要となる。

マップマッチングは、あらかじめ作成しておいた地図を用いて、その地図とリアルタイムにセンサから得られたデータとの照合を行うことで、地図上の自車両位置を計算するものである。マップマッチングに使用される主要なセンサとして、カメラ、LiDAR やミリ波レーダなどが挙げられる。LiDAR ベースの自己位置推定手法は、自動運転自動車に広く採用されており、実際に公道走行試験を行った実績も数多く報告されている[1][2][3]。

本稿では、マップマッチングによる自己位置推定に焦点を置いて、LiDAR をベースとした位置推定手法とその技術的な課題について紹介する。

* 金沢大学 高度モビリティ研究所, 〒920-1192 石川県金沢市角間町

Advanced Mobility Research Institute, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa 9201192

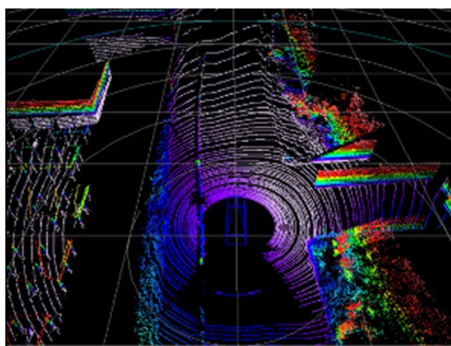


図 1 LiDAR から得られる 3 次元点群

2. LiDAR の特徴

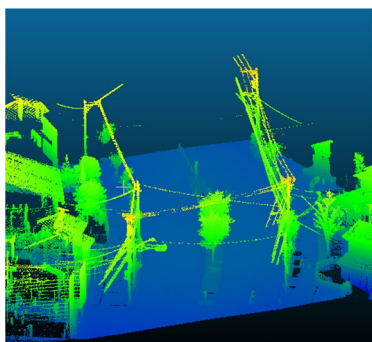
LiDAR (Light Detection And Ranging) は赤外線レーザを照射し、その反射光を測定することで物体までの距離や反射強度を計測するセンサである。自動運転自動車では 3 次元的な位置計測が可能な 3D LiDAR が多く利用されており、数 cm 単位での測距精度で点が得られるため、点群データとして物体の立体的な形状を捉えることが可能である。図 1 に実際の LiDAR から得られた点群の一例を示す。

カメラでは、時間帯や天候によって日照条件が変わることで物体の見え方に大きく変化が現れるが、LiDAR はセンサ自らが赤外線を照射するので日照条件による影響を受けにくいという利点がある。これらの特徴から、自動運転における自己位置推定には LiDAR が多く用いられており、また物体認識などその他の認知プロセスにおいても非常に重要な役割を持つ。

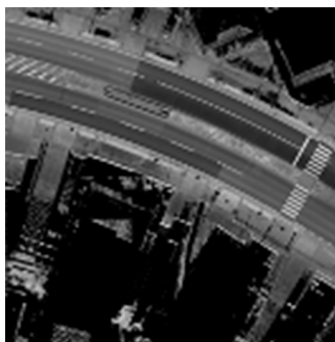
3. LiDAR による自己位置推定手法

マップマッチングには参照用の地図を使用するが、地図にどのような特徴を持たせるかが重要となる。位置推定のためのランドマークとなる特徴としては、基本的に位置が変化しない、または変化が起こりにくいものが望ましい。自動運転における位置推定においては、建物や電柱などの立体構造物と、白線や横断歩道などの路面パターンの 2 つが主な特徴として挙げられる。立体構造物に注目する手法は、建物やポールなど周辺環境の様々な物体をランドマークとして利用可能であり、図 2 (a) のような 3 次元点群として地図を保持し、点群のマッチングによって位置推定を行う。これに対して、路面パターンに注目する手法では、地図データを図 2 (b) のような画像の形式で保持し、画像マッチングなどによって地図とセンサデータとの照合を行うことで位置を推定する。すなわち、地図をどのような形式で保持するかによって自己位置推定手法が大別されることとなる。

本章では、自動運転において一般的に利用されている手法として、3 次元点群地図に基づくものと 2 次元画像地図に基づくものについて解説する。



(a) 3次元点群地図



(b) 2次元画像地図

図 2 自己位置推定のための地図

3.1. 3次元点群地図を用いた自己位置推定

3次元点群地図を利用する場合、地図とリアルタイムに得られたLiDAR点群との照合を点群マッチングにより行う。マッチングの具体的な手法としては、ICPアルゴリズムやNDTスキューンマッチングが代表的である。

3.1.1. ICPアルゴリズム

ICP (Iterative Closest Point)アルゴリズムは、2つの点群の位置・角度のずれ量を計算するためのアルゴリズムである[4]。ICPは図4のように、一方の点群に含まれる各点について他方の点群の最近傍点を探索し対応点のペアを作り、これらのペアについて、2点間の距離の和を最小化するような変換(並進・回転)を推定する。これらの手順を繰り返すことで、2つの点群の位置合わせを行い、最終的な位置と角度のずれが求められる。ICPでは、2つの点群の対応点を探索する処理を繰り返し行うこととなるが、マッチングに使用する範囲を広げてより多くの点群を用いる場合、全体的な処理時間が増大してしまうといった欠点がある。この問題を解決する手法として、点群を複数のレイヤーに分割し、レイヤーごとにマッチングを行うものが提案されている[5]。

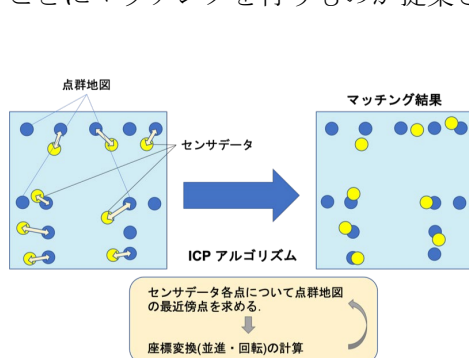


図 4 ICP アルゴリズムの外観図

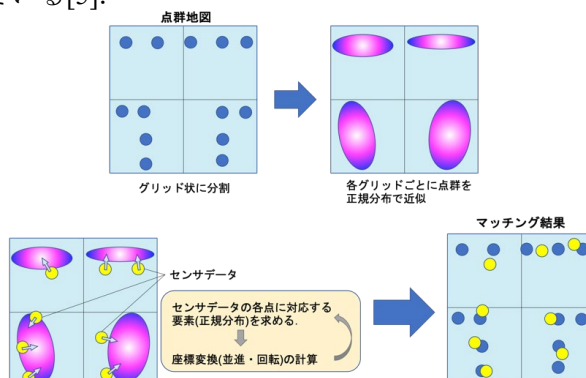


図 3 NDT スキャンマッチングの外観図

3.1.2. NDT スキャンマッチング

NDT (Normal Distributions Transform) スキャンマッチングでは、図 3 に示すように点群地図をグリッド状に区切り、各グリッド内の点群を正規分布で近似する[6]。この正規分布によって表された地図とセンサデータについて、ICP と同様に対応要素の探索および変換の推定を繰り返すことで2つの点群間の位置・角度のずれを計算する。この手法は地図の点数に依存しないため、ICP と比較して高速に計算可能であり、リアルタイム処理が必要である自動運転で用いられている実績がある[7]。

3.2. 2次元画像地図を用いた自己位置推定

2次元画像地図を用いた自己位置推定では、路面パターンを2次元画像として保持しておき、センサデータとの照合を行う手法が取られる。地図画像は図 2(b) で示したように、正射投影によって歪み補正を行ったオルソ画像と呼ばれる形式で表現される。

画像の照合にはテンプレートマッチング等が用いられる。テンプレートマッチングは、図 5 に示すように、テンプレート画像（センサデータ画像）を (d_x, d_y) だけずらしたときの類似度を計算し、その結果として相関分布という類似度の分布を得ることができる。このとき分布のピークが実際の車両位置である可能性が最も高い場所であると捉えることができる。この処理は高速フーリエ変換を利用して高速化を行うことが可能であり、テンプレートマッチングによる自己位置推定技術は文献[3]で示すように自動運転の公道実証実験において使用されている。

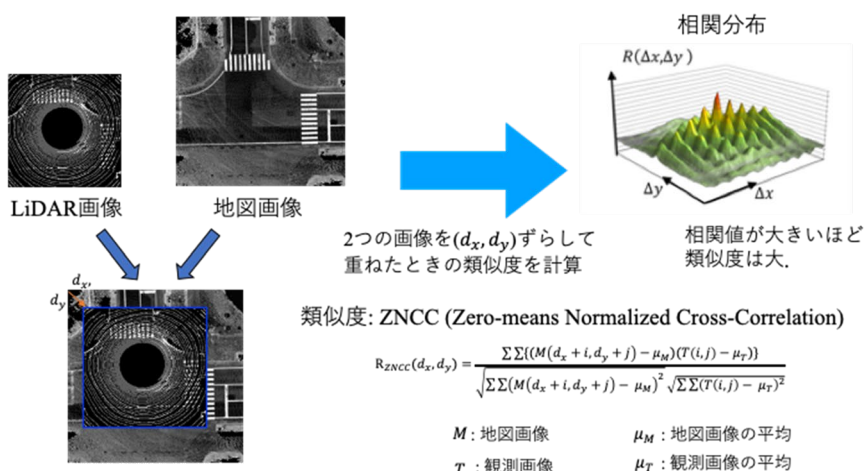


図 5 テンプレートマッチングの外観図

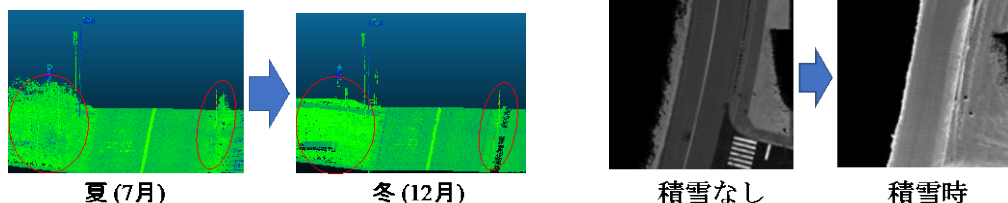
4. 自己位置推定の技術的課題

マップマッチングによる自己位置推定は、地図とセンサデータとの照合により成り立っており、あらかじめ用意していた地図とリアルタイムのセンサデータの双方で得られる特徴が一致することを前提としている。例えば、図 6 (a) のように、季節の移り変わりによって植物の形状が変化するような環境で、保持していた点群地図が形状変化前のものだったとすると、リアルタイムに得た LiDAR 点群とのマッチングにより正しく位置合わせできない問題が発生する。また、図 6 (b) に示すように積雪によって路面が隠れてしまったとき、路面パターンの見え方が地図と大きく異なるため画像マッチングでの位置合わせが困難となる。このように、地図とセンサデータが異なる状況こそが自己位置推定における技術的課題となっており、本章では特に LiDAR による自己位置推定に関しての課題について述べる。

地図とセンサデータが異なる状況の発生には、以下のような要因が考えられる。

- 時間経過による状態の変化
 - 植え込みや街路樹等の植物の形状変化
 - 路面パターンのかすれなどの経年変化
- 構造的変化
 - 工事による車線数の増加や建物の建て替えなど物理的な構造の変化
 - 路面パターンの塗り替え
- 天候による要因
 - 豪雨・霧によるレーザの反射・分散・散乱
 - 積雪による路面の形状変化・路面パターンの隠れ

このうち、時間経過による状態の変化および構造的変化については、地図が最新の状態に更新されていれば回避可能な問題であるが、常に地図を最新の状態に保つことは非常に大きなメンテナンスコストが必要とされるため困難であると言える。したがって、現実的な解としては、地図とセンサデータのマッチングを行うだけではなく、現在の道路環境と地図との変化を検出し、その差異が大きい場合にはマッチング結果を棄却するといった対応が必要であると考えられる。



(a) 季節による植物の形状変化

(b) 積雪による路面の隠れ

図 6 位置推定における技術的課題の例

天候による要因に関しては、LiDAR 単体による解決が困難な例である。例えば、濃霧が発生している状況では、レーザ光が散乱することによって見通せる距離が低下してしまう。このような課題に対する解決策の 1 つとして、センサフュージョンが挙げられる。ミリ波レーダは、霧・雪などの影響を比較的受けにくい耐環境性の高いセンサとして注目されており、ミリ波レーダベースの自己位置推定手法によって北海道の積雪環境下での自動走行を実現した例も報告されている[8]。安全な自己位置推定を行うためには、センサ単体での高精度な位置推定のみならず、複数種類のセンサによる冗長系を組むことでそれぞれのセンサの欠点を補い頑健性の高いシステムを構築することも求められる。

5. おわりに

本稿では、自動運転における自己位置推定に関して、主要なセンサである LiDAR を用いた推定手法と課題について述べた。位置推定には参照する地図にどのような特徴を持たせるかが重要であり、主に用いられる手法として、3 次元点群地図および 2 次元画像地図に基づくものを紹介した。それぞれの手法に対して課題となる状況が存在するが、特に、霧や雪などの天候による課題については LiDAR 単体の自己位置推定では解決が非常に困難であり、より頑健性の高いシステムを実現するためにはセンサ冗長系を構築するといった対策が必要とされる。

参考文献

- [1] C. Urmson, J. Anhalt, D. Bagnell, et al., “Autonomous Driving in Urban Environments: Boss and the Urban Challenge”, *Journal of Field Robotics*, vol. 25, no. 8, pp. 425-466, 2008.
- [2] J. Levinson, S. Thrun, Robust Vehicle Localization in Urban Environments Using Probabilistic Maps, *Proceedings of IEEE ICRA2010*.
- [3] N. Suganuma, et al., Localization for Autonomous Driving on Urban Road, *Journal of Advanced Control, Automation and Robotics*, Vol.1, No.1, pp.47-53, 2015.
- [4] P. J. Besl et al., “A Method for Registration of 3-D Shapes,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992.
- [5] K. Yoneda et al., “Urban Road Localization by using Multiple Layer Map Matching and Line Segment Matching,” *Proceedings of 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2015.
- [6] P. Biber et al., “The Normal Distributions Transform: A New Approach to Laser Scan Matching,” *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Intelligent robots and Systems*, 2003.
- [7] S. Kato, et al., “An Open Approach to Autonomous Vehicles,” *IEEE Micro*, 2015.
- [8] K. Yoneda, N. Hashimoto, et al., “Vehicle Localization using 76GHz Omnidirectional Millimeter-Wave Radar for Winter Automated Driving,” *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2018, pp. 971-977

コヒーレント差分吸収ドップラーライダーによる風・水蒸気分布計測技術

Development of coherent differential absorption Doppler lidar
for wind and water vapor measurements

青木 誠、岩井 宏徳

Makoto Aoki and Hironori Iwai

情報通信研究機構（〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1）

NICT, 4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795

要旨： NICT のリモートセンシング研究室において取り組んでいる、ゲリラ豪雨や竜巻等に代表される極端気象の早期捕捉や発達メカニズムの解明に貢献する、風と水蒸気の空間分布を遠隔計測するコヒーレント差分吸収ドップラーライダー技術について解説する。

Abstract: NICT is conducting studies of remote sensing technologies that can measure atmospheric wind, water vapor, and precipitation with high temporal and spatial resolutions for early detection of extreme weathers. In this paper, we introduce coherent differential absorption Doppler lidar technique for wind and water vapor measurements.

1 はじめに

ライダー（LIDAR: Light Detection And Ranging）は、光を用いたリモートセンシング技術の一種であり、大気中にパルス状の光または連続波を照射し、測定対象からの散乱光を測定し、遠距離にある対象までの距離とその性質を計測するものである[1]。近年では、自動運転のセンサーとしての近距離ライダー技術（LiDAR）に注目が集まっているが、その一方で、古くから大気と気象の研究に用いられてきた。ライダーは、レーザを使ったレーダーという意味で、レーザレーダーとも呼ばれる。電波を用いるリモートセンシング技術であるレーダーとの最も基本的な相違は、周波数が高い（＝波長が短い）電磁波を用いることである。波長の長い電波と比べて波長の短い光は、大気中の様々な微粒子と強い相互作用を起こす。そのため、気象レーダーの主な観測対象は、雨や雪などの比較的大きな降水粒子であるのに対し、ライダーは大気より小さな構成要素である大気分子や大気微粒子（以下、エアロゾル）の観測を得意としている。利用する光の散乱機構（ミー散乱、レイリー散乱、ラマン散乱など）や観測対象の違いによって様々なライダーが存在する。

2 ドップラーライダー

風に乗って運ばれている大気分子、エアロゾルや雲にレーザ光を当てると、ドップラー効果によって散乱信号の周波数が送信時と比べて僅かにシフトする。ドップラーライダーは、このシフトした散乱信号の周波数を測定することで、風を高時間・高空間分解能で測定するライダーである。ドップラーライダーによる測定方法は、検出方式によってコヒーレント方式と直接検波方式の2つに分けられる。ここでは、NICTで開発を実施している光ヘテロダイン検波を用いるコヒーレント方式ドップラーライダー[2][3]について述べる。

図1にドップラーライダーの概略図を示す。ドップラーライダーは主に、単一波長で発振するシードレーザ、高出力なパルスレーザ、送受信の望遠鏡とレーザビームをスキャンするための光学系、受信した散乱信号をヘテロダイン検波する光検出器、信号処理及び観測制御を行う計算機から構成される。光送信機に用いられるパルスレーザの発振波長は、人の目に対する安全を考慮して、波長が1.4から2.6 μm の人の目に対して損傷閾値が高いアイセーフレーザが用いられる。90年代から固体レーザ技術の躍進により2 μm 帯の固体レーザ[4]が、最近では光部品の入手性などから1.5 μm 帯の光ファイバー型のレーザ[5]が用いられるようになっており、現在ではこれらの波長帯がドップラー風ライダーの光送信機として主流になっている。連続波で発振するシードレーザから得られたレーザ光（周波数： f_0 Hz）は、光分岐器で2分割されて、一方はヘテロダイン検波のための局発光として用いられる。もう一方は、ヘテロダイン検波及びドップラー成分の正負の判断のために、周波数変調器で周波数オフセットが加えられ（周波数： f_0+f_{mod} Hz）パルスレーザの周波数制御に用いられる。パルスレーザによって生成されたパルス光は、望遠鏡及び走査光学系を通り大気へと射出される。散乱体によって後方散乱されたパルス光（周波数： $f_0+f_{\text{mod}}+f_d$

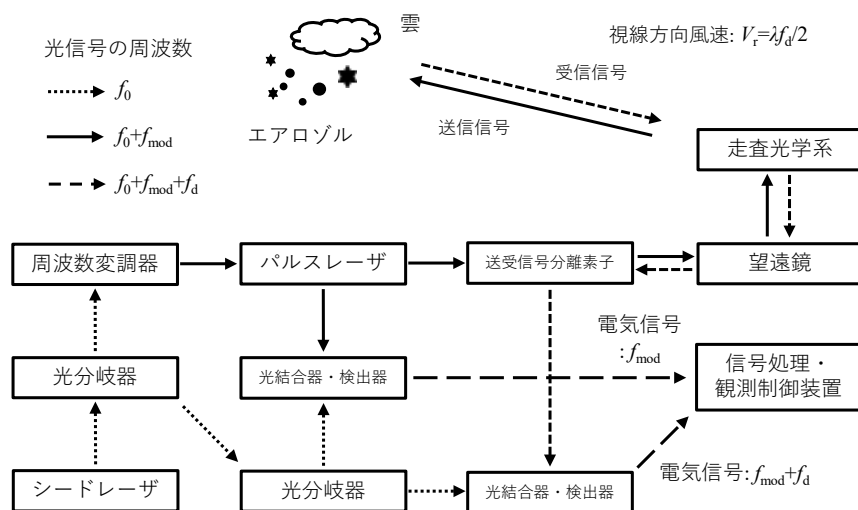


図1 コヒーレント方式のドップラーライダーの構成

Hz) は、送信と同じ望遠鏡によって集められた後、光結合器で局発光と混ぜられて光検出器によってヘテロダイン検波されてビート信号 (周波数: $f_{mod} + f_d$ Hz) として検出される。パルスレーザとシードレーザの周波数オフセット量 (周波数: f_{mod} Hz) も同様の手法で検出を行う。ヘテロダイン検波された信号は、AD ボードでサンプリングされた後に信号処理されて、レンジごとの視線方向ドップラー速度を含むプロダクトデータが生成される。

ドップラーライダーの応用範囲は、局地的な気象観測、航空気象、風力発電、都市環境計測など多岐にわたる。ここでは、2015 年 8 月 31 日に NICT の沖縄電磁波技術センターから西に約 6 km の東シナ海海上で発生した海上竜巻の観測事例を紹介する。海上竜巻は海上で発生する上昇気流を伴う高速の渦巻きであり、海面近傍で局地的な突風を発生させる。図 2 左の写真に示すように、海上竜巻は積乱雲の雲底から漏斗状に垂れ下がる雲 (漏斗雲) により可視化される場合がある。図 2 中央及び右のコンター図は、14 時 38 分のドップラーライダーのセクターPPI 観測により可視化された竜巻とその周辺の視線方向ドップラー速度の分布を示している。観測結果は時計回りの渦の存在を示しており、渦の接線方向風速の速度差 ΔV は $12.96 - (-8.76) = 21.72 \text{ m/s}$ である。しかし、渦中心付近での観測体積内でのドップラースペクトルに着目してみると、ドップラー速度は $+15 \text{ m/s}$ から -22 m/s まで広がっているため、実際の渦の接線方向風速の速度差 ΔV はさらに大きいことが示唆されている。ドップラーライダーと同じ地点には NICT のフェーズドアレイ気象レーダ (PAWR) が設置されており、海上竜巻の親雲である積乱雲内で時計回りの循環を伴う降水コアが成長する様子は捉えることができたが、その一方で PAWR では降水粒子を伴わない海上竜巻本体の渦を捉えることができず、ドップラーライダーでのみ渦を捉えることができた。以上のことから、ドップラーライダーは降水粒子を伴わない積乱雲発生前の風速場や竜巻などの極端気象の早期検知に非常に有効であると言える。

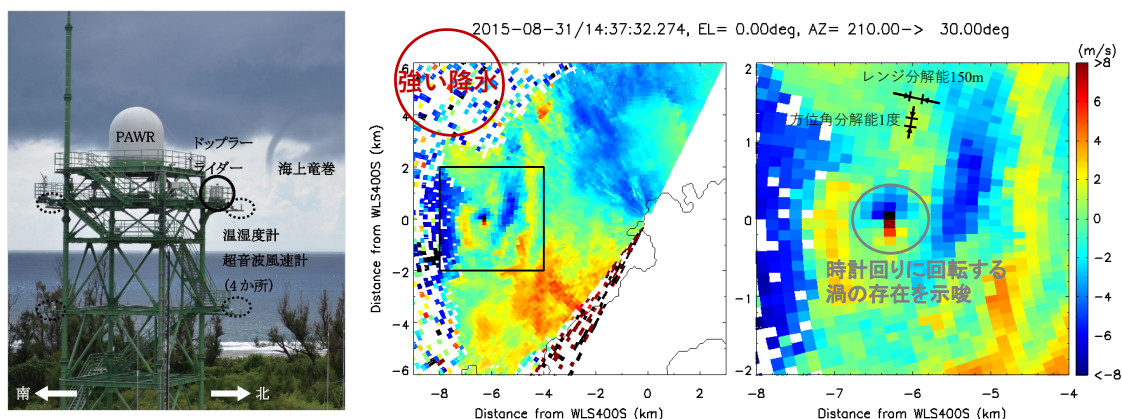


図 2 ドップラーライダーによる海上竜巻の観測事例

3 水蒸気差分吸収ライダー、マルチパラメータ差分吸収ライダー

差分吸収ライダー (DIAL: Differential Absorption Lidar) は、気体濃度を遠隔測定するライダー手法である。測定対象気体分子の吸収の大きな波長と吸収の小さい波長の近接する2波長を観測に用いることで、エアロゾル濃度などの未知のパラメータを打ち消すことができ、測定対象の気体分子濃度分布を高精度に求めることが可能である。近年、局地豪雨や竜巻などの局所的で突発的な大気現象による災害が増加傾向にある。急激に発達する積乱雲に伴い発生するこれらの極端現象は、河川の氾濫や土砂災害を引き起こし人々の生活に甚大な被害をもたらすことがある。現在、NICTのリモートセンシング研究室では、波長 $2\mu\text{m}$ 帯のコヒーレント方式のドップラーライダー技術を発展させて、積乱雲発生の前兆現象となる風の収束・上昇気流と、雲や雨の素となる水蒸気を同時計測する水蒸気差分吸収ライダー (H_2O -DIAL) 及びその更なる発展形であるマルチパラメータ差分吸収ライダー (MP-DIAL: Multi Parameter DIAl) の研究開発を進めている。MP-DIALは観測波長を3波長以上に増やすことで、大気の様々な情報 (大気微量成分、大気気体成分、風、水蒸気、温度など) を選択的に観測可能かつ多目的に利用できる高機能なライダーである (図3)。

MP-DIALは、主に波長 $2\mu\text{m}$ 帯の単一波長CWシードレーザ、シードレーザの波長を観測に適した波長に制御する波長制御装置、波長制御したシードレーザを光注入同期光源とする高出力パルスレーザから構成される。将来的な社会実装を目指して各構成要素の開

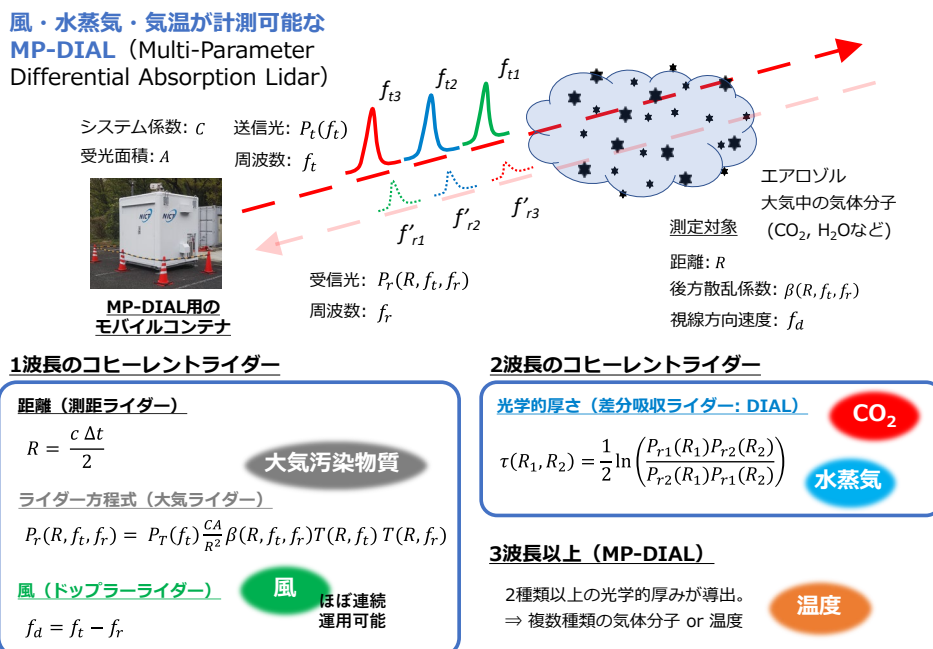


図3 NICTで開発を進めているMP-DIAL

MP-DIALの主な構成要素



図4 開発を進めている MP-DIAL の主構成要素

開発を進めている（図4）。開発を進めているシードレーザは、低コスト化と安定化を主眼として、レーザ媒質である Tm,Ho:YLF 結晶、発振波長選択のためのエタロン素子、ピエゾ素子に取り付けられた出力鏡から構成されるシンプルな LD 端面励起の固体レーザとした（図4左）。共振器内部に挿入されたエタロン素子の厚さや傾き等のパラメータ、ピエゾ素子の印加電圧を変化させることで発振波長の選択が可能である。

シードレーザは長時間の連続運転や周囲の環境変化によって、数 μm 程度の波長ドリフトおよび波長変動を起こす。吸収波長と非吸収波長は、それぞれ H_2O 分子と CO_2 分子の吸収断面積の波長依存性が大きい場所に位置しているので、波長変動により測定誤差が生じる。そのため、観測に適した波長にシードレーザの発振波長を長時間安定して制御するための波長装置の開発も進めている（図4中央）。開発した装置は、Pound-Drever-Hall 法 (PDH 法) を用いた CO_2 の吸収線 (2050.967 nm) への波長制御、電気光学変調器 (EOM) によるレーザ発振波長の位相変調及び Optical Phase-Locked Loop 法 (OPLL 法) によるレーザ発振波長の位相同期技術の組み合わせによってシードレーザの波長制御実現しており、EOM の変調周波数を変化させることで、波長制御範囲内 ($2050.967 \pm 0.42 \text{ nm}$) の任意の波長にシードレーザの波長を位相同期すること可能である[6]。

ライダー用の波長 $2\mu\text{m}$ 帯のパルスレーザとしては、 Tm や Ho を添加した固体レーザ (Tm,Ho:YLF 、 Ho:YLF など) が良く用いられる。これらのレーザは数 ms 以上のレーザ上準位寿命を持ち（高い励起エネルギー蓄積能力を持つ）、高パルスエネルギーの Q スイッチ発振が可能であり、遠距離のライダー観測に適している。NICT では、衛星搭載型のドップラーライダーの実現を目指して、高パルスエネルギーが期待できる LD 側面励起の -80 から -40°C 程度まで冷却して使用する Tm,Ho:YLF パルスレーザ[7]の研究を進めてきたが、最近では地上設置型の MP-DIAL の光送信機として、 Tm ファイバーレーザを励起光源とする端面励起 Ho:YLF パルスレーザ[8]の開発を進めている（図4右）。このパルスレーザは常温で効率的な高繰返し周波数・高平均出力動作が可能であり、使いやすく効率的な MP-DIAL を構築できる可能性がある。



ラジオゾンデ（風船から吊下げられたセンサー）で水蒸気の高高度分布を観測、開発した装置との比較検証を実施。



水蒸気ライダーの波長制御装置

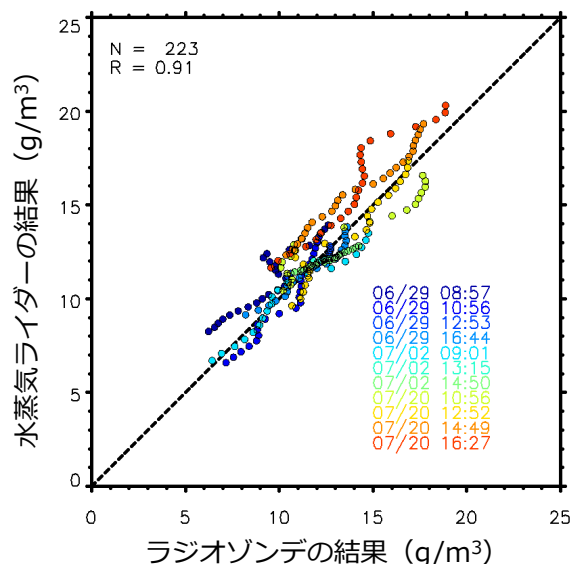


図5 H₂O-DIAL の測定精度検証（東京都小金井市、NICT 本部、2020 年 6-7 月）

4 おわりに

NICT のリモートセンシング研究室で開発が進められている風と水蒸気の空間分布を遠隔計測するコヒーレント方式の H₂O-DIAL とその発展形である MP-DIAL について紹介した。現在では、ラジオゾンデ（ゴム気球に気象測器を取り付けたセンサー）との比較検証による H₂O-DIAL の水蒸気測定精度の検証を進めており、良い一致が得られている（図5）。今後は、H₂O-DIAL の技術を発展させた MP-DIAL の開発を実施すると共に、その社会実装を目指した活動を進める予定である。

参考文献

1. R. M. Measures, “Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications,” Wiley-Interscience, 1984.
2. V. Banakh and I. Smalikho, “Coherent Doppler Wind Lidars in a Turbulent Atmosphere,” Artech House, 2013.
3. S. Ishii, et al., Appl. Opt. **49**, 1809–1817 (2010).
4. S. W. Henderson, et al., Opt. Lett. **16**, 773–775 (1991).
5. S. Kameyama, et al., Appl. Opt. **46**, 1953–1962 (2007).
6. M. Aoki and H. Iwai, Appl. Opt. **60**, 4259–4265 (2021).
7. A. Sato, et al., IEEE Photo. Techno. Lett. **29**, 134–137 (2017).
8. K. Mizutani, et al., Opt. Lett. **43**, 202–205 (2018).

レーザーで取得された 3 次元データによる森林解析

Laser derived 3D data for forest measurement and analysis

加藤 顕, Ph.D.

千葉大学 大学院園芸学研究科

Akira Kato, Ph.D.

Graduate School of Horticulture, Chiba University

摘要

自動運転実現のために、3 次元レーザーが衝突防止用に急速に普及したが、レーザー技術自体は、森林分野で以前から研究が進められてきた。本発表では、レーザーによって得られる 3 次元データを用いた形状解析技術を森林分野に特化して紹介する。レーザーデータの取得方法は、衛星、航空機、車載、地上、さらには手持ちのものがああり、様々な取得方法がある。そうした様々な方法に合わせた 3 次元データの解析事例を紹介する。

Abstract

Automated driving system becomes popular and utilizes 3D laser system to prevent collision of the vehicle. 3D laser has been used in forestry field to capture the structure of trees. This paper is aimed to introduce the development of 3D laser analysis, especially for forest application. The 3D data acquisition has been conducted by satellite, airborne, mobile mapping, terrestrial and handy devices, and the various 3D data analysis was proposed and developed to fit to the device capability.

本研究紹介では、森林分野でのレーザー利用、解析技術の発展を時系列で紹介したい。レーザーセンサーの開発は、社会からの強いニーズに応えるように発展してきている。レーザーを照射する技術は確立した技術として研究蓄積があるが、商品化される過程で、社会のニーズに合わせた開発が行われているため、センサーへのニーズと、その結果何がでるようになったかをまとめて報告したい。

1. 航空機レーザー：3 次元形状の推定

航空機レーザーの最初の利用は、氷の厚さを遠隔から計測するという目的であった。レーザーによって海面上にある氷の 3 次元形状把握ができれば、運航業に安全な航路のデータを提供できる。大きな市場があったため、単反射型レーザーが商品化された。その後、3 次元データが氷だけでなく、森林を透過して地盤高が測れることがわかり、測量分野で応用されるようになった。航空機レーザーから測量や林業といった産業を支えるために解析手

法が確立されてきた。測量分野では、防災のために地盤高を正確に把握するというのが課題であったため、航空機レーザーから地面を自動で抽出する技術が発展した。森林下にある地面の把握では、樹木はすべて「ノイズ」であったため、森林をいかに効率よく除去できるかが研究課題であった。しかし、せっかく森林形状が3次元データとして得られているため、ノイズとして捨てていたデータを林業に応用できないか？というので、林業のために森林データを活用する研究が展開された。測量分野では日本全国で地盤高を広域でデータ整備する必要があるため、森林も同時に3次元データが入手できるようになった。しかし、航空機レーザーでは得られる3次元点群の点密度が低いいため、森林を計測するためには「モデル」を作成する必要がある。3次元データが取得されているにも関わらず、形状を直接計測できず、モデルを通して「推定する」必要がある。航空機によるデータ取得では地上高 1km 上空からのレーザーを照射するため、レーザー反射で受け止められる点が少なくなり（初期のセンサーで 2 点/m²、最近では 20 点/m²）、対象とする物の一部しかデータ取得できないという限界があった。さらに、森林上部からの反射が多くなるため、森林内部など、本来取得したい形状のデータを得ることが難しかった。そのため、レーザーを高頻度または高出力に照射できるセンサーの開発が進んだ。その結果、fullwave と呼ばれるレーザー照射 1 点に対して、多数の反射を得るレーザーセンサーの開発が進み、効率よくデータを取得できるようにしたと同時に、森林の上部と地盤高の反射だけ（first と last pulse）ではない、その中間からの反射で、森林内部を把握する研究が続いている。

2. 地上・車載レーザー：3次元形状の詳細把握

より近い場所からデータを取得できれば、より詳細な3次元データを得られるため、地上設置型レーザーを樹木の近く、もしくは森林内部に設定し、樹木の詳細形状を把握する研究が進められた。3次元レーザーを森林に利用する機会が増え、センサーも小型化・安価になり、高頻度で、いつでも3次元形状が把握できるようになった。地上レーザーによる3次元データで、森林内部の細かい情報を得ることができるようになった一方で、樹木自体によって照射が遮られ、取得できない（影の）部分があり、航空機レーザーのように一律で面的データの取得ができないという欠点があるが、航空機レーザーのようなモデルを作成する必要がなく、直接計測ができるようになった。様々な場所で地上にセンサーを設置し、局所的なデータを合体することで面的データにもできる。こうした高密度点群データは、詳細であるために多くの樹木情報（森林にとっては、病害や変形といった情報）を早期に見つけ出すことができるようになった一方で、樹木の個体差が顕著になり、効率的なサンプリング手法、広域でデータを取得する方法を検討する必要がでてきた。地上設置型を車に搭載すれば広域展開も可能なため、車載レーザーも使用されるようになったが、道路沿いしかデータが取得できず、データ取得範囲に限界があった。さらに、樹木の側面

データしか得られないため解析手法も工夫する必要がある。車載レーザーによる開発が現在の衝突防止用レーザーの研究へと展開している。

3. ドローンレーザー：3次元形状の広域で詳細な把握

レーザーの普及とともに、写真測量の技術を応用した **Structure from Motion (SfM)** という解析技術が普及し、レーザーを用いずドローンの空中写真だけから3次元データを作成できるようになった。写真だけから3次元化する手法が普及したおかげで、ドローン自体が急速に普及し、ドローンで3次元データ作成が容易に行えるようになった。しかし、写真上に撮影されたものしか3次元化できないため、森林内部の3次元データは取得できない。その結果、レーザーをドローンに搭載したドローンレーザーが使用されるようになった。ドローンレーザーは、従来の航空機レーザーと同様で、森林内をレーザーが透過して地盤高も計測できる。さらに、航空機レーザーに比べ低高度（50m～100m）でデータ取得が可能のため、点密度が400点/m²に飛躍的に高くなった。さらに、ドローンに搭載しなければならないため、積載可能量を超えない重さのレーザーセンサーを開発する必要がある。そこで、車の衝突防止用に開発された小型レーザーをドローンに転用し、ドローンレーザーとして使用されるようになった。ドローンレーザーによって、樹木の上部と森林内の幹形状を同時に計測でき、広域でデータをより均一に取得できる。課題としては飛行時間である。積載可能なりポバッテリーで30分～1時間が飛行限界であり、1回でデータが取得できる範囲の限界である。バッテリーが進歩し、飛行時間の長距離化が実現できれば、より広範囲のデータ取得が低高度で、さらに高密度（高解像度）で可能となる。

4. これからのレーザーセンサー開発：3次元レーザーの多波長化

レーザーによって取得できる3次元データの解像度は、ドローンレーザーによって飛躍的に向上し、社会の需要に応えるようになってきたが、点群の処理過程で、樹木を抽出する際、分類エラーが生じてしまう。3次元データ取得時に、点群を同時に分類できれば用途が広がるため、レーザーセンサーの今後の開発に注目されているのは多波長化である。ハイパースペクトルレーザーセンサー開発は以前から話題になっているが、ハイパーのようなすべての波長領域でのレーザーセンサー開発は難しく、すでに決まった波長で開発されたレーザーセンサーを組み合わせることで、センサーの多波長化を実現しようとしている。レーザーの形状把握に加え、波長情報によって特定できる対象情報を付加してデータを提供できれば、現在の点群処理が飛躍的に効率化し、より正確な分類結果で森林を解析可能となる。

5. 衛星レーザー：世界の3次元化

広域を詳細に形状把握する技術が発展する一方で、衛星からレーザーによって世界の 3 次元化に取り組むといった研究も盛んである。NASA が GEDI という衛星レーザーシステムを国際宇宙ステーションの暴露部に取り付け、3 次元データ収集している。衛星レーザーはビーム径が広がるため、地上に到達する際は直径 20m ほどになり、1 つのレーザーに対して 1 つの点反射ではなく、Full waveform として 1 つのレーザーから複数の反射を波形状で記録し、波形の形状から地盤高や樹木状況を把握するといった解析手法が必要となる。日本でも MORI が GEDI の後継として同じ場所にセンサーを取り付ける予定で JAXA で準備が進められている。

6. 解析技術

レーザーによって得られるデータを解析する標準的手法として、CloudCompare¹⁾, Lastools²⁾ (rapidlasso GmbH) などの無料ツールにて誰でも簡単にできる。特に細かい樹木形状を自動解析する手法として Quantitative Structure Model³⁾ (QSM) も提案されている。様々手法を理解する必要があり、統計、自然科学、コンピュータグラフィックス、プログラミングなど多分野での理解が必要となる。本発表者もこれまで、様々な手法での解析手法を提案しており、ラッピング法^{4),5),6)}、ボクセル法^{7),8)}、3 次元から 2 次元への画像展開法⁹⁾、さらには 3 次元時系列解析方法^{10),11)}などがあり、ひとつのソフトにパッケージ化してカスタマイズして提供できるようにしている。コンピュータグラフィックの手法を用いた形状把握を特長としている。不定形で複雑な樹木をいかに効率良く、そして正確に計測し、把握するかをテーマに研究を進めている。

7. 参考文献

- 1) <https://www.danielgm.net/cc/>
- 2) <https://rapidlasso.com/lastools/>
- 3) Raunonen, P., et al, (2013) Remote Sensing 5 (2), 491–520.
- 4) Kato, A., et al., (2009) Remote Sensing of Environment 113(6), 1148-1162
- 5) 加藤 顕、特許第 5911114 号 表面再現方法及び表面再現プログラム
- 6) 加藤 顕、特許第 5522367 号 表面再現方法及び表面再現プログラム
- 7) 加藤 顕等 (2019) 日本緑化工学会誌 45(1), 121-126
- 8) 加藤 顕、特許第 5844438 号 三次元測定対象物の形態調査方法
- 9) 加藤 顕、特許第 6044052 号 魚眼画像データ作成プログラム及び LAI 算出プログラム
- 10) Hudak, A.T. Kato A., et al., Forest Science 66(4) 428-442
- 11) 加藤 顕、特許第 6635649 号 データ重ね合わせプログラム及びデータ重ね合わせ方法

令和 3 年第 4 回

ホログラフィック・ディスプレイ研究会のお知らせ

■開催日： 2021 年 12 月 10 日(金) 13:00～16:00

■場 所： Zoom によるオンライン開催

■テーマ： 光によるリモートセンシング技術の最新動向

■プログラム：

- (1) サスペンション・フリー型ミラーアレーデバイスで 3 次元分野で活かすには
南條 健（リコー）
- (2) 自動運転における LiDAR での自己位置推定とその課題
柳瀬 龍（金沢大）
- (3) コヒーレント差分吸収ドップラーライダーによる風・水蒸気分布計測技術
青木 誠，岩井宏徳（NICT）
- (4) レーザーで取得された 3 次元データによる森林解析
加藤 顕（千葉大）

■参加費： 会員，非会員，ともに無料

■問合せ先

- ・研究会について： e-mail meeting@hodic.org
- ・その他全般: HODIC 事務局
日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川 浩 宛
TEL/FAX 047-469-5391
e-mail office@hodic.org

令和 4 年第 1 回ホログラフィック・ディスプレイ 研究会のお知らせ

■開催日： 2022 年 2 月下旬から 3 月上旬ころを予定

■場 所： Zoom によるオンライン開催の予定

■テーマ： 未定

■プログラム： 未定

■研究会参加申込 事前申込

■参加費： 会員，非会員，ともに無料

■問合せ先

・研究会について： e-mail meeting@hodic.org

・その他全般: HODIC 事務局

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川 浩 宛

TEL/FAX 047-469-5391

e-mail office@hodic.org

HODIC の WEB ページとメールリストのご案内

HODIC では、独自のドメインにて WEB ページとメーリングリストのサービスしております。WEB ページのアドレス (URL) は

<https://www.hodic.org/>

です、ぜひアクセスしてみてください。なお、WEB ページでは皆さんからの情報やメッセージも掲載できるようになっています。

メールリストサービスは、特定のアドレスにメールを送ると加入者にメールが転送されるものです。HODIC からのお知らせと会員間の自由な意見交換や情報交換のために利用しています。加入も脱退も自由で、費用もかかりません。自分から情報発信したり、分からないことを質問したりすることも可能です。インターネットへの電子メールの送受信が可能ならどなたでも参加できます。加入の申し込みは、登録したいメールアドレスから maillist-req@hodic.org あてに、本文に SUBSCRIBE と書いて電子メールをお送りください。ご質問は、w3@hodic.org までお知らせください。

ホログラフィック・ディスプレイ研究会役員（敬称略）

名誉会長	辻内 順平	会長	伊藤 智義（千葉大学）
副会長	山本 健詞（徳島大学）	前会長	橋本 信幸（シチズン時計）
国際担当	西辻 崇（東京都立大学）	企画委員長	角江 崇（千葉大学）
会計幹事	山内 豪（大日本印刷）	事務局長	岸本 康（凸版印刷）
編集長	吉川 浩（日本大学）		

幹 事（５０音順）

石井勢津子（美術家）	石川 洵（石川光学造形研究所）	岩田 藤郎
鎌田 康昌（凸版印刷）	坂本 雄児（北海道大学）	下馬場朋禄（千葉大学）
白木 厚司（千葉大学）	白倉 明（アーティエンス・ラボ）	高橋 進（凸版印刷）
松島 恭治（関西大学）	山口 健（日本大学）	山口 雅浩（東京工業大学）
渡邊恵理子（電気通信大学）		

相 談 役（５０音順）

上田 裕昭（コカミナルプラネタリウム）	小野 雄三（立命館大学）	勝間ひでとし（湘南 LRT 研究 G）
桑山 哲郎	久保田敏弘（久保田カメラ工房）	酒井 朋子（千葉大学）
佐藤 甲癸	永田 忠昭（arts-unis）	三田村峻右
堀内 道夫（光と風の研究所）	本田 捷夫（本田ひかり技研）	

編集部よりのお知らせ

編集部では皆様からの情報を募集いたしております。ホログラフィ関連のお知らせや報告などがございましたら、下記編集部連絡先までお送り下さいますようお願い申し上げます。

なお、次号会報に掲載するためには研究会開催日の１ヶ月前が締切となります。

HODIC Circular, Vol. 41, No. 4 (Dec. 2021)

2021 年 12 月 10 日発行

編 集 日本光学会 ホログラフィック・ディスプレイ研究グループ

編 集 長 吉川 浩(日本大学)

HODIC 事務局 (入会・連絡先変更・各種問合せ等)

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付 (担当: 吉川 浩)
〒274-8501 船橋市習志野台 7-24-1

TEL/FAX 047-469-5391 E-mail: office@hodic.org

WEB: <http://www.hodic.org/>

ご連絡はなるべく電子メールまたは FAX にてお願いいたします。

For foreign members, any corresponding to

Hiroshi Yoshikawa, Dept. Computer Engineering, Nihon University

7-24-1 Narashino-dai, Funabashi, Chiba 2748501 JAPAN

E-mail: yoshikawa.hiroshi@nihon-u.ac.jp

HODIC