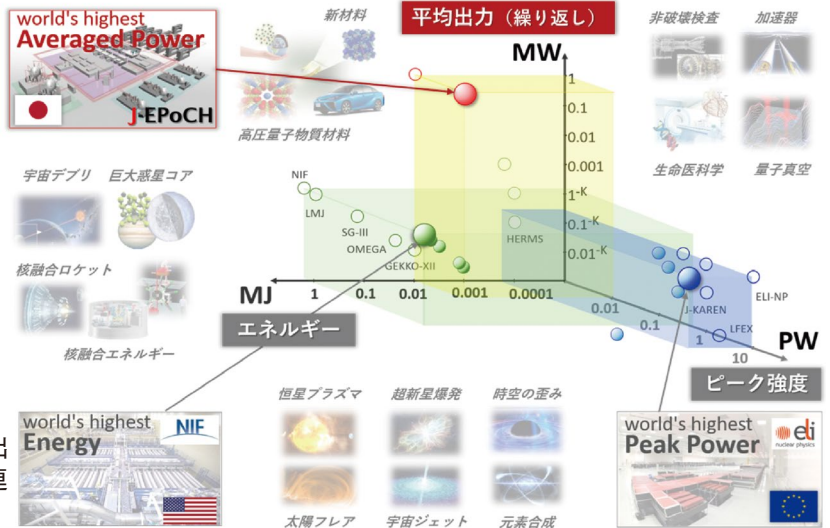


CONTENTS

- 大型パワーレーザーとその応用に関する日本学術会議の提言について
- 可変形鏡を用いた補償光学システムの開発



【表紙図】ハイパワーレーザーの3つの特性(平均出力、ピーク出力、パルスエネルギー)と多様な関連科学技術分野(参考1. 日本学術会議提言より)

大型パワーレーザーとその応用に関する日本学術会議の提言について

大阪大学名誉教授 三間 罔興

■はじめに

これまで、高出力レーザー技術、レーザー核融合、レーザー粒子加速、高エネルギー密度の物質科学、地球惑星科学と宇宙デブリ除去への応用、真空破壊などの超高強度場の物理、並びにレーザー加工などのパワーレーザーの産業利用分野の研究開発において、大阪大学、量子科学技術研究開発機構、レーザー技術総合研究所や理化学研究所などの我が国の取り組みが世界をリードしてきた。特に、パワーレーザーの産業、医療への利用・普及は、レーザー技術総合研究所が1987年の発足以来目指しているところである。

一方、大型パワーレーザー施設の整備が海外で急速に進み、この分野の学術と産業利用が急速に進展している。現在、世界のパワーレーザーは新しい質的変革の時代を迎えつつある。表紙図で示すように、米国のNIF、フランスのLMJに続き、ロシア、中国が開発しつつあるナノ秒メガジュールレーザー、大阪大学のLFEXやフランスのPETAL(Peta Watt Laser)などの高出力のピコ秒ペタワットレーザー、さらに欧州 ELI

や韓国、中国、ロシアなどが開発しているフェムト秒10 PWから200 PWを目指す超高強度のパワーレーザーなど、様々なパルス幅、出力エネルギー、ピークパワーの高出力レーザーがあり、各々の施設において、レーザー核融合、実験室宇宙物理、超高圧物性、レーザープラズマ粒子加速、真空の非線形物理から物質生成に至る光による高エネルギー物理学まで、他の方法では実現できない実にさまざまな研究が展開している。

2018年には、ノーベル物理学賞に輝いたG. Mourou, D. StricklandらによるCPA(Chirped Pulse Amplification)による極短パルス超高強度レーザー技術とその利用によって、LFEX(Laser for Fusion Experiment: 大阪大学)、ELI-BL(Extreme Light Infrastructure-Beam Line: チェコプラハ)、ELI-NP(Nuclear Physics: ルーマニアブダペスト)や中国 SULF(Super-intense Ultrafast Laser Facility: 上海)の10 PWレーザー、さらに韓国 CoReLS(Center for Relativistic Laser Science: 光州)の4 PW+1 PWレーザーなどでは、新しい科学への入口を開くとされ



大型パワーレーザーとその応用に関する日本学術会議の提言について

るレーザー強度である 10^{23} W/cm²に手が届きそうなところに来ている。世界各国は、そのレーザー強度を100 PWレーザーにすることを目指して新しい装置建設段階に入っている。

このような状況を踏まえ、日本学術会議第3部総合工学委員会「エネルギーと科学技術に関する分科会」は、今後我が国の産学官が連携して取り組むべき重要研究課題として「高出力パワーレーザーとその応用分野の研究開発」を取り上げ、提言した。以下、提言(参考1)の作成の経緯と概要を紹介する。

■提言の経緯

2015年9月に日本学術会議主催国際シンポジウム「大型レーザーによる高エネルギー密度科学の新展開」を開催し、2016年8月に、総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会が、報告「大型レーザーによる高エネルギー密度科学の新展開」を公表した。2019年1月には、米国ワシントンD.C.において、日本学術会議主催国際シンポジウム「ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学技術の展望」を開催した。その際、日米両政府により「高エネルギー密度科学に関する日米協力事業取り決め」が調印され、日米の新たな研究協力事業が立ち上がることになった。また、2019年3月、大阪大学ならびに量子科学技術研究開発機構は、大型パワーレーザーとその学術・産業利用を目指した「学術の大型研究計画」を日本学術会議ならびに文部科学省に提案している。この計画では、パワーレーザーと高エネルギー密度科学の研究者コミュニティが連携して、「高出力の次期大型パワーレーザー施設による高エネルギー密度科学の推進と新産業創成」を目指している。

このような状況を踏まえ、エネルギーと科学技術に関する分科会は「ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学小委員会」(委員長:東京大学名誉教授 近藤駿介)を設置し、我が国におけるハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学の在り方を評価・検討した。なお、本小委員会の開催にあたりレーザー技術総合研究所所掌のIFEフォーラムの支援を受けた。

上記小委員会は、「我が国のパワーレーザー研究は、これまで大学附置研究所が大きな牽引力となり、独立行政法人の研究機関や大学共同利用・共同研究拠点など、さまざまな研究拠点で推進されてきた。しかし、こうした分散した研究拠点で開発研究を進める現状のままでは、研究開発において諸外国をリードし、若者を引きつけ夢のある幅広い人材育成の場を提供するこ

とが困難である。」と結論し、以下の目指すべき今後の取り組みを整理し提言の骨子をまとめた。

目指すべき今後の取り組みでは、「我が国が築いてきた高エネルギー密度科学とパワーレーザー技術に関する多くのコア・コンピタンスを生かしてこの科学技術の飛躍的發展を追求することは、国際競争力のある産業創成のために極めて重要」としている。

■提言の背景と趣旨

近年、パルスエネルギーやピーク強度を高める研究開発により、表紙図で示すようにパワーレーザーによる高エネルギー密度科学とその産業利用の可能性は著しく多様化している。また、パワーレーザーの繰り返し化技術の進歩により生まれるビッグデータとIoT・AIを結びつけることで可能となるパワーレーザーとその照射システムのスマート化は、多様なステークホルダーの間で効率的・効果的な共創を生み出している。産業界はスマートレーザー加工の技術基盤として、高エネルギー密度科学における知の重要性に注目している。

以上のことから、パワーレーザーと高エネルギー密度科学分野において、これまで培われてきた我が国の科学技術を結集し、産学官界に活動の輪を広げ、持続的な研究開発と人材育成を可能にすることが重要であると認識し、関係する研究者コミュニティの提案「高出力の次期大型パワーレーザー施設による高エネルギー密度科学の推進」を評価して提言を作成することになった。

■提言

以下の提言「パワーレーザー技術と高エネルギー密度科学の量子飛躍と産業創成」が、上記の背景と経緯ならびに課題の認識に基づき、2020年6月に公表された。

「我が国において、大学と国立研究機関は、高エネルギー密度科学とパワーレーザー技術に関する研究開発を産業界とも連携協力して推進し、多くの人材を育成し、先導的技術を生み出し、この分野におけるコア・コンピタンスを築いてきた。こうした人材育成と先導的技術開発への挑戦の取り組みを産業界の協力も得て一層強化してこの科学技術の更なる飛躍的發展を追求することは、我が国における次の時代を担う国際競争力のある産業創成に極めて有効であり、鮮烈な国際競争の動向に鑑みれば急務である。

よって、これまで高エネルギー密度科学とパワーレーザー技術に関する研究開発を先導してきた大学と国立研究機関は、産業界と連携して知と技術を集約し、組織改編で世界最高レベルの繰り返し・高出力の大型

パワーレーザー施設を高エネルギー密度科学推進の中核拠点として世界に先駆けて設置し、機械学習技術も活用して大型パワーレーザー技術と高エネルギー密度科学の量子的飛躍を実現し、新たな学術の開拓や産業創成に繋がる価値創造・人材育成を行う切磋琢磨・共創の道場とするべきである。」(参考1より)

■最後に

上記提言の実現に向けて、関係大学・研究機関、関

連産業界の意見を取りまとめるアクションプランの検討が進んでいる。今後の進展に注目したい。

参考 1.

提言 URL : <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/-kohyo-24-t291-2.pdf>

パワーレーザー技術と高エネルギー密度科学の量子的飛躍と産業創成

可変形鏡を用いた補償光学システムの開発

レーザープロセス研究チーム ハイク コスロービアン、稲田順史

レーザー計測研究チーム 谷口誠治

■はじめに

光波が大気などの不均一な媒質を伝搬するとき、伝搬経路に沿った屈折率の違いが波面の歪みを引き起こす。このような波面収差を補正するためによく用いられる技術が補償光学である。補償光学には多くの場合、波面歪みを補正するため可変形鏡などのアクティブな光学素子が用いられる。補償光学は天文学にルーツを持つが^[1]、現在では眼底検査やレーザーのビーム整形など、さまざまな産業に利用されている^[2]。当研究所では、大気中における高出力レーザー遠距離伝送システムを開発するため、要素技術の一つである高速・高光耐性可変形鏡の開発を進めている。ピエゾアクチュエーター(PA)を駆動素子に用いた可変形鏡についてはすでに報告したが、これと並行して可変形鏡の制御法についても検討を進めている。本稿では、61個のPAを用いた可変形鏡の制御について、影響関数およびPA間のクロストークを導入した制御モデルにより検討した結果を述べる。

■影響関数とPA間のクロストーク

可変形鏡を用いた補償光学系は通常、光の波面歪みを計測する波面センサーと可変形鏡、波面センサーか

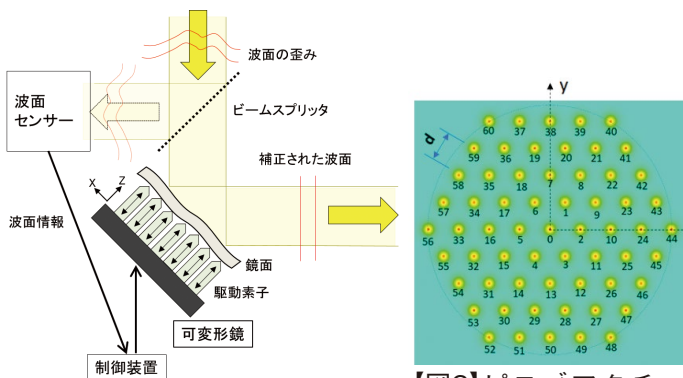
らの情報に基づき可変形鏡を制御する信号を作り出す制御装置によって構成される(図1)。可変形鏡の基本構造は、薄い鏡の裏面に鏡平面の法線方向(z方向)に伸縮する複数のPAを接着したものであり、センサーにより観測した波面歪みに対し、逆向きの歪み(逆位相)を鏡面に与えることで波面補正を行う。この時の鏡の表面形状は、基本的に個々のPAの変位によって形成される形状の組み合わせとなるため、可変形鏡の制御にはPAを単一で駆動した際の鏡全体の表面形状におよぼす影響を実験的、あるいは理論的に取得しておくことが重要となる。この時の鏡全体の形状を表す関数は影響関数^[3](Influence Function, IF)と呼ばれる。

図2に、可変形鏡(10cmφ)における61個のPAの配置モデルを示す。PAはx-y平面上に六角形配置されており、中央かららせん状に番号(PA_i, i=0~60)を付してある。各PAのx-y座標はPAの間隔(d=1 cm)を用いて決定される。IFは、対象となるPAのみに電圧を印可してz方向に最大変位させ、この時の鏡面の全体形状を干渉計などにより観測して取得する。PAが61個である場合、61のIFを決定する必要がある。可変形鏡のあるx-y座標上のz方向の変位をZ_i(x, y)で表すと、この時の影響関数IF_i(x, y)は下式で表される。

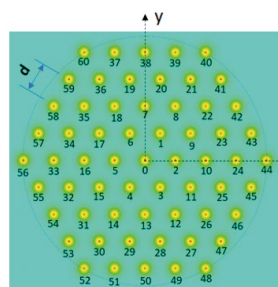
$$Z_i(x, y) = V_i C_i IF_i(x, y)$$

ここで、C_i [μm/V]はPA_iの応答定数、V_i [V]はPA_iへの印加電圧、IF_i(x, y)はPA_iの規格化影響関数である。波面センサーにより得られる変位Z_i(x, y)と、あらかじめ取得してあるC_iおよびIF_i(x, y)を用いると、波面補正に必要なPAへの印加電圧V_iを算出できる。

しかしながら実際の可変形鏡は1枚の鏡面に複数のPAを接着しているため、あるPAを単一で駆動した際、周囲のPAが“電圧を印加しなくとも”z方向に変位を示す場合が多い。この効果をクロストークと呼び、可変



【図1】補償光学系の例



【図2】ピエゾアクチュエーター(61個)の配置

形鏡の制御にはこの寄与を考慮した手法を用いる必要がある。クロストークが発生する場合、例えばクロストークが可変形鏡中央のPA₀(図2)と隣接した6個のPA(PA₁~PA₆)との間でそれぞれ発生するとした場合、PA₀の変位はそれぞれのPAの影響関数を用いた線形方程式となる(下式)。

$$Z_0(x_0, y_0) = C_0V_0 + C_1V_1IF_1(x_0, y_0) + C_2V_2IF_2(x_0, y_0) + C_3V_3IF_3(x_0, y_0) + C_4V_4IF_4(x_0, y_0) + C_5V_5IF_5(x_0, y_0) + C_6V_6IF_6(x_0, y_0)$$

他のPA(PA₁~PA₆₀)についても同様に数式化が可能である。全てのPAの線形方程式系をまとめ行列形式で記述すると下式となる。

$$\mathbf{Z} = \mathbf{M} \times \mathbf{V}$$

ここで \mathbf{Z} は変位ベクトル、 \mathbf{V} は電圧ベクトルであり、PAがN個ある場合は(N×1)型行列となる。 \mathbf{M} は(N×N)型の係数行列で、各要素はPAの配置や応答定数および影響関数を用いて決定される。波面補正に必要な各PAへの印加電圧は、 \mathbf{M} の逆行列 \mathbf{M}^{-1} を用いて下式

$$\mathbf{V} = \mathbf{M}^{-1} \times \mathbf{Z}$$

により計算できる。

■波面補正シミュレーション

IFおよびクロストークを取り入れた制御モデルを用い、61ピエゾ可変形鏡の波面補正シミュレーションを行った。まず制御信号の計算に必要な係数行列(\mathbf{M})を決定するため、IFを下式の円対称ガウス分布で近似した。

$$IF_i(x, y) = \exp \left[\ln(\varepsilon) * \left(\frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}{d} \right)^\sigma \right]$$

ここで (x_i, y_i) はi番目のPAの位置座標、 ε は隣接するPA間の影響(カップリング)比で、 $0 < \varepsilon < 1$ 内で設定する。 d はPA間距離、 $\sigma (> 0)$ はガウス指数で、鏡面の形状、厚み、硬度やPA間距離などにより変化する。図3に、 $x=0$ の位置に配置されているPAのみを駆動した際のIFの計算例を示す。使用したパラメータは図中に示した。クロストークに影響する因子は主に ε で、 ε が小さい場合にはクロストークはほぼ発生しない(図

中赤線)が、 ε が大きくなると鏡面は隣接したPA($x = \pm 1$ cm)の位置にz方向の変位を持ち、クロストークが発生する(図中青線)。PAの応答定数は、変位・電圧の関係性を線形近似して決定した。また本来波面センサーの観測値の逆位相から得られる補正波面情報は、ここでは擬似的にゼルニケ多項式の0~14項の係数をランダムに設定して算出した。算出した波面を可変形鏡で再現できるかどうかを検証することにより、この制御モデルの有用性が評価できる。図4に、算出した波面(図4A)と、クロストークが10%発生する($\varepsilon = 0.1$)として計算した可変形鏡の表面形状(図4B)を比較したものを示す。可変形鏡の表面形状は波面の歪みをよく再現していることがわかる。この結果から、クロストークの効果を取り入れたモデルが可変形鏡の制御に有効であることが示された。

■まとめと今後

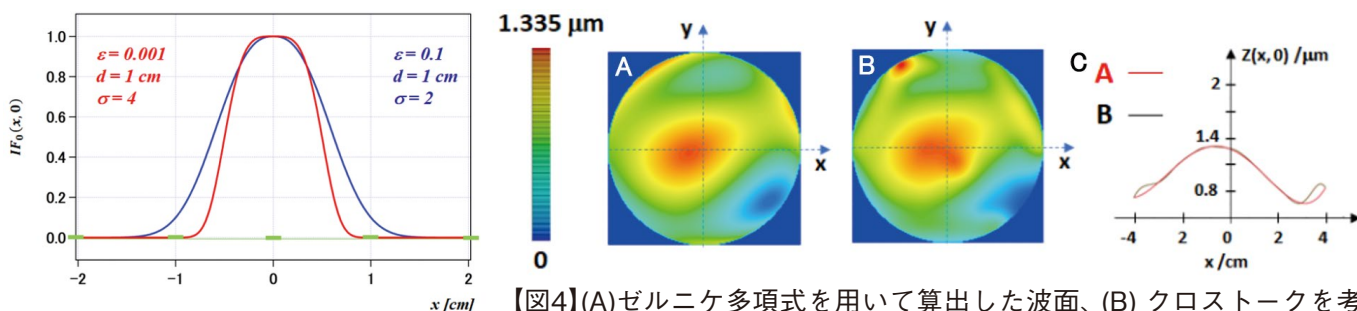
本研究では、ピエゾアクチュエーターを駆動素子に用いた可変形鏡の制御手法として、影響関数およびクロストークを導入した制御モデルを構築し波面補正シミュレーションを行った。その結果、この制御モデルが可変形鏡の正確な制御に有効であることがわかった。今後はこの制御モデルを実際の可変形鏡へと適用し、その有用性を実験的に明らかにしていく。

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」)の支援の下行われた。

参考文献

- [1] P. W. Milonni, Am. Journal of Physics, **67** (6), 476 – 485, 1999.
- [2] A. Greenaway et al., IoP Publishing Ltd., Bristol, 2004.
- [3] M. B. Roopashree et al., ACEEE Int. J. on Control System and Instrumentation, **03** (02), 10 – 14, 2012.



【図3】影響関数の計算例(x-zプロファイル) 慮して計算した可変形鏡の表面形状、(C) AとBの比較(x-zプロファイル)

【図4】(A)ゼルニケ多項式を用いて算出した波面、(B) クロストークを考慮して計算した可変形鏡の表面形状、(C) AとBの比較(x-zプロファイル)