

## 工作機械の二次元変形の高精度実時間測定技術に関する研究

著者	安達 正明
雑誌名	平成13(2001)年度 科学研究費補助金 基盤研究(C) 研究成果報告書
巻	1999-2001
ページ	58p.
発行年	2002-03-01
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/48185">http://hdl.handle.net/2297/48185</a>



# 工作機械の二次元変形の高精度 実時間測定技術に関する研究

課題番号 11650120

平成11年度～平成13年度科学研究費補助金（基盤研究(c)(2)）研究成果報告書

平成14年3月

研究代表者

金沢大学 工学部 安達正明

著者 寄贈

## はしがき

工作機械の性能向上には、加工中における機械の熱や応力による2次元変形を実時間で定量的に評価して変形分布の解析を行い、そのデータを機械設計に生かして構造を改良することや、解析データをフィードバック機構を介し工作機械に戻し、変形を補正して加工を行う技術の開発が望まれる。しかし、実時間で定量的に2次元変形分布を評価する方法としては、1波長のレーザー光とCCDカメラを用いて2次元の変形分布をサブミクロン精度で得る方法しかこれまでには開発されておらず、この方法は非常に低速(0.001mm/sec)の変形しか対応できなかった。そのために、機械が被削材を削る始める瞬間など反作用力が大きく変化する時の変形の計測は困難だった。そこで本研究では、我々がこれまでに開発してきた1干渉画像から変形を定量評価する方法に、二波長のレーザー光を適用する方法を組み合わせ、高速の変形(0.1mm/sec)にも対応できる定量的変形評価方法を開発し、加工中における工作機械の変形を実時間で定量的にモニターするための基礎技術の確立を目的とした。

我々はこれまでの研究で「1波長のレーザー光を用い、機械の表面が変形した後で干渉画像をカメラで1枚のみ取り込んで、表面の変形を高精度に測定する方法」を開発している<sup>1)</sup>。開発した方法を用いると機械が連続的に変形し始めた後でも、連続取込みした干渉画像から変形の時間変化を高精度に測定できることも確認している。この本方法に2波長レーザー光を組み合わせ、2つの波長での2つの干渉画像を瞬間的(1msec以内)にほぼ同時にコンピュータに取り込めれば、速い変形であっても工作機械の変形量を高精度に測定できることが期待できる。そこで本研究では、2つの画像を瞬時にコンピュータに取り込む手法を確立し、研究してきた方法と2波長レーザー光を用いて、機械表面の高速な変形量の高精度測定法の研究と実験を行った。そして実験から、主として本方法の計測原理の有効性を確認し、測定可能な変形スピードの範囲、測定精度、そして変形スピードの限界や測定精度を決める因子についても検討した。

これらの研究の学術的な特色や独創的な点は以下のように要約できる。これまでは、物体表面の高速な移動を高精度でリアルタイムに測定するためには、非測定物にミラーを張り付け、反射されたレーザー光を参照光と干渉させ、ヘテロダインも

しくはホモサイン測定をする必要があった。しかしこの場合、非測定物は大きな物でなければならず、さらに、測定は1点に限られ、視野の総ての点での同時測定はできなかつた。

本研究で研究開発した方法では、機械表面（粗面）でレーザー光が反射される場合に生じるスペックルパターンを使うことができるのでミラーを張り付ける必要はなく、二次元的な視野内の総ての点について変形（移動）量の光干渉による高精度かつ定量的な測定ができる。その結果、構造体のたわみや変形スピードの測定、熱などによる膨張・収縮のダイナミックスを高精度に測定でき、工作機械の研究開発や性能向上に広く役立つことが期待できる。

#### 参考文献

- 1) M. Adachi, Y. Ueyama, K. Inabe, Automatic deformation analysis in electronic speckle pattern interferometry using one speckle interferogram of deformed object, Optical Review 4, 3, 429-432, 1997,

#### 研究組織

研究代表者：安達正明（金沢大学工学部教授）

#### 交付決定額（配分額）

（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合計
平成11年度	2,300	0	2,300
平成12年度	600	0	600
平成13年度	700	0	700
総計	3,600	0	3,600

## 研究発表

### (1) 学会誌等

- 1) 安達正明, 稲部勝幸: 連続取り込みスペックル干渉画像における初期位相測定法, 精密工学会誌, 66 巻, 9 号, 1419-1420 頁, 2000 年
- 2) M. Adachi, Jon N. Petzing, and D. Kerr : Deformation-phase measurement of diffuse objects that have started nonrepeatable dynamic deformation, Applied Optics, Vol. 40, No. 34, 6187-6192p, 2001

### (2) 口頭発表

- 1) 安達正明、北川洋一、松本哲也、中里一茂、稲部勝幸: 変形後のスペックル干渉画像を 1 枚だけ用いる定量的変形計測 -高精度化への改良-、2000 年度精密工学会秋期大会講演論文集、606P、1999 年
- 2) 安達正明、北川洋一、松本哲也、稲部勝幸: 位相シフト量に影響されないスペックル位相の抽出法 -粗面の連続微小変形量の高精度測定のための-、2000 年度精密工学会春期大会講演論文集、596P、2000 年
- 4) 岡田幸司、安達正明: 二波長スペックル干渉法における固体材料の変形測定、2000 年度精密工学会秋期大会講演論文集、484P、2000 年

### (3) 出版物

なし

## 研究成果による工業所有権の出願・取得状況

なし

# 目次

第1章 序論	1
第2章 変形測定の実理	
2.1 DSPI法	4
2.2 AOモジュレータ (AOM) の実理	6
2.2.1 AOM変調器の構成	9
2.2.2 AOM変調器の特性	11
2.2.3 回折効率	14
2.3 取り込んだ画像の解析方法	14
2.3.1 4画面位相シフト法	15
2.3.2 4画面位相シフト法を用いない初期位相測定法	16
2.3.2 その後の変形量の算出方法	18
第3章 実験装置及び実験方法	
3.1 実験装置	25
3.1.1 実験光学系	25
3.1.2 CCDカメラのRESTART RESET MODE	28
3.1.3 AOモジュレータの入力信号制御	29
3.1.4 光ファイバケーブル	35
3.2 実験方法	36
第4章 実験結果及び考察	
4.1 実験結果	37
4.2 測定精度向上への取り組み	45
4.2.1 測定における問題点とその改良方法	45
4.2.2 改良後の実験結果	47

第5章 結論	50
参考文献	51
付録 本研究に関する学会発表（口頭発表、論文発表）	52

# 第1章 序論

精密加工は現代社会で使われる殆どの製品に用いられており、高付加価値なハイテク製品と呼ばれるものになるに従いその心臓部には1ランク上の超精密加工が施されたものが多い。故に今後も精密加工の需要はさらに伸びることが予想され、同時にその加工精度も年毎に高いものが要求されていくと予想される。このような要求される加工精度の高度化に伴って、データ解析やフィードバック技術を用いてそれをスマートに実現する方向は高性能コンピュータが非常に導入しやすくなった現在、今後の必然的な流れと言える。しかしそれを可能にするためには、高い精度とスピードで構造体の変形を計測する高度な計測技術が要求されることも必然である。特に成長著しいナノテクノロジーという言葉に象徴される超精密部品の加工技術の分野においては、従来では考えられなかった0.1nmオーダーの高い計測制度が求められ始めている。

しかし、従来より工業における検査等に広く用いられてきた機械的な計測法は接触式であるため、応答速度が極めて遅く、計測範囲（ダイナミックレンジ）も限られ、さらには精度も劣るため、上記の要求を満たすことは極めて難しい。一方において、レーザの発達と共に近年広く用いられるようになった光計測法は、高感度、非接触、高速、電磁誘導の影響を受けないなどの特徴を備え、上記の要求に十分応え得るポテンシャルを持っている。

このレーザ応用計測法について以下に簡単に歴史を振り返りながら、構造体の変形の高精度高速測定技術の開発を目的とした本研究の位置づけをしてみる。

現在、レーザ応用計測の測定対象には、変位、変形、振動、速度、加速度等があり、これらを精密に計測するための技術として、ホログラフィ干渉法（変位、変形、振動等）、スペックル干渉法（変位、変形、振動、速度、加速度等）、モアレ法（変形等）、相関法（速度等）、格子状空間フィルタ法（速度等）、レーザドップラー法（速度等）などがこれまで開発されている。この中で構造体の変位変形の測定には、ホログラフィ干渉法、スペックル干渉法を基礎として発展した方法が広く用いられる。

ホログラフィの原理は1948年にGaborによって初めて発明された。しかし、応用

研究は長期間なされなかった。1962年にLeithとUpatoniaksは、その後発明されたレーザを用いて、2光束ホログラフィの研究を発表した。これをきっかけとして、ホログラフィは飛躍的に発展し始めることになる。ホログラフィを用いると、光波の振幅、位相ともに正確に記録することができ、そして再生できる。再生されたものを基準波面として、変位・変形後の物体からの散乱波と干渉させれば、物体の変位・変形の状態が計測できる。これがホログラフィ干渉法の原理である。ホログラフィ干渉法での、変位・変形の具体的計測法には、多重露光法と実時間法がある。一般的な干渉法が鏡面物体を対象とするのに対して、ホログラフィ干渉法は、粗面物体を対象としている。故に、機械部品などの変形・振動の高精度な測定が、実際の加工物を用いて容易に行える。

スペックル干渉法はホログラフィ干渉から発展した。初期の研究はLeendertzによる1970年の仕事と言われる。彼は、粗面からの散乱光が干渉しているとき、像面スペックルの個々の光強度は物体の動きの方向において周期的に変化することを示した。その後、Groh、Maronなどによって、この現象を利用した干渉法が開発された。スペックルパターンの統計的性質（大きさの平均値や強度の分布）は、粗面の粗さが光の波長に比較して大きい場合には、粗面の性質に依存しない。しかし、粗面の変位や変形には、スペックルは強く影響される。物体変位が微小で粗面の微細構造に変化がなく、照明方向や観測方向も不変とみなせる場合には、スペックルパターンも物体変位とともに形を変えずに移動する。このことを利用すると、物体の変位・変形の計測ができる。これがスペックル干渉法の原理である。この干渉法はホログラフィ干渉法のように高解像度の記録媒体を要求されない。ホログラフィ干渉法に比べ縞の鮮明度は悪くなるが、変位測定においてはより柔軟性のある技術であるといえる。

上の2つの方法は記録媒体に写真乾板を用いるため、現像や写真乾板の再配置など手間がかかり、熟練した技術が必要であった。1971年に記録媒体に写真乾板を用いずに、ビデオシステムを用いるESPI法（Electronic Speckle Pattern Interferometry＝電子式スペックル干渉法）を3グループがほぼ同時に発表した。ButterとLeendertzはスペックル干渉法の応用として、Macovskiらはビデオの研究として、またSchommaらはホログラム干渉計の応用としてである。ESPI法の大きな特徴は、現像

処理なしで干渉縞をリアルタイムにテレビモニター上に表示できることである。このように操作が簡単であるため、複雑な形状測定の問題や変形解析に応用された。

さらに、その ESPI 法にコンピュータ解析技術を組み合わせた DSPI 法 (Digital Speckle Pattern Interferometry = デジタルスペックル干渉法) は、コンピュータから外部にアナログ信号を出力させ、積極的に光路差を変えて CCD カメラから取り込まれる干渉光強度信号の変化をコンピュータで解析することで、干渉位相変化の測定を可能にした方法で、これ以降、変形の計測精度は飛躍的に向上することになった。そしてこれを基礎とした変形量抽出法はその後、大きく発展してきた。

しかし、干渉画像を用いた変形測定では、変形による光路差の変化が測定に使用している干渉光の波長の整数倍だけ違っている場合は、干渉光強度は光路差の変化がない場合と同じとなり、変形は測定できないという大きな問題がある。一方で、物体表面の高速な移動を高精度でリアルタイムに測定するためには、被測定物に特殊なミラーを張りつけ、反射されたレーザ光を参照光と干渉させ、ヘテロダインもしくはホモダイン測定をする方法もある。しかしこの場合、測定は 1 点に限られ、視野の総ての点での同時測定はできないと言う問題がある。

そこで本研究では、二波長のレーザ光と CCD カメラの RESTART RESET MODE を用いた DSPI 法を用いて、ほぼ同時に変形物体からの波長別の干渉画像をコンピュータに取り込み、大きな変形にも対応できる測定方法の研究を行った。この方法であれば、ほぼ同時に二波長のレーザ光での異なる干渉画像を取り込めるため、その比較によって 1 波長ではできなかった大きな変形測定が可能となり、また CCD カメラの各画素の光強度変化から測定するため、二次元的な視野内すべての点について、変形量の光干渉による高精度かつ定量的な実時間での測定が可能となる。

## 第2章 変形測定の実理

光干渉を用いた変形測定では、変形による光路差の変化が測定に使用している光の波長の整数倍違っている場合は、光路差の変化がない場合と干渉光強度は同じとなり、大きな変形は測定できないという問題がある。

本研究では、変形測定する基本技術としてDSPI法を用い、それを二波長とCCDカメラのRESTART RESET MODEとAOモジュレータを利用することで、ほぼ同時に二波長で取りこんだ干渉画像から大きな変形を測定する方法について研究した。

### 2.1 DSPI法

第1章でも述べたように、ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)法は、ButtersとLeendertzによって1971年に最初に発表された。ホログラフィ法との違いは、写真乾板の代わりにビデオカメラを使用する点であり、リアルタイムにテレビモニタ上で干渉画像を見ることができるといふ特徴がある。ESPI法による変形計測結果の出力となる干渉縞は、2つのビデオ信号の加算、減算によって得られる。ここでは、減算を用いたESPI法について説明する。図2.1にESPI法で用いられる基本的な実験装置の例を示す。また、図2.2はESPI法によって得られる干渉画像の例である。

測定対象面と参照面のそれぞれで反射された光のCCDカメラの感光面上のある点での光強度を $I_R(r)$ 、 $I_O(r)$ とすると、測定対象面の変形前後の干渉光強度 $I_1(r)$ 、 $I_2(r)$ は、それぞれ

$$I_1(r) = I_R(r) + I_O(r) + 2A_R A_O \cos\{\phi(r)\} \quad (2.1)$$

$$I_2(r) = I_R(r) + I_O(r) + 2A_R A_O \cos\{\phi(r) + \delta(r)\} \quad (2.2)$$

となる。

ここで、 $\phi(r)$ は $I_R(r)$ と $I_O(r)$ の位相差、 $\delta(r)$ は変形によって生じた位相変化である。ビデオカメラの出力 $V_1$ 、 $V_2$ が光強度に比例するとしたら減算信号 $V_s$ は、

$$\begin{aligned} V_s &= (V_1 - V_2) \propto (I_1 - I_2) \\ &= 4\sqrt{I_R(r)I_O(r)} \sin\left\{\phi(r) + \frac{1}{2}\delta(r)\right\} \sin\left\{\frac{1}{2}\delta(r)\right\} \end{aligned} \quad (2.3)$$

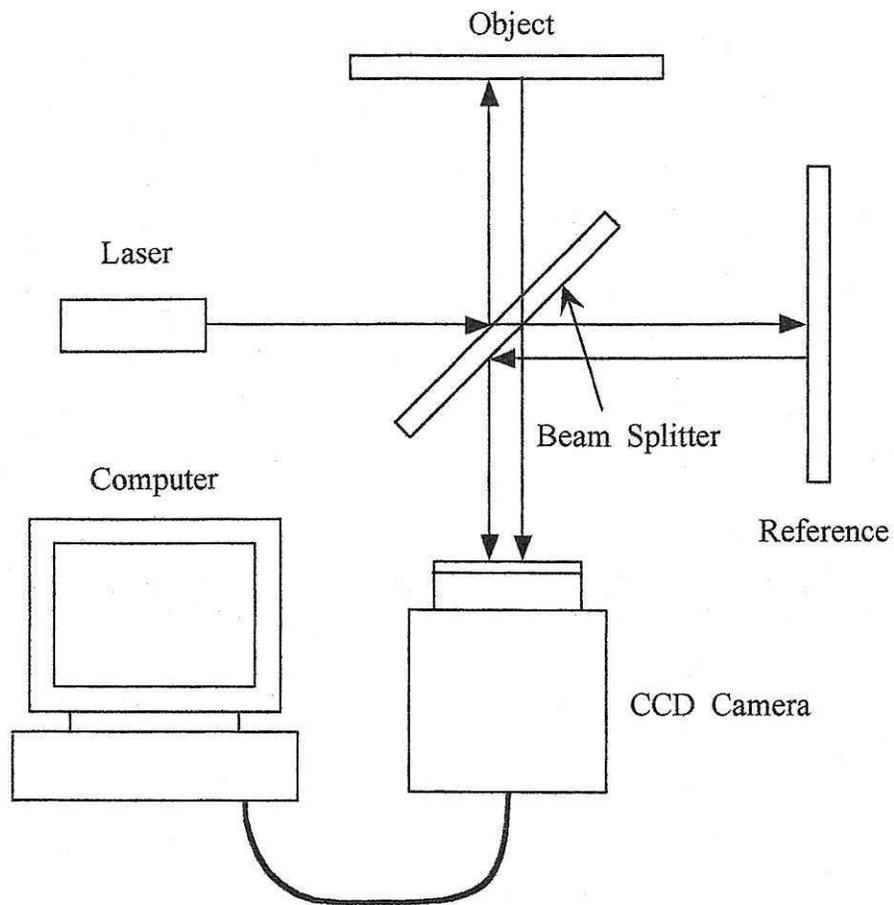


図 2.1 ESPI 法で用いられる基本的な実験装置

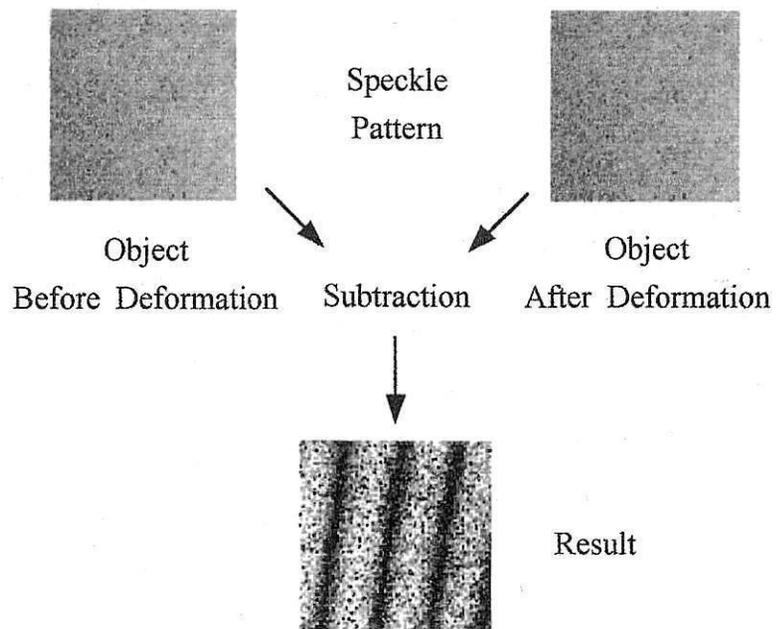


図 2.2 ESPI 法で得られる画像の例

となる。このような計算を画像全体について行うことによって図2.2に示すような干渉画像が現れる。このとき、明るさが最大、最小となるのは、

$$V_{\max};\delta(r) = (2n + 1)\pi \quad (2.4)$$

$$V_{\min};\delta(r) = 2n\pi \quad (2.5)$$

の所である。

ESPIはカメラからのビデオ信号を、先に取り込んでおいたビデオ信号とアナログ電子回路で比較し、その結果をビデオ信号としてTVモニターに出力した。これに対してDSPI (Digital Speckle Pattern Interferometry) ではコンピュータから高度に制御されたアナログ信号を外部に出し、その信号を基に干渉計の光路差を変え、その変化をカメラを介してコンピュータに取込み、その値を解析して干渉位相等を抽出する方法であり、代表的な位相抽出法として位相シフト法と呼ばれる方法が知られる。しかし、その基礎はESPI法であり、またコンピュータはどんな計測にも欠かせない機器でもあるので、コンピュータを用いるのは当たり前として、ESPIとDSPIをあまり区別しないで呼ぶことも多い。当然、ここでは厳密な表現に従うものとしてDSPIを用いることにする。組み上げたスペckル干渉計に対してコンピュータの制御と計測をどのように効果的に使って行くかに関してはDSPIの最も根幹に関わるところであり、故に必要なところで、そのデータ処理の方法も含めて述べる。

## 2.2 AO モジュレータ (AOM) の原理

本研究では工作機械の二次元変形の高精度測定法の開発をテーマとしている。加工中の工作機械では被削材を削り始めた瞬間や、加工部の被削材の厚みが増減した瞬間には、レーザ光の波長以上の大きな瞬間的な変形を良く伴う。1つの波長の光を用いる干渉計測ではこのような場合は変形量が正しく測定できない。そこで2つのレーザ光を交互に高速に切り替えて、ほぼ同時刻の2つの波長による干渉画像をここでは取り込んで利用している。この切り替えには切り替えスピードに高速性が求められるため、機械的なシャッターが利用できず、AOモジュレータと呼ばれる素子を利用する。そこでこの素子について説明する。

透明で屈折率の大きな結晶 (超音波媒体) に周波数が数十MHz以上の超音波を

伝搬させると、超音波媒体中には超音波の波長と振幅に対応した屈折率変化の波が生じる。この屈折率変化の波は位相形の回折格子として働き、これにレーザ光が入射すると回折して光は曲げられる。この回折光は、超音波の強度や周波数に応じて、強度や方向が変化する。このような超音波による光の回折効果を音響光学効果(acoust optic effect)といい、音響光学効果を利用した光変調器をAOモジュレータ(Acoust Optic Modulator)という。

回折格子による光の回折現象にはブラッグ (Bragg) 回折 (または反射)、ラマンナス (Raman-Nath) 回折とがあるが前者が利用される。

ブラッグ回折は、図 2.3 に示すように、波長  $\lambda$ 、入射角  $\theta$  の光束が入射する場合、回折格子の一部 A 点と B 点とで回折する光が互いに同位相になって強め合う方向に回折するものである。A 点と B 点での回折光が互いに強め合うための条件は、AB 間の距離を  $d$ 、回折角を  $\theta_2$  とすると

$$d(\sin\theta_1 - \sin\theta_2) = m\lambda \quad (2.6)$$

であり、どんな  $d$  に対してもこの条件が成り立たなければならないから、

$$\theta_1 = \theta_2 \quad \text{or} \quad m\lambda = 0 \quad (2.7)$$

でなければならない。光路差 0 はあり得ないから  $\theta_1 = \theta_2$ 、すなわち、入射角と反射角とが等しいという反射の条件と同じである。

つぎに、同図から、A 点と A' 点とでの回折光 (一次回折光のみで通常は高次の回折光はない) が互いに強め合う条件は

$$\Delta x \cos\theta_1 + \Delta x \cos\theta_2 = m\lambda \quad (2.8)$$

となり、反射の条件から  $\theta_1 = \theta_2 = \theta$  とすれば、

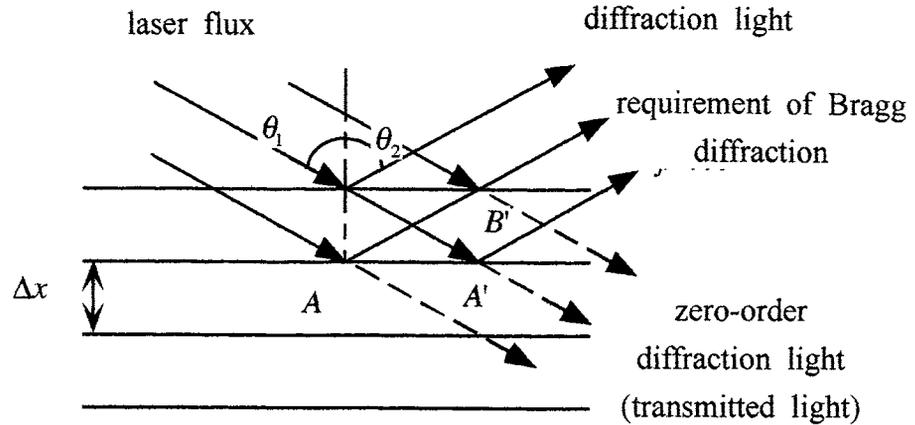
$$\Delta x = \frac{m\lambda}{2\cos\theta} \quad (2.9)$$

となり、回折格子の間隔  $\Delta x$  は干渉次数、 $m=1$  と置けば

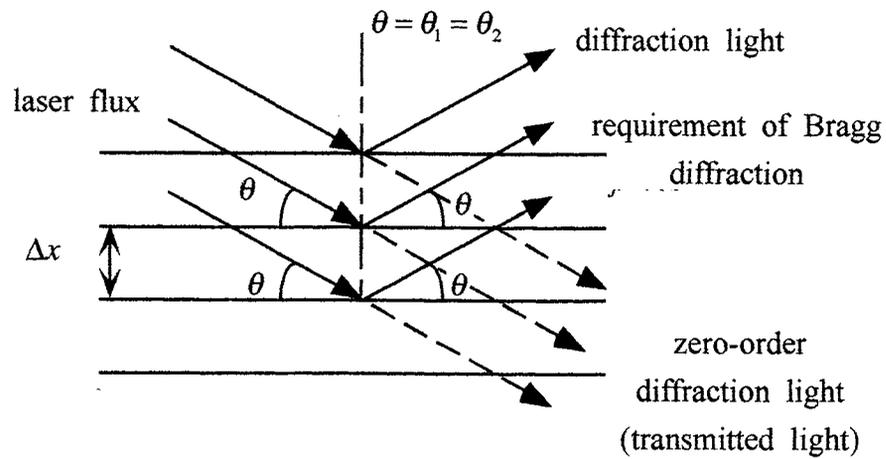
$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\cos\theta} \quad \lambda = \Delta x \cdot 2\cos\theta \quad (2.10)$$

となる。この式は、 $\lambda$  と入射角  $\theta$  が決まれば回折格子の特定の間隔  $\Delta x$  のときのみ回折 (反射) される。これを一次回折光とい、回折せず直接透過する光を 0 次回折光という。同様に、入射角  $\theta$  を図 2.3 (b) に示すようにとると、ブラッグ回折の条件は

$$\Delta x \cdot 2\sin\theta = \lambda \quad (2.11)$$



(a) 入射角を法線に対してとった場合



(b) 入射角を回折格子面に対してとった場合

図 2.3 ブラッグ回折の条件

として表わす場合もある。

ブラッグ回折を利用したAOMの原理は図2.4に示す一次回折光または0次回折光の強度を、変調した超音波信号に応じて変化させるものである。いま、AOMへの入射光強度を $I$ 、一次回折光の強度を $I_R$ とすると、

$$I_R = I \sin^2(K\sqrt{P}/\lambda) \quad (2.12)$$

で与えられる。ここで $K$ は超音波媒体の超音波伝導特性と光学的特性を含む定数で $P$ は媒質中の超音波のパワーである。また、媒体中の超音波のパワーは超音波振動子に供給する電圧 $V$ の2乗に比例するから、変調入力電圧に対する一次回折光の強度 $I_R$ は $\sin^2 V$ に比例する。

AOM素子の構造は図2.5に示すように、超音波の媒体である結晶の一端に圧電振動

子（トランスジューサ）を張りつけ、向かい側の端は超音波の反射の影響を防ぐためテーパ状に加工し、さらに超音波吸収剤を張りつけてある。光の入射面、出射面は光学的に研磨され、さらに、媒体の屈折率が高いので、レーザ光の入射や出射のときの反射損失が大きいため通常は反射防止膜が蒸着されている。媒体の材料としては、PbMO04（モリブデン酸鉛）、TeO2（二酸化テルル）、テルライトガラス、重フリントガラスなどがある。これらの中でPbMO04やTeO2の結晶材料は比較的高周波向き、ガラス材料は安価であるが、高周波の伝搬損失が大きいため主として低周波用に使われる。

### 2.2.1 AOM 変調器の構成

変調器の駆動部を含む構成図を図2.6に示す。レーザ光をアナログ的に変調するには、トランスジューサへ供給する高周波電圧の強度を変調すればよい。しかし、入力電圧に対する被変調光の強度はX特性のため湾曲しているから、特性曲線の直

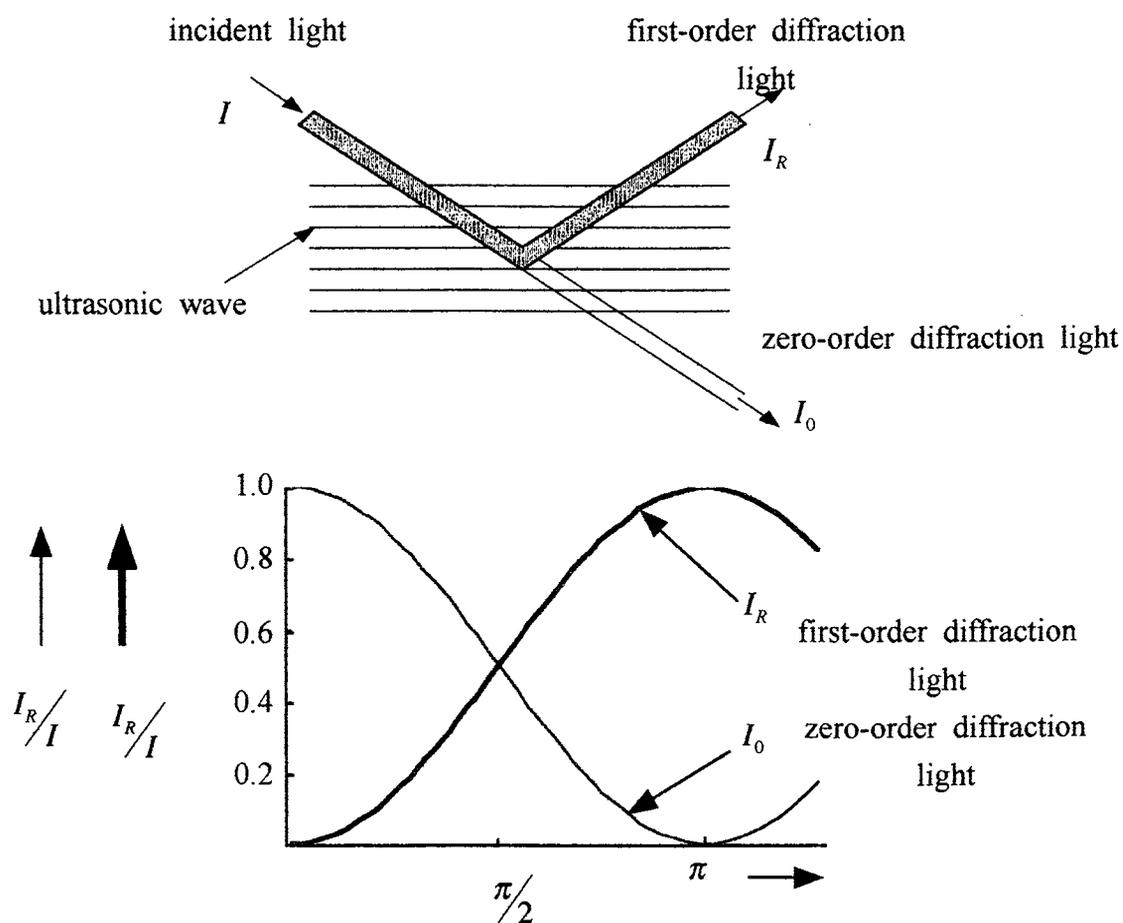


図 2.4 音響光学変調器の変調特性

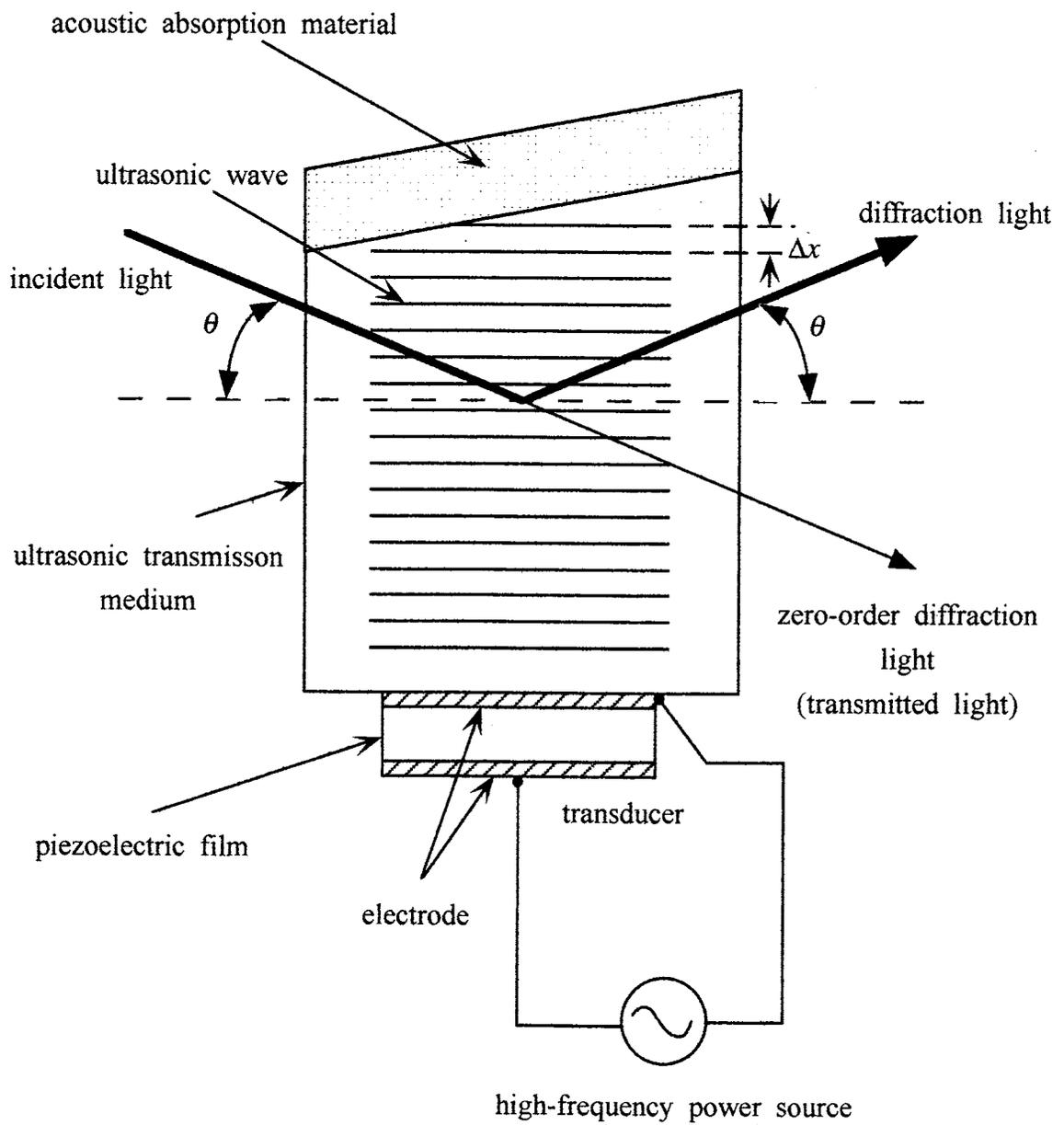


図 2.5 音響光学効果を利用した光変調器 (AOM)

線部分を利用するか、回路的に入力特性に補正を加え直線の変調ができるようにする必要がある。

パルスの (デジタル的) な変調をするには、トランスジューサの高周波電圧を変調信号パルスで ON-OFF して、回折光を ON-OFF するか、高周波超音波周波数をパルスの  $f$  と  $f_2$  というように変化し、回折角をパルスのように変えることによって変調できる。

### 2.2.2 AOM 変調器の特性

AOM の変調帯域幅は、高周波超音波周波数によって定まり、実用的には超音波周波数の 1/10 程度以下の変調周波数である。

また、変調帯域幅に関係する要素として、変調信号に対する光の応答速度があり、

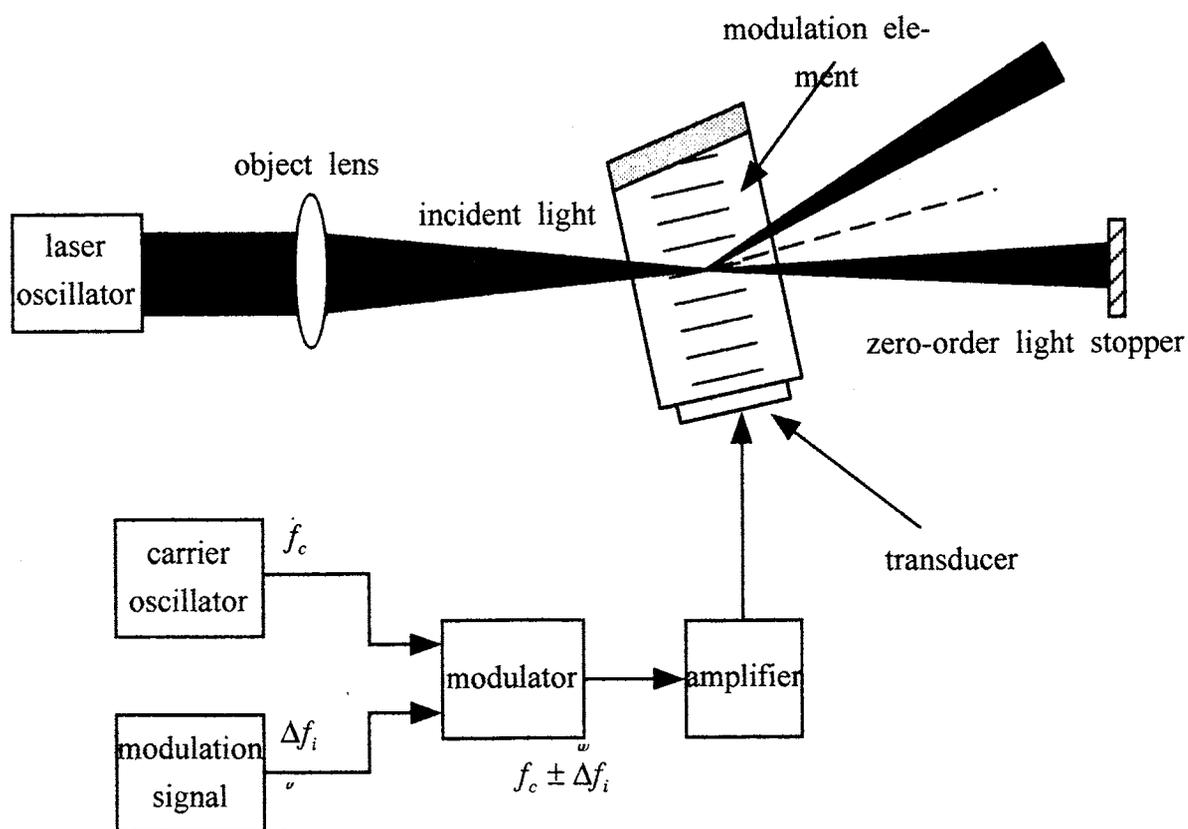


図 2.6 AOM の構成

AOM素子に入射するレーザービーム径によって決定される。これは、図3.7に示すように、レーザービーム径が大きいと横断する超音波の通過時間が長くなって、応答速度が遅くなることによるものである。したがって、応答性を速くして帯域を広げるためには凸レンズを用いるなどしてレーザービームを細く絞って素子に入射すればよい。しかし、レンズを通った収束レーザービームは図3.8に示すようにブラック角からわずかにずれる。このブラック角を満足しない成分が増加するために、全体として一次回折光の強度（回折効率）が低下してしまい、同時に、回折光のビーム形状は楕円形になるという欠点が生じる。

通常、この場合のパルス応答時間（図2.9）を $t_r$ ととすると、素子に入射するレーザービーム径 $d$ と素子内の超音波の伝搬速度 $v$ によって、おおよそ次のようになっている。

$$t_r \cong 0.65d/v \quad (2.13)$$

この場合 $d$ は図2.8(a)に示すように入射レーザービーム径を $D$ 、レンズの焦点距離を $F$ とすると、素子内のビームウエスト部分の径は

$$d = \frac{4\lambda}{\pi D} F \quad (2.14)$$

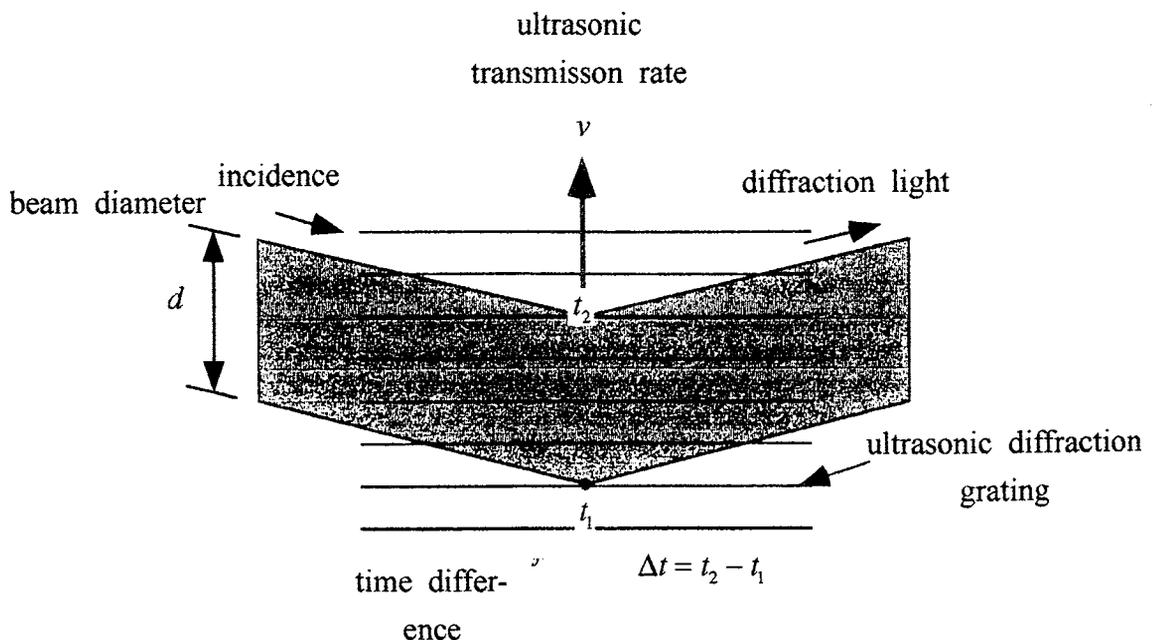
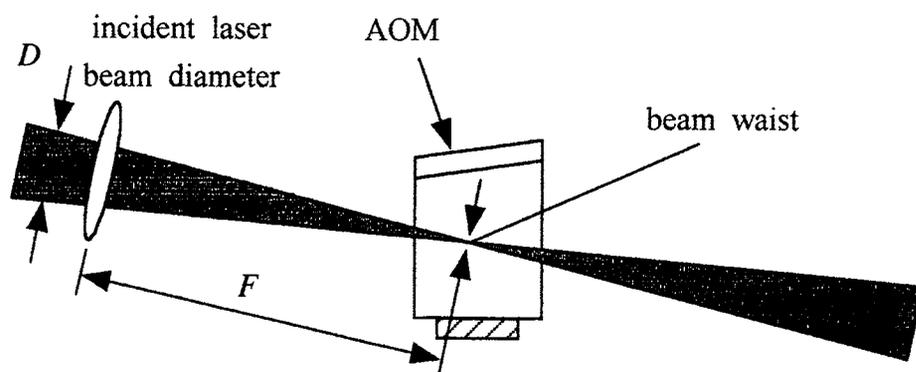
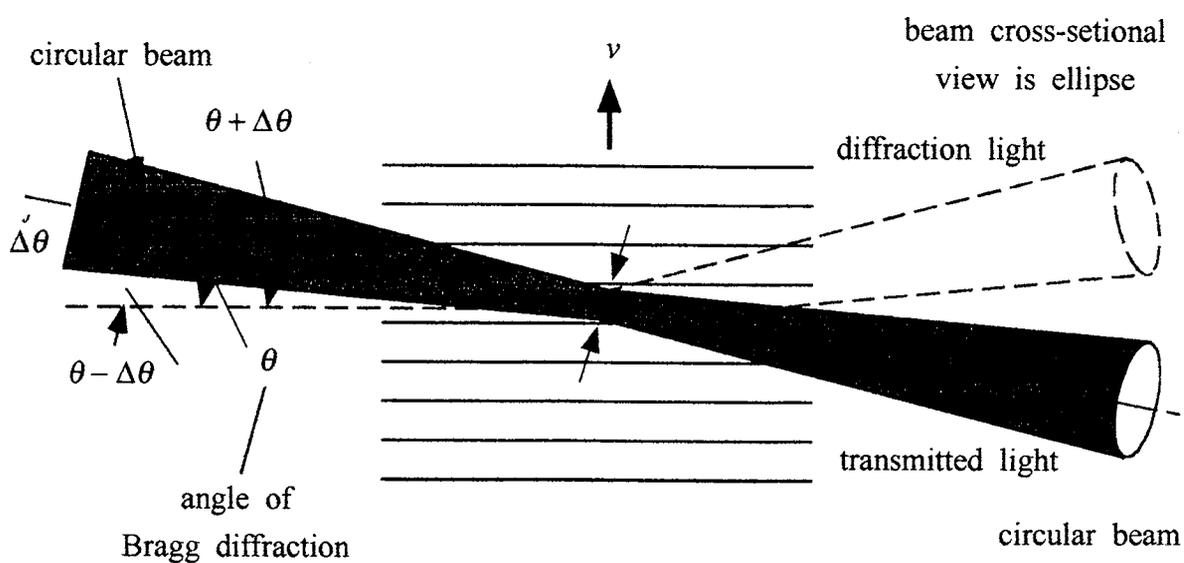


図2.7 レーザービーム径を横断する超音波の通過時間差



(a) ビームウエスト



(b)

図 2.8 集束ビームの場合のブラッグ回折角からのずれによる回折効率の低下

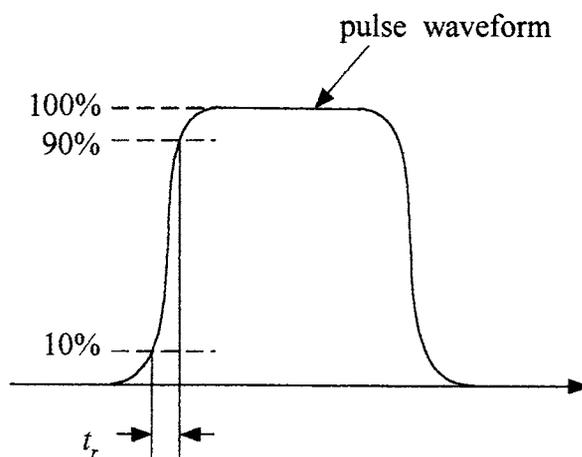


図 2.9 パルス応答時間

で与えられる（ただし結晶内の屈折率は無視した）。

また、変調帯域幅  $f_D$  は、パルス応答時間より

$$f_D = 0.35/t_r \cong 0.54v/d \quad (2.15)$$

で与えられる。

### 2.2.3 回折効率

AOMの変調効率  $\eta$  は、回折しないで透過する光（0次回折光）の強度  $I_0$  と一次回折光の強度  $I_r$  との割合で表される。すなわち、

$$\eta = \frac{I_r}{I_0} \times 100\% \quad (2.16)$$

で定義されている。 $\eta$  はレーザー光の波長によっても変わり、式 (2.12) に示すように、波長の長いレーザー光ほど大きな電力の超音波が必要となる。通常実用されている AOM の回折効率は 60 ~ 90% 程度である。

AOM を実用する場合、つぎの 2 点に考慮する必要がある。

第一は、変調するレーザー光の偏光方向に注意が必要で、ガラス媒体の AOM 素子では、超音波の波面に平行な振動面をもつ偏光を用いた方が回折効率が大きく変調効率（消光比）が大きい。また、結晶を用いた AOM 素子においては、指定された方向の直線偏光レーザー光を使用する必要がある。

第二は、通常 AOM は変調効率（回折効率）と変調周波数帯域を大きくするため、球面レンズやシリンドリカルレンズで絞り込んで使用する。この場合、ビームが小さく集束した点ではレーザーエネルギー密度が高くなり AOM 結晶の一部が変化し、レーザー光のスポット形状が変形したり、場合によっては損傷を受け使用不可能になるので注意が必要である。

## 2.3 取り込んだ画像の解析方法

取り込んだ画像の光強度の変化から位相変化量を出し、それを利用して変形量を算出する。まず変形をさせていない状態で参照光をシフトさせて、初期位相を決定する。その後変形を加えてその変形量を測定する。

### 2.3.1 4画面位相シフト法

初期位相の決定には、最初は現在広く用いられている4画面位相シフト法を用いた。位相を $\pi/2$ ずつシフトさせる。そのシフト関数を $\delta(t)$ 、位相ステップ指数を $i$ とおくと、

$$\delta_i(t) = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3}{2}\pi; \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (2.17)$$

光強度は式(2.18)のように表わせる。

$$I(x, y, t) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + \delta(t)] \quad (2.18)$$

ここで、 $I'(x, y)$ は強度バイアス、 $I''(x, y)$ は強度変調、 $\phi(x, y)$ は位相である。式(2.18)に式(2.17)の4つの値をそれぞれ代入すると、干渉図形の強度パターンを示す4つの式が得られる。

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y)] \quad (2.19)$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) - I''(x, y) \sin[\phi(x, y)] \quad (2.20)$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) - I''(x, y) \cos[\phi(x, y)] \quad (2.21)$$

$$I_4(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \sin[\phi(x, y)] \quad (2.22)$$

これら4つの方程式は、3つの未知な、 $I'(x, y)$ 、 $I''(x, y)$ 、 $\phi(x, y)$ があるが、干渉図形のそれぞれの点において、 $\phi(x, y)$ の値を解くことができる。3つの干渉図形はすべて波面位相を解くのに必要なものであるが、4番目は計算を簡単にするものである。強度バイアスの項 $I'(x, y)$ は、2つを一組にして方程式を引くことによって消すことができる。

$$I_4 - I_2 = 2I''(x, y) \sin[\phi(x, y)] \quad (2.23)$$

$$I_1 - I_3 = 2I''(x, y) \cos[\phi(x, y)] \quad (2.24)$$

これらの2つの式の比をとることで、未知の位相 $\phi(x, y)$ と4つの光強度しか含まないので、強度変調項 $I''(x, y)$ を消すことができる。

$$\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} = \frac{\sin[\phi(x, y)]}{\cos[\phi(x, y)]} = \tan[\phi(x, y)] \quad (2.25)$$

整理すると、

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[ \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right] \quad (2.26)$$

この式 (2.26) によって、初期位相を決定する。

### 2.3.2 4画面位相シフト法を用いない初期位相測定法

スペックル干渉法と干渉画像のコンピュータ処理を組み合わせるDSPI (Digital Speckle Pattern Interferometry) は粗面のサブミクロンの変形でもそれを位相変化量として高精度に測定できるため、変形測定に広く用いられている。このDSPIで位相変化量を求めるために良く使われるのは先に説明した位相シフト法である。しかし、位相シフト法では物体面を静止状態に保ちながら参照波面のみを特定量(位相)シフトする必要がある、変形測定の前後で物体面が止まっている状態を必ず必要とした。故に、工作機械の加工中の変形測定を考える場合には条件的に応用が難しい場合がでてくる。

ところで、物体面が止まっていなくても位相を測定できる手法もこれまでにいくつか開発されてきている。カメラを3台用いる方法、Space Career Phase Shifting法、Career FringeをFFT (Fast Fourier Transformation) を用いて解析する方法、さらにはスペックル強度を空間平均で取り除く方法等である。しかし、3台のカメラを用いる方法は装置が高価でカメラ位置の調整も難しい。他の3つは一般的な位相シフト法に比べ空間分解能が劣るとされる。

近年、アナログICやデジタルICが高速化し、カメラからのビデオ信号を高速でコンピュータに連続取込みし、解析することが可能となってきた(4万枚/秒の取込みが可能なシステムもある)。これらのシステムは単発の変形現象に対しても動的解析の可能性を与える点で注目される。ところで高速に連続して干渉画像データを取り込めることは、位相測定において干渉光強度の最大値、最小値を利用することをも可能にする。これは光路差の小さな変化に対して干渉光強度を連続して取り込めるためである。

干渉光強度の最大値、最小値を位相測定に利用する研究例として1995年のWangらの報告がある。変形下での干渉光強度変化を1台のカメラを用いて連続取込みして変形の時間変化を測定した。連続的に取り込んだデータより、変形に伴う干渉光強度の最大値と最小値をピクセルごとにまず算出し、測定したい瞬間の干渉光強度より、その位相の情報を $\cos^{-1}$ を用いて求めている。

しかし、使われる  $\cos$  は偶の多価関数である。故に  $\cos^{-1}$  からは位相の絶対値しか求まらない。そこで、Wangらは位相を求めたい時点ではその時の干渉画像と共に、位相シフトをしたもう1枚の画像（変化の増減から符号を求めるため）を取り込んだ。その結果、時間分解能は取込速度の半分となった。さらに位相値がゼロや  $\pi$  付近では符号の判定に誤差が入りやすく、これを避けるため特別な処理が必要であった。

一方、我々は  $\cos^{-1}$  演算を使うが符号決定のための余分な画像を取り込む必要のない方法を1997年に報告している<sup>1)</sup>。この方法は測定初期の一時点で位相が正確に求められていることを必要とした。

そこで本研究では、初期位相を変形の止まっている状態を全く用いないで決定できる方法を新たに開発した。この方法と先の方法を組み合わせることで、変形し始めている物体に対して干渉画像をカメラに連続的に取り込むだけで、取込み時間域すべてで位相測定を行うことが可能となった。この方法を前述の高速カメラと組み合わせると単発変形現象でもより詳しく動的変形を解析できることになると思われる。

### 2.3.2.1 連続取込み画像からの初期位相測定の原理

変形により変化し続けているスペckル干渉光強度をカメラで連続取込みした場合、ある画素の光強度変化は図2.10のようになる。今、図2.10の  $t=t_0$  での初期位相測定を取り扱う。まず図の光強度変化から、その画素での最大光強度  $I_{\max}$  と最小光強度  $I_{\min}$  を求める。そして、 $t=t_0$  と  $t=t_1$  での干渉光強度  $I_{t_i}$  ( $i=1, 2$ ) を用いて  $\phi_{t_i} = \cos^{-1} \left[ \frac{I_{t_i} - (I_{\max} + I_{\min})/2}{(I_{\max} - I_{\min})/2} \right]$  を計算する。 $\cos$  は偶関数のため位相の符号は決定できない。そこで  $t=t_0, t_1$  での位相の絶対値から  $\pm \phi_{t_0}, \pm \phi_{t_1}$  の4種の位相を考え、1画素につき4種類の  $\Delta \phi_j = (\pm \phi_{t_1}) - (\pm \phi_{t_0})$  を計算する。そして、 $Z = \exp(i \Delta \phi_j)$  を測定対象画素を中心とする局所領域 ( $3 \times 3$ ) について複素空間でプロットする。このプロットは図2.11のようになる。この分布は  $\Delta \phi_j$  が符号に関し対称だから実軸に関し対称である。そこで上半面の領域についてのみ1画素あたり2種類の合わせて18個のプロットを行い平均する。このプロットは位相変化量に対して正しい値を与える点を確率50%で含む。正しい点は偏角が変形量に比例するので局所領域でほぼ一定値を採る。一方、正しくないプロット点はスペckル位相のランダム性の影響を受け、平均処理でその影響はゼロに近づく。故に18

個の平均から位相変化量が求まる。ここでZを $Z = \{(I_{\max} - I_{\min})/2\} \exp(i \Delta \phi_j)$ としてプロットすると平均値の精度はさらに上がる。 $(I_{\max} - I_{\min})/2$ は図2.10の信号変化のModurationを表し、これが大きい点は信号取込みで避けられないランダム雑音下で信号対雑音比の高い位相変化量を与えるからである。この分布を図2.12に示す。平均値の偏角 $\Delta \phi$ は位相変化量となる。この位相変化量を、図2.10の $t=t_0$ 以降に連続して取り込んだ何十枚かについてプロットしてみると図2.13のようになる。ここで $t=t_4$ 付近では $\Delta \phi$ はピークを採り、それ以後は減少している。これはピーク値では変化量が約 $\pi$ であり、それ以降は図2.12の上半面で計算された位相変化量が実軸の下に入り込み、一方で実軸の下にあった対称成分が上半面に現れるためである。このことは $0 < \text{位相変化量} < \pi$ ならば、変化量が $\Delta \phi$ で正しく抽出できることを示す。ただし、この変化量は常に絶対値で与えられるので光路差が短くなったのか長くなったのかは分からない。もし変形が測定初期に一方向に進むことが知られているなら全画素で変化の符号は同じと考えることができ、この方向の変化を正として位相変化量 $\Delta \phi$ が符号を含めて求まる。そこで、 $t=t_0$ と $t=t_j$ で取り込まれた光強度から $\cos \phi_{t_0}$ と $\cos(\phi_{t_0} + \Delta \phi)$ が分かっているので、これらと $\Delta \phi$ を用いて次式より $\sin \phi_{t_0}$ を計算し、そして $\phi_{t_0}$ が求まる。

$$\sin \phi_{t_0} = \frac{\cos \phi_{t_0} \cos \Delta \psi - \cos(\phi_{t_0} + \Delta \psi)}{\sin \Delta \psi} \quad (2.27)$$

$$\phi_{t_0} = \arg(\cos \phi_{t_0} + i \sin \phi_{t_0})$$

もし画像内の個々の部分で変形の方法が異なるならば、 $t=t_0$ の取込み直後に強制的に参照光路を少し（位相変化量が約 $\pi/2$ に相当する量）だけ短時間に短くし、その直後の画像も取り込む。この時、強制変化のスピードを物体変形のスピードよりも速くできれば、変形による変化を含んでも画像内で位相は $0 < \text{位相変化量} < \pi$ となる。故に式(2.27)の議論が成立し、 $t=t_0$ の初期位相が符号を含めて求まる。なお、ここでの $\phi_{t_0}$ は画素ごとに異なる値であって、参照光路を短くする方向を位相が増える方向として全画素で位相が求まる。

### 2.3.2 その後の変形位相量の算出方法

任意時点での変形量を出すためには、その時点での位相を出す必要がある。その

任意時点の位相  $\theta$  の決定方法を、図 2.14 に示す。光強度の最大値を  $I_{\max}$ 、最小値を  $I_{\min}$ 、そして任意時点での光強度を  $I_y$  とすると、以下の式が求まる。

$$|\theta_2| = \cos^{-1} \left\{ \frac{I_y - \left( \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} \right)}{\left( \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2} \right)} \right\} \quad (2.28)$$

しかし、この式から位相を求めると、その位相は  $\theta_2$  であるか、 $-\theta_2$  であるか判断できない。そこで、着目する点での変形量はその周辺で同じと考えられるので、図 2.14 (a) のように着目点の周辺 ( $3 \times 3$ ) で  $(|\theta_2| - \theta_1)$  と  $(-|\theta_2| - \theta_1)$  の分布を調べる。

任意の点の光強度から抽出した 2 種類の位相の初期位相との差を、複素平面上にプロットすると、そのうちの 50% が正しい値を与えており、式 (2.28)、(2.29) をプロットすると図 2.15 (b) のようになる。

$$z = \exp\{i(|\theta_2| - \theta_1)\} \quad (2.28)$$

$$z = \exp\{i(-|\theta_2| - \theta_1)\} \quad (2.29)$$

実際には、この 2 つの式に変調度を考慮して、式 (2.30)、(2.31) のようになり、プロットすると図 2.15 (c) のようになる。

$$z = (I_{\max} - I_{\min}) \exp\{i(|\theta_2| - \theta_1)\} \quad (2.30)$$

$$z = (I_{\max} - I_{\min}) \exp\{i(-|\theta_2| - \theta_1)\} \quad (2.31)$$

この 2 つの式のプロット点から、その点における位相変化量 ( $\Delta\theta$ ) を求めることができる。

図 2.14 のような光学系を考える。変形量が  $d$  であったとすると、光路差の変化は往復であるからとなる。この時の位相変化量を  $\Delta\theta$  とすると、

$$2d = \frac{\Delta\theta}{2\pi} \times \lambda \quad (2.32)$$

と表わすことができる。よって、

$$d = \frac{\Delta\theta}{4\pi} \times \lambda \quad (2.33)$$

式 (2.33) から位相変化量にをかけることで、変形量を求められることがわかる。

$$\begin{aligned} &= \Delta\theta \times \frac{\lambda}{4\pi} \\ &= \frac{\lambda}{4\pi} \arg \left[ \sum (I_{\max} - I_{\min}) \left[ \exp\{i(|\theta_2| - \theta_1)\} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \exp\{i(-|\theta_2| - \theta_1)\} \right] \right] \end{aligned} \quad (2.34)$$

このようにしてカメラからのビデオ信号を連続してコンピュータに取り込んでデータ解析できるシステムで、物体の変形開始後にスペックル干渉画像を取り込んで、測定初期の位相とその後の位相を計算するための方法を述べた。この方法を用いることで、連続的に変形し始めている物体に対してその干渉画像から位相測定を行うことが可能となった。

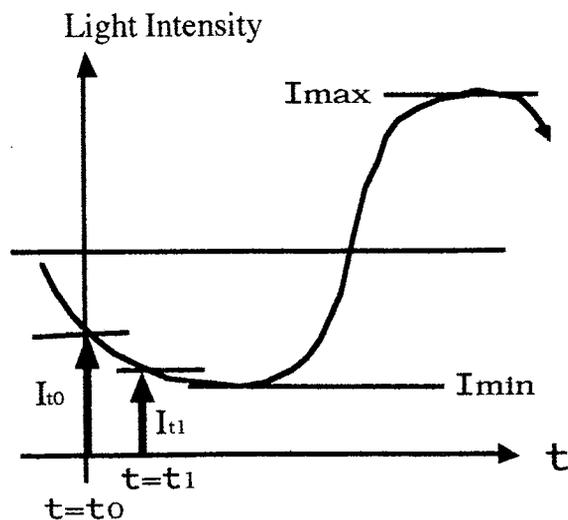


図 2.10 任意時点の位相決定方法 1

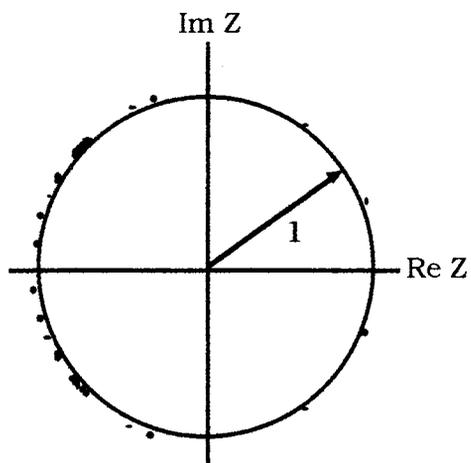


図 2.11 任意時点の位相決定方法 1

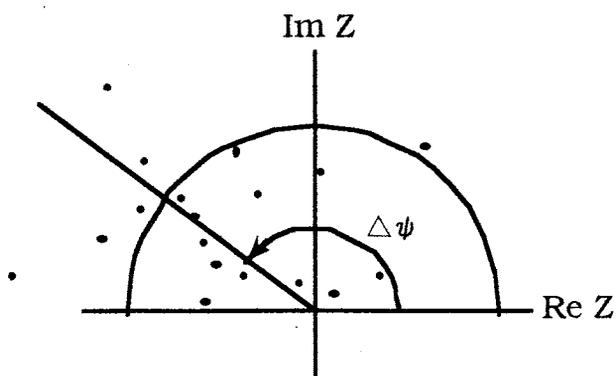


図 2.12 任意時点の位相決定方法 1

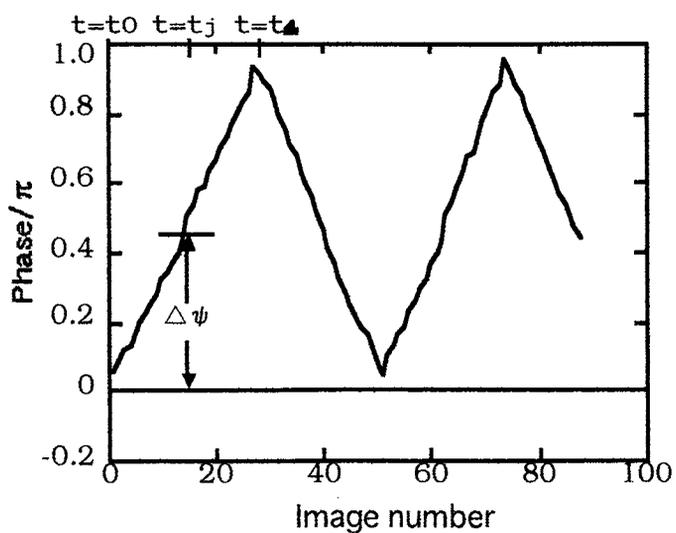
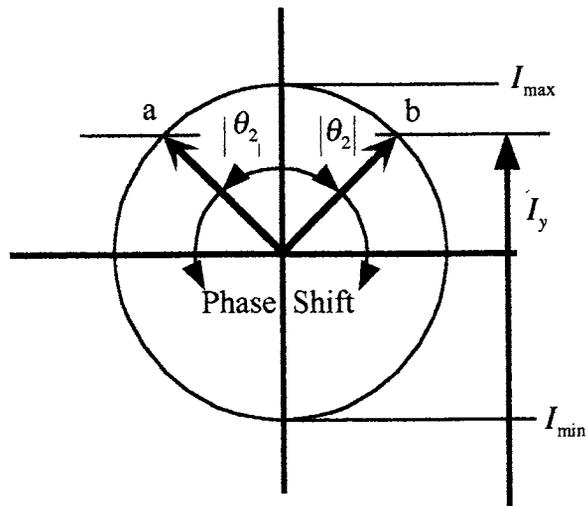
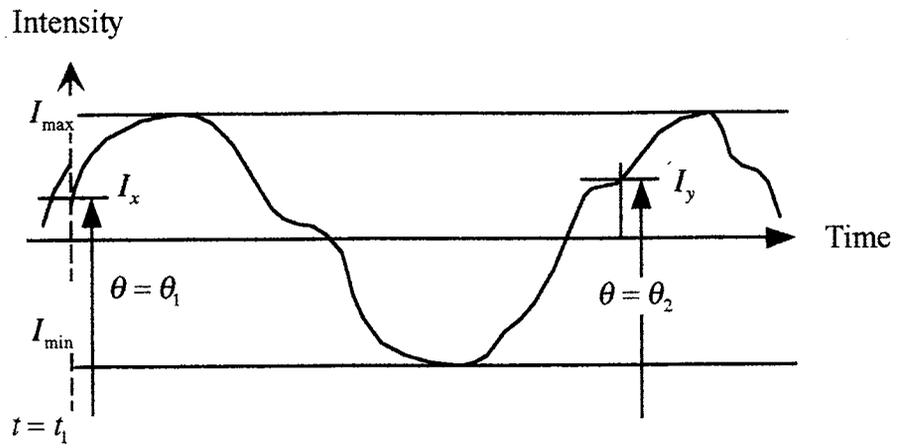
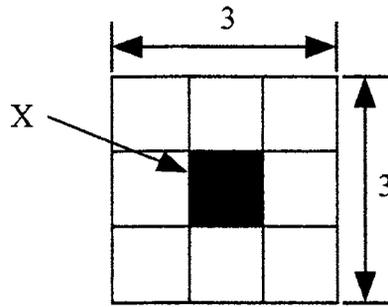


図 2.13 任意時点の位相決定方法 1

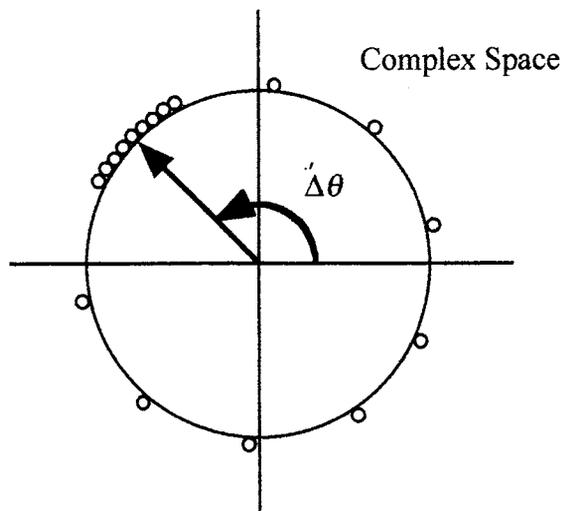


$$|\theta_2| = \cos^{-1} \left\{ \frac{I_y - \left( \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} \right)}{\left( \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2} \right)} \right\}$$

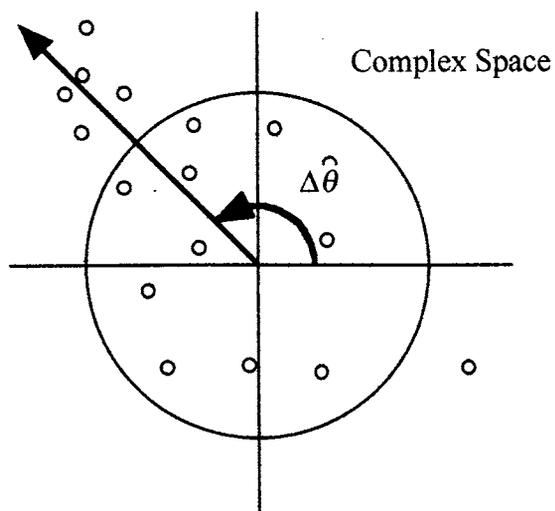
図 2.14 任意時点の位相決定方法 1



(a)



(b)



(c)

図 2.15 任意時点の位相決定方法 2

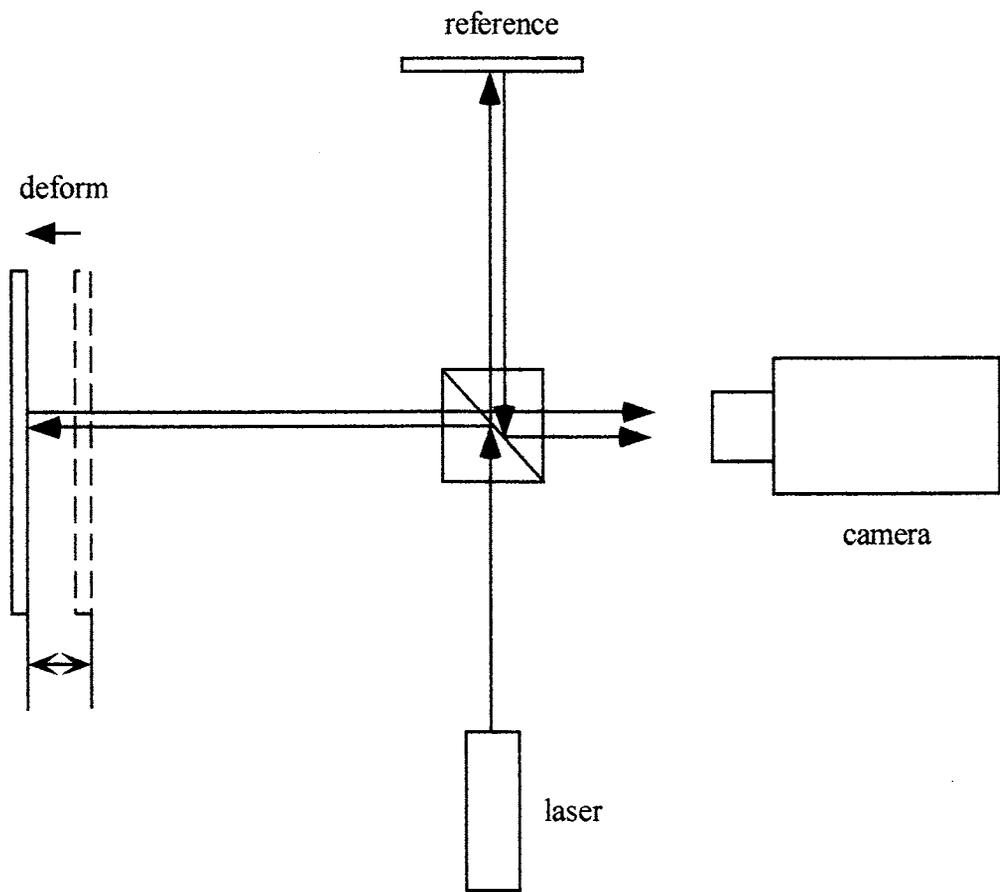


図 2.16 位相変化量から変形量の計算方法

## 第3章 実験装置及び実験方法

### 3.1 実験装置

実験装置概略図を図3.1に、外観を図3.2に示す。本研究で用いた実験装置は、光学部品と画像取り込み用機材からなっている。また、取り込んだ干渉画像の解析プログラム用ソフトとして、Labview Version5.1 (National Instruments 製) と IMAQ VI (National Instruments製) を使用している。

#### 3.1.1 実験光学系

実験に使用した光学素子は以下の通りである。

- ・アルゴンレーザ (Spectra-Physics BeamLok)
- ・ズームレンズ (Nikon AF Zoom-nikkor 35-105mm f/3.5-4.5D IF)
- ・AO モジュレータ (ISOMET Series 1201E)
- ・光ファイバ (Newport S-M-F-917-NTT)
- ・ビームスプリッタ
- ・ミラー
- ・偏光板
- ・光ファイバカプラ
- ・分光プリズム

実験に使用した装置は以下の通りである。

- ・同期信号発生器 (Victor SG-101)
- ・MULTIFUNCTION SYNTHESIZER WAVE FACTORY 1946  
(NF ELECTRONIC INSTRUMENTS)

実験に使用した画像取り込み用機材は以下の通りである。

- ・CCD カメラ (SONY XC-77)
- ・画像取り込みボード (NATIONAL INSTRUMENTS IMAQ PCI-1408)

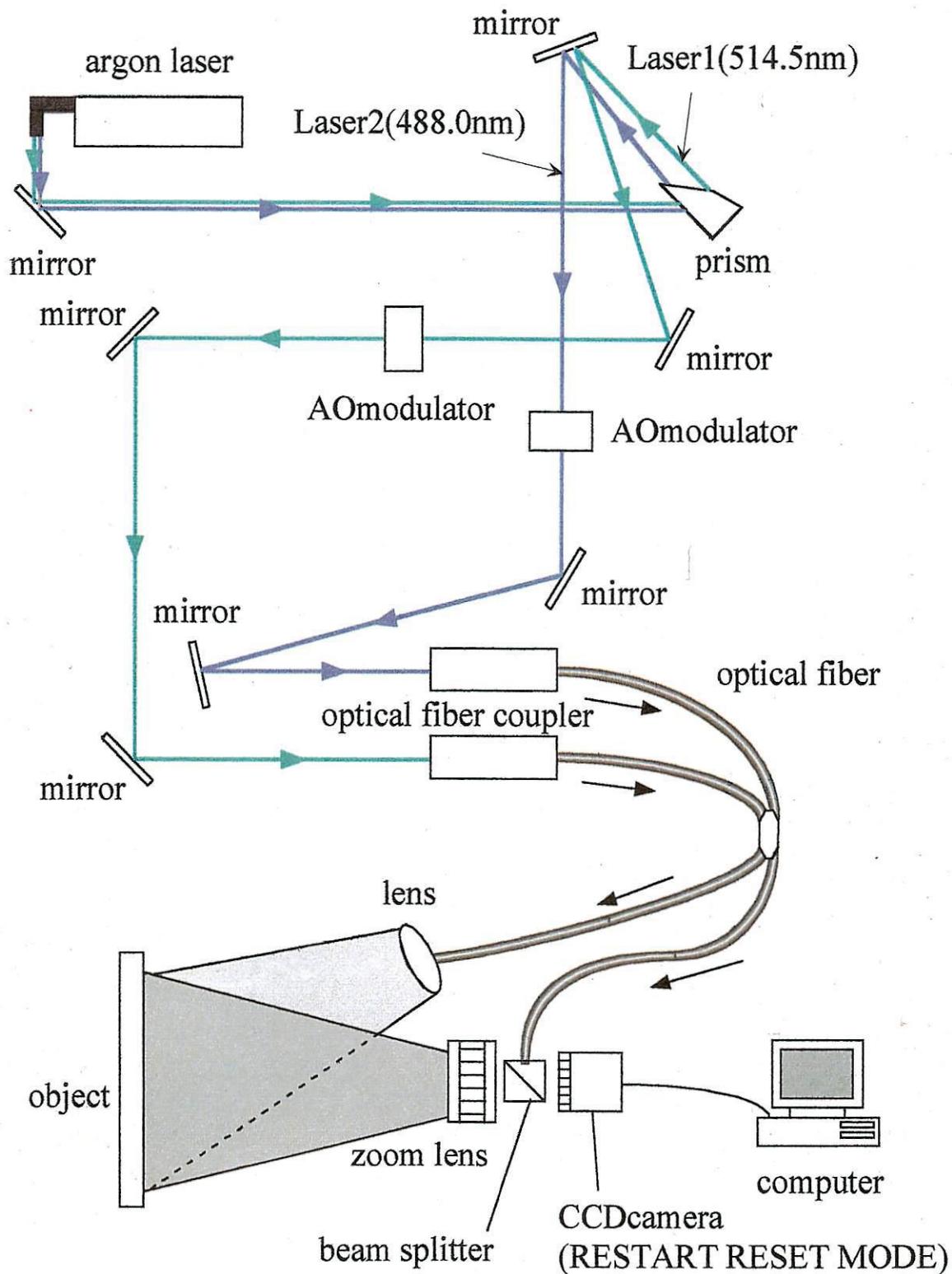


图 3.1 实验装置概略图

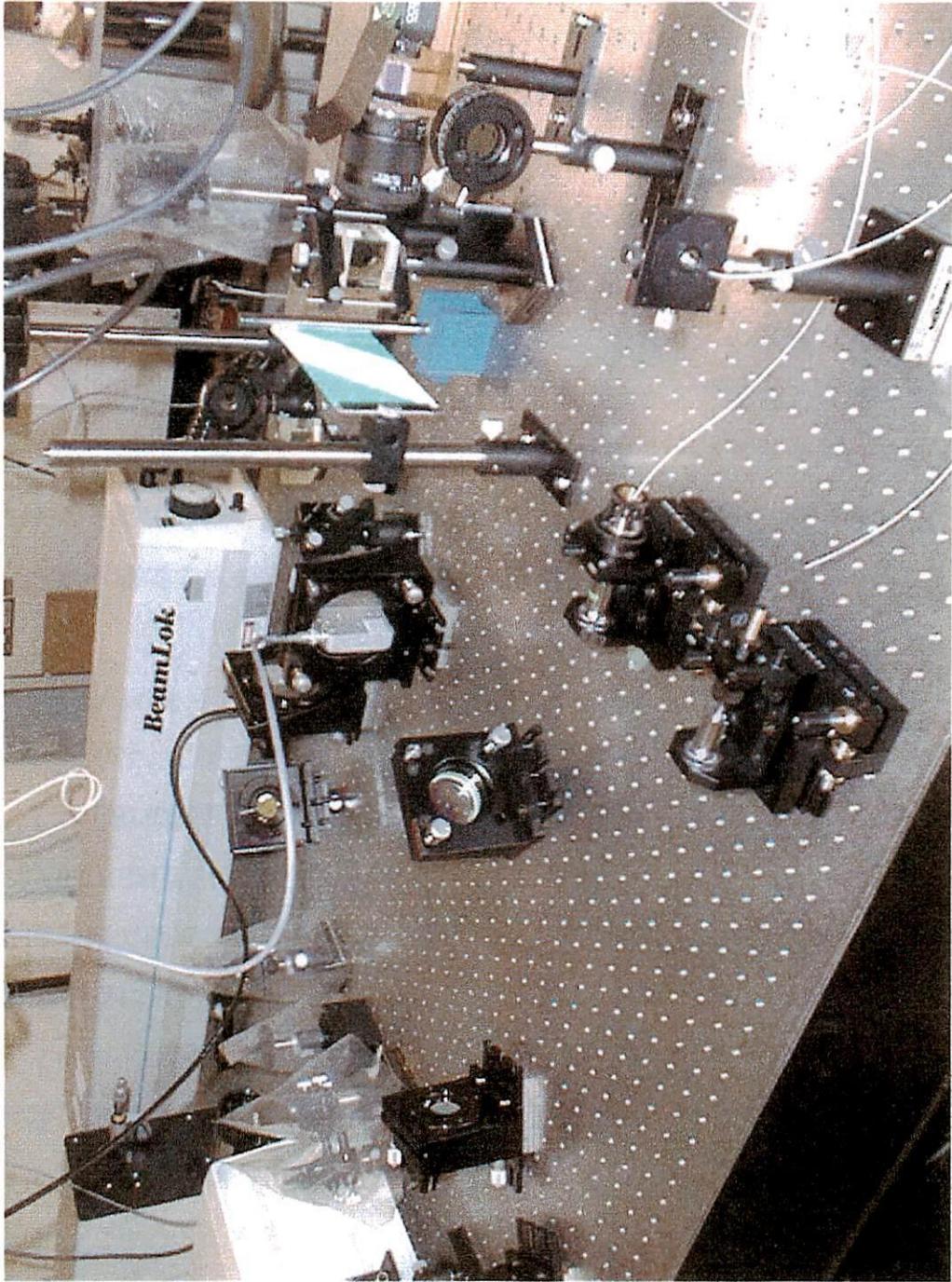


図 3.2 実験装置外観

アルゴンレーザーは6種類の発振波長（457.9nm、476.5nm、488.0nm、501.7nm、514.5nm、528.7nm）を持つレーザーである。分光プリズムでそれらを分光し、その中で最も強い2種類の波長（514.5nm、488.0nm）の光を使用する。

分光した光の進行方向をミラーで変え、AOモジュレータに入れる。このAOモジュレータによって2種類の波長の光のON、OFF切り替えを行う。その2つの光を光ファイバケーブルを用いて光ファイバに入れ、物体光と参照光に分割する。この光ファイバによって、2種類のレーザー光を同一位置から照射できる。物体光を測定対象物に照射し、その反射光と参照光を干渉させ、この干渉画像をCCDカメラを通してパソコンに取り込む。

CCDカメラの直前には、2分割された反射光のそれぞれの電場方向を調節するために、偏光板が取り付けられている。これは2種類の光が干渉を起こす時、それぞれの電場方向が同じである場合を前提として、異なっている場合にはうまく干渉を起こすことができない。そこで、2つの経路を通ってきたそれぞれの反射光から、同一方向の電場の光のみを取り出して干渉させるためである。

### 3.1.2 CCDカメラの **RESTART RESET MODE**

本研究では、二波長でほぼ同時の変形量を調べることが目的であるため、ほぼ同時にそれぞれの波長の光の干渉画像を取り込む必要がある。そこでCCDカメラのRESTART RESET MODEを使った。

外部同期で同期信号発生器（SYNC SIGNAL GENERATOR）のVDとHDの信号をCCDカメラに入力する。RESTART RESET MODEでは、ODDとEVENのイメージングフィールドが繰り返されており、画面の走査線の奇数番目がODDフィールドに、偶数番目がEVENフィールドに蓄積されるようになっている。そのフィールドの開始は入力している信号に同期している。よってこの同期信号で任意の時刻を設定することができる。このそれぞれのフィールドに、ODDフィールドには波長488.0nmのレーザー光のみ、EVENフィールドには波長514.5nmのレーザー光のみが入るように、AOモジュレータの入力信号を設定して使用している。

### 3.1.3 AO モジュレータの入力信号制御

AOモジュレータの音響光学効果を利用して、二波長のレーザのON、OFFを行う。CCDカメラのRESTART RESET MODEの外部同期で使用している、同期信号発生器（SYNC SIGNAL GENERATOR）のVDとHDの信号を利用して、AOモジュレータに入力する信号を決定する。図3.3に信号の変調方法、図3.4に信号伝達のブロック図を示す。

VDのパルスの立ち上がりの時点でのHDは、HIGHとLOWが交互に繰り返している。VDはCCDカメラのイメージングフィールドと同期しているので、立ち上が

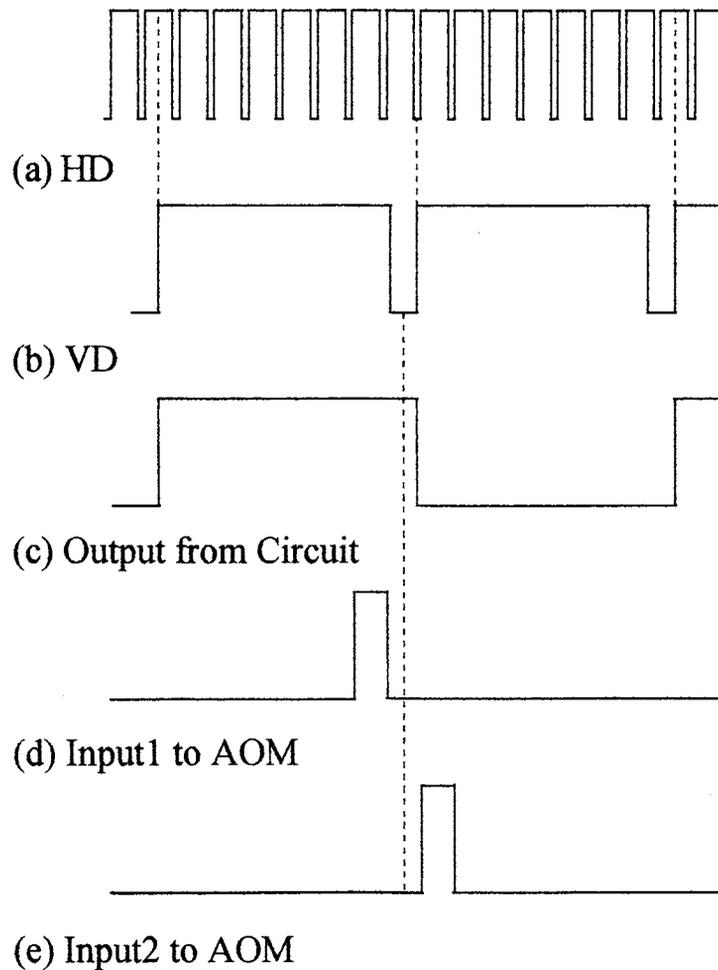


図 3.3 AO モジュレータの入力信号の変調方法

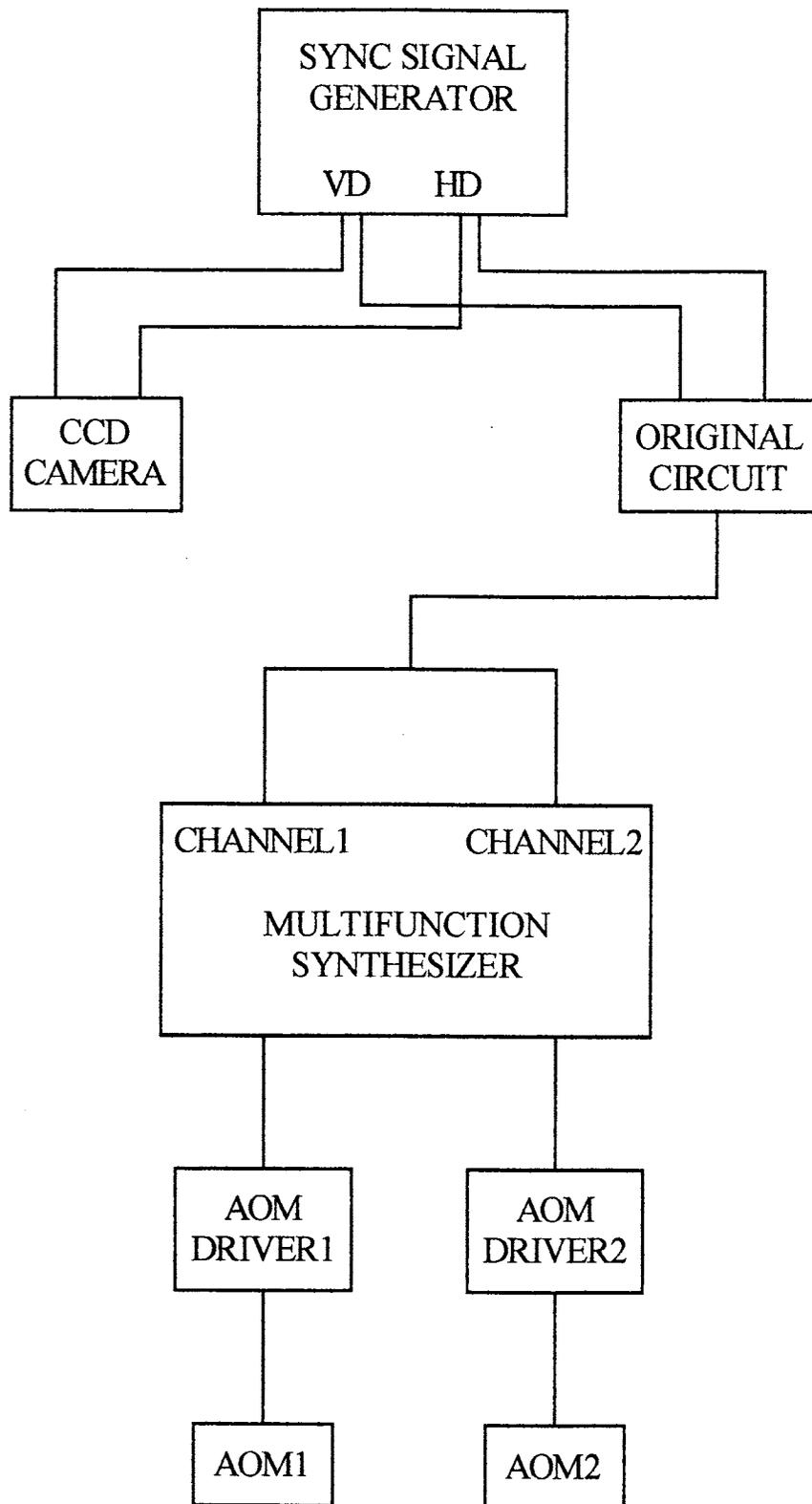


図 3.4 AO モジュレータの信号伝達のブロック図

りの時点でのHDによってODDフィールドか、EVENフィールドかを区別することができる。それを利用して図3.5に示す回路を使い、AOモジュレータに入れる信号を変調する。この回路ではそのVDの立ち上がりの時点（LOWからHIGHに切り替わる時点）で、HDがHIGHであったら立ち上がり（HIGH）、LOWであったら立ち下がる（LOW）。よって図3.3(c)のような矩形波を出力する。さらにスレッシュホールドレベルがあり、2V以上がHIGH、0.8V以下がLOWとなるため、それに合うように、抵抗とツェナーダイオードを使って電圧を調整している。

ツェナーダイオードとは、図3.6に示すように逆電圧を加えたとき、ある電圧から急に電流が流れ出し、その電圧（ツェナー電圧）は電流値にかかわらずほぼ一定となるので、簡単に一定電圧を作る場合や、出力電圧値を制限する場合によく用いられる。ツェナー電圧は温度とともに若干変化する。この温度による変化はツェナー電圧5Vを境として増減方向が逆になり、5V程度においてもっとも温度の影響が小さくなる。

回路から出た信号をMULTIFUNCTION SYNTHESIZERを使ってAOモジュレータに入力する信号に変調する。回路から出た信号は、HIGHの時はCCDカメラのODDフィールド、LOWの時はEVENフィールドになっている。

MULTIFUNCTION SYNTHESIZERに回路からの信号を入力する。チャンネルは2つあり、波長514.5nmのレーザ光用と波長488.0nmのレーザ光用と使い分ける。バースト発振（タイプ：トリガ）は、トリガ信号ごとに指定された発振波数を出力する間欠発振である。これを利用して入力信号の立ち上がりでトリガをかけて、DELAYを設定することでその立ち上がりから何秒後に発振するか決定できる。

DELAYの設定値は、ODDとEVENのイメージングフィールドが切り替わる部分を基準として、その前後でそれぞれODDフィールドには488.0nmの光だけを、EVENフィールドには514.5nmの光だけを当てて計測するので、それに合うように設定した。さらにレーザ光を当てている時間は、短いほど同時の変形を測定することができるが、同時に光量も減るので1/300sに決定した。振幅、オフセット値はAOモジュレータの一次回折光が最大になる最適値を探し、決定した。レーザをONにするタイミングのイメージ図、実際測定に使用したMULTIFUNCTION SYNTHESIZERの設定値をそれぞれ図3.7、表3.1に示す。

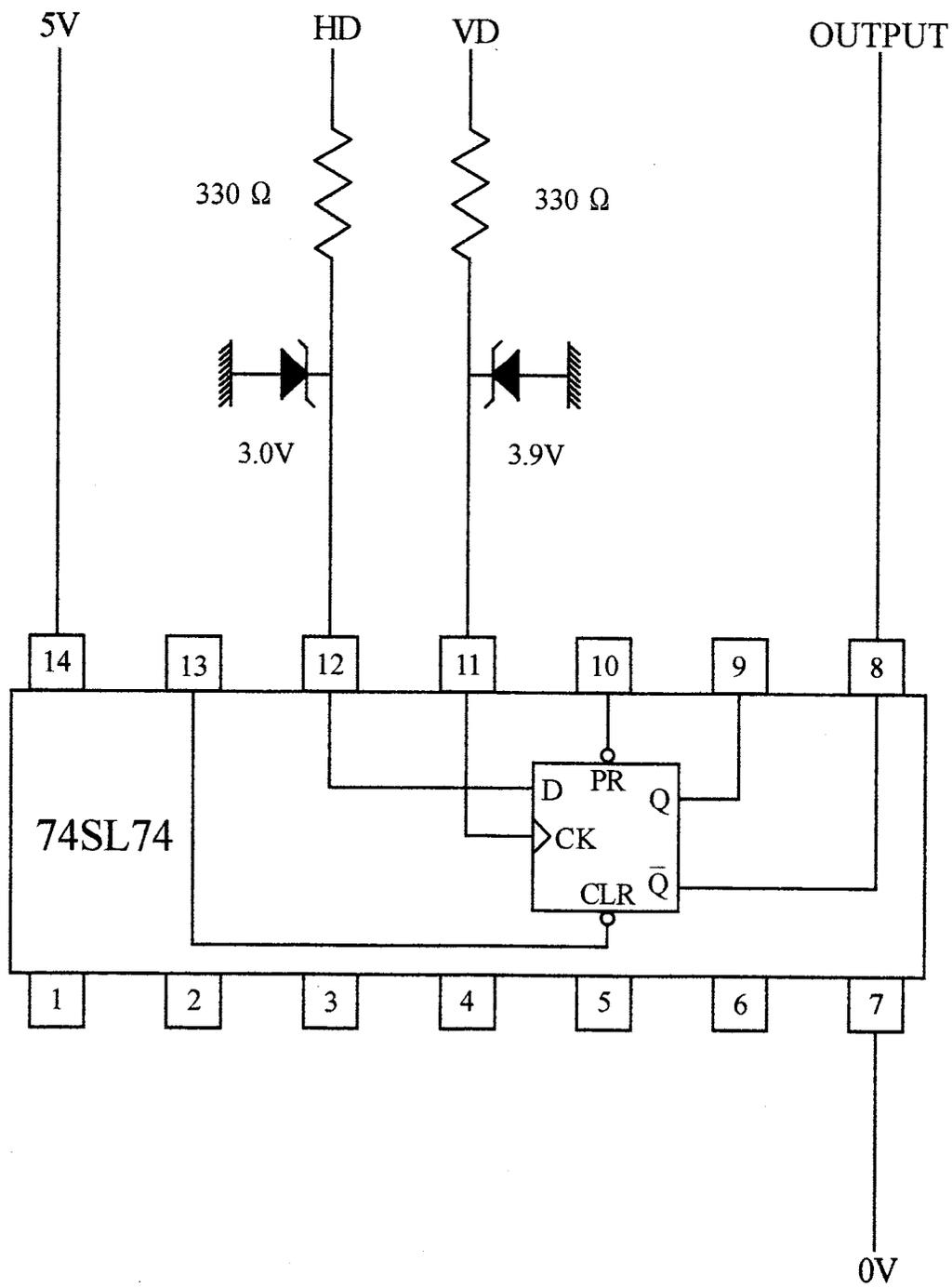


図 3.5 AO モジュールの入力信号回路図

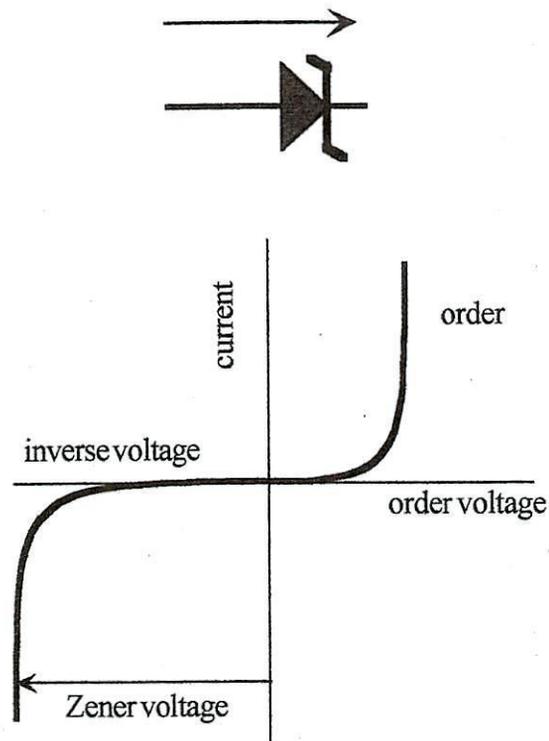


図 3.6 ツェナーダイオードの特性

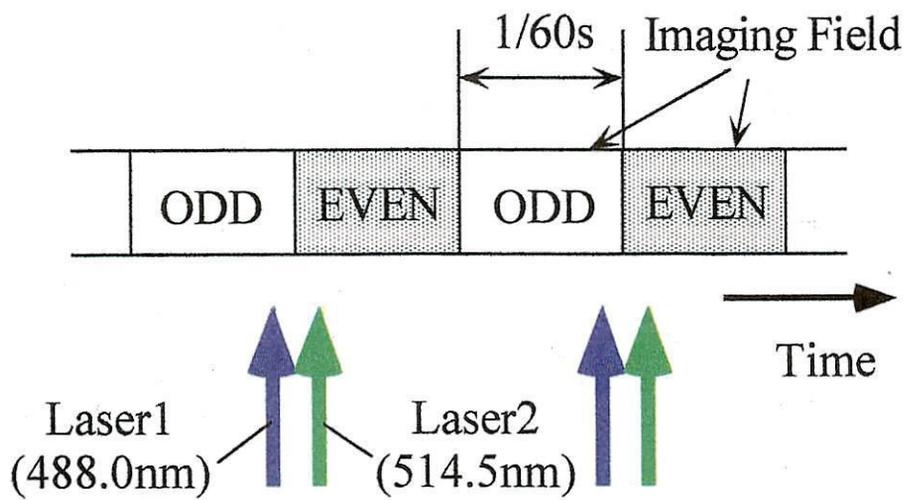


図 3.7 レーザを当てるタイミングイメージ図

表 3.1 測定に使用した MULTIFUNCTION SYNTHESIZER の設定値

	Laser1(488.0nm)	Laser2(514.5nm)
Amplitude(V)	1.5	1.2
Offset(V)	0	0
Delay(ms)	30.1	32.5
Lighting Time(s)	1/300	1/300

### 3.1.4 光ファイバカプラ

本研究で使用している光ファイバカプラを図3.8に示す。これはレーザ光を光ファイバに入れるための装置で、レーザ光を対物レンズで絞り、ビーム径が最も小さくなったところに光ファイバの先端を合わせると、光ファイバに入る光量は最大となる。調節ねじは全部で5つ付いており、Aではファイバを前後に動かすことができる。Bでは2つのねじで上下左右に動かすことができる。Cでは2つのねじでファイバを固定してある部分を傾けることで、上下左右に微調整することができる。これを利用してレーザ光を光ファイバに入れている。

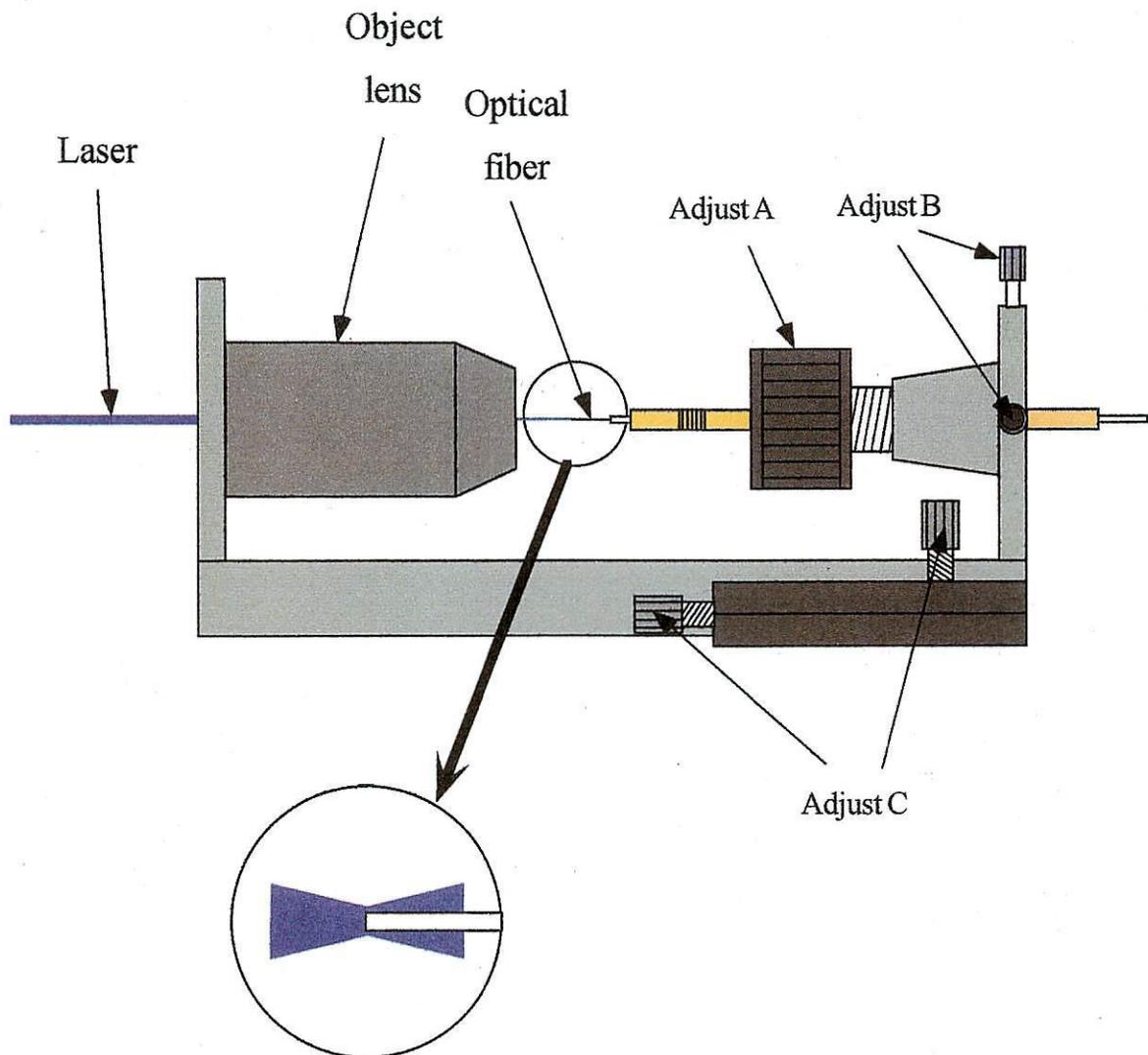


図3.8 光ファイバカプラ概略図

### 3.2 実験方法

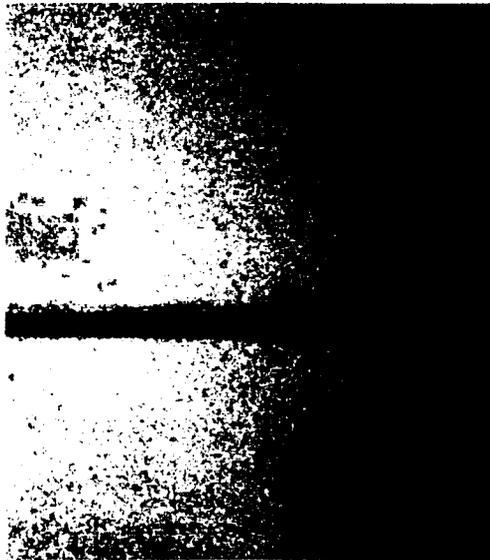
ここでは、本研究の実験手順についてまとめておく。

- ・レーザ光を測定対象物に当て、その反射光と参照光が作る干渉画像を CCD カメラを通して、200 枚パソコンに取り込む。
- ・パソコンに画像を取り込む際に、初期段階では初期位相を決定するために、参照光を保持している部分にピエゾ素子を使用し、動かすことによって光路差を変える。その後モータによって測定対象物に大きな変形を加える。
- ・取り込んだ画像は ODD、EVEN フィールドごとに別々に表示及び保存し、それぞれについての位相変化量を算出し、その位相変化量から変形量を算出する。

## 第4章 実験結果及び考察

### 4.1 実験結果

取り込んだ物体光と参照光を図4.1に示す。さらに各フィールドの物体光と参照光を図4.2に示す。この2つを干渉させ取り込んだ各フィールドの画像を図4.3に示す。光ファイバカップラで、各波長の光の光量を同程度に調節した。測定対象物はアルミ板で中央には切れ目が入っている。



(a) object



(b) reference

図4.1 取り込んだ物体光と参照光

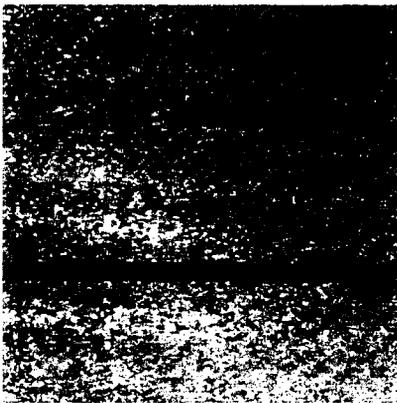


object

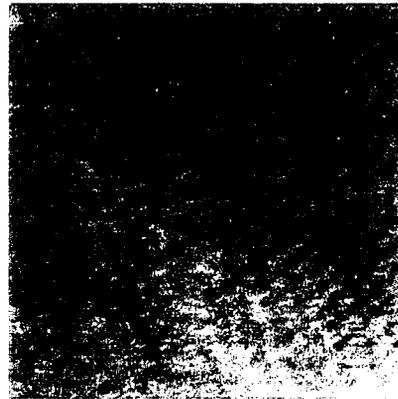


reference

(a) ODD フィールドで取り込んだ画像



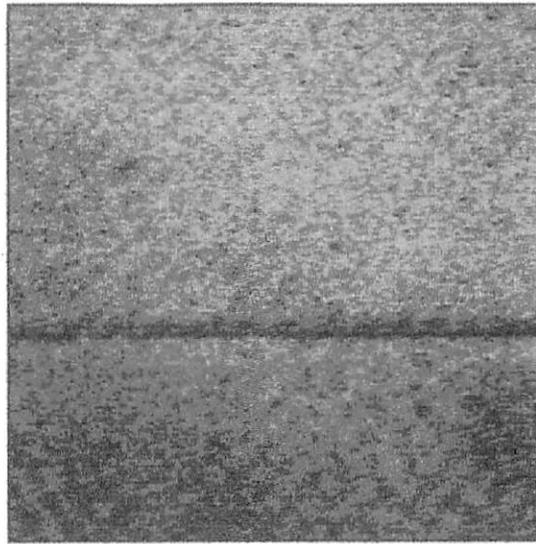
object



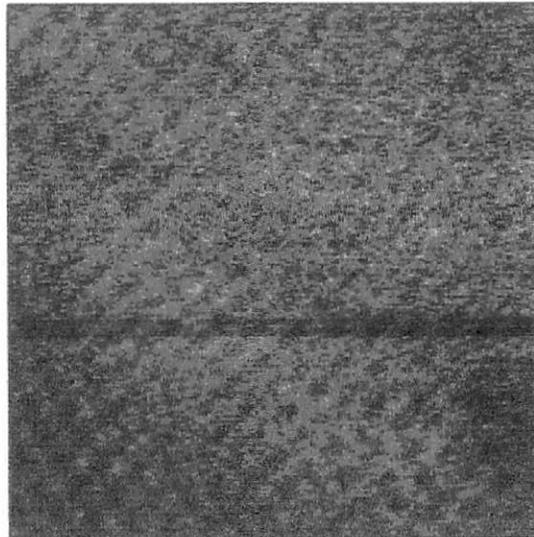
reference

(b) EVEN フィールドで取り込んだ画像

図 4.2 各フィールドの物体光と参照光



(a) ODDフィールドで取り込んだ画像



(b) EVENフィールドで取り込んだ画像

図 4.3 取り込んだ各フィールドの干渉画像

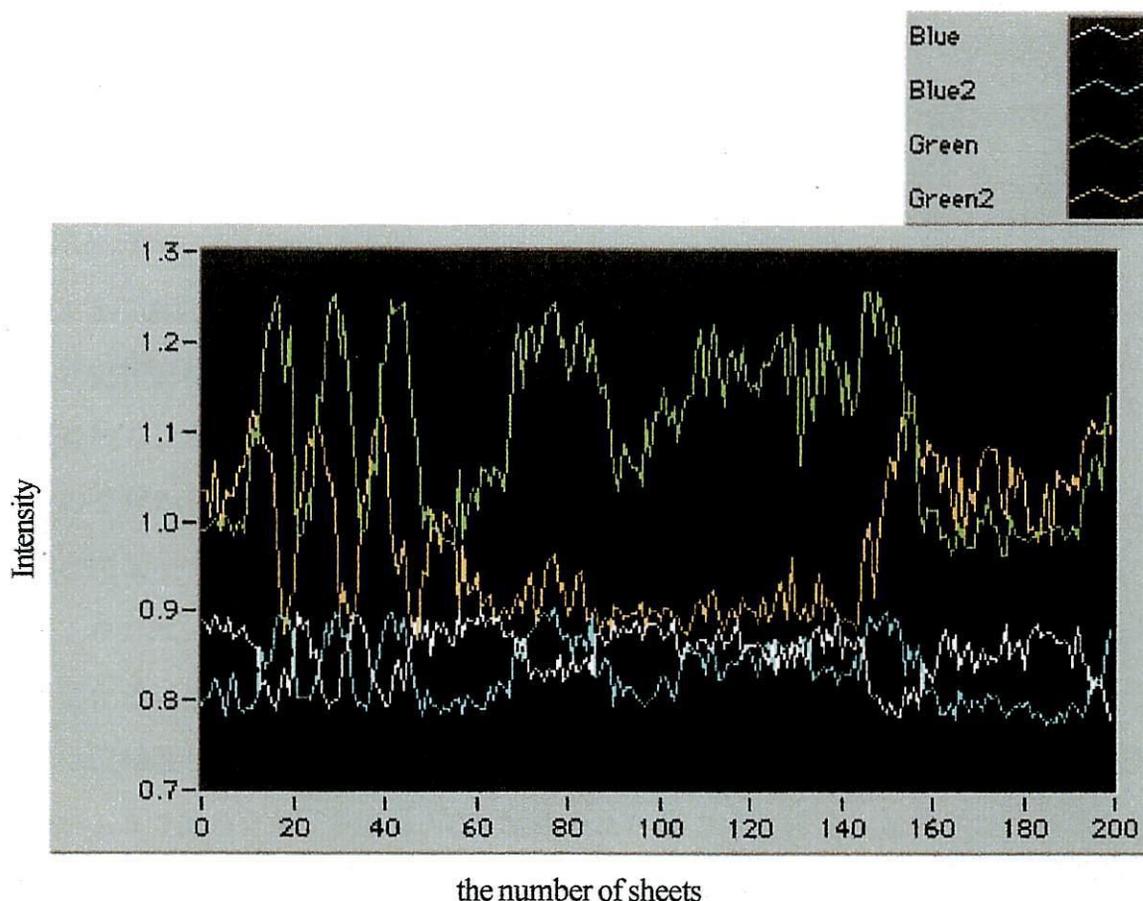


図 4.4 取り込んだ画像の 2 点における光強度変化

取り込んだ画像のある 2 点における光強度変化を図 4.4 に示す。Blue (488.0nm) と Green (514.5nm)、Blue2 と Green2 は画像の同じ点からのデータであるが、画像はそれぞれ ODD と EVEN に分けて表示してあるため、全く同じ点ではなく 1 ピクセル  $y$  軸方向 (縦方向) にずれた点である。変形量の測定であるため、周辺との差はほとんどないと考えられるので問題はない。

取り込み枚数 40 枚程度まではピエゾ素子を使って、参照光を動かすことによって光路差を微小に変えている段階である。この部分を初期位相の決定に使用する。その以降の山の部分はモータを使って測定対象物に大きな変形を加えている部分である。

光強度のデータは規格化を行っている。測定において光強度を利用しているため、物体光、参照光は一定の光量でなければならないが、実際には一定ではない場合が多い。そこで、取り込む 1 枚の画像全体の光強度の和をとる。これを取り込むすべ

ての画像について行い、その値を一定にすることで光量が一定と考えることができ、これが規格化である。

取り込んだ画像から得た光強度変化によって得られる、ある点における二波長それぞれによる位相変化量を図4.5に、その二波長の位相変化量の差をとったものを図4.6に示す。

図4.5において一波長で見たとき、20枚目と60枚目を比較するとこの2つではほとんど位相変化がなく、この2枚の画像から位相変化を使って変形量を算出すると、変形量は0になってしまう。実際には位相変化が $2\pi$ 以上あるためであるが、それはこの2枚からでは判断できない。そこで二波長を使い、その位相変化量の差をとることによって分かる。

図4.6では、初期位相を決める段階（取り込み枚数40枚程度）から $2\pi$ で約0.5位相変化量に差が出ていることが分かる。これを基準に考えると、100枚目のあたりでは位相変化量の差が0.5であるため、約 $2\pi$ 、125枚目のあたりでは位相変化量の差が1.5であるため、約 $6\pi$ 、150枚目のあたりでは位相変化量の差が3.0であるため、約 $12\pi$ の違いがあることが分かる。2つの位相変化量の差をとることによって、 $2\pi$ の整数倍以上の位相変化ある場合にも位相変化量の差には違いが出るため、その位相変化量を判断することができる。

位相変化量の差を取るときに、位相は $2\pi$ 周期であるため、 $2\pi$ の整数倍になると0に戻ってしまうので、アンラップする必要がある。図4.7(a)に示すような位相変化があったとすると、その差をとると図4.7(b)の実線のようになる。この落ち込みは位相が $2\pi$ 周期によるものであり、連続的であるとすると落ち込んでいる部分は破線のようになる。この落ち込み部分を破線のようにすることをアンラッピングといい、位相変化量の差を取る際には、この作業を行っている。

図4.8には、ある時点における面での位相変化量を示している。取り込んだ画像から位相変化量を計算しているため、この様に1点だけでなく面全体の位相変化量を出すことができ、面全体の变形量を定量的に測定できる。

データのS/N値はあまり良好ではないので、改善する必要がある。原因として考えられるのは、光ファイバは非常に外乱に対して影響を受けやすく、光量が一定になっていなかったためであると考えられる。

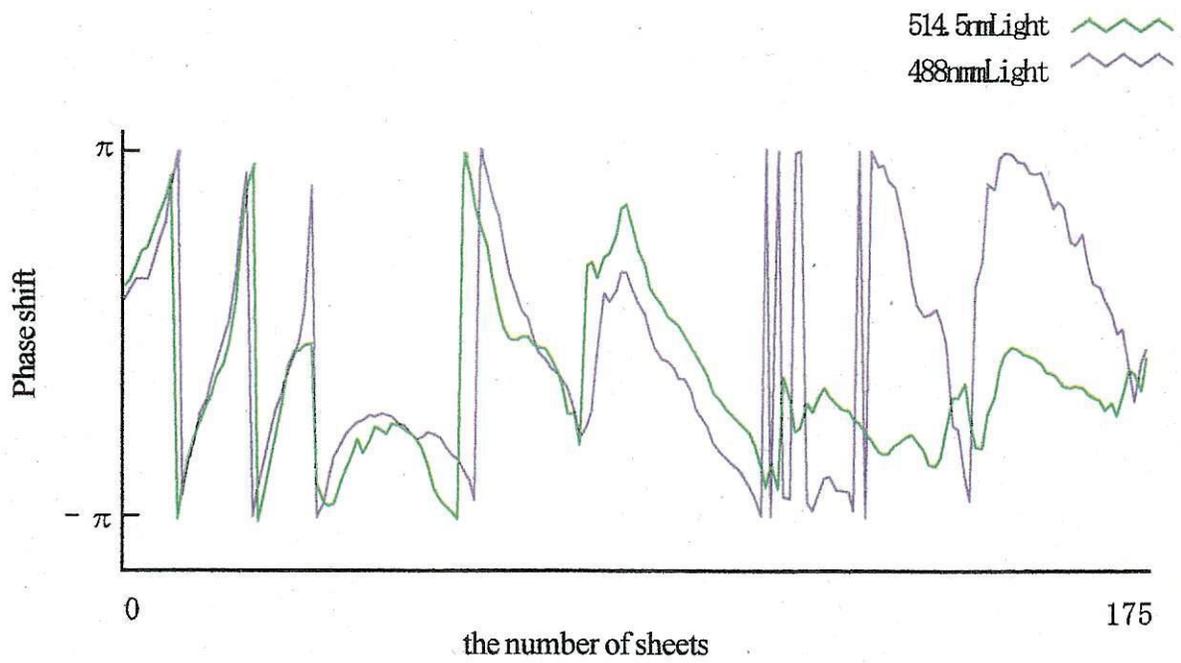


図 4.5 取り込んだ画像から得た位相変化量

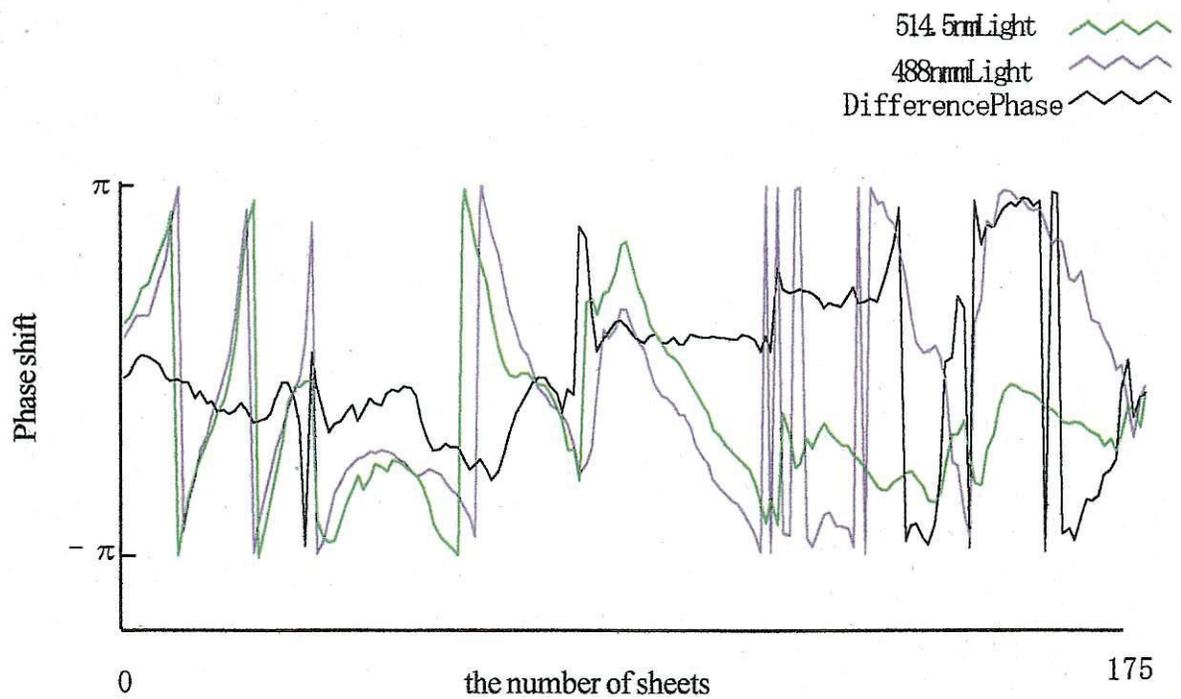


図 4.6 取り込んだ画像から得た位相変化量とその差

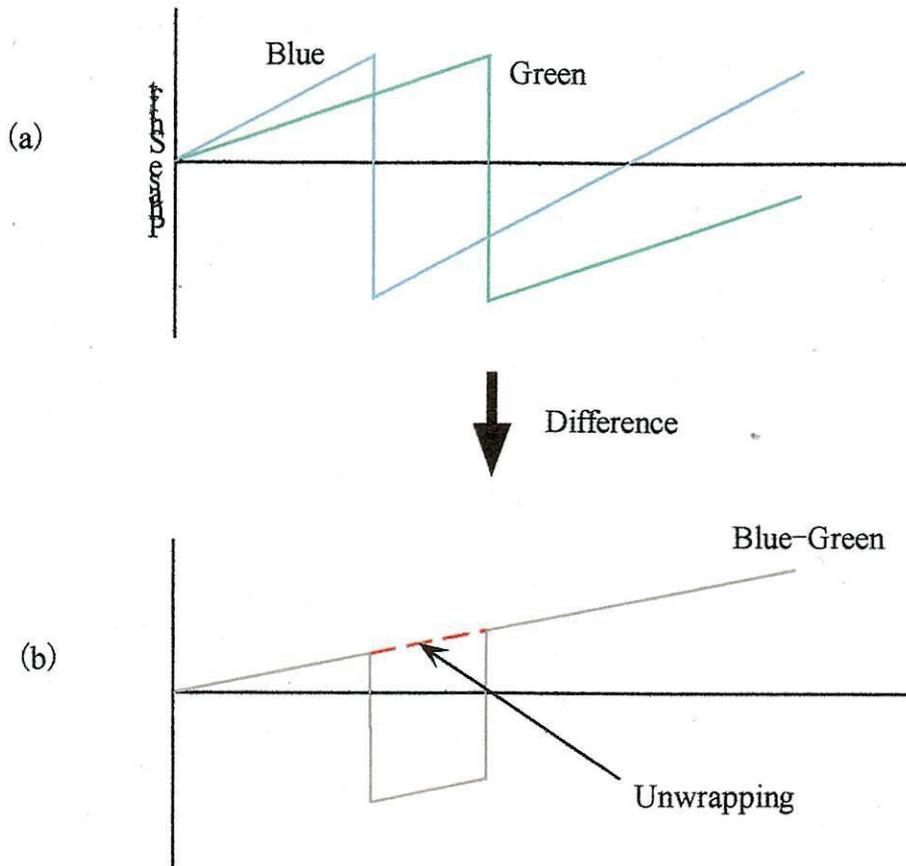
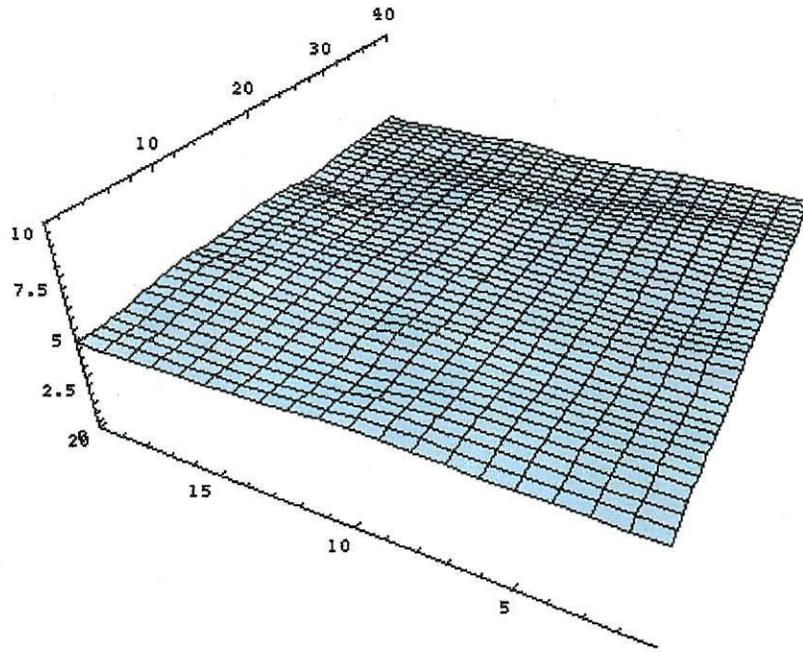
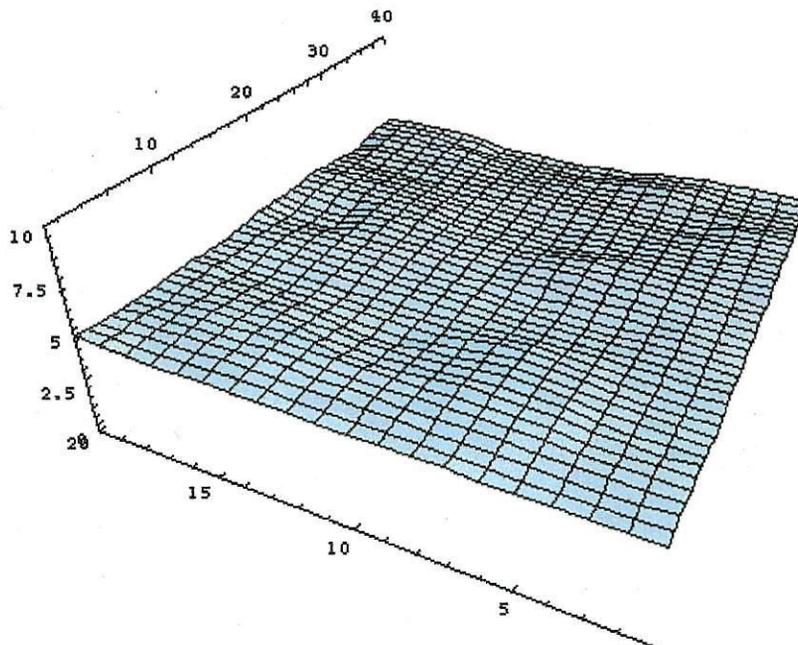


図 4.7 位相変化量の差をとった時のアンラップ処理



(a) ODDフィールド



(b) EVENフィールド

図 4.8 ある時点における平面の位相変化量

## 4.2 測定精度向上への取り組み

測定を行った結果、S/N値がよい結果が得られなかったため、様々な改善を行い測定精度の向上を図った。

### 4.2.1 測定における問題点とその改良方法

問題点として以下のことがあった。

- ・光ファイバにより光量が不安定になる。
- ・物体光の光量が弱すぎる。
- ・画像の取り込み速度が遅い

使用した光ファイバには入口と出口がそれぞれ2つあり、さらに中央には接合部があり、片方の入口から入射すると両方の出口から出るようになっていた。本研究には非常に適した光ファイバであったが、いくつか問題点があった。

- ・入射した光は2つの出口で光量に差があり、さらに入口によってその差にも違いがある。
- ・接合部は非常に影響を受けやすく、軽く触れただけでも光量に変化してしまう。
- ・接合部による光のロスが大きい。
- ・レーザの出力を上げてもファイバから出てくる光量は増えず、ほとんど変化がない。

このファイバを使用していることで、光をロスするだけでなく、光量も一定にならないため、ファイバを光学系を配置している防振台に貼付して固定したがほとんど改善がなかった。そこでこのファイバを使用しないように光学系を改良した。改良した実験装置概略図を図5.9に示す。

改良した光学系では、光ファイバに入れる前にそれぞれの光をビームスプリッタで2つに分け、光ファイバカプラを物体光用、参照光用とし、それぞれに入射する。これによって2つ入口、出口があるファイバを使用せずに同じ状態にすることができる。

さらに物体の反射光が非常に弱かったため、測定対象物に反射テープを貼付した。この反射テープは正面から当たった光を強く反射するため、カメラ前にビームスプ

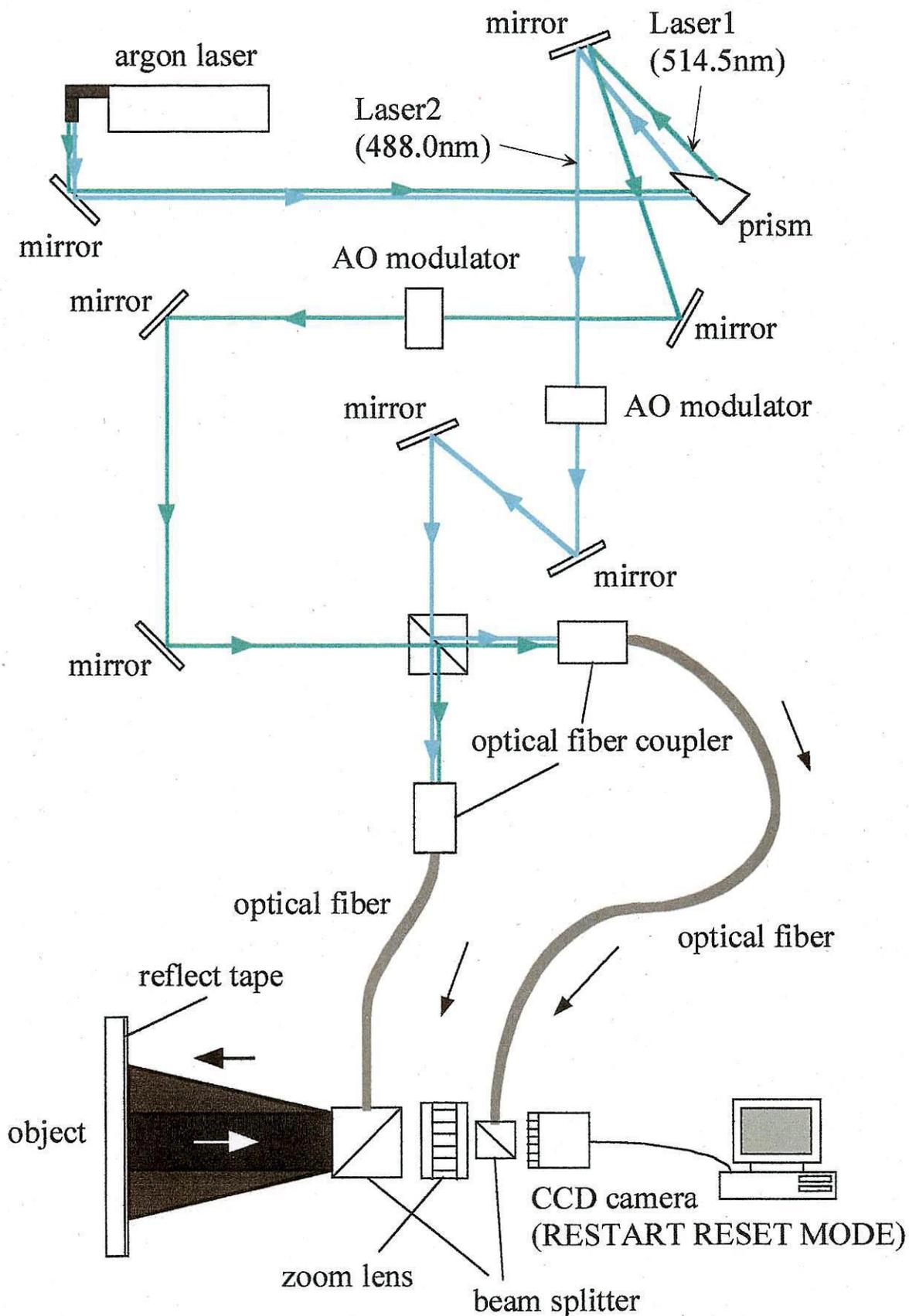


図 4.9 改良した実験装置概略図

リッタを置き、横から光を当てて、測定対象物の正面から光が当たるように変更した。

パソコンの性能上（CPU 200MHz）、1秒間に10枚しか画像を取り込むことができなかった。CCDカメラは1/30秒で1枚の画像を取り込むので、その1/3しか取り込んでいなかった。そこでパソコン自体を性能のよいもの（CPU 266MHz）に変更し、プログラムも変更した。これによって1秒間に30枚画像を取り込むことができるようになり、CCDカメラが取り込む速度と同じ速さで取り込めるようになった。

#### 4.2.2 改良後の実験結果

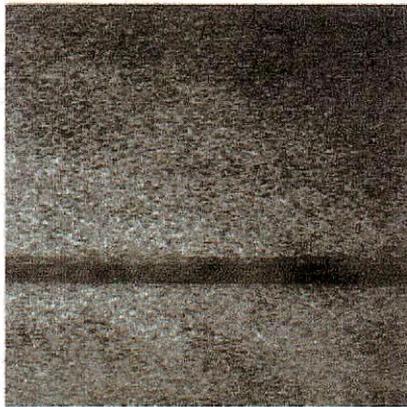
光学系を改良した結果、取りこむ画像の全体的な光強度は上がり、レーザの出力を上げればファイバから出る光の光量も増えるようになった。しかし、二波長のレーザをビームスプリッタで物体光と参照光に分けて、それぞれを光ファイバに入れる際に、分けたそれぞれの光の焦点を合わせる必要があった。

測定した結果を図4.10～図4.13に示す。図4.10は取り込んだ干渉画像、図4.11は光強度変化、図4.12は位相変化量、図4.13は位相変化量とその差である。改良前の結果と同様に位相変化量の差をとることで大きな変形も測定できることを示している。さらに画像の取り込み速度が向上したことと、光量が比較的安定したことにより位相変化量の差の曲線が滑らかになっている。

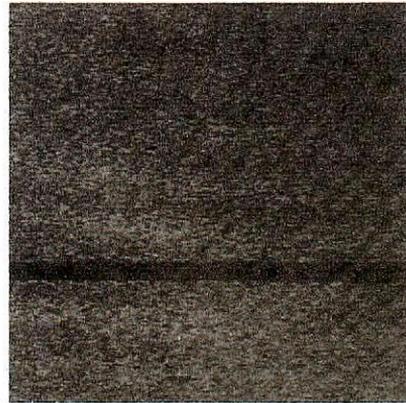
この光学系を組む上で、二波長を1つの光ファイバカップラで、光ファイバに入れる必要があるのだが、両方の焦点を全く同一点に合わせるのは非常に難しく、光量もほぼ同程度にしなければならぬため、光量の少ない点で合わせている。しかし、今回はレーザの出力を上げることで全体の光量を上げることができると、測定できる光量は得ることはできた。

問題点として、物体光、参照光に光量のばらつきが依然生じる。これは解析する上で非常に重要な点であるため改善する必要がある。

DSPI法においてスペックルの形状、照明方向、観測方向が不変であることが条件であるが、変形を与える際にその変形量が大きすぎる場合、スペックルの形状が変わってしまい、正確な測定ができないという問題がある。



(a) ODD フィールド



(b) EVEN フィールド

図 4.10 取り込んだ各フィールドの干渉画像

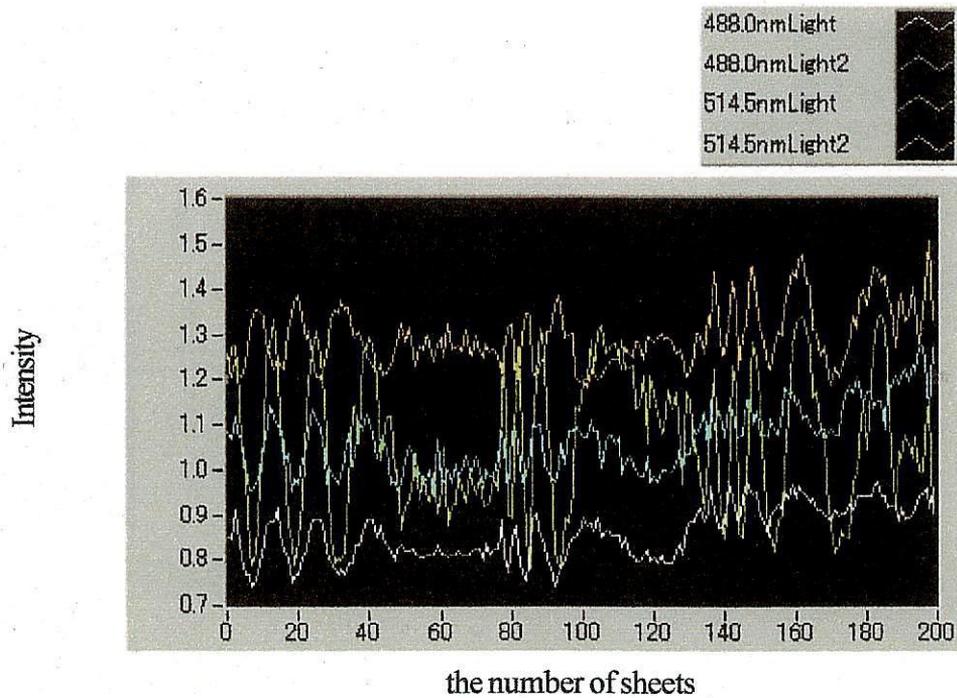


図 4.11 取り込んだ画像の 2 点における光強度変化

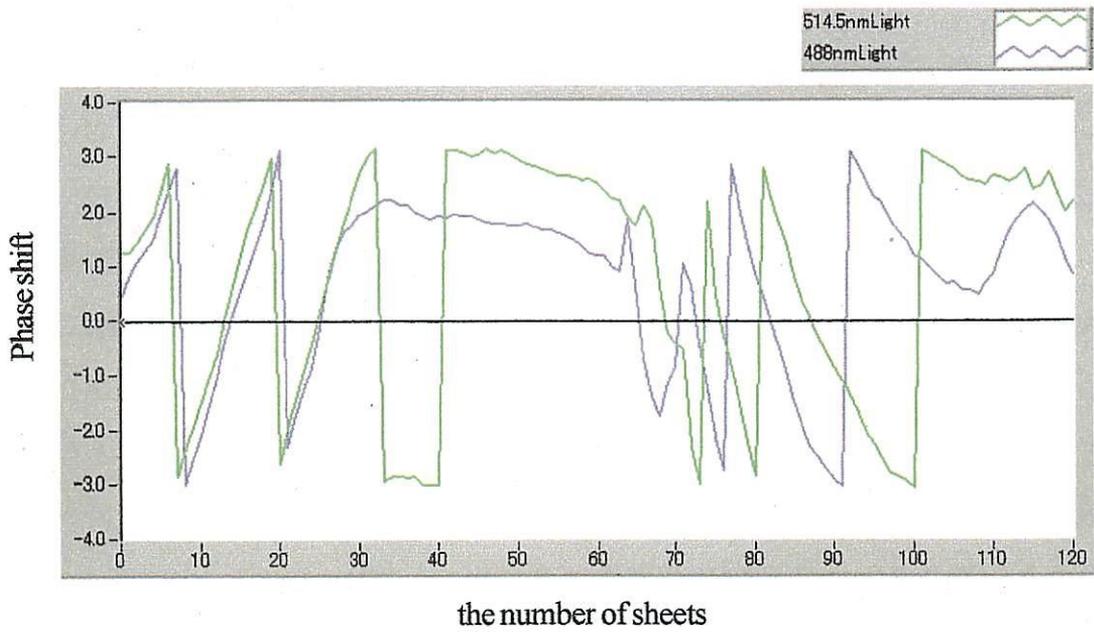


図 4.12 取り込んだ画像から得た位相変化量

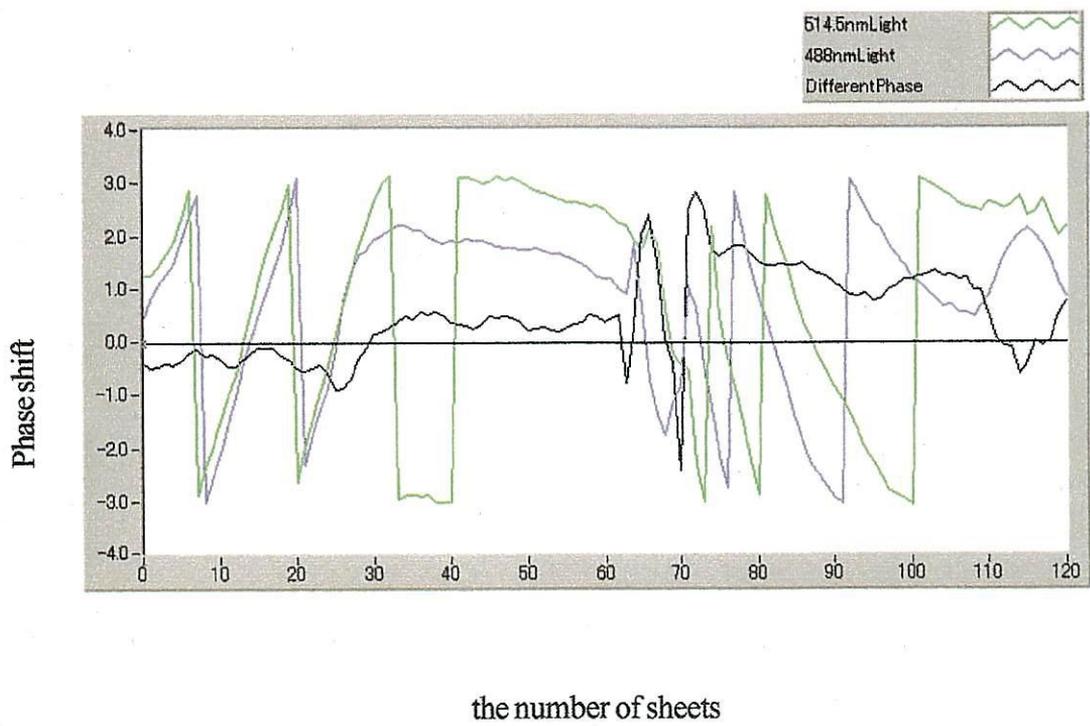


図 4.13 取り込んだ画像から得た位相変化量とその差

## 第5章 結論

従来の光変形計測では波長より大きな変形は測定できなかつた。そこで、二波長スペックル干渉法を用いることで、以下の結果を得た。

- 1)・AOモジュレータとCCDカメラのRESTART RESETモードを使用することで、二波長でほぼ同時刻の画像を取り込むことができた。
- 2)・二波長の位相変化量の差をとることによって、位相変化量が $2\pi$ 以上の大きな変形（用いるレーザ光の波長以上の）も測定が可能となった。1画像を取り込む時間を $\Delta t$ とし、2波長の合成波長を $\lambda_e$ とすると変形速度は $(\lambda_e/\Delta t)/2$ まで原理的には測定が可能である。この値は実験に用いたアルゴンレーザ光源と一般的なCCDカメラでは0.142mm/sであり、当然高速度取込が可能なカメラを用いるとその測定範囲は上がる。

＜参考文献＞

- (1) 谷田貝豊彦： ”応用光学 光計測入門” 丸善株式会社 P. 146-P. 163 (1988)
- (2) 平井紀光： ” 実用レーザー技術” 共立出版株式会社 P. 200-P. 206 (1987)
- (3) 小原治樹： ” 電子回路学入門-機械工学者のためのアナログ・デジタル・パワー回路の基礎” コロナ社 P. 36-37、P. 107 (1998)
- (4) 豊岡了： ” スペックル干渉法による塑性変形過程の時空間観察” 応用物理 第66巻 第5号 P. 457-P. 461 (1997)
- (5) 吉田賛一郎： ”スペックル干渉法による固体材料の変形解析および破断予測法” レーザー研究 第26巻 第9号 P. 668-P. 671 (1998)
- (6) 豊岡了： ” レーザーによる非破断検査と診断” レーザー研究 第26巻 第9号 P. 666-P. 667
- (7) DANIEL MALACARA: ”Optical Shop Testing Second Edition” Wiley-Interscience Publication P. 501-P. 515 (1992)
- (8) レーザ協会： ” レーザ応用技術ハンドブック” 朝倉書店 P. 279-P. 289 (1984)
- (9) Kjell j. Gasvik: ”OPTICAL METROLOGY Second Edition” John Wiley & Sons P. 147 (1995)