

# スキャナミラーと同期したパルスレーザーによるミラー面の形状計測

先進理工学専攻 宮本研究室  
中澤 誠人

## 1 はじめに

光による物体形状計測は、物体に直接触れることなくその物体の形状を得ることができるため、物体への接触を好まない状況で威力を発揮する。これまでに光を用いた形状計測法が多く提案され、実用化されてきた。その中のひとつとしてレーザー干渉計による物体の形状計測がある。レーザー干渉計は光路長差をナノメートルオーダーの高分解能で検出することができ、微細表面形状を計測することができる。本研究では、MEMS( Micro-Electro-Mechanical Systems) スキャナミラーを測定対象としてレーザー干渉計を用いてミラー面の形状計測を行う。MEMS スキャナミラーとは半導体微細加工技術を応用して電子回路やアクチュエータなどを一体化したシステムである MEMS 技術で製造されたスキャンデバイスである。特長として小型軽量、高速動作、省電力であることが挙げられ、ヘッドアップディスプレイやレーザーポインタ、レーザープロジェクタなどに組み込まれている。MEMS スキャナミラーは小型軽量で高速に駆動するためミラー面に歪みが生じる可能性があり、そのミラー面の歪みに起因したスキャン画像の歪みが生じると考えられる。本研究では、MEMS スキャナミラーと同期したパルスレーザーを用いてミラー面の形状計測を行うことを目的とする。動作中の MEMS スキャナミラーは角度が時間によって変化し、またミラーの振れ角が大きいため一般には撮像素子や光学素子の配置を動かす必要がある。MEMS スキャナミラーと同期したパルスレーザーを用いることで MEMS スキャナミラーが特定の角度を向いているときの干渉縞を得ることができる。また、大きな振れ角でも MEMS スキャナミラーの出力直後の光波を撮像素子上に結像できるように光学系を設計することで、レンズや撮像素子の配置を変更することなくミラー面の形状計測を行うことにより、比較的簡素な光学系で MEMS スキャナミラーのミラー面の形状計測が実現できる。

## 2 フーリエ変換法による位相抽出

本研究ではフーリエ変換法を用いて干渉縞画像から位相抽出を行った。物体波に対して参照波が傾いて伝搬している状況を考え、物体波と参照波の複素振幅をそれぞれ  $u_o(x,y) \exp(ikz)$ 、 $u_r(x,y) \exp[i(k_x x + k_y y + kz)]$  とおく。ここで  $k_x$ 、 $k_y$  は物体波に対する参照波の傾きを表す。図 1 に物体波と参照波の傾きの関係を示す。

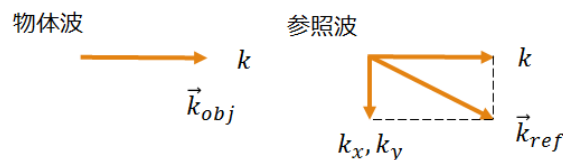


図 1: 物体波と参照波の傾きの関係

干渉縞の強度分布  $I(x, y)$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
I(x, y) &= |u_o(x, y) \exp(ikz) + u_r(x, y) \exp[i(k_x x + k_y y + kz)]|^2 \\
&= |u_o(x, y)|^2 + |u_r(x, y)|^2 \\
&\quad + u_o(x, y) u_r^*(x, y) \exp[-i(k_x x + k_y y)] + u_o^*(x, y) u_r(x, y) \exp[i(k_x x + k_y y)]
\end{aligned} \tag{1}$$

$|u_o(x, y)|^2 + |u_r(x, y)|^2$  のフーリエ変換を  $A(f_x, f_y)$ 、 $u_o(x, y) u_r^*(x, y)$  のフーリエ変換を  $B(f_x, f_y)$  とすると

干渉縞の強度分布  $I(x, y)$  のフーリエ変換は

$$\begin{aligned}
\mathcal{F}\{I(x, y)\} &= G(f_x, f_y) \\
&= A(f_x, f_y) + B\left(f_x + \frac{k_x}{2\pi}, f_y + \frac{k_y}{2\pi}\right) + B^*\left(f_x - \frac{k_x}{2\pi}, f_y - \frac{k_y}{2\pi}\right)
\end{aligned} \tag{2}$$

となる。ここで  $\mathcal{F}$  はフーリエ変換演算子を表す。 $(k_x, k_y)$  を適当に選べば3つの項を分離でき、2項目をフィルタして中心を原点に移動することで  $B(f_x, f_y)$  が得られる。 $g(x, y) = u_o(x, y) u_r^*(x, y)$  とおき、逆フーリエ変換すると

$$\begin{aligned}
\mathcal{F}^{-1}\{B(f_x, f_y)\} &= \iint_{-\infty}^{\infty} B(f_x, f_y) \exp\{i2\pi(f_x x + f_y y)\} df_x df_y \\
&= \iint_{-\infty}^{\infty} \iint_{-\infty}^{\infty} g(x', y') \exp\{-i2\pi(f_x x' + f_y y')\} \exp\{i2\pi(f_x x + f_y y)\} dx' dy' df_x df_y \\
&= \iint_{-\infty}^{\infty} \iint_{-\infty}^{\infty} g(x', y') \exp[i2\pi\{f_x(x - x') + f_y(y - y')\}] dx' dy' df_x df_y \\
&= \iint_{-\infty}^{\infty} g(x', y') \delta(x - x', y - y') dx' dy' \\
&= g(x, y)
\end{aligned} \tag{3}$$

となる。ここで  $\mathcal{F}^{-1}$  は逆フーリエ変換演算子を表す。 $g(x, y)$  の位相が物体波と参照波の位相差である。 $\arg\{g(x, y)\} = \phi(x, y)$  として  $g(x, y)$  の複素対数をとると

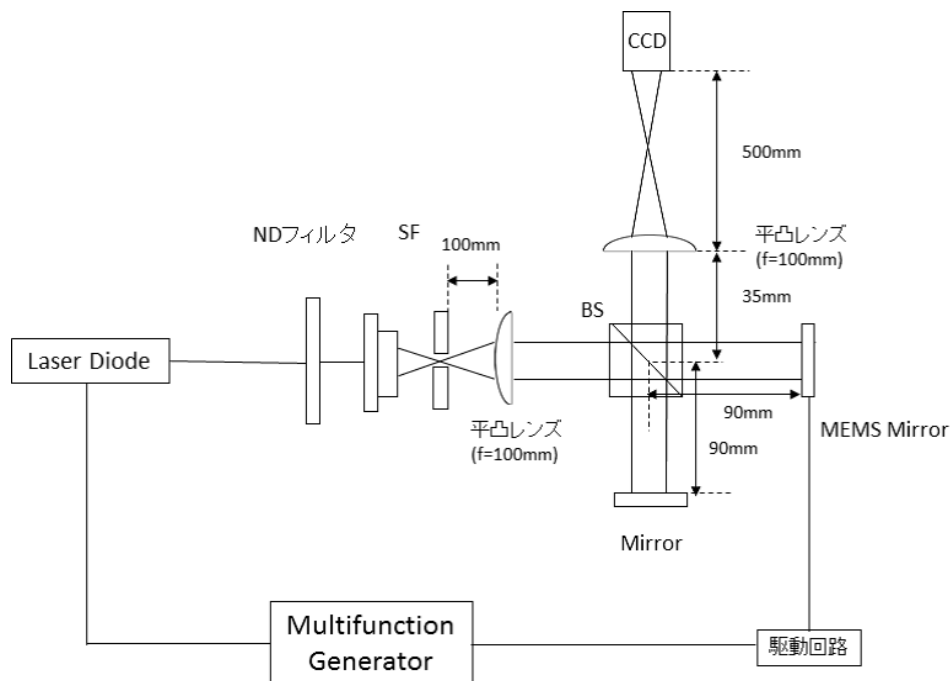
$$\log\{g(x, y)\} = \log\{|u_o(x, y) u_r^*(x, y)|\} + i\phi(x, y) \tag{4}$$

となり、虚部から物体波と参照波の位相差  $\phi(x, y)$  を求めることができる。

### 3 同期したパルスレーザーを用いた干渉計測

図2にパルスレーザーを用いた干渉光学系を示す。MEMS スキャナミラーは水平方向に 22075Hz で走査した。MEMS スキャナミラーの駆動回路から同期信号を取得し、これをトリガーとして信号発生器のバーストモードでパルス幅 25 ns および 50 ns の矩形波を発生させた。これを半導体レーザーの変調信号として用いることでパルス光を得た。光源からの光は空間フィルターと平凸レンズを用いて直径 10 mm の平行光を生成した。生成した平行光をビームスプリッターで2つの光路に分離した。一方は測定対象である MEMS スキャナミラーで反射する。もう一方は、参照用ミラーで反射する。結像用レンズ (f=100 mm、50 mm  $\phi$ ) を用いて MEMS スキャナミラーの出力直後の光波を 4 倍に拡大して撮像素子上に結像した。MEMS スキャナミラーの反射光 (物体光) と参照用ミラーの反射光 (参照光) とを干渉させ、干渉

縞画像を撮影した。撮影した干渉縞画像からミラーの縁にかからないよう 212pixel × 212pixel の矩形範囲を残して周囲の輝度値を 0 とした。フーリエ変換法 [1] を用いて位相差を抽出した。測定対象の MEMS スキャナミラー (OPUS Microsystems 社, W05-080910) の仕様を表 1 にまとめる。



SF( Spatial Filter) : 空間フィルタ  
BS( Beam Splitter) : ビームスプリッタ

図 2: パルスレーザーを用いた干渉光学系

表 1: 測定対象の仕様

|              |          |
|--------------|----------|
| ミラーサイズ       | 1.0 mm   |
| スキャン速度 (高速軸) | 22075 Hz |
| スキャン角度 (高速軸) | ±16.5 度  |
| スキャン速度 (低速軸) | 1387 Hz  |
| スキャン角度 (低速軸) | ±15 度    |
| 反射率 (15 度入射) | 80 %     |

#### 4 連続発振光を用いた干渉計測とパルスレーザーを用いた干渉計測の比較

MEMS スキャナミラー動作時について連続発振 (CW) 光を用いた干渉計測とパルスレーザーを用いた干渉計測をそれぞれ行った。それぞれの干渉縞から得られた空間スペクトルを図 3 に示す。連続発振光

を用いた場合は、水平方向に連続したスペクトルが確認された。パルスレーザー (パルス幅 25 ns) を用いた場合は、MEMS スキャナミラーのミラー面が特定の角度を向いているときの干渉縞を得ることができ、空間スペクトルに明確なピークが現れた。また可視度の概算を行った結果を表 2 に示す。連続発振光と比較して約 4 倍に向上した。以上の結果から動作中の MEMS スキャナミラーのミラー面の形状計測において同期したパルスレーザーを用いた干渉計測の有効性が示された。

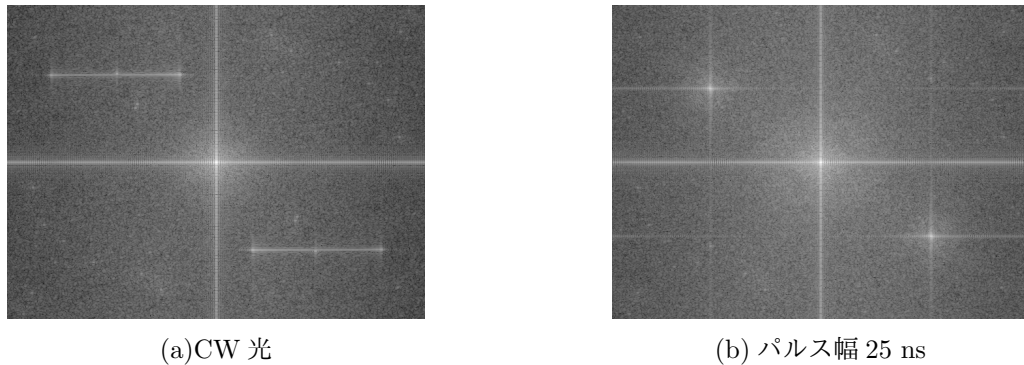


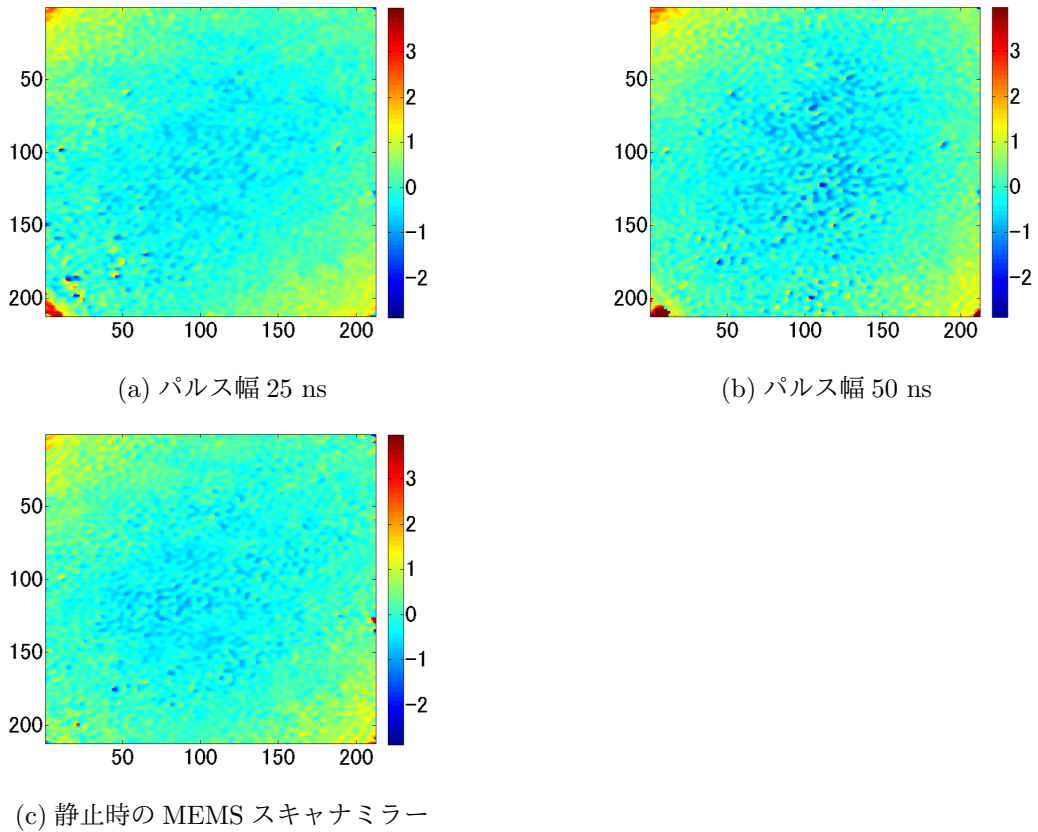
図 3: 空間スペクトル

表 2: 干渉縞の可視度の概算

|           | 空間周波数 0 成分の振幅値 | フィルタした空間周波数成分の振幅値 | 可視度 % |
|-----------|----------------|-------------------|-------|
| CW 光      | 14.28          | 0.236             | 3     |
| パルス幅 25ns | 23.61          | 1.538             | 13    |

## 5 平面度評価

パルスレーザー (パルス幅 25 ns および 50 ns) を用いた場合の位相値から平面アルミミラーの位相値を参照値として干渉計の歪み成分の除去を行った。得られた位相値を平面でフィッティングし、残差を平面からのずれと考えて平面度評価を行った。パルスレーザー (パルス幅 25 ns および 50 ns) を用いた場合の平面との残差を図 4 に示す。平均的な平面とのずれを 2 乗平均平方根 (Root Mean Square) として評価した結果を表 3 に示す。



Max: 3.9721(0.416  $\mu\text{m}$ ) Min: - 2.8704(- 0.301  $\mu\text{m}$ )

図 4: 残差 (干渉計の歪みを除去した場合)

表 3: 平面とのずれ (干渉計の歪みを除去した場合)

| 測定                | 平面とのずれ (RMS 値) |
|-------------------|----------------|
| パルス幅 25ns         | 6.9nm          |
| パルス幅 50ns         | 28nm           |
| 静止時の MEMS スキャナミラー | 20nm           |

RMS 値についてパルス幅 25 ns の場合で 6.9 nm 、 50 ns の場合で 28 nm となり  $\lambda/20$  以下の値が得られている。

## 6 トリガー遅延による MEMS スキャナミラーの傾きの変化

信号発生器でパルス幅 25 ns の矩形波を発生させた場合についてトリガー遅延を変化させたときの空間スペクトルの水平方向の中心周波数の変化を計測した。トリガー遅延と空間スペクトルの中心周波数の関係を図 5 に示す。

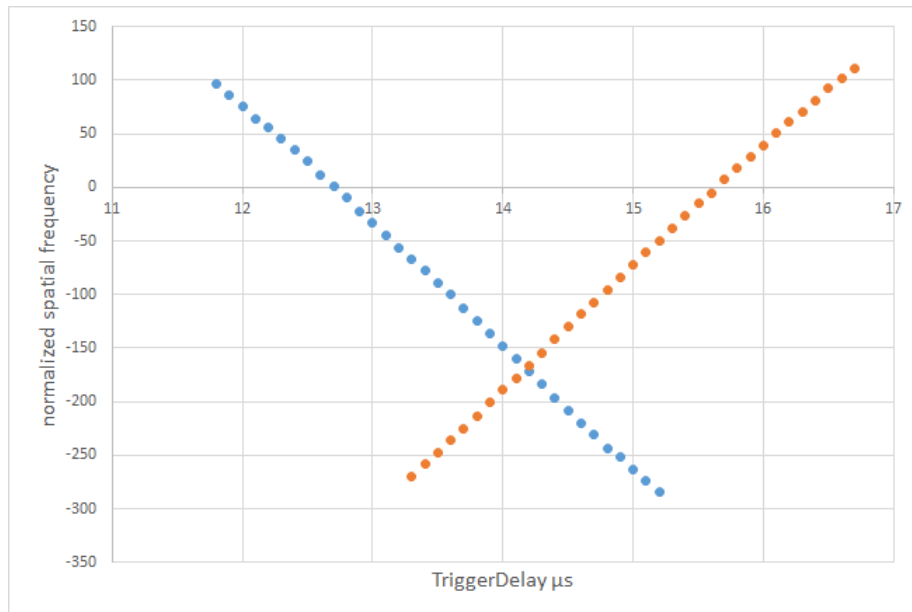


図 5: トリガー遅延の変化に対する空間スペクトル領域における水平方向の中心周波数の変化

信号発生器のトリガー遅延の値を変化させることにより測定対象の位相分布を含んだスペクトルが水平方向に移動していることが確認できる。これは MEMS スキャナミラーの角度変化が反射光の伝搬方向の変化として見えていると考えられる。これにより様々な傾きの状態の MEMS スキャナミラーの形状計測が可能であることが分かった。

## 7 結論

本研究では、MEMS スキャナミラーと同期したパルスレーザーによるミラー面の形状計測を行った。動作中の MEMS スキャナミラーのミラー面の形状計測が可能であることが分かった。また測定系の問題点について検討を行った。今後の課題として光学系の改良を行い、様々な傾きの状態の MEMS スキャナミラーの形状計測を行っていく。

## 参考文献

- [1] M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," J. Opt. Soc. Am. A **72**, 156-160 (1982).
- [2] 和田篤, 「位相特異点を持つ光ビームの発生と伝搬に関する研究」, 電気通信大学博士論文 (2006).
- [3] J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics," McGraw Hill (2000).