

ピコ秒パルスレーザ干渉計を用いた干渉計測に関する研究

奈良工業高等専門学校 電子制御工学科 ○林寛人 ◎押田 至啓

要旨

ピコ秒パルスレーザは、パルス性とバンド幅が広いいため干渉距離が短い。この性質を用い、パルスステージにより干渉計中の鏡を移動させ、干渉縞のコントラストが最大となる鏡の移動量から透明物体の厚みを測定する。Labviewを用いた干渉縞コントラスト自動測定、パルスステージ制御プログラムを作成し、自動測定システムを完成した。透明ガラス板を用いた測定実験結果を示す。

1. 緒言

超短パルスレーザは、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、可干渉性の低い光の干渉を用いた自動厚み測定の安定性と測定精度を上げることを目的として、自動コントラスト測定のアルゴリズムを提案し、自動厚み測定システムを構築する。

2. 原理

2.1 レーザの発振帯域と可干渉距離

光の干渉現象が観測される2光波間の光路差の最大値を可干渉距離という。Fig.1のマッハツェンダー干渉計では光源からの光波を光路1と光路2に分けた後の光路差により、干渉縞が生じる。この干渉計において、中心波長が λ 、スペクトル幅が $\Delta\lambda$ のハルスレーザを光源とした場合、可干渉距離 Δl は

$$\Delta l = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (1)$$

で表される。すなわち、光路1と光路2の間の光路差が Δl の値を超えると、2光波は干渉しなくなり、干渉縞は観測されなくなる。また、干渉縞のコントラストは、光路差0の状態を最大値として、この可干渉距離よりも光路差が大きい場合0となる。

2.2 厚み測定

応用性が高いため、本研究ではFig.1に示すマッハツェンダー干渉計を使用する。

光波を2つに分けて干渉させ、CCDカメラに映る干渉縞をLabVIEWのプログラムを用いてPCに取り込み、コントラストを測定する。

測定物を挿入した状態で、干渉縞のコントラストが最大となるように、パルスステージを調整する。次に測定物体を抜いて、コントラストが最大となるように、パルスステージを移動させる。パルスステージの移動量を δL とすると、測定物体の厚み L は

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

となる。ただし、 n_a は空気の屈折率、 n_o は物体の屈折率を表す。

3. 移動平均を用いたノイズによる影響の低減

光路差0の位置を検出するために、LabVIEWを用いて、干渉縞のコントラストを自動的に測定するプログラムを作成する。得られる干渉縞はスペckルノイズ等があるため、本法では入力画像の移動平均を行うことによりノイズの低減を行う。

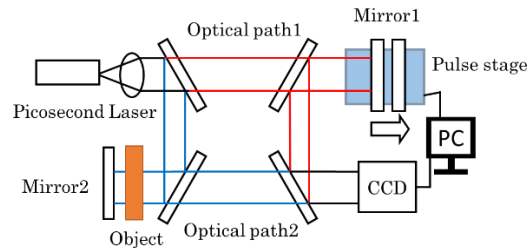


Fig.1 Mach-Zehnder interferometer

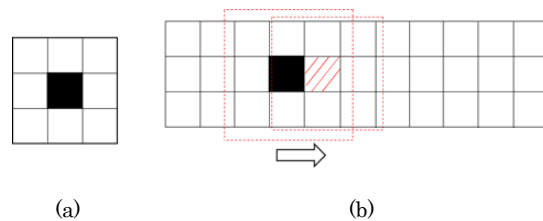


Fig.2 How to extract data in xy coordinate

まず、Fig.2(a)に示すように(奇数ピクセル)×(奇数ピクセル)のブロックを作り、この領域内の光強度データの平均値を中心ピクセルの光強度値とする。このブロックをFig.2(b)に示すようにブロック①からブロック②に1ピクセル移動し、同様に中心ピクセルの光強度を求める。これを順次繰り返すことにより、入力画像の移動平均を行う。

4. コントラスト測定プログラム

コントラスト測定では、輝度の測定を行う座標の範囲を定めて、前述のように、各点での輝度を求める。その中から、最小値 I_{min} と最大値 I_{max} を検出して、コントラストを次式より、算出する。

$$C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (3)$$

本法のコントラスト測定プログラムでは、異なる範囲でコントラストを測定し、干渉縞の広い領域のコントラストを求める。このために、Fig.3に示すように、異なる領域のコントラストの平均値を代表値とする。取り込まれた画像の1例をFig.3に示す。各ピクセルの座標を図に示すように (x, y) とする。

まず、コンピューター内に取り込まれた画像の (x_0, y_0) から (x_1, y_0) のオレンジの線で囲われた各点の光強度を前述のとおり移動平均により求め、その最大値と最小値を用い、式(3)からコントラストを算出する。その後測定範囲をy軸方向に1ピクセル移動させた (x_0, y_0+1) から (x_1, y_0+1) と (x_0, y_0+2) から (x_1, y_0+2) の範囲において、

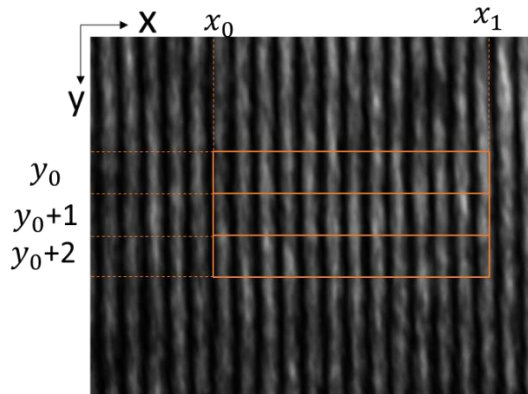


Fig.3 Contrast measurement

同様にコントラストを算出する。算出された3つのコントラストの平均値を干渉縞のコントラストの値とすることで、移動平均を行い、ノイズの低減を行う。

パルスステージを1パルスごとに移動させながら、各位置における干渉縞画像をパソコンに取り込み、上記の方法によりコントラストを測定する。コントラストがピークとなるパルスステージの位置を記録し、この値を用いて、厚み測定を行う。

以上の処理を自動的に行うプログラムをLabVIEWを用いて作成した。

5. 実験方法

5.1 可干渉距離の測定

本実験で用いたパルスレーザーの可干渉距離を測定する。コントラスト測定プログラムを用い、パルスステージを1 μm ずつ移動させ、各位置に対する干渉縞のコントラストを求めた。

本実験で用いたパルスレーザーの中心波長は $\lambda = 648\text{nm}$ 、スペクトル幅は $\Delta\lambda = 4.3\text{nm}$ であるため、式(1)に代入すると可干渉距離は390 μm となる。

5.2 厚み測定

本システムの妥当性を検証するために、オプティカルパラレルを測定物体とした厚み測定を行った。

干渉計としてはFig.1に示したものをを用い、光源としてはパルス幅40psのパルスレーザーを用いた。また、パルスステージの送り量は1パルス当たり1 μm で行った。

厚み測定では、測定物体を垂直に挿入するために、Mirror2の反射光とObjectの反射光が重なるように挿入する。自動厚み測定システムにより、3種のオプティカルパラレルの厚みの測定を行う。測定物体を挿入した場合としない場合のパルスステージの移動量から測定物体の厚みを式(4)より算出する。

6. 実験結果および考察

6.1 可干渉距離の測定

可干渉距離の測定結果をFig.4に示す。パルスステージの位置a, b, c, d, eのときに得られた干渉縞の画像をそれぞれ(a),(b),(c),(d),(e)に示す。図に示すようにコントラストがピーク位置に対し、パルスステージの移動量で左右対称になっている。

ピーク位置が光路差0の位置に対応している。この結果から可干渉距離を求めると402 μm となり、スペクトル幅から求めた値とほぼ一致している。

したがって、レーザーのバンド幅の影響で干渉縞の

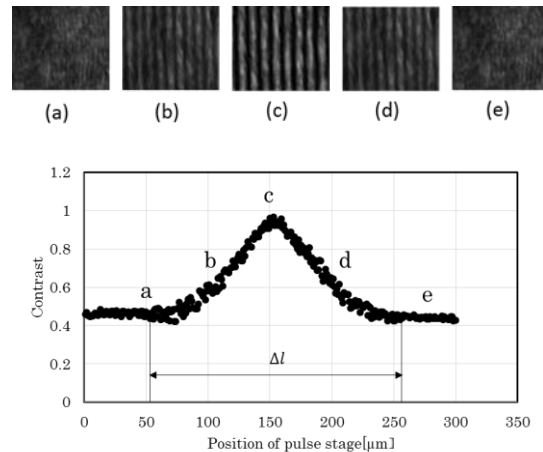


Fig.4 Changes in contrast

Tab. 1 Experiment of Thickness Measurement

theoretical value[mm]	experimental value[mm]	relative error
12.00	12.372	3.10%
12.12	12.486	3.01%
12.25	12.605	2.90%

コントラストが変化し、コントラストがピークの位置から光路差0の状態を検出可能であることが確認できた。

6.2 厚みの測定

3種類のオプティカルパラレルの厚み測定の結果をTab.1に示す。

各オプティカルパラレルの基準寸法に対し、3%程度の誤差で測定することができた。本法により、厚み測定が可能であることが検証できた。測定値が基準寸法より大きくなるのは、オプティカルパラレル表面に光波が垂直に入射していないために、見かけ上の厚みは大きくなったためであると考えられる。

7. 結言

本研究においては、コントラスト測定プログラムを作成し、垂直に測定物体を挿入するために、測定物体の反射光を利用して、厚み測定を行った。コントラスト測定では、移動平均を行うことによりノイズによる影響を低減させた。また、コントラストを広範囲で検出することで、可干渉距離を求め、可干渉距離が発振帯域により限定されることを確認した。

厚み測定では、作成した自動測定プログラムにより、厚みが測定できることが検証された。測定物体の反射光を利用することで、測定誤差を減らし、3%で安定したことから、測定精度が向上した。

今後、段差測定に本研究で構築した自動厚み測定システムが応用可能であると考えられる。

参考文献

- 1) エミール・ウォルフ：白井智宏訳、光のコヒーレンスと偏光理論、京都大学学術出版会（2009）、pp.5-7.