

液晶空間光変調素子を用いたオンデマンド型 マルチスポット光ツイーザー

岩井俊昭

On-Demand Holographic Optical Tweezers Using a Liquid Crystal Spatial Light Modulator

Toshiaki IWAI

Recent developments of a high-density and high-speed liquid-crystal spatial light modulator (SLM) have activated the attractive research works on the holographic optical tweezers (HOTs). The iterative phase retrieval method and the generalized phase contrast method are reviewed from the viewpoints of the production of a computer-generated hologram fed into the SLM. Finally, the time-division multiplexing holographic optical tweezers is presented briefly from our recent works.

Key words: liquid crystal spatial light modulator, holographic optical tweezers, generalized iterative phase retrieval method, phase contrast method, time-division multiplexing method

空間光変調素子 (spatial light modulator, 以後 SLM と略す) とは, 光波の振幅, 位相および偏光を空間的に制御する光デバイスであり, レーザービームの集光特性や波面の整形, 大気屈折率ゆらぎや観察対象の空間的歪みから発生する波面歪みの補正, 光学的フィルタリングを基礎とした光学的演算, 多機能型光ツイーザーへの利用が期待されている。近年, 大画面フロントおよびリアプロジェクターの光学エンジン素子として, liquid crystal on silicon (LCOS または LCoS と略す) 技術によって, XGA (1024×768 画素), WUXGA (1920×1200 画素), そしてデジタル・ハイビジョン規格 HDTV (1920×1080 画素) に至る高密度化が進行し, フレームレートに関しては筆者の知るところでは毎秒 180 フレームと高速化されている。さらには, 高速駆動性, 照射強度耐性, かつ偏光不変性を有するマイクロミラーアレイ型 MEMS 空間光変調器や磁気光学空間光変調器などが市販されるに至っている。

このような SLM の高密度化・高速化の技術展開を背景に, 新しい光ツイーザー技術の研究が旺盛を極めている。光ツイーザー技術は, 1970 年に Ashkin がレーザービー

ムの集光点近傍において, マイクロ誘電体微粒子が光圧によって捕捉されることを発表して以来, 盛んに研究が行われてきた¹⁾。80 年代には理論的な原理展開とともに集光レーザービームによる単粒子捕捉の実用研究の先駆けが形成された。90 年代にはレーザービーム走査によるマイクロ微粒子の二次元配列の研究が進展し, 実用的なシステムが民生用として普及した²⁾。この間, レーザービームによる微粒子の捕捉技術は, 光ピンセットまたは光ツイーザーとよばれ, 細胞を捕捉し移動・配列させること, 細胞膜と細胞内物体とを独立に捕捉・変形させること, DNA にマイクロ微粒子を接着させ微粒子を捕捉・移動させることによって DNA の力学的特性を評価することなど, おもに生命科学の重要な微細加工や測定技術へと展開されている。このようなレンズによる集光レーザービーム光ツイーザー技術に対して, 回折光学素子を用いて光波の振幅または位相を変調することによって顕微領域にマルチスポット光を形成させて, 数 10 μm ~数 100 nm の微小物体の捕捉と配列の制御を行う技術が研究された。このような光ツイーザー技術を, ホログラム光ツイーザー (holographic optical

東京農工大学大学院共生科学技術研究部生物システム応用科学府 (〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16) E-mail: tiwai@cc.tuat.ac.jp

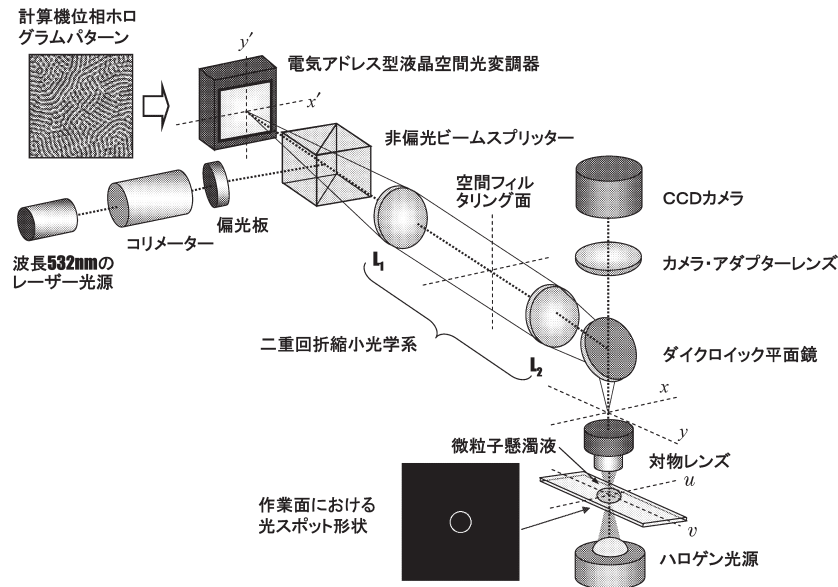


図1 空間光変調素子を用いたフーリエ変換ホログラムによる光ツイーザーの光学系。

tweezers, HOTs と略す)とよんでいる³⁾。実時間操作を目指して液晶 SLM を用いた HOTs 技術は、1999 年早崎ら⁴⁾と Reicherter ら⁵⁾による提案から始まり、空間光変調器の急速な性能向上に伴って、近年では光ツイーザー技術の中心的研究課題となっている。筆者の研究室では、LCOS 型 SLM を用いて、微小物体、特に細胞や細胞内物質を自在に制御するために、オンデマンド型マルチスポット光ツイーザーの開発研究を行っている。本解説では、液晶 SLM を用いた HOTs 技術の研究動向と筆者の研究室の研究を概説する。

1. SLM を用いた HOTs 技術の研究動向

HOTs 技術研究においては、研究者は「いかにオンデマンド操作を行うか」に集中している。オンデマンドとは、微小物体を移動や配列させる際に、捕捉された物体をコンピューターディスプレイ上に像としてキャプチャーし、その像を介してカーソルやペンタブレットなどのポインティングデバイスによって意のままに操作することを意味する。HOTs 技術は、計算機ホログラムの生成とマルチスポット光の形成の 2 段階に分けられる。特に、オンデマンド操作という観点からは、計算機ホログラムの生成がキーポイントになる。現在、HOTs に用いられている計算機ホログラムの生成法としては、Stuttgart University の Tiziani ら⁵⁾、New York University (アメリカ合衆国) の Grier ら⁶⁾、Illinois Wesleyan University の Spalding らと University of St. Andrews の Dholakia ら⁷⁾などが採用している反復位相推定法 (iterative phase retrieval

method) と RISØ 国立研究所 (デンマーク) の Glückstad ら⁸⁾が提案した一般化位相差法 (generalized phase-contrast method) に集約されよう。以下に、これら 2 手法について概説する。

1.1 反復位相推定法

反復位相推定法は、1972 年に Gerchberg と Saxton により提案されたフーリエ位相ホログラムを生成する手法である⁹⁾。別名、energy reduction 法または GS 法ともよばれる。本手法は、高速フーリエ変換法の提案とその後のコンピューターの高速度・大容量化によって、所望の三次元像を結像させるためのキノフォーム最適化の手法として多用された。1980 年代初頭、大気ゆらぎによって劣化した天体像の画像回復法の基礎として、本手法の研究が展開された。

図 1 に、反射型 SLM を用いた反復位相推定法を用いた HOTs の代表的な光学系を示す。SLM に照射された平面波は位相変調され、顕微鏡対物レンズの焦点面に光強度分布を形成する。このとき、SLM の面積と対物レンズの入射瞳の大きさが異なるため、二重回折縮小結像系によって位相変調された光波を対物レンズの入射瞳に縮小結像している。SLM に入力された位相ホログラムに対応するマルチスポット光は、対物レンズの焦点面に形成される。この平面において、微小物体が捕捉され、移動され、そして配列される。ダイクロミックミラーは、焦点面の微小物体の挙動を観察するカメラにトラップ光が入射することを阻止している。

図 2 に GS 法のアルゴリズムを示す。本アルゴリズム

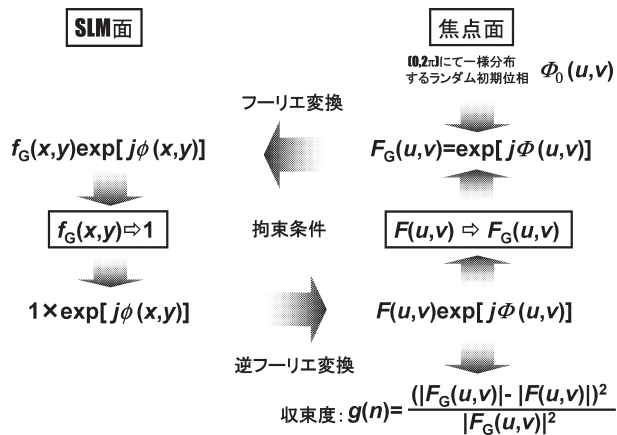


図2 Gerchberg-Saxton法に基づくフーリエ変換位相ホログラム生成のための反復位相推定法のアルゴリズム。

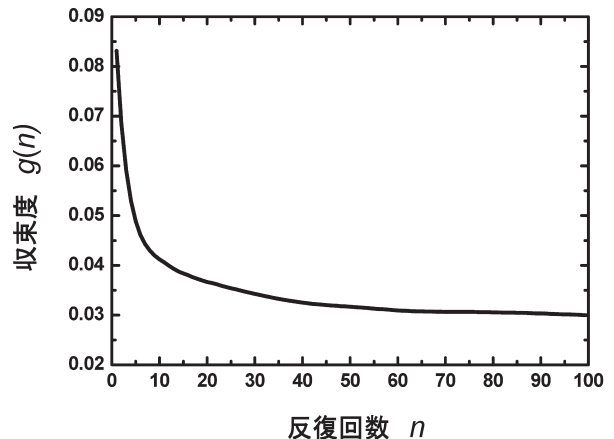


図3 反復位相推定法における収束度の反復回数依存性。

は、平面波照射された位相物体に対するレンズ焦点面におけるフーリエ変換作用を想定しており、SLM面と焦点面とはフーリエ変換の関係にある。焦点面では所望の強度分布の平方根を振幅の拘束条件として適用し、SLM面では完全位相ホログラムを仮定して振幅1の拘束条件を適用する。反復の1回目のホログラム面の位相を、 $0 \leq \Phi_0 < 2\pi$ の範囲で一様分布するランダム位相を仮定し、以後拘束条件を両面において乗算しながら、位相が真値に収束するまで反復を繰り返す。図3に、漢字「光」を発生させるホログラムを生成したときの焦点面における所望の振幅と生成された振幅の絶対値差の二乗、すなわち収束度 $g(n)$ の減少変化を示し、図4にその結果を示す。このGS法の振幅に関する収束性は、Saxtonにより証明されている。図より、GS法では反復を開始してから数回の中に、収束度 $g(n)$ は急速に減少し、焦点面において推定された振幅は拘束条件に収束していくことがわかる。しかしながら、その後の収束変化は緩やかで、誤差3%程度まで収束するためには数10回の反復が必要である。このため、GS法を用いた計算機ホログラム生成法は、図4に示すように形成させる強度分布の形状についての自由度を有するが、実時間性に乏しいことが欠点である。したがって、連続した計算機ホログラムを事前に生成しておき、ポインティングデバイスのボタンに画像のSLMへの出力操作を割り付けておき、微小物体の移動や配列の操作を行う使用方法が一般的である。

図5は、光軸に関して対称に形成させた2個のスポット光に直径 $3 \mu\text{m}$ のポリスチレン微粒子を捕捉し、互いに反対方向に直線的に並進させたのち、時計回りに回転させた実験例を示す¹⁰⁾。実験では、微粒子を20枚のホログラムを用いて $40 \mu\text{m}$ まで並進させ、180枚のホログラムを用

いて 360° 回転させている。SLMには理想的な位相ホログラムが入力されているはずであるが、実際には振幅変調が混在しているため、円の中心に強い0次光が発生する。この0次光による強力な電界勾配力で微粒子が捕捉されてしまう。この影響を考慮して、SLMへ位相画像を入力する際には入力画像の切り替えをコンピューターのキーボードのアップキーとダウンキーとに割り付け、ディスプレイ上でモニターしながら微粒子の移動を微妙に調整している。マルチスポット光による回転と同様の効果は、軌道角運動量を有するラグール・ガウスビーム(LGビームと略す)でも得られる¹¹⁾。LGビーム複素振幅場は、波動方程式の円筒座標系における近軸近似解であり、次式で与えられる。

$$u_{pl}(r, \theta, z, t) = \frac{C}{w} (-1)^p \left(\frac{\sqrt{2}r}{w} \right)^l L_p^l \left(\frac{2r^2}{w^2} \right) \exp\left(-\frac{r^2}{w^2} \right) \times \exp\left(i \frac{kr^2}{2\rho} \right) \exp[-i(2p+l+1)\psi] \times \exp(i l \theta) \exp[i(kz - \omega t)] \quad (1)$$

ここで、 $r = \sqrt{u^2 + v^2}$ は観測場の動径距離、 ω は角周波数、 k は波数、 p は動径モード指数、 l は偏角モード指数、 C は規格化因子、 L_p^l はラグール陪多項式、 $w = w(z)$ はビーム半径、 $\rho = \rho(z)$ は波面の曲率半径、 ψ はグイ位相を表す。式(1)において、 $p=0$ かつ $l \neq 0$ のとき、LGビームはドーナツ状強度分布を示す。このときの振幅場を単純化して次式で示す。

$$u(r, \theta, z) = G(r, z) e^{i k z} e^{i l \theta} \quad (2)$$

このとき、LGビームのヘリカルモードは、 $e^{i l \theta}$ によって1光子あたり $l\hbar$ なる軌道角運動量を発生する。図6は、 $l=40$ に対する位相関数 $\phi = (l\theta) \bmod 2\pi$ によって変調された TEM_{00} ビームが対物レンズの焦点面に形成するドーナツ状強度分布を示す。

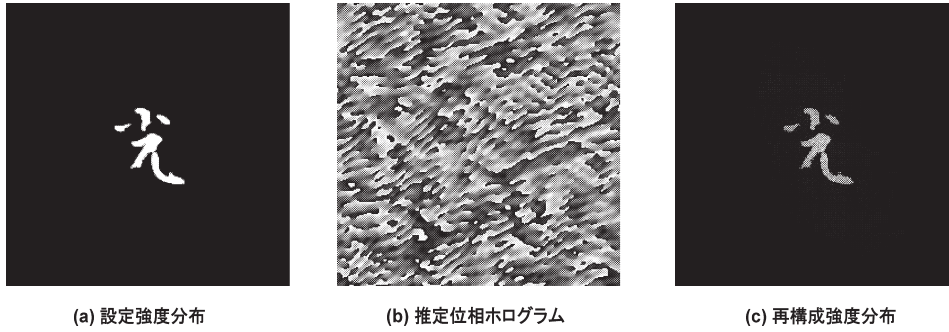


図4 反復位相推定法における設定された強度分布 (a), 推定された位相ホログラム (b), そして (b) の位相ホログラムから再構成された強度分布 (c).

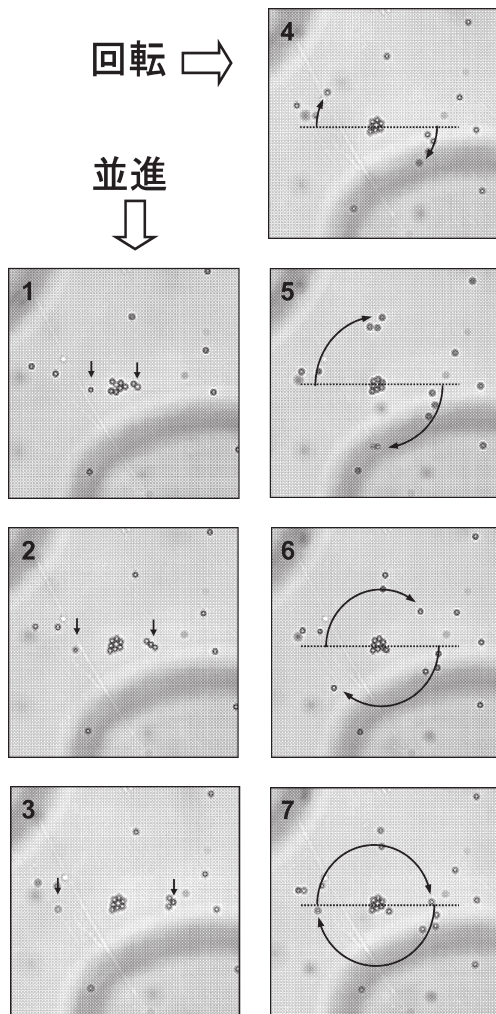


図5 反復位相推定法によるHOTsを用いて、直径 $3\mu\text{m}$ ポリスチレン粒子を並進・回転させた例¹⁰⁾.

ナツ状LGビーム強度分布とその軌道角運動量によって右回転する微粒子の様子を示す。ドーナツ状LGビームは、周囲媒質よりも低屈折率の微小物体、たとえば気泡などをその中心に捕捉するためにも用いられる。

このほかに、光スポット集光点を光軸方向に並進させる

ことによって微粒子の三次元操作を行うことは、GS法で生成した位相ホログラムに

$$\phi_z(x, y) = [\pi(x^2 + y^2) / \lambda f'] \bmod 2\pi \quad (3)$$

なる焦点距離 f' の球面レンズの位相を加算することによって実現されている¹²⁾。さらには、歯車状強度分布による粒子ソーティングの試みなど興味深い応用例が提案されている¹³⁾。

1.2 一般化位相差法

一般化位相差法は、デンマークのRISØ国立研究所のGlückstadのグループによって提案された実時間光ツイーザー技術である。図7に、その光学系を示す。入射平面波はSLMによって位相変調されたのち、縦列に配置された2つの二重回折系を経て顕微鏡対物レンズによってガラスプレート近傍の媒質内に結像される。前方の二重回折系は位相差フィルタリングのための系であり、後方のそれは顕微鏡対物レンズの焦点面に余分な位相が付加されることなく縮小結像させるための系である。前方の二重回折系に入射される直線偏光平面波がSLMによって

$$\alpha(x, y) = \exp[i\phi(x, y)] \quad (x, y) \in S \quad (4)$$

なる位相変調され、空間フィルタリング面の光軸を中心に設置されたツェルニケ位相差フィルタ

$$T(f_x, f_y) = \begin{cases} 1 + [\exp(i\theta) - 1] & (f_x, f_y) \in S_f \\ 0 & (f_x, f_y) \notin S_f \end{cases} \quad (5)$$

によって空間フィルタリングされるとする。ここで、 S と S_f はそれぞれSLMの位相変調領域と空間フィルタリング面において光軸を中心に分布する微小透過領域を表す。いま、像面における強度分布のコントラストが最大になる条件、すなわち α の複素平均の振幅が $1/2$ に等しくかつ $\theta = \pi$ のもとでは、二重回折系の像面強度分布は次式でえられる¹⁴⁾。

$$I(x', y') = 2[1 - \cos\phi(x', y')] \quad (6)$$

式(6)が成り立つためには、ツェルニケ位相差フィルタ

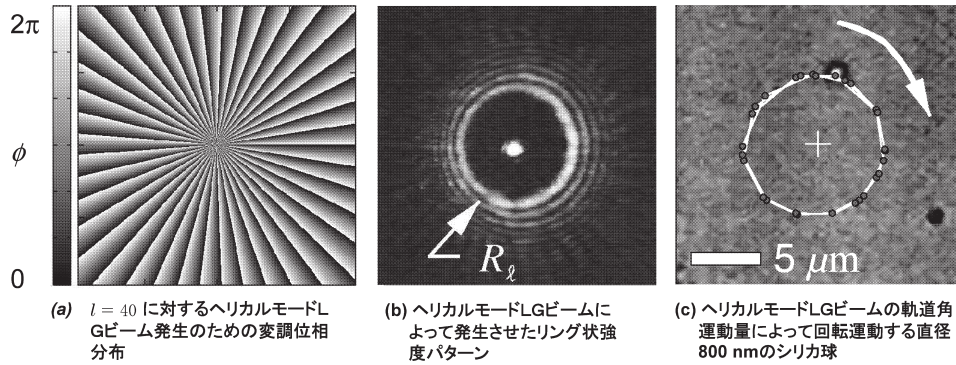


図6 HOTS法によるヘリカルモード LG ビームの形成と直径 800 nm 微粒子を回転させた例¹¹⁾.

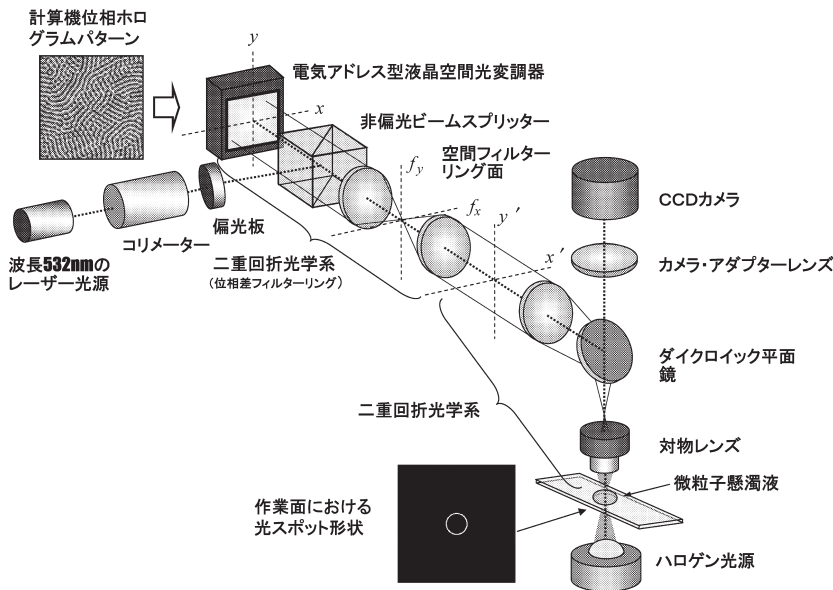


図7 空間光変調素子を用いた一般化位相差法による光ツイーザーの光学系。

一の条件のほかに、次式で与えられる 2 つの条件を満足するように位相関数を SLM に入力する必要がある。

$$\begin{cases} \int_S \cos [\phi(x, y)] dx dy = S/2 \\ \int_S \sin [\phi(x, y)] dx dy = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式 (7) の第 1 式は α の複素平均の振幅が 1/2 なる条件であり、第 2 式は像面の強度分布変化が SLM に入力する位相関数の余弦に従うことを保証するための条件である。式 (6) が示すように、一般化位相差法では、任意の位相関数の余弦を計算するのみでよく、反復位相推定法にくらべ計算時間が大幅に短縮可能であり、光ツイーザーの実時間操作を可能にしている。図 8 は、8 個の直径 $2 \mu\text{m}$ のポリスチレン微粒子の配列と移動の実験結果を示す¹⁵⁾。六角形の頂点に配列させた 6 個の微粒子の全体を時計方向に回転させ、その内部の 2 個の微粒子を反時計方向に回転させて

いる。本手法では、位相パターンを直接計算できるため実時間操作が容易に行える特長を有する。さらに、前方の二重回折系の像面側に偏光制御用の SLM を挿入し、偏光ビームスプリッターによって直交する偏光成分に 2 分割したのち、作業面の上下方向から挟み込むようにトラッピングビームを形成させ、微粒子の三次元操作を可能にしている¹⁶⁾。

2. オンデマンド型マルチスポット光ツイーザーを目指して¹⁷⁾

筆者らは、LCOS 型液晶空間光変調素子を用いたマルチスポット光ツイーザーによる微粒子のオンデマンド制御の研究を行っている。特に、マウスやタブレットなどのポインティングデバイスによって微粒子をディスプレイ上で運搬し、固定されたマルチスポット光の配列に並べることを想定している。そのため、固定された配列用スポット光

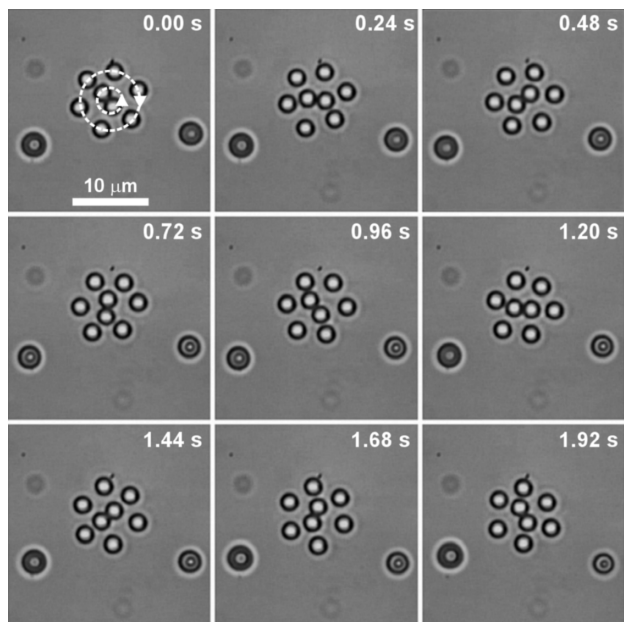


図8 一般化位相差法による HOTs を用いて、直径 $2\mu\text{m}$ ポリスチレン粒子を配列・回転させた例¹⁵⁾。

の発生を維持しながら、移動用のスポット光を連続的に発生させることが必要になる。このような操作を実現するために、筆者らは「時間分割多重化法」を提案した¹⁷⁾。本技術では、移動と配列のスポット光のホログラムは、事前に1枚ずつGS法を用いて生成させる。スポット光の移動は、SLM面と作業面がフーリエ変換の関係にあることから位相ホログラムに線形位相

$$\phi_s(x, y) = (k\mathbf{x} \cdot \Delta\mathbf{x}/f) \bmod 2\pi \quad (8)$$

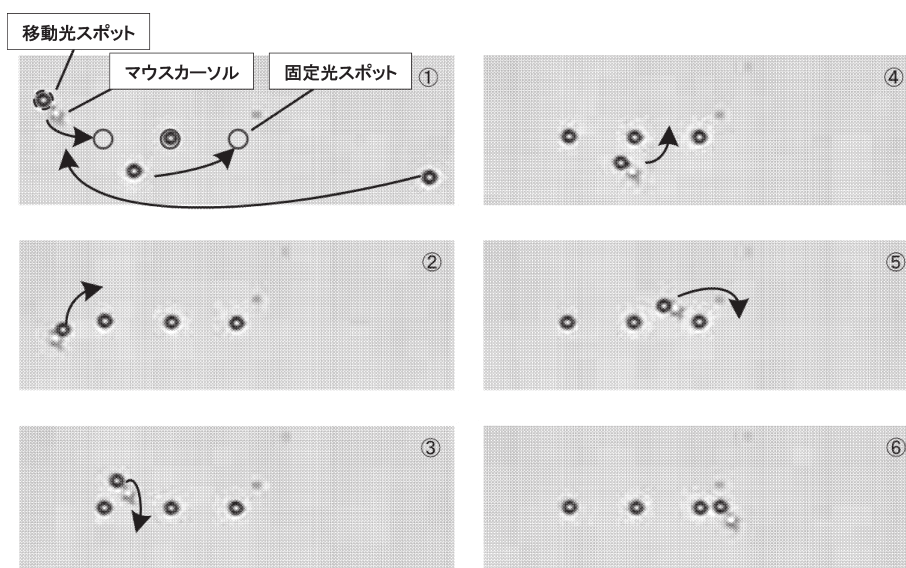


図10 時間分割多重化法による3個の微粒子の固定配列スポット光への配列と1個の微粒子をスラローム移動させた例¹⁷⁾。

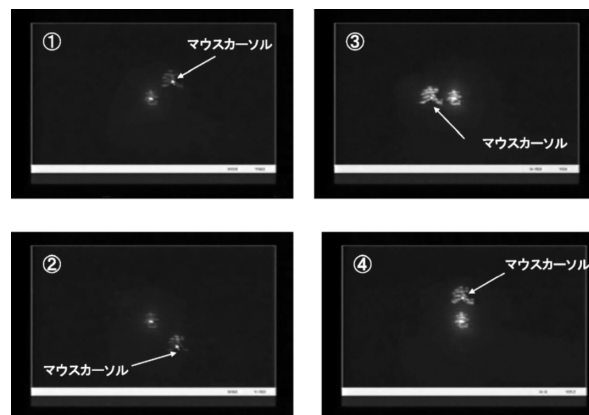


図9 時間分割多重化法を用いて、固定光強度パターン「壹」と移動光強度パターン「弐」とを同時表示させた例¹⁷⁾。

を加算することにより、 $\Delta\mathbf{x}$ だけスポット光の位置が移動する。式(8)の位相計算は実時間で行うことができるため、移動用スポット光の操作においては微粒子の移動する状況を観測しながら捕捉状況の変化に随時対応させることが可能となる。このような移動スポット光と固定された配列マルチスポット光の位相ホログラムを交互にSLMに入力することによって、両スポット光を並列に形成させることを実現している。時間分割多重化法によるオンデマンド型マルチスポット光ツイーザーにおいても、図1に示した光学系が用いられる。

図9は、固定スポット光と移動スポット光を、それぞれ漢字の「壹」と「弐」に割り当て、固定された「壹」の周りでマウスカーソルが示す位置に「弐」を移動させている

例を示す。さらに、図 10 は、3 個の微粒子を固定配列スポット光で配列させ、移動スポット光に捕捉された 1 個の微粒子をマウスカーソルの移動に沿って動かし、粒子間をスラロームさせた例を示す。図より、筆者らが提案した「時間分割多重化法」によって、固定された配列スポット光による微粒子の配列状態を維持しながら、微粒子をその配列スポット光に移動させることが可能であることを示した。

近年の光ツイーザー技術は、空間光変調素子の機能の高度化によって、急展開している。本解説では、最近の光ツイーザー研究を位相ホログラムの生成法の観点から、「反復位相推定法」と「一般化位相差法」について概説した。さらに、筆者らが提案している「時間分割多重化法」について、実験結果を示しながら、オンデマンド操作への可能性を示した。

現在、HOTs 技術の研究は旺盛であり、毎年 8 月に開催される SPIE 会議では 4 日間にわたって多種多様な研究成果が発表されている。今後も空間光変調素子の高機能化が進むことが予想され、HOTs 技術もますます高機能化されるであろう。また、技術の進歩に伴い、新しい応用が提案されることを期待したい。

文 献

- 1) A. Ashkin: "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure," *Phys. Rev. Lett.*, **24** (1970) 156-159.
- 2) A. Ashkin: "History of optical trapping and manipulation of small-neutral particle, atoms, and molecules," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Elec.*, **6** (2000) 841-856.
- 3) D. G. Grier: "A revolution in optical manipulation," *Nature*, **424** (2003) 810-816.
- 4) Y. Hayasaki, M. Itoh, T. Yatagai and N. Nishida: "Nonmechanical optical manipulation of microparticle using spatial light modulator," *Opt. Rev.*, **6** (1999) 24-27.
- 5) M. Reicherter, T. Haist, E. U. Wagemann and H. J. Tiziani: "Optical particle trapping with computer-generated holograms written on a liquid-crystal display," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 608-610.
- 6) J. E. Curtis, B. A. Koss and D. G. Grier: "Dynamic holographic optical tweezers," *Opt. Commun.*, **207** (2002) 169-175.
- 7) H. Melville, G. F. Milne, G. C. Spalding, W. Sibbett, K. Dholakia and D. McGloin: "Optical trapping of three-dimensional structures using dynamic holograms," *Opt. Express*, **11** (2003) 3562-3567.
- 8) P. C. Mogensen and J. Glückstad: "Dynamic array generation and pattern formation for optical tweezers," *Opt. Commun.*, **175** (2000) 75-81.
- 9) R. W. Gerchberg and W. O. Saxton: "A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures," *Optik*, **35** (1972) 237-246.
- 10) T. Iwai, M. Shirai and J. Yamamoto: "Laser beam manipulation of particles using dynamic holographic optical tweezers," submitted.
- 11) J. E. Curtis and D. G. Grier: "Structure of optical vortices," *Phys. Rev. Lett.*, **90** (2003) 133901-1-133901-4.
- 12) T. Haist, M. Schönleer and H. J. Tiziani: "Computer-generated holograms from 3D-objects written on twisted-nematic liquid crystal displays," *Opt. Commun.*, **140** (1997) 299-308.
- 13) A. Jesacher, S. Fürhapter, S. Bernet and M. Ritsch-Marte: "Size selective trapping with optical "cogwheel" tweezers," *Opt. Express*, **12** (2004) 4129-4135.
- 14) J. Glückstad: "Phase contrast image synthesis," *Opt. Commun.*, **130** (1996) 225-230.
- 15) R. L. Eriksen, V. R. Daria and J. Glückstad: "Fully dynamic multiple-beam optical tweezers," *Opt. Express*, **10** (2002) 597-602.
- 16) I. R. Perch-Nielsen, P. J. Rodrigo and J. Glückstad: "Real-time interactive 3D manipulation of particles viewed in two orthogonal observation planes," *Opt. Express*, **13** (2005) 2852-2857.
- 17) T. Iwai and J. Yamamoto: "On-demand optical tweezers using time-division multiplexing holographic optical tweezers," submitted.

(2006 年 11 月 27 日受理)