

多重零点光ビームおよび遠隔 6 軸変位計測への応用

安藤 繁・栗原 徹

Multi-Zeros Optical Beam and Its Application to Remote Six-Axis Displacement Sensing

Shigeru ANDO and Toru KURIHARA

A new principle for monitoring full-axis (three translational and three rotational) deformation of large and long structures such as bridges, roads, and railways has been proposed based on a combined use of a multi-zeros optical beam and correlation image sensor (CIS). We present, as a basis of this technique, a fundamental theory and a mathematical description of the multi-zeros optical beam. Then, we describe an experimental system we developed, and show several results of preliminary field experiments in the university campus.

Key words: structure health monitoring, laser, Laguerre-Gaussian beam, polynomial, zeros, correlation image sensor

1. 光ビームを用いた遠隔 6 軸変位計測

レーザーを用いた測距・変位計測には多方面の応用がある。近年では、橋梁や鉄道・道路などの社会的なインフラの健全度モニタリング^{1,2)}への適用にも関心が集まっている。静止変形の継続的把握が、構造物に蓄積される歪みの定量化に本質的だからである。

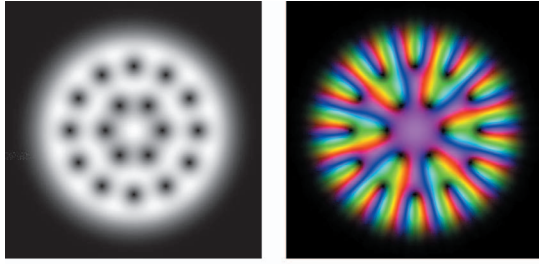
一般に、対象となる構造物の変形の自由度は並進 3 軸 (x, y, z) と回転 3 軸 ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) の合計 6 個存在し、計測対象の状態の把握には、これらすべての同時計測が望ましい。光ビームを用いる方法では、波長方向とビームに直交する方向の回転に関する検出能力は、前者には干渉を、後者には光でこの原理を用いることで非常に高くできる。しかし、それ以外の方向 (横変位や軸方向の回転) の検出能力は必ずしも高いとはいえない。筆者らは、光ビームを用いた遠隔での変位計測に取り組むにあたり、この非対称性の克服に強い問題意識をもった。本稿は、このような観点から出発したわれわれの取り組み³⁻¹²⁾の概要をまとめたものである。

2. 光ビームの多様性と多重零点光ビーム

2.1 光ビームへの断面マーカの付与

横変位の検出能力は、横方向の変位に対する光ビーム断面の振幅位相分布の変化量が大きいほど大きい。横変位に対して変化が大きい部分が横変位のマーカとなるわけである。この意味で、通常の光ビーム (ガウスビーム) におけるマーカの断面内の変化は振幅のガウス関数のみであり、その振幅も広がりも伝搬や経路上の事象の影響で変化しやすい。ビームに検出容易で伝搬の影響を受けにくい横方向のマーカが付けられればこれは解決するが、これはどのようなマーカなのだろうか。軸方向の回転検出能力については、通常の光ビームは円対称で、目印になるものは全くない。ビームに検出容易な回転方向のマーカを付けるにはどのような方法があるのだろうか。長距離伝搬を前提としたものであるため、当然それらに付けられるマーカは伝搬に不変でなければならない。

Laguerre-Gaussian (LG) ビームを出発点に考えなければいけないことは明らかである。LG ビームは伝搬不変であり、エネルギーの光軸近傍集中と保存の性質を有し、種々の波面を合成するための基底としての整って体系的な数学的表現をもつ。



(a) 強度分布 (b) 複素振幅分布

図1 遠隔6軸変位計測に用いる18次の多重零点光ビーム。位相をカラーで表現している。12個の零点を最外円周に、6個の零点をその内側の円周上にもち、18個の零点の繰り返し測定による並進成分の抽出と、最外周輪郭部の 36π の位相回転による高感度な回転角度検出が可能である。

2.2 LGビームの多重零点ビーム表現

LGビームとは、軸平行(paraxial)波動方程式の基本解を構成する伝搬不変解(波面の振幅位相分布が伝搬距離によらず相似)のことである。含まれる光渦(optical vortex; OV¹³⁻¹⁵、位相特異点)の個数で系列付けされ、一意に決定される。また、これらの組み合わせで任意の波面が構成される。図1に、われわれのシステムで実際に測定に用いる波面の例を示す。次節で詳しく論じるように、それらの振幅位相分布は、ビーム径に応じた適切なスケージングの後、

$$G(r)p(\zeta), G(r) \equiv e^{-r^2/w^2}, p(\zeta) \equiv \sum_{n=0}^N c_n \zeta^n \quad (1)$$

のように、ガウス包絡 $G(r)$ と任意の多項式 $p(\zeta)$ の積で簡明に表される。ここで、 $\zeta = x + jy = r \exp(j\theta)$ は光軸(z 軸)を中心とする複素座標(j は虚数単位、 ζ は伝搬によるビーム径拡大のスケージングとGouy位相に起因する座標回転を含む)である。LGビームの含む光渦は多項式 $p(\zeta)$ の零点であり、 $p(\zeta)$ の係数を適切に選ぶことにより、任意の位置に生成することができる。このような形に組み立てられたLGビームの混合を、われわれは多重零点ビームとよぶ。多重零点ビームのそれぞれの零点の周囲では位相は左回りに 2π だけ回転し、振幅は零点をまたいで線形に変化する。 n 個の零点を囲む任意の経路上を1周すると、位相回転は増倍され、 $2n\pi$ だけの回転を示す。これらの性質により、多重零点ビームには豊富な幾何学的情報を符号化可能であり、マーカーとしての最適設計も随意に可能になる。

2.3 LGビームの複素座標表記

偏角方向に n 次、動径方向に p 次のLGビームは、ビームウエストを原点として伝搬方向を z 軸、それに直交する平面上の極座標を (r, θ) として

$$\begin{aligned} \text{LG}_p^n(r, \theta, z) = & \sqrt{\frac{2p!}{\pi(2p+|n|)!}} \left(\frac{\sqrt{2}r}{w(z)} \right)^{|n|} L_p^{|n|} \left(\frac{2r^2}{w(z)^2} \right) \frac{1}{w(z)} \\ & \times \exp \left\{ -\frac{r^2}{w(z)^2} + \frac{jk r^2}{2R(z)} + jn\theta \right. \\ & \left. - j(2p+|n|+1)\phi(z) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

と表される¹³⁻¹⁵。 $L_p^n(x)$ はラゲール多項式

$$L_p^n(x) \equiv \frac{e^x x^{-n}}{p!} \frac{d^p}{dx^p} (e^{-x} x^{n+p}) \quad (3)$$

z_R はレイリー距離

$$z_R \equiv \frac{\pi w_0^2}{\lambda} = \frac{k w_0^2}{2} \quad (4)$$

で、 w_0 はビームウエストにおけるビーム径、 $w(z)$ は伝搬方向に沿ったビーム径の分布で

$$w(z) \equiv w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2} \quad (5)$$

は、 w_0 を含めビーム断面を確率分布と考えたときの標準偏差の $\sqrt{2}$ 倍、 $R(z)$ は波面の曲率半径で

$$R(z) \equiv z \left\{ 1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2 \right\} \quad (6)$$

を示す。

上記で特に $p=0$ の場合を考え、複素座標を

$$\zeta \equiv \begin{cases} \frac{r}{w(z)/\sqrt{2}} e^{j(\theta-\phi(z))} & n \geq 0 \\ \frac{r}{w(z)/\sqrt{2}} e^{-j(\theta+\phi(z))} & n < 0 \end{cases} \quad (7)$$

と置くと、

$$\begin{aligned} \sqrt{\pi|n|!} \text{LG}_0^n(r, \theta, z) = & \frac{e^{j(kr^2/2R(z)-\phi(z))}}{w(z)/\sqrt{2}} e^{-\zeta \zeta^*/2} \zeta^{|n|} \\ = & A(r, z) G(|\zeta|) \zeta^{|n|} \end{aligned}$$

のように表される。ここで、 $A(r, z)$ は次数 n に依存しない距離に応じた振幅減少と球面位相、 $\phi(z)$ はGouy位相、 $G(r)$ は標準偏差1のガウス関数を表す。

2.4 発想は波動伝搬の複素座標表現から

前節の議論は、結果は了解できたとしても見通しが悪過ぎる。筆者の式(1)の着想は、問題の複素座標表現から始まった。ビーム伝搬はビーム中心に関して円対称な場の現象であり、このような場では、一般に複素座標を用いることが本質把握への近道である。

要点だけをかいつまんで述べると、ビーム伝搬を表現する近軸波動方程式

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} - 2jk \frac{\partial}{\partial z} \right) \psi(x, y, z) = 0$$

は、座標変換 $\zeta \equiv x + jy$ 、 $\zeta^* = x - jy$ により、

$$\left(2\frac{\partial}{\partial \zeta}\frac{\partial}{\partial \zeta^*}-jk\frac{\partial}{\partial z}\right)\psi(\zeta,\zeta^*,z)=0 \quad (8)$$

となる. この表現が簡素化簡明化につながる理由は, 上式が ζ と ζ^* に関する1次の微分方程式に減じたこと, 解に現れるガウス関数が, 同じく ζ, ζ^* の関数として $\exp(-\zeta\zeta^*/w^2)$ と表され, 指数部が同様に ζ, ζ^* の1次関数に減じたことに由来する.

2.5 多重零点光ビームとその特徴

振幅を適切に調整された $n > 0$ 次の複素座標表現LGビームの重ね合わせを考える. それぞれのLGビームの係数を $c_n(n=0, 1, 2, \dots, N)$ とすると, $A(r, z)G(|\zeta|)$ が共通項として括り出され, 係数 c_n をもつ ζ の多項式(零点多項式)が分離され, その零点 $\zeta_n(n=1, 2, \dots, N)$ を用いた同値な因数分解表現

$$G(r)\sum_{n=0}^N c_n \zeta^n = c_N G(r) \prod_{n=1}^N (\zeta - \zeta_n) \quad (9)$$

に基づき, 以下に示すような性質を有する.

1) 伝搬不変性: 伝搬に応じた球面位相に関係する $A(r, z)$ を除けば, 波面は式(9)のみによって表され, それは ζ の z に依存するスケール変化とGouy位相に依存した座標回転を除いて変化することがない.

2) 零点分布と多項式の1対1対応: 多重零点ビームの零点は零点多項式の零点に一致し, その零点のみに限られる. なぜなら

$$|A(r, z)G(|\zeta|)| = \frac{|e^{j(kr^2/2R(z) - \phi(z))}|}{w(z)/\sqrt{2}} e^{-\zeta\zeta^*/2} = \frac{\sqrt{2}}{w(z)} e^{-\zeta\zeta^*/2} > 0$$

は新たな零点を生成することがない.

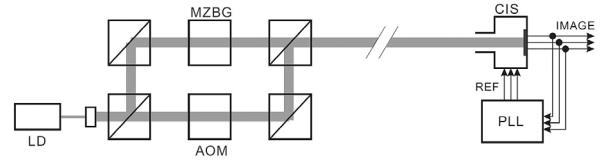
3) 零点分布の自由度と一意性: 代数学の基本定理により, N 次の多項式の零点は常に N 個存在し, それらは係数 $c_n(n=0, 1, 2, \dots, N-1)$ により一意に決定される. また, 係数の与え方により零点の分布は任意の位置に配することができる.

4) フーリエ変換不変性: 波面の振幅位相分布の二次元フーリエ変換は, 定数とスケールを除いて, もとの分布に一致する. これはビームの伝搬不変性に数学的には等しいが, 実用上でも, イメージセンサーにより検出された波面の画像解析と零点検出に, 二次元FFTや多重解像度解析などの多様で高度な手法の導入を可能にする.

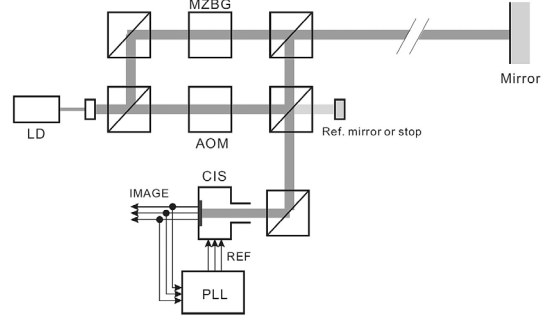
3. 6軸変形計測の方法

3.1 全体構成

図2(a), (b)は, 2ノード(基幹ノードと折り返しノード)間での6軸変形計測の方法を示したものである^{4-6, 8)}. 2ノード間の相対的変位, すなわち並進の3自由度($d_x, d_y,$



(a) d_x, d_y, θ_z の測定



(b) d_z, θ_x, θ_y の測定

図2 遠隔6軸変形計測の構成図. z : ビームの伝搬方向軸, x, y : 伝搬方向に垂直な座標軸, d_x, d_y, d_z : x, y, z 方向の並進変位, $\theta_x, \theta_y, \theta_z$: x, y, z 軸回りの回転変位, LD: レーザーダイオードまたはガスレーザー, AOM: 音響光学変調素子, MZBG: 多重零点ビーム発生器(計算機プログラム), CIS: 時間相関イメージセンサー, PLL: 位相同期参照信号発生器.

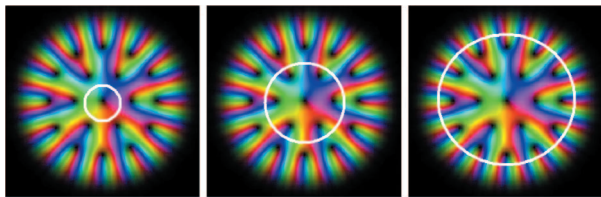
d_z)と回転の3自由度($\theta_x, \theta_y, \theta_z$)を, 以下の2ステップで測定する.

図2(a)に示す最初のステップでは, 基幹ノードから多重零点ビームとヘテロダイン復調用の参照ビームを重ね合わせて送出する. 折り返しノードでは, 伝搬してきたビームの断面の振幅位相分布を撮像し, これを画像解析する. 振幅位相分布のヘテロダイン復調撮像には, 後に述べる時間相関イメージセンサー¹⁶⁻¹⁸⁾を用いる. 横方向変位 d_x, d_y は零点配列のシフトと零点付近の複素振幅の線形変化から, ビーム伝搬軸回りの回転変位 θ_z はビーム中心を中心とする同心円上の回転的な位相シフトから求められる^{9, 10)}.

図2(b)に示す第2ステップでは, 折り返しノードの前面に反射鏡が導入され, 反射されて戻ってきた光ビームが基幹ノードで撮像され画像解析される. 回転変位 θ_x, θ_y は光でこの原理に従い戻りビームの向きを変位させ, 零点配列や位相分布の横方向シフトとして検出される. 距離方向の変位 d_z の測定は, 往復伝搬光路長の変化による伝搬時間シフトによる.

3.2 多重零点ビームの設計

後述する手段で, 波面は複素数として検出する. 横シフトによる $d_x, d_y, \theta_x, \theta_y$ の測定には零点をマーカーとして用いる. 孤立した1次の零点 ζ_n の付近では, 複素振幅分布 $\zeta - \zeta_n$ は, 実部 $x - x_n$ と虚部 $y - y_n$ がともに線形に零交差する¹⁹⁾. この関係を利用して変位を精密測定する. ビーム内



(a) $2\pi/\text{周}$ (b) $12\pi/\text{周}$ (c) $38\pi/\text{周}$

図3 同軸多重位相回転による θ_z の測定. (a) $2\pi/\text{周}$ (b) $12\pi/\text{周}$ (c) $38\pi/\text{周}$. 1周あたりの位相回転が多いほど測定精度が上がるが、位相決定の曖昧さも増大する. これを内周から3段階の測定で回避する.

の零点の数だけの繰り返し測定のため、1次零点をなるべく均一に配置する. またイメージセンサーのダイナミックレンジ有効活用のため、それらの周囲での振幅もなるべく均一化する. この結果が、図1 (a) の蓮根状のビーム断面となる.

θ_z の測定には同軸円周上の位相分布をマーカーとして用いる (図2および図3). 精度向上には、円周方向の位相勾配すなわち1周あたりの位相回転が大きいほどよい. 正則関数 $p(\zeta)$ の性質から、1周あたりの位相回転はその円が含む零点の数の 2π 倍であり、よって内側の零点の数が多いほどよい. そこで零点を同心円上に配置し、その隙間の零点のない円周状の領域で位相を測定する. 内側の円周では1周あたりの位相回転量が少なく、精度は低いが大変位時に位相の曖昧さは生じにくい. 外側の円周では内側での測定結果を利用することで位相の曖昧さを回避して高精度を得る.

ただし、零点数が多いと、ビームサイズとその距離に応じた拡大率が大きくなる. 実機応用の設計には、これらのトレードオフも考慮する必要がある.

3.3 ヘテロダイン干渉検出と時間相関イメージセンサー 波面の複素振幅分布の検出はヘテロダイン干渉による.

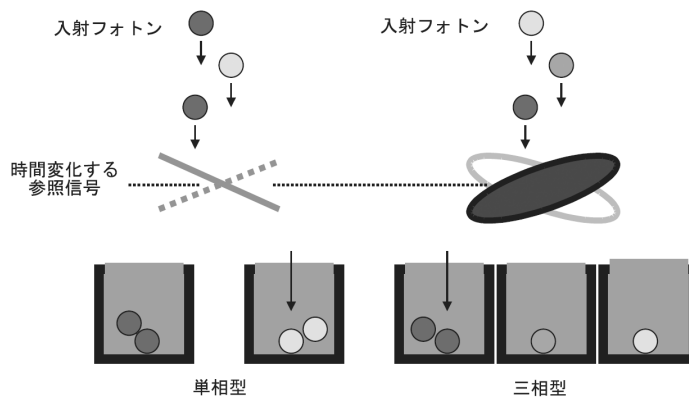


図4 時間相関イメージセンサーの動作原理の模式図. 三相型では、3個のコンデンサーに光電流を、参照信号で制御された時間的に変化する分流比で蓄積する.

同一光軸上に周波数シフトしたビームを重ねて送出するとそれらの間の位相差に応じて時間変動する干渉縞が生じ、これを筆者らが開発した時間相関イメージセンサーによって振幅位相復調する.

時間相関イメージセンサーは、明暗変動する光の分布に関して、直交相関検出を二次元並列的に行う半導体集積デバイスである. 通常のイメージセンサーは、1フレーム時間にたまったキャリアの総量を読み出すだけなので、その時間内での光の時間変化の情報は得られない. 対照的に時間相関イメージセンサーでは蓄積するコンデンサーは複数あり、それらに光キャリアをアナログ比で分配して蓄える. 図4に示す模式図のように、この分配比が外部の参照信号に比例して任意に変更できるようになっている. 分配比を変えるゲート電圧に三相の正弦波参照信号を供給すると、時間変動する光電流 $f(t)$ によって蓄積される電荷 Q_1, Q_2, Q_3 から

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ 0 & -1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} = \rho \int_0^T f(t) \begin{bmatrix} 1 \\ \cos(\omega t) \\ -\sin(\omega t) \end{bmatrix} dt \equiv \begin{bmatrix} g_0 \\ Rg_\omega \\ \mathcal{I}g_\omega \end{bmatrix} \quad (10)$$

のような演算で、直流と周波数 ω のフーリエ成分が得られる (ρ は MOS トランジスタのゲート特性により決まる定数、 T はフレーム時間).

4. システム構成と検証実験

4.1 試作システム

提案法の有効性を確認するため、図5に示す試作システムを開発した. 実験装置は、レーザー光を2つに分岐しそ

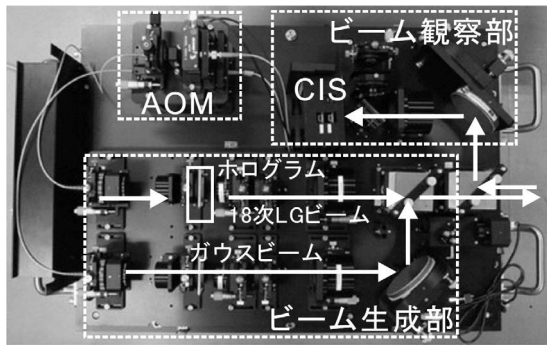


図5 試作システム（基幹ノード）の概略構成と写真.

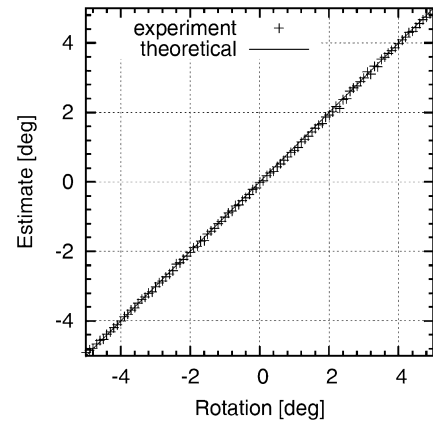
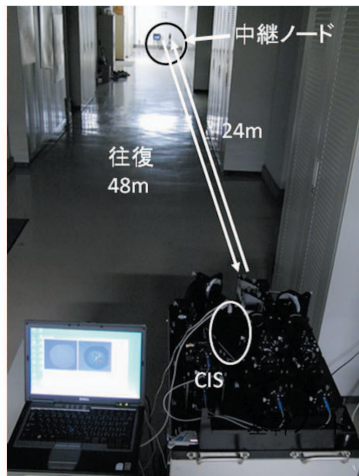
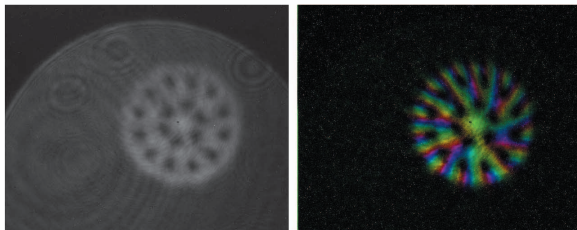


図7 光軸周り回転変位 θ_2 の検出実験結果. 横軸は微動台の回転角, 縦軸は推定角度. -5 度から 5 度まで 0.1 度ずつ回転しビームの回転角度を推定した.

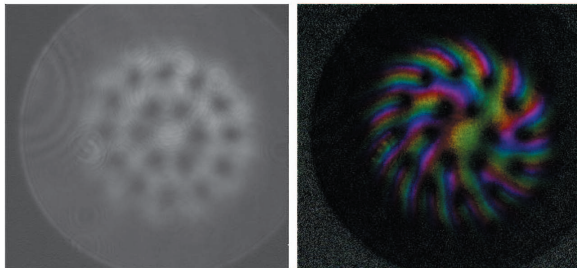


(a) 実験状況



(b) 強度画像 (24m)

(c) 相関画像 (24m)



(d) 強度画像 (48m)

(e) 相関画像 (48m)

図6 屋内での遠隔伝搬実験. 48 m の距離でも 18 個の零点を明瞭に観察できている. (a) 往復 48 m の実験の様子, (b) 24 m 伝搬後の折り返しノードで検出された多重零点ビームの強度画像, (c) 同じく相関画像, (d) 48 m 伝搬後の基幹ノードで検出された多重零点ビームの強度画像, (e) 同じく相関画像.

それぞれ AOM を用いて異なる周波数 ω_1, ω_2 だけ周波数シフトを起こした後, 一方のビームにはホログラムを用いて 18 次零点光ビームを生成し, もう一方を参照波面として Gauss ビームのまま伝搬させ, 折り返しノードおよび基幹ノードに設置されたカメラ撮像面上で干渉させることにより差周波数 $\omega_2 - \omega_1$ で時間変調された 18 次零点光ビームの複素波面を観察する構成となっている.

4.2 技術的要点と現システムの課題

光学系にはそれなりの配慮が必要だが, 多重零点ビームは十分安定に機能することがわかり, その将来性に筆者も大いに感銘を受けた. しかし, 短期間での開発もあって, レーザダイオードでは十分な干渉性や安定度が得られず, He-Ne レーザ使用のため装置が大型化した. また, 数 10 m 程度の遠隔測定を想定しても, 送受ビーム径が 30 mm 以上必要であり, 光学系が大きくなり, 高精度な光学素子を必要とした.

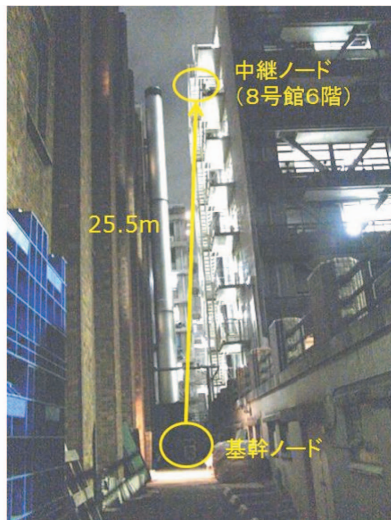
4.3 実験

4.3.1 屋内での遠距離伝搬実験

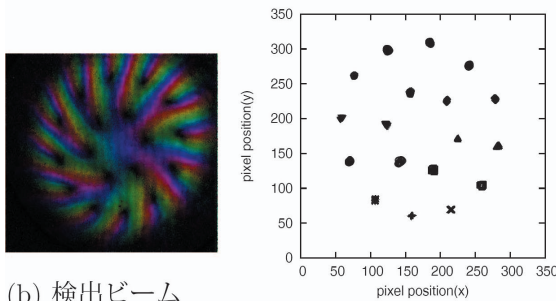
試作システムを用いて, 屋内での遠距離伝搬試験の撮像例を図6に示す. 実験では, 廊下で片道 24 m で往復伝搬させた 18 次零点光ビームの撮像を行った. 伝搬距離によってビームのサイズは変化するが, 18 個の零点がその配置を変えることなく 18 次零点光ビームの相似形を保ったまま安定に伝搬していることが確認できた.

4.3.2 光軸周り回転 θ_2 の検出

室内において, モーター駆動のゴニオステージを用いてカメラを回転し, 多重零点光ビームの相対的な回転角度検出の評価を行った. 結果を図7に示す. 実験は 18 次零点光ビームの中央に零点が追加された 19 次零点光ビームを用いた. カメラの回転角度と推定角度はほぼ一致し, 標準偏



(a) 実験状況



(b) 検出ビーム

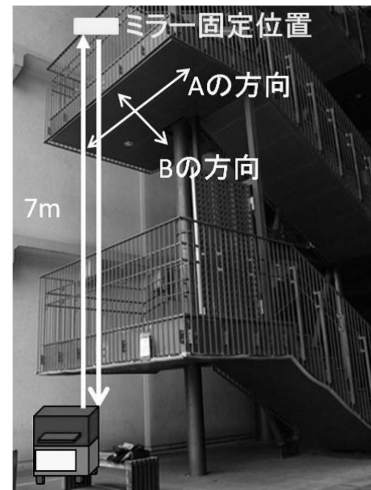
(c) 零点位置の散布図

図8 遠距離零点検出の戸外実験. ミラーを用いて多重零点光ビームを垂直に出射し, 6階に設置した折り返しノードで撮像した. 戸外でも18個の零点を明瞭に観察できている. (a) 実験環境, (b) 撮像された多重零点光ビーム, (c) 画像中の100フレーム分の18個の零点位置.

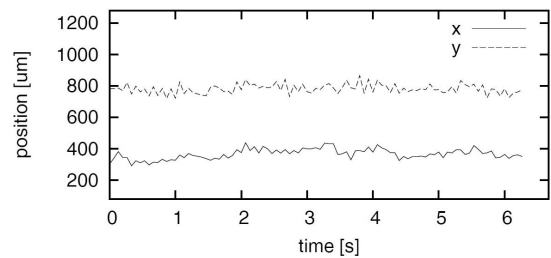
差 0.044 deg が得られた. 多重零点ビームによる円周方向の安定した位相分布の付与によって, 光軸周りの微小回転角度の測定が十分に実現可能なことを示している.

4.3.3 フィールド実験1

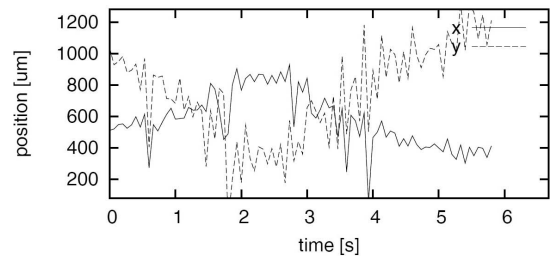
フィールド上での実証実験として, 東京大学本郷キャンパス工学部8号館6階の外階段手すりに折り返しノードを取り付け, ビームの零点位置の検出が可能かどうかを検証した. 実験環境や撮像された光ビームを図8に示す. 地上から折り返しノードまでの距離は約25.5mである. 18個の零点が個別にプロットされていることから, コントロールされていない実環境であってもすべての零点が安定して検出可能であることが確認された. 零点検出のばらつきはすべての零点でほぼ同一で, その標準偏差は1.7画素(1画素 $12\mu\text{m}$)程度であった. ばらつきの主要因は戸外環境での波面のゆらぎとみられる⁵⁾.



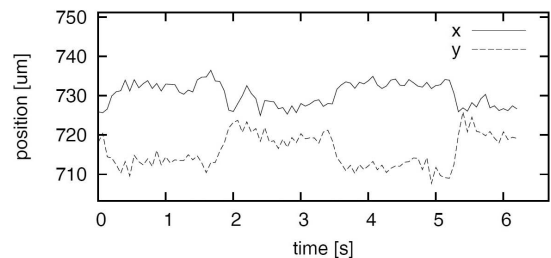
(a) 実験状況



(b) 平常時の戻りビームの位置変化



(c) 歩行による変形時の位置変化



(d) わずかな負荷変動に対する位置変化

図9 鉄骨階段の微小回転変位 (θ_x, θ_y) 計測結果. 成人男性一名の体重による鉄骨の歪みを18次零点光ビームのビーム中心の位置の変位として計測した. (a) 実験環境, (b) 静止時の参照データ. 伝搬ゆらぎ等による数 μm 程度の変動が観測されている. (c) A方向にゆっくりと1往復した場合, (d) B方向に瞬時移動・静止を繰り返した場合.

4.3.4 フィールド実験2

最後に、鉄骨階段踊り場の手すりに折り返しミラーを取り付け、反射光位置の変化から鉄骨階段の動的歪みを検出した実施例を図9に示す。基幹ノードから射出した光ビームは折り返しミラーを取りつけた踊り場の傾き変化によってわずかに伝搬方向を変えて基幹ノードに戻るため、基幹ノード撮像面上での位置がシフトする。グラフは横軸が時間を表わし、縦軸が基幹ノード撮像面上でのビームのシフト量(全零点での平均)を表わしている。横シフト自体の検出精度としては継続的に数 μm 程度が、光でこの原理による回転検出に関しては、身体の移動により鉄骨に生じた $1.5\ \mu\text{rad}$ 程度の傾き変化が計測できていることが示されている。

本研究にご協力いただいた三菱電機先端技術総合研究所の仲嶋様、佐野様、岡様、時間相関イメージセンサー開発にご協力いただいた静岡大学川人教授ならびに浜松知的クラストの方々には深謝いたします。

文 献

- 1) J. J. Lee and M. Shinozuka: "A vision-based system for remote sensing of bridge displacement," *NDT & E Int.*, **39** (2006) 425-431.
- 2) K. T. Park, S. H. Kim, H. S. Park and K. W. Lee: "The determination of bridge displacement using measured acceleration," *Eng. Struct.*, **27** (2005) 371-378.
- 3) S. Ando, S. Sato, T. Kurihara and I. Fujimoto: "Realtime tracking and amplitude/phase imaging of multizeros optical beam using correlation image sensor," *Optics & Photonics Japan (2007)* pp. 606-607.
- 4) 佐藤世智, 栗原 徹, 安藤 繁: "多重極ビームの振幅・位相映像化による多自由度変位計測", 第24回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム(2007) pp. 73-76.
- 5) 佐藤世智, 藤本生松, 栗原 徹, 安藤 繁: "多重極光ビームを用いる遠隔6軸変位計測(第1報) —多重極ビームの生成と実時間映像検出—", 第24回センシングフォーラム講演予稿集(2007) pp. 31-36.
- 6) 佐藤世智, 藤本生松, 栗原 徹, 安藤 繁: "多重極光ビームを用いる遠隔6軸変位計測(第2報) —多重極ビームの数理的表現と検出理論—", 第24回センシングフォーラム講演予稿集(2007) pp. 49-53.
- 7) S. Sato, I. Fujimoto, T. Kurihara and S. Ando: "Optical vortex and correlation image sensor for networked deformation sensing of infrastructures," *Proc. INSS 2008* (2008) pp. 39-42.
- 8) S. Sato, I. Fujimoto, T. Kurihara and S. Ando: "Remote full-axis deformation sensing with optical vortex beam for health monitoring of infrastructures," *3rd Int. Conf. Sensing Technology (ICST)* (2008) pp. 452-456.
- 9) S. Ando, S. Sato and T. Kurihara: "Real-time tracking experiment of higher-order Laguerre-Gaussian beam for remote six-axis deformation sensing," *Proc. Int. Conf. Networked Sensing Systems (INSS)* (2009) pp. 106-109.
- 10) 安藤 繁, 佐藤世智, 栗原 徹: "多重零点ビームの実時間振幅位相撮像とパラメータ抽出", 第56回応用物理学関係春期連合講演会, 1a-K-8 (2009).
- 11) 栗原 徹, 齊 宇嵐, 安藤 繁, 佐野恵美子, 仲嶋 一: "多重零点光ビームを用いる遠隔6軸変位計測—小型実証実験システムの開発—", 第16回パターン計測シンポジウム(2011) pp. 13-20.
- 12) Y. Qi, T. Kurihara and S. Ando: "Open air experiment of long-range full-axis deformation sensing using multi-zeros Laguerre-Gaussian beam," *8th Int. Conf. Networked Sensing System (INSS)* (2011).
- 13) A. E. Siegman: *Lasers* (University Science Books, 1986).
- 14) D. Rozas, C. T. Law and G. A. Swartzlander: "Propagation dynamics of optical vortices," *J. Opt. Soc. Am. B*, **14** (1997) 3054-3065.
- 15) I. D. Maleev and G. A. Swartzlander: "Composite optical vortices," *J. Opt. Soc. Am. B*, **20** (2003) 1169-1176.
- 16) S. Ando and A. Kimachi: "Correlation image sensor: Two-dimensional matched detection of amplitude-modulated light," *IEEE Trans. Electron Devices*, **50** (2003) 2059-2066.
- 17) A. Kimachi: "Real-time heterodyne imaging interferometry: Focal-plane amplitude and phase demodulation using a three-phase correlation image sensor," *Appl. Opt.*, **40** (2006) 87-94.
- 18) S. Ando, T. Nara, N. Ono and T. Kurihara: "Real-time orientation-sensitive magneto-optic imager for leakage flux inspection," *IEEE Trans. Magn.*, **43** (2007) 1044-1051.
- 19) M. E. Pawlowski, Y. Sakano, Y. Miyamoto and M. Takeda: "Phase-crossing algorithm for white-light fringes analysis," *Opt. Comm.*, **260** (2006) 68-72.

(2013年10月28日受理)