

## レーザービームの連続走査による FMCW 法を用いた 3 次元物体形状測定の高速度化

小西朋春・長坂揺月・飯山宏一（金沢大学）

## 1. はじめに

FMCW (Frequency-Modulated Continuous-wave) 法を使用した光距離測定システムは、光周波数掃引された光源と干渉計によって構成される。干渉信号は、参照光と測定対象からの反射光の光路長差に比例したビート周波数をもつ。レーザー光の光周波数が対称三角波で掃引されると、ビート周波数  $f_b$  は、

$$f_b = \frac{4nf_m\Delta F}{c}L \quad (1)$$

となる。ここで、 $L$  は測定対象までの距離、 $n$  は屈折率、 $c$  は真空中の光速、 $f_m$  はレーザーの光周波数掃引の変調周波数、 $\Delta F$  は光周波数掃引幅である。干渉信号を周波数解析することによりビート周波数を推定し、測定対象までの距離が測定される。

FMCW 光距離測定システムは、レーザービームを空間的に走査させることで 3 次元の物体形状測定に適用することができ、 $10 \mu\text{m}$  未満の精度での 3 次元物体形状測定が容易に実現されている [1-2]。しかし、3 次元物体形状の測定速度は、レーザービームの走査に使用するガルバノミラーの応答遅延によって制限される。本研究では、ガルバノミラーを連続的にスキャンすることによって、3 次元物体形状測定の高速度化を提案する。

## 2. 手法

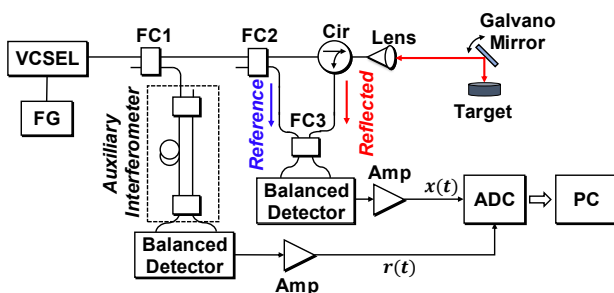


図1 3次元物体形状測定システムの構成

図1に3次元物体形状測定システムの構成を示す。光源には波長  $1310 \text{ nm}$  の面発光レーザー (VCSEL) を使用し、レーザーの駆動電流を三角波で変調することで光周波数を掃引する。レーザー光は、サーキュレーター (Cir) から測定対象に出射される。測定対象からの反射光は、FC2 を通過した参照光と干渉する。

駆動電流変調によるレーザーの光周波数掃引はレーザーの応答遅れのために非線形性となり、FMCW 法によって測定される距離の分解能と精度は大きく劣化する。この光周波数掃引の非線形性を補償するため、 $k$ -サンプリング法を使用した。すなわち、補助干渉計を設け、その干渉信号  $r(t)$  で干渉信号  $x(t)$  をサンプリングすることで、ビート周波数の時間変動を補償することができる。ビート信号は、FFT によって周波数解析され、ビートスペクトルが得られる。ここで、ビート周波数は、FFT の

周波数分解能の倍数であるため、ビートスペクトルのピークパワー付近を 2 次近似することで、ビート周波数を推定した。

従来は、ガルバノミラーをステップ状にスキャンしたが、応答遅延により測定速度が  $f_m = 1.4 \text{ kHz}$  に制限された。本研究では、ミラーを連続的にスキャンすることでガルバノミラーのステップ応答遅延を補償した。

ガルバノミラーの連続スキャンにより、距離測定中にビーム位置が変化するが、変調信号の対称度を小さくすることで、ビーム位置の変化の影響を小さくし、高速かつ高精度な 3 次元物体形状測定システムを実現した。

## 3. 結果

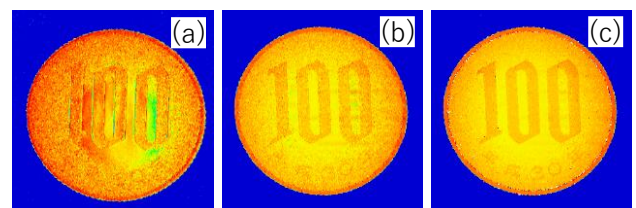


図2 100円玉の3次元物体形状測定結果

- (a) ステップスキャン、 $f_m = 2.0 \text{ kHz}$ 、対称度 50%  
 (b) 連続スキャン、 $f_m = 50.0 \text{ kHz}$ 、対称度 50%  
 (c) 連続スキャン、 $f_m = 50.0 \text{ kHz}$ 、対称度 15%

図2にステップスキャンと連続スキャンによる100円硬貨の3次元物体形状測定結果を示す。同図(a)より、ステップスキャンでは、ガルバノミラーの応答遅延によって測定精度が劣化していることがわかる。測定時間は  $80.9 \text{ s}$  である。一方、連続スキャンでは、同図(b)に示すようにミラーの応答遅延の影響が補償され、高精度な測定が実現されている。さらに同図(c)に示すように、変調三角波の対称度を小さくすることで、距離測定中のビーム位置の変化の影響を小さくし、より高精度な測定が可能となった。本研究では、変調周波数  $f_m = 50.0 \text{ kHz}$ 、対称度 15% で測定され、従来のステップスキャンの約 24 倍高速な  $3.3 \text{ s}$  での形状測定を実現した。

## 3. まとめ

FMCW 法を用いた 3 次元物体形状測定において、レーザービームの連続走査と変調波形の非対称化により、従来のステップスキャンに比べ、24 倍高速な形状測定を実現した。

本研究は、JSPS 科研費 20K04501 の補助を受けたものです。

## 参考文献

- [1] T. Hariyama, et. al, Opt. Express, vol. 26, no. 7, pp. 9285–9297 (2018).  
 [2] R.K. Ula, et. al, J. Lightwave Technol., vol. 37, no. 15, pp. 3826-3833 (2019).