

論文の内容の要旨

論文題目 ファブリ・ペロー光共振器型位相共役鏡と無線光エネルギー伝送

氏名 川上 言美

位相共役光はある入射光の波面形状はそのまま進行方向のみ逆になった特殊な光である。位相共役光発生装置（これを鏡に見立てて位相共役鏡とよぶ）に入射した光は通常の鏡と異なり入射角によらず光が来た方向へ反射され、入射光の光路を正確に逆進して光源に戻る（図1）。また通常光路上に空気揺らぎなどの位相物体があると透過光の波面を歪ませるが位相共役光を用いると空気揺らぎの影響をキャンセルすることができる。

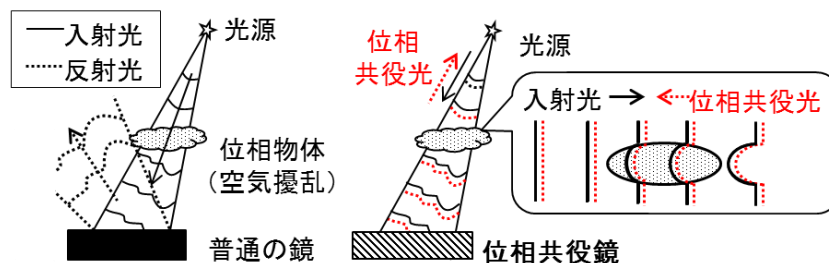


図1. 普通の鏡(左)と位相共役鏡(右)での反射光の比較. 位相共役光は自動的に波面補正をして光源の位置に集光する

位相共役光は媒質の非線形応答によって発生するが、非線形光学効果の種類により応答速度や閾値はじめ様々な特徴が変わってくる。速い応答速度と広い視野角をもち、長距離伝搬による回折損失を抑えるために大きな開口をもつ媒質の使用が可能であれば遠隔移動物体への光伝送が可能になる。これは位相共役光の自動追跡・集光作用を活かして機械的・電氣的制御が不要で3次元的な追尾を可能にするものであり、既存の装置では追跡不可能な高速移動体に対応できるようになると期待できる。上記の要求は利得媒質の利得飽和現象を用いて位相共役光発生させることで満たされる。

本研究ではファブリ・ペロー型レーザー共振器を利用し、レーザー媒質中で飽和利得

四光波混合を行い位相共役光を発生させる．発振中のレーザー共振器中の媒質を利用することで，光源と位相共役鏡が一体となったシンプルな系が達成される．レーザー共振器型位相共役鏡による遠隔移動体への光集光のながれを図2に示す．まずレーザー出力光を拡大光学系により広げて広い空間を照射するプローブ光として用いる．標的がプローブ光に照射されると反射光の一部が媒質に物体光として再入射する．物体光は共振器中を行き来する参照光と干渉して利得回折格子を生成し，参照光と対向して進む読み出し光を回折させて位相共役光を発生させる．ファブリ・ペロー共振器型位相共役鏡の利点は，レーザー媒質に位相共役鏡としての役割を兼ねさせることで，プローブ光，物体光，参照光，そして読み出し光すべての光を自身で用意することが出来，外部光源 unnecessary シンプルな系が実現されることである．さらに，読み出し光と参照光は対向するため自動的に位相整合条件が満たされる．また，物体光の光路が変化しても対応できるため，移動物体の追尾が可能である．本研究ではファブリ・ペロー光共振器型に組み立てた位相共役鏡の特性を調べ，詳しい追尾性能を調べることを目的とする．

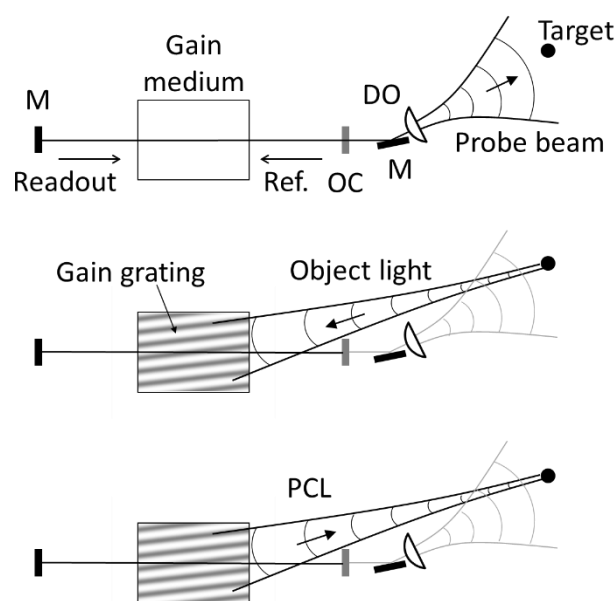


図2. レーザー共振器型位相共役鏡による遠隔移動体への光集光のながれ．まずレーザー出力光で標的を照らし(上段)，反射光の一部が物体光として媒質に再入射する(中段)．共振器中の参照光と読み出し光により四光波混合が行われ，位相共役光(PCL)が発生して標的の位置で集光する(下段)．M, 鏡；OC, レーザー出力鏡；DO, 拡大光学系；Readout, 読み出し光；Ref., 参照光．

実験配置図を図3に示す．レーザー発振波長は1064 nmで，シングルショットのパルス発振である．まず位相共役光発生実験を行い，図4に示すように物体光と同じ形状の位相共役光が観測され，元の波面が再現されることが確かめられた．また，出力測定，

感度測定を行い、ランダム位相板と空気揺らぎを用いて波面歪みの補正実験を行った。位相共役光出力は最高で320 mJを達成し、感度測定の結果から数ミリジュールの物体光強度が必要であることが分かった。位相物体を用いた波面補正実験では、位相共役鏡での反射と通常の鏡での反射光の様子を比較し、位相共役光にすることで位相物体による波面歪み効果が打ち消され、位相物体がないときと同様の波面が再現されることが確認された。続いてライターの炎によって温められた空気の揺らぎを利用して空気擾乱を模擬して波面補正実験を行った。通常の鏡での反射光は空気揺らぎに伴って形状、ビーム位置ともに変化するのに対し、位相共役鏡での反射光は空気揺らぎの影響を補正し、揺らぎがないときに比べて変化がなかった。空気揺らぎによるビーム中心位置のずれは位相共役光を使うことで1/10に抑えられ、指向精度が向上したことが確認された。

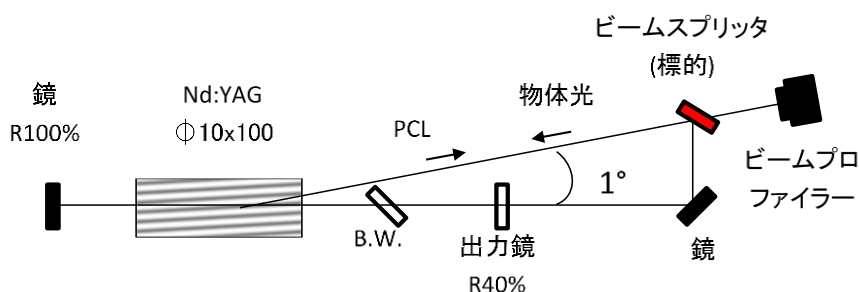


図3. 実験配置図. B.W., ブリュースター窓

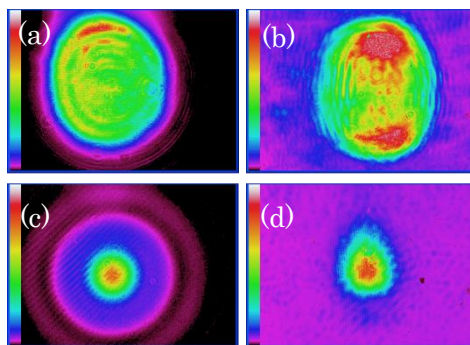


図4. 物体光と位相共役光のビームプロファイル比較. (a) トップハットビーム, 物体光, (b) トップハットビーム, 位相共役光, (c) ガウシアンビーム, 物体光, (d) ガウシアンビーム, 位相共役光.

続いて遠隔移動体への無線光伝送のための追尾性能評価を行った。まずプローブ光照射範囲に複数標的が存在する場合を想定し、位相共役光の多点同時集光が可能であるか

調べた。実験では2本の物体光を用意して四光波混合を行い、同時に位相共役光が2つ観測されることを確かめた。また追尾システムとしては視野角が大きいことが望まれるが、視野角は媒質の大きさに制約を受ける。そこで縮小光学系をもちいて広い範囲からの入射光を小さい入射角に変換して媒質に導くことを考え、物体光光路上に焦点距離の異なる2枚のレンズを挿入した。標的の位置を物体光の光軸と垂直な方向に少しずつずらして位相共役光を観測した結果、位相共役光は20度以上の範囲にわたって観測された。また、ビーム中心の位置を測定して標的位置とのずれを調べたところ、標準偏差で0.25 mradのすれ幅があることが分かった。これは標的サイズの8 mradに比べて十分小さいため、広い視野角にわたり高い追尾精度があることが変わった。続いて球面鏡を用いて点光源を模擬し、奥行き方向の追尾性能を調べた。位相共役光の集光位置が点光源の位置と一致し、集光スポット径は回折限界の約1.4倍と高い再現性があることが分かった。

最後に、標的が連続的に移動する場合について干渉縞消去の影響を調べた。標的が位相共役鏡から遠ざかる（あるいは近づく）場合、ドップラーシフトにより物体光と参照光の周波数に離調が発生し、干渉縞は一定のスピードで明暗の位置が移動していく。この時干渉縞が走行することで利得変調が平坦化され、回折格子が消去される懸念がある。実験では標的スピードを徐々に増しながら、パルス幅18 nsと400 μ sのパルスを用いて位相共役光出力の振る舞いを測定した。400 μ sの長いパルスを使用した場合、標的スピードが増すごとに位相共役光出力が減少していくことが分かったが、短い18 nsのパルスを使用すると測定範囲にわたって出力がほぼ一定に保たれることが分かった。この結果から、高速移動体への光伝送を行う場合は、短パルスを使用することが有効であることが分かった。またあらかじめ波長をチューニングすることでドップラーシフトによる離調を防ぐことも考えられる。本研究は既存技術では対応できない高速移動体の追跡を可能にすると考えられ、将来的にはレーザーアブレーションを利用した微小宇宙デブリ除去などへの応用が考えられる。