

## 気になる論文コーナー

### 二重周波数パターン投影による高速三次元形状計測

Dual-Frequency Pattern Scheme for High-Speed 3-D Shape Measurement

[K. Liu, Y. Wang, D. L. Lau, Q. Hao and L. G. Hassebrook: Opt. Express, 18, No. 5 (2010) 5229-5244]

構造化光投影による三次元形状計測技術は高速・高精度な形状計測が可能で、科学・産業分野等において利用されている。これまでにさまざまな構造のパターン投影が提案されており、その中でも高周波の縞パターンを用いる方法は高精度な計測が可能であるが、位相接続 (phase unwrapping) でエラーを生じるという問題がある。また、逆正接や三次元再構成の計算に時間を要していた。本論文では、位相シフトを用いた縞パターン光投影による形状計測法において上記の問題を解決するために、2種類の異なる周波数をもつ正弦波パターンを投影する手法と、ルックアップテーブル (LUT) を用いた高速処理を提案している。高周波のパターンからは精度は高いが  $0 \sim 2\pi$  で折り畳まれた位相が得られ、低周波のパターンから得られる精度は低い折り畳みのない位相と組み合わせることで、空間的な位相接続を行うことなく、折り畳みのない位相を高精度に求めることができる。また、縞パターンの変調度および位相を求める計算を二次元 LUT に、また位相

から三次元空間座標を求める計算を三次元 LUT に実装することで、高速処理を可能としている。LUT による高速化の効果を検証する実験では、6枚の画像から位相を算出する例において、従来手法では 68.75 ms (14.55 frame/s 相当) を要するのに対して、上記3種類の LUT を用いることで 7.18 ms (139.28 frame/s 相当) と約 10 倍の処理速度を達成している。さらに、提案手法をマルチスレッドによるリアルタイム処理系として実装し、120 frame/s での三次元再構成を実現している。(図 9, 表 1, 文献 27)

2種類の周波数のパターンや LUT を用いる手法自体は必ずしも新規性が高いとはいえないが、実装としては完成度が高く、高フレームレートでのリアルタイム三次元再構成を可能としている点は興味深い。LUT のためのメモリーを多く必要とするものの、GPU を用いた手法と同様、注目に値する。(山口 雅浩)

### 100 Gb/s コヒーレントシステムにおける非線形劣化と偏波モード分散の相互作用ならびに受信器の複雑性の影響に関する評価

Experimental Assessment of Interactions between Nonlinear Impairments and Polarization-Mode Dispersion in 100-Gb/s Coherent Systems versus Receiver Complexity

[O. Bertran-Pardo, J. Renaudier, G. Charlet, P. Tran, H. Mardoyan, M. Salsi and S. Bigo: Photonics Technol. Lett., 21, No. 1 (2009) 51-53]

次世代光伝送技術として、コヒーレント検波とデジタル信号処理 (DSP) を用いた偏波分割多重直交位相シフトキーイング (PDM-QPSK) が活発に研究されている。本方式の重要な特徴として、コヒーレント検波により得られる振幅や位相、偏波といった信号の波形情報と DSP を用いることで、伝送路中で発生する波長分散 (CD) や偏波モード分散 (PMD) に起因する線形劣化を補償することが可能であるという点が挙げられる。一方、伝送路中では線形劣化に加え、ファイバー非線形光学効果に伴う非線形劣化の発生が知られており、これが伝送システムの品質を制限する要因のひとつとなっている。本論文では、非線形効果と PMD の相互作用が PDM-QPSK 方式の PMD 耐力に及ぼす影響について、伝送実験により定量的な評価を行っている。実験では、伝送前に PMD を付加することで非線形効果と PMD の相互作用を模擬しており、非線形効果が発生しない場合に比べ、PMD が 8 ps のときで 0.7 dB、PMD が 20 ps のときで 1 dB の Q 値マージンがより多く必要となることを示している。本論文では、PMD 補償に用いる適応フィルターのタップ数と Q 値マージンの関係についての評価も実施されており、タップ数の減少に伴い、より大きなマージンが

必要となることが示されている。また、伝送後に PMD を付与した場合の評価も実施されており、非線形劣化後に PMD を付与した場合は、非線形劣化がない場合と同様に PMD の補償が可能であることが示されている。これは、非線形効果と PMD の相互作用が生じない場合には、PMD による波形劣化と非線形光学効果による波形劣化を分離することが可能であることを意味している。(図 5, 文献 8)

本論文は、PMD の影響と非線形光学効果の影響を独立に扱うことが、光伝送システム設計における信号品質劣化の過小評価につながるという点を定量的に明確化しており、非常に興味深い。PMD と非線形光学効果の相互作用による影響は、次世代光伝送システムの設計を考える上で重要なパラメータのひとつとなることが考えられる。本論文では、伝送路として分散補償ファイバー (DCF) が適用された系を想定しているが、コヒーレント検波と DSP を用いた伝送システムでは、一般に DCF を用いない系が構築可能である。今後は、DCF を用いない系における、PMD と非線形光学効果の相互作用に関する検討が期待される。(山本 秀人)

### 自己集合ナノスケール球面レンズによる近接場集束と拡大

Near-Field Focusing and Magnification through Self-Assembled Nanoscale Spherical Lenses

[J. Y. Lee, B. H. Hong, W. Y. Kim, S. K. Min, Y. Kim, M. V. Jouravlev, R. Bose, K. S. Kim, I. Hwang, L. J. Kaufman, C. W. Wong, P. Kim and K. S. Kim: Nature, 460, No. 7254 (2009) 498-501]

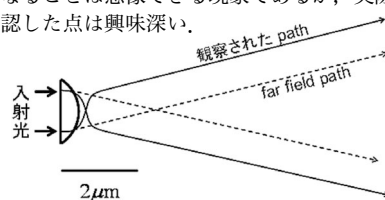
球面レンズを用いた光学系では、解像力はアッペの回折限界で制限されている。このアッペの回折限界を超えるためにいろいろな方法が考えられているが、この論文では特殊な物性などを利用するわけではなく、通常の球面レンズだが可視波長と同程度の大きさの場合、回折限界を超える解像が可能であることを実験で示した。

カリックス [4] ヒドロキノンという物質を自己集合させて、厚み 800 nm 以下、直径 50~3000 nm のレンズを作成し、その結像性能と像拡大の性質を調べている。

著者は光源として波長 472 nm を使用し、220 nm ピッチの縞をナノレンズを介して顕微鏡で解像していることを観察し、Sparrow 解像力限界  $0.475\lambda/NA=250$  nm と比べてそれ以上の解像力が得られることを確認した。幾何光学光線に相当する光線が曲線になることで、通

常の幾何光学で考えられる焦点距離に比べて短い焦点距離になっている。このことは FDTD (finite-difference time-domain) シミュレーションでも確認している。(図 4, 文献 28)

レンズを波長サイズまで小さくすると通常の幾何光学が成り立たなくなることは想像できる現象であるが、実際に回折限界を破ることを確認した点は興味深い。(鳥羽 英光)



観察によって得られる光線と幾何光学的な光線

## 黒体化した金属を用いた高輝度光源：熱放射光源の放射効率の著しい増加

Brighter Light Sources from Black Metal: Significant Increase in Emission Efficiency of Incandescent Light Sources

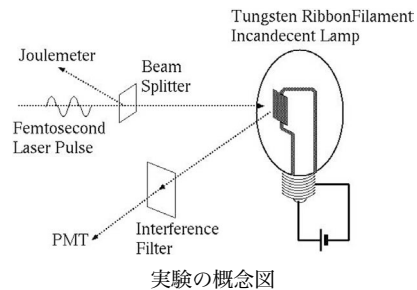
[A. Y. Varobyev, V. S. Makin and C. Guo: Phys. Rev. Lett., 102, No. 23 (2009) 234301]

著者らの先行研究によれば、フェムト秒パルスレーザーを用いたアブレーション処理により金属にナノスケールの構造を作ることができる。この論文ではこの手法を白熱電球のタングステンフィラメントに適用し、以下4点を報告している：①アブレーション処理したものは、未処理のものに比較して放射効率が1.6倍程度に上昇すること（この意味は次項②より800 nmの光の熱放射効率上限の95%相当）、②別途吸収効率の実験を行い、この系で金属は黒体に近づく（800 nmの光に対して吸収効率が95%程度になる）こと；熱放射のキルヒホッフの法則が成立していること、③アブレーションに用いたレーザーの偏光と同じp偏光の発光・吸収効率がs偏光のものに比較して高いこと、④500～1300 nmの広いレンジにわたって黒体化可能なこと。（図3、文献16）

可視域での発光効率についてはその後のコメント [K. C. Mishra *et al.*: Phys. Rev. Lett., 103 (2009) 269401] と応答 [同 (2009) 209402] で議論されているが、この論文はナノスケールの構造による放射・吸収

スペクトルの制御可能性を示唆している。赤外域の放射を抑制しエネルギー効率を上げられれば、白熱電球の製造・使用中止という世界的流れに一石を投げ、発展途上国にも優しい技術になるだろう。

（坂野 齋）



実験の概念図

## 円形誘電液体アイリス

Circular Dielectric Liquid Iris

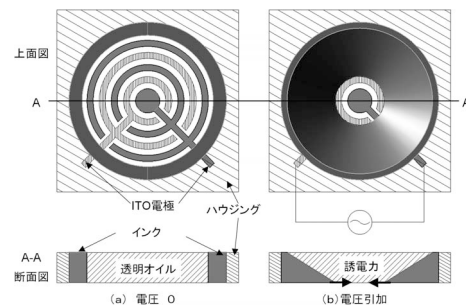
[C. G. Tsai and J. A. Yeh: Opt. Lett., 35, No. 14 (2010) 2484-2486]

従来の機械的な構成を有するアイリス絞りに代わり、液体を利用したアイリス絞りが提案されているが、開口サイズが不連続な点が問題であった。著者らは、開口サイズを連続的に変化させることができ、さらに低消費電力を実現した開口絞りを提案している。

提案された液体アイリス絞りは、概略図に示すように、混ざり合わない2種類の誘電液体（透明オイルとインクで染めた誘電液体）、ITO電極、そしてハウジングで構成されている（ただし、上面は硝子プレートで封止されている）。アイリス絞りの開口サイズは、電極間への電圧印加によって2種類の誘電液体表面で発生する誘電力によってインクが内側に引っぱられることで制御される。論文では、φ4から1.5 mmまで開口サイズを連続的に変化させている（全体サイズ9 mm角）。このときの印加電圧、電流量、電力量はそれぞれ40～160 V、22～186 μA、0.14～4.66 mW、動作速度は0.14～1.08 秒、緩和時間は0.07～0.25 秒であり、開口部分の透過率は可視域全域で85%程度を実現している。

紹介された誘電液体アイリス絞りはメカレスで開口サイズを可変にできるので、幅広い分野での利用が期待できる。

（雙木 満）



円形誘電液体アイリス絞りの概略図

## 直交偏光子間のフォトニック結晶を用いた安価なラベルフリーバイオセンサー

Low-Cost Label-Free Biosensors Using Photonic Crystals Embedded between Crossed Polarizers

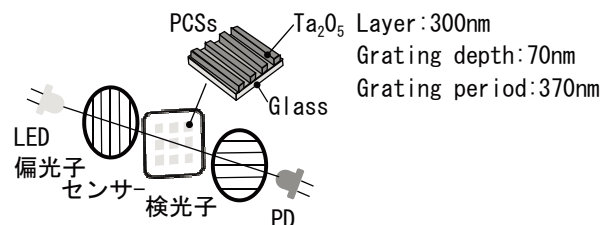
[Y. Nazirizadeh, U. Bog, S. Sekula, T. Mappes, U. Lemmer and M. Gerken: Opt. Express, 18, No. 18 (2010) 19120-19128]

タンパク質などの生体物質のラベルフリーなセンシング手法として、表面プラズモン共鳴が広く利用されているが、分光器を用いてスペクトル解析を行うため、装置が大掛かりで高価なものが多い。これに対して著者らは、PSCs (photonic crystal slabs) における導波モード共鳴を利用した小型で安価なバイオセンサーを提案した。直交する偏光子間に方位45度でPSCsを挟むことで、PSCs表面の生体物質による屈折率変化から生じる共鳴波長シフトを効率よく検出している。さらに、光源に用いたLEDのスペクトルスロープと透過光強度からシフト量を算出することで、PD (photodiode) を検出器として利用することを可能とした。これらを組み合わせ、図の構成を数cm程度のデモンストレーション機として作製し、 $2.25 \times 10^{-4}$ の屈折率変化の検出に成功している。また、PSCs表面を官能化させ、2.5 nMolのタンパク質とビタミンの結合過程をリアルタイムで検出した結果を示している。（図7、文献16）

原理そのものの新規性というよりは、検出シグナルの特性に適合し

た技術を組み合わせることで比較的容易に小型化・低価格化を実現している点で興味深く、著者らが示した手法は広く応用可能な実用化技術として期待される。

（海老澤瑞枝）



LEDとPDを用いた安価なラベルフリーバイオセンサー