

ピコ秒パルスレーザー干渉計を用いた厚み測定システム

奈良工業高等専門学校 電子制御工学科 ○熊本 光, 坂井 雄介 ◎押田 至啓

要旨

可干渉性の低いパルスレーザーの干渉を用い、干渉縞のコントラストがピークになる状態を自動的に検出することにより、透明物体の厚みを非接触で測定するシステムを考案した。干渉縞の画像データをコンピュータに取り込み、コントラストを自動的に検出し、ピーク位置すなわち、光路差がゼロになるように、干渉計中の鏡を移動させ、その移動量から透明物体の厚みを測定するシステムを、Labviewを用いて構築し、その動作を検証した。

1. 緒言

短パルスレーザーは、短いパルス幅にエネルギーを集中でき、高いエネルギー密度が得られる。この特徴を生かし、非接触の加工や医療など様々な分野において広く研究されている。

本研究では、可干渉性の低いパルスレーザーを用いて干渉計を構築し、干渉縞のコントラストがピークになる状態を自動的に検出することにより、透明物体の厚みを非接触で測定するシステムを考案した。

2. 原理

2.1. パルスレーザーの干渉

パルスレーザーは、発振周波数帯域が広いため、可干渉距離が短くなる。このため、干渉縞のコントラストが低下し、2光束干渉の場合、干渉縞のコントラストは、光路差0のときを最大値として、光路差の増大とともに低下する。本法では、Fig. 1のマッシュェンダー干渉計を構築する。光路①と光路②の光路差が0の場合はFig. 2(a)に示すように干渉縞が観測できるが、光路差が長くなると干渉縞は観測できなくなる。

2.2. コントラスト測定

コントラスト C は次式で与えられる。

$$C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (1)$$

ここで、 I_{max} は干渉縞中の光強度の最大値、 I_{min} は光強度の最小値である。

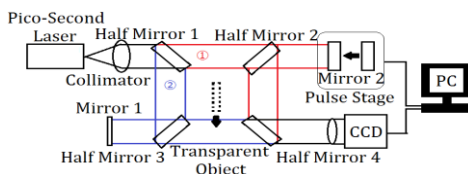
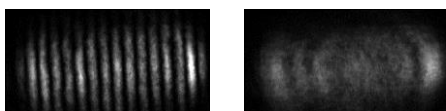


Fig. 1 厚み測定システム



(a)0の時 (b)長い時
Fig. 2 光路差の違いにおける干渉縞

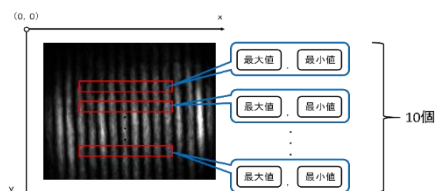


Fig. 3 干渉縞データ抽出方法

2.3. 厚み測定

Fig. 1において、光路①と②の距離が等しくなる時、コントラストがピークとなる。光路差を0に調整した光学系中の光路②に透明物体を挿入した時、透明物体の屈折率の影響で光路②の光路長が伸びる。Mirror 2を移動させ干渉縞のコントラストが最大になるように設定すれば、物体挿入時の光路②の光路長と光路①の光路長を同じ値にすることができる。このときのMirror 2の移動量が透明物体を挿入したことにより生じた光路長変化に対応する。このことから、Mirror 2の移動量 δL と透明物体の厚み L との関係は次式で与えられる。

$$L = \frac{n_a \delta L}{n_p - n_a} \quad (2)$$

ただし、 n_a は空気の屈折率、 n_p は透明物体の屈折率である。

従って、透明物体の屈折率 n_p が既知であれば、Mirror 2の移動量 δL から透明物体の厚み L を測定することができる。

3. 処理方法

3.1. コントラスト測定

Fig. 2に示すように、コンピュータ内に取り込まれた干渉縞画像から強度の最大値と最小値を求め、(1)式によりコントラストを演算する。しかし、Fig. 2からもわかるようにスペckル等の影響で誤差の大きい値が含まれている。これを除去するために考慮した方法を以下に述べる。

Fig. 3に示すように干渉縞データを抜き出す位置を10ヵ所指定し、その中の最大値・最小値をそれぞれ10個ずつ抜き出す。10個の値から2個の値を取り出し平均値を求め、その平均値を付近の値と比較する。その時の差が一定値を超えた場合、それらの値を外れ値と判断し除去する。この操作を4回繰り返す。信頼できる値だけを残して最後にそれらを平均する。最大値・最小値のそれぞれでこの操作を行い出てきた平均値を最大値・最小値とし、これらの値を(1)式に代入しコントラストの算出を行った。

3.2. コントラストピークの判別

透明物体を挿入前後のMirror 2の移動量に対するコントラストの変化をFig. 4に示す。Fig. 4において、パルスステージをその位置から Δx ずつ移動させながら測定したコントラストの値を $\alpha(x)$ 、 $\alpha(x+\Delta x)$ とする。 $\alpha(x+\Delta x) > \alpha(x)$ の時(ピークの左側)、 Δx を正の値とし、 $\alpha(x+\Delta x) < \alpha(x)$ の時(ピークの右側)、 Δx を負の値としMirror 2をそれぞれの方向に移動する。

この移動をくり返し $\alpha(x+n\Delta x) < \alpha(x+(n-1)\Delta x)$ となった時、 $\alpha(x+(n-1)\Delta x)$ をピーク値として検出する。ただし、コントラストの測定値にノイズが含まれるため、パルスステージを移動させ測

定したデータ 5 つ分の移動平均を計算し平滑化処理を行う。

3.3. システムのフローチャート

自動化したシステムのフローチャートを Fig. 5 に示す。これにより、厚み測定を開始から終了まで自動で進めることができる。

4. 実験

4.1. コントラスト測定プログラムの精度

本法の自動コントラスト測定プログラムが正しく動作するか、またその精度を検証する。

基準となるコントラスト 0.25, 0.5, 0.75, 1 の 4 種の干渉縞パターンをコンピュータで作成し、本法のプログラムによりコントラストを求めた。Tab. 1 に本プログラムにより得られた結果を示す。すべてのパターンにおいて±0.1%未満の誤差率で測定できていることから本プログラムの基本的なコントラスト測定は確認することができた。

4.2. 平滑化処理

本研究の自動縞解析システムを使用し、透明物体の厚み測定を行う場合にはコントラストが最大になる点を判定する必要がある。Fig. 1 の干渉計により Mirror 2 の移動量に対する干渉縞のコントラスト測定結果を Fig. 6 に示す。コントラストを測定した結果、移動距離 41μm で最大になっており、この位置で 2 光路の光路差が 0 になっていると考えられる。

しかし、Fig. 6 の結果ではノイズ成分のためピーク位置の特定が不正確である。そこで Fig. 6 で示されるデータを平滑化し、雑音成分の除去を行った。平滑化のために 5 個ずつのコントラスト値の移動平均をとった。これによって得られた結果を Fig. 7 に示す。

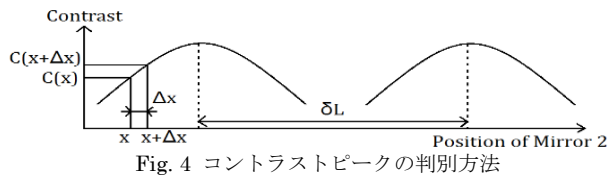


Fig. 4 コントラストピークの判別方法

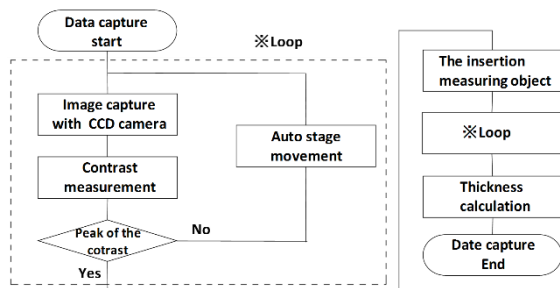


Fig. 5 自動厚み測定システムのフローチャート

Tab. 1 コントラスト測定検証実験結果

	experimental value	relative error
0.25	0.251969	0.78760%
0.50	0.503937	0.78740%
0.75	0.749020	-0.13067%
1.00	1.000000	0.00000%

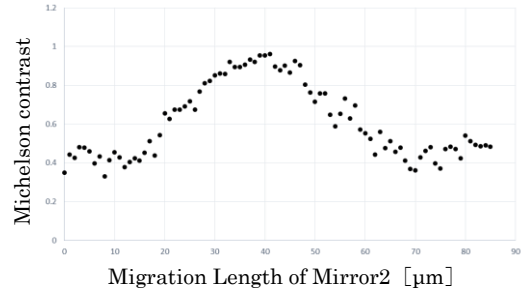


Fig. 6 コントラスト測定結果

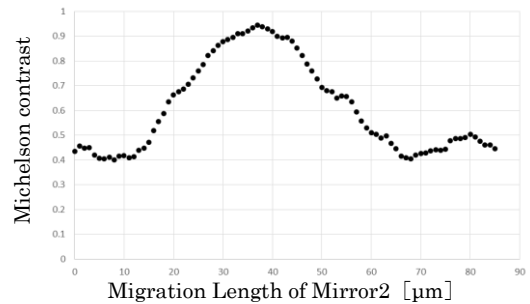


Fig. 7 コントラスト測定結果（移動平均処理後）

4.3. 厚み測定の結果

本法の自動厚み測定システムが正しく動作するか、またその精度を検証するために透明なガラスの厚み測定を行った。測定物体としては透明な厚さ 1.2 mm, 2.4 mm のスライドガラスを用いた。また、パルスステージの送り幅は 1 μm で行った。本システムにより得られた測定結果をマイクロメータにより測定した結果を Tab. 2 に示す。Tab. 2 に示す結果から厚みが大きくなるにつれ、誤差率が大きくなっている。誤差の要因として、透明物体の斜め入射や、測定物体の厚みのばらつきによるものと考えられる。

Tab. 2 厚み測定結果

theoretical value	experimental value	relative error
1.25mm	1.28mm	2.4%
2.42mm	2.57mm	6.2%

5. 結言

本法ではパルスレーザーの干渉を用いて自動的に透明物体の厚みを測定するシステムを作成した。自動的に干渉縞のコントラストを測定するとともに、ノイズを除去するシステムを作成した。また、透明ガラスの厚みを測定することにより本システムが正確に動作し、自動測定が可能であることを示した。

今後、本法の段差測定への応用も考えられる。

参考文献

- 1) Max Born, Emil Wolf: Principles of Optics, Cambridge University Press, (1999), 348-352
- 2) エミール・ウォルフ, 訳 白井智宏: 光のコヒーレンスと偏光理論, 京都大学学術出版会, (2009), 5-7