位相共役・アダプティブ光学が開く高品質光ビームの世界*

松本弘一**

New Field of High-quality Optical Beams Opened by Phase Conjugation and Adaptive Optics / Hirokazu MATSUMOTO

Key words: phase conjugation, adaptive optics, real-time correction, high-quality beam, optical technology, optical metrology, laser cutting technique

1. はじめに

科学・技術の進展は著しく製品の高精度化・高機能化が求められ、これに伴ってレーザ技術への期待も一段と大きくなっている。従来、レーザ光といえば、コヒーレントで波面のそろったビームと考えられてきた。しかしながら、このレーザ光もよく観察すると、完全な平面波でコヒーレントなビームとして取り扱うことができなくなってきた。これは、近年微細加工の超精密化・高度化、高品位画像伝送、高精度光計測などの要求が高まってきたことによる。

こうした高品質なビームの生成、利用技術においては、非線形光学による位相共役波や機械的なアダプティブ光学の利用が有効であると考えられ、当学会の分科会として、「高品質ビーム技術研究」について1992、1993年度において調査研究を行ってきた。ここでは、これらの調査研究を踏まえて、位相共役技術¹⁾や補償光学²⁾の最近の進展とその産業への応用の可能性について解説する。

2. 高品質ビームの発生法

光波の利用においては光の波面ひずみの問題が深刻であり、これを回復させることが有効であるが、純光学的な位相共役技術と機械的なアダプティブ光学とが考案されている。

2.1 位相共役波

位相共役波を発生させるには、非線形媒質にポンプ光として2つのビームをそれぞれ反対方向から、そしてプローブ光を入射させると、媒質内で干渉じまが形成され、屈折率分布が生じる。この分布による格子によって、位相共役波が形成される（縮退4光波混合）。BaTiO₃などの結晶の適当な位置においてレーザ光が入射すると、散乱光を種とする光が結晶の内側の面で全反射され、結晶内にリング状の光ループが生じて干渉じまが形成される。この結果、ポンプ光が無い場合でも、位相共役波が発生する（自己ポンプ型）。この波は、図1に示すように、発散光が入射すると、収れん光が反射されるので、丁度時間が反転したと等価な波が発生され、ビデオ画像を反対に再生した時と同様の現象が観測される。

図1 光の反射
(a) 普通の鏡, (b) 位相共役鏡

* 原稿受付 平成6年5月11日
** 正会員 計量研究所(つくば市梅園1-1-4)
1976年東京大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。専門は光計測で、光波干渉・光変調法による長さ測定、大気ゆらぎの計測評価、加工表面の光計測および非線形光学応用計測などの研究に従事。主な著書は、「レーザー応用計測の基礎」など。

表1 波面補償要素技術とその応用

位相共役波技術	材 料	可視・赤外用フォトリフラクティブ材料 大出力用非線形光学材料
	発生法	4光波混合，自己ポンプ型，2光波結合，動格子法，誘導ブリュアン散乱，人工的
	応 用	光計測（光学素子の補償・検査，画像処理，機械量），光センシング（大気，海洋，湖など），分析，動体の抽出，生体計測，レーザ顕微鏡，医療，通信・画像伝送，光演算，連想記憶，工業計測（微小振動・材料計測），光ジャイロ，レーザ共振器（モード選択，波面制御），2光波結合（位相同調，レーザの高出力化），生産・建設現場の自動化，核融合，レーザ加工
アダプティブ光学	波面検出	ハルトマン方式，シャリング干渉方式，マルチディザー方式
	補償素子	補償光学用材料，セグメント鏡，一体鏡素子，空間変調器
	応 用	ウラン濃縮，核融合，天文学，レーザ共振器，レーザ加工（リモート，三次元）

この位相共役波の発生には，主にフォトリフラクティブ結晶が用いられ，干渉じまによる屈折率分布が実時間で記録される．多波長化に関しては，442 nm から 1152 nm の波長領域までフォトリフラクティブ効果が確認されている³⁾⁴⁾．また，インコヒーレントな光による位相共役波の発生も実現している⁵⁾．位相共役波の発生のための光源として，一番多く利用されているのが，出力パワーの大きな Ar イオンレーザ（波長；488 nm，515 nm）である．また，633 nm He-Ne レーザや色素レーザの使用も有効である．最近，YAG レーザの第 2 高調波（532 nm）の出力パワーが増大するとともに，単一周波数の発振が実現され，位相共役波発生のための光源として利用されてきている．また，誘導ブリュアン散乱などによっても位相共役波が発生されることから，大出力パワー用のレーザの共振器には，0.24 μm から 10 μm の波長領域において気体や液体が反射鏡として利用されている．

2.2 アダプティブ光学

これは，柔らかい鏡の裏面またはセグメントに分かれた鏡の裏面に電歪素子など（例えば PZT）を取り付けて，光の波面のひずみ量に比例した電圧を電歪素子に加えて，鏡の形状を変えることによって光の波面ひずみを補償するものである⁶⁾．この方法は，補償の空間的分解能が電歪素子の数で制限されるので，分解能が幾分悪いが，時間的応答は比較的早く 1 ms 前後である．また，この方法の一番大きな利点はレーザビームの伝搬が一方方向だけでもそのビームの波面補償が可能であることである．

3. 広い応用範囲

位相共役技術・アダプティブ光学は表 1 に示すように多

くの応用が考えられるが，ここでは 2, 3 の特徴的な例について紹介する．

3.1 大気ゆらぎの補償

大気における光計測の大きな課題は大気のゆらぎの減少である．この大気のゆらぎは温度分布，つまり，屈折率分布を持った空気が移動することによる⁷⁾．このスペクトルは数十 Hz より高い周波数領域ではかなり小さいことから，BaTiO₃ による位相共役鏡を用いて 400 m の長光路で位相共役波を発生させ，約十数分の 1 まで大気ゆらぎの低減に成功している⁸⁾．これは，ゆがんだ波面に対応した回折格子を非線形光学結晶の中に記録すると，この回折格子によって反射光は，元の光路を正しく戻り，元の波面に回復される．このような技術は，光路長の大きな光学系において不可欠である．また，炎の温度分布を求めるための干渉計⁹⁾，また波長計測用フィゾー干渉計などの反射鏡としても応用されてきている¹⁰⁾．

波面ひずみの機械的な補償法は，レーザビームの伝搬が一方方向だけでもそのビームの波面補償が可能であり，希少価値の高い天文学における大気ゆらぎの補償などに応用されている．波面の検出においては，ハルトマン方式やシャリング干渉方式が開発されている外に，マルチディザー方式といって各要素の反射鏡を異なる周波数で変調し，ビームの集光点の光強度から各周波数成分を分離検出することによって，10 μm CO₂ レーザ光の波面を補償する方法も開発されている¹¹⁾．

3.2 光学素子の補償

長光路の干渉計を構成する場合，回折などによる信号光の減衰の問題から光学系には比較的大きな径を有する光学素子が使われることが多い．この場合，光学系の視野径を大きくすることによって，回折による信号光の損失などを解消しても光の波面精度が悪ければ，光電検出信号の SN 比の増大はそれほど期待できない．このような場合，光学素子による波面ひずみの回復に位相共役技術が有効である¹²⁾．また，光学顕微鏡において回折限界によって制限される分解能（使用波長の 1/2）を向上させることにも成功している¹³⁾．

高分解能計測用ヘテロダイン干渉計を構成するための音響光学変調器（AO）において，光周波数がシフトされた回折光は熱分布などにより波面ひずみも受けるので，位相共役鏡で回折光を反射させることによって，再び AO に入射させれば，波面ひずみが解消されたレーザ光が得られている¹⁴⁾．また，凹凸面鏡やレンズの評価を行うための干渉計の参照鏡として位相共役波を利用することによって，高精度な形状検査を可能にしている¹⁵⁾．さらに，多モード光ファイバを利用した干渉計におけるレーザ光の波面ひずみの減少に応用されている．

3.3 粗い表面の光計測

固体表面を光計測する場合、表面にレーザ光を照射すると表面粗さの状態によってレーザ光は散乱されるので、その固体の表面粗さが光源の波長よりも小さいことが必要である。このような場合、反射光をレンズで集光し、位相共役鏡に入射させることによって、粗面による波面ひずみが回復され、表面状態の悪い場合でも干渉計測が可能となる。この技術を利用して、物体の変形前後の情報を取り入れることによって、干渉じまパターンとして物体の変形量が測定されている¹⁶⁾。

3.4 レーザ共振器

レーザビームの波面補償技術の最大の応用は、加工用のパワースの大きなレーザビームのクリーンアップであると考えられる。なぜなら、レーザパワーの大出力化においてはレーザ共振器の幾何学的形状が変形したり、マルチモード発振に近い光学系の共振器が利用されるとともに、レーザ媒質自体が励起エネルギーによって屈折率分布を持つことによる。この解決には、レーザ共振器の反射鏡として位相共役鏡・アダプティブ光学を用い、次に出力パワーは小さいが高品質なレーザビームを発振させる。最後にこのビームを大きな光エネルギーの媒質に通して増幅したときに生じる波面ひずみを補償する方法が開発され、実用化も実現してきている¹⁷⁾。

4. 位相共役技術・アダプティブ光学への期待

レーザ光の波面制御技術は、回折効率が大きくて応答周波数が高い、無機、有機及び半導体などの固体、液体および気体の各種の非線形材料（フォトリフラクティブ材料）や誘導ブリュアン散乱材料などの開発とともに、その応用において興味あるものとなってきている。コストの面から考えると、半導体媒質の進展が期待されるが、光源の波長と関連して、無機結晶の利用も欠かすことができないだろう。これらの光学材料を利用することによって、新しい光デバイス・利用技術の開発が可能になり、レーザ光の利用技術において従来に無かった高機能化が期待されだけでなく、また従来の光デバイス・利用技術の性能を十分に発揮させることが可能となる。

これと関連して、光の波面に応じてミラー表面を機械的に制御するアダプティブ光学は実際の応用においては位相共役技術とお互いに相補の関係にあり、前述の高度加工などの応用が実現されてきており、デバイスおよびシステムの低コスト化が望まれる。

5. 産業への応用の可能性

5.1 基盤的産業

高品質ビームのための波面制御技術の現状と将来に関し

て調査してきたように、この分野の技術は、科学・工業における先端的つまり付加価値の高い技術であるが、運輸、医療、通信及びエネルギーなどの日常の製品・部品のための要素技術としても、発展性が期待される。このような光デバイス製作技術・利用技術の高度化・高機能化に関する研究は、科学・工業の基盤的技術でもあり、その波及効果は大きいと考えられる。とりわけ、実時間波面制御技術は、計測・照準のための要素デバイス技術として直接利用するだけでなく、光信号のSN比を向上させるための補助的機能として利用することが考えられる。位相共役技術はまだまだ成長期にあるが、光信号の空間フィルタリングの効果や直接の光増幅の効果などの多くの特長があるので、高感度計測つまり信号のSN比の向上の応用が期待される。この外、レーザ光の利用技術の大きな課題は、媒体による光波面のゆらぎを解消すること、また空間的分解能の回折限界を解消することである。

5.2 レーザ加工

レーザ光はエネルギー密度が高くて、コヒーレントであることから、そのビームは切削加工などのエネルギー源として有効である。この場合、レーザ共振器における光波面のひずみだけでなく、生産・建設現場で使用するためには、レーザビームの光路が長くなることから、ビーム径が有限であることによる回折によるビームの広がりが問題となり、レーザビームを集光することが困難になる。特に、大気中においては、大気の変化によりレーザビームの波面が乱れると同時に、ビームの方向が変動する。前者はエネルギー密度の低下を引き起こし、後者は目的とする部分の加工を不可能にするなどの多くの問題がある。波面の制御技術によりこれらの問題が解決され、マイクロマシンなどの精密な微細加工・複雑な3次元加工が可能となり、また大気中や水中におけるリモート加工が可能となるので、効率的な生産が実現される。図2はリモート3次元加工システムの概念を示したものであり、目的（加工箇所）とする部分からの弱い反射光を直接増幅し、そのレーザ光を位相共役鏡で戻すと、強く高品質なビームとなって目的とする微小箇所のみを高精度に加工し、またビームの収束点の位置も自動的に変えることが可能となる。

5.3 情報伝送・計測

生産・建設現場においては、高度化・複雑化が著しく、測定器や加工機に情報を送ったり、情報を受ける必要がある。この場合、従来電線を利用することが一般的であったが、最近光ファイバを利用する提案が行われてきている。光ファイバは1本の線でも多くの情報を伝送できるが、ロボットのような移動体との連結では問題が残る。このような目的には、光ビームを直接空中伝送させることが有効である。図3は波面補償技術に関しての、環境の悪い所での光の利用法やその利用技術の高度化についての概念を描い

(概念) その場高度加工

(原理)

図2 夢のリモート3次元レーザー加工システム

図3 レーザ光利用技術の将来

たものである。この場合、大気ゆらぎや機械的振動によるビーム方向の変動の問題はもとより、フィルタリングや光増幅の課題が位相共役技術の利用によって解決される可能性がある。

6. おわりに

以上述べてきたように、位相共役波技術・アダプティブ光学は、科学・工業における光利用技術の拡大と高度化において不可欠であり、この応用によってさらに新しい技術

の展開が期待される。このためには、フォトリフラクティブ材料などを科学的に追求し、要素技術を確認するのとともに、また応用と関連して材料にフィードバックすることが重要である。このような技術の開発によって、付加価値の高い新しい産業の発展が期待される。

参考文献

- 1) 左貝潤一：位相共役光学，朝倉書店，(1990)。
- 2) 松本弘一，本多徳行：計測のための位相共役技術，光技術コンタクト，**27**, 8 (1989) 457。
- 3) A. E. Attard: Photoconductive and Photo-refractive Effects in BSO, Appl. Opt., **28**, 23, (1989) 5169。
- 4) C. Bao, J. Zhang and S. Wang: Dual-frequency Phase Conjugation Wave Generation with the High-order Nonlinear Effect by Non-degenerate Six-wave Mixing in Photo-refractive Fe:LiNbO₃, Appl. Opt., **27**, 21, (1988) 4572。
- 5) W. S. Rabinovich and B. J. Feldman: Photorefractive Two-beam Coupling with White Light, Opt. Lett., **16**, 10, (1991) 708。
- 6) 家 正則：能動光学と補償光学，光技術コンタクト，**29**, 1 (1991) 10。
- 7) 松本弘一：光計測における大気の影響，Opt. Eng., **26**, 9 (1987) 99。
- 8) T. Honda and H. Matsumoto: Effects of BaTiO₃ Self-Pumped Phase-Conjugation in 400-m Atmospheric Optical Path, Jpn. J. Appl. Phys., **30**, 12 A, (1991) 3399。
- 9) X. Wang, R. Magnusson, A. Haji-Sheikh: Real-time Interferometry with Photorefractive Reference Holograms, Appl. Opt., **32**, 11, (1993) 1983。
- 10) G. Yang and A. Siahmakoun: Time-delay Fizeau Phase-conjugate Interferometer, Appl. Opt., **32**, 9, (1993) 1578。
- 11) 一ノ瀬裕治，川端正弘，道口由博：マルチディザー方式補償光学系における波面制御性の解析およびシミュレーション結果，光学，**21**, 10 (1992) 714。
- 12) W. L. Howes: Large Aperture Interferometer with Phase-conjugate Self-reference Beam, Appl. Opt., **25**, 18, (1986) 3167。
- 13) C. Mao, K. M. Johnson and W. T. Cathey: Superresolving Phase Conjugate Scanning Microscope, Appl. Opt., **29**, 26, (1990) 3753。
- 14) T. Honda and H. Matsumoto: Aberration Correction of Acousto-optically Modulated Laser Beams by Phase Conjugation, Opt. Lett., **15**, 6, (1990) 308。
- 15) R. P. Shukla, M. Dokhanian, P. Venkateswarlu and M. C. George: Phase Conjugate Twyman-Green Interferometer for Testing Spherical Surfaces and Lenses and for Measuring Refractive Indices of Liquids or Solid Transparent Materials, Opt. Commun., **78**, 5, (1990) 407。
- 16) D. Tontchev, S. Zhivkova and M. Miteva: Holographic Interferometric Microscope on the Basis of a BTO Crystal, Appl. Opt., **29**, 32, (1990) 4753。
- 17) M. C. Golomb, B. Fischer, J. Nilsen, J. O. White and A. Yariv: Laser with Dynamic Holographic Intracavity Distortion Correction Capability, Appl. Phys. Lett., **41**, 3, (1982) 219。