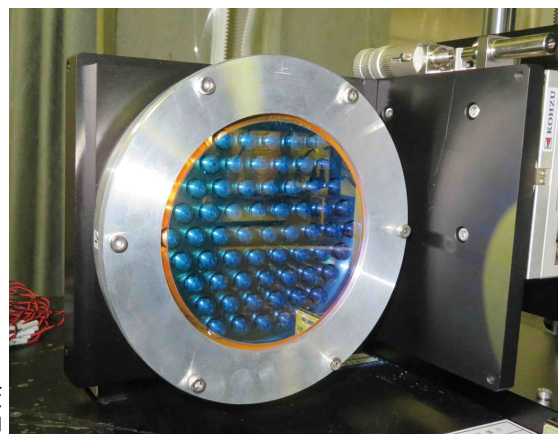




【表紙図】開発した大型可変形鏡(高次項補正鏡)の外観

高速・高光耐性可変形鏡の開発

レーザープロセス研究チーム 谷口誠治、コスロービアン ハイク、稲田順史

■はじめに

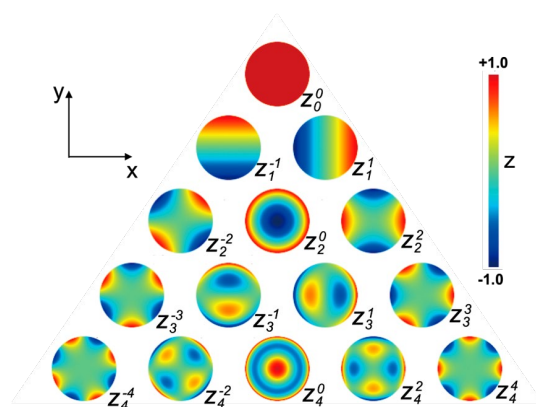
当研究所では、高出力レーザーの大気中遠距離伝送技術を開発するため、要素技術の一つである高速・高光耐性可変形鏡(デフォーマブルミラー)の開発を進めてきた。可変形鏡とは、鏡の背面に縦方向(Z軸方向)に伸縮する駆動素子を複数配置し鏡面形状を変化させる反射鏡のことを指す。大気のゆらぎなどに起因するレーザーの波面乱れを可変形鏡で補正することにより、高いエネルギー効率でのレーザー伝送が可能となる。これまでに、レーザー光の進行方向(チップ・チルト成分)およびピント(デフォーカス成分)の波面乱れをそれぞれ補正する口径100 mmの大型可変形鏡を2種開発した(Laser Cross No.408,2022.May.を参照)。本稿では、高次成分の波面乱れの補正が可能な大型可変形鏡(以下高次項補正鏡と表記)を開発し、動作性能の評価を行った結果について報告する。

■高次項補正鏡の開発

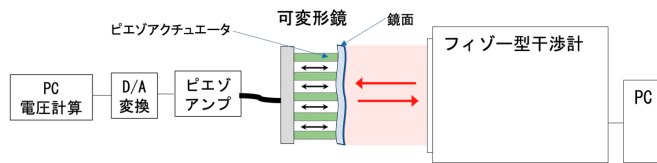
波面収差の数学的解析によく用いられるのがゼルニケ(Zernike)多項式である。図1に、ゼルニケ多項式の最初の15項を2次元表示した図を示す。色の変化は、単位円内の座標から計算される値(規格化された縦(z軸)方向の変位)を示している。多項式はそれぞれ、ゼルニ

ケ多項式の1次成分(チップ・チルト Z_1^{-1}, Z_1^1)、2次成分(デフォーカス (Z_2^0)、アスティグマティズム(非点収差、 Z_2^{-2}, Z_2^2)、3次以上の高次成分(コマ収差(Z_3^{-1}, Z_3^1)など)と呼ばれる基本的な波面収差の形状を表している。任意の波面はこれらの線型結合で表されることから、可変形鏡によりそれぞれの波面を再現できれば波面乱れの補正が可能になる。

開発した高次項補正鏡の外観を表紙図に示す。複雑な高次項成分の補正を行うため合計61本のピエゾアクチュエータ(以下PAと記述)を用い、正三角形格子状に配置した。鏡面基板(105 mm径)には高出力CWレー



【図1】ゼルニケ多項式の最初の15項(2次元表示)



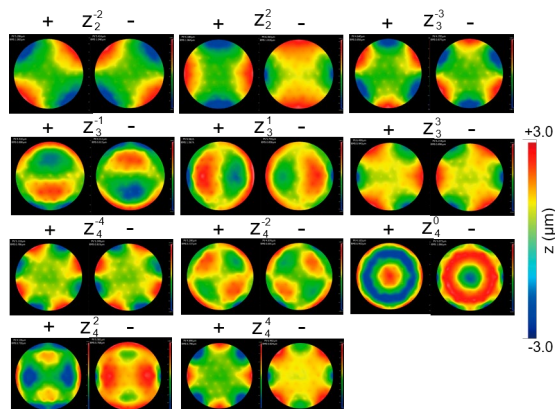
【図2】可変形鏡動作試験配置図

ザー（～10 kW）への適用のため高反射コート（反射率＞99.8 %）を施した。また、鏡面を透過したレーザー光（入射光の約0.2 %以下）が可変形鏡内部に侵入することによる発熱を防ぐため、鏡面とPAの間に金メッキを施した凸面状の保護板を挿入した。

■可変形鏡による波面制御試験

高次項補正鏡の性能を評価するため動作試験を行った。実験配置図を図2に示す。可変形鏡の制御には以下の手法を用いた。まずゼルニケ多項式を用いて波面の各PA位置(x,y)でのz軸方向の変位を計算する。次に各PAの影響関数(Laser Cross No.393,2020 Dec.を参照)を考慮して変位をPAへの印加電圧データに変換したのち、それぞれのPAへ同時に入力し動作させる。試験ではチップ・チルト、デフォーカスを除く15項までのそれぞれの表面形状をフィゾー型干渉計により観測した。波面のZ変位はそれぞれ±2.5 μmとなるよう印加電圧を設定した。観測結果を図3に示す。図中の+、-はZ変位をそれぞれ正方向、負方向に設定した場合の観測結果である。それぞれの波面がよく再現されていることがわかる。

作成した波面の精度について検証するため、4次15項までのゼルニケ多項式を用いて波面解析を行った。この解析により、観測した表面形状にそれぞれの成分がどれほどの大きさで含まれているかがわかる。例として、アスティグマティズム成分(Z_2^2)を作成した際の



【図3】高次項補正鏡によりゼルニケ高次項(4次15項まで)波面を作成した際の表面形状(2次元表示)

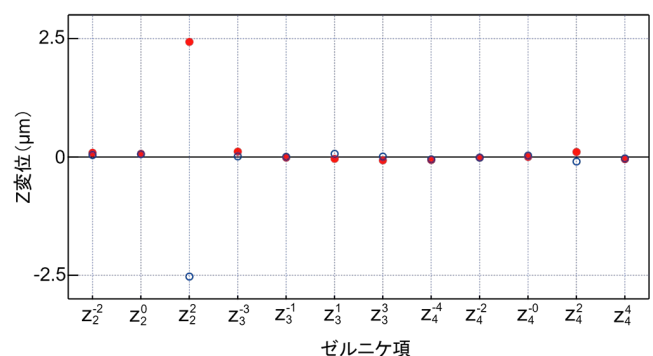
解析結果を図4に示す。横軸はゼルニケ多項式の各項（波面成分）を示しており（図1を参照）、縦軸はそれぞれの項のZ変位(μm)を示している。アスティグマティズム成分(Z_2^2)が顕著に表れ、Z変位は正方向、負方向とも設定値(±2.5 μm)と同値となっている。一方、他の波面成分のZ変位はいずれも0.1 μm以下で、他の波面成分は殆ど含まれていない。これは可変形鏡によりアスティグマティズム成分の波面のみが正確に再現されていることを示している。他の波面成分(図3を参照)についても同様の解析を行った結果、球面収差(Z_4^0)、2次のコマ成分(Z_4^{-2}, Z_4^2)など内部形状が複雑な波面については設定値よりもZ変位はやや小さいものの、いずれも設定値の82 %以上の値を示すことがわかった。

■まとめと今後

高出力レーザー伝送時の大気ゆらぎによる高次の波面乱れを補正する口径100 mmの大型可変形鏡(高次項補正鏡)を開発した。干渉計を用いた観測により動作性能の評価を行い、ゼルニケ多項式の4次15項までの波面を高精度で再現できることを明らかにした。ここでは省略するが、最大10 kHzでの高速動作も可能であることを確認している。この技術は長距離光通信などの産業分野や、レーザーによる宇宙デブリ除去といった宇宙利用など、将来的に発展が期待される応用にも必要な技術である。今後もこの技術の確立を目指して研究を進めていく。

謝辞

本研究は、防衛装備庁安全保障技術研究推進制度JPJ004596(研究課題「高速移動物体への遠距離・高強度光伝送のための予測的波面制御の研究」)の支援により実施された。ご協力頂いた国立研究開発法人理化学研究所、三菱重工業(株)の関係者各位に謝意を表します。



【図4】高次項補正鏡により作成したアスティグマティズム成分(図3中 Z_2^2)の波面解析結果(設定値±2.5 μm)

SPIE Sensors+Imaging 2023

国際会議・第41回レーザセンシングシンポジウム報告

レーザ計測研究チーム 染川智弘

◆SPIE Sensors+Imaging 2023が アムステルダムで開催

国際会議(SPIE Sensors+Imaging 2023)がオランダ、アムステルダムで9月3日から4日間にわたり開催された。会場はRAI国際会議場で2014年に同会議に参加した際と同じであったが、2018年にアムステルダム中央駅から南北につながるメトロが開通しており、交通が便利になっていた。

SPIE Sensors+Imaging は、筆者が参加したRemote SensingとSecurity + Defenceの2つの国際会議の共同開催であり、両方の会議に参加が可能である。16個のRemote Sensing、Security + Defenceに関するセッションがあった。発表会場は会議ごとに分けられておらず、隣の部屋でSecurity + Defenceの発表も行われているため、リモートセンシング技術について幅広い分野の聴講が容易であった。プレナリー・セッションはSecurity + Defenceと共通で行われ、Hanowski博士から欧州宇宙機関(ESA)における衛生レーダー観測研究の現状・今後の計画などが報告された。

◆リモートセンシングに関連した 幅広い分野の研究者が集まる

筆者は主にRemote SensingのRemote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2023に参加した。このセッションでは、衛星データや音響を利用した水質の評価に加え、光を利用したセンシングの研究報告もあった。中国のAerospace information Research InstituteのHuijing Zhang博士から「Preliminary exploration of underwater applications of hyperspectral lidar」というタイトルで、Supercontinuum(SC)光源を利用した複数波長でのライダーによる海底地形の把握に向けた研究に関する報告があった。450~610 nmのSC光源を干渉フィルターで波長域を制限して海中に照射し、複数の波長での反射特性の違いからさまざまな物質が混在する海底地形を観測する、といった内容であったが、単位波長当たりの出力が小さいSC光源を利用するメリットは見られなかった。また、千葉大の椎名達雄准教授から

「CO₂ Raman lidar design for marine drone」というタイトルで、海中のCO₂濃度評価に向けた取り組みの紹介があった。水中ドローンにレーザーなどの機器を搭載するのではなく、大きなレーザーやラマンライダー信号観測部は船に設置し、光ファイバーで水中ドローンに搭載した送受信光学系とつなぐ構想であった。

今回のSPIE Sensors+Imagingは、2024年9月16~19日にスコットランド、エジンバラでの開催が予定されている。

◆第41回レーザセンシングシンポジウム(LSS) がつくば市で開催

LSSはレーザセンシング学会が主催で、広くセンシング技術を対象とした講演会ではあるが、大気環境計測などのリモートセンシングの講演が多いシンポジウムである。今年は気象研が実行委員長となり、つくばにて9月6~8日の3日間の開催となった。毎年、参加しているシンポジウムであったが、上記の国際会議と日程が重複してしまったため、アムステルダムから成田に飛び、そこから高速バスでつくばに向かうという強行日程で最終日の8日のみ参加した。8日の朝に着くフライトが遅延したため、自分の発表開始の5分前に到着という心臓に悪い参加になったが、日本のレーザーリモートセンシングの研究者との多くの議論が持つことができた。

今回のLSSは、筆者が実行委員長となり9月上旬に大阪で開催予定である。開催案内は順次、レーザセンシング学会のHPにて公開していく予定である。是非参加をご検討いただきたい。



【写真】筆者の講演時の様子

レーザー総研オープンセミナー

「レーザー加工からインフラ診断まで」
～ILT2023 令和4年度研究成果報告会～ を開催

■ILTオープンセミナーを大阪で開催

2023年11月7日、パシフィコ横浜(横浜市西区)にて『レーザー総研オープンセミナー「レーザー加工からインフラ診断まで」～ILT2023令和4年度研究成果報告会～』を開催いたしました。昨年と同様、「光とレーザーの科学技術フェア2023」(主催：株式会社オプトロニクス社)の併催イベントとして開催となりました。セミナーでは、ロボットアームの先端に搭載した3Dプリンタヘッドとレーザーを用いて月面模擬砂を3次元造形し建材へと適用する技術、高出力レーザーの大気中長距離伝送を可能にする高速動作可変形鏡の開発、開発した可変形鏡の動作性能を定量評価するための技術の開発、水中に漏れいした油を遠隔から二次元イメージとしてモニターできるフラッシュラマンライダーの開発、山岳トンネル工事現場において浮石を検知する技術の開発、光学素子のレーザー損傷評価試験の自動化に向けたプラズマ発光計測による評価技術の開発など、レーザー応用に関するさまざまな技術の基礎と現状について解説し、当研究所の最新の研究成果を報告いたしました。またセミナーの最後には研究員がポスター発表を行い、活発な意見交換をいたしました。

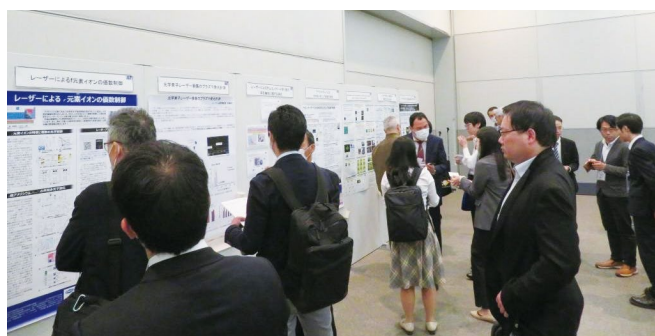


【写真1】質疑応答を行うコスロビアン副主任研究員

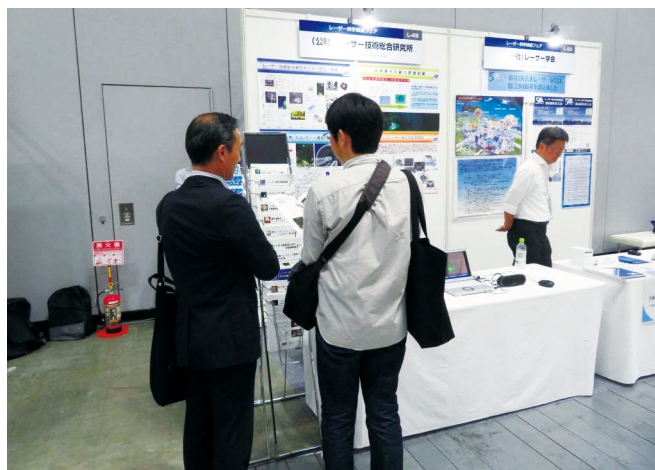
■「光とレーザーの科学技術フェア2023」に出展

11月7～9日にパシフィコ横浜にて光・レーザー、画像計測関連機器が一堂に介する技術展示会「光とレーザーの科学技術フェア2023」が開催されました。弊所は、併催イベントとしてオープンセミナーの開催、ならびに技術紹介の展示を行いました。展示ブースでは技術紹介ビデオの上映のほか、パネル展示や本誌のバックナンバーの配布、技術相談を行いました。当日は多くの方にご来訪いただき、貴重なご意見をいただきました。

今回の同展示会は、光産業技術振興協会とオプトロニクス社の共同主催で「InterOpto 2024-光とレーザーの科学技術フェア-」と新たに名を変え、パシフィコ横浜において2024年10月29～31日の期間で開催予定です。



【写真2】ポスター発表の様子



【写真3】展示会場のレーザー総研ブース