

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	干渉光の強度信号の時間変化を用いた位相信号検出方式の耐環境性向上に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	山崎和良
Author(English)	Kazuyoshi Yamazaki
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11438号, 授与年月日:2020年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:山口 雅浩,中村 健太郎,金子 寛彦,小尾 高史,渡辺 義浩
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11438号, Conferred date:2020/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

博士論文

干渉光の強度信号の時間変化を用いた 位相信号検出方式の耐環境性向上に関する研究

指導教員 山口 雅浩

東京工業大学 工学院 情報通信系

山崎和良

2020 年 2 月

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 本論文の構成	2
第2章 干渉計測法とホモサイン位相検出法	4
2.1 はじめに	4
2.2 干渉計測法	4
2.2.1 位相シフト法	4
2.2.2 ホモサイン位相検出法	8
2.2.3 白色干渉法	11
2.2.4 微分干渉顕微鏡	12
2.2.5 フーリエ変換法	15
2.2.6 本研究のターゲット	17
2.2.7 方式比較	18
2.3 位相シフト法アルゴリズム検討	19
2.3.1 評価方法	19
2.3.2 レーザ強度変化の影響	20
2.3.3 位相シフト量のずれの影響	21
2.3.4 カメラ非線形感度ずれの影響	23
2.3.5 アルゴリズム比較	25
2.4 まとめ	26
第3章 提案方式の概念	27
3.1 はじめに	27
3.2 強度ずれによる位相誤差の発生要因	27
3.3 提案方式の概念	30
3.4 製造ライン向け位相検出	32
3.4.1 信号処理フロー	32
3.4.2 位相復元	32
3.5 ホログラフィックメモリの位相検出	34
3.5.1 信号処理フロー	34
3.5.2 記録再生データ	35
3.6 まとめ	36
第4章 製造ライン向け時間微分位相検出法の検討	37
4.1 はじめに	37

4.2	時間微分位相検出法の原理	37
4.2.1	光学系	37
4.2.2	位相検出原理	38
4.2.3	特徴	42
4.3	実験および評価方法	44
4.3.1	実験系	44
4.3.2	位相信号検出の原理検証	48
4.3.3	評価方法	49
4.4	耐環境性に関する実験	50
4.4.1	強度ずれの影響	50
4.4.2	位相ずれの影響	52
4.5	考察	53
4.5.1	光学部品よる迷光の影響に関する検討	54
4.5.2	線状の位相誤差に関する検討	55
4.5.3	測定対象物の効率分布に関する検討	58
4.5.4	測定対象物の移動方向ずれに関する検討	60
4.5.5	位相シフト他方式との比較	65
4.6	まとめ	70
第5章	ホログラフィックメモリのページ間差動位相検出法の検討	72
5.1	はじめに	72
5.2	位相変調型ホログラフィックメモリ	72
5.3	ページ差動位相検出法の原理	73
5.3.1	光学系	73
5.3.2	位相検出原理	76
5.4	位相検出の原理検証および評価方法	79
5.4.1	実験系	79
5.4.2	位相検出の原理検証	81
5.4.3	評価方法	82
5.5	最適な記録位相差に関する検討	83
5.6	耐環境性に関する実験	85
5.6.1	強度ずれの影響	85
5.6.2	波面ずれの影響	86
5.7	考察	87
5.7.1	最適記録位相差に関する検討	88
5.7.2	強度ずれの影響に関する検討	92
5.7.3	波面ずれの影響に関する検討	96

5.7.4	光学部品のばらつきに関する検討	97
5.7.5	位相4値記録に関する検討	99
5.7.6	位相信号パターン	101
5.7	まとめ	102
第6章	ホログラフィックメモリのページ間差動強度増幅法の検討	103
6.1	はじめに	103
6.2	強度変調型ホログラフィックメモリ	103
6.3	従来の光ディスクの信号増幅検出	104
6.3.1	光学系	104
6.3.2	増幅信号検出原理	106
6.4	ページ間差動強度増幅検出法の原理	107
6.5	原理検証および評価方法	109
6.5.1	実験系	109
6.5.2	強度増幅検出の原理検証	111
6.5.3	評価方法	113
6.6	耐環境性に関する実験	115
6.6.1	強度ずれの影響	115
6.6.2	波面ずれの影響	118
6.7	考察	120
6.7.1	ページ間の位相ずれの影響に関する検討	120
6.7.2	大容量化、高速化に関する検討	121
6.7.3	再生光強度パターン	121
6.8	まとめ	122
第7章	ホログラフィックメモリ高速再生技術	123
7.1	はじめに	123
7.2	従来技術とその課題	123
7.3	プローブ光角度制御技術の原理	126
7.3.1	光学系	126
7.3.2	角度制御信号検出原理	130
7.3.3	特徴	132
7.4	分離角度の最適化	135
7.5	角度制御信号の原理検証	137
7.6	考察	140
7.6.1	記録媒体の傾きの影響	141
7.6.2	波長ずれの影響	141
7.6.3	記録と再生時の記録媒体温度差の影響	142

7.6.4 記録媒体温度ずれの影響	143
7.6.5 補正精度の見積り	144
7.7 まとめ	145
第8章 結論	146
参考文献	149
研究業績	154
謝辞	156

[略語の説明]

GM (Galvo mirror) : ガルバノミラー

LD(Laser Diode) : 半導体レーザ

PD (Photo Detector) : 光検出器

ACS (Angular Control Signal) : 角度制御信号

HBS (Half Beam Splitter) : ハーフビームスプリッタ

PBS (Polarizing Beam Splitter) : 偏光ビームスプリッタ

HWP (Half Wave Plate) : 1/2 波長板

QWP (Quater Wave Plate) : 1/4 波長板

SLM (Spatial light modulator) : 空間光変調器

ECLD (External Cavity Laser Diode) : 外部共振器付きレーザ

FWHM (Full Width at Half Maximum) : 半値全幅

第 1 章 序論

1.1 研究の背景と目的

光計測は、非接触、無侵襲、非破壊、高感度、高速などの観点から様々な用途に応用されている。従来、光計測では最も簡便に測定できる強度情報が、広く利用されてきた。その一方で、近年、位相情報が注目されており、工業分野、情報分野、バイオ分野、医療分野などへの適用が期待されている。例えば工業分野では、精密加工製品の高機能化、精密化などに伴い、表面の 3 次元形状をナノメートル精度で可視化したいという要求がある。強度情報では、直接高さを測定することができないが、位相情報の検出に干渉計測法を用いることでナノメートル精度の高さ測定が可能となる。例えば、半導体製造業では、パターンの細線化が進んでおり、従来影響していなかったウェハ上の凹凸が性能に影響している。このため、半導体検査装置では、微分干渉顕微鏡を用いてウェハ上の凹凸を可視化している[1, 2]。

さらに、電子部品の複雑化などに伴い、さまざまな部品が実装されている電子部品の内部構造を可視化したいとの要求がある。例えば、半導体パッケージの封止材中のボイドを検出することが求められている。封止材は、半導体や金属配線を外部からの衝撃や温度から保護する樹脂部材である。この樹脂部材にボイドが発生すると、外部からの衝撃に弱くなる、水分を含むと半導体や金属配線が劣化する、などの課題がある。従来、内部の可視化には X 線の吸収計測が適用されているが、吸収率の低い樹脂材料に適用することができなかった。この課題に対し、X 線タルボ干渉計を適用し、位相情報からボイドを検出したとの報告がある[3]。また、X 線と同様に物体を透過する電磁波のテラヘルツ波でも位相シフト法を用いて内部の屈折率の違いを可視化したとの報告がある[4]。

また、フラットパネルディスプレイやマイクロマシンなどの複雑な段差を持つ物体の表面形状を製造ラインのインライン検査で評価することが求められている。これに対して、測定時間 2 秒、測定再現性 5nm の白色顕微鏡を実現したとの報告がある[5]。

情報分野では、デジタルデータの爆発的な増加[6]に伴い、記録媒体としてホログラフィックメモリが期待されている。ホログラフィックメモリは、2 次元のデータを記録媒体に 3 次元的に多重記録を行うことで、大容量化を実現できる。さらに近年、記録媒体に多値の位相情報を記録する位相変調型のホログラフィックメモリの研究が行われている[7-9]。位相情報はカメラで直接検出できないため、干渉計測法を用いて記録した位相情報の再生が行

われる。

そして、バイオ分野では、強度情報では見ることができない透明物質の検出に微分干渉法などの干渉計測法を適用することで、透明物質の可視化が行われている[10, 11]。また、医療分野では、干渉現象を用いて X 線の位相情報を検出する研究が行われている。例えば、従来 X 線の吸収がない部位(例えば、乳がんやリュウマチ(軟骨))については可視化することができなかったが、位相情報を検出することで、特定部位の検出を高感度化できると報告されている[12]。

また、赤外線を使った光干渉断層計測は、眼球内の最も奥にある網膜の 3 次元画像を測定することができるため、眼科で広く利用されている。光干渉断層計測により従来、表面から見てわからなかった浮腫や神経線維の減少などの異常が可視化できるようになった。

このように、高精度の位相情報の検出に電磁波の干渉計測が必要とされている。一方で、干渉計測法は耐環境性の低さなどが実用化を阻害している。そこで、本研究では耐環境性の高い干渉計測法の基礎技術を確立すべく、時間の概念を取り入れた新しい干渉計測法を提案し、耐環境性に対する原理検証を行った。そして、この干渉計測法を製造ライン検査およびホログラフィックメモリに適用する検討を行った。

本研究の目的は、製造ライン検査、ホログラフィックメモリ向けに耐環境性の高い位相検出の基礎技術を確立することである。

1.2 本論文の構成

図 1.1 に本論文の構成を示す。本論文は、8 章の構成である。

第 2 章では、従来の干渉計測法について概説し、製造ライン検査およびホログラフィックメモリ適用に向けた議論を行い、ホモダイン位相検出法が有用性が高いと判断した。そして、従来のホモダイン位相検出法の課題について明確にする。

第 3 章では、ホモダイン位相検出法の課題を解決する手法を説明する。また、その手法を製造ラインおよびホログラフィックメモリに適用するときの位相検出の考え方を説明する。

第 4 章では、製造ライン検査の干渉計測法として、物体光の位相の時間変化を検出する時間微分位相検出法を新たに提案する。製造ラインで測定対象物が移動していることを利用した時間微分位相検出法の位相検出原理について説明を行う。また、従来の干渉計測法で課題となっていた参照光の強度分布ずれや波面ずれに対するロバスト性が高いことを実験で確認する。さらに、時間微分位相検出法の課題について議論する。

第 5 章では、位相変調型ホログラフィックメモリのページ間の位相信号の差を検出する

ページ間差動位相検出法を新たに提案する。ここでは、ページ間の再生光の強度変化に対するロバスト性を向上するための最適な記録位相について説明する。さらに、ページ間差動位相検出法を用いた位相 4 値記録の可能性を示す。

第 6 章では、時間の概念を強度信号検出に拡張した、ページ間差動強度増幅検出法を強度変調型ホログラフィックメモリに適用することを提案する。ここでは、参照光の強度分布ずれや波面ずれに対して、ロバスト性が高いことを実験で確認する。また、信号増幅による大容量化、高速化の効果を示す。

第 7 章では、ページ間差動位相検出法、ページ間差動強度増幅検出法の耐環境性を向上するため、ホログラフィックメモリの高速性と高精度化を両立する新たなプローブ光の角度制御技術を提案する。本技術の角度制御信号の生成方法および実験結果について議論し、高速化の実現性を示す。

第 8 章で、結論を述べる。

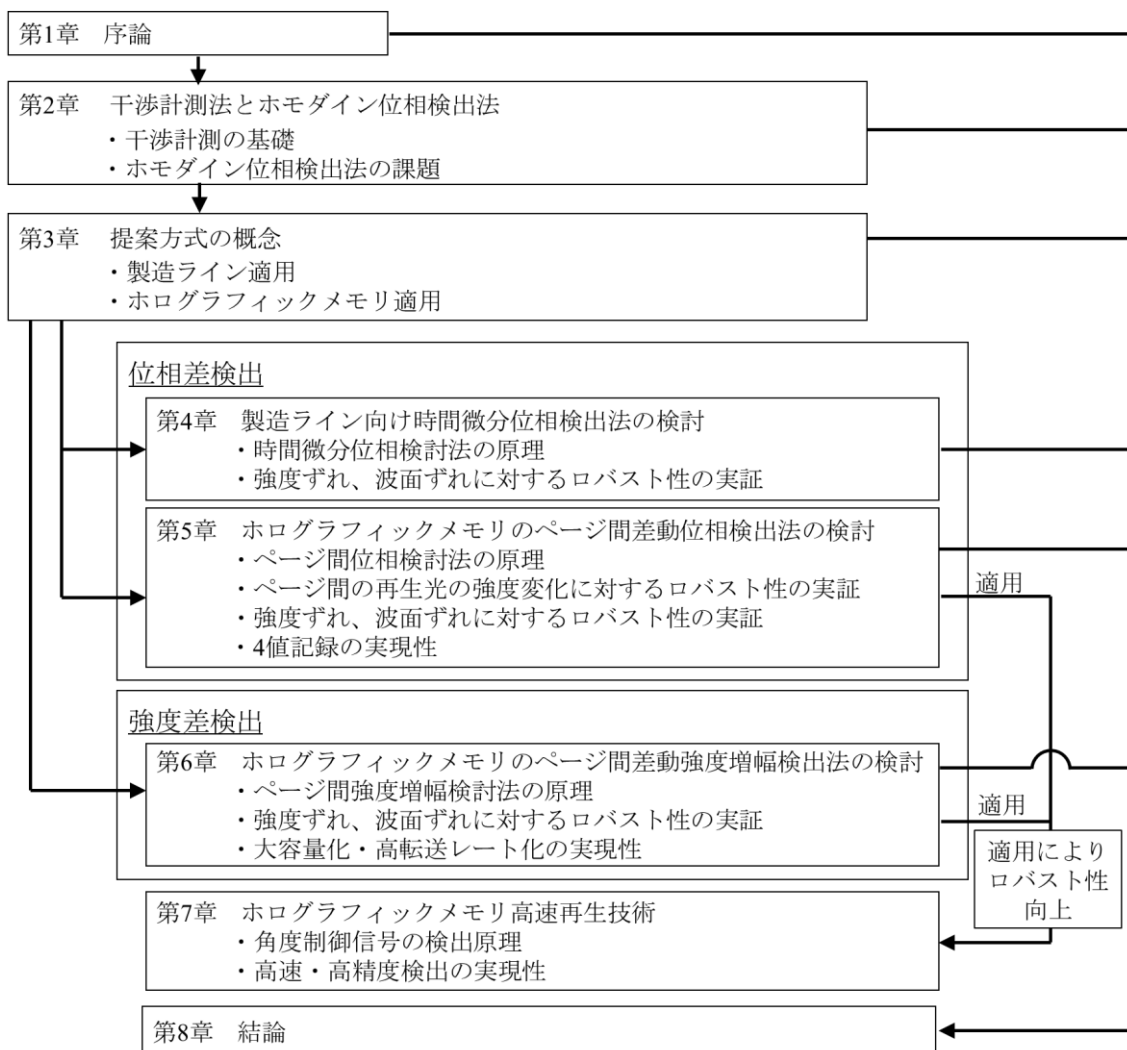


図 1.1 本論文の構成

第 2 章 干渉計測法とホモダイン位相検出法

2.1 はじめに

本章では、従来の干渉計測法について概説し、製造ライン検査およびホログラフィックメモリ適用に向けた干渉計測法の耐環境性に関する課題について議論する。そして、従来のホモダイン位相検出法の課題について明確にする。

2.2 干渉計測法

レーザや白色光源を用いた干渉計測法はいくつかの方式が提案されており、実用化されている。ここでは、従来方式の手法およびその課題について説明する。

2.2.1 位相シフト法

位相シフト法は、1970 年代から研究されており[13-16]、1985 年に磁気テープの表面形状を解析[17]して以来、検査装置として幅広く使われるようになった。そして、近年でも物体の表面計測[18]、物体内部の形状計測[4]などへの応用が提案されている。

図 2.1 は、位相シフト法の光学系構成を示している。レーザから出射した光ビームは、ビームスプリッタによって、物体光（反射）と参照光（透過）に分けられる。物体光は、ビームスプリッタを反射後、測定対象物を反射する。このとき、反射面の形状に応じて所定の位相が物体光に付加される。そして、測定対象物を反射した物体光はビームスプリッタを透過する。一方、参照光はビームスプリッタを透過した後、可動ミラーを反射する。可動ミラーは光軸方向に動くことができるようになっており、参照光に一定の位相を加えることができる。ここでは、モデルを単純にするために位相可変素子として可動ミラーを用いるが、液晶素子などを用いて高速化を図ることも可能である。そして、可動ミラーを反射した参照光はビームスプリッタを反射し、物体光とともにリレーレンズを経てカメラに入射する。リレーレンズは、測定対象物の表面の像をカメラに結像するために配置されている。

このとき、カメラ上で物体光と参照光が干渉する。ここで、物体光の電場 $O(x, y)$ 、参照光の電場 $R_m(x, y)$ を

$$O(x, y) = A(x, y)\exp\{-i\theta(x, y)\} \quad (2.1)$$

$$R_m(x, y) = B(x, y)\exp[-i\{\phi(x, y) + \Delta\phi_m\}] \quad (2.2)$$

とする。なお、 $A(x, y)$ 、 $\theta(x, y)$ は物体光の振幅と位相、 $B(x, y)$ 、 $\phi(x, y)$ は参照光の振幅と位相を示している。また、 $\Delta\phi_m$ は位相可変素子の可動ミラーにより m 番目の測定時に与えられた位相を示している。そして、カメラで検出される m 番目の干渉光の強度 $I_m(x, y)$ は、

$$\begin{aligned} I_m(x, y) &= |O(x, y) + R_m(x, y)|^2 \\ &= A(x, y)^2 + B(x, y)^2 + 2A(x, y)B(x, y)\cos\{\theta(x, y) - \phi(x, y) - \Delta\phi_m\} \\ &= a_0 + a_1\cos\Delta\phi_m + a_2\sin\Delta\phi_m \quad (2.3) \end{aligned}$$

$$a_0 = A(x, y)^2 + B(x, y)^2 \quad (2.4)$$

$$a_1 = 2A(x, y)B(x, y)\cos\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\} \quad (2.5)$$

$$a_2 = -2A(x, y)B(x, y)\sin\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\} \quad (2.6)$$

と示すことができる。そして、可動ミラーの位相 $\Delta\phi_m$ を変えて N 回測定した画像の強度分布に対して最小二乗法を適用し、最も確からしい物体光と参照光の位相差 $\theta(x, y) - \phi(x, y)$ を求めることができる。参照光の位相 $\Delta\phi_m$ を 0 から 2π の間で等間隔に N 段階変化させる場合、最小二乗法で求められる a_0 、 a_1 、 a_2 は、

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} I_m(x, y, \Delta i) \quad (2.7)$$

$$a_1 = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} I_m(x, y, \Delta i) \cos\Delta\phi_m \quad (2.8)$$

$$a_2 = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} I_m(x, y, \Delta i) \sin\Delta\phi_m \quad (2.9)$$

となる。このため、(2.5)式、(2.6)式、(2.8)式、(2.9)式を用いて、物体光と参照光の位相差 $\theta(x, y) - \phi(x, y)$ は、

$$\theta(x, y) - \phi(x, y) = -\tan \frac{\sum_{i=0}^{N-1} I_m(x, y, \Delta i) \sin \Delta \phi_m}{\sum_{i=0}^{N-1} I_m(x, y, \Delta i) \cos \Delta \phi_m} \quad (2.10)$$

と示すことができる[14, 19]。

以上のように、N回画像を測定し、測定画像の各画素に対する強度情報について、(2.10)式の演算を行うことで、物体光と参照光の位相差を求めることができる。このとき、参照光の位相がフラットまたは既知であれば、測定対象物の表面の形状を波長精度で正確に求めることができる。

位相シフト法は、測定回数が多いほど最小二乗法の誤差が小さくなるため、ノイズ要因に対する影響は小さく抑えられるが、測定に時間を要してしまうため高速化の観点に課題がある。

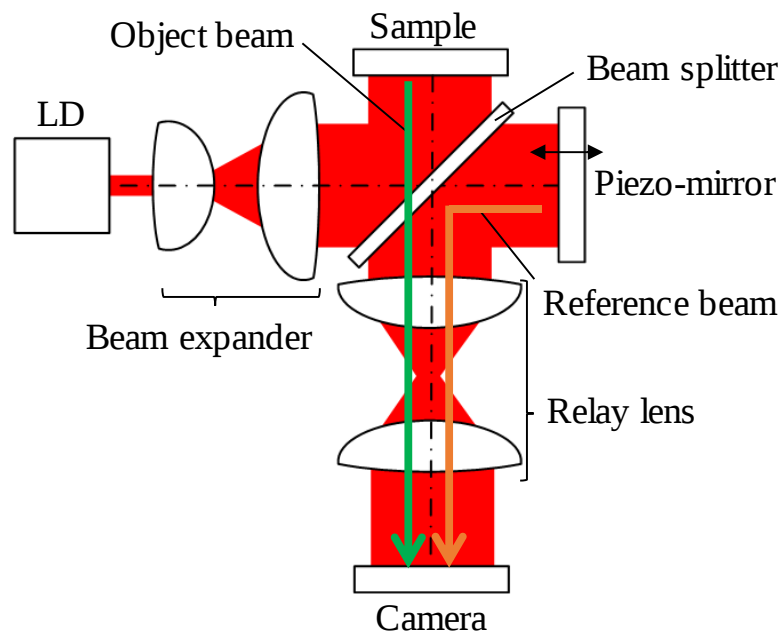


図 2.1 位相シフト法光学系

表 2.1 は、位相シフト法の 7 つの演算方法を示している[20-22]。1 列目は各方式の名称を示しており、step の前の数字が測定回数を示し、回数が同じ物に対しては(1)、(2)と示すことで区別した。また、2 列目は位相可変素子の位相量 $\Delta\phi_m$ を示している。なお、2 列目のカッコ内は位相可変素子の位相変化量を示している。そして、3 列目は、物体光と参照光の位相差の演算方法を示しており、カメラで検出した m 番目の検出信号を用いて位相差を検出し

ている。2 step 方式は、2 回の計測で、物体光の振幅 $A(x, y)$ 、参照光の振幅 $B(x, y)$ 、物体光と参照光の位相差 $\theta(x, y) - \phi(x, y)$ を同時に求めることができないため、物体光の振幅 $A(x, y)$ (Step2(1))または物体光の振幅 $A(x, y)$ と参照光の振幅 $B(x, y)$ (Step2(2))を予め測定してあることが前提となる。

位相シフト法では、以上のような検出および演算を行うことで位相を求めることができる。位相シフト法は、強度信号を直接演算するだけなので演算処理に対する負荷が小さい。

ここで、例えば物体光の振幅 $A(x, y)$ に対する参照光の振幅 $B(x, y)$ の比を k とすると、(2.5)式、(2.6)式に示される干渉光の強度 $I_m(x, y)$ の位相項 a_1 、 a_2 は、

$$a_1 = 2kA(x, y)^2 \cos\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\} \quad (2.11)$$

$$a_2 = -2kA(x, y)^2 \sin\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\} \quad (2.12)$$

となる。ここで、物体光の強度を $A(x, y)^2$ と示せることから、位相項 a_1 、 a_2 は、物体光の振幅 $A(x, y)$ に対する参照光の振幅 $B(x, y)$ の比 k だけ信号が増幅されて検出されることを意味している。このため、位相シフト法は、物体光に対する参照光の強度比を大きくすることで、弱い物体光を増幅検出することができるのが特徴である。

表 2.1 代表的な位相シフト法のアルゴリズム

	$\Delta\phi_m$	Phase $\theta(x, y) - \phi(x, y)$
2 step(1) ^[20]	$0, \frac{\pi}{2} \left(\frac{\pi}{2} \right)$	$\tan^{-1} \left[\frac{I_2 - \frac{(I_1 + I_2) \pm \sqrt{(I_1 + I_2)^2 - 2\{(I_1 - A^2)^2 + (I_2 - A^2)^2\}}}{2}}{I_1 - \frac{(I_1 + I_2) \pm \sqrt{(I_1 + I_2)^2 - 2\{(I_1 - A^2)^2 + (I_2 - A^2)^2\}}}{2}} \right]$
2 step(2)	$0, \frac{\pi}{2} \left(\frac{\pi}{2} \right)$	$\tan^{-1} \left\{ \frac{I_2 - (A^2 + B^2)}{I_1 - (A^2 + B^2)} \right\}$
3 step(1) ^[21]	$\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4} \left(\frac{\pi}{2} \right)$	$\tan^{-1} \left(\frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} \right)$
3 step(2) ^[21]	$-\frac{2\pi}{3}, 0, \frac{2\pi}{3} \left(\frac{2\pi}{3} \right)$	$\tan^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{3}(I_1 - I_3)}{2I_2 - I_1 - I_3} \right\}$
4 step(1) ^[21]	$0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2} \left(\frac{\pi}{2} \right)$	$\tan^{-1} \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right)$
4 step(2) ^[21]	$-\frac{3\pi}{4}, -\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4} \left(\frac{\pi}{2} \right)$	$\tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{[(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)][3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)]}}{(I_2 + I_3) - (I_1 - I_4)} \right)$
5 step ^[22]	$-\pi, -\frac{\pi}{2}, 0, \frac{\pi}{2}, \pi \left(\frac{\pi}{2} \right)$	$\tan^{-1} \left\{ \frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \right\}$

2.2.2 ホモダイン位相検出法

位相シフト方式は、容易に位相が検出できるが、複数回の測定が必要となるためリアルタイム検出が困難である。この課題に対して、複数のカメラを用いるホモダイン位相検出方式が提案されている[23-25]。位相シフト法では、位相可変素子で位相量 $\Delta\phi_m$ の位相を付加することで、物体光と参照光の位相差を変化させ、位相を求める。これに対し、ホモダイン位相検出法では、波長板等を用いてカメラごとに物体光と参照光の位相差を変化させ、位相シフトと同じ干渉信号成分を検出する。これにより、位相シフト法と同じ位相を検出することができる。さらに、ホモダイン位相検出法のカメラの数を減らす提案もなされている。例えば、カメラ内の検出領域を2つに分割し、半分のカメラの数でホモダイン位相検出法を実現することができる[26, 27]。また、カメラの1画素ごとに異なる物体光と参照光の位相差を与え、複数画素を用いて1つの位相を求める並列位相シフト法も提案されている[28-30]。このような構成とすることで、物体光と参照光の位相差を検出することができる。ただし、これらの方式は、カメラの検出領域を分割する分、位相シフト法やホモダイン位相検出法に対して、分解能が低下する課題がある。

図 2.2 は、ホモダイン位相検出法の光学系を示す。ここでは一例として最も一般的な4Step(1)のアルゴリズムを説明する。

レーザを出射した光ビームは、ビームエキスパンダで所望の大きさのビーム径に変換された後、HWP1に入射する。HWP1は、出射光をS偏光とP偏光を含む偏光に変換する。HWP1を出射した光ビームは、PBS1に入射する。PBSはS偏光を反射し、P偏光を透過する光学素子である。ここでは、PBS1を反射した成分を物体光、透過した成分を参照光と呼ぶ。PBS1を反射した物体光はQWP1に入射し、測定対象物に入射する。このとき、測定対象物の形状や屈折率の不均一性に伴い、物体光に所定の位相が付加される。そして、測定対象物を反射した物体光は、再びQWP1を透過し、PBS1に入射する。QWPを2回透過した物体光は、偏光軸が90度回転し、P偏光に変換されるため、PBS1を透過する。

一方、PBS1を透過した参照光は、QWP2、固定ミラーを経て、再びQWP2を透過する。このとき、参照光の偏光軸が90度回転し、S偏光に変換されるため、PBSを反射し、物体光と同じ方向に光ビームが伝搬する。PBS1を出射した物体光と参照光は、リレーレンズを経てホモダイン位相検出法の位相検出光学系に入射する。なお、リレーレンズは、測定対象物の反射面の像をカメラに結像するために配置されている。

位相検出光学系では、物体光と参照光の干渉光を4つのカメラで検出する。また、4step(1)の4つの位相状態の干渉光を検出するため、HWP、QWP、HBS、PBSを用いる。

リレーレンズを透過した物体光と参照光は、QWP3を経てHBSに入射する。HBSは物体光と参照光を均等に透過成分と反射成分に分ける。HBSを透過した物体光と参照光は、PBS2に入射する。ここで、PBS2を透過した物体光と参照光はカメラ1に入射し、PBS2を反射した物体光と参照光はカメラ2に入射する。一方、HBSを反射した物体光と参照光は、HWP2を経て、PBS3に入射する。ここで、PBS3を透過した物体光と参照光はカメラ3に入射し、

PBS3 を反射した物体光と参照光はカメラ 4 に入射する。4 つのカメラから得られた強度信号を演算することで、物体光と参照光の位相差を検出する。

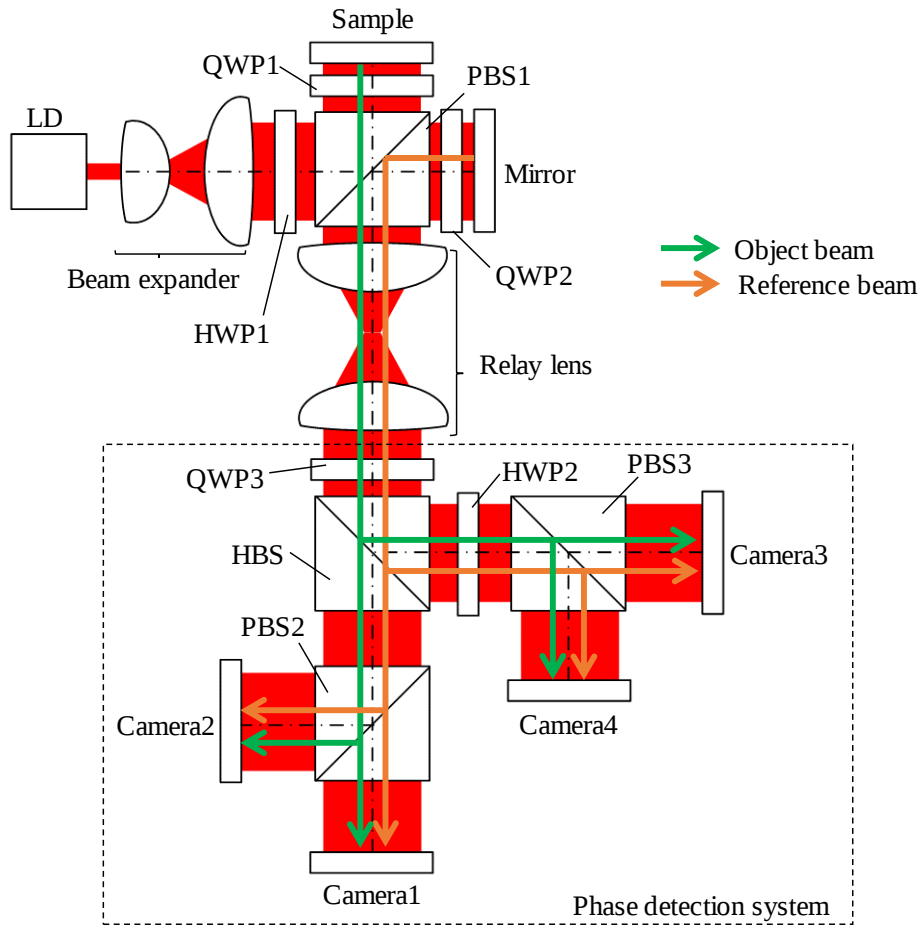


図 2.2 ホモダイン位相検出光学系

次にホモダイン位相検出法の位相検出原理についてジョーンズベクトルを用いて議論する。まず、リレーレンズを出射した物体光と参照光の電場 $E_o(x, y)$ を、

$$E_o(x, y) = \begin{pmatrix} A(x, y) \exp\{i\theta(x, y)\} \\ B(x, y) \exp\{i\phi(x, y)\} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

とする。ここで、 $A(x, y)$ 、 $\theta(x, y)$ は物体光の振幅と位相、 $B(x, y)$ 、 $\phi(x, y)$ は参照光の振幅と位相を示している。

カメラ 1 上の干渉光の電場 $E_{H1}(x, y)$ は(2.13)式、QWP、HBS、PBS(透過)の演算子を用いて、

$$\begin{aligned}
E_{H1}(x, y) &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A(x, y) \exp\{i\theta(x, y)\} \\ B(x, y) \exp\{i\phi(x, y)\} \end{pmatrix} \\
&= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} A(x, y) \exp\{i\theta(x, y)\} + B(x, y) \exp\{i(\phi(x, y) + \frac{\pi}{2})\} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.14)
\end{aligned}$$

となる。ここで、 $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix}$ 、 $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 、 $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ は、それぞれ QWP、HBS、PBS(透過)のジョーンズ行列である。そして、カメラ 1 で検出される物体光と参照光の干渉光の強度 $I_{H1}(x, y)$ は、振幅 $A(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 、位相 $\theta(x, y)$ 、 $\phi(x, y)$ を用いて、

$$\begin{aligned}
I_{H1}(x, y) &= \frac{1}{4} \left| A(x, y) \exp\{i\theta(x, y)\} + B(x, y) \exp\{i(\phi(x, y) + \frac{\pi}{2})\} \right|^2 \\
&= \frac{1}{4} [A(x, y)^2 + B(x, y)^2 + 2A(x, y)B(x, y)\sin\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\}] \quad (2.15)
\end{aligned}$$

となる。(2.15)式は、物体光と参照光の強度 $(A(x, y)^2 + B(x, y)^2)$ で示される定数項と物体光と位相光の位相成分 $(2A(x, y)B(x, y)\sin\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\})$ で示される位相項の 2 つに分けられる。

同様にしてカメラ 2、カメラ 3、カメラ 4 上の干渉光の強度 $I_{H2}(x, y)$ 、 $I_{H3}(x, y)$ 、 $I_{H4}(x, y)$ は、

$$I_{H2}(x, y) = \frac{1}{4} [A(x, y)^2 + B(x, y)^2 - 2A(x, y)B(x, y)\sin\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\}] \quad (2.16)$$

$$I_{H3}(x, y) = \frac{1}{4} [A(x, y)^2 + B(x, y)^2 - 2A(x, y)B(x, y)\cos\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\}] \quad (2.17)$$

$$I_{H4}(x, y) = \frac{1}{4} [A(x, y)^2 + B(x, y)^2 + 2A(x, y)B(x, y)\cos\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\}] \quad (2.18)$$

と表すことができる。ここで、カメラ間の差動信号を演算することで、定数項を無くし、位相差 $\theta(x, y) - \phi(x, y)$ の $\sin$ 成分、 $\cos$ 成分を得ることができる。

$$I_{H1}(x, y) - I_{H2}(x, y) = A(x, y)B(x, y)\sin\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\} \quad (2.19)$$

$$I_{H4}(x, y) - I_{H3}(x, y) = A(x, y)B(x, y)\cos\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\} \quad (2.20)$$

そして、(2.19)式、(2.20)式を用いて下記演算を行うことで、位相差 $\theta(x, y) - \phi(x, y)$ を求めることができる。

$$\theta(x, y) - \phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_{H1}(x, y) - I_{H2}(x, y)}{I_{H4}(x, y) - I_{H3}(x, y)} \right] \quad (2.21)$$

このような演算を行うことで、リアルタイムに物体光と参照光の位相差 $\theta(x, y) - \phi(x, y)$ を

求めることができる。さらにホモダイン位相検出法は位相シフト法と同様に、物体光に対する参照光の強度を大きくすることで、弱い物体光を増幅して検出できる利点がある。

一方で、ホモダイン位相検出法は位相シフト法と同様に物体光と参照光の位相差を検出するため、例えば光学系の経時変化や空気の流れ、温度勾配等に伴う物体光または参照光の波面ずれにより位相誤差を発生する課題がある。例えば、波長 532nm、ビーム有効径 4.0mm の光ビームが反射するミラー面が経時変化で 0.01 度傾くと 2.6λ (peak to valley)が発生する。このため、波面ずれに対するロバスト性は必須となる。

さらにホモダイン位相検出法は、リアルタイム検出を実現する一方で複数台のカメラを用いるため、カメラ間の強度ずれが発生すると、位相誤差が大きく発生する課題がある。

2.2.3 白色干渉法

図 2.3 は白色干渉顕微鏡の光学系構成を示している。白色光源から出射した光ビームは、ビームエキスパンダー、ミラー1 経て対物レンズに入射する。対物レンズ内部のレンズを透過した光は、ビームスプリッタによって、物体光（透過）と参照光（反射）に分けられる。物体光は、ビームスプリッタを透過後、測定対象物を反射する。このとき、反射面の形状に応じて所定の位相が物体光に付加される。そして測定対象物を反射した物体光はビームスプリッタを透過する。一方、参照光はビームスプリッタを反射した後、ミラー2 を反射する。ミラー2 を反射した参照光はビームスプリッタを反射し、物体光とともに検出レンズを経てカメラに入射する。

白色光源はコヒーレンス長が短く、数 μm 程度しかないため、物体光と参照光の光路差が数 μm の範囲の条件で干渉現象が発生する[31]。そして、対物レンズを測定対象物方向(矢印の方向)に動かすことで、干渉光の強度が変化する。この干渉光の強度ピーク的位置を検出することで、測定対象物の表面の形状を可視化することができる。白色干渉顕微鏡は、精度と速度がトレードオフの関係となっている。精度向上や高速化のために、干渉信号の時間領域でなく、周波数領域で取得するフーリエドメイン法やスペクトラルドメイン法など様々なアルゴリズムが提案されているが、ナノメートルオーダーの測定精度を実現するには、複数回の測定が必須となる。なお、市販されている白色干渉顕微鏡では、高さ分解能 0.01nm の高精度な測定を可能としている[32]。

一方で白色干渉顕微鏡は、物体光と参照光の位相差を検出するため、例えば経時変化、空気の流れ、温度勾配等に伴う物体光または参照光の波面ずれにより位相誤差を発生する課題がある。さらに、ナノメートル精度の測定を実現するためには複数回の測定を行う必要があり、検出速度の課題がある。また、ホログラフィックメモリは可干渉性の高いレーザで記録再生を行うため、白色光源を用いる白色干渉を適用することはできない。

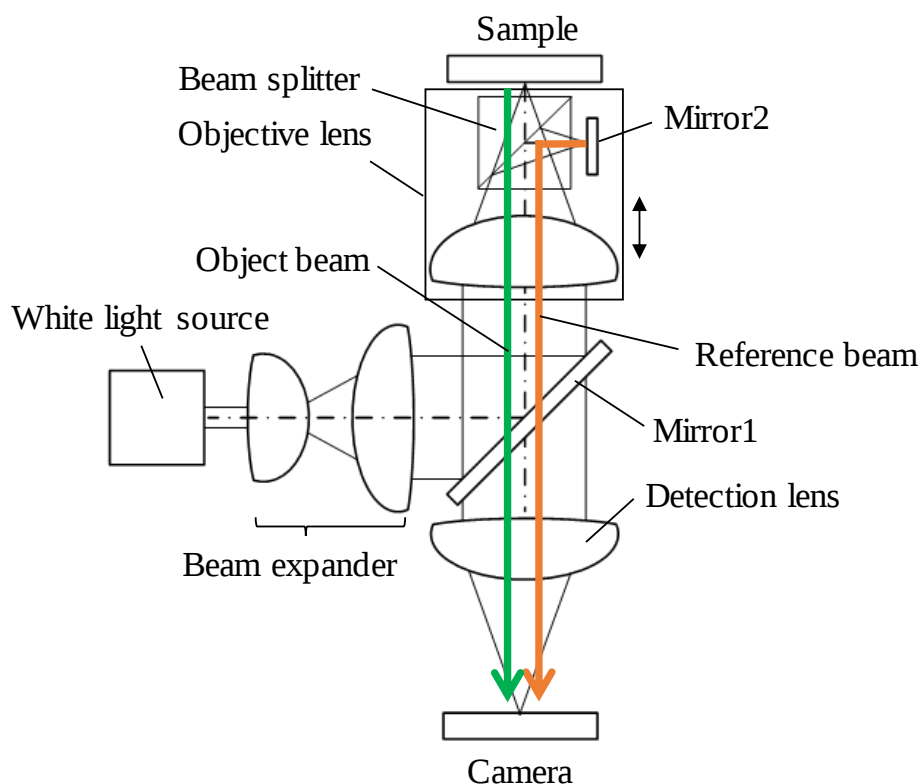


図 2.3 白色干渉顕微鏡光学系

2.2.4 微分干渉顕微鏡

微分干渉顕微鏡は、生きた細胞の形態観察などに適用されており、バイオ分野で広く利用されている[10, 11]。また、近年では半導体検査装置の欠陥検査へ適用されている[1, 2]。微分干渉顕微鏡は、測定対象物の微小な位相を強度情報に変換することで可視化する[33-35]。図 2.4 は、微分干渉顕微鏡の光学系構成を示したものである。レーザから出射した光ビームは、ビームエキスパンダを経て $1/2$ 波長板に入射する。ここで、P 偏光と S 偏光の両方を含む偏光となる。HWP を透過した光ビームは、ミラーを経てノマンスキープリズムに入射する。ノマンスキープリズムは、P 偏光と S 偏光の光ビームをわずかに角度分離する光学素子である。ノマンスキープリズムを透過した伝搬方向の異なる 2 つのビームは対物レンズを経て、測定対象物に入射する。このとき、測定対象物上の 2 つのビームの位置はわずかにずれる。そして、測定対象物を反射した 2 つのビームは、対物レンズを経て、再びノマンスキープリズムに入射する。ここで、P 偏光と S 偏光のビームは同じ伝搬方向に変換される。そして、ノマンスキープリズムを透過した光ビームは、ミラー、偏光子、検出レンズを経て、カメラに入射する。

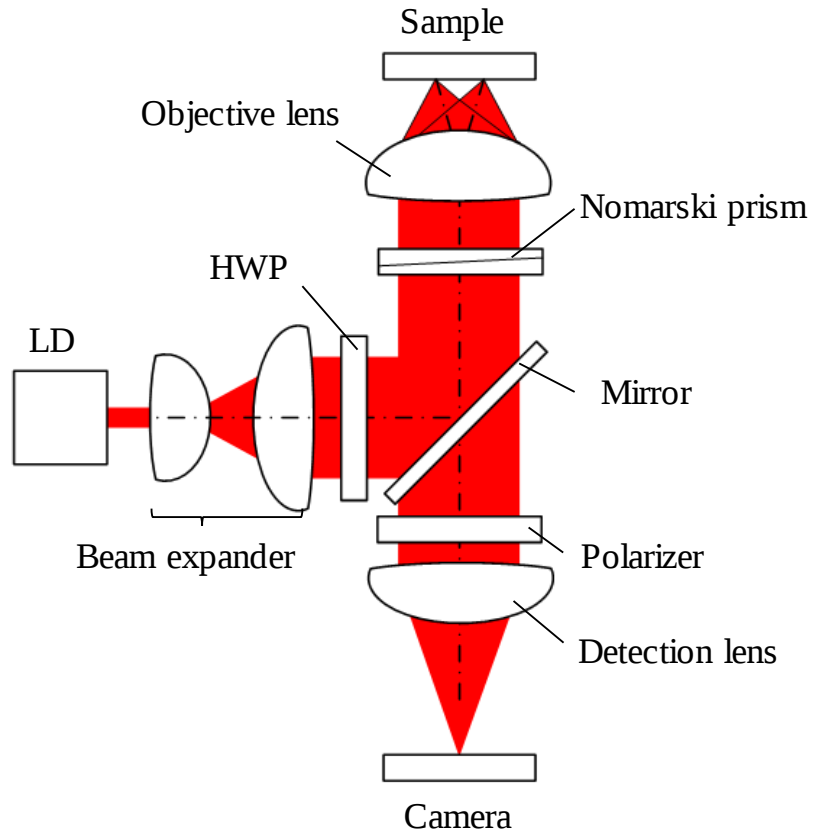


図 2.4 微分干渉顕微鏡光学系

ここで、微分干渉顕微鏡の検出原理についてジョーンズベクトルを用いて説明する。測定対象物を反射し、ノマンスキープリズムを透過した光ビームの電場 $E(x, y)$ を、

$$E(x, y) = \begin{pmatrix} A(x - \frac{d}{2}, y) \exp \{ i\theta(x - \frac{d}{2}, y) \} \\ A(x + \frac{d}{2}, y) \exp \{ i\theta(x + \frac{d}{2}, y) \} \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

と示す。ここで $A(x, y)$ 、 $\theta(x, y)$ は、測定対象物を反射したときの振幅と位相を示している。

ここで、微分干渉顕微鏡を用いて観測する測定対象物は、強度のコントラストが低いため、

$$A(x - \frac{d}{2}, y) = A(x + \frac{d}{2}, y) = A \quad (2.23)$$

と考えることができる。そして、カメラに入射する電場 $E_D(x, y)$ は、

$$\begin{aligned}
E_D(x, y) &= \frac{1}{2\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \exp\{i\theta(x - \frac{d}{2}, y)\} \\ A \exp\{i\theta(x + \frac{d}{2}, y)\} \end{pmatrix} \\
&= \frac{1}{2\sqrt{2}} \begin{pmatrix} A \exp\{i\theta(x - \frac{d}{2}, y)\} + A \exp\{i\theta(x + \frac{d}{2}, y)\} \\ A \exp\{i\theta(x - \frac{d}{2}, y)\} + A \exp\{i\theta(x + \frac{d}{2}, y)\} \end{pmatrix} \quad (2.24)
\end{aligned}$$

となる。ここで、 $\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$ 、 $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ は、透過軸が 45 度傾いた偏光子、ミラーのジョーンズ行列である。また、 d は測定対象物上の 2 つのビーム間の距離を示している。そして、カメラで検出される干渉光の強度 $I_D(x, y)$ は、

$$\begin{aligned}
I_D(x, y) &= \frac{1}{4} \left| A \exp\{i\theta(x - \frac{d}{2}, y)\} + A \exp\{i\theta(x + \frac{d}{2}, y)\} \right|^2 \\
&= \frac{A^2}{2} \left[1 + \cos\{\theta(x - \frac{d}{2}, y) - \theta(x + \frac{d}{2}, y)\} \right] \quad (2.25)
\end{aligned}$$

となる。(2.25)式は、2 つのビームの位相差 $\theta(x - \frac{d}{2}, y) - \theta(x + \frac{d}{2}, y)$ に従って、強度が変化する。このことから、本方式は微分干渉と呼ばれている。微分干渉顕微鏡は、位相情報を簡便に可視化できるが、振幅の 2 乗の項 A^2 が不定なため、直接位相を求めることができない。これについては、微分干渉顕微鏡に位相シフト法を適用することで、位相を求めることができる[36-38]。具体的には、2 つのビームの位相差を波長板で付加し、それを複数回観測することで、微分干渉顕微鏡でも位相差を検出することができる。

ここで、微分干渉顕微鏡と他の干渉計測との大きな違いは、光学系が同軸になっている点である。他の干渉計測では、物体光と参照光の 2 つの光路が発生するため、経時変化、空気の流れ、温度勾配等に伴う物体光または参照光の波面ずれにより位相誤差を発生する課題がある。それに対し、微分干渉顕微鏡は、光路がほぼ 1 つのため、他の干渉計測に対して耐環境性が高い特徴がある。また、光学系が同軸になっていると小型化が容易となる。例えば、デジタルホログラフィの技術と組み合わせることでレンズを使わない簡素な構成で、測定対象物の位相差を検出する方式も報告されている[39]。

一方で、微分干渉顕微鏡では、2 つのビームを同じ強度で入射する必要があるため、例えば反射率の低い測定対象物の測定で、位相シフトのような増幅検出はできない。

2.2.5 フーリエ変換法

フーリエ変換法は 1 枚の干渉画像から表面形状を求める方式である[40, 41]。図 2.5 はフーリエ変換法の光学系を示している。フーリエ変換法は、位相シフト法と同様の光学系だが、参照光側のミラーが固定されていること、ミラーが傾いていること、が特徴となる。

レーザから出射した光ビームは、ビームスプリッタによって、物体光（反射）と参照光（透過）に分けられる。物体光は、ビームスプリッタを反射後、測定対象物を反射する。このとき、反射面の形状に応じて所定の位相が物体光に付加される。そして、測定対象物を反射した物体光はビームスプリッタを透過する。一方、参照光はビームスプリッタを透過した後、ミラーを反射する。ミラーはわずかに傾いており、参照光にチルト収差を加える。そして、ミラーを反射した参照光はビームスプリッタを反射し、物体光とともにリレーレンズを経てカメラに入射する。なお、リレーレンズは、測定対象物の反射面の像をカメラに結像するために配置されている。

このとき、カメラ上で物体光と参照光が干渉する。この干渉光に対しフーリエ変換を用いることで位相を検出する。ここで、物体光の電場 $O(x, y)$ 、参照光の電場 $R(x, y)$ を、

$$O(x, y) = A(x, y)\exp\{-i\theta(x, y)\} \quad (2.26)$$

$$R(x, y) = B(x, y)\exp\{-i\phi(x, y)\} \quad (2.27)$$

とする。なお、 $A(x, y)$ 、 $\theta(x, y)$ は物体光の振幅と位相、 $B(x, y)$ 、 $\phi(x, y)$ は参照光の振幅と位相を示している。そして、カメラで検出される干渉光の強度 $I(x, y)$ は、

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |O(x, y) + R(x, y)|^2 \\ &= |A(x, y)|^2 + |B(x, y)|^2 + A(x, y)B(x, y)[\exp[i\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\}] + \exp[-i\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\}]] \quad (2.28) \end{aligned}$$

となる。この式をチルト収差の方向にフーリエ変換すると、位相成分に従って 3 つの項に分けられる。ここで、参照光位相 $\phi(x, y)$ のチルト収差の成分が大きいと、図 2.6 に示すように 3 つの項はスペクトル上で分離される。そして、このスペクトル成分のうち、 $+\phi(x, y)$ の成分を数値解析的に抜き出し、スペクトルを $-\phi(x, y)$ 分だけシフトし、原点に配置する。そして、逆フーリエ変換を行うと、強度 $I_{FT}(x, y)$ は、

$$I_{FT}(x, y) = A(x, y)B(x, y)\exp\{i\theta(x, y)\} \quad (2.29)$$

が得られる。そして、物体光の位相は、

$$\theta(x,y) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[I(x,y)]}{\text{Re}[I(x,y)]} \quad (2.30)$$

となる。このように、意図的にチルト収差を加え、フーリエ変換を用いることで物体光の位相を検出することができる。ただし、フーリエ変換法は、波面ずれが発生するとフーリエ変換後のスペクトルが分離できなくなるため、位相誤差を生じやすいという課題がある。このため、例えば光学系の経時変化や空気の流れ、温度勾配等に伴う物体光または参照光の波面ずれに気をつけなければならない。さらにフーリエ変換法は、フーリエ変換を用いるため検出速度に課題がある。また、ホログラフィックメモリは位相信号が高周波なのでスペクトルの分解が困難である。

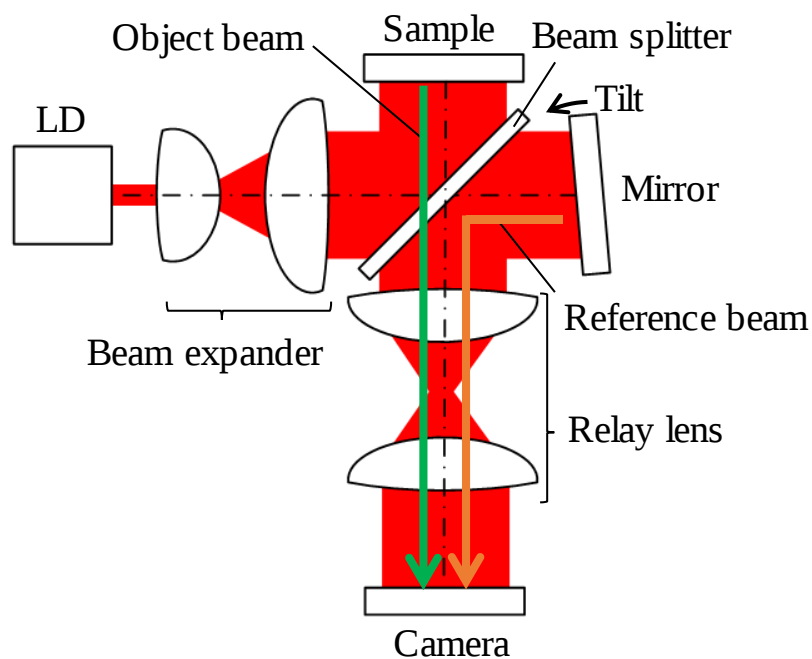


図 2.5 フーリエ変換法光学系

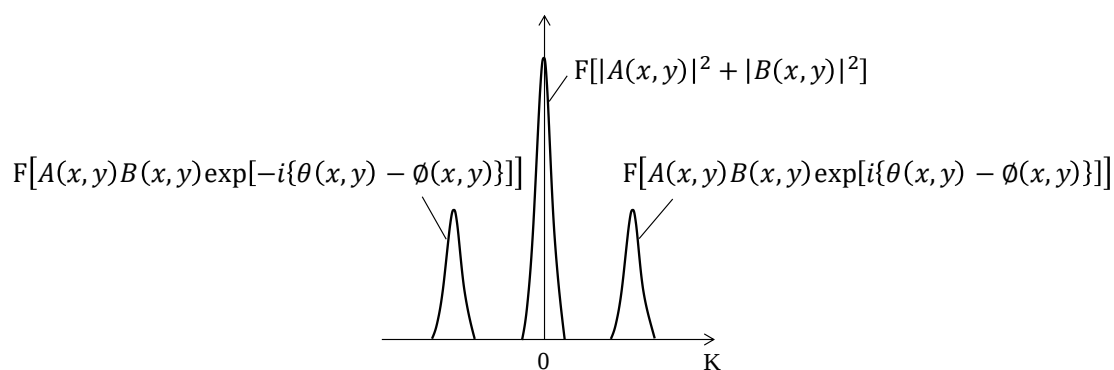


図 2.6 フーリエ変換後のスペクトル成分

2.2.6 本研究のターゲット

本研究では、耐環境性を向上することにより、今まで干渉測定を導入できなかった分野への干渉計測の適用をめざす。図 2.7 は、本研究のターゲットを説明する図である。現在、干渉計測は管理された環境で主に使われている。例えば、半導体のウェハ検査では、クリーンルーム内に置かれている微分干渉顕微鏡を用いて検査が行われている。また、X 線の干渉計は病院や実験室などの管理された環境で使われている。そして、位相シフト法、白色干渉法、フーリエ変換法などを適用した干渉計は、実験室や工場でのオフライン検査に使用されている。一方で、工場のインライン検査(以降、製造ライン検査と呼ぶ)やデータセンターなどでは広く利用されていない。本研究では、干渉計測法の耐環境性を向上し、これら環境でも使用可能な、位相検出技術の確立をめざす。

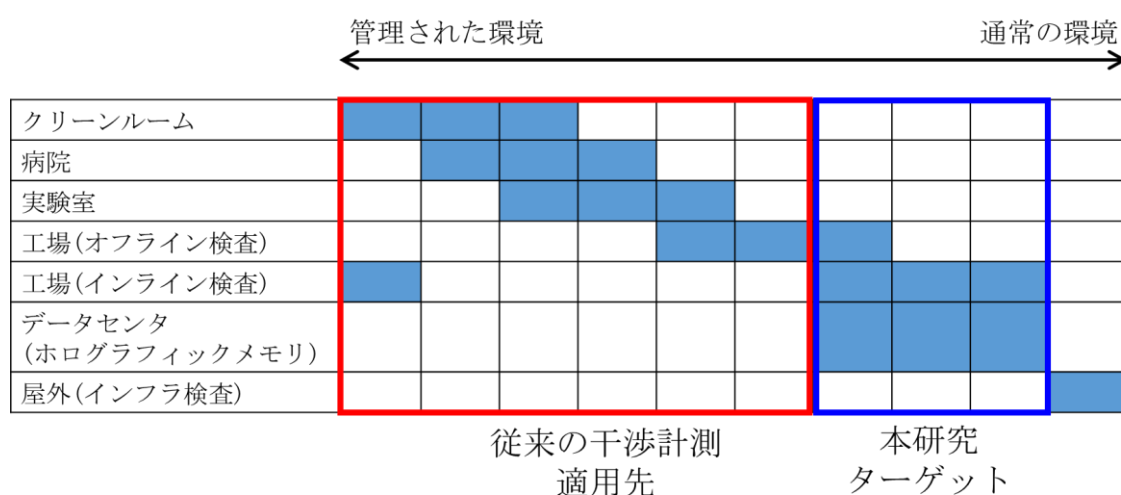


図 2.7 本研究のターゲット

2.2.7 方式比較

製造ラインおよびホログラフィックメモリへの適用を考慮し、干渉計測法には以下の条件が必要であると考えた。

製造ライン適用

- ・測定対象物のナノメートル精度の形状測定が可能(位相または位相差が検出可能)
- ・リアルタイム測定が可能
- ・耐環境性が高い

ホログラフィックメモリ対応

- ・波長オーダーの位相または位相差が検出可能
- ・リアルタイム検出が可能
- ・微弱光の検出が可能
- ・耐環境性が高い

製造ライン適用では、ナノメートル精度の3次元の形状測定を行うことを必須とした。ここでは、ナノメートル精度の測定を実現するため、 $1/100\lambda$ の精度を実現する。また、測定対象物が随時移動することを考慮し、リアルタイム検出が必要であると考えた。ホログラフィックメモリでは、高転送レートを実現するため、リアルタイム検出が必要であると考えた。ホログラフィックメモリでは、弱い再生光の検出が可能となると容量や速度をさらに向上できる。そこで、本研究では微弱光の検出を条件とした。そして、製造ライン、データセンタでの実用化を考慮すると耐環境性は高くなければならないと考えた。

表 2.2 は、各方式について位相または位相差検出、リアルタイム検出、微弱信号検出、耐環境性に関して比較を行った結果である。まず、白色干渉顕微鏡、フーリエ変換法は、ホログラフィックメモリの適用が困難である。また、微分干渉顕微鏡は、位相が測定できない、微弱光の検出が困難な課題がある。また、位相シフト法はリアルタイム性に課題がある。一方、ホモダイン位相検出法は、耐環境性については微分干渉顕微鏡に劣るが、位相検出や微弱光の検出に優位性がある。そこで、本研究では、ホモダイン位相検出法の耐環境性を向上することをめざし、検討を行った。

表 2.2 干渉計測の方式比較

	位相シフト法		白色干渉 顕微鏡	微分干渉 顕微鏡	フーリエ 変換法
	複数回検出	ホモダイン 位相検出法 (1回検出)			
位相(差)検出 ①製造ライン ②ホログラフィックメモリ	○	○	① : ○ ② : ×	① : × ② : △	① : ○ ② : ×
リアルタイム性	×	○	×	○	△
微弱光検出	○	○	○	△	○
耐環境性	×～△	△	△	○	△

2.3 位相シフト法アルゴリズム検討

2.1.1 項で説明したように、位相シフト法には、測定回数に応じた方式がある。ホモダイン位相検出法では測定回数が多くなるほど、カメラの数が多くなるとともに光学系を分離する必要があるので、耐環境性が低下してしまうことが懸念される。

そこで、まず表 2.1 に示した位相シフト法のアルゴリズムについて検討を行った。条件としては、レーザ光の強度変化、参考文献[42]に記載されていた位相誤差発生要因である位相シフト量のずれ、カメラの感度ずれについてシミュレーション検討を行った。

2.3.1 評価方法

図 2.8 は、評価条件を示したものである。縦軸は位相誤差、横軸は物体光と参照光の位相差を示している。ここで、理想状態の場合、表 2.1 記載のアルゴリズムには、位相 $\theta(x,y) - \phi(x,y)$ によらず、位相誤差は発生しない。一方で、外乱を考慮すると、位相 $\theta(x,y) - \phi(x,y)$ によって位相誤差が変化する。本検討では、位相 $\theta(x,y) - \phi(x,y)$ を 0～360 度まで変化させたときの最大値を位相誤差として評価した。

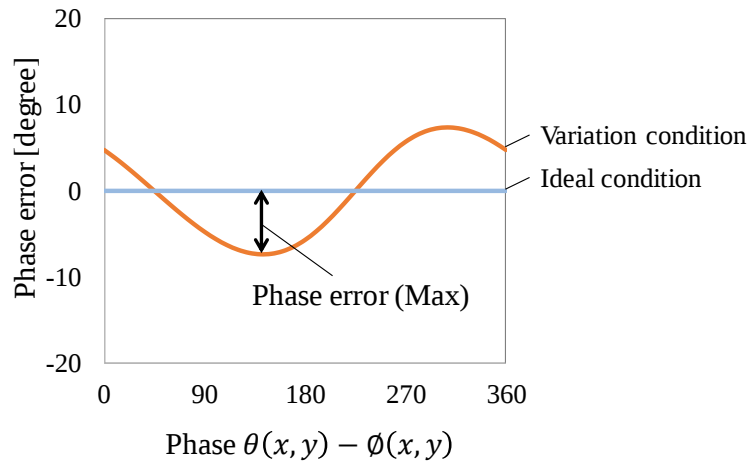


図 2.8 評価条件

2.3.2 レーザ光の強度変化の影響

長時間測定していると、レーザの温度特性等により、物体光、参照光の振幅 $A(x, y)$ 、 $B(x, y)$ が変化する。これに伴い位相誤差が発生することが考えられる。なお、ここでは長時間での強度変化を考えているため、1回の位相測定の間では強度は変化しないと仮定する。本検討では強度ずれとして次式を考慮した。

$$\{A(x, y)\}' = A(x, y)\sqrt{1 + \varepsilon} \quad (2.31)$$

$$\{B(x, y)\}' = B(x, y)\sqrt{1 + \varepsilon} \quad (2.32)$$

なお、ここではレーザ光源の強度変化を仮定しているため、物体光と参照光は同様に変化する。 ε は強度のずれ量を示している。

図 2.9 は、レーザ光の強度変化の影響を示している。(a)は位相誤差の強度ずれ依存性、(b)は強度ずれ量 $\varepsilon=10\%$ のときの位相誤差を示している。そして、(a)の縦軸は位相誤差、横軸は強度ずれ量を示している。また、(b)の縦軸は位相誤差、横軸はアルゴリズムを示している。図 2.9(a)、(b)より、3 step 方式以上の検出方式では、位相誤差は発生しないことがわかった。それに対し、2 step 方式では、強度ずれによって位相誤差が発生してしまうことを確認した。2回測定では、3つの条件である物体光の振幅 $A(x, y)$ 、参照光の振幅 $B(x, y)$ 、物体光と参照光の位相差 $\theta(x, y) - \phi(x, y)$ を同時に求めることができないため、2 step 方式では、予め測定しておいた物体光の振幅、参照光の振幅を用いている。このため、レーザの強度が変化してしまうとそれに伴い、位相誤差が発生する。

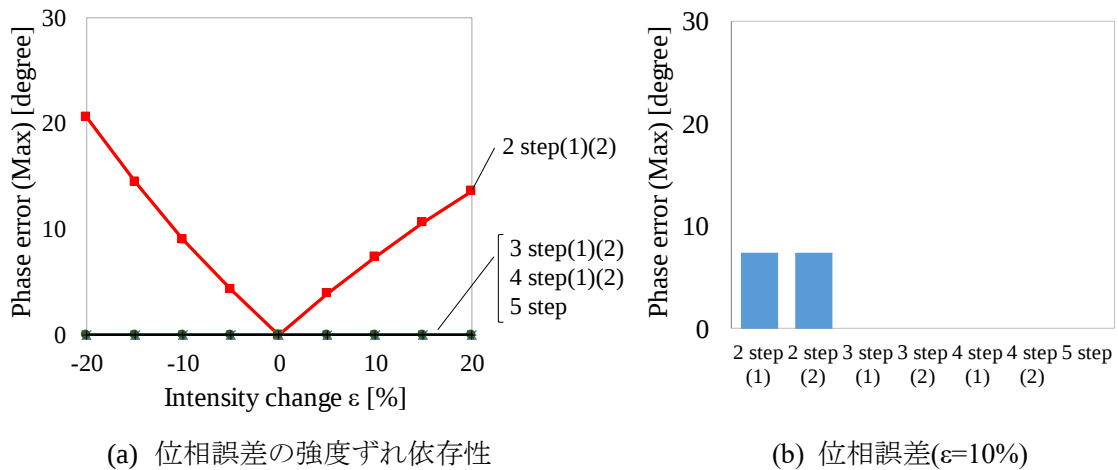


図 2.9 レーザ光の強度変化の影響

2.3.3 位相シフト量のずれの影響

可動ミラーや液晶素子などの位相可変素子の位相シフト量が所定値からずれた場合、それに応じた位相誤差が発生する。例えば、可動ミラーの場合、速度と位置精度はトレードオフの関係がある。このため、駆動速度を早くするとその分だけミラーの静止位置ずれが発生してしまい、付加する位相シフト量が変わる。また、液晶素子では、液晶媒体の温度や駆動電圧が変化すると付加する位相シフト量が変わる。ホモダイン位相検出の場合には、波長板の位相ずれがそれに相当する。そこで、線形・非線形の位相シフト量のずれの影響について検討を行った。

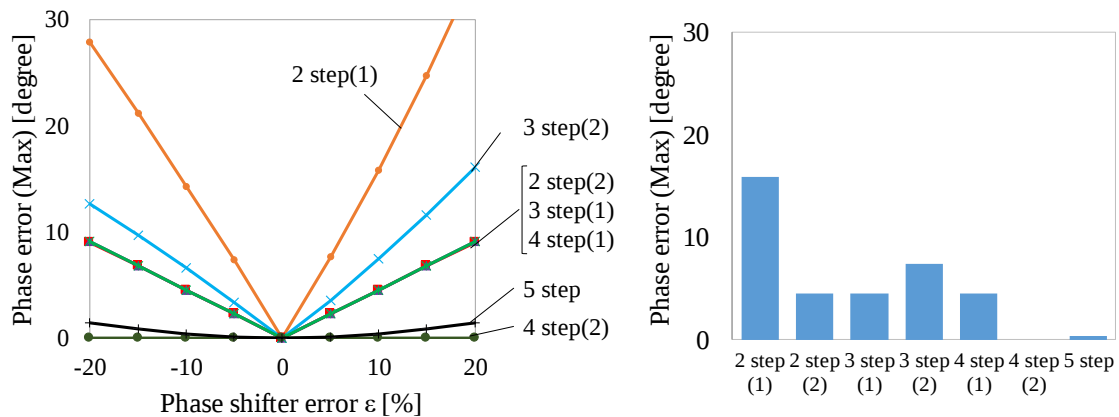
(1)線形の位相シフト量のずれ

線形の位相シフト量のずれがある場合の位相シフト量 $\Delta\phi'_m$ を

$$\Delta\phi'_m = \Delta\phi_m(1 + \varepsilon) \quad (2.33)$$

とする[42]。ここで $\Delta\phi_m$ は理想的な位相シフト量、 ε は位相シフト量のずれ量(割合)を示している。例えば、理想的には 90 度の位相を付加するはずの位相可変素子に $\pm 10\%$ の位相変化量のずれがあった場合、実際の位相シフト量は、81 度または 99 度となる。

図 2.10 は、線形の位相シフト量のずれの影響を示している。(a)は位相誤差の位相シフト量のずれ依存性、(b)は位相シフト量のずれ量 $\varepsilon=10\%$ のときの位相誤差を示している。そして、(a)の縦軸は位相誤差、横軸は位相シフト量のずれ量を示している。また、(b)の縦軸は位相誤差、横軸はアルゴリズムを示している。図 2.10(a)、(b)より、4 step(2)方式、5 step 方式では、位相シフト量のずれに対して位相誤差を発生しないことがわかった。



(a) 位相誤差の位相シフト量のずれ依存性

(b) 位相誤差($\epsilon=10\%$)

図 2.10 線形の位相シフト量のずれの影響

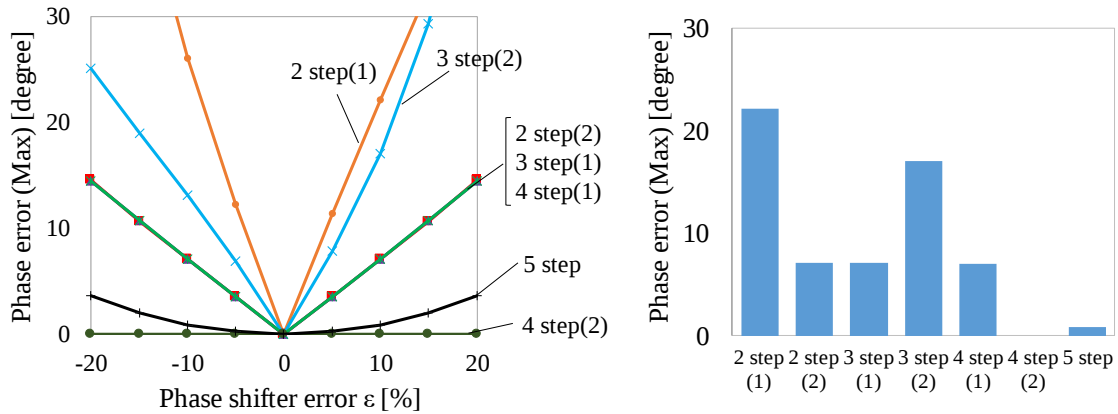
(2)非線形の位相シフト量のずれ

可動ミラーや液晶素子などの位相可変素子の場合、非線形な位相シフト量のずれは、完全に取り除くことが困難であり、装置の校正を行っても部分的な改善しか図れない。非線形な位相シフト量のずれがある場合の位相シフト量 $\Delta\phi'_m$ を

$$\Delta\phi'_m = \Delta\phi_m(1 + \Delta\phi_m\epsilon - \epsilon) \quad (2.34)$$

とする[42]。ここで $\Delta\phi_m$ は理想的な位相シフト量、 ϵ は位相シフト量のずれ量(割合)を示している。

図 2.11 は、非線形の位相シフト量のずれの影響を示している。(a)は位相誤差の位相シフト量のずれ依存性、(b)は位相シフト量のずれ量 $\epsilon=10\%$ のときの位相誤差を示している。そして、(a)の縦軸は位相誤差、横軸は位相シフト量のずれ量を示している。また、(b)の縦軸は位相誤差、横軸はアルゴリズムを示している。図 2.10、図 2.11 より、4 step(2)方式、5 step方式は、位相シフト量のずれに対してロバスト性が高いことがわかった。



(a) 位相誤差の位相シフト量のずれ依存性

(b) 位相誤差(ε=10%)

図 2.11 非線形の位相シフト量のずれの影響

2.3.4 カメラの非線形感度ずれの影響

カメラ 1 台であっても、カメラが非線形な受光感度特性の場合、検出信号が線形からずれることに伴い位相誤差が発生する。カメラの非線形感度については、センサ部のゲインを電氣的に補正することでその感度ずれをある程度まで補正することができるが、温度変化や電源の安定性などを考慮するとこの影響を無視することはできない。

(1)二次の非線形感度ずれ

カメラに二次の非線形感度ずれがあった場合の検出信号の強度 $I'_m(x, y)$ は次式で与えられる[42]。

$$I'_m(x, y) = I_m(x, y) + \varepsilon \{I_m(x, y)\}^2 \quad (2.35)$$

ここで、 $I_m(x, y)$ はカメラへの理想的な入射強度、 ε は感度のずれ量(割合)を示している。

図 2.12 は、カメラの二次の非線形感度ずれの影響を示している。(a)は位相誤差の感度ずれ依存性、(b)は感度ずれ量 $\varepsilon=10\%$ のときの位相誤差を示している。そして、(a)の縦軸は位相誤差、横軸は感度ずれ量を示している。また、(b)の縦軸は位相誤差、横軸はアルゴリズムを示している。図 2.12(a)、(b)より、4 step(1)方式、5 step 方式は、二次の非線形感度ずれに対して位相誤差を発生しないことがわかった。

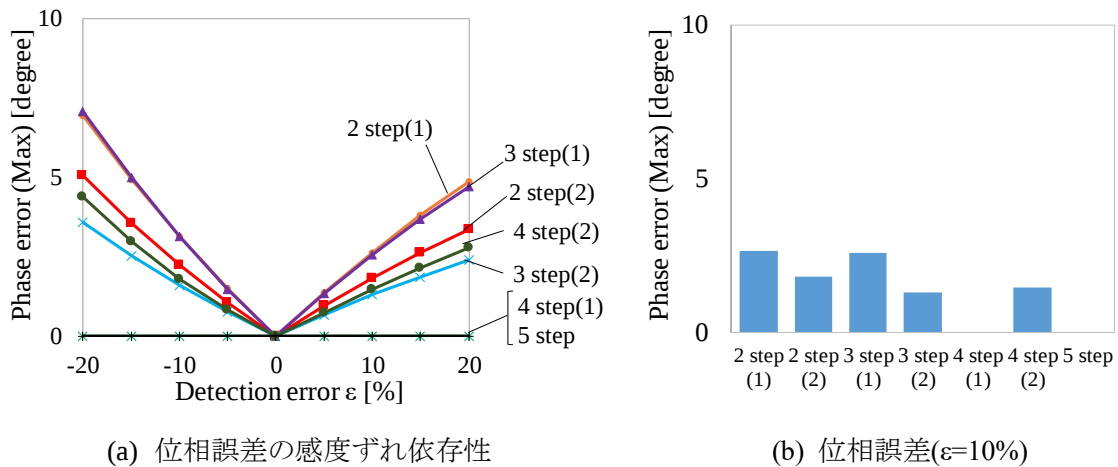


図 2.12 カメラの二次の非線形感度ずれの影響

(2)三次の非線形感度ずれ

カメラの非線形感度ずれとして、二次以外に三次の非線形感度ずれについても議論する。三次の非線形感度ずれがあった場合の検出信号の強度 $I'_m(x, y)$ は、次式で与えられる[42]。

$$I'_m(x, y) = I_m(x, y) + \varepsilon \{I_m(x, y)\}^3 \quad (2.36)$$

ここで、 $I_m(x, y)$ はカメラへの理想的な入射強度、 ε は感度のずれ量(割合)を示している。

図 2.13 は、カメラの三次の非線形感度ずれの影響を示している。(a)は位相誤差の感度ずれ依存性、(b)は感度ずれ量 $\varepsilon=10\%$ のときの位相誤差を示している。そして、(a)の縦軸は位相誤差、横軸は感度ずれ量を示している。また、(b)の縦軸は位相誤差、横軸はアルゴリズムを示している。図 2.12、図 2.13 より、4 step(1)方式、5 step 方式は、カメラの非線形感度ずれに対してロバスト性が高いことがわかった。

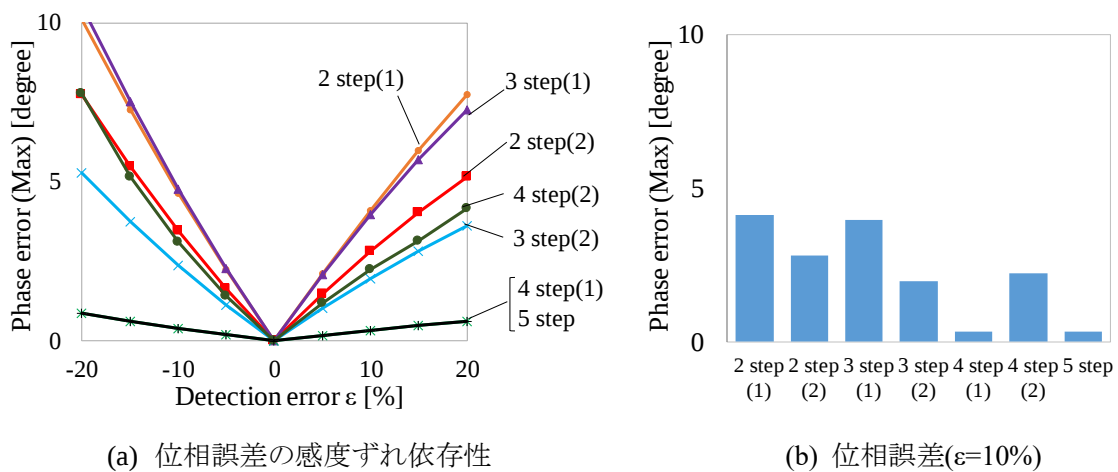


図 2.13 カメラの三次の非線形感度ずれの影響

2.3.5 アルゴリズム比較

表 2.3 は位相シフト法のアルゴリズムを比較したものである。この表には、ずれ量 ε が 10% のときの最大位相誤差量を示している。この結果より、5 step 方式が最も良いことがわかった。また、4 step(1)方式は、カメラの感度ずれに対してロバスト性が高く、4 step(2)は、位相可変素子のシフト量のずれに対してロバスト性が高いことがわかった。ここで、ホモダイン位相検出法の場合には、位相シフト量は波長板で付加するため、測定ごとに変化するものではない。そして、高い位相精度の波長板を搭載することも可能である。本検討では、位相シフト量のずれよりも、カメラの感度ずれを考慮した。この場合、4 step(1)と 5 step が同じ性能となるが、本検討ではカメラの数が少ない 4 step(1)がホモダイン位相検出法にとって最良のアルゴリズムと判断した。

一方で、複数のカメラを使う場合には、カメラ間の検出強度のずれがあると位相誤差を大きく発生することは、本節の検討から自明である。製造ラインやデータセンタなどで利用するにはカメラの感度ずれ、ほこり、汚れなどによるカメラ検出信号の強度ずれに対してロバスト性が高いことが望まれる。次章では、本課題およびそれを解決するための手法について説明を行う。

表 2.3 位相シフト法のアルゴリズムの比較

		2 step (1)	2 step (2)	3 step (1)	3 step (2)	4 step (1)	4 step (2)	5 step
Beam intensity		7	7	0	0	0	0	0
Phase shifter	Linear	16	4	4	7	4	0	0
	Non linear	22	7	7	17	7	0	1
Detection nonlinearities	2 nd order	3	2	3	1	0	1	0
	3 rd order	4	3	4	2	0	2	0

2.4 まとめ

本章では、製造ラインおよびホログラフィックメモリに適用するために必要な4条件(測定対象物の形状測定が可能、リアルタイム測定が可能、耐環境性が高い、微弱光の検出が可能)から、干渉計測法の中でホモダイン位相検出が最良であると判断した。また、位相シフト法のアルゴリズムの検討から、カメラの感度ずれに強く、カメラの数も少ない4回測定の位相シフト法アルゴリズムが良いと判断した。これにより、4つのカメラを用いたホモダイン位相検出法で耐環境性に関する課題を抽出した。

ホモダイン位相検出法は、複数のカメラ間の検出信号の強度の差動演算を用いて、物体光と参照光の位相差を検出する。このため、ホモダイン位相検出法は、物体光、参照光の波面ずれの影響を受ける。また、カメラの感度ずれ、ほこり、汚れなどによるカメラ間の検出信号の強度ずれの影響を強く受ける。次章では、本課題およびそれを解決するための手法について説明を行う。

第3章 提案方式の概念

3.1 はじめに

本章では、ホモサイン位相検出法の強度ずれによる位相誤差の発生要因を明確にし、その課題を解決する手法を説明する。また、その手法を製造ラインおよびホログラフィックメモリに適用するときの位相検出の考え方を説明する。

3.2 強度ずれによる位相誤差の発生要因

ホモサイン位相検出法のカメラ間の強度ずれによる位相誤差の発生要因について検討した。ここで、例えば、カメラ1の感度が他のカメラに対して q 倍の感度変化があったと仮定すると、カメラ1の強度 $I'_{H1}(x, y, t)$ は、

$$\begin{aligned} I'_{H1}(x, y) &= qI_{H1}(x, y) \\ &= \frac{q}{4} [A(x, y)^2 + B(x, y)^2 + 2A(x, y)B(x, y)\sin\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\}] \quad (3.1) \end{aligned}$$

となる。そして、(2.19)式と同じ演算を行うと、

$$\begin{aligned} I'_{H1}(x, y) - I_{H2}(x, y) &= \frac{q-1}{4} [A(x, y)^2 + B(x, y)^2] + \frac{q+1}{2} A(x, y)B(x, y)\sin\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\} \quad (3.2) \end{aligned}$$

となる。(3.2)式は、定数項 $A(x, y)^2$ 、 $B(x, y)^2$ と位相項 $A(x, y)B(x, y)\sin\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\}$ に感度変化 q が残ることを意味している。ここで、どちらの項が強度ずれに対して影響が大きいかについて検討を行った。

図 3.1 は、位相誤差の参照光に対する物体光の強度比依存性のシミュレーション結果である。縦軸は位相誤差、横軸は参照光に対する物体光の強度比を示している。ここでは、微弱光の位相検出を考慮し、参照光に対する物体光の強度を変えて位相誤差を求めた。なお、本検討では感度変化 q を 0.9(感度 10%減)とした。各線は、定数項のみの感度変化 q を変更した場合、位相項のみの感度変化 q を変更した場合を示している。実際にはカメラの感度が変わ

ると定数項と位相項の両方が変わるが、ここでは各要因の影響を知るため、個別に変化させた。なお、位相誤差は、位相 $\theta(x, y) - \phi(x, y)$ を0～360度まで変化させたときの最大値を位相誤差として評価した。

本検討から、定数項は強度比の変化に伴って位相誤差を大きく発生することがわかった。そして、位相項は強度比に全く依存しないことが分かった。

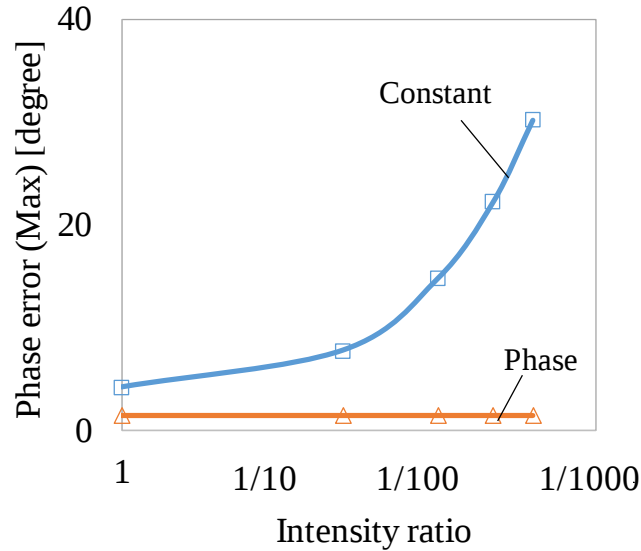


図 3.1 位相誤差の参照光に対する物体光の強度比依存性(定数項、位相項)

次に、定数項のうち、物体光と参照光のどちらに依存するのか検討を行った。図 3.2 は、そのシミュレーション結果である。本検討では感度変化 q を0.9(感度10%減)とした。各線は、物体光のみの感度変化 q を変更した場合、参照光のみの感度変化 q を変更した場合を示している。

本図より、参照光のみ強度比に依存することがわかる。これは、物体光に対して参照光の強度が大きいため、参照光の変化が影響しやすいのである。

さらに、位相項 $A(x, y)B(x, y)\sin\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\}$ が全く変化しない理由について検討を行った。例えば位相項のみが残留した場合は、(3.2)式は、

$$I'_{H1}(x, y) - I_{H2}(x, y) = \frac{q+1}{2} A(x, y)B(x, y)\sin\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\} \quad (3.3)$$

となる。そして、物体光と参照光の位相差は、(3.3)式と(2.20)式より、

$$\theta(x, y) - \phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{q+1}{2} \cdot \frac{I_{H1}(x, y) - I_{H2}(x, y)}{I_{H4}(x, y) - I_{H3}(x, y)} \right] \quad (3.4)$$

と示すことができる。(3.4)式は、物体光、参照光の振幅成分が消去されたため、参照光に対する物体光の強度比には依存しなかったといえる。このため、位相項については、感度変化 q の違いだけが影響することがわかった。図 3.3 は、位相誤差の感度変化依存性のシミュレーション結果である。縦軸は位相誤差、横軸は感度変化 q を示している。ここで、各線は物体光のみの感度変化 q を変更した場合、参照光のみの感度変化 q を変更した場合を示している。ここで、参照光に対する物体光の強度比を $1/10$ とした。本図から、感度変化 q が変化に対しても、定数項の影響が大きいことがわかった。

以上の検討より、ホモダイン位相検出法のカメラ間の強度ずれによる位相誤差は、参照光の定数項 $(B(x,y)^2)$ が影響していることを明らかにした。

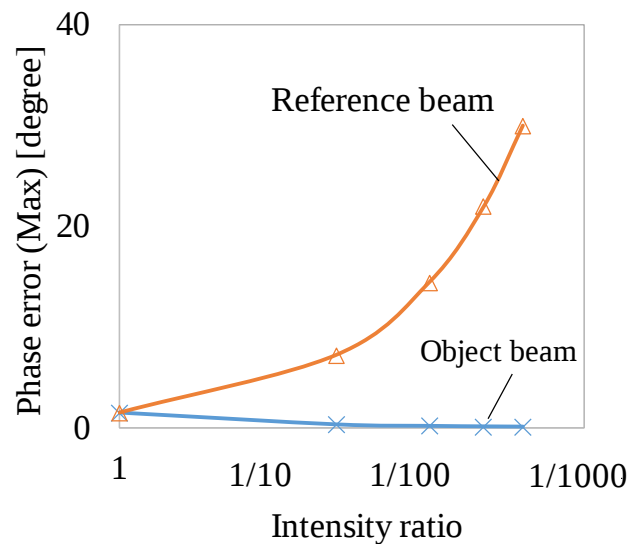


図 3.2 位相誤差の参照光に対する物体光の強度比依存性(物体光、参照光)

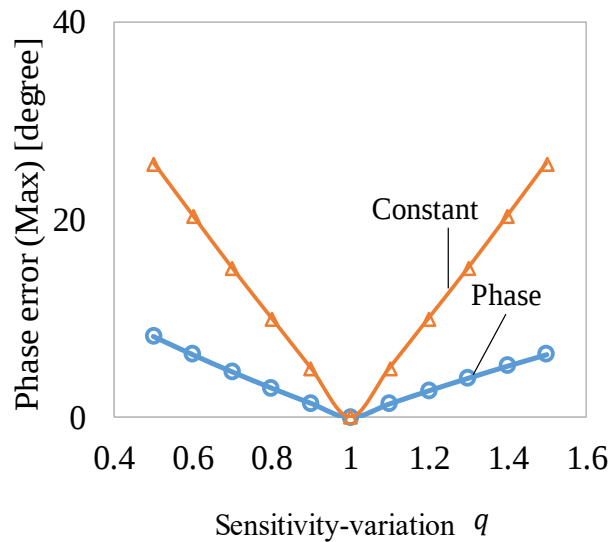


図 3.3 位相誤差の感度変化依存性

3.3 提案方式の概念

図 3.4 はホモサイン位相検出法と提案方式の演算のイメージを示している。(a)はホモサイン位相検出、(b)は提案方式を示している。ホモサイン位相検出法は、カメラ 1 とカメラ 2 の検出信号から定数項($A(x, y)^2$ 、 $B(x, y)^2$)を消去して $\sin$ 成分を得る。また、同様にカメラ 3 とカメラ 4 の検出信号から定数項を消去して $\cos$ 成分を得る。そして、この $\sin$ 成分と $\cos$ 成分から物体光と参照光の位相差 $\theta - \phi$ を得る。ホモサイン位相検出法は、リアルタイムな位相シフト法を実現できるため、製造ラインへの適用を考慮すると非常に有用である。しかしながら、カメラ間の差動演算の場合、カメラの感度ずれ、ほこり、汚れなどによる検出信号の強度ずれが発生すると、参照光の定数項($B(x, y)^2$)を消去できない課題がある。

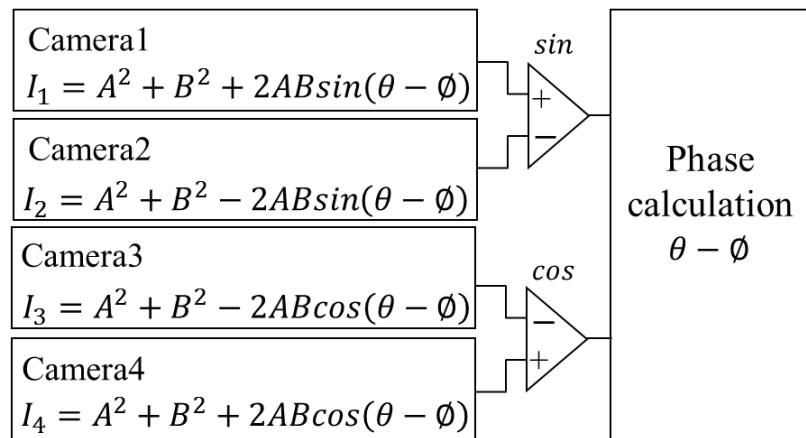
この課題に対し、参照光の定数項を完全に消去することができれば、ロバスト性の高い位相検出方式が実現できると考え、本研究ではこの定数項を消去する検出方式を新たに考案した。本検出方式は、時間の概念を取り入れた新しい干渉計測法である。図 3.4(b)に示すように、時間の異なる 2 回の検出信号を用いる。カメラ 1 では、 n 回目の検出信号と $n + 1$ 回目の検出信号の差動信号を演算する。カメラ 2、カメラ 3、カメラ 4 でも同様に、 n 回目の検出信号と $n + 1$ 回目の検出信号の差動信号を演算し、それらの信号から、 $n + 1$ 回目の物体光と n 回目の物体光の位相差 $\theta_n - \theta_{n+1}$ を得る。

同じカメラの検出信号は、カメラの感度ずれ、ほこり、汚れなどによる検出信号の強度ずれが発生しても、2 回の測定で参照光の信号成分は変化しないので、参照光の定数項($B(x, y)^2$)を完全に消去できると考えた。

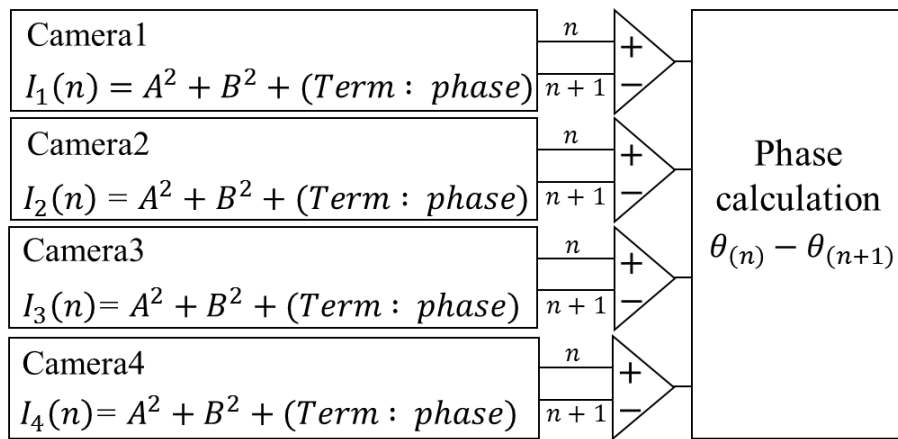
以上のように、本検出方式では新たに時間の概念を取り入れることにより、同じカメラの

検出信号を使えるようにした。これにより、参照光の定数項を完全に消去し、ロバスト性の高い位相検出法を実現できると考えた。

本研究では、製造ライン向けに本概念を用いた時間微分位相検出法を第3章で提案する。さらに、ホログラフィックメモリ向けに、ページ間の位相差を検出する、ページ間差動位相検出法を第4章で提案する。そして、時間の概念を強度信号検出に拡張した、ページ間差動強度増幅検出法を第5章で提案する。



(a) ホモダイン位相検出



(b) 提案方式

図 3.4 ホモダイン位相検出法と提案方式の演算イメージ

3.4 製造ライン向け位相検出

製造ライン検査の干渉計測法として、物体光の位相の時間変化を検出する時間微分位相検出法を新たに提案する。

3.4.1 信号処理フロー

図 3.5 は、信号処理フローと信号の名前を定義した図である。(a)はホモダイン位相検出法、(b)は時間微分位相検出法を示している。本章では、測定対象物を反射した物体光と参照の干渉光を4つのカメラを用いて検出する。4つのカメラからの検出信号を用いて位相演算処理が行われる。ホモダイン位相検出法では、位相演算処理後の信号を復元位相信号と呼ぶ。時間微分位相検出法は、2つの処理フローがある。1つ目は物体光の位相の時間変化を演算する位相演算処理である。2つ目は、ホモダイン位相検出と同様の位相情報に変換する復元処理である。時間微分位相検出法では、位相演算処理後の信号を検出位相信号、復元処理後の信号を復元位相信号と呼ぶ。

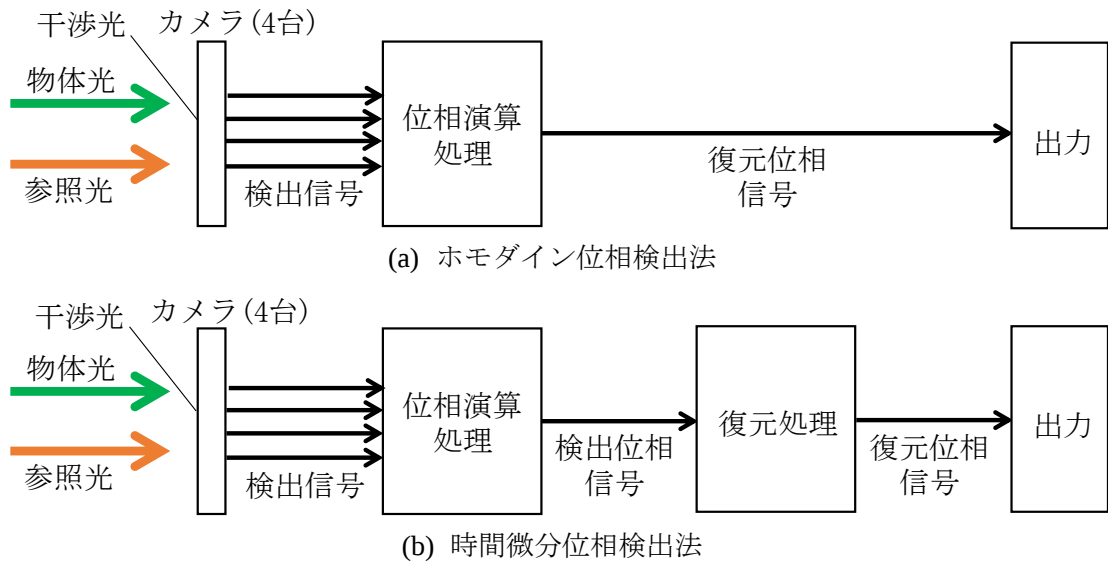


図 3.5 信号処理フローと信号の名前の定義

3.4.2 位相復元

時間微分位相検出法で、ホモダイン位相検出法と同じ復元位相信号を得るため復元処理の方法について説明する。時間微分位相検出法では、物体光の位相変化量 $\Delta\theta(x, y, T_n)$ を、

$$\Delta\theta(x, y, T_n) = \theta(x, y, T_n) - \theta(x, y, T_{n+1}) \quad (3.5)$$

として検出する。復元処理では、物体光の位相変化量 $\Delta\theta(x, y, T_n)$ に対して、

$$\theta(k_2, y, T_n) = - \sum_{k=k_1}^{k_2} \Delta\theta(x_k, y, T_n) / j \quad (3.6)$$

の演算を行う。なお、 k_1 、 k_2 は、画像内の画素を示しており、位相情報を復元する範囲を示している。また、 j は時刻 T_n から時刻 T_{n+1} の間に移動した測定対象物の移動量(画素数)を示している。

図 3.6 は、位相復元のアルゴリズムを説明した図である。(a)、(b)、(c)はホモダイン位相検出法の復元位相信号、時間微分位相検出法の検出位相信号、時間微分位相検出法の復元位相信号をそれぞれ示している。四角の枠は、画素を示しており、各画素中には、各方式の位相を示している。ここでは説明を簡単にするため、1次元方向の画素で説明を行う。

ホモダイン位相検出法の場合、図 3.6(a)に示すように s 番目の画素は物体光の位相 $\theta(s, T_n)$ に対する参照光の位相 $\phi(s)$ が出力される。理想的には、参照光の位相 $\phi(s)$ は測定画素によらず一定となることが望ましい。

時間微分位相検出法の検出位相は、図 3.6(b)に示すように s 番目の画素は物体光の位相変化 $\Delta\theta(s, T_n)$ が検出される。本検出方式では、ホモダイン位相検出法と同じ位相を検出するため、図 3.6(c)のような位相復元処理を行う。図 3.6(c)の位相復元信号では測定対象物の空間的な位相変化を積分することを特徴としている。ここで、説明を簡単にするため、測定対象物が時刻 T_n から時刻 T_{n+1} の間に1画素だけ図中の左側に移動したと仮定する。画素1の位相 $\theta_c(1, T_1)$ は、(3.6)式から、

$$\theta_c(1, T_n) = -\Delta\theta(1, T_n) = \theta(1, T_{n+1}) - \theta(1, T_n) \quad (3.7)$$

となる。また、同様に画素2の位相 $\theta_c(2, T_n)$ は(3.6)式から

$$\begin{aligned} \theta_c(2, T_n) &= -[\Delta\theta(1, T_n) + \Delta\theta(2, T_n)] \\ &= -\{[\theta(1, T_n) - \theta(1, T_{n+1})] + [\theta(2, T_n) - \theta(2, T_{n+1})]\} \end{aligned} \quad (3.8)$$

と示すことができる。ここで、測定対象物は同じ位相状態のまま1画素左に移動しているだけなので物体光の位相 $\theta(m, T_{m+1})$ と $\theta(m+1, T_m)$ は同じ位相となる。これより、画素2の位相 $\theta_c(2, T_n)$ は、

$$\theta_c(2, T_n) = \theta(2, T_{n+1}) - \theta(1, T_n) \quad (3.9)$$

となる。同様の演算を行うと、画素 s の位相 $\theta_c(s, T_n)$ は、

$$\theta_c(s, T_n) = \theta(s, T_{n+1}) - \theta(1, T_n) \quad (3.10)$$

となる。これは、物体光の位相 $\theta(s, T_{n+1})$ と一定の位相 $\theta(1, T_n)$ と考えることができるので、ホモダイン位相検出法と同じ復元位相を検出できることがわかる。なお、ここでは 1 画素の移動で説明したが、複数画素の移動であっても同様にして位相を復元できる。

	Pixel 1	Pixel 2	Pixel 3	...	Pixel s
(a)	$\theta(1, T_n) - \phi(1)$	$\theta(2, T_n) - \phi(2)$	$\theta(3, T_n) - \phi(3)$	• • • • •	$\theta(s, T_n) - \phi(s)$
(b)	$\Delta\theta(1, T_n)$ $\theta(1, T_n) - \theta(1, T_{n+1})$	$\Delta\theta(2, T_n)$ $\theta(2, T_n) - \theta(2, T_{n+1})$	$\Delta\theta(3, T_n)$ $\theta(3, T_n) - \theta(3, T_{n+1})$	• • • • •	$\Delta\theta(s, T_n)$ $\theta(s, T_n) - \theta(s, T_{n+1})$
(c)	$\theta_c(1, T_n)$ $\theta(1, T_{n+1}) - \theta(1, T_n)$	$\theta_c(2, T_n)$ $\theta(2, T_{n+1}) - \theta(1, T_n)$	$\theta_c(3, T_n)$ $\theta(3, T_{n+1}) - \theta(1, T_n)$	• • • • •	$\theta_c(s, T_n)$ $\theta(s, T_{n+1}) - \theta(1, T_n)$

図 3.6 時間微分位相検出法の位相復元アルゴリズム

- (a) ホモダイン位相検出法の復元位相信号、(b)時間微分位相検出法の検出位相信号、
(c)時間微分位相検出法の復元位相信号

3.5 ホログラフィックメモリの位相検出

位相変調型ホログラフィックメモリのページ間の位相信号の差を検出するページ間差動位相検出法を新たに提案する。

3.5.1 信号処理フロー

図 3.7 は、信号処理フローと信号の名前を定義した図である。ここではホモダイン位相検

出、ページ間差動位相検出法とともに同じ信号の名前としている。記録媒体から回折した再生光とオシレータ光の干渉光を4つのカメラを用いて検出する。4つのカメラからの検出信号を用いて位相演算処理が行われ、再生位相信号が出力される。

時間微分位相検出法では、測定対象物の3次元形状を可視化する必要があると考え、位相復元を行った。一方で、ホログラフィックメモリに適用する場合には、任意の位相情報が記録再生できれば良いので、位相復元を必ずしも必要としない。そこで、ここではページ間の位相の差を検出するページ間差動位相検出法を新たに提案する。

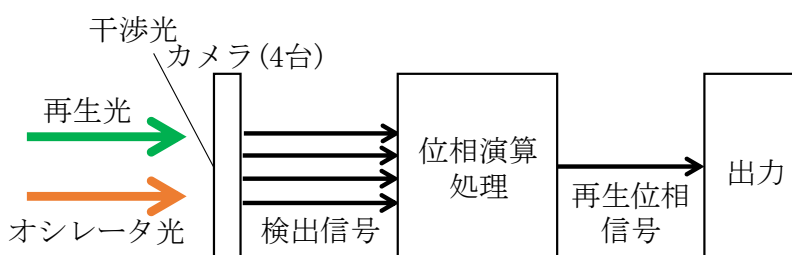


図 3.7 信号処理フローと信号の名前の定義

3.5.2 記録再生データ

ページ間差動位相検出法では、ページの位相差を信号とする新たな符号化方式を取り入れる。図 3.8 は、位相信号の記録のイメージを示した図である。図 3.8 (a)は、ページ間差動位相検出法の符号化した位相信号を示している。また、図 3.8 (b)、(c)は、 n ページ目、 $n+1$ ページ目に記録媒体に記録する位相を示している。本方式では、ページ間の位相差を再生位相信号とするため、符号化した位相を位相 $a1$ (領域 $A1$)、位相 $a2$ (領域 $A2$)、位相 $a3$ (領域 $A3$)、位相 $a4$ (領域 $A4$)、 n ページ目に記録媒体に記録する位相を位相 $b1$ (領域 $B1$)、位相 $b2$ (領域 $B2$)、位相 $b3$ (領域 $B3$)、位相 $b4$ (領域 $B4$)とした場合、 $n+1$ ページ目に記録媒体に記録する位相は、位相 $a1+b1$ (領域 $C1$)、位相 $a2+b2$ (領域 $C2$)、位相 $a3+b3$ (領域 $C3$)、位相 $a4+b4$ (領域 $C4$)とする。従来方式では、それぞれのページに記録されている位相信号を再生位相信号とするが[7-9]、ページ間差動位相検出法では、ページ間の位相差を符号化した信号とする。

図 3.9 は、ページ間差動位相検出法の再生イメージを示したものである。図 3.8(a)と(b)は、 n ページ目の再生光と $n+1$ ページ目の再生光の位相を示している。図 3.8(c)は、ページ間差動位相検出法の再生位相信号を示している。 n ページ目に記録された位相信号を位相 $k1$ (領域 $K1$)、位相 $k2$ (領域 $K2$)、位相 $k3$ (領域 $K3$)、位相 $k4$ (領域 $K4$)とし、 $n+1$ ページ目に記録された位相信号を位相 $m1$ (領域 $M1$)、位相 $m2$ (領域 $M2$)、位相 $m3$ (領域 $M3$)、位相 $m4$ (領域 $M4$)とした場合、ページ間差動位相検出法の再生位相信号は位相 $k1-m1$ (領域 $L1$)、位相 $k2-m2$ (領域 $L2$)、位相 $k3-m3$ (領域 $L3$)、位相 $k4-m4$ (領域 $L4$)となる。このように、ページ間差動位相

検出法では、ページ間の位相差を信号とする新たな符号化方式を提案する。

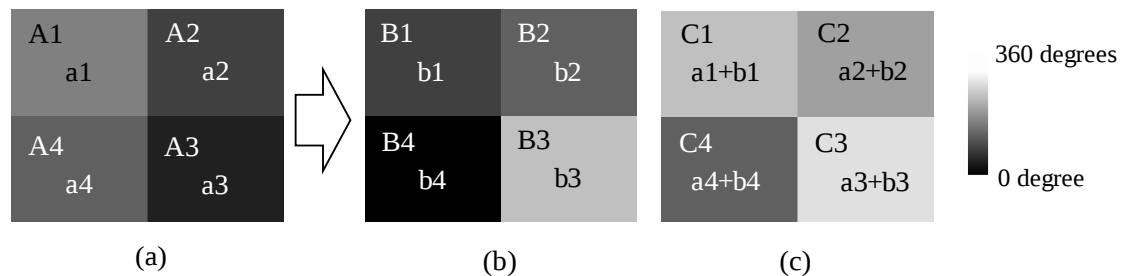


図 3.8 ページ間差動位相検出法の位相信号の記録イメージ

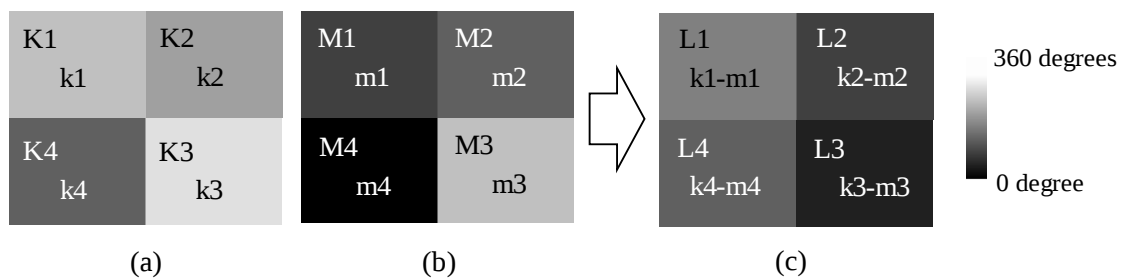


図 3.9 ページ間差動位相検出法の再生信号の再生イメージ

3.6 まとめ

本章では、ホモダイン位相検出法のカメラ間の強度ずれによる位相誤差は、参照光の定数項 $(B(x,y)^2)$ が影響していることを明らかにした。そしてその上で、ロバスト性の高い位相検出方式が実現するために参照光の定数項を完全に消去する新しい検出方式を提案した。本方式は、同じカメラの n 回目の検出信号と $n+1$ 回目の検出信号の差動信号を演算し、それらの信号から、 $n+1$ 回目の物体光と n 回目の物体光の位相差 $\theta_n - \theta_{n+1}$ を得る。これにより、参照光の定数項を完全に消去できるため、従来のホモダイン位相検出法に対してロバスト性の向上が見込める。製造ライン向け位相検出では、位相差 $\theta_n - \theta_{n+1}$ に対し復元処理を行うことで、従来のホモダイン位相検出法と同じ位相信号を検出する。そして、ホログラフィックメモリ向けでは、ページ間の位相の差を検出するページ間差動位相検出法を新たに提案した。

第 4 章 製造ライン向け時間微分位相検出法の検討

4.1 はじめに

製造ライン検査の干渉計測法として、物体光の位相の時間変化を検出する時間微分位相検出法を新たに提案する。本章では測定対象物が移動していることを利用した時間微分位相検出法の位相検出原理について説明を行う。また、従来の干渉計測法で課題となっていた参照光の強度分布ずれや波面ずれに対するロバスト性が高いことを実験で確認する。また、時間微分位相検出法の課題について議論する。

4.2 時間微分位相検出法の原理

4.2.1 光学系

図 4.1 に製造ライン向けの検査装置の光学系を示す。以下、光学系について説明を行う。

レーザを出射した光ビームは、ビームエキスパンダで所望の大きさのビーム径に変換された後、HWP1 を経て PBS に入射する。HWP1 は、出射光を S 偏光と P 偏光を含む偏光に変換する。HWP1 は光軸方向を軸に回転することで S 偏光と P 偏光の強度を変えることができる。そして、PBS を反射した S 偏光を物体光、透過した P 偏光を参照光と呼ぶ。PBS を反射した物体光は QWP1 を経て、測定対象物に入射する。このとき、測定対象物の形状や屈折率の不均一性に伴い、物体光に所定の位相が付加される。ここでは製造ラインのインライン検査を想定しているため、測定対象物は矢印の方向に移動している。測定対象物を反射した物体光は、再び QWP1 を透過し、PBS に入射する。QWP を 2 回透過した物体光は、偏光軸が 90 度回転し、P 偏光に変換されるため、PBS を透過する。

一方、PBS を透過した参照光は、QWP2、固定ミラーを経て、再び QWP2 を透過する。このとき、参照光の偏光軸が 90 度回転し、S 偏光に変換されるため、PBS を反射し、物体光と同じ方向に参照光が伝搬する。PBS を出射した物体光と参照光は、リレーレンズを経て位相検出光学系に入射する。なお、リレーレンズは、測定対象物の反射面の像をカメラに結像するために配置されている。

図 4.2 に時間微分位相検出法の検出光学系を示す。位相検出光学系に入射した物体光と参

照光は、HBS1 に入射する。HBS1 を透過した物体光と参照光は、QWP1、HBS2 を透過し、偏光子 1(Polarizer1)を経て、カメラ 1 で検出される。また、HBS2 を反射した物体光と参照光は、HWP1、Polarizer2 を経てカメラ 2 で検出される。

一方、HBS1 を反射した物体光と参照光は位相可変素子(VPS : Variable Phase Shifter)、QWP2 を経て、HBS3 に入射する。位相可変素子は、参照光の偏光のみに位相を付加することができる液晶素子である。HBS3 を透過した物体光と参照光は Polarizer3 を経て、カメラ 3 で検出される。また、HBS3 を反射した物体光と参照光は、HWP2、Polarizer4 を経てカメラ 4 で検出される。

4.2.2 位相検出原理

次に時間微分位相検出法の位相検出原理についてジョーンズベクトルを用いて議論する。まず、リレーレンズを出射した物体光と参照光の電場 $E_o(x, y, t)$ を、

$$E_o(x, y, t) = \begin{pmatrix} A(x, y) \exp\{i\theta(x, y, t)\} \\ B(x, y) \exp\{i\phi(x, y)\} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

とする。ここで、 $A(x, y)$ 、 $\theta(x, y, t)$ は物体光の振幅と位相、 $B(x, y)$ 、 $\phi(x, y)$ は参照光の振幅と位相を示している。ここでは、測定対象物が移動するので、物体光の位相のみが時間で変化すると仮定した。

カメラ 1 上の干渉光の電場 $E_1(x, y, t)$ は、(4.1)式、HBS、QWP、偏光子の演算子を用いて、

$$\begin{aligned} E_1(x, y, t) &= \frac{1}{2\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A(x, y) \exp\{i\theta(x, y, t)\} \\ B(x, y) \exp\{i\phi(x, y)\} \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{2\sqrt{2}} \begin{pmatrix} A(x, y) \exp\{i\theta(x, y, t)\} + B(x, y) \exp\left\{i\left(\phi(x, y) + \frac{\pi}{2}\right)\right\} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.2) \end{aligned}$$

となる。そして、カメラ 1 で検出される物体光と参照光の干渉光の強度 $I_1(x, y, t)$ は、物体光と参照光の振幅 $A(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 、位相 $\theta(x, y, t)$ 、 $\phi(x, y)$ を用いて、

$$\begin{aligned} I_1(x, y, t) &= \frac{1}{8} \left| A(x, y) \exp\{i\theta(x, y, t)\} + B(x, y) \exp\left\{i\left(\phi(x, y) + \frac{\pi}{2}\right)\right\} \right|^2 \\ &= \frac{1}{8} [A(x, y)^2 + B(x, y)^2 + 2A(x, y)B(x, y) \sin\{\theta(x, y, t) - \phi(x, y)\}] \quad (4.3) \end{aligned}$$

となる。ここで、時刻 T_n から時刻 T_{n+1} のカメラ 1 の検出強度の変化は、

$$\begin{aligned}
& I_1(x, y, T_n) - I_1(x, y, T_{n+1}) \\
&= -\frac{A(x, y)B(x, y)}{2} \cos \left\{ \frac{\theta(x, y, T_n) + \theta(x, y, T_{n+1})}{2} - \phi(x, y) \right\} \sin \left\{ \frac{\theta(x, y, T_n) - \theta(x, y, T_{n+1})}{2} \right\} \quad (4.4)
\end{aligned}$$

と示すことができる。そして、カメラ 2、カメラ 3、カメラ 4 の検出強度 $I_2(x, y, t)$ 、 $I_3(x, y, t)$ 、 $I_4(x, y, t)$ は、カメラ 1 と同様に、

$$I_2(x, y, t) = \frac{1}{8} [A(x, y)^2 + B(x, y)^2 + 2A(x, y)B(x, y) \cos \{ \theta(x, y, t) - \phi(x, y) \}] \quad (4.5)$$

$$I_3(x, y, t) = \frac{1}{8} [A(x, y)^2 + B(x, y)^2 + 2A(x, y)B(x, y) \sin \{ \theta(x, y, t) - \phi(x, y) - \Delta\phi(t) \}] \quad (4.6)$$

$$I_4(x, y, t) = \frac{1}{8} [A(x, y)^2 + B(x, y)^2 + 2A(x, y)B(x, y) \cos \{ \theta(x, y, t) - \phi(x, y) - \Delta\phi(t) \}] \quad (4.7)$$

となる。ここで、 $\Delta\phi(t)$ は、位相可変素子の付加位相を示しており、測定回数が奇数の場合には、付加位相は 0 度であり、偶数の場合には、付加位相が 180 度である。

そして、時刻 T_n から時刻 T_{n+1} までのカメラ 2、カメラ 3、カメラ 4 の検出強度の変化は、

$$\begin{aligned}
& I_2(x, y, T_n) - I_2(x, y, T_{n+1}) \\
&= -\frac{A(x, y)B(x, y)}{2} \sin \left\{ \frac{\theta(x, y, T_n) + \theta(x, y, T_{n+1})}{2} - \phi(x, y) \right\} \sin \left\{ \frac{\theta(x, y, T_n) - \theta(x, y, T_{n+1})}{2} \right\} \quad (4.8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& I_3(x, y, T_n) - I_3(x, y, T_{n+1}) \\
&= -\frac{A(x, y)B(x, y)}{2} \sin \left\{ \frac{\theta(x, y, T_n) + \theta(x, y, T_{n+1})}{2} - \phi(x, y) \right\} \cos \left\{ \frac{\theta(x, y, T_n) - \theta(x, y, T_{n+1})}{2} \right\} \quad (4.9)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& I_4(x, y, T_n) - I_4(x, y, T_{n+1}) \\
&= \frac{A(x, y)B(x, y)}{2} \cos \left\{ \frac{\theta(x, y, T_n) + \theta(x, y, T_{n+1})}{2} - \phi(x, y) \right\} \cos \left\{ \frac{\theta(x, y, T_n) - \theta(x, y, T_{n+1})}{2} \right\} \quad (4.10)
\end{aligned}$$

となる。なお、ここでは、 T_n の測定回数を奇数とし、 $\Delta\phi(T_n)$ を 0 度、 $\Delta\phi(T_{n+1})$ を 180 度とした。次に、(4.4) 式の 2 乗と (4.8) 式の 2 乗の和、(4.9) 式の 2 乗と (4.10) 式の 2 乗の和を演算すると、

$$\{I_1(x, y, T_n) - I_1(x, y, T_{n+1})\}^2 + \{I_2(x, y, T_n) - I_2(x, y, T_{n+1})\}^2 = \frac{\{A(x, y)B(x, y)\}^2}{2} \sin^2 \left\{ \frac{\Delta\theta(x, y, T_n)}{2} \right\} \quad (4.11)$$

$$\{I_3(x, y, T_n) - I_3(x, y, T_{n+1})\}^2 + \{I_4(x, y, T_n) - I_4(x, y, T_{n+1})\}^2 = \frac{\{A(x, y)B(x, y)\}^2}{2} \cos^2 \left\{ \frac{\Delta\theta(x, y, T_n)}{2} \right\} \quad (4.12)$$

$$\Delta\theta(x, y, T_n) = \theta(x, y, T_n) - \theta(x, y, T_{n+1}) \quad (4.13)$$

となる。ここで、時刻 T_n と時刻 T_{n+1} の物体光の位相変化量を $\Delta\theta(x, y, T_n)$ とした。そして、(4.11)式と(4.12)式より、

$$\Delta\theta(x, y, T_n) = 2 \tan^{-1} \left[\pm \sqrt{\frac{\{I_1(x, y, T_n) - I_1(x, y, T_{n+1})\}^2 + \{I_2(x, y, T_n) - I_2(x, y, T_{n+1})\}^2}{\{I_3(x, y, T_n) - I_3(x, y, T_{n+1})\}^2 + \{I_4(x, y, T_n) - I_4(x, y, T_{n+1})\}^2}} \right] \quad (4.14)$$

が得られる。本演算は、測定時刻の異なる検出強度の差動演算により、物体光の時間的な位相変化を検出する。なお、(4.14)式の正負については、(4.4)式、(4.8)式、(4.9)式、(4.10)式から判別することができる。

次に、測定回数が偶数から奇数への変化について示す。測定回数で異なるのは、位相可変素子の位相付加量のみなので $\Delta\phi(T_{n+1})$ を180度、 $\Delta\phi(T_{n+2})$ を0度として、カメラ3、カメラ4で検出される強度に対して(4.9)式、(4.10)式と同様の演算を行うと、

$$\begin{aligned} & I_3(x, y, T_{n+1}) - I_3(x, y, T_{n+2}) \\ &= \frac{A(x, y)B(x, y)}{2} \sin \left\{ \frac{\theta(x, y, T_{n+1}) + \theta(x, y, T_{n+2})}{2} - \phi(x, y) \right\} \cos \left\{ \frac{\theta(x, y, T_{n+1}) - \theta(x, y, T_{n+2})}{2} \right\} \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} & I_4(x, y, T_{n+1}) - I_4(x, y, T_{n+2}) = \\ & - \frac{A(x, y)B(x, y)}{2} \cos \left\{ \frac{\theta(x, y, T_{n+1}) + \theta(x, y, T_{n+2})}{2} - \phi(x, y) \right\} \cos \left\{ \frac{\theta(x, y, T_{n+1}) - \theta(x, y, T_{n+2})}{2} \right\} \end{aligned} \quad (4.16)$$

となる。(4.9)式、(4.10)式に対し、(4.15)式、(4.16)式は正負が反転しただけなので、(4.11)式、(4.12)式の演算を行うと、同じ結果が得られ、物体光の位相変化量 $\Delta\theta(x, y, T_{n+1})$ は、

$$\Delta\theta(x, y, T_{n+1}) = 2\tan^{-1} \left[\pm \sqrt{\frac{\{I_1(x, y, T_{n+1}) - I_1(x, y, T_{n+2})\}^2 + \{I_2(x, y, T_{n+1}) - I_2(x, y, T_{n+2})\}^2}{\{I_3(x, y, T_{n+1}) - I_3(x, y, T_{n+2})\}^2 + \{I_4(x, y, T_{n+1}) - I_4(x, y, T_{n+2})\}^2}} \right] \quad (4.17)$$

と示すことができる。(4.14)式、(4.17)式より、測定回数は、奇数、偶数によらず連続的に同じ位相変化量として与えられることがわかる。このため、時間微分位相検出法は、物体光の位相変化を連続的に検出することができ、ホモダイン位相検出と同様にリアルタイム検出が可能であることを確認した。

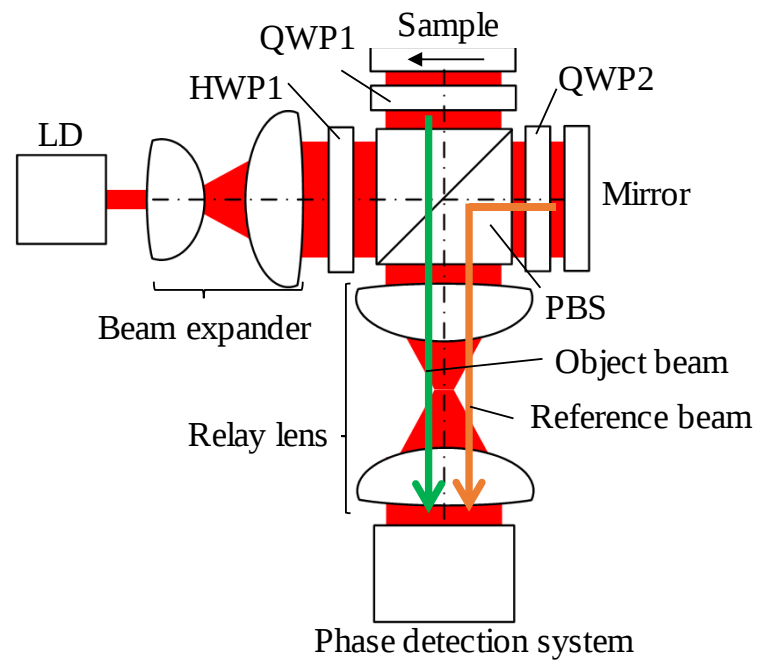


図 4.1 検査装置の光学系

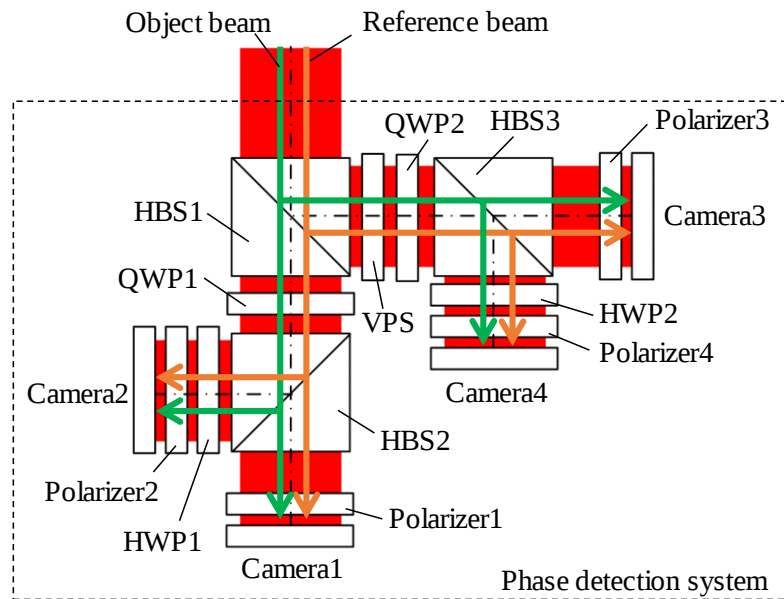


図 4.2 時間微分位相検出法の位相検出光学系

4.2.3 特徴

次に、時間微分位相検出法の特徴を示す。

[特徴 1] 時間的な位相変化を検出

ホモサイン位相検出法は測定対象物から得られる物体光と参照光の位相差 $\theta(x, y, t) - \phi(x, y)$ を検出するが、時間微分位相検出法は、測定対象物の位相の時間変化を検出する。本方式は、製造ラインのインライン検査への適用を想定している。

[特徴 2] 複数カメラからの信号を演算することでリアルタイム検出を実現

時間微分位相検出法は、複数カメラからの信号を演算することで、ホモサイン位相検出法と同様にリアルタイム検出を実現できる。

[特徴 3] 検出信号の強度ずれの影響を受けにくい

ホモサイン位相検出法は、異なるカメラで検出した信号強度の差動演算を行うため、カメラ感度のずれ、ほこり、汚れに伴うカメラ間の検出強度ずれの影響を強く受ける課題があった。それに対し、時間微分位相検出法は、同じカメラで検出した 2 つの信号強度の差動演算を行うため、カメラ間の信号強度ずれには影響しにくい特徴がある。

[特徴 4] 波面ずれの影響を受けにくい

時間微分位相検出法は物体光の位相の時間変化のみを検出するため、物体光、参照光の波面ずれは影響しない。位相シフト法やホモサイン位相検出法で課題となっていた光学系の経時変化に伴う収差要因の波面ずれや、空気の流れ、温度勾配等に伴う屈折率変化要因の波

面ずれに対してロバスト性の高い検出方式である。

[特徴 5]位相アンラッピング処理が不要

ホモサイン位相検出法の復元位相信号は、 $0 \sim 360$ 度で示されるため、位相情報が 0 度以下、 360 度以上となると位相が連続的に変化しない。この課題を解決するため、ホモサイン位相検出法では、位相の変化が滑らかであると仮定して、図 4.3(a)に示す位相接続（アンラッピング）処理を行う必要がある[43, 44]。一方で滑らかに接続しない場合などにおいて、位相接続処理は、間違った接続を行う課題がある。それに対し、時間微分位相検出法では、時間微分位相検出法は物体光の位相の時間変化が検出されるため、位相アンラッピング処理をする必要がない。復元位相信号は位相アンラッピング処理なしに図 4.3(b)のように復元される。一方で、時間微分位相検出法は、 360 度以上の位相差となると正しい位相を検出できない。このことから、時間微分位相検出法は、滑らかな位相変化の検出に対し、最も効果が発揮できると考える。

[特徴 6]時間間隔を後処理で変更可能

測定対象物の位相差を測定する方式として微分干渉顕微鏡がある。微分干渉顕微鏡の場合、測定対象物の形状に合わせて 2 つのビームの間隔を自由に変えることが困難である。2 つのビームの間隔を測定対象物の最大位相差の観点から決定してしまうと、位相差の小さい形状では所望の S/N が得られない課題がある。それに対し、時間微分位相検出法の場合、時間間隔を後処理で変更することができる。例えば、各カメラの強度を保存しておけば、位相変化が小さい領域に対しては、長い時間間隔で処理を行うことで大きな位相変化量を検出することができる。一方で、位相変化の大きい領域に対しては、短い時間間隔で処理を行えば良い。

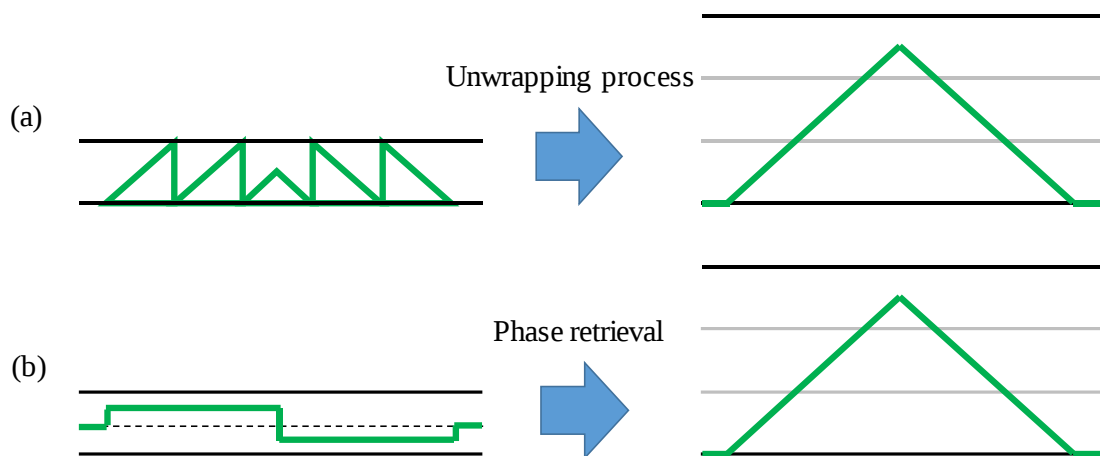


図 4.3 測定対象物の位相が大きい場合
(a)位相シフト法、(b)時間微分位相検出法

4.3 実験および評価方法

4.3.1 実験系

本研究では、時間微分位相検出法の原理検証を行った。図 4.4 は、原理検証の実験系を示している。原理検証では、測定対象物の代わりに SLM(Spatial light modulator)を用いた。

レーザを出射した P 偏光の光ビームは、ビームエキスパンダを経て HBS に入射する。SLM は素子の特性上、直線偏光を入射する必要があるため HBS を用いて物体光と参照光の分岐、合成を行った。ここで HBS を反射したビームを物体光、透過した光ビームを参照光と呼ぶ。HBS を反射した物体光は 2 枚の偏光子を透過し、SLM に入射する。2 枚の偏光子は、検出光学系に入射する物体光の偏光を P 偏光に維持したまま、物体光の強度を変更するために配置した。SLM は物体光に位相を付加する目的で配置されている。SLM を反射した物体光は、再び 2 枚の偏光子を経て、HBS を透過する。一方、HBS を透過した参照光は QWP、ミラー、QWP を経て、HBS を反射する。このとき、参照光は QWP により P 偏光から S 偏光に変換される。このため、HBS を出射した物体光と参照光の偏光は、直交しており、図 4.1 の光学系と同じ偏光となっている。HBS を出射した物体光と参照光はリレーレンズを経てホモダイン位相検出法、時間微分位相検出法の位相検出光学系に入射する。本原理検証で使用した主要部品の仕様を表 4.1 に示す。また、図 4.5 は実験光学系の写真である。(a)は原理検証の光学系、(b)は位相検出光学系を示している。このような光学部品の配置で原理検証を行った。

本原理検証では、時間微分位相検出法とホモダイン位相検出法の比較を行った。ここでは、時間微分位相検出法と同じ要因を考慮するため、図 4.6 の光学系で測定を行った。本光学系は図 2.2 に対して、カメラに入射する物体光、参照光の強度が半分となってしまうが、検出信号の成分は同じである。

図 4.4(b)は、SLM で付加した物体光の位相パターンを示している。ここでは、半導体ウェハの欠陥を想定し、高さ 100nm の台形状とした。高さ 100nm で与えられる位相は、波長 633nm で 114 度相当である。また、時刻 T_1 から時刻 T_2 には SLM が移動するのではなく、SLM の表示する位相パターンを変えることで疑似的に物体を 58 画素だけ移動させた。

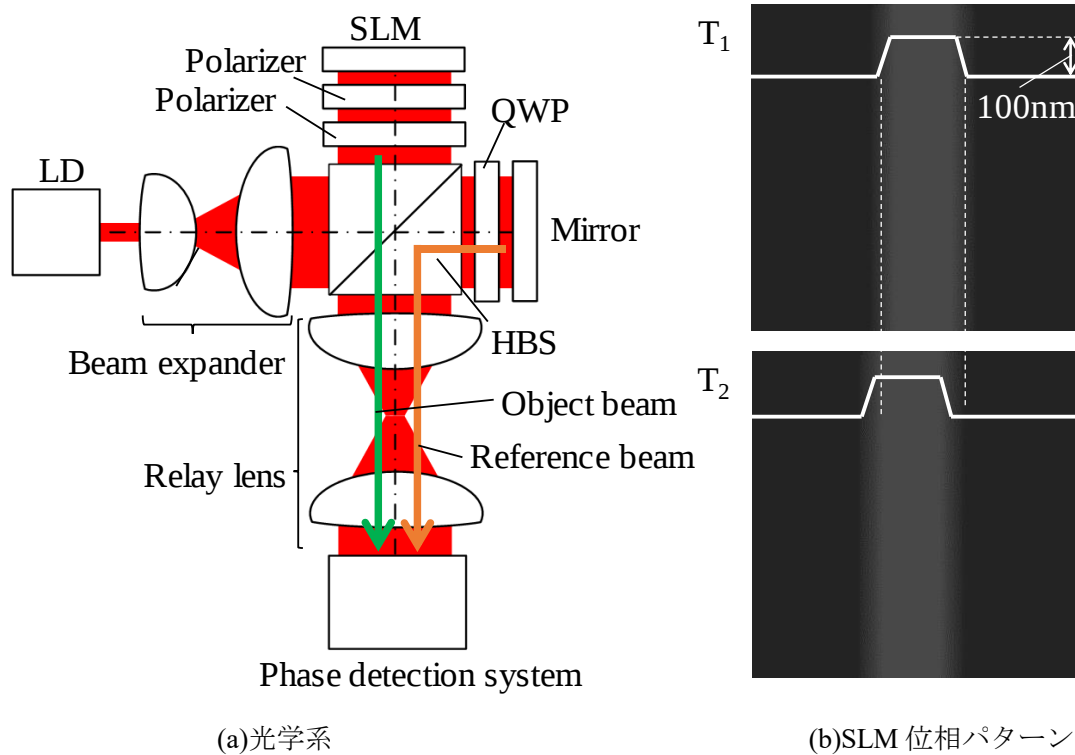


図 4.4 原理検証の実験系

表 4.1 主要部品の仕様

Component	Specifications	
LD (Newport R-32734)	Wavelength	633 nm
SLM (Boulder Nonlinear system P512-0635)	Mode	Reflective
	Resolution	512 x 512
	Pixel Size	15 μm , Square
	Effective area	7.68 x 7.68 mm
VPS (Thorlabs LCC1111U-A)	Wavelength Range	350 - 700 nm
	Effective area	$\Phi 10$ mm
Camera (Thorlabs DCC1545M)	Resolution	1280 x 1024 Pixels
	Pixel Size	5.2 μm , Square
	Effective area	6.66 x 5.32 mm

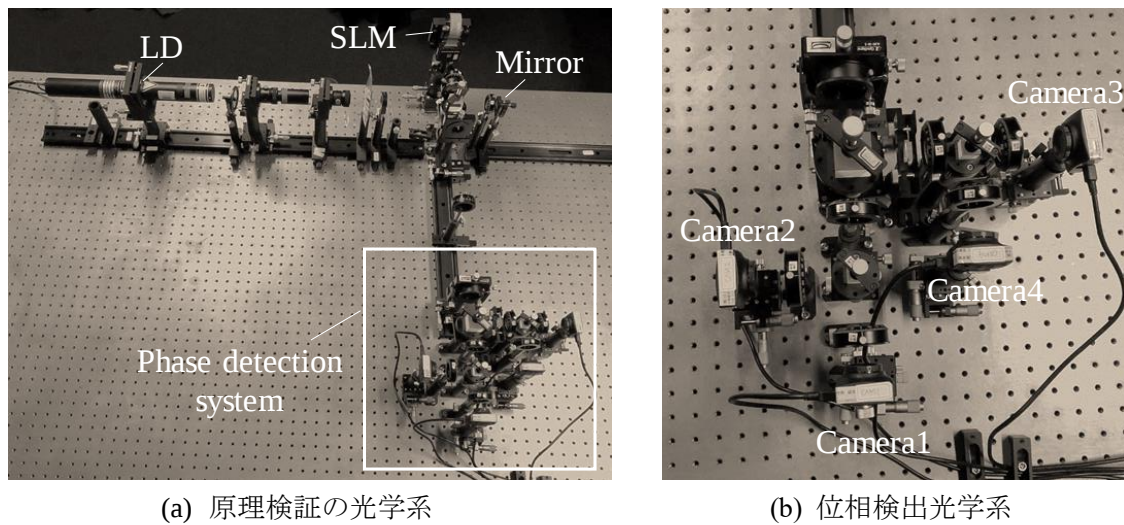


図 4.5 実験光学系の写真

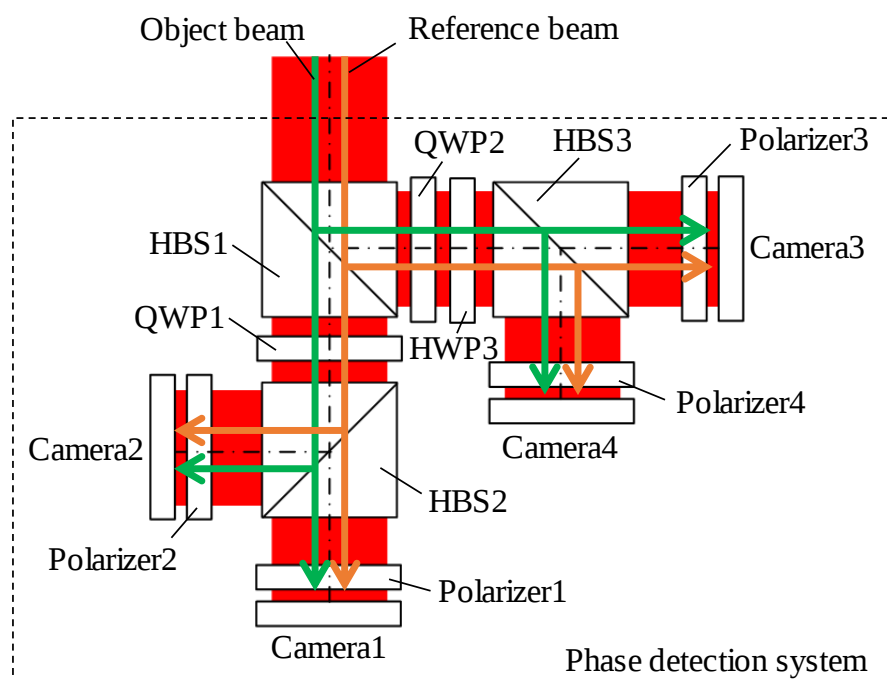


図 4.6 ホモダイン位相検出法の実験光学系

図 4.7 は、参照光の強度分布をカメラで検出した画像である。各カメラで異なる強度分布ずれが発生していることがわかる。これらの強度分布は、従来の干渉計測には不向きな強度分布であるが、実際の製造ラインでは、センサの感度ずれ、ほこり、汚れなどの影響により、強度分布ずれが発生することが考えられるため、本原理検証では、この強度分布で測定を行った。また、図 4.8 は、SLM の位相をフラットにしたときのホモダイン位相検出法の復元位

相を示している。図 4.8(a)は復元位相、(b)は(a)の斜め線の位相分布をそれぞれ示している。図 4.8(b)の縦軸は物体光と参照光の位相差、横軸は位置を示している。本光学系は初期的に物体光と参照光が 220 度(peak to valley)ずれている。ホモダイン位相検出法では位相ずれが測定に影響するため、本原理検証では、測定結果から本位相ずれを差し引いた結果をホモダイン位相検出法の測定結果とした。なお、時間微分位相検出法については、物体光の位相変化のみを検出するため、補正処理は行っていない。

このような、強度分布ずれ(図 4.7)、初期位相ずれ(図 4.8)を有した、干渉計には不向きな条件で耐環境性に関する原理検証を行った。

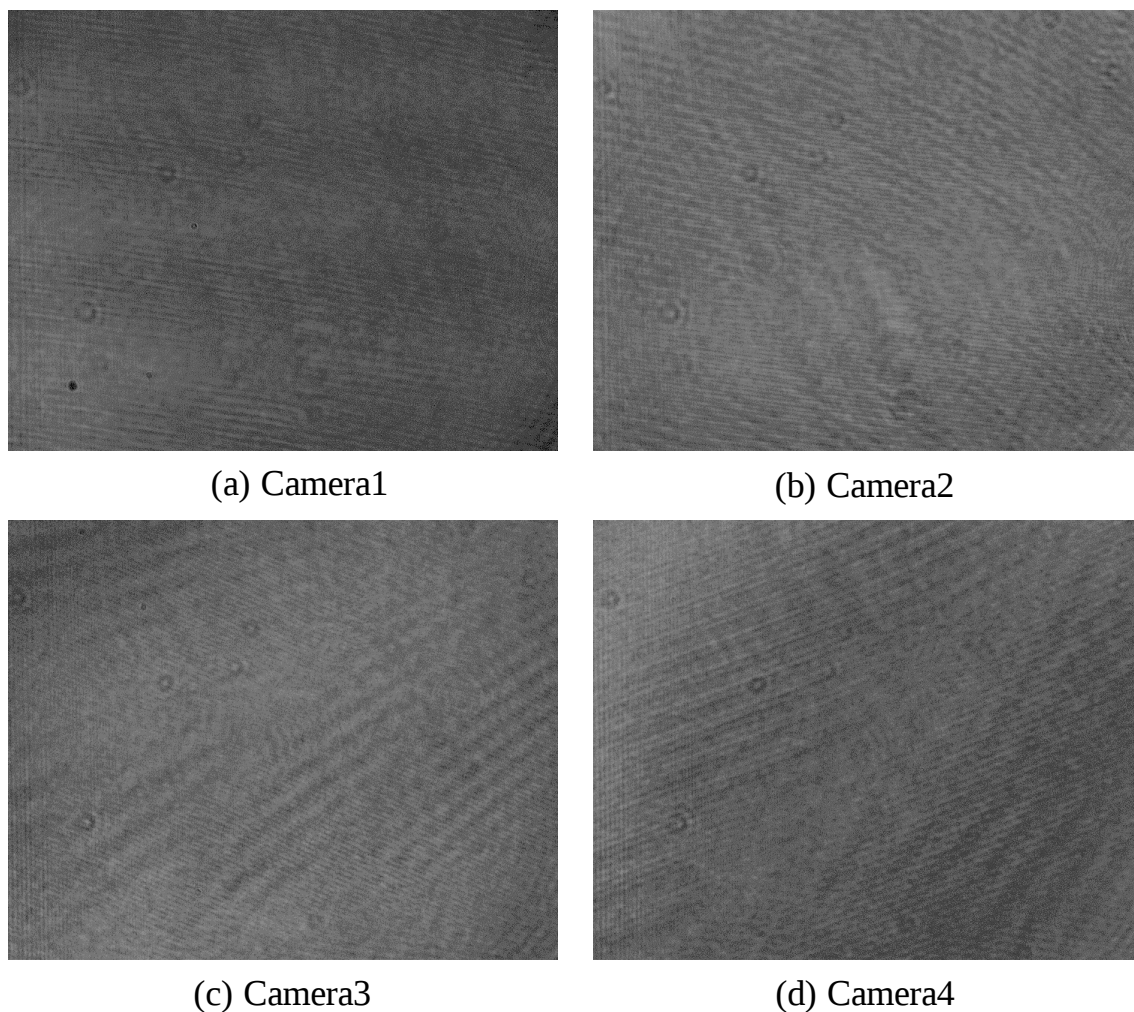


図 4.7 参照光の強度分布

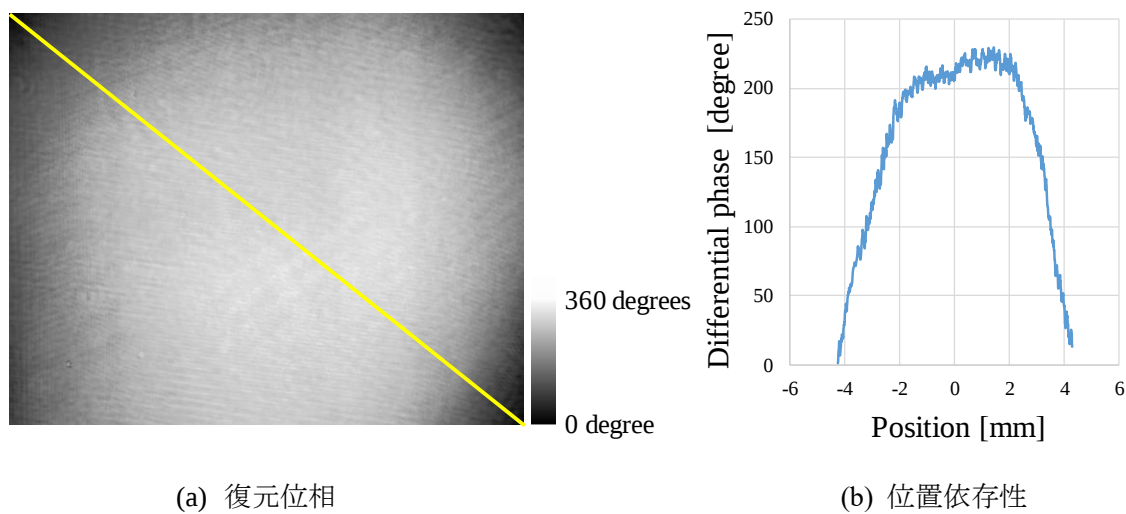


図 4.8 光学系の初期位相

4.3.2 位相信号検出の原理検証

図 4.9 は、ホモダイン位相検出法の測定結果である。図 4.4(b)に示す SLM で付加した帯状の位相が検出できていることがわかる。また、図 4.10 は、時間微分位相検出法の測定結果である。(a)は検出位相、(b)は復元位相を示したものである。時間微分位相検出法では、検出がプラスとマイナス方向に検出されており、その結果、SLM で付加した帯状の復元位相が検出できていることがわかる。なお、図 4.9、図 4.10 とともに参照光に対する物体光の強度比を 1/2 で測定を行った。

本結果より、時間微分位相検出法は、ホモダイン位相検出と同様の位相を復元できることを実験で確認した。

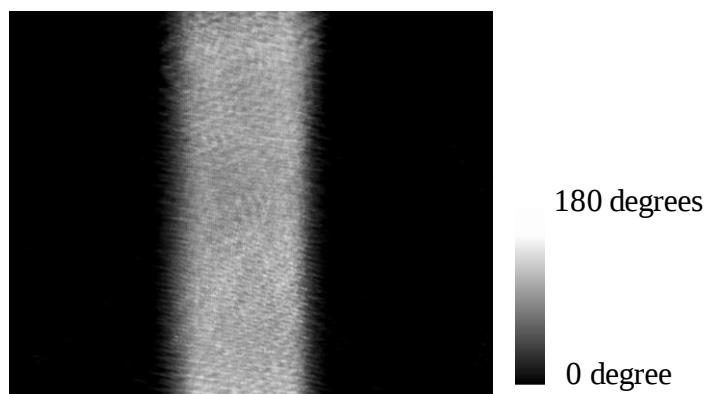


図 4.9 ホモダイン位相検出法の実験結果

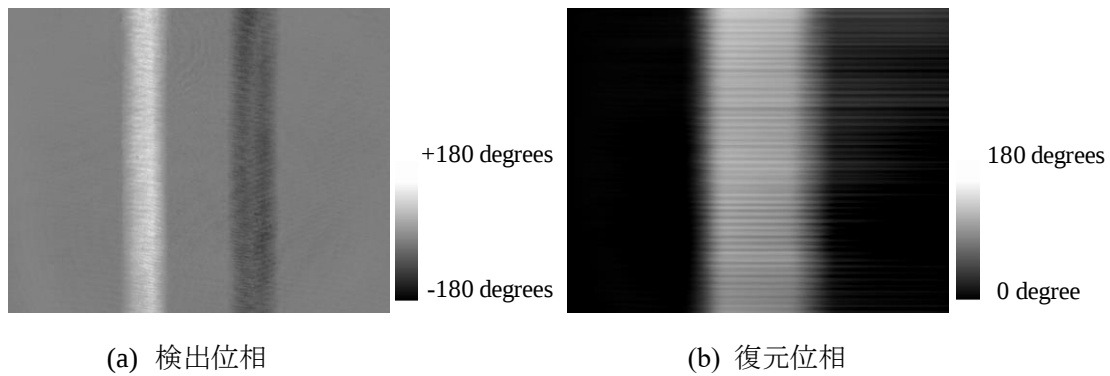


図 4.10 時間微分位相検出法の実験結果

4.3.3 評価方法

ここで、それぞれの位相検出法の定量的な評価を行う。図 4.11 は、検出した位相の評価方法を示している。(a)は復元位相を示しており、本評価では、検出された位相を垂直方向に平均化する。(b)は(a)を垂直方向に平均化した位相を示している。ここでは物体の形状検出では、高さと幅が重要と考え、ピーク範囲の位相 φ と半値全幅 W から高さ誤差(HE)、半値全幅誤差($EFWHM$)を定義した。

$$HE = |\varphi - \varphi_{SLM}| \quad (4.18)$$

$$EFWHM = \left| \frac{W - W_{SLM}}{W_{SLM}} \right| \quad (4.19)$$

ここで、位相 φ はピーク付近の位相の平均値である。また、 φ_{SLM} と W_{SLM} は、SLM で設定した位相および半値全幅を示している。

表 4.2 は、図 4.9、図 4.10 に示したホモダイン位相検出法と時間微分位相検出法の測定結果である。これより、ホモダイン位相検出法、時間微分位相検出法ともに高さ誤差が $1/100\lambda$ 以下であり、高精度に位相が検出できていることがわかる。また、半値全幅誤差も小さい。

次に、本評価指標を用いて時間微分位相検出法の強度ずれ、波面ずれに対する耐環境性を検討した。

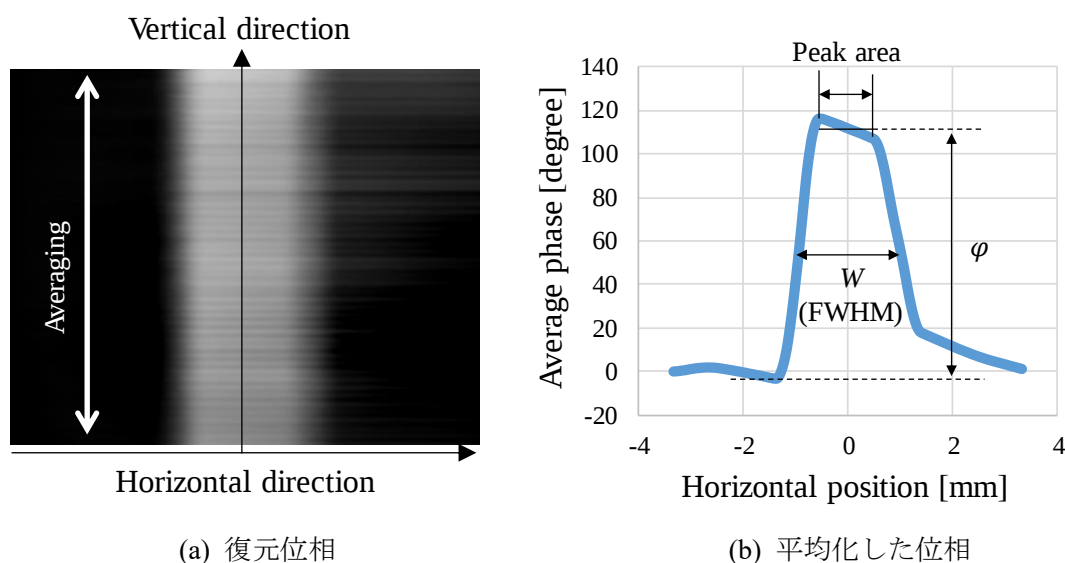


図 4.11 評価方法

表 4.2 測定結果(強度比 1/2)

	Homodyne phase detection	Time differential phase detection
Height Error (HE)	1.0 degree	0.1 degree
Error of FWHM (EFWHM)	5 %	1.3 %

4.4 耐環境性に関する実験

4.4.1 強度ずれの影響

図 4.12 は、物体光の強度を下げた場合の復元位相を示している。参照光に対する物体光の強度比を 1/2 から 1/200 に変えて測定を行った結果である。なお、本測定では参照光の強度を一定にしたまま、図 4.4(a)に示す SLM 側の偏光子の軸を光軸周りに回転させることで物体光のみの強度を低下させた。これは、例えば光学系の効率が低い、測定対象物の反射率／透過率が低い、測定対象物を破壊もしくは測定対象物に光毒性があるため、測定対象物に弱い強度の光しか入射できない、などの理由で物体光の強度が弱いことを想定している。

図 4.12 より、ホモダイン位相検出法の場合、強度比を 1/2 から 1/200 に変えると、位相を全く測定できていないことがわかる。それに対して、時間微分位相検出法は、強度比が変わっても復元位相の変化が小さいことがわかる。

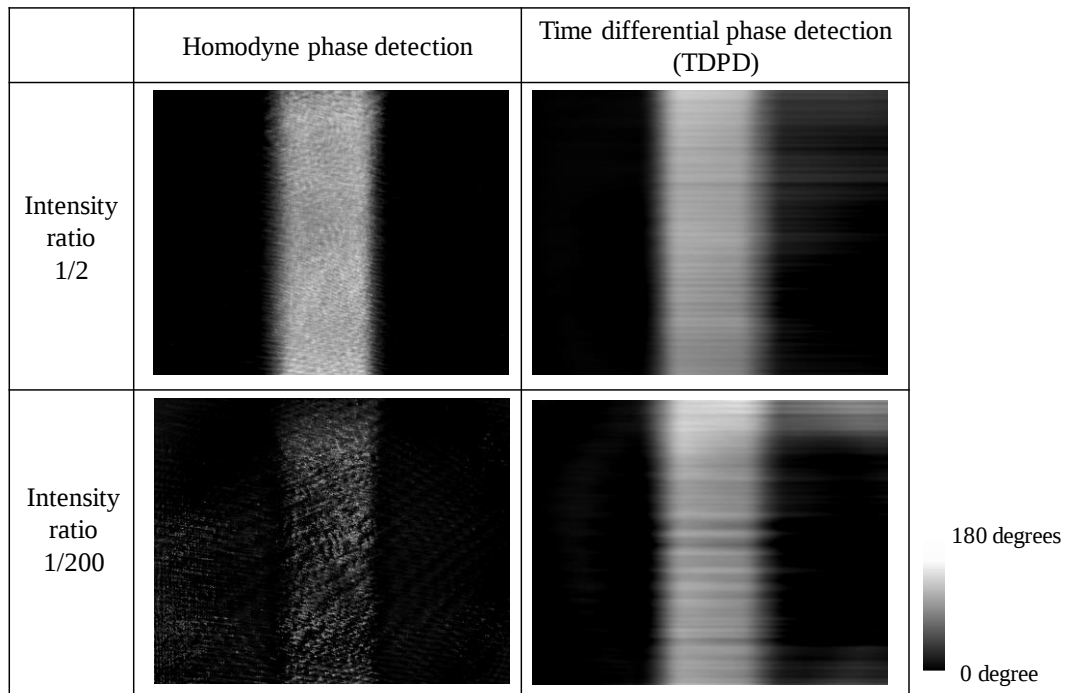


図 4.12 復元位相の強度比依存

次に本結果の定量評価を行った。図 4.13 は、高さ誤差、半値全幅誤差の強度比依存性を示している。ここで、(a)の縦軸は高さ誤差、(b)の縦軸は半値全幅誤差、(a)、(b)ともに横軸は参照光に対する物体光の強度比を示している。この結果より、ホモダイン位相検出法は、参照光に対する物体光の強度比が小さくなるに伴い、高さ誤差および半値全幅誤差が大きくなることがわかる。それに対し、時間微分位相検出法は、大きく変化していない。強度比が 1/200 となることで高さ誤差が 4.0 度まで増えたが、それでも精度は $1/100\lambda$ 程度なので、実用上は問題がないと考える。また、半値全幅誤差は全く変化していない。

これは、上述したようにホモダイン位相検出法は、カメラ間の検出強度の差動信号を演算するため、図 4.7 のようにカメラ間で参照光の強度分布が異なる場合、参照光の定数項 ($B(x, y)^2$) を消去することができず、高さ誤差、半値全幅誤差が発生すると考える。特に参照光に対する物体光の強度比が小さい場合、残留した参照光の定数項が、物体光の強度より大きくなってしまうため、その影響は大きい。このため、ホモダイン位相検出法は、理想的な強度分布の場合にのみ、信号の増幅検出できることがわかった。

それに対して、時間微分位相検出法の場合には、同じカメラで検出した二つの信号強度の差動演算を行うため、カメラ間の信号強度ずれには影響しにくい。特にホモダイン位相検出法で残留していた参照光の定数項 ($B(x, y)^2$) を完全に消去できるため、図 4.12 のように参照光に対して物体光の強度比が小さくとも、安定した位相検出ができる特徴がある。

以上より、時間微分位相検出法は、参照光の強度ずれに対してロバスト性が高いことを実験で確認した。

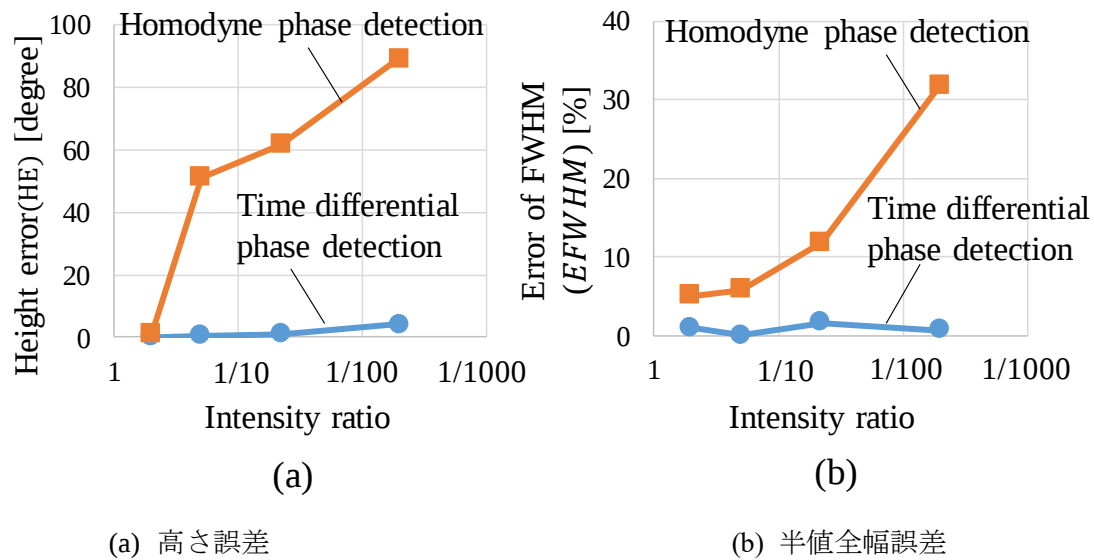


図 4.13 高さ誤差、半値全幅誤差の強度比依存性

4.4.2 位相ずれの影響

次に、外乱要因で発生する参照光の波面ずれに対するロバスト性について検証を行った。外乱要因として、例えば光学系の経時変化や空気の流れ、温度勾配等による波面ずれがある。

図 4.14 は、波面ずれを付加したときの復元位相を示している。(a)はホモダイン位相検出法、(b)は時間微分位相検出法を示している。なお、波面ずれは、図 4.4(a)の参照光学系のミラーを傾けて意図的に参照光に斜め方向のチルト収差 3.5λ (peak to valley) を付加した。図 4.14 より、ホモダイン位相検出法は正確な位相を検出できていないことがわかる。これは、ホモダイン位相検出法が、物体光と参照光の位相差を検出するためである。それに対し、時間微分位相検出法は、物体光の時間的な位相変化を検出するため、参照光には依存しにくい特性がある。このため、SLM で付加した帯状の復元位相が検出できていることがわかる。

図 4.15 は、時間微分位相検出法の高さ誤差、半値全幅誤差のチルト収差依存性を示している。ここで、(a)の縦軸は高さ誤差、(b)の縦軸は半値全幅誤差、(a)、(b)ともに横軸は参照光のチルト収差量 (peak to valley) を示している。チルト収差の影響で高さ誤差が 3.2 度まで増えたが、それでも精度は $1/100\lambda$ 以下なので、実用上は問題がないと考える。また、半値全幅誤差はほとんど変化していないと考える。このように、時間微分位相検出法は、参照光の大きな位相ずれに対して、ほとんど影響しないことを確認した。

以上より、時間微分位相検出法は、参照光の波面ずれに対してロバスト性が高いことを実験で確認した。

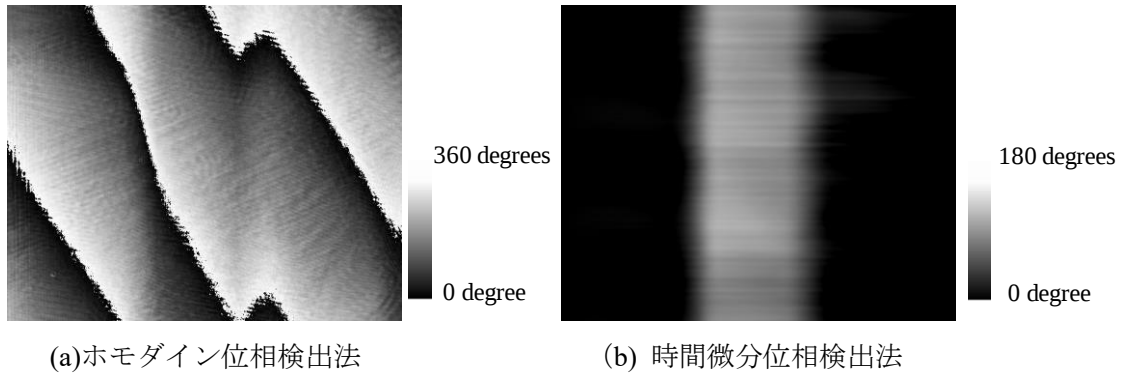


図 4.14 波面ずれの影響

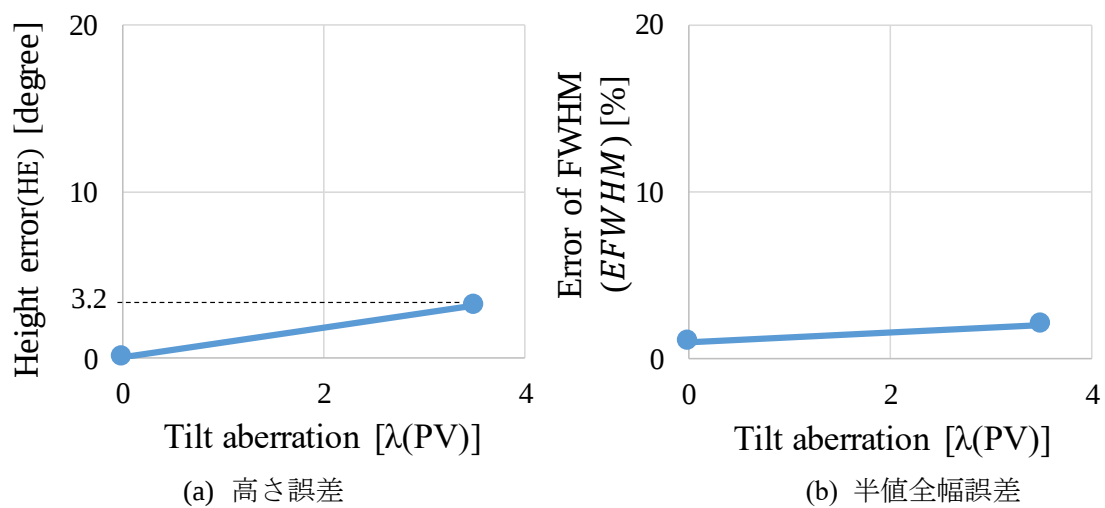


図 4.15 高さ誤差、半値全幅誤差のチルト収差依存性(時間微分位相検出法)

4.5 考察

上述したように、時間微分位相検出法は、ホモダイン位相検出法よりも強度ずれ、波面ずれに対してロバスト性が高いことを実験で確認した。また、参照光に対して物体光の強度が弱くても位相を復元できることを確認した。ここでは、実験結果に関する考察を解析計算、シミュレーションを用いて行う。また、時間微分位相検出法の効果や課題について、シミュレーションを用いて検討した。

4.5.1 光学部品による迷光の影響に関する検討

図 4.7 に示した参照光の強度分布は、干渉縞のように見える。これは、光学部品から不要な迷光がカメラに入射し、参照光と迷光が干渉したことにより、干渉縞が発生したと考えられる。例えば、シグマ光機の水晶波長板では透過率の仕様が 98.5%以上となっており、1～2%程度が迷光となることが考えられる。ここでは、光学部品から不要な迷光が発生したとして、時間微分位相検出法に与える影響について検討を行った。

図 4.16 は迷光計算のモデルである。ここでは、カメラ 2 に入射する物体光、参照光が HWP によって不要な迷光が発生したと仮定する。このとき、(4.5)式で示したカメラ 2 上の干渉光の電場 $E_2(x, y, t)$ は、

$$E_2(x, y, t) = \frac{1}{2\sqrt{2}} [A(x, y) \exp\{i\theta(x, y, t)\} + B(x, y) \exp\{i(\phi(x, y))\}] \{1 + \sqrt{r} \exp(i\mu)\} \quad (4.20)$$

と示せる。ここで r と μ は、迷光の効率と迷光の位相差を示している。本式は物体光、参照光ともに迷光が発生した場合を考慮した。そして、カメラ 2 で検出される物体光と参照光と迷光の干渉光の強度 $I_2(x, y, t)$ は、

$$I_2(x, y, t) = \frac{1}{8} \{1 + r + 2\sqrt{r} \cos(\mu)\} [A(x, y)^2 + B(x, y)^2 + 2A(x, y)B(x, y) \cos\{\theta(x, y, t) - \phi(x, y)\}] \quad (4.21)$$

となる。これは、(4.5)式に対して単純にカメラの検出強度が $\{1 + r + 2\sqrt{r} \cos(\mu)\}$ 倍されただけで示されることがわかる。ここで、時刻 T_n から時刻 T_{n+1} までのカメラ 2 の検出強度の変化は、

$$\begin{aligned} & I_2(x, y, T_n) - I_2(x, y, T_{n+1}) \\ &= -\frac{A(x, y)B(x, y)}{2} \{1 + r + 2\sqrt{r} \cos(\rho)\} \sin\left\{\frac{\theta(x, y, T_n) + \theta(x, y, T_{n+1})}{2} - \phi(x, y)\right\} \sin\left\{\frac{\theta(x, y, T_n) - \theta(x, y, T_{n+1})}{2}\right\} \end{aligned} \quad (4.22)$$

となる。このように、時間微分位相検出法では、迷光による検出強度の違いが発生しても定数項 $(A(x, y)^2, B(x, y)^2)$ をキャンセルできる。一方で、(4.22)式より、 $B(x, y)\{1 + r + 2\sqrt{r} \cos(\rho)\}$ を $B'(x, y)$ と書き換えることで、参照光の強度ずれとみなすことができる。

以上より、時間微分位相検出法は、光学部品の迷光に対してもロバスト性が高いことを確認した。

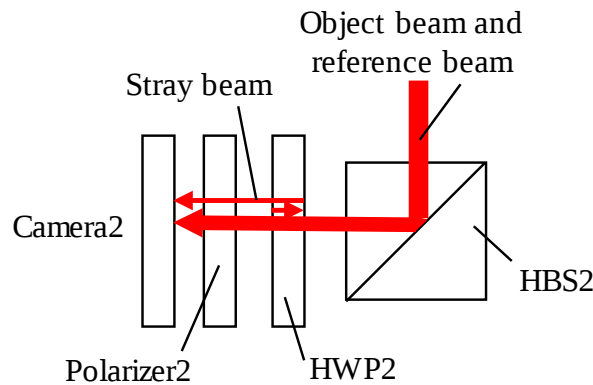


図 4.16 迷光計算モデル

4.5.2 線状の位相誤差に関する検討

図 4.17 は、時間微分位相検出法の復元位相を示している。4.3.2 項で時間微分位相検出法の位相検出原理を確認した。一方で、図中の矢印に示す、水平方向に線状の位相誤差を発生することがわかった。高精度の位相検出に向けては、この位相誤差の理由を明確にし、その対策が必須となる。

図 4.18 は、時間微分位相検出法のシミュレーション結果である。本計算では、参照光に対する物体光の強度比を $1/2$ とした。また、カメラノイズとして 40 dB のランダムノイズを考慮した。(a)は物体光と参照光の強度分布を一定とした場合、(b)は、物体光と参照光の強度分布を図 4.19 に示す強度分布とした場合を示している。図 4.18 より、強度分布が一定の場合には、線状の位相誤差が発生していない。それに対し、図 4.19 のような縞状の強度分布となると線状の位相誤差が発生していることがわかる。これは、(4.3)式、(4.5)式、(4.6)式、(4.7)式の位相項の $A(x,y)B(x,y)$ が影響していると言える。大きな位相誤差を発生させる主要因は、参照光の定数項 $(B(x,y)^2)$ であるが、位相項の $A(x,y)B(x,y)$ は少なからず影響する。さらに、(3.6)式で示した位相復元も影響していると考ええる。この位相復元は、水平方向に積分するため、例えば一画素だけ大きな位相差の誤差が生じた場合、その誤差は、その水平ライン上に影響が伝搬する。線状の位相誤差はこれらが影響していると考ええる。

通常の干渉計測の条件であれば、強度分布はほぼ均一なため、線状の位相誤差は発生しない。ただし、製造ラインに適用する場合には、カメラ感度のずれ、ほこり、汚れに伴うカメラ間の検出強度ずれが発生する可能性があり、その場合には、この線状の位相誤差の発生が懸念される。そこで、線状の位相誤差を低減するため、空間フィルタを用いる検討を行った。図 4.20 は 3 行 3 列のフィルタ処理を行った結果である。ここでは、検出位相に対してフィルタ処理を行った。そして、フィルタには、単純な平均化フィルタとメディアンフィルタを用いた。メディアンフィルタは画像を平滑化することなく、画像のエッジ部分を残してノイズ除去ができる特徴があることから適用の検討を行った。

図 4.20 より、フィルタなしに対してフィルタをかけることで、誤差のピークを低減できることがわかった。そして、平均化フィルタよりも、メディアンフィルタの方がノイズが小さくなっていることがわかった。フィルタをかけると画像分解能が低下することが懸念されるため、適用するアプリケーションごとに最適化する必要がある。

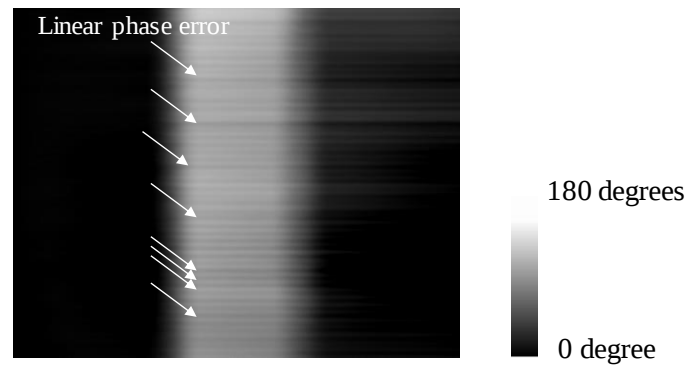


図 4.17 時間位相微分検出法の測定結果



(a) 物体光・参照光の強度分布一定 (b) 物体光・参照光の強度分布ずれ

図 4.18 時間微分位相検出法シミュレーション結果

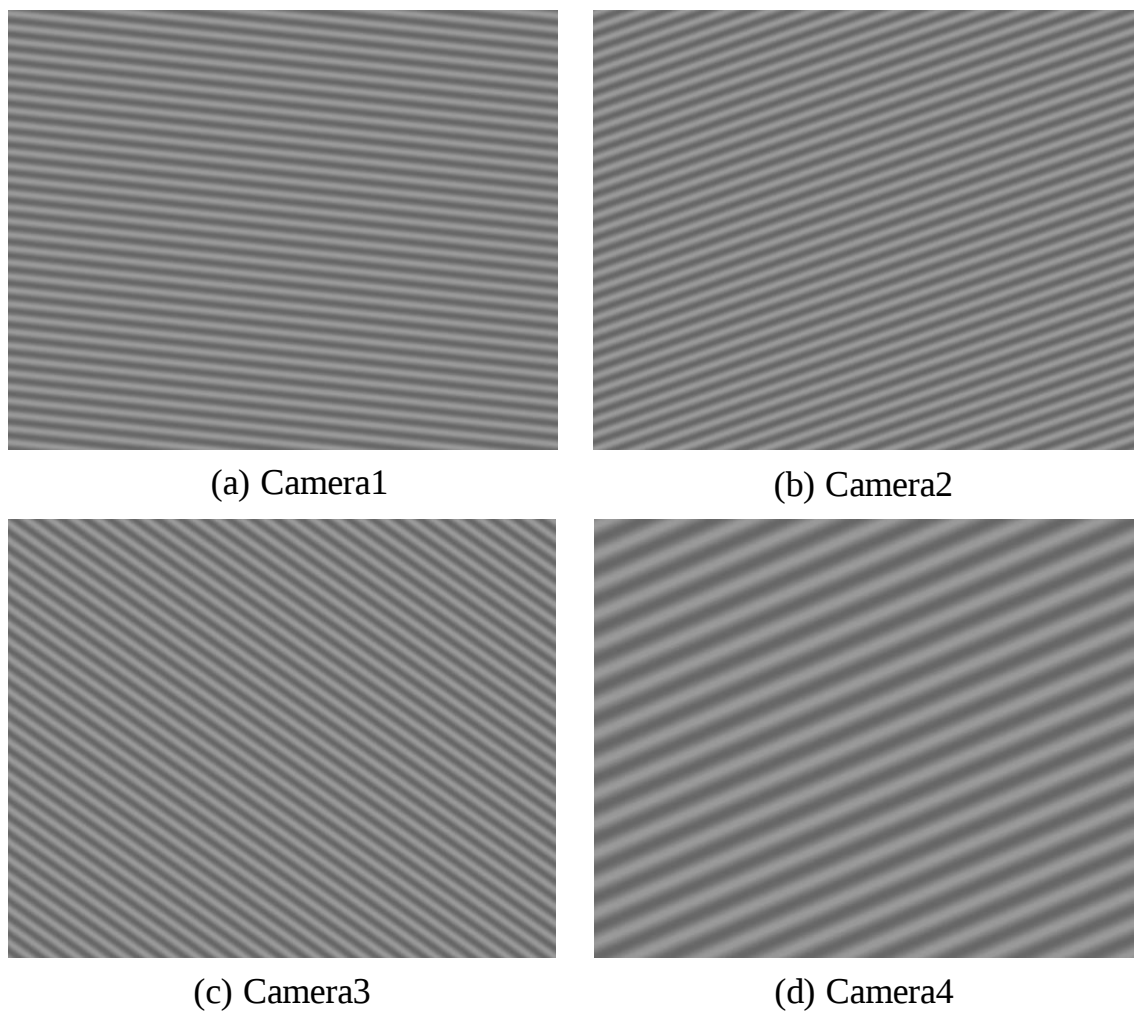


図 4.19 シミュレーション条件 参照光強度分布

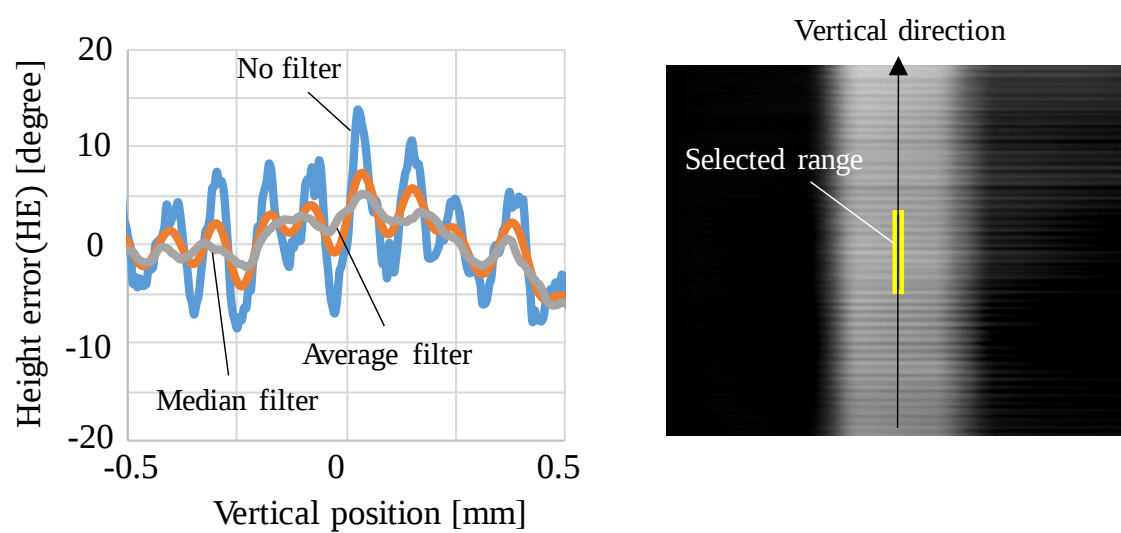


図 4.20 フィルタ適用の結果

4.5.3 測定対象物の効率分布に関する検討

時間微分位相検出法では、物体光の強度は時間で変化しないと仮定した。例えば、半導体ウェハのような平面の変化の高さ揺らぎや傾斜の緩い形状については、物体光の強度ほとんど変化しない。この場合、同じカメラで検出した2つの信号強度の差動演算は、物体光、参照光の定数項をともに消去可能である。一方で、急峻な傾きの形状については、物体光の強度が変化することが考えられる。この場合、物体光の強度が時間的に変化するため、測定結果に影響することが懸念される。そこで、物体光の強度低下の影響についてシミュレーション検討を行った。

図 4.21 は、測定対象物のシミュレーションモデルを示している。(a)は位相、(b)は効率を示している。測定対象物の位相が変化する領域で効率が低下すると仮定した。ここでは、位相が変化しない領域の効率を 100%、位相が変化する領域の効率を R_s としてシミュレーション検討を行った。

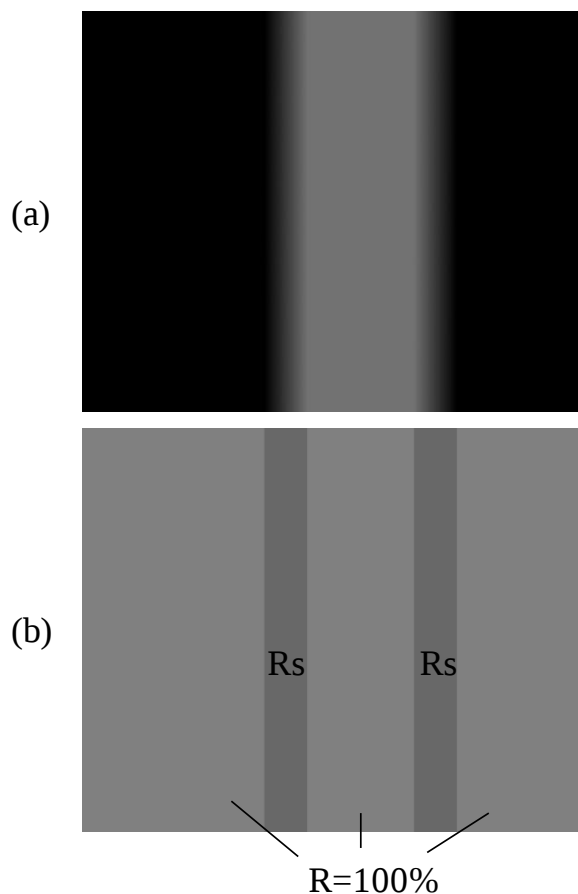


図 4.21 測定対象物のシミュレーションモデル
(a) 位相、(b)反射率

図 4.22 は、高さ誤差の測定対象物位相依存性のシミュレーション結果である。本計算では、参照光に対する物体光の強度比を $1/100$ とした。縦軸は高さ誤差、横軸は測定対象物の位相を示している。なお、各線は測定対象物の効率の違いを示している。ここでは、物体光の強度変化以外の条件は 4.5.2 項と同じ条件とした。そして、半導体レーザーの波長 405nm で 10nm の構造物を位相を測定するとし、最小の位相を 8.9 度とした。

まず、本図で効率 100% で高さ誤差が発生しているのは、参照光の強度分布とカメラノイズの影響である。そして、そこからの変化が物体光の強度変化の影響を示しており、測定対象物の効率 R_s が小さくなるに伴って、高さ誤差が大きくなることがわかった。

図 4.23 は、測定対象物が位相 8.9 度の際の位相誤差の効率依存性を示している。縦軸は高さ誤差、横軸は測定対象物の位相 R_s を示している。本図より、測定精度 $1/100\lambda$ を実現するには、効率 R_s は 87% 以上でなければならないことがわかった。

以上の検討により、測定対象物の位相が変化しない領域に対する位相が変化する領域の効率 87% 以上であれば、測定精度 $1/100\lambda$ を実現できることがわかった。一方で、測定対象物によっては複雑な効率の分布が存在する可能性もある。この課題については例えば、物体光の強度を検出し、その強度情報により補正することが考えられる。ただし、微弱光の検出の観点から増幅検出との兼ね合いとなるため、測定対象物に合わせた最適化が必要となると考える。

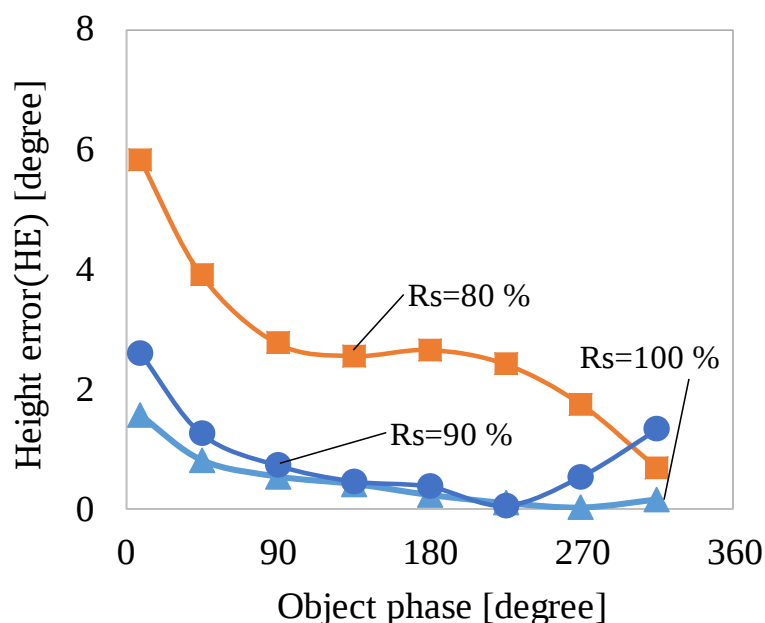


図 4.22 高さ誤差の測定対象物位相依存性

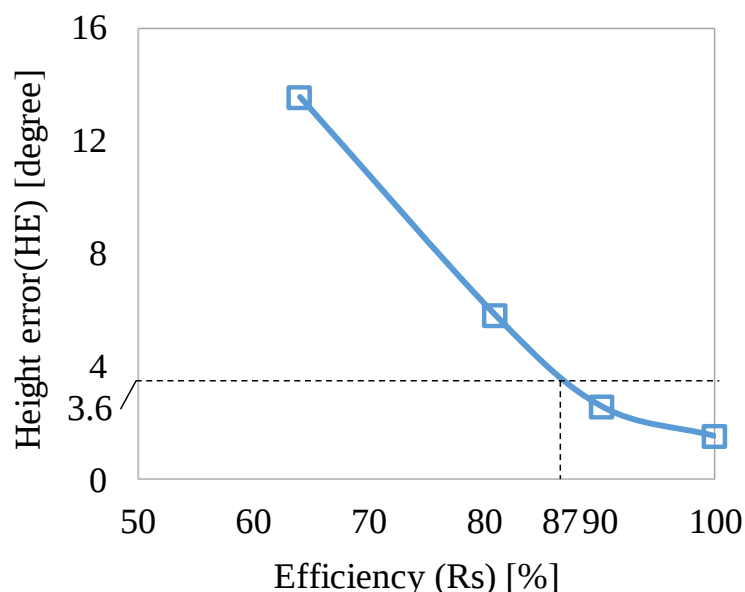


図 4.23 位相誤差の効率依存性(測定対象物の位相 8.9 度)

4.5.4 測定対象物の移動方向のずれに関する検討

時間微分位相検出法では、測定対象物が水平方向に移動することを仮定している。製造ラインに適用する場合、ラインの振動などにより測定対象物が移動に対して垂直方向への変位が発生する可能性がある。そこで、本検討ではこの垂直方向の変位について検討を行った。図 4.24 は、長方形の形状の測定対象物が垂直方向に変位したときの検出位相と復元位相のシミュレーション結果である。なお、ここでは図 4.4(b)に示す位相パターンを垂直方向に縮めた条件である。そして、上側は垂直方向の変位(Δd)が無い場合、下側は 2 回の測定の間に垂直方向に 10 画素変位した場合を示している。この条件の場合、測定対象物の垂直方向の中心領域は、2 回の測定で位相の違いが見れないことから影響しないことがわかった。一方で上下のエッジ部では検出位相の矢印のように、極端な位相差が検出されることがわかった。これに伴い、復元位相の上下のエッジ部での位相が大きく変化することがわかった。これより、垂直方向の位相変化が小さい測定対象物に対しては、垂直方向の変位の影響が小さいことがわかった。一方で、垂直方向に位相変化が変化する測定対象物には影響が大きいと考えられる。そこで、垂直方向に位相変化が大きい測定対象物について検討を行った。

図 4.25 は、45 度回転した正方形の形状の測定対象物が垂直方向に変位したときの検出位相と復元位相のシミュレーション結果である。上側は垂直方向の変位が無い場合、下側は 2 回の測定の間に垂直方向に 10 画素変位した場合を示している。この条件の場合、測定対象物が 10 画素ずれると検出位相の垂直方向の対称性が無くなる。このため、復元位相の垂直方向に位相差が発生する。そして、測定対象物を超えても、その位相がゼロに戻らないため、オフセット位相が発生してしまう。ここでは、垂直方向に位相差が発生することが課題とな

ると考え、シミュレーションで定量評価を行った。

図 4.26 は、位相誤差の評価方法を示している。(a)は(b)に示す黒枠部の復元位相を示している。本図より、位相は垂直方向に 2 つに分離していることがわかる。図 4.11 に示した評価方法では、2 つの位相の平均となり、高さ誤差が発生しないため、ここでは垂直方向の変位が無い条件からの変化量を高さ誤差と定義した。図 4.27 は、高さ誤差の変位量依存性を示している。縦軸は高さ誤差、横軸は垂直方向の変位量を示している。本図より、垂直方向の変位に伴って、高さ誤差が発生することがわかる。そして、測定精度 $1/100\lambda$ を実現するには、垂直方向の許容変位量は 2 画素であることがわかった。

図 4.28 は、高さ誤差の測定対象物の位相依存性を示している。縦軸は高さ誤差、横軸は測定対象物の位相を示している。ここでは、垂直方向の変位量を 2 画素とした。本図より、測定対象物の位相に応じて高さ誤差が変化したが、測定精度は $1/100\lambda$ 程度となることがわかった。

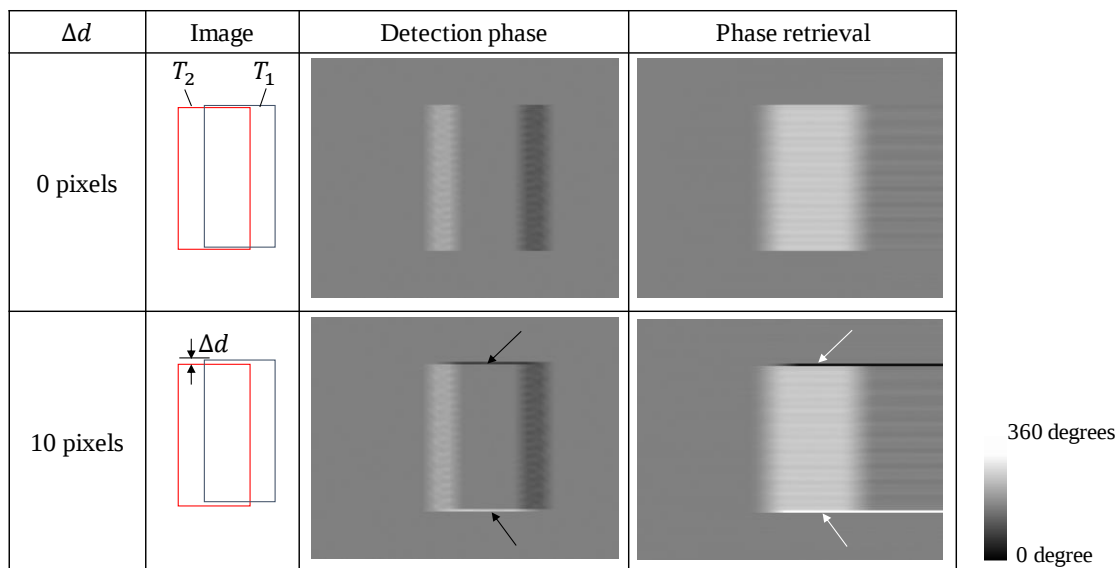


図 4.24 垂直方向変位の影響(長方形 0 度配置)

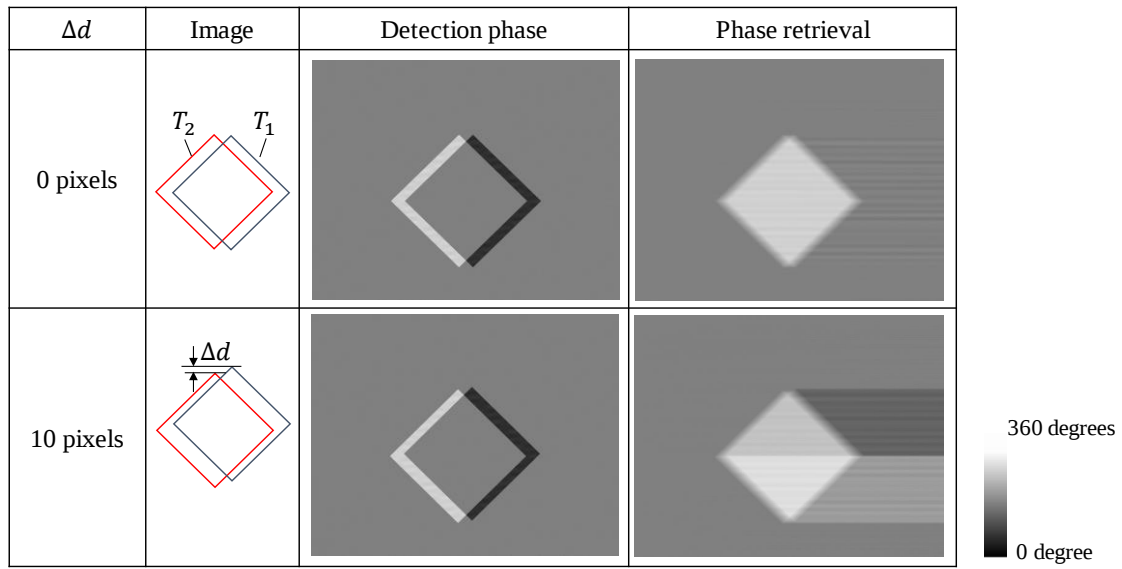
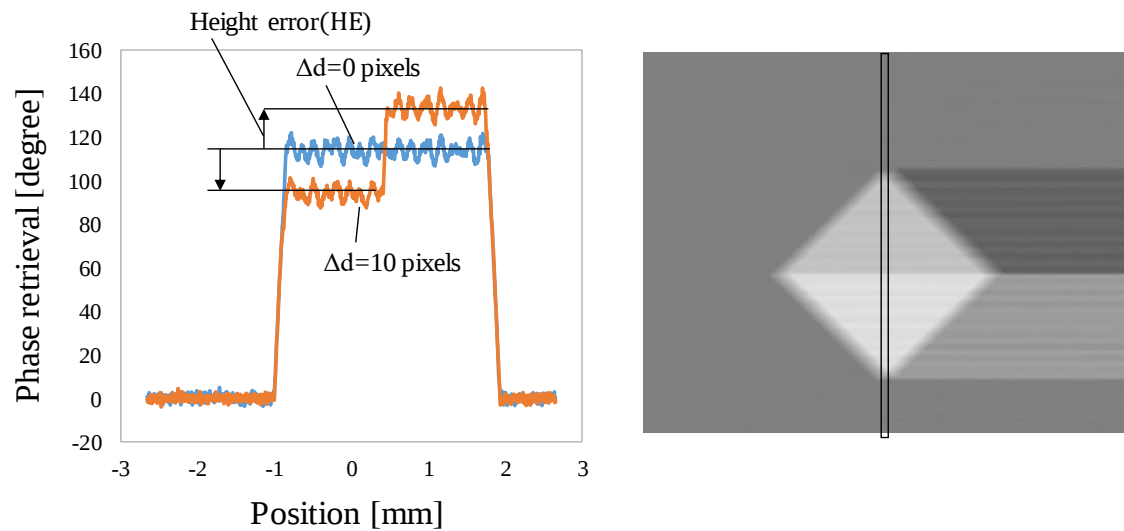


図 4.25 垂直方向変位の影響(正方形 45 度配置)



(a) 復元位相(1 列)

(b) 再生位相画像

図 4.26 高さ誤差の評価方法

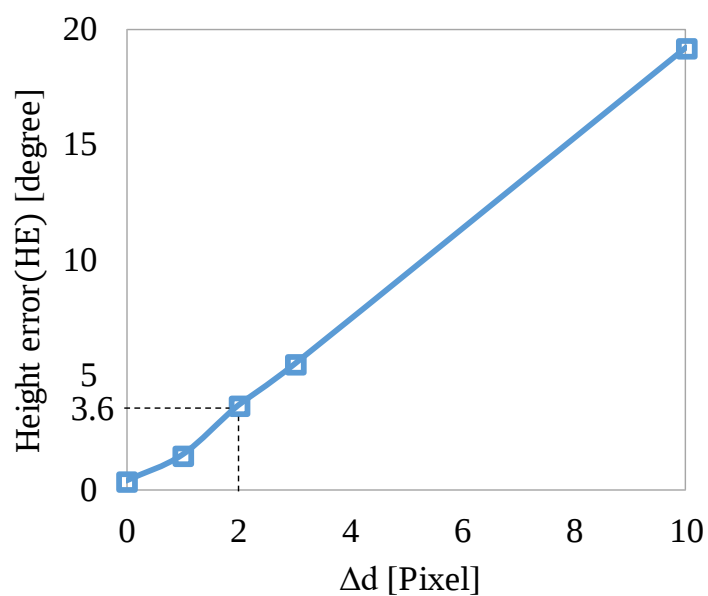


図 4.27 高さ誤差の変位量依存性

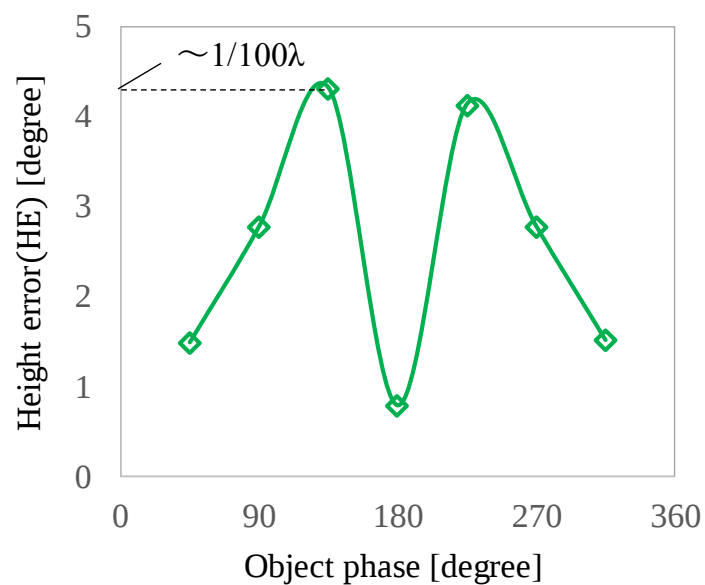


図 4.28 高さ誤差の測定対象物の位相依存性

次に他の測定対象物の形状について検討を行った。図 4.29 は、円形の形状の測定対象物が垂直方向に変位したときの検出位相と復元位相のシミュレーション結果である。上側は垂直方向の変位が無い場合、下側は 2 回の測定の間に垂直方向に 10 画素変位した場合を示している。図 4.25 と同様に、測定対象物が 10 画素ずれると検出位相の垂直方向の対称性が

無くなるため、復元位相に位相差が発生する。45 度回転した正方形と異なるのは、エッジ部に位相誤差が大きく発生する点ある。図 4.30 は、高さ誤差を求めた結果である。(a)は(b)に示す黒枠部の復元位相を示している。ここでは、垂直方向の変位を 2 画素とした。本図より、円形の形状の場合には、垂直方向のエッジに大きな位相誤差が発生することがわかった。ただし、垂直方向の変位が 2 画素の場合には、高さ誤差は 3.0 度であり、測定精度 $1/100\lambda$ を満たせる目途を得た。

以上の検討より、製造ラインの振動などによる測定対象物の垂直方向への変位の影響について検討を行い、測定間の垂直方向の変位量を 2 画素以下にする必要があることがわかった。水平方向の移動量が 58 画素なので、測定対象物の移動方向が水平方向に対して 2 度以下が許容値となる。例えば、半導体検査では、ウェハを高精度に回転しているため、このような課題はないが、通常のライン検査を想定すると、垂直方向の変位に対する管理が必要となることが懸念される。

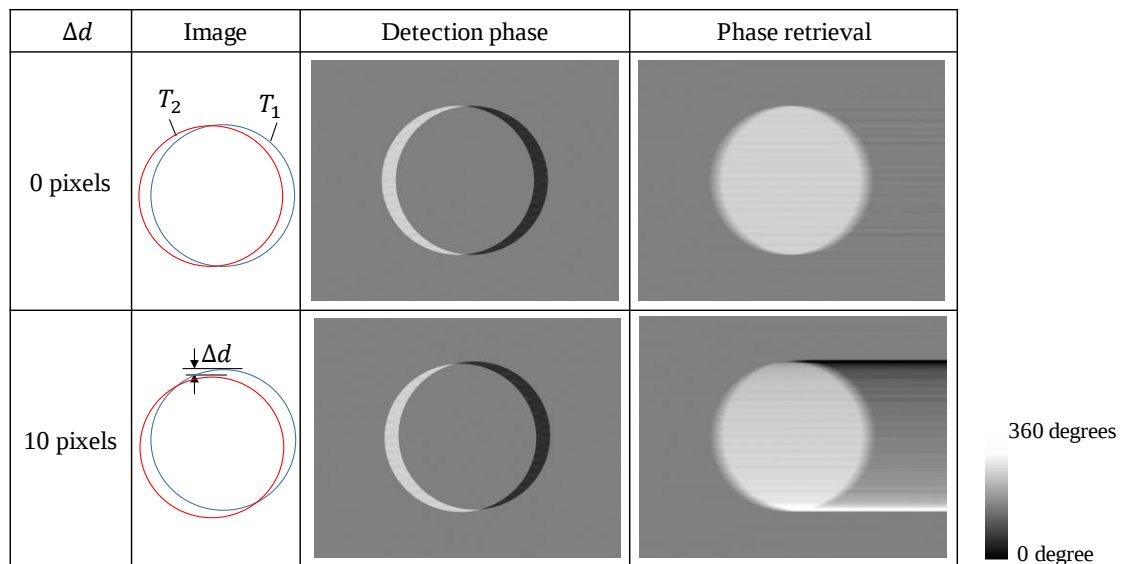


図 4.29 垂直方向変位の影響(円)

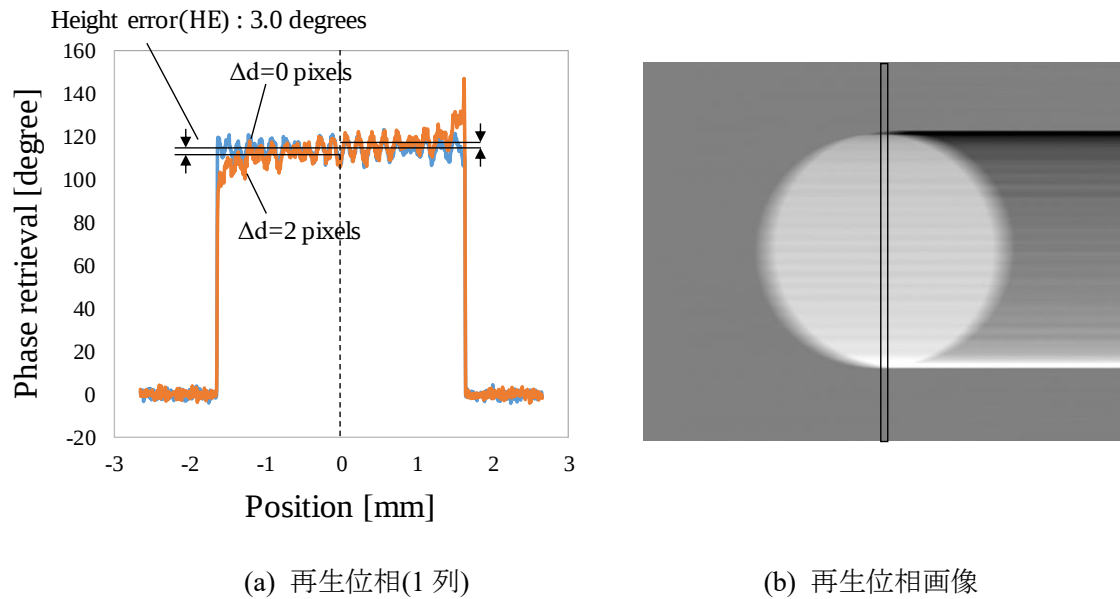


図 4.30 高さ誤差

4.5.5 位相シフト他方式との比較

2.2.1 項で説明したように、位相シフト法にはホモダイン位相検出法とは異なる位相検出方式が提案されている。その中で、強度ずれに対してロバストな方式は、複数画素を用いて 1 つの位相を求める並列位相シフト法である[28-30]。図 4.31 は、並列位相シフト法の光学系を示す。並列位相シフト法は、位相シフトアレイとカメラから位相検出光学系が構成されている。図 4.32 は位相シフトアレイの構成を示す。位相シフトアレイは、カメラの画素と同じだけ分割された位相板となっており、4 領域で 1 組となっている。4 領域は、物体光と参照光の相対位相を 0 度、90 度、180 度、270 度ずらす(位相シフト)。そしてカメラによって検出された強度信号を、図 4.33 のように位相シフト量ごとに抽出し、位相シフト法の演算を行う。図 4.34 は復元位相の画素を示している。灰色の線は実際の画素、黒の線は位相を検出した画素を示している。並列位相シフト法は、カメラの 4 画素で 1 つの位相成分を生成するため、分解能が低下することが課題となる。一方で、ホモダイン位相シフト法や時間微分位相検出法に対して光学系構成が簡素化できる利点がある。そして、ホモダイン位相シフト法の場合には、カメラ間の差動信号を演算していたが、並列位相シフト法は、隣接画素の差動信号を演算するので、強度分布ずれに対してロバスト性が高いと考えられる。本検討では、並列位相シフト法と時間微分位相検出法の強度ずれに対するロバスト性を比較した。

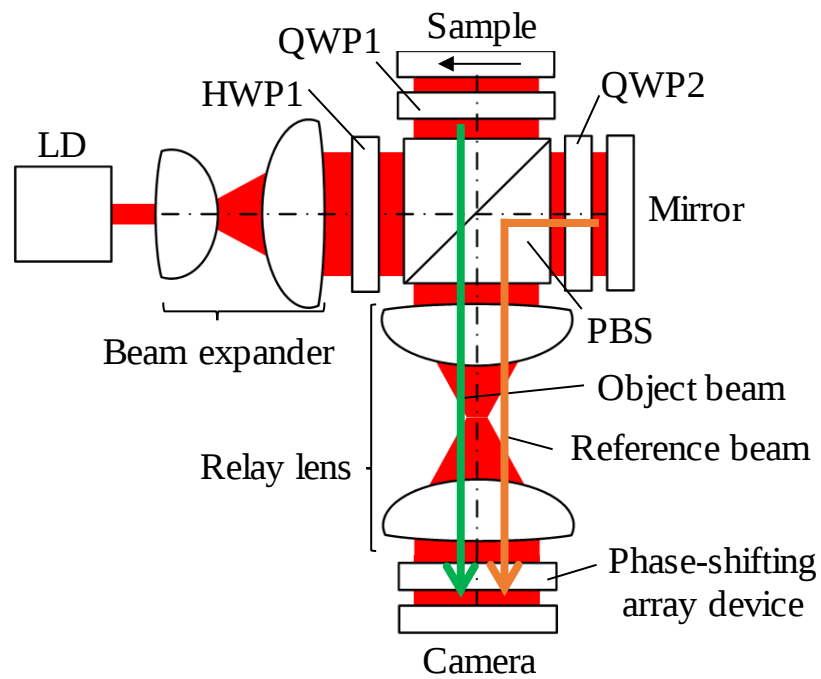


図 4.31 並列位相シフト法光学系

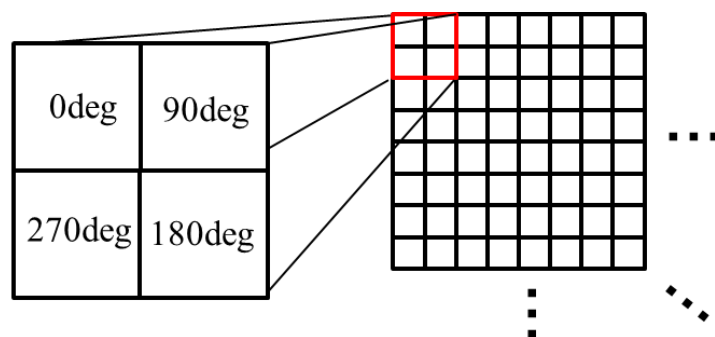


図 4.32 位相シフトアレイの構成

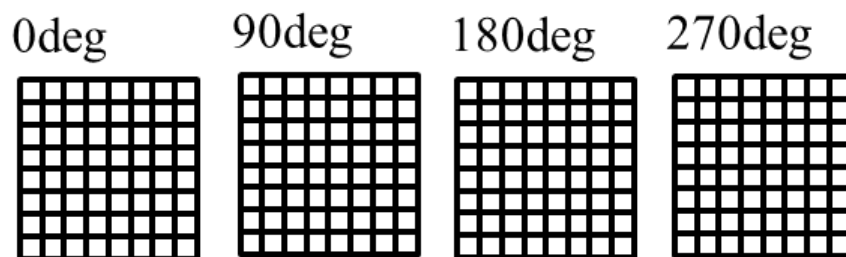


図 4.33 位相シフトごとに抽出

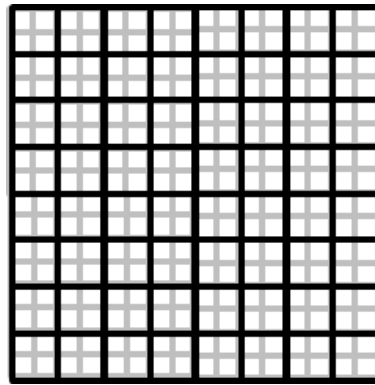


図 4.34 復元位相の画素

図 4.35、図 4.36 は参照光の強度分布のシミュレーション条件である。図 4.35 は時間微分位相検出法、図 4.36 は並列位相シフト法を示している。ここで並列位相シフト法は、図 4.35 の時間微分位相検出法のカメラ 1 の参照光強度分布を 4 つに分割した。並列位相シフト法では、図 4.36 の強度分布を用いて計算を行った。

図 4.37 は、高さ誤差の強度比依存性のシミュレーション結果を示している。縦軸は高さ誤差、横軸は参照光に対する物体光の強度比を示している。本図より、参照光に対する物体光の強度比が大きい場合には、並列位相シフト法の方が高さ誤差が小さいことがわかる。一方で、強度比が小さい場合には、時間微分位相検出法の方が高さ誤差が小さいことがわかる。これは、並列位相シフト法は隣接画素の差動信号を演算するため、強度ずれの影響が小さいが、強度比が大きくなると隣接画素間の強度ずれが無視できなくなったと言える。このため、並列位相シフト法は、画素の感度ずれや画素欠陥、微小なほこり、汚れなどの高周波の強度変化の影響が課題となる。

一方で強度比が小さい条件で時間微分位相検出法よりも、並列位相シフト法の方が高精度に検出できることがわかった。そこで、本検討では、時間微分位相検出法を改良した、並列時間微分位相検出法について検討を行った。図 4.38 は並列時間微分位相検出法の検出信号を示している。時間微分位相検出法は 4 つの領域で検出した 8 つの検出信号を用いる。(4.4)式、(4.8)式、(4.9)式、(4.10)式を、

$$I_1(x, y, T_n) - I_1(x, y, T_{n+1}) = \textcircled{2} - \textcircled{6} \quad (4.23)$$

$$I_2(x, y, T_n) - I_2(x, y, T_{n+1}) = \textcircled{1} - \textcircled{5} \quad (4.24)$$

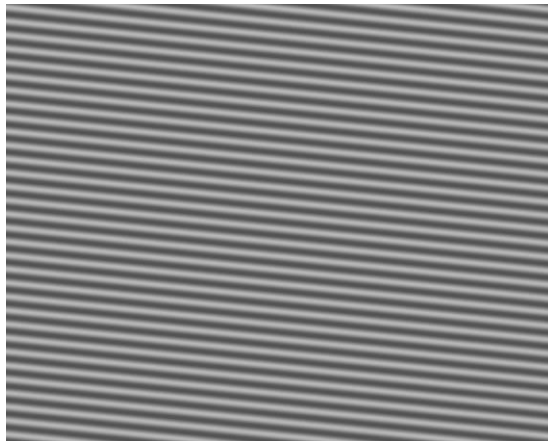
$$I_3(x, y, T_n) - I_3(x, y, T_{n+1}) = \textcircled{2} - \textcircled{7} \quad (4.25)$$

$$I_4(x, y, T_n) - I_4(x, y, T_{n+1}) = \textcircled{1} - \textcircled{8} \quad (4.26)$$

とすることで時間微分位相検出法と同じ信号成分が検出可能となる。

図 4.39 は、高さ誤差の強度比依存性のシミュレーション結果を示している。縦軸は高さ

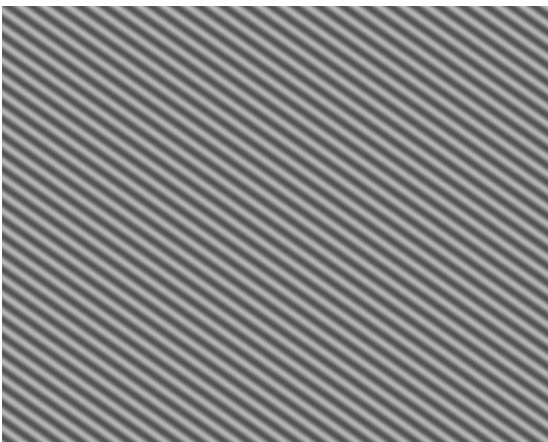
誤差、横軸は参照光に対する物体光の強度比を示している。本図より、並列時間微分位相検出法は、強度比が小さい場合であっても並列位相シフト法よりも高さ誤差が小さくできることがわかった。ただし、並列時間微分位相検出法は並列位相シフト法と同様に分解能が低下することが課題がある。



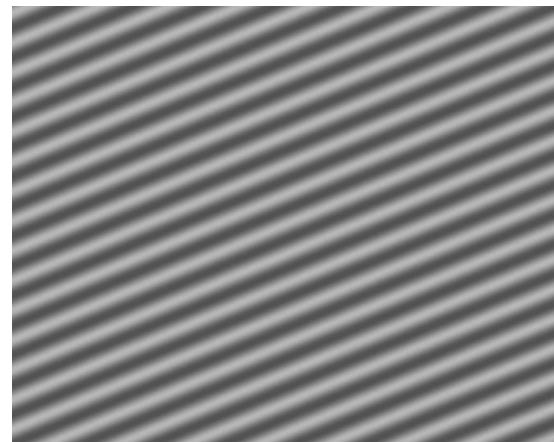
(a) Camera1



(b) Camera2



(c) Camera3



(d) Camera4

図 4.35 シミュレーション条件(時間微分位相検出法) 参照光強度分布

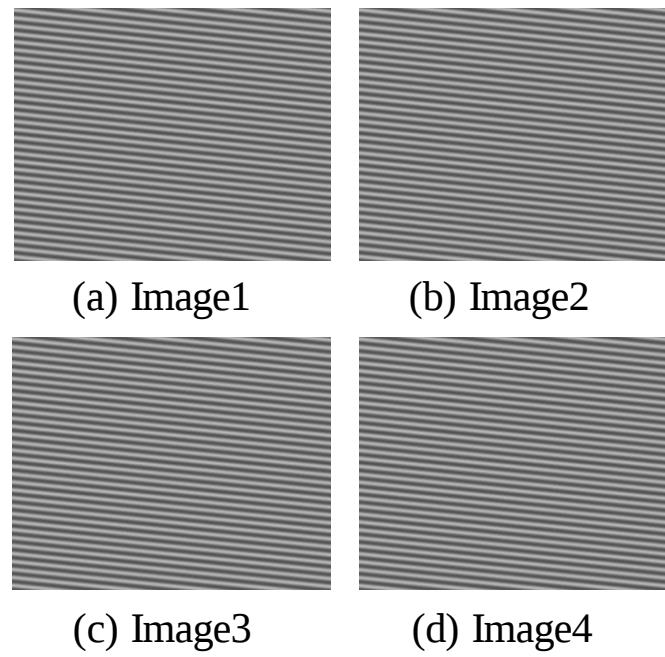


図 4.36 シミュレーション条件(並列位相シフト法) 参照光強度分布

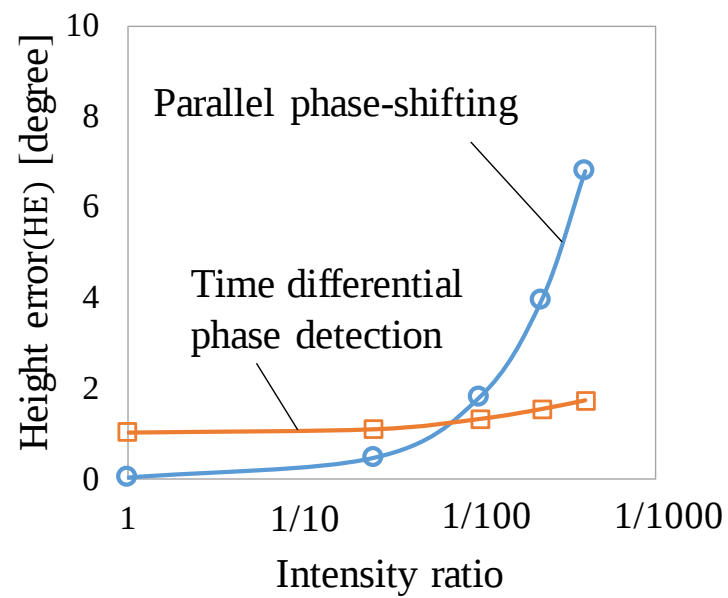


図 4.37 高さ誤差の強度比依存性

T_1	① 0deg	② 90deg
	③ 270deg	④ 180deg

T_2	⑤ 0deg	⑥ 90deg
	⑦ 270deg	⑧ 180deg

図 4.38 並列時間微分位相検出法の検出信号

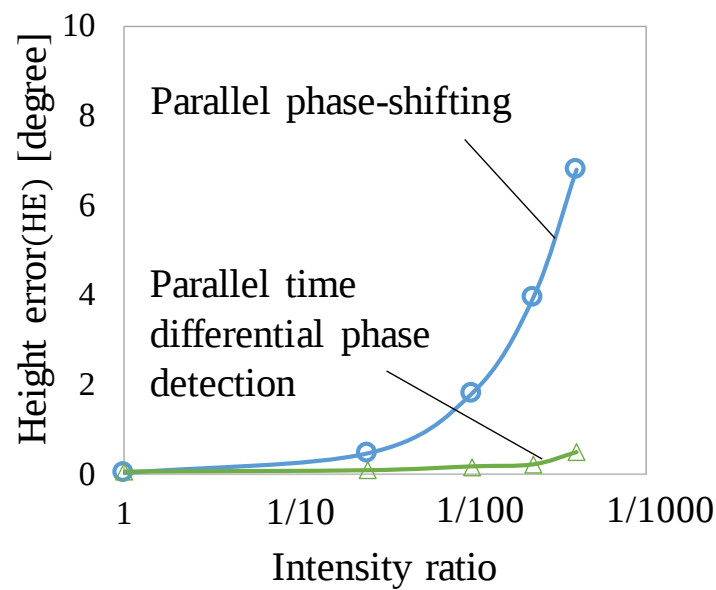


図 4.39 高さ誤差の強度比依存性

4.6 まとめ

本章では、製造ライン検査の干渉計測法として、時間微分位相検出法を新たに提案した。時間微分位相検出法は、測定対象物の位相の時間変化を検出する。そして、従来のホモダイン位相検出法と同様に 4 つのカメラを用いることでリアルタイムの位相検出を実現した。ホモダイン位相検出法では、カメラ間の検出信号の強度の差動演算を用いて、物体光と参照光の位相差を検出する。このため、ホモダイン位相検出法はカメラの感度ずれ、ほこり、汚れなどによるカメラ間の検出信号の強度ずれの影響を強く受ける。また、物体光、参照光の波面ずれの影響を受ける。

これに対し、時間微分位相検出法は、同じカメラで検出した時間の異なる 2 つの検出信号の強度の差動演算を用いるため、強度ずれの影響は大幅に低減される。また、本検出法は製

造ラインで移動する測定対象物の位相の時間変化のみを検出するため、物体光、参照光の波面ずれに影響しない。さらに、干渉効果を利用することで微弱光の検出も可能である。

一方で、時間微分位相検出法は、物体光の位相の時間変化なので、ホモダイン位相検出法と同様の位相情報を得るには、位相復元が必要となる。本検討では、位相の復元を行うことで時間微分位相検出法が、ホモダイン位相検出法と同様の位相成分となることを実験で確認した。また、ホモダイン位相検出法では検出が困難な強度ずれ、波面ずれ(チルト収差 $(3.5\lambda(\text{peak to valley}))$)の条件でも微弱光(参照光に対する物体光の光量 $1/200$)から高精度な位相情報が得られることを実験で確認した。

そして、時間微分位相検出法の課題について2つ検討を行った。測定対象物の効率分布に伴う高さ誤差に関して検討を行った。本検討により、測定対象物の位相が変化しない領域に対する位相が変化する領域の効率が87%以上であれば、測定精度 $1/100\lambda$ を実現できることがわかった。一方で、測定対象物によっては複雑な効率分布が存在する可能性もある。この課題については例えば、物体光の強度を検出し、その強度情報により補正することが考えられる。ただし、微弱光の検出の観点から増幅検出との兼ね合いとなるため、測定対象物に合わせた最適化が必要となると考える。

また、ラインの振動などによる測定対象物の垂直方向への変位の影響について検討を行い、測定間の垂直方向の変位量を2画素以下にする必要があることがわかった。水平方向の移動量が58画素なので、測定対象物の移動方向が水平方向に対して2度以下が許容値となる。例えば、半導体検査では、ウェハを高精度に回転しているため、このような課題はないが、通常のライン検査を想定すると、垂直方向の変位に対する管理が必要となることが懸念される。

以上の検討より、測定対象物は限定されるが、強度ずれ、波面ずれに対してロバスト性が高く、微弱な物体光も検出可能な位相検出方式の実現の目途を得た。

第 5 章 ホログラフィックメモリのページ間差動位相検出法の検討

5.1 はじめに

本章では、位相変調型ホログラフィックメモリのページ間の位相信号の差を検出するページ間差動位相検出法を新たに提案する。ここでは、ページ間の再生光の強度変化に対するロバスト性を向上するための記録する位相の最適化について説明する。さらに、ページ間差動位相検出法を用いた位相 4 値記録の可能性を示す。

5.2 位相変調型ホログラフィックメモリ

ホログラフィックメモリは、2 次元のデータを記録媒体に 3 次元的に多重記録を行うことで、大容量化を実現できる[45-47]。さらに 2 次元のデータを記録再生するため、従来の光ディスクに比べ、高転送レートを実現できる特徴がある。2 次元データを用いたホログラフィックメモリの多重記録方式には信号光と参照光を同軸上に配置するシフト多重方式[48-51]と、参照光のディスク入射角度を変化させて多重記録を行う角度多重方式がある[52-56]。

シフト多重方式は、記録媒体内の光スポット位置を空間的にわずかにずらして記録再生を行なう記録方式である。本方式は、対物レンズの内側に信号光、外側に参照光を配置し、記録媒体に照射する記録方式であり、信号光と参照光が共に収束光となっているため、光スポット位置を空間的にわずかにずらすことで次の記録が行える特徴がある。一方、角度多重方式は信号光に対する参照光の入射角度をずらして記録再生を行なう記録方式である。本方式は、参照光の入射角度を変えるだけで同一位置に多重記録できる特徴がある。シフト多重方式は、フーリエ面近傍でしか信号光と参照光の干渉が発生しない。それに対し、角度多重方式は記録媒体の厚み方向全てで干渉させるため、記録密度の観点で優れていると考える。

さらに近年、2 次元情報を多値化し、位相を記録する位相変調型ホログラフィックメモリの研究が行われている[7-9]。位相変調型ホログラフィックメモリは強度変調型ホログラフ

ィックメモリよりも信号を多値化しやすいという特徴がある。ただし、位相信号はカメラで直接検出することができないので、干渉計測法を用いて位相信号の検出が行われる。従来、位相変調型ホログラフィックメモリの位相信号検出にはホモダイン位相検出が用いられてきた[27, 57]。一方で、3章で検討したようにホモダイン位相検出は、強度ずれ、波面ずれ、微弱光の検出に対して課題がある。

本章では、このような課題から 4 章で説明した時間微分位相検出を位相変調型ホログラフィックメモリに適用するとともに新しい記録再生方式を提案する。

5.3 ページ差動位相検出法の原理

5.3.1 光学系

図 5.1 は、位相変調型ホログラフィックメモリの角度多重方式の記録再生光学系を示している。まず、記録方法について説明を行う。本光学系では、ディスク内の記録媒体の温度変化等に伴う媒体の膨張／収縮を補償するため、ECLD (External Cavity Laser Diode)を光源としている[58, 59]。ECLD から出射した光ビームは、ビームエキスパンダ 1、HWP1 を経て、PBS1 に入射する。HWP1 は、記録と再生に応じて出射後の光ビームの偏光状態を変え、P 偏光と S 偏光の比率を制御する。記録時、HWP1 からの透過光を P 偏光と S 偏光の両方を含む偏光とすることで、PBS1 にて光ビームを信号光と参照光の 2 つの光路に分岐する。信号光はビームエキスパンダ 2、HWP2、リレーレンズ 1、PBS2、QWP を経て、位相変調型の SLM に入射する。SLM は記録する 2 次元ページデータに従って信号光に位相情報を重畳する。そして、SLM を反射した信号光は再度 QWP を透過し、S 偏光に変換される。QWP を出射した信号光は、PBS2 を反射し、リレーレンズ 2 内に配置されたポリトピックフィルタ、HWP3 を経て、対物レンズ[60]により記録媒体に照射される。ポリトピックフィルタは、記録時に隣接する記録領域への無駄な露光を防ぐため、所定の周波数の光のみを透過させる光学素子である。また、再生時には、隣接する記録領域からの不要な光を遮光する役割も有している[54]。

一方、PBS1 を反射した参照光は、ガルバノミラー1 を経て、スキャナレンズに入射する。スキャナレンズは、記録媒体への参照光の入射角度を可変にするレンズであり、図 5.1 の矢印のようにガルバノミラー1 を回転することで、記録媒体に入射する参照光の入射角度を変えることができる。スキャナレンズを出射した参照光は、信号光と同じ位置に照射され、記録媒体内で干渉縞が生じる。ホログラフィックメモリシステムでは、この干渉縞をホログラムとして記録媒体に記録する。次に SLM の 2 次元の位相情報を変えると同時に、ガルバノミラー1 を用いて記録媒体への参照光の入射角度を変えることで角度多重記録を実現する。このとき、2 次元の記録データをページと呼び、角度多重記録を行った記録媒体内の領域を

ブックと呼ぶ。ブック内に所定数のページを記録した後、記録媒体を移動させることで、新たな記録を行う。この記録動作を繰り返すことにより、記録媒体全面に記録ができる。

次に、再生方法について説明を行う。図 5.2 は再生時の光路を示した図である。再生時、HWP1 からの透過光を P 偏光と S 偏光の両方を含む偏光とすることで、PBS1 にて、光ビームをオシレータ光とプローブ光の 2 つの光路に分岐する。PBS1 を透過したオシレータ光はビームエキスパンダ 2、HWP2、リレーレンズ 1 を経て、PBS2 に入射する。再生時、HWP2 は P 偏光を S 偏光に変換するため、オシレータ光は PBS2 を反射し、リレーレンズ 3 を経て位相検出光学系に入射する。

一方、PBS1 を反射したプローブ光は、ガルバノミラー 1、スキャナレンズ、記録媒体を経て、ガルバノミラー 2 を反射する。ガルバノミラー 2 は、ガルバノミラー 1 と同期がとられており、ガルバノミラー 2 は、入射したプローブ光を垂直に反射することができる。そして、ガルバノミラー 2 を反射したプローブ光は、記録媒体内のホログラムに照射される。これにより、対物レンズ側にホログラムからの回折光が再生光として発生する。この再生光は、対物レンズ、HWP3、ポリトピックフィルタを含むリレーレンズ 2、PBS2、リレーレンズ 3 を経て位相検出光学系に入射する。ここで、リレーレンズ 3 は、PBS2 後に結像される再生像をカメラに結像させるために配置している。

位相検出光学系では、再生光とオシレータ光の干渉強度をカメラで検出し、再生位相信号を生成する。図 5.3 は、ページ間位相差分位相検出法の光学系である。なお、位相検出光学の構成は、図 4.2 の時間微分位相検出法の光学系と同じ構成である。

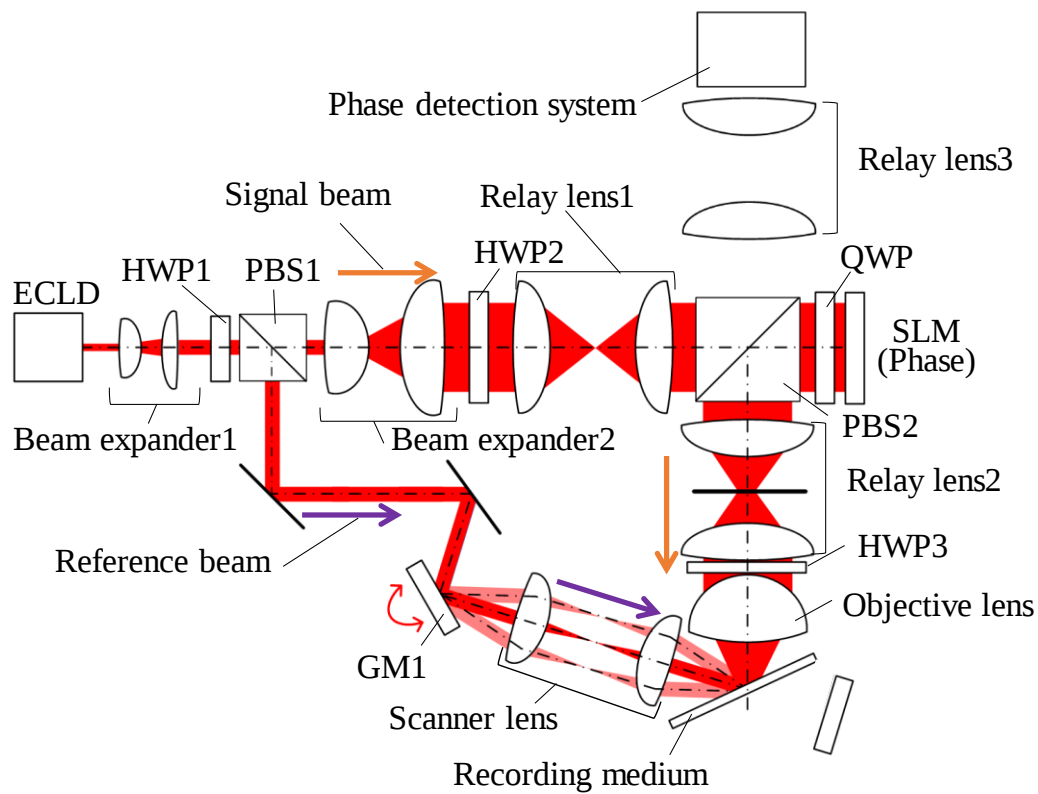


図 5.1 位相変調型ホログラフィックメモリ光学系(記録時)

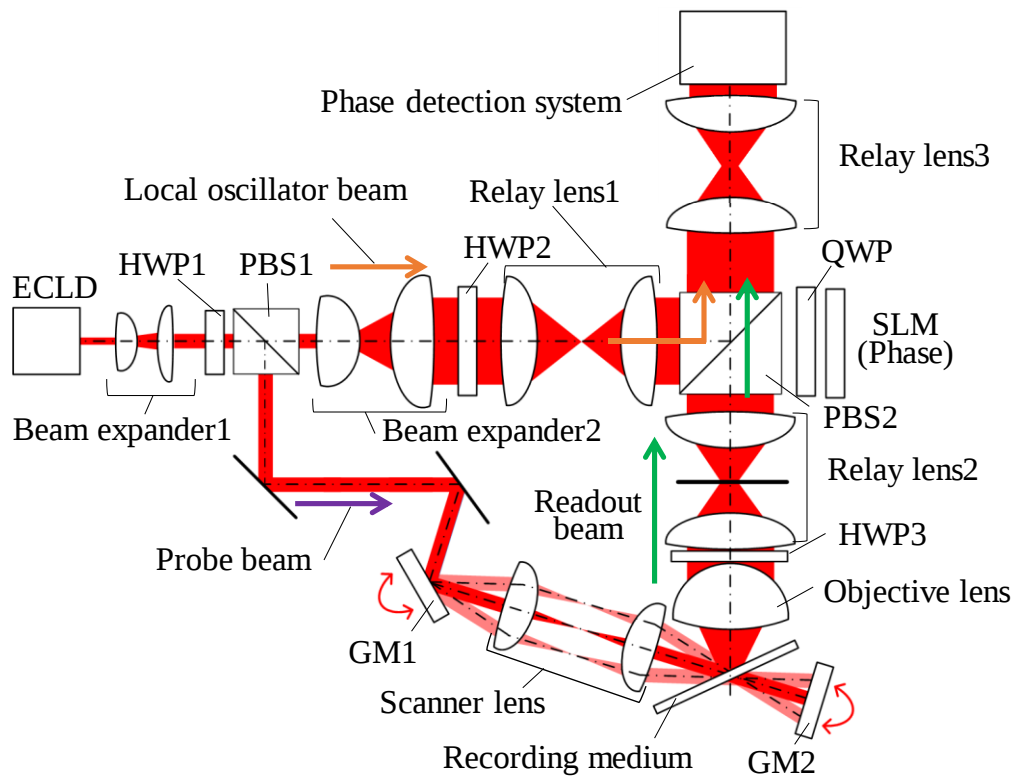


図 5.2 位相変調型ホログラフィックメモリ光学系(再生時)

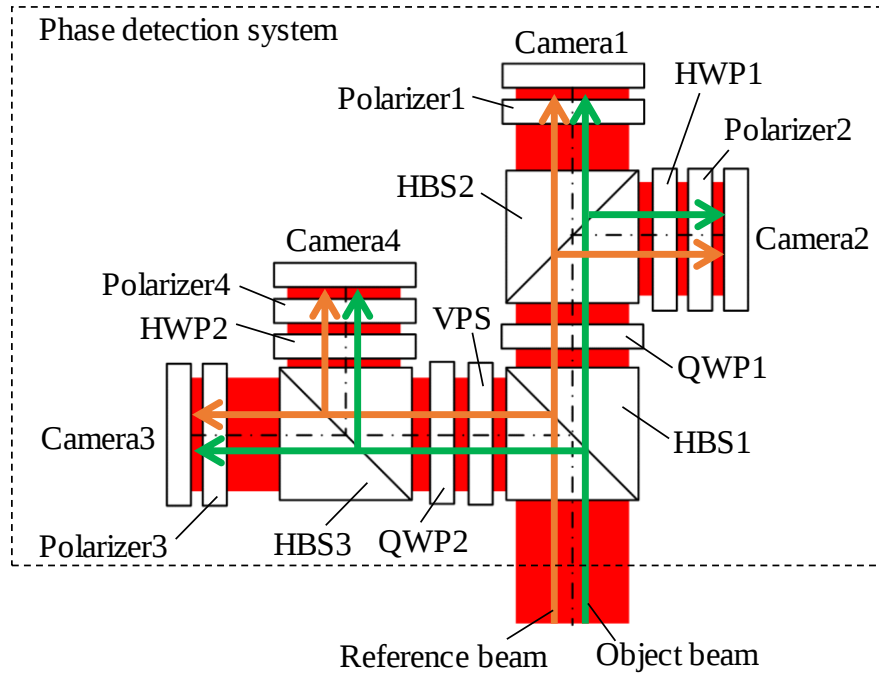


図 5.3 ページ間差動位相検出法の光学系

5.3.2 位相検出原理

次にページ間差動位相検出法の位相検出アルゴリズムについてジョーンズベクトルを用いて議論する。まず、PBS2 を出射した再生光とオシレータ光の電場 $E_o(x, y, P_n)$ を、

$$E_o(x, y, P_n) = \begin{pmatrix} A(x, y) \exp\{i\theta(x, y, P_n)\} \\ B(x, y) \exp\{i\phi(x, y)\} \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

とする。ここで $A(x, y)$ 、 $\theta(x, y, P_n)$ は再生光の振幅と位相、 $B(x, y)$ 、 $\phi(x, y)$ はオシレータ光の振幅と位相を示している。また、 P_n はページ番号を示しており、再生信号がページ番号に応じて変わることを意味している。ここでは、ホログラフィックメモリの再生により、再生光の位相のみが変化すると仮定した。

ここで、第4章と同様の演算を行うと、カメラ1、カメラ2、カメラ3、カメラ4の検出強度 $I_{H1}(x, y, P_n)$ 、 $I_{H2}(x, y, P_n)$ 、 $I_{H3}(x, y, P_n)$ 、 $I_{H4}(x, y, P_n)$ は、

$$I_1(x, y, P_n) = \frac{1}{8} [A(x, y)^2 + B(x, y)^2 + 2A(x, y)B(x, y) \sin\{\theta(x, y, P_n) - \phi(x, y)\}] \quad (5.2)$$

$$I_2(x, y, P_n) = \frac{1}{8} [A(x, y)^2 + B(x, y)^2 - 2A(x, y)B(x, y) \sin\{\theta(x, y, P_n) - \phi(x, y)\}] \quad (5.3)$$

$$I_3(x, y, P_n) = \frac{1}{8} [A(x, y)^2 + B(x, y)^2 + 2A(x, y)B(x, y) \cos\{\theta(x, y, P_n) - \phi(x, y) - \Delta\phi(P_n)\}] \quad (5.4)$$

$$I_4(x, y, P_n) = \frac{1}{8} [A(x, y)^2 + B(x, y)^2 - 2A(x, y)B(x, y)\cos\{\theta(x, y, P_n) - \phi(x, y) - \Delta\phi(P_n)\}] \quad (5.5)$$

と示すことができる。ここで、 $\Delta\phi(P_n)$ は、位相可変素子の付加位相を示しており、再生ページが奇数の場合には、付加位相は0度、偶数の場合には、付加位相が180度とする。ここで、 n ページ目と $n+1$ ページ目のカメラ1、カメラ2、カメラ3、カメラ4の検出強度の差は、

$$\begin{aligned} I_1(x, y, P_n) - I_1(x, y, P_{n+1}) \\ = -\frac{A(x, y)B(x, y)}{2} \cos\left\{\frac{\theta(x, y, P_n) + \theta(x, y, P_{n+1})}{2} - \phi(x, y)\right\} \sin\left\{\frac{\theta(x, y, P_n) - \theta(x, y, P_{n+1})}{2}\right\} \end{aligned} \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} I_2(x, y, P_n) - I_2(x, y, P_{n+1}) \\ = -\frac{A(x, y)B(x, y)}{2} \sin\left\{\frac{\theta(x, y, P_n) + \theta(x, y, P_{n+1})}{2} - \phi(x, y)\right\} \sin\left\{\frac{\theta(x, y, P_n) - \theta(x, y, P_{n+1})}{2}\right\} \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} I_3(x, y, P_n) - I_3(x, y, P_{n+1}) \\ = -\frac{A(x, y)B(x, y)}{2} \sin\left\{\frac{\theta(x, y, P_n) + \theta(x, y, P_{n+1})}{2} - \phi(x, y)\right\} \cos\left\{\frac{\theta(x, y, P_n) - \theta(x, y, P_{n+1})}{2}\right\} \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} I_4(x, y, P_n) - I_4(x, y, P_{n+1}) \\ = \frac{A(x, y)B(x, y)}{2} \cos\left\{\frac{\theta(x, y, P_n) + \theta(x, y, P_{n+1})}{2} - \phi(x, y)\right\} \cos\left\{\frac{\theta(x, y, P_n) - \theta(x, y, P_{n+1})}{2}\right\} \end{aligned} \quad (5.9)$$

となる。そして、第4章同様の演算を行い、

$$\begin{aligned} \{I_1(x, y, P_n) - I_1(x, y, P_{n+1})\}^2 + \{I_2(x, y, P_n) - I_2(x, y, P_{n+1})\}^2 &= \frac{\{A(x, y)B(x, y)\}^2}{2} \sin^2\left\{\frac{\Delta\theta(x, y, P_n)}{2}\right\} \\ (5.10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \{I_3(x, y, P_n) - I_3(x, y, P_{n+1})\}^2 + \{I_4(x, y, P_n) - I_4(x, y, P_{n+1})\}^2 &= \frac{\{A(x, y)B(x, y)\}^2}{2} \cos^2\left\{\frac{\Delta\theta(x, y, P_n)}{2}\right\} \\ (5.11) \end{aligned}$$

$$\Delta\theta(x, y, P_n) = \theta(x, y, P_n) - \theta(x, y, P_{n+1}) \quad (5.12)$$

が得られる。ここで、 n ページと $n+1$ ページの再生光の位相差を $\Delta\theta(x, y, P_n)$ をとした。そして、(5.10)式と(5.11)式より、

$$\Delta\theta(x, y, P_n) = 2\tan^{-1} \left[\pm \sqrt{\frac{[I_1(x, y, P_n) - I_1(x, y, P_{n+1})]^2 + [I_2(x, y, P_n) - I_2(x, y, P_{n+1})]^2}{[I_3(x, y, P_n) - I_3(x, y, P_{n+1})]^2 + [I_4(x, y, P_n) - I_4(x, y, P_{n+1})]^2}} \right] \quad (5.13)$$

が得られる。(5.13)式は、同じカメラのページ間の検出信号の差を演算している。オシレータ光はページ間で大きく変化しないため、オシレータ光の強度ずれの影響が小さい。また、(5.13)式で得られる再生位相は、オシレータの位相には依存せず、ページ間の位相信号の差のみで表されている。このため、ページ間差動位相検出法は、従来のホモサイン位相検出法で課題となっていた光学系の経時変化や、空気の流れ、温度勾配等による波面ずれに対してロバスト性の高い検出方式である。

一方で、時間微分位相検出法は測定対象物の位相を復元するため、(3.6)式の演算を行ったが、ページ間差動位相検出法は、位相信号の差が再生信号なので位相復元を行う必要がない。このため、第4章で課題となった線状のノイズの影響を受けない。

そして、ページ間差動位相検出法も、位相シフト法同様に、オシレータ光に対する物体光の振幅比だけ信号を増幅することができる。ホログラフィックメモリの場合、弱い光を増幅検出することは以下の効果をもたらす。

① 大容量化(記録密度向上)

ホログラフィックメモリでは記録媒体の回折効率が課題となっている。記録媒体の回折効率は記録媒体ごとに決まっており、 $M\#$ (エムナンバー)として定義されている[61]。 $M\#$ は、記録材料のダイナミックレンジをあらわす指標である。1ページあたりの回折効率を η_p としたときに、最大の記録ページ数 N_{max} が、

$$N_{max} = \frac{M\#}{\sqrt{\eta_p}} \quad (5.14)$$

で求められる。また、 $M\#$ は、

$$M\# = \sum_{i=1}^{N_{max}} \sqrt{\eta_p} \quad (5.15)$$

と定義されている。このため、小さな回折効率で発生した弱い再生光からの2次元データを復元できれば、記録ページ数を増やすことができたため、大容量化につながる。

② 記録再生の高速化

ホログラフィックメモリの記録では、信号光と参照光を記録媒体内で干渉させ、その干渉縞を屈折率分布としてホログラムを記録する。回折効率は、干渉光の強度と照射時間に依存する。小さな回折効率で発生した弱い再生光からの2次元データを復元できれば、干渉光の

照射時間を短くすることができるため、記録の高速化を実現できる。

また、再生では、媒体内のホログラムにプローブ光を所定の角度で入射すると記録媒体内の屈折率分布から回折した再生光が発生する。この回折光をカメラで検出することで、記録媒体内に記録した情報を再生する。このとき、カメラの検出信号は、検出強度と露光時間に依存する。弱い光を増幅検出することができれば、露光時間を短くすることができるため、再生の高速化を実現できる。

5.4 位相検出の原理検証および評価方法

5.4.1 実験系

本研究では、ページ間位相微分検出法の原理検証を行った。図 5.4 は、原理検証の実験系を示している。図 5.4(a)は、原理検証の光学系、(b)は、SLM で付加した位相パターンを示している。本原理検証では、ホログラムの代わりに SLM を用いて再生光の位相を生成した。図 5.4(b)は、SLM で付加した再生光の位相パターンを示している。1 ページ目の領域 A1 と領域 A3 の位相を位相 Aa とし、領域 A2 と領域 A4 の位相を位相 Ab とした。また、2 ページ目の領域 B1、領域 B2、領域 B3、領域 B4 は全て同じ位相の 180 度とした。ここでは、図 4.6 に示したホモダイン位相検出法の検出光学系を用いて比較を行った。ホモダイン位相検出法は、再生位相として再生光とオシレータ光の位相差が出力されるため、初期的なオフセットが発生する。本実験では、SLM の付加位相を 0 としたときの位相の平均値で全画素の位相オフセットをキャンセルした。

図 5.5 は、オシレータ光の強度分布をカメラで検出した画像である。カメラ間の強度分布ずれが発生していることがわかる。また、カメラ 1 とカメラ 3 の検出強度の左下にはほこりのような影が見えている。本原理検証では、この強度分布の条件で測定を行った。

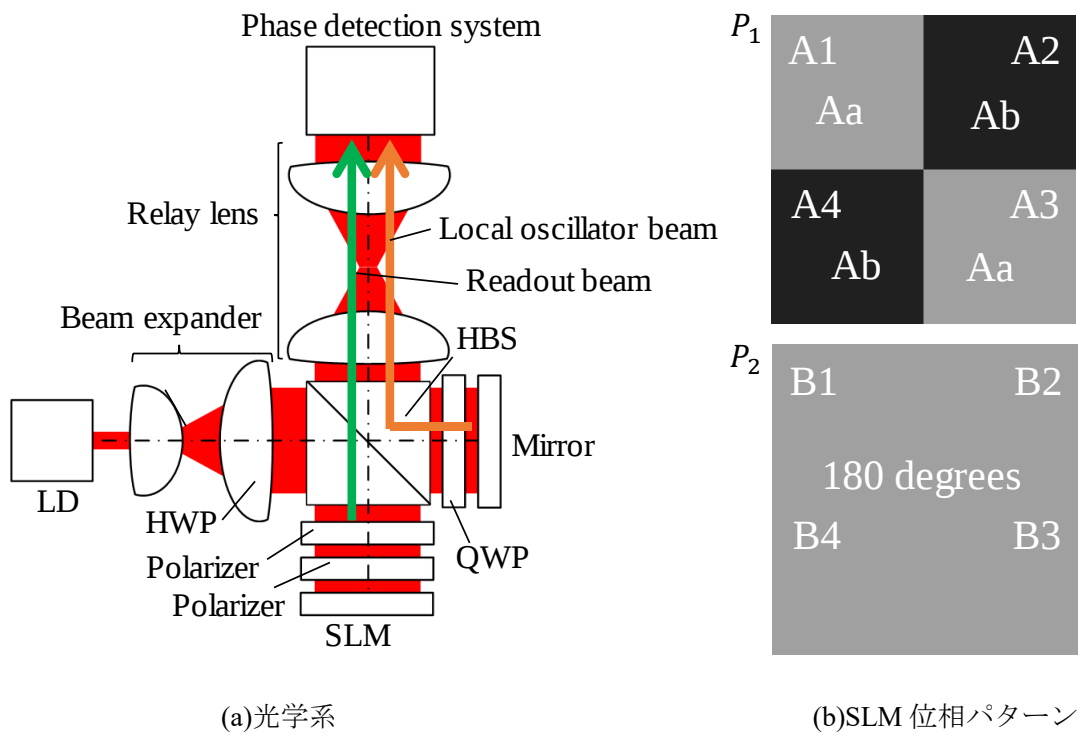


図 5.4 原理検証の実験系

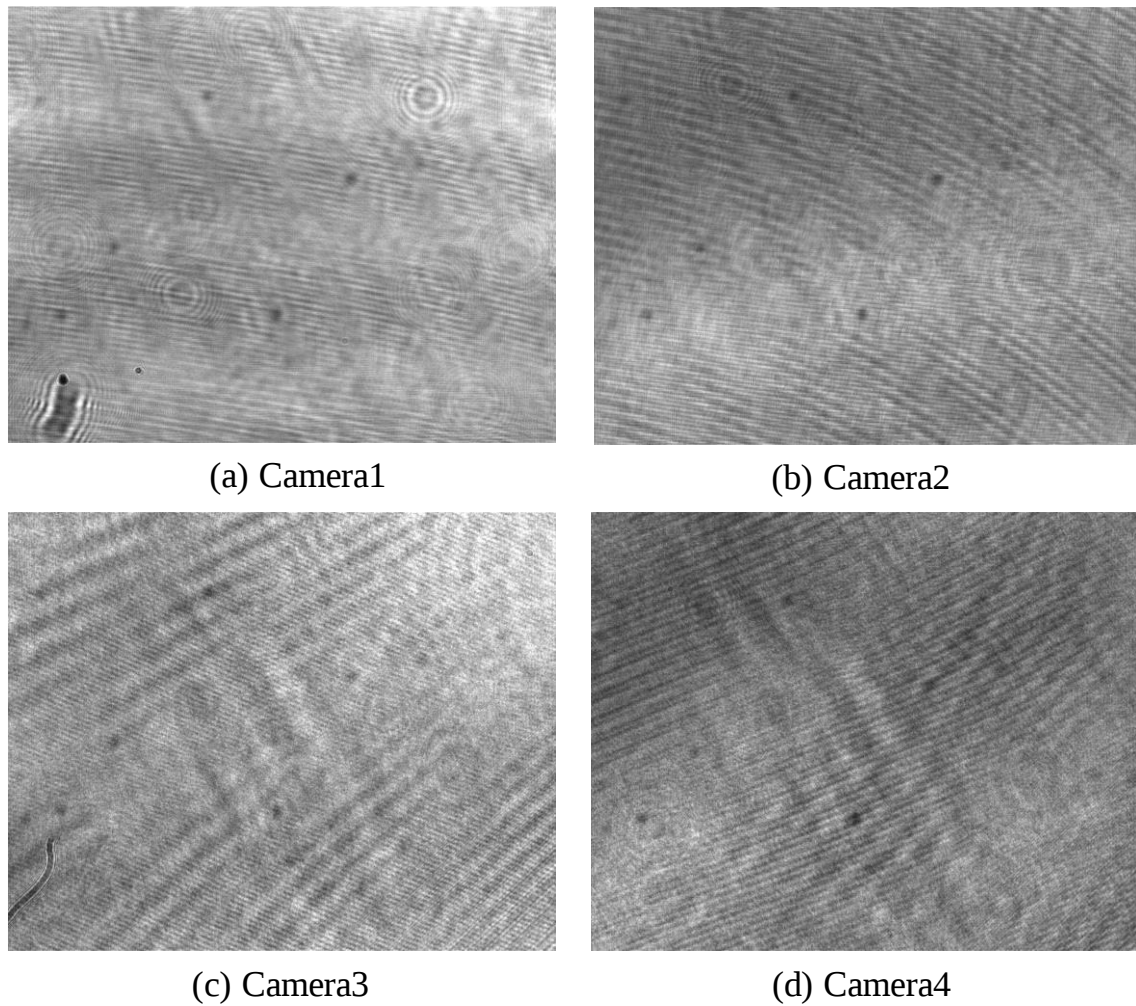
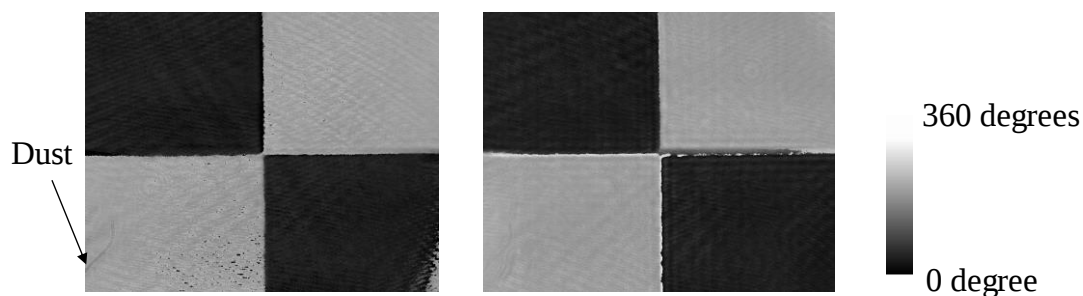


図 5.5 オシレータ光の強度分布

5.4.2 位相検出の原理検証

図 5.6 は、位相検出結果を示している。(a)はホモダイン位相検出法、(b)はページ間差動位相検出法の結果を示している。なお、(a)の場合には、SLM の付加した位相 Aa を 45 度、位相 Ab を 225 度とした。また(b)の場合には、1 ページの位相 Aa を 225 度、位相 Ab を 45 度とした。2 ページ目の位相が 180 度のため、ページ間差動位相検出法で得られる位相は、45 度と 225 度となる。また、オシレータ光に対する再生光の強度比は 1/1.6 とした。本結果より、ホモダイン位相検出法、ページ間差動位相検出法の両方とも同じような再生位相が検出されていることがわかる。そして、ホモダイン位相検出法がわずかにほこりの影響を受けていることがわかる。



(a)ホモダイン位相検出法 (b) ページ間差動位相検出法

図 5.6 位相検出結果(強度比 1/1.6)

5.4.3 評価方法

次に図 5.7 を用いて評価方法を説明する。図 5.7 は、図 5.6(b)のページ間差動位相検出法で検出された全画面の位相のヒストグラムを示している。縦軸は画素数、横軸は位相を示している。ここで、本原理検証では、ホログラフィックメモリ用に 3 つの評価指標を定義した。1つ目は、ピーク値の位相ずれである。これは、実測値が SLM で設定した値に対してどれだけずれて検出されたかを示す指標である。2つ目は、2つの位相値の間隔ずれである。これは、2つの位相 Aa と位相 Ab の間隔の実測値が SLM で設定した位相値に対してどれだけずれて検出されたかを示す指標である。そして3つ目は、分布の標準偏差である。ここでは、標準偏差は位相 Aa の標準偏差と位相 Ab の標準偏差の平均で評価を行った。これらを用いて、位相 4 値記録の可能性について検討を行った。

表 5.1 は、図 5.6 のホモダイン位相検出法とページ間差動位相検出法の評価を行った結果である。本結果より、ホモダイン位相検出法の方が位相誤差が小さいことがわかった。ただし、ページ間差動位相検出法の位相誤差 3.5 度は、波長換算すると $1/100\lambda$ であり、高精度な測定ができていることがわかる。これについては間隔誤差も同様である。また、標準偏差については、ページ間差動位相検出法の方がばらつきが小さいことがわかった。ただし、3つの指標とも大きな違いはないと考える。本結果により、ページ間差動位相検出法は、位相変調型ホログラフィックメモリのページ間の位相信号の差を高精度に検出できることを確認した。

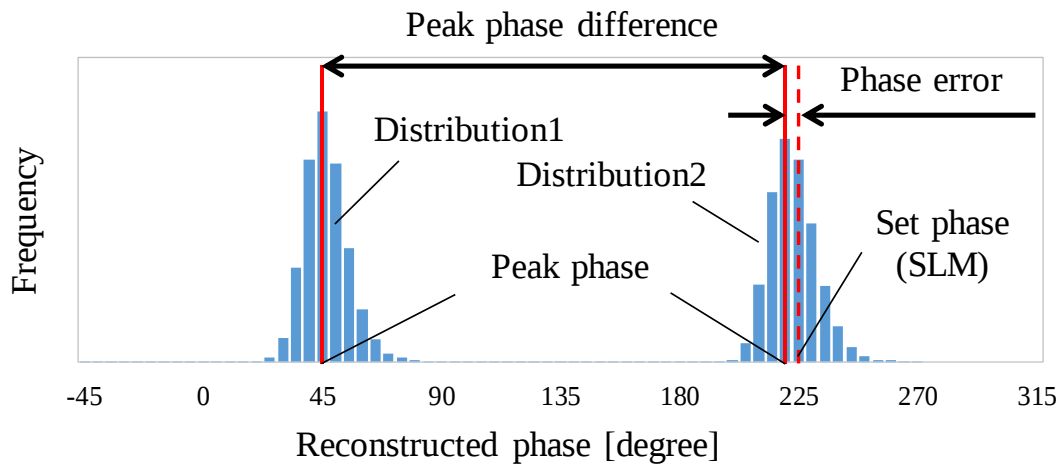


図 5.7 評価方法

表 5.1 測定結果(強度比 1/1.6)

	Set phase (SLM)	Error	
		Homodyne phase detection	Page differential phase detection
Peak phase	45 degrees	0.4 degrees	0.1 degrees
	225 degrees	0.3 degrees	3.5 degrees
Peak phase difference	180 degrees	0.49 degrees	3.4 degrees
Standard deviation	-	16 degrees	11 degrees

5.5 最適な記録位相差に関する検討

実際にページ間差動位相検出法を、ホログラフィックメモリに適用する場合、ページ間の再生光の強度ずれが課題となる。(5.13)式は、再生光の強度がページ間で同じと仮定して導出された式である。実際のホログラフィックメモリでは、再生光ページ内で強度がばらついているとともに、その強度のばらつき方がページごとに異なる[62]。このため、ページ間差動位相検出法を適用するには、再生光のページ間の強度ばらつきに対応する必要があると考えた。上述したように、ホログラフィックメモリでは、記録する位相を任意に決めることができる。そこで、本研究では、記録するページ間の位相差を変えたときの位相誤差について測定を行った。

図 5.8 は、再生光の強度ずれの影響を示した実験結果である。ここで縦軸は位相誤差、横軸は再生位相を示している。そして、2本の線は、2つのページの再生光の強度を同じにし

た場合($I_r(P_1) = I_r(P_2)$)と 2 ページ目の再生光の強度を 30%低下させた場合($I_r(P_1) = 0.7I_r(P_2)$)を示している。なお、再生光の強度は、図 5.4 の偏光子を用いて変更した。図 5.8 より 2 つのページの再生光の強度が同じ場合には位相誤差が小さいことがわかる。そして、2 つのページの再生光の強度が異なる場合には、大きな位相誤差を発生することがわかった。ただし、ページ間の位相差を 90 度、270 度付近にすると、非常に小さな位相誤差となり、2 つのページの再生光の強度が同じ場合と変わらない結果が得られることを実験で明らかにした。

ここで、4 値の位相差を記録する場合には、45 度、135 度、225 度、315 度の条件が良いことがわかった。以下の検討では、4 値記録を想定し、位相 Aa を 45 度、位相 Ab を 225 度として、2 つの位相値の間隔ずれ、標準偏差について検討を行った。

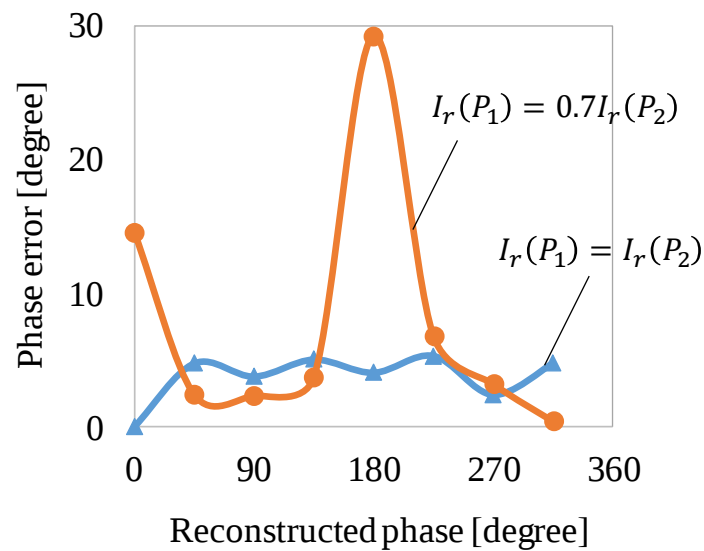


図 5.8 再生光強度ずれの影響の実験結果

5.6 耐環境性に関する実験

本研究では、ページ間差動位相検出法の強度ずれ、波面ずれに対するロバスト性の原理検証を行った。

5.6.1 強度ずれの影響

再生光の増幅検出を実現すると、オシレータ光に対して再生光の強度比を小さくできるので、記録容量、記録再生速度の観点で非常に有利となる。そこで、本検討ではオシレータ光を一定にしたまま、再生光の強度を低下させ、測定を行った。なお、再生光の強度は、図 5.4(a)の偏光子を用いて変更した。

図 5.9 は、強度比が $1/1.6$ と $1/620$ のときのホモダイン位相検出法とページ間差動位相検出法の再生位相の測定結果である。この結果より、オシレータ光に対する再生光の強度比が 1 に近いときには、ホモダイン位相検出法とページ間差動位相検出法はほとんど同じであるが、強度比が小さくなるとホモダイン位相検出法は大きな誤差を発生することがわかる。これは、オシレータ光の強度分布が依存していると考ええる。

図 5.10 は、間隔ずれ、標準偏差の強度比依存性を示した図である。(a)は間隔ずれ、(b)は標準偏差を示している。(a)の縦軸は間隔ずれ、(b)の縦軸は標準偏差を示しており、(a)、(b)ともに横軸はオシレータ光に対する再生光の強度比を示している。ホモダイン位相検出法の場合、強度比が小さくなるに伴って、間隔ずれ、標準偏差ともに大きくなっていくことがわかる。それに対し、ページ間差動位相検出法は、その変化量が小さい。

以上より、ページ間差動位相検出法は、オシレータ光の強度ずれに対してロバスト性が高いことを実験で確認した。

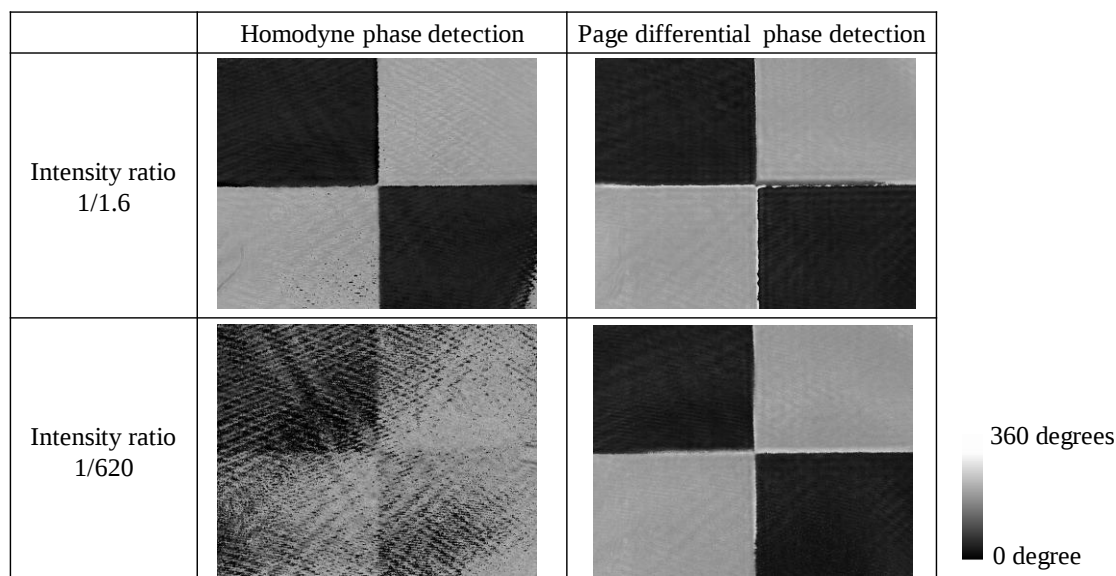


図 5.9 強度比が $1/1.6$ と $1/620$ のときの再生位相

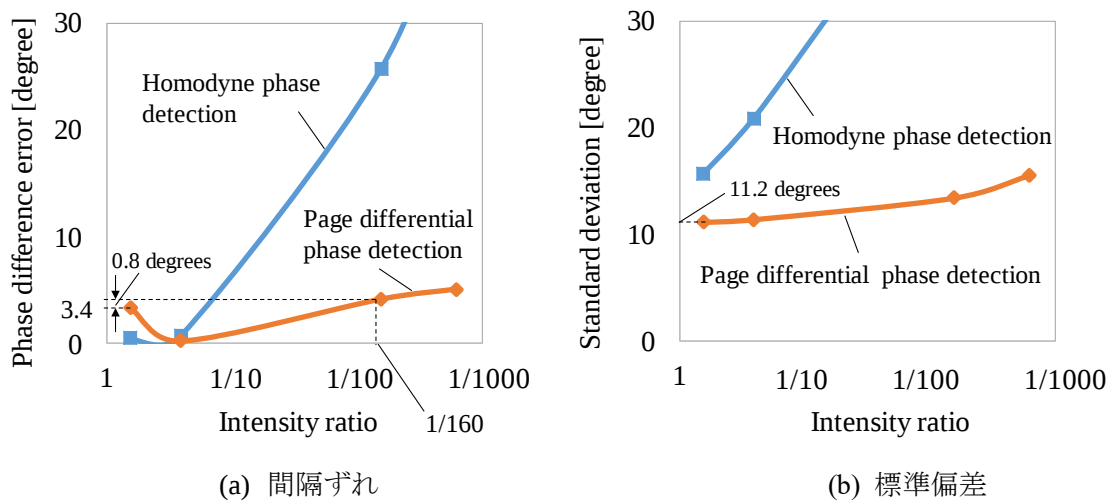


図 5.10 間隔ずれ、標準偏差の強度比依存性

5.6.2 波面ずれの影響

次に波面ずれに対するロバスト性について検討を行った。波面ずれは、光学系の経時変化や、空気の流れ、温度勾配等により容易に発生する。

図 5.11 は、チルト収差が 2.5λ (peak to valley)のときの再生位相の測定結果である。なお、ここでは図 5.4(a)の光学系のオシレータ光を反射するミラーを傾け、チルト収差を発生させた。そして、オシレータ光に対する再生光の強度比を 1/1.6 とした。本図より、ホモダイン位相検出法は波面ずれに影響を受けることがわかる。これは、ホモダイン位相検出法の再生位相が、再生光とオシレータ光の位相差であるためであり、オシレータ光の位相に大きく影響を受ける。それに対して、ページ間差動位相検出法は、ページ間の再生光の位相差を検出するため、ほとんど変化していないことがわかる。

図 5.12 は、ページ間差動位相検出法の間隔ずれ、標準偏差のチルト収差依存性を示した図である。(a)は間隔ずれ、(b)は標準偏差を示している。(a)の縦軸は間隔ずれ、(b)の縦軸は標準偏差を示しており、(a)、(b)ともに横軸はオシレータ光に付加したチルト収差量を示している。ページ間差動位相検出法は、チルト収差が 2.5λ 発生した場合であっても間隔ずれが 1.4 度変化するだけであった。また、標準偏差も 0.7 度変化するだけであった。

以上より、ページ間差動位相検出法は、オシレータ光の波面ずれに対してロバスト性が高いことを実験で確認した。

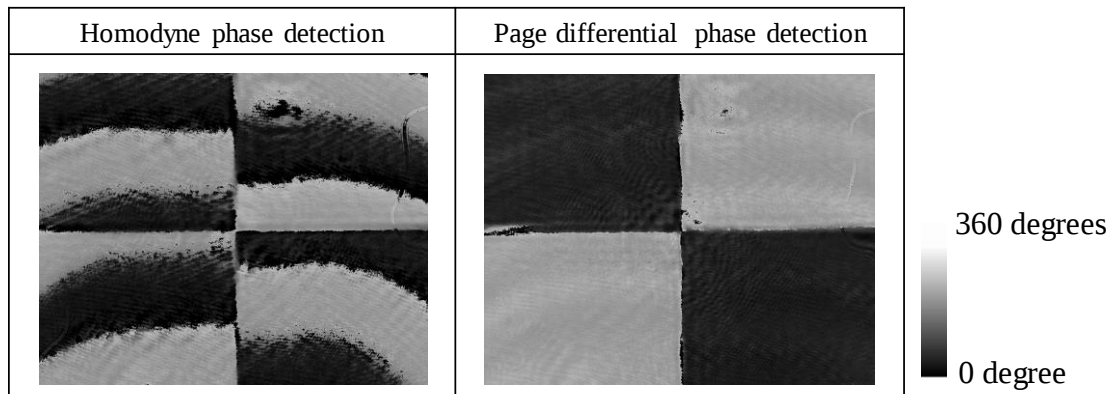
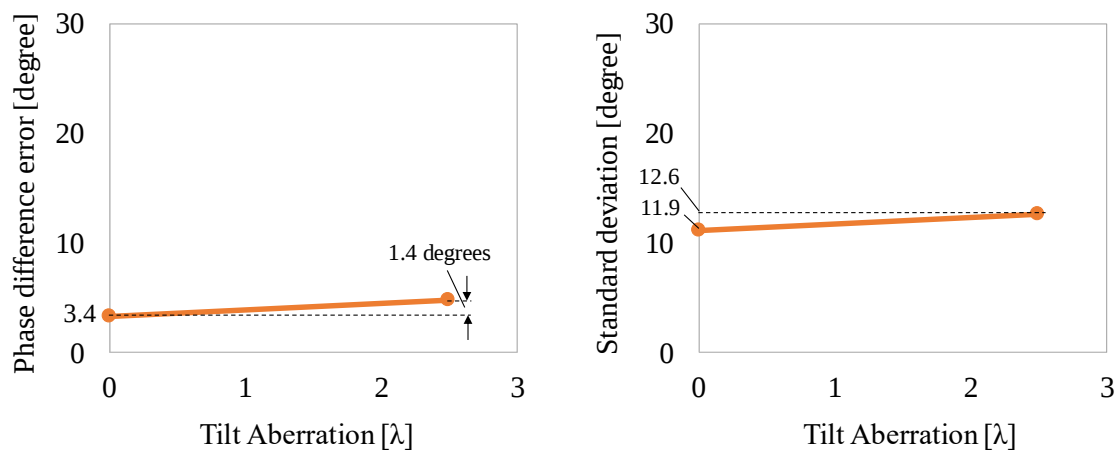


図 5.11 チルト収差が 2.5λ (peak to valley) のときの再生位相



(a) 間隔ずれ

(b) 標準偏差

図 5.12 ページ間差動位相検出法の間隔ずれ、標準偏差のチルト収差依存性

5.7 考察

ページ間差動位相検出法は、強度ずれや波面ずれに対してロバスト性が高いことを確認した。ここでは、実験結果に関する考察を解析計算、シミュレーションを用いて行う。表 5.2 は、シミュレーションの条件を示している。原理実験同様、1 ページ目の領域 A1 と領域 A3 の位相を位相 Aa とし、領域 A2 と領域 A4 の位相を位相 Ab とした。また、2 ページ目の領域 B1、領域 B2、領域 B3、領域 B4 は全て同じ位相の 180 度とした。そして、オシレータ光の強度分布は図 5.5 の強度分布を参考に、シミュレーションでは、図 5.13 の強度分布を使用した。また、カメラノイズとして 40 dB のランダムノイズを考慮した。

5.7.1 最適記録位相差に関する検討

まず最初に記録位相差について検討を行った。図 5.14 は、再生光の強度ずれの影響を示したシミュレーション結果である。ここで縦軸は位相誤差、横軸は再生位相を示している。そして、2 本の線は、2 つのページで再生光の強度を同じにした場合($I_r(P_1) = I_r(P_2)$)と 2 ページ目の再生光の強度を 30%低下させた場合($I_r(P_1) = 0.7I_r(P_2)$)を示している。

本図より、2 つのページで再生光の強度を同じにした場合は位相誤差を全く発生していない。それに対し、2 ページ目の再生光の強度を 30%低下させた場合、ページ間の位相差が 0 度、180 度のときに大きな位相誤差が発生し、位相差が 90 度 270 度のとき、位相誤差が小さい。この結果は、図 5.8 に示す実験結果と同じ結果であることがわかる。

次に、ページ間の位相差が 90 度、270 度のとき、位相誤差が小さい理由について解析的な検討を行った。ここで、2 つのページの再生光の強度の違いを考慮するため、2 ページ目の再生光の振幅を $\alpha A(x, y)$ とする。これにより、カメラ 1 で検出される 1 ページ目の検出強度 $I_1(x, y, P_1)$ および 2 ページ目の検出強度 $I_1(x, y, P_2)$ は、以下のように示せる。

$$I_1(x, y, p_1) = \frac{1}{8}[A(x, y)^2 + B(x, y)^2 + 2A(x, y)B(x, y)\sin\{\theta(x, y, p_1) - \phi(x, y)\}] \quad (5.16)$$

$$I_1(x, y, p_2) = \frac{1}{8}[\alpha^2 A(x, y)^2 + B(x, y)^2 + 2\alpha A(x, y)B(x, y)\sin\{\theta(x, y, p_2) - \phi(x, y)\}] \quad (5.17)$$

そして、カメラ 1 で検出される 1 ページ目の検出強度 $I_1(x, y, P_1)$ と 2 ページ目の検出強度 $I_1(x, y, P_2)$ の差動信号は、

$$I_1(x, y, P_1) - I_1(x, y, P_2) = \frac{1}{8}[(1 - \alpha^2)A(x, y)^2 + 2A(x, y)B(x, y)\{\sin\{\theta(x, y, P_1) - \phi(x, y)\} - \alpha\sin\{\theta(x, y, P_2) - \phi(x, y)\}\}] \quad (5.18)$$

で表される。ここで、単純化のためにオシレータ光に対する再生光の強度比が小さいと仮定し、再生光強度 $A(x, y)^2$ の項を無視すると、

$$I_1(x, y, P_1) - I_1(x, y, P_2) = \frac{1}{8}\left[2A(x, y)B(x, y)\left\{2\cos\left\{\frac{\theta(x, y, P_1) + \theta(x, y, P_2)}{2}\right\} - \phi(x, y)\right\}\sin\left\{\frac{\theta(x, y, P_1) - \theta(x, y, P_2)}{2}\right\} + (1 - \alpha)\sin\{\theta(x, y, P_2) - \phi(x, y)\}\right] \quad (5.19)$$

となる。そして、カメラ 2、カメラ 3、カメラ 4 に対して同様の演算を行うと、

$$I_2(x, y, P_1) - I_2(x, y, P_2) = \frac{1}{8}\left[2A(x, y)B(x, y)\left\{2\sin\left\{\frac{\theta(x, y, P_1) + \theta(x, y, P_2)}{2}\right\} - \phi(x, y)\right\}\sin\left\{\frac{\theta(x, y, P_1) - \theta(x, y, P_2)}{2}\right\} + (1 - \alpha)\cos\{\theta(x, y, P_2) - \phi(x, y)\}\right] \quad (5.20)$$

$$I_3(x, y, P_1) - I_3(x, y, P_2) = \frac{1}{8} \left[2A(x, y)B(x, y) \left\{ 2\sin \left\{ \frac{\theta(x, y, P_1) + \theta(x, y, P_2)}{2} - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \emptyset(x, y) \right\} \cos \left\{ \frac{\theta(x, y, P_1) - \theta(x, y, P_2)}{2} \right\} - (1 - \alpha) \sin \{ \theta(x, y, P_2) - \emptyset(x, y) \} \right\} \right] \quad (5.21)$$

$$I_4(x, y, P_1) - I_4(x, y, P_2) = \frac{1}{8} \left[2A(x, y)B(x, y) \left\{ 2\cos \left\{ \frac{\theta(x, y, P_1) + \theta(x, y, P_2)}{2} - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \emptyset(x, y) \right\} \cos \left\{ \frac{\theta(x, y, P_1) - \theta(x, y, P_2)}{2} \right\} - (1 - \alpha) \cos \{ \theta(x, y, P_2) - \emptyset(x, y) \} \right\} \right] \quad (5.22)$$

となる。そして、(5.6)式から(5.13)式と同じ演算を、(5.19)式から(5.22)式に適用すると、

$$\sqrt{\frac{[I_1(x, y, P_1) - I_1(x, y, P_2)]^2 + [I_2(x, y, P_1) - I_2(x, y, P_2)]^2}{[I_3(x, y, P_1) - I_3(x, y, P_2)]^2 + [I_4(x, y, P_1) - I_4(x, y, P_2)]^2}} = \pm \sqrt{\frac{\sin^2 \left[\frac{\Delta\theta(x, y, P_1)}{2} \right] + \frac{(1-\alpha)}{4\alpha}}{\cos^2 \left[\frac{\Delta\theta(x, y, P_1)}{2} \right] + \frac{(1-\alpha)}{4\alpha}}} \quad (5.23)$$

が得られる。ここで α が1の場合、(5.13)式と同じ結果が得られることがわかる。一方で、 α が1以外の場合には、(5.23)式の右边が α に依存してしまい、 $\tan$ 成分をそのまま演算できない。

ここで、 α が1以外の条件で、例えば再生位相が0度の場合を考える。再生位相 $\Delta\theta(x, y, P_n)$ が0度の場合、(5.21)式は、

$$\sqrt{\frac{[I_1(x, y, P_1) - I_1(x, y, P_2)]^2 + [I_2(x, y, P_1) - I_2(x, y, P_2)]^2}{[I_3(x, y, P_1) - I_3(x, y, P_2)]^2 + [I_4(x, y, P_1) - I_4(x, y, P_2)]^2}} = \sqrt{\frac{\frac{(1-\alpha)}{4\alpha}}{1 + \frac{(1-\alpha)}{4\alpha}}} \quad (5.24)$$

となる。本実験では、(5.24)式の右边を $\tan$ 成分として演算したため、

$$\tan \left[\frac{\Delta\theta(x, y, P_1)}{2} \right] = \sqrt{\frac{\frac{(1-\alpha)}{4\alpha}}{1 + \frac{(1-\alpha)}{4\alpha}}} \quad (5.25)$$

として、再生位相を求めている。この場合、 α が1以外の場合では、再生位相は α に依存するため、正確な再生位相を求めることができない。次に再生位相が90度の場合を考える。再生位相が90度の場合、(5.23)式は、

$$\sqrt{\frac{[I_1(x,y,P_1)-I_1(x,y,P_2)]^2+[I_2(x,y,P_1)-I_2(x,y,P_2)]^2}{[I_3(x,y,P_1)-I_3(x,y,P_2)]^2+[I_4(x,y,P_1)-I_4(x,y,P_2)]^2}} = 1 \quad (5.26)$$

となる。同様にして、本実験では(5.26)式の右辺を $\tan$ 成分として演算したため、

$$\tan\left[\frac{\Delta\theta(x,y,P_n)}{2}\right] = 1 \quad (5.27)$$

として再生位相を求めている。これは、 α には依存せずに、再生位相 $\Delta\theta(x,y,P_1)$ が 90 度と正しい値が検出される。これは再生位相が 270 度のときも同様である。

以上のように、再生位相が 90 度、270 度の場合には、再生光のページ間の強度の違いの影響がないことを解析的に確認した。

表 5.2 シミュレーション条件

Parameter		
Beam	Wavelength	633 nm
	Phase value	Readout beam : 0 degree (min), 360 degrees (max) Local oscillator beam : 180 degrees
	Phase pattern	Readout beam : Fig. 5.4(b) Page 1 : A1=A3, A2=A4 Page 2 : B1=B2=B3=B4 Local oscillator beam : uniform pattern / tilt aberration
	Intensity pattern	Readout beam : uniform pattern Local oscillator beam : Fig. 5.13
Camera	Pixel number	1280 x 1024 Pixels
	Noise	40 dB

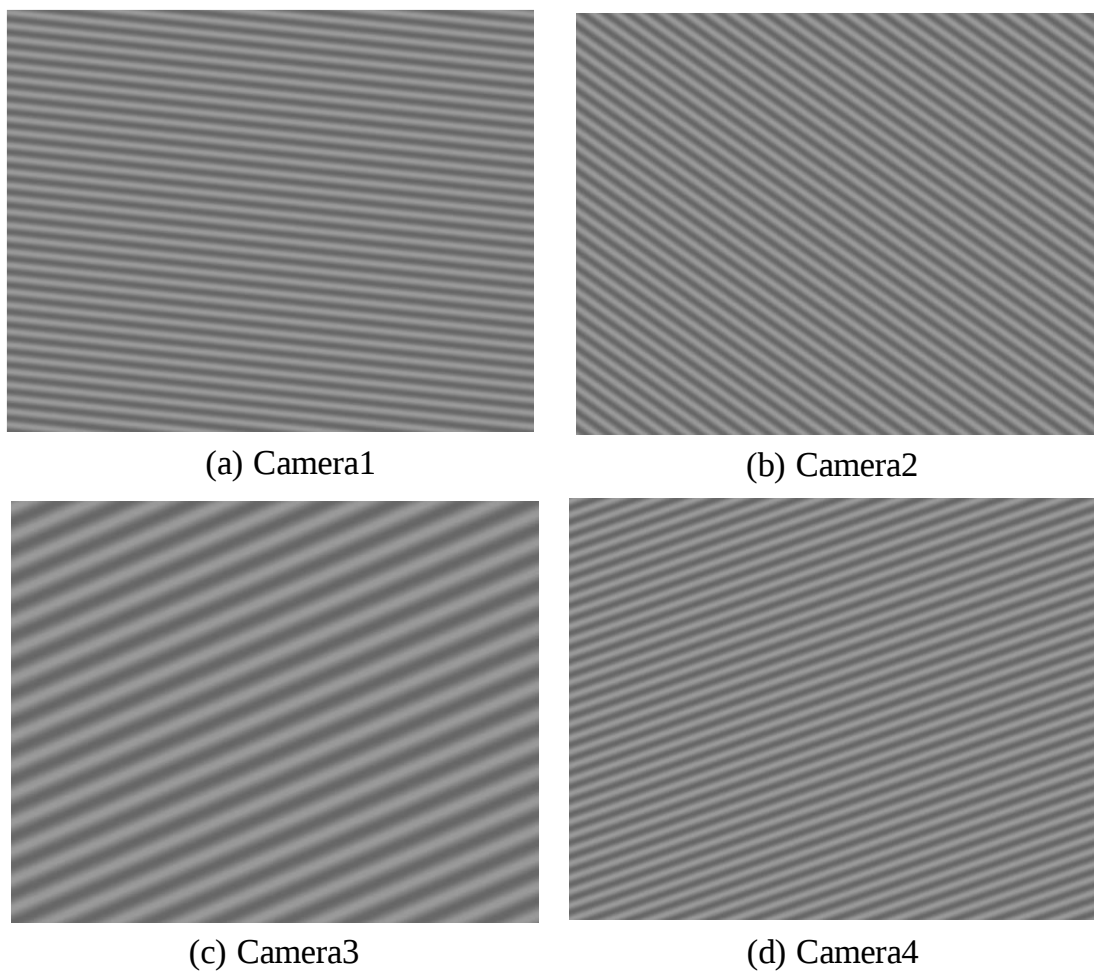


図 5.13 シミュレーション条件 再生光、オシレータ光強度分布

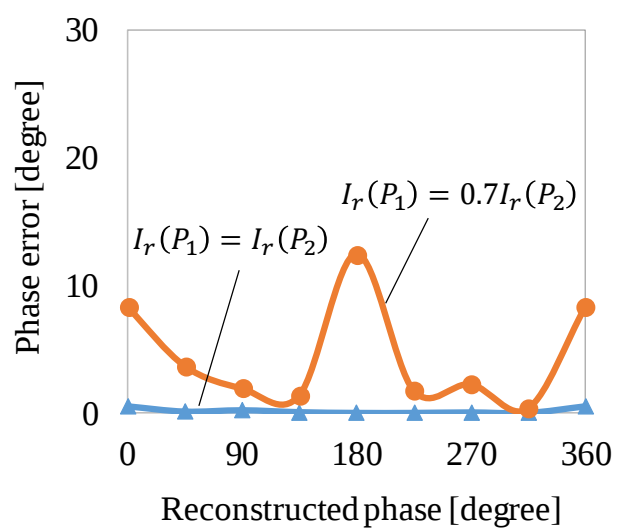


図 5.14 再生光強度ずれの影響のシミュレーション結果

5.7.2 強度ずれの影響に関する検討

次に、強度ずれに対するシミュレーションの検証を行った。図 5.15 は、オシレータ光に対する再生光の強度比を $1/1.6$ と $1/620$ としたときの再生位相のシミュレーション結果である。本結果は、図 5.9 と同じ傾向となっていることがわかる。ここで、ホモダイン位相検出法の信号劣化の要因を明確にするため、シミュレーションで検討を行った。図 5.16 は、オシレータ光に対する物体光の強度比が $1/620$ のときのホモダイン位相検出法の再生位相のシミュレーション結果を示している。(a)は、図 5.13 に示すオシレータ光の強度分布を考慮した場合、(b)は、オシレータ光の強度分布を均一にした場合を示している。オシレータ光の強度分布が均一の場合、各領域で所定の位相が検出できていることがわかる。これより、再生位相の劣化は、オシレータ光の強度分布ずれであることを明らかにした。

次にシミュレーションで強度ずれに対する定量評価を行った。図 5.17 は、間隔ずれ、標準偏差の強度比依存性のシミュレーション結果を示している。(a)は間隔ずれ、(b)は標準偏差を示している。(a)の縦軸は間隔ずれ、(b)の縦軸は標準偏差を示しており、(a)、(b)ともに横軸はオシレータ光に対する再生光の強度比を示している。なお、この結果は図 5.10 の測定と同条件でシミュレーションした結果である。

図 5.17(a)の間隔ずれは、ホモダイン位相検出法、ページ間差動位相検出法ともに強度比に依存していないことがわかる。また、図 5.17(b)のホモダイン位相検出法の標準偏差は、強度比に強く依存していることがわかる。それに対し、ページ間差動位相検出法は強度比に対して標準偏差の変化量が小さいことがわかる。ここで、実機とシミュレーションの結果について以下の検討を行った。

① ホモダイン位相検出法の標準偏差が強度比に強く依存する理由

実験、シミュレーションともにホモダイン位相検出法の標準偏差が、オシレータ光に対する再生光の強度比に強く依存している(図 5.10(b)、図 5.17(b))。これは、オシレータ光の強度分布と干渉光の定数項($B(x, y)^2$)の残留が影響していると考ええる。

図 5.18 は、カメラ 1 に入射する強度を変えたときの位相誤差のシミュレーション結果である。(a)はホモダイン位相検出法、(b)はページ間差動位相検出法を示している。(a)、(b)ともに縦軸は位相誤差、横軸はカメラ 1 に入射する再生光とオシレータ光の強度の変化量である。また、2 つの線は、信号位相を 45 度、 225 度を示している。なお、オシレータ光に対する再生光の強度比は $1/620$ とした。そして、ここでは再生光、オシレータ光は均一な強度分布とした。

図 5.18(a)のホモダイン位相検出法は、カメラ 1 に入射する再生光とオシレータ光の強度が変化すると大きな位相誤差を発生することがわかる。それに対し、(b)のページ間差動位相検出法は、カメラに入射する再生光とオシレータ光の強度が変化しても位相誤差の発生は小さい。これは、オシレータ光の定数項($B(x, y)^2$)が影響している。特に、今回の条件の場合、オシレータ光に対する再生光の強度比が $1/620$ なので、オシレータ光の定数項($B(x, y)^2$)

が大きく影響する。例えば、カメラ 1 に入射するオシレータ光の強度が 5%減った場合、再生光の強度の 31 倍の強度が残留する。これにより、大きな位相誤差が発生する。それに対し、ページ間差動位相検出法は同じカメラの差動信号を検出するため、この要因による誤差は発生しない。

そして、図 5.5、図 5.13 に示す 4 つの強度分布を考慮すると、強度の組み合わせが様々存在するため、ホモサイン位相検出法は、標準偏差が大きくなったと理解することができる。

② 実験の間隔ずれが強度比に依存する理由

シミュレーションでは、間隔ずれは発生しないが、実験では間隔ずれが発生している(図 5.10(a)、図 5.17(a))。これは、①と同じ理由であると考ええる。ホモサイン位相検出法では、位相誤差はオシレータ光の強度分布に強く依存する。シミュレーションで用いた図 5.13 のオシレータ光の強度分布は規則的な $\sin$ 波の繰り返しで表現されている。それに対し、図 5.5 の実際のオシレータ光の強度分布ずれは不規則な強度分布となっているため、分布のピークの位相がずれたと考える。そして、ホモサイン位相検出の場合、位相誤差が強度比に強く依存するため、強度比に伴って分布のピークの位相が変化したと考える。

③ ページ間差動位相検出法で強度比が小さくなると標準偏差が大きくなる理由

実験、シミュレーションともにページ間差動位相検出法で、オシレータ光に対する再生光の強度比が小さい場合、標準偏差が大きくなる傾向がある(図 5.10(b)、図 5.17(b))。これについては、2 つの要因の可能性があると考えた。1 つ目は、原理的な課題である。ページ間差動位相検出法は、同じカメラの検出強度を差動演算することで、干渉光の定数項($A(x,y)^2$ 、 $B(x,y)^2$)をキャンセルできる。一方で、位相成分を含む項の $A(x,y)B(x,y)$ は、残留する。このため、位相誤差が発生しているのはこの要因であると考えた。もう一つは、カメラノイズである。再生光の強度が小さくなるとカメラのノイズの影響が無視できなくなると考えた。これらの要因を解析するため、カメラノイズの影響について確認を行った。図 5.19 はカメラノイズの影響のシミュレーション結果である。縦軸は標準偏差、横軸はオシレータ光に対する再生光の強度比を示している。2 本の線はノイズを考慮した場合としていない場合を示している。なお、カメラノイズを考慮した結果は、図 5.17(b)の結果と同じである。

ここで、カメラノイズがある条件には、上述した 1 つ目の要因と 2 つ目の要因が影響している。また、カメラノイズがない条件には、1 つ目の要因のみが影響している。このため、ノイズの有無の結果を比べることで、カメラノイズのみの影響を確認することができる。図 5.19 より、カメラノイズを考慮しないと、標準偏差は強度比に依存せず、ほぼ一定であることがわかる。このため、位相成分の項の影響は、ほとんどないと言える。これより、ページ間差動位相検出法の標準偏差の劣化は、カメラノイズの影響であることを明確にした。

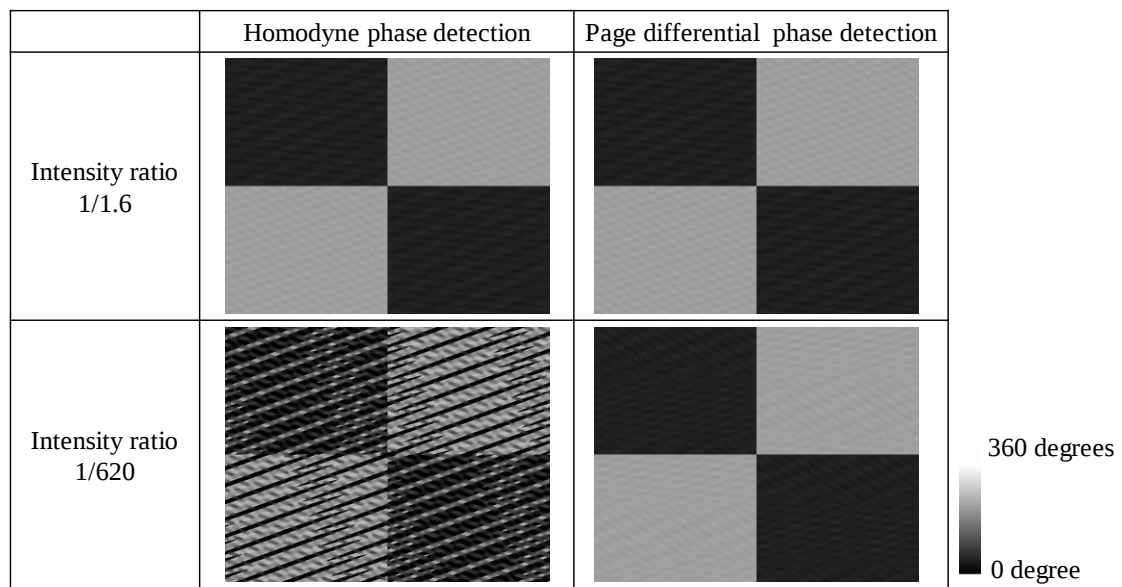


図 5.15 強度比が 1/1.6 と 1/620 のときの再生位相

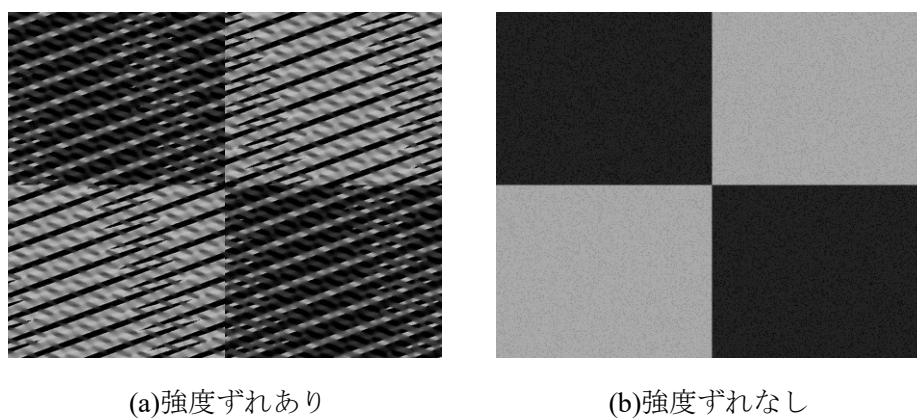
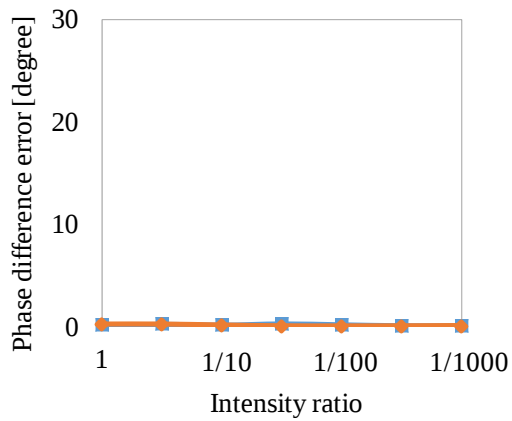
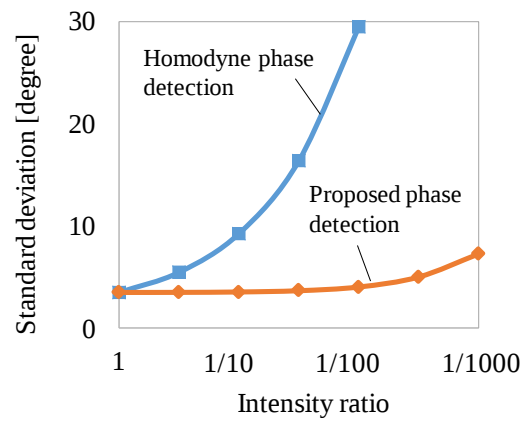


図 5.16 強度比が 1/620 のときのホモダイン位相検出法の再生位相

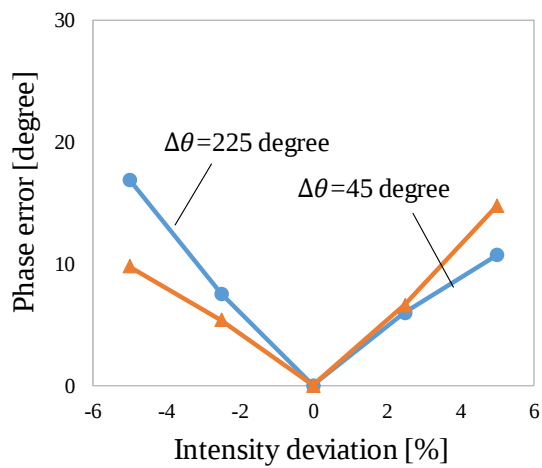


(a) 間隔ずれ

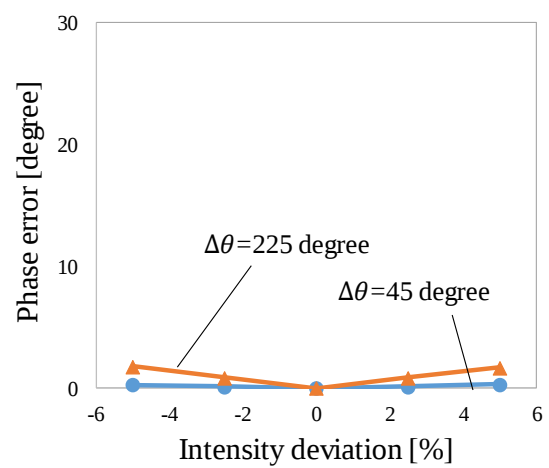


(b) 標準偏差

図 5.17 間隔ずれ、標準偏差の強度比依存性



(a) ホモダイン位相検出法



(b) ページ間差動位相検出法

図 5.18 カメラ 1 に入射する強度を変えたときの位相誤差

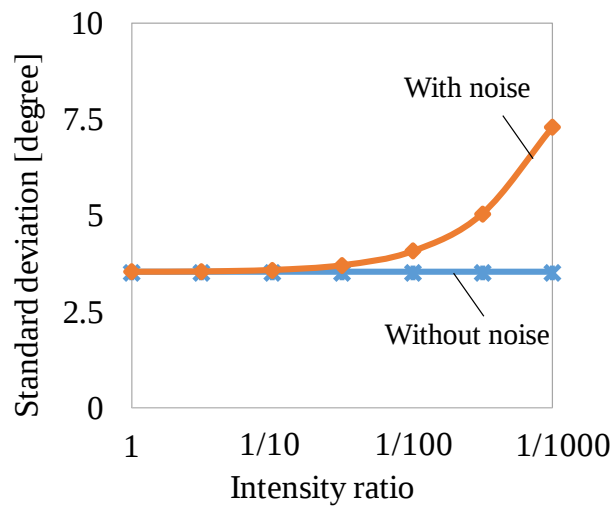


図 5.19 カメラノイズの影響

5.7.3 波面ずれの影響に関する検討

次に波面ずれに対するロバスト性について議論する。図 5.20 は、チルト収差が 2.5λ (peak to valley) のときの位相信号のシミュレーション結果である。ここで、チルト収差はオシレータ光に付加した。ホモダイン位相検出法は、チルト収差に大きく影響しており、信号位相がまったく測定できていないことがわかる。一方で、ページ間差動位相検出法は、ほとんど影響していないように見える。この結果は、図 5.11 の実験結果と同じであることがわかる。なお、図 5.11 のホモダイン位相検出法はチルト収差とは別にデフォーカス収差が入っているため直線状の干渉縞となっていないと考える。

図 5.21 は、ページ間差動位相検出法の間隔ずれ、標準偏差のチルト収差依存性のシミュレーション結果である。(a)が間隔ずれ、(b)が標準偏差を示している。(a)の縦軸は間隔ずれ、(b)の縦軸は標準偏差を示しており、(a)、(b)ともに横軸はオシレータ光に付加したチルト収差量を示している。この結果は、図 5.12 に示した結果と同じ結果であり、オシレータ光の位相変化は、間隔ずれ、標準偏差にほとんど影響しないことを確認した。ページ間差動位相検出法はページ間の位相信号の差を検出するため、オシレータ光の位相が影響しないことを確認した。

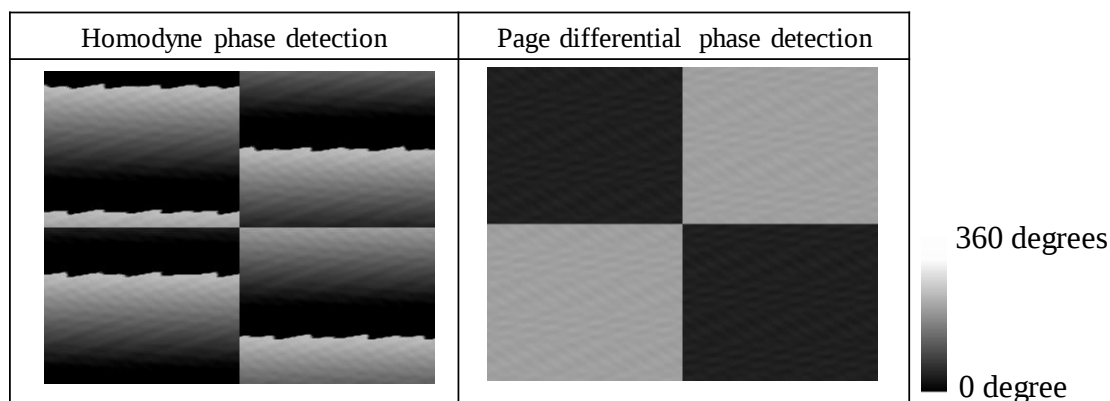


図 5.20 チルト収差が 2.5λ (peak to valley) のときの位相信号

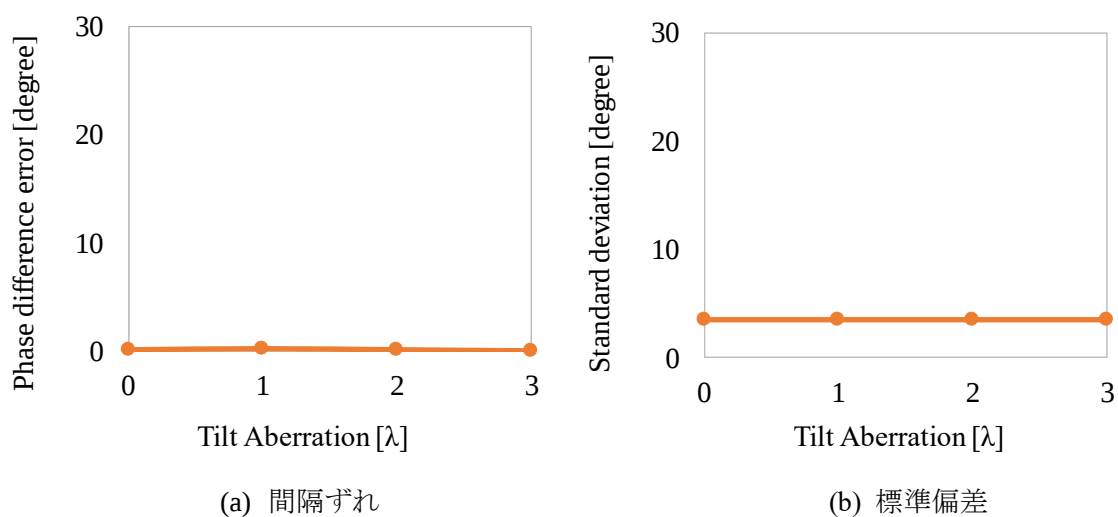


図 5.21 ページ間差動位相検出法の間隔ずれ、標準偏差のチルト収差依存性

5.7.4 光学部品のばらつきに関する検討

ホモダイン位相検出法およびページ間差動位相検出法は、カメラごとに再生光とオシレータ光の位相差を変えて干渉強度を検出し、検出強度をもとに再生位相を求めている。再生光とオシレータ光の位相差は、波長板により加えられている。特に、ページ間差動位相検出法では、位相可変素子を用いて動的に位相を変えている。ここでは、光学部品の付加位相ずれについて検討を行った。

まず、位相可変素子で付加する位相のずれの影響について検討した。図 5.22 は、間隔ずれの位相ずれ依存性を示している。縦軸は間隔ずれ、横軸は位相ずれを示している。市販の波長板の位相精度は、1%程度であるので、それを考慮すると間隔ずれが 1.2 度発生する。

次に、波長板の位相ずれの影響について検討した。図 5.23 は間隔ずれの波長板位相ずれ依存性を示している。(a)はホモダイン位相検出法、(b)はページ間差動位相検出法を示して

いる。また、(a)(b)ともに縦軸は間隔ずれ、横軸は位相ずれを示している。本結果より、ホモダイン位相検出法、ページ間差動位相検出法ともに、波長板の初期的な位相ずれは、間隔ずれに影響しないことがわかる。これは、波長板の初期的な位相ずれは、位相分布を一様にシフトさせるだけのため、間隔ずれには影響がなかったためである。ホログラフィックメモリに適用する場合はあまり問題とならないが、検査・計測で用いる場合には注意が必要である。

以上より、ページ間差動位相検出法に対して、光学部品の付加位相ずれが発生しても大きな影響はないと考える。

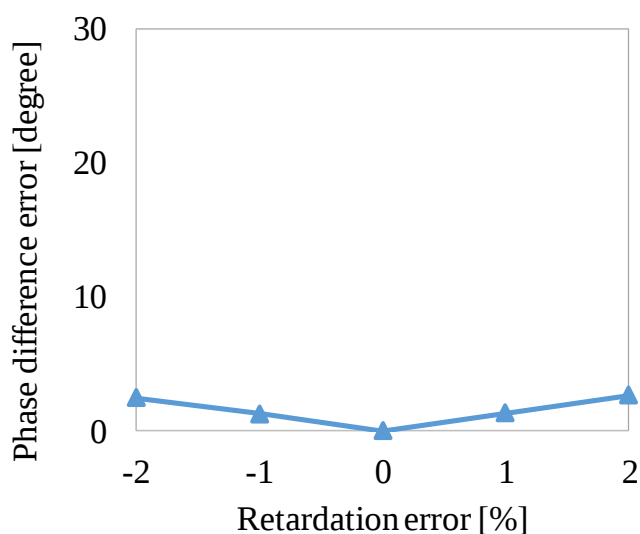


図 5.22 間隔ずれの位相可変素子位相ずれ依存性

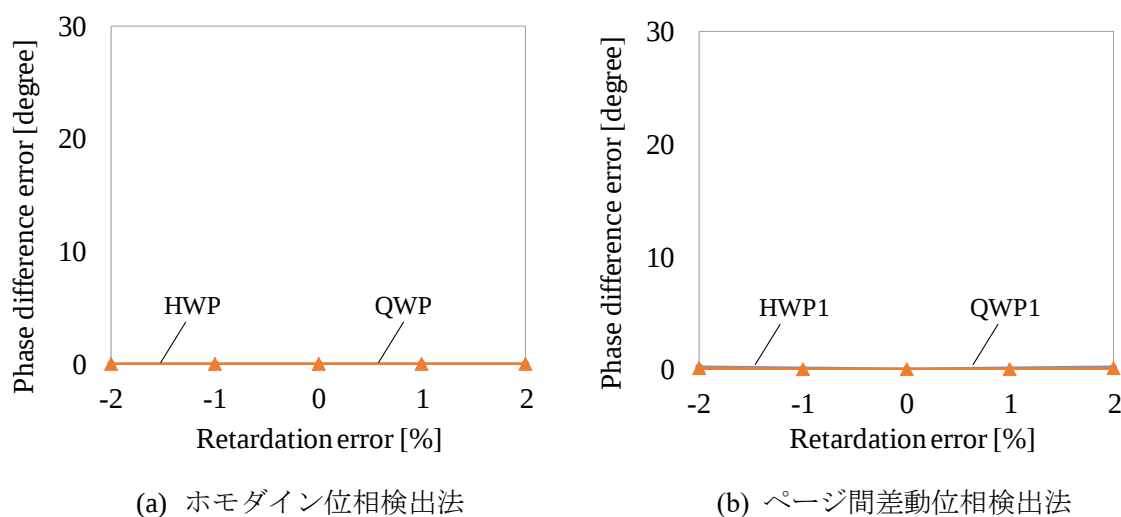


図 5.23 間隔ずれの波長板位相ずれ依存性

5.7.5 位相 4 値記録に関する検討

次に位相 4 値記録について見積りを行った。図 5.24 は、4 値の位相信号配置モデルを示している。縦軸は 4 値の信号の頻度、横軸は位相を示している。ここで、360 度の中に 4 値の信号を入れるには 90 度の等間隔で 4 つの信号を記録すべきと考えた。また、2 値の間隔は、 6σ 以上が必要と考え、ここでは 6σ として評価を行った。そして、今回は実験結果の方が、より実際のばらつきが考慮されていると考え、図 5.10、図 5.12 の結果をもとに検討を行った。なお、本検討では記録に伴うばらつきは、ホログラムドライブ内の信号処理で補償されると仮定した。

表 5.3 と表 5.4 は、間隔ずれと標準偏差の結果をそれぞれ示している。ここでは、これらの条件から 4 値記録の可能性を判断するとともに実現可能なオシレータ光に対する再生光の強度比を見積もった。まず、表 5.3 に示す間隔ずれについて説明する。初期的な間隔ずれは図 5.10(a)に示した強度比 1.6 のときの 3.4 度とした。また、図 5.5 の強度ずれと強度比を考慮した間隔ずれの変化量は、図 5.10(a)の強度比 1/160 の 0.8 度とした。そして、チルト収差 2.5λ (peak to valley)による間隔ずれの変化は、図 5.12(a)より 1.4 度とした。さらに、位相可変素子の位相制御ばらつきを、図 5.22 のシミュレーション結果から、間隔ずれの変化 1.2 度と考えた。この 4 つの 2 乗平均平方根から、間隔ずれを 3.9 度と見積もった。

次に、表 5.4 に示す標準偏差について説明する。まず、許容される標準偏差を見積もる。2 つの位相信号の理想的な間隔は 90 度であるが、間隔ずれが 3.9 度あるため、実際の間隔は 86.1 度となる。これが 6σ であると仮定すると、許容される標準偏差 σ は、14.4 度となる。次に初期的な標準偏差は、図 5.10(b)より、11.2 度となる。図 5.25 は、図 5.12(b)の結果を標準偏差の変化量として示した図である。縦軸は標準偏差の変化量、横軸はチルト収差量である。この結果から、チルト収差 2.5λ (peak to valley)による標準偏差の増加分は 5.8 度とした。

以上の結果をもとに、強度ずれと強度比で許容される標準偏差の増加分は 6.9 度となると見積もった。この結果より、4 値の位相記録が可能であることを明確にした。次に実現可能なオシレータ光に対する再生光の強度比を見積もった。

図 5.26 は、図 5.10(b)の結果を標準偏差の変化量として表した図である。縦軸は標準偏差の変化量、横軸はオシレータ光に対する再生光の強度比を示している。図 5.26 より、標準偏差の変化量が 6.9 度は、オシレータ光に対する再生光の強度比が 1/100 と見積もることができる。これは、記録媒体の回折強度が 1/100 でよいことに相当する。例えば、記録容量が記録媒体の M#の制約で決まっている場合、位相変調型ホログラフィックメモリの 4 値記録にページ間差動位相検出法を適用することで、(5.15)式より 10 倍の記録容量(ページ数)を記録できるようになる。そして、ここで再生時に露光時間とページ移動時間が同じであると仮定した場合、ページ間差動強度増幅法を適用することで露光時間が 1/100 倍となるので、ほぼページ移動時間のみとなり、2 倍の高速化を実現できる。

一方で、ページ間の移動中に位相変化が発生すると、その分だけ位相誤差が発生する。この影響を小さくするためには、ページ間の移動時間を短くすることが重要である。本研究で

は、ホログラフィックメモリの高速化技術について検討を行った。これについては第 7 章で説明する。

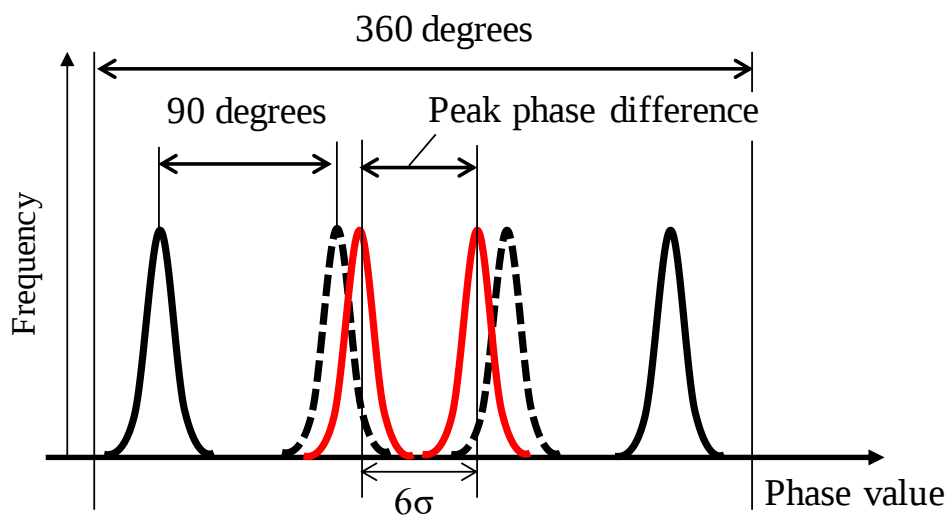


図 5.24 位相 4 値の位相信号配置モデル

表 5.3 間隔ずれの見積り

Factor		
(1)	Initial phase difference error	3.4 degrees
(2)	Intensity ratio (1/160)	0.8 degrees
(3)	Tilt aberration (2.5λ)	1.4 degrees
(4)	Phase shift error (1%)	1.2 degrees
Total($\sqrt{(1)^2+(2)^2+(3)^2+(4)^2}$)		3.9 degrees

表 5.4 標準偏差の見積り

Factor		
(0)	Allowable standard deviation	14.4 degrees
(1)	Initial standard deviation	11.2 degrees
(2)	Tilt aberration (2.5λ)	5.8 degrees
(3)	Intensity ratio ($\sqrt{(0)^2-(1)^2+(2)^2}$)	6.9 degrees

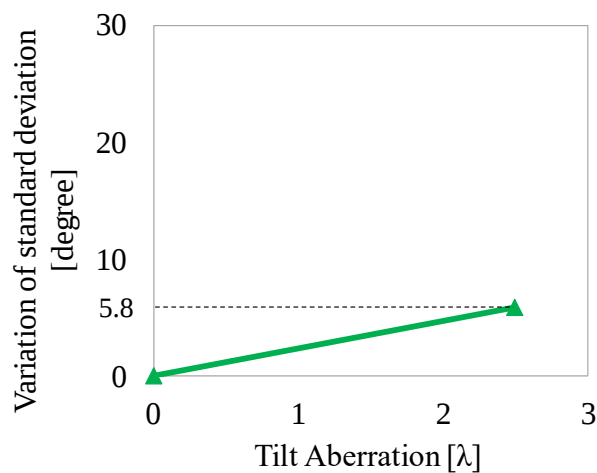


図 5.25 標準偏差変化量のチルト収差依存性

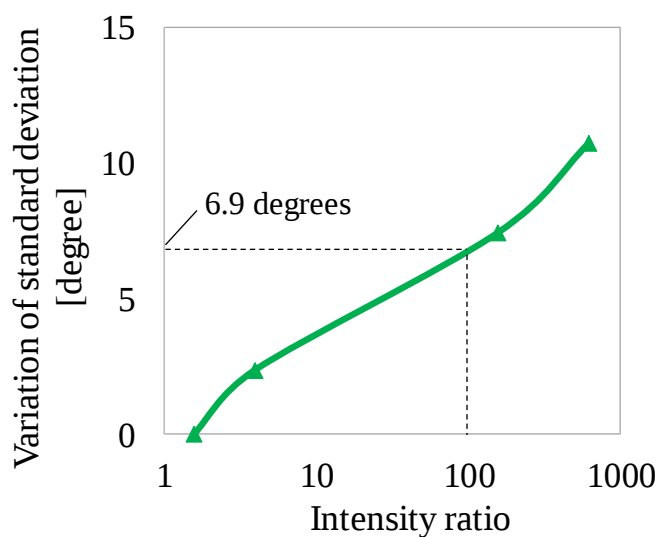


図 5.26 標準偏差変化量の強度比依存性

5.7.6 位相信号パターン

次に、位相信号パターンに関して検討を行った。図 5.27 は、図 5.4(b)に示した位相パターンとは異なる位相パターンの位相信号の測定結果を示している。位相パターン 1 は、1 ページ目の位相は、領域 A1 と領域 A3 の位相を 45 度、領域 A2 と領域 A4 の位相を 225 度とし、2 ページ目は中央領域のみを位相 180 度とし、周囲の領域を位相 0 度とした。本結果より、2 ページ目の中央領域の位相差 180 度の影響で、1 ページ目の位相パターンの中央領域の位相が反転していることがわかる。

また、位相パターン 2 では、1 ページ目の領域 A1、領域 A2、領域 A3、領域 A4 の位相を 135 度、225 度、45 度、315 度の 4 値、2 ページ目を 0 度とした。本結果より、4 つの再生位相が検出できていることがわかる。これより、4 値の位相検出の可能性を確認した。

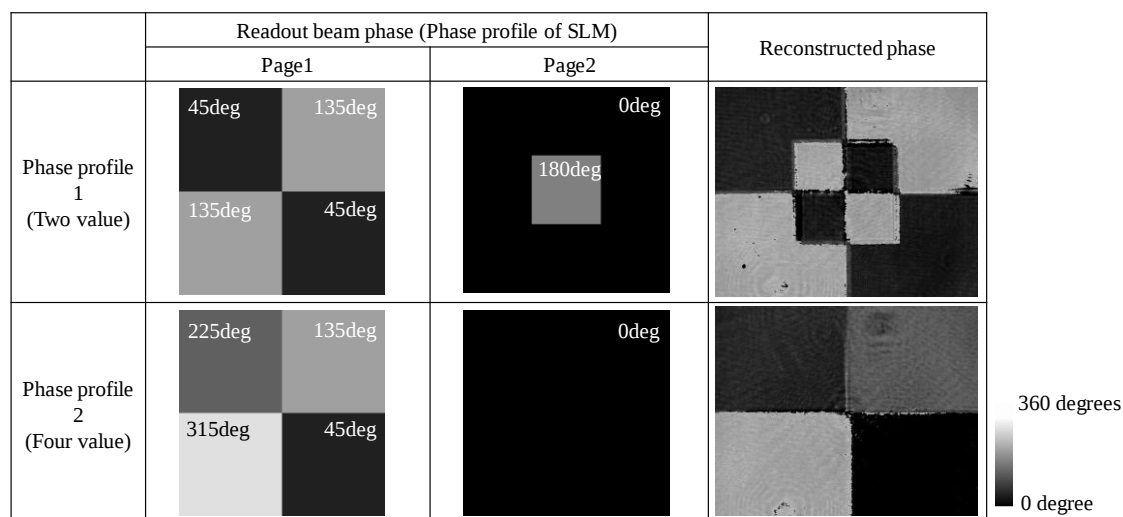


図 5.27 異なる信号位相パターン(実験)

5.8 まとめ

本章では、ホログラフィックメモリ向けにページ間の位相差を検出するページ間差動位相検出法を新たに提案した。ページ間差動位相検出法は、時間微分位相検出法をホログラフィックメモリの 2 次元データの検出に拡張した検出法である。本検討では、ホログラフィックメモリ特有のページ間の再生光の強度ずれの影響に対し、記録する位相を最適化することで、その影響を低減できることを実験で確認した。

そして、実験およびシミュレーションの結果をもとに位相多値記録の見積りを行い、強度ずれ、波面収差(チルト収差 2.5λ (peak to valley))、位相可変素子の位相ずれ(1%)、オシレータ光に対する再生光の強度比が 1/100、の条件で位相 4 値記録を実現できる目途を得た。さらに、従来に対し 10 倍の記録容量(ページ数)、記録再生速度を 2 倍の高速化を実現できる目途を得た。

第 6 章 ホログラフィックメモリのページ間差動強度増幅検出法の検討

6.1 はじめに

本章では、時間の概念を強度信号検出に拡張した、ページ間差動強度増幅検出法を強度変調型ホログラフィックメモリに適用することを提案する。オシレータ光の強度ずれや波面ずれに対して、ロバスト性が高いことを実験で確認する。また、信号増幅による大容量化、高速化の効果を示す。

図 6.1 は、信号処理フローと信号の名前を定義した図である。記録媒体から回折した再生光とオシレータ光の干渉光をカメラを用いて検出する。カメラからの検出信号を用いて強度増幅演算処理が行われ、増幅信号が出力される。

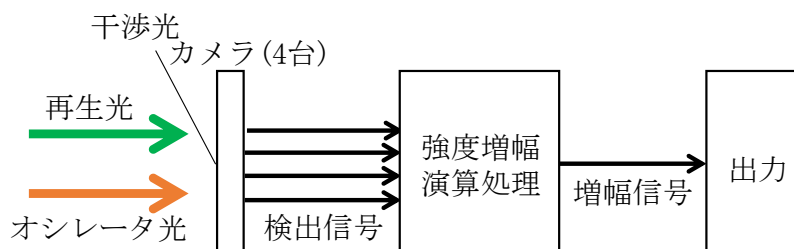


図 6.1 信号処理フローと信号の名前の定義

6.2 強度変調型ホログラフィックメモリ

ホログラフィックメモリは、大容量、高転送レートを実現できることから、データのアーカイバル媒体として期待されている。特に、近年のデジタルコンシューマー製品の普及により、ホログラフィックメモリの主要部品が高性能化、低価格化してきている。例えば、光源では BD(Blu-ray Disc™)が一般的になり、高速記録にも対応したため、高出力の青色半導体光源が使えるようになっている。また、光の変調については、プロジェクタなどに使われて

いる液晶素子などの高画素の変調素子が使えるようになってきた。さらに、カメラは高画素化が進んでおり、大容量のデータを扱えるようになってきた。今後、自動車の先進運転支援システムや自動運転システムに LiDAR(Light Detection and Ranging)が採用されるようになってくると、ガルバノミラーなどの角度制御素子が一般化し、性能が向上するとともに低価格化が進むと予想される。

液晶素子などの光学素子は強度変調が一般的であり、ホログラフィックメモリも強度変調から製品化されることが予想される。一方で、ホログラフィックメモリでは記録媒体の回折効率が課題となっており、記録密度を向上するにはホログラムからの弱い再生光を検出したいという要求がある。本章では、強度変調の弱い再生光をオシレータ光で増幅検出する新たな方式を提案する。この方式は、記録密度向上だけでなく、記録再生の高速化も実現することができる。

6.3 従来の光ディスクの信号増幅検出

従来の光ディスクでは、多層化による信号光の低下に対し、干渉を用いて増幅信号を得るという報告がなされている[63]。さらに、他の層からの迷光による外乱を抑制することができるとの報告もある[64]。

従来の光ディスクでは、データをビット単位で読み書きしており、本方式は1つの時間軸の信号を増幅するために提案された方式である。これを、2次元に拡張した場合については議論されていなかった。本研究では、本方式をホログラフィックメモリの2次元ページデータに適用した場合について検討した。以下、本方式をホモダイン強度増幅検出法と呼ぶ。

6.3.1 光学系

図 6.2 は、強度変調型のホログラフィックメモリの再生時の光路を示している。図 5.2 に示した位相変調型のホログラフィックメモリとの大きな違いは、SLM と検出系である。図 5.2 では、位相変調型の SLM および位相検出光学系であったが、図 6.2 ではそれが、強度変調型の SLM および強度増幅検出光学系になっている。

図 6.3 はホモダイン強度増幅検出法とページ間差動強度増幅検出法の光学系を示している。リレーレンズを透過した再生光とオシレータ光は、QWP を経て HBS に入射する。HBS は再生光とオシレータ光を均等に透過成分と反射成分に分ける。HBS を透過した再生光とオシレータ光は、PBS1 に入射する。ここで、PBS1 を透過した再生光とオシレータ光はカメラ 1 に入射し、PBS1 を反射した再生光とオシレータ光はカメラ 2 に入射する。一方、HBS を反射した再生光とオシレータ光は、HWP を経て、PBS2 に入射する。ここで、PBS2 を透過した再生光とオシレータ光はカメラ 3 に入射し、PBS2 を反射した再生光とオシレータ光

はカメラ 4 に入射する。4 つのカメラから得られた強度信号を演算することで、強度信号を増幅する。

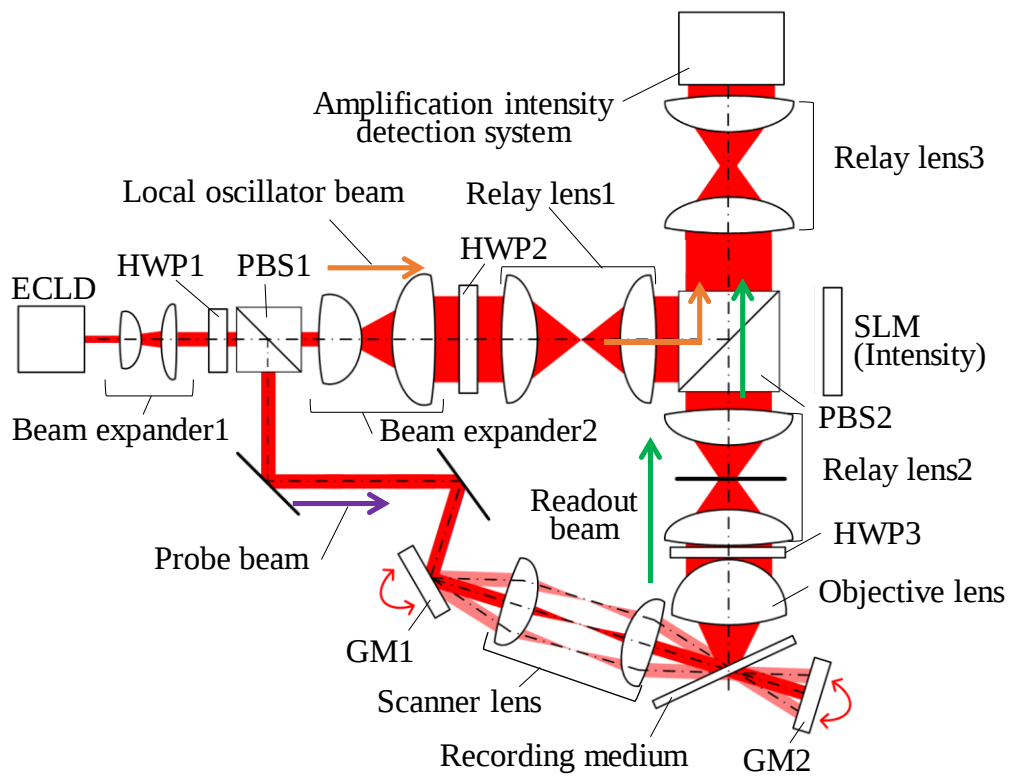


図 6.2 強度変調ホログラムドライブ(再生時)

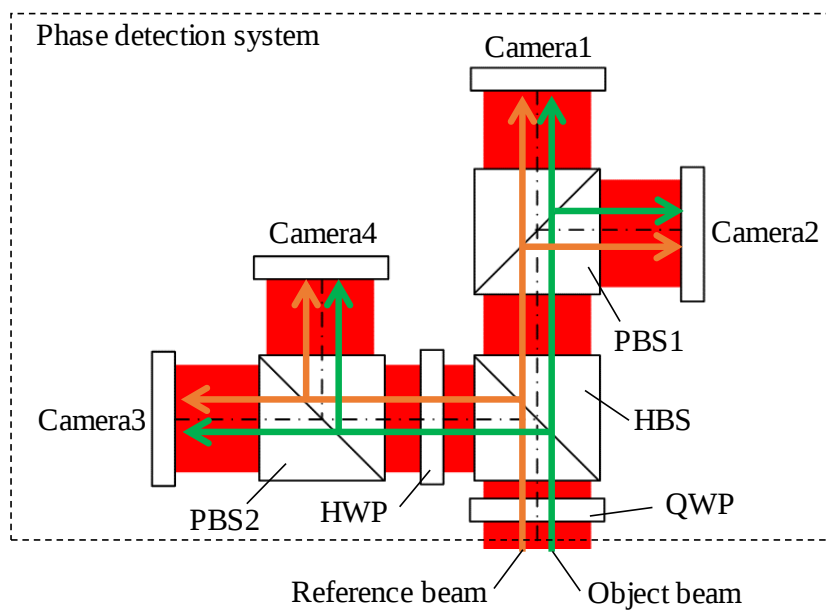


図 6.3 強度増幅検出光学系

6.3.2 増幅信号検出原理

ホモダイン強度増幅検出の原理についてジョーンズベクトルを用いて議論する。リレーレンズ3を出射した再生光とオシレータ光の電場 $E_o(x, y, P_n)$ を、

$$E_o(x, y, P_n) = \begin{pmatrix} A(x, y, P_n) \exp\{i\theta(x, y)\} \\ B(x, y) \exp\{i\phi(x, y)\} \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

とする。ここで $A(x, y, P_n)$ 、 $\theta(x, y)$ は再生光の振幅と位相、 $B(x, y)$ 、 $\phi(x, y)$ はオシレータ光の振幅と位相を示している。ここでは、強度変調なので再生ページに伴って、再生光の振幅が変化するとした。

ここで、カメラ1、カメラ2、カメラ3、カメラ4の検出強度 $I_{A1}(x, y, P_n)$ 、 $I_{A2}(x, y, P_n)$ 、 $I_{A3}(x, y, P_n)$ 、 $I_{A4}(x, y, P_n)$ は、

$$I_{A1}(x, y, P_n) = \frac{1}{4} [A(x, y, P_n)^2 + B(x, y)^2 + 2A(x, y, P_n)B(x, y) \sin\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\}] \quad (6.2)$$

$$I_{A2}(x, y, P_n) = \frac{1}{4} [A(x, y, P_n)^2 + B(x, y)^2 - 2A(x, y, P_n)B(x, y) \sin\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\}] \quad (6.3)$$

$$I_{A3}(x, y, P_n) = \frac{1}{4} [A(x, y, P_n)^2 + B(x, y)^2 + 2A(x, y, P_n)B(x, y) \cos\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\}] \quad (6.4)$$

$$I_{A4}(x, y, P_n) = \frac{1}{4} [A(x, y, P_n)^2 + B(x, y)^2 - 2A(x, y, P_n)B(x, y) \cos\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\}] \quad (6.5)$$

と示すことができる。ここで、カメラ間の差動信号を演算することで、定数項を無くし、位相差 $\theta(x, y) - \phi(x, y)$ の $\sin$ 成分、 $\cos$ 成分を得ることができる。

$$I_{A1}(x, y, P_n) - I_{A2}(x, y, P_n) = 2A(x, y, P_n)B(x, y) \sin\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\} \quad (6.6)$$

$$I_{A3}(x, y, P_n) - I_{A4}(x, y, P_n) = 2A(x, y, P_n)B(x, y) \cos\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\} \quad (6.7)$$

そして、(6.6)式、(6.7)式を用いて、位相差 $\theta(x, y) - \phi(x, y)$ を消去することで増幅信号を得ることができる。

$$\begin{aligned} I_{AH} &= \sqrt{(I_1(x, y, P_n) - I_2(x, y, P_n))^2 + (I_3(x, y, P_n) - I_4(x, y, P_n))^2} \\ &= A(x, y, P_n)B(x, y) \quad (6.8) \end{aligned}$$

ここで、再生光、オシレータ光の強度と振幅を、

$$I_r = A^2 \quad (6.9)$$

$$I_o = B^2 \quad (6.10)$$

とする。ここで、 I_r 、 A は再生光の強度と振幅、 I_o 、 B はオシレータ光の強度と振幅を示している。ここで、オシレータ光の振幅 B が再生光の振幅 A の k 倍だった場合、(6.8)式は、

$$I_{AH} = kI_r \quad (6.11)$$

と示すことができる。これは再生光の強度の k 倍の信号を検出したことに相当する。一方で、ホモサイン位相検出法と同様に、カメラ間の差動信号を検出するため、例えばカメラの感度ずれ、ほこり、汚れなどによる検出信号の強度ずれが発生すると、(6.6)式、(6.7)式に定数項($A(x, y, P_n)^2$ 、 $B(x, y)^2$)が残留するため、増幅信号に影響してしまう。特に、再生光の強度を増幅する場合、オシレータ光の強度を再生光の強度よりも非常に大きくするため、オシレータ光の強度ずれが増幅信号に大きく依存する。

6.4 ページ間差動強度増幅検出法の原理

次に、ページ間差動強度増幅検出法について説明する。ページ間差動増幅検出方式は、ホモサイン強度増幅検出と同じ光学系を用いることが特徴である。

ここで、 n ページと $n+1$ ページのカメラ1の検出強度差 $\Delta I_1(x, y, P_n)$ は、(6.2)式より、

$$\begin{aligned} \Delta I_1(x, y, P_n) &= I_1(x, y, P_1) - I_1(x, y, P_2) \\ &= \frac{1}{4}(A(x, y, P_1)^2 - A(x, y, P_2)^2) + \frac{1}{2}B(x, y)\{A(x, y, P_1) - A(x, y, P_2)\}\sin\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\} \end{aligned} \quad (6.12)$$

となる。同様にして、 n ページと $n+1$ ページのカメラ2、カメラ3、カメラ4の検出強度差 $\Delta I_2(x, y, P_n)$ 、 $\Delta I_3(x, y, P_n)$ 、 $\Delta I_4(x, y, P_n)$ は、(6.3)式、(6.4)式、(6.5)式より、

$$\Delta I_2(x, y, P_1) = \frac{1}{4}(A(x, y, P_1)^2 - A(x, y, P_2)^2) - \frac{1}{2}B(x, y)\{A(x, y, P_1) - A(x, y, P_2)\}\sin\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\} \quad (6.13)$$

$$\Delta I_3(x, y, P_1) = \frac{1}{4}(A(x, y, P_1)^2 - A(x, y, P_2)^2) + \frac{1}{2}B(x, y)\{A(x, y, P_1) - A(x, y, P_2)\}\cos\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\} \quad (6.14)$$

$$\Delta I_4(x, y, P_1) = \frac{1}{4}(A(x, y, P_1)^2 - A(x, y, P_2)^2) - \frac{1}{2}B(x, y)\{A(x, y, P_1) - A(x, y, P_2)\}\cos\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\}$$

$$\emptyset(x, y)\} \quad (6.15)$$

となる。そして、次に定数項 $(A(x, y, P_1)^2 - A(x, y, P_2)^2)$ を消去するため、以下の演算を行う。

$$\begin{aligned} \Delta I_{12}(x, y, P_1) &= \Delta I_1(x, y, P_1) - \Delta I_2(x, y, P_1) \\ &= B(x, y)\{A(x, y, P_1) - A(x, y, P_2)\}\sin\{\theta(x, y) - \emptyset(x, y)\} \quad (6.16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta I_{34}(x, y, P_1) &= \Delta I_3(x, y, P_1) - \Delta I_4(x, y, P_1) \\ &= B(x, y)\{A(x, y, P_1) - A(x, y, P_2)\}\sin\{\theta(x, y) - \emptyset(x, y)\} \quad (6.17) \end{aligned}$$

そして、(6.16)式と(6.17)式から位相項 $(\theta(x, y) - \emptyset(x, y))$ を消去すると、

$$\begin{aligned} I_{AP}(x, y, P_1) &= \sqrt{(\Delta I_{12}(x, y, P_1))^2 + (\Delta I_{34}(x, y, P_1))^2} \\ &= B(x, y)|A(x, y, t_1) - A(x, y, t_2)| \quad (6.18) \end{aligned}$$

を得る。

図 6.4 と表 6.1 は、 n ページ目と $n+1$ ページ目の再生光の強度と増幅後の検出信号の関係を示している。なお、ここでは、再生光の強度を I_r または 0、オシレータ光の強度を I_o とした。また、再生光の強度が I_r のとき、オシレータ光の振幅が再生光の振幅の k 倍とした。図 6.4(a)、(b)は、 n ページと $n+1$ ページの強度信号を示しており、図 6.4(c)は増幅信号を示している。

(6.18)式より、 n ページ目と $n+1$ ページ目の再生光の強度が同じ場合には、検出信号は 0 となる。一方、 n ページ目と $n+1$ ページ目の再生光の強度が異なる場合には、増幅された信号が検出される。例えば、 n ページ目の再生光の強度が I_r 、 $n+1$ ページ目の再生光の強度が 0 のとき、再生光の強度の k 倍の信号 kI_r が検出される。また、 n ページ目の再生光の強度が 0、 $n+1$ ページ目の再生光の強度が I_r のとき、同様に再生光の強度の k 倍の信号 kI_r が検出される。一方で、ページ目の再生光の強度が 0、 $n+1$ ページ目の再生光の強度が 0 のとき、またはページ目の再生光の強度が I_r 、 $n+1$ ページ目の再生光の強度が I_r のときは、強度信号が検出されない。また、ページ間差動強度増幅検出法は、位相項を消去したため、再生光、オシレータ光の波面に依存しない特徴がある。

以上のように、ページ間差動強度増幅検出法は、ページ間の再生光の強度の差に応じて、増幅された信号を検出する検出方式である。

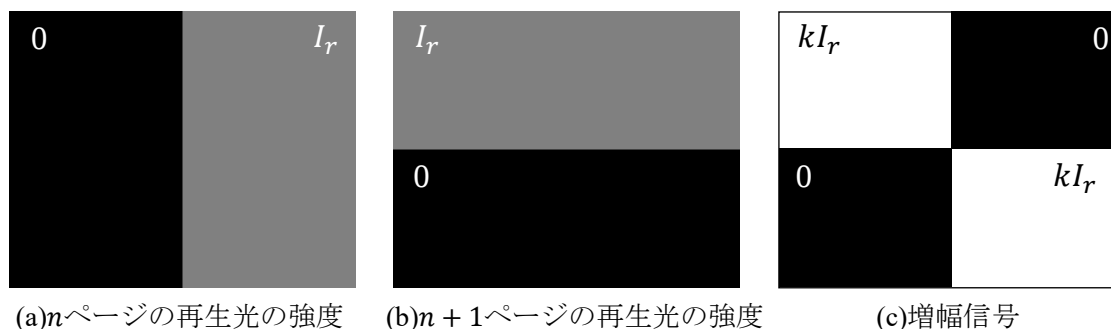


図 6.4 再生光の強度と検出信号の関係

表 6.1 再生光の強度と検出信号の関係

		$I_{AP}(x, y, P_2)$	
		I_r	0
$I_{AP}(x, y, P_1)$	I_r	0	kI_r
	0	kI_r	0

6.5 原理検証および評価方法

6.5.1 実験系

本検討では、ページ間差動強度増幅検出法の原理検証を行った。図 6.5 は、原理検証の実験系を示している。図 6.5(a)は、原理検証の光学系、(b)は強度変調用のマスクのパターンを示している。図 6.6 は、マスクで生成した再生光の強度パターンを示している。(a)は 1 ページ目、(b)は、2 ページ目の再生光の強度パターンを示している。ここでは、図 6.5(b)のマスクを使っているので図 6.6 (a)の領域 A1 と領域 A3 は、強度分布を除いて同じ強度となっている。また、領域 A2、領域 A4 はマスクで遮光されている。そして、図 6.6(b)は再生光が全て遮光されている。

図 6.7 は、オシレータ光の強度分布をカメラで検出した画像である。カメラ間の強度分布ずれが発生していることがわかる。本検討では、この強度分布の条件で測定を行った。

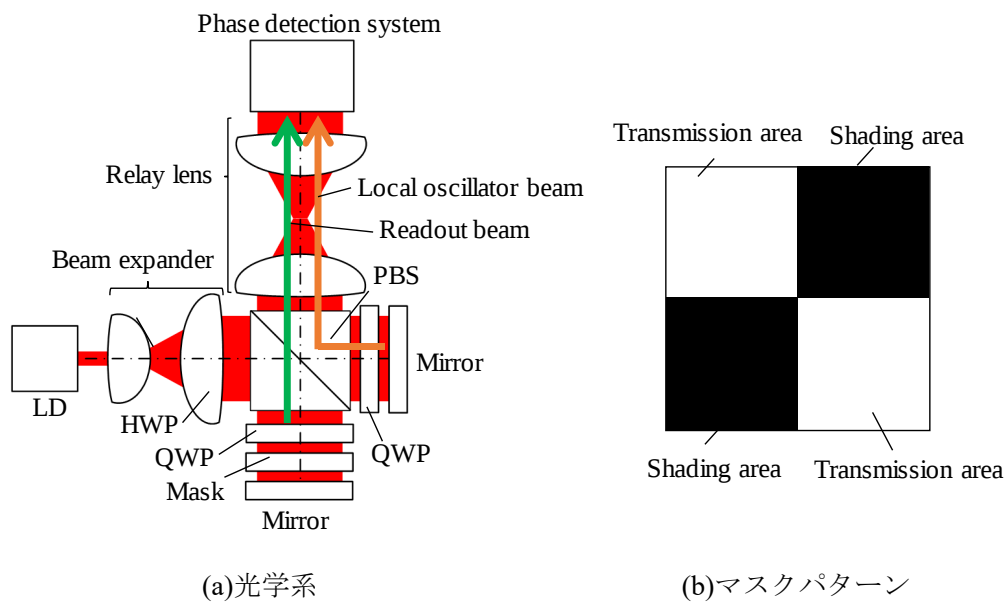
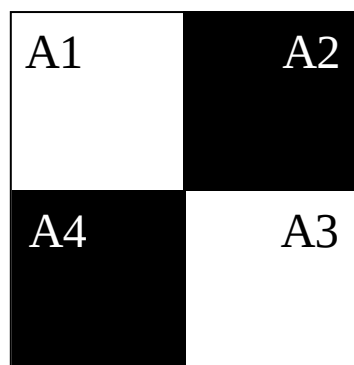
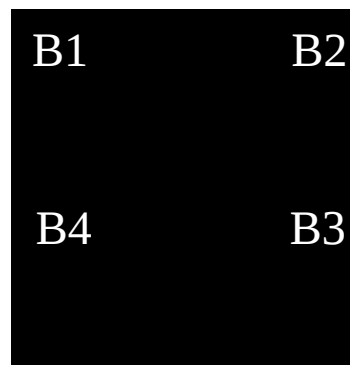


図 6.5 原理検証の実験系



(a)1 ページ目の再生光の強度



(b)2 ページ目の再生光の強度

図 6.6 再生光の強度

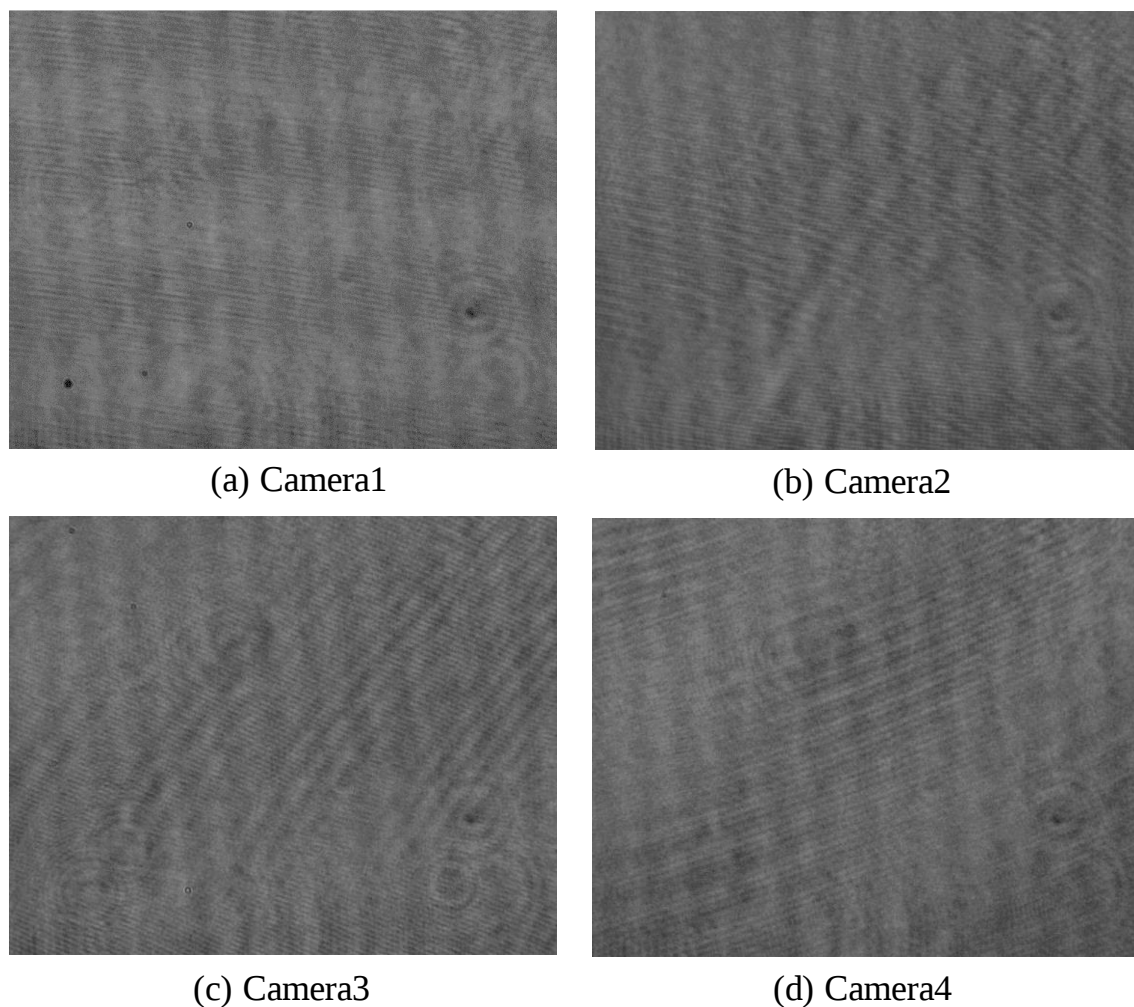


図 6.7 オシレータ光の強度分布

6.5.2 強度増幅検出の原理検証

図 6.8 は、ページ間差動強度増幅検出法の測定結果である。なお、再生光とオシレータ光の強度を 1 : 1 にした結果である。ここでは、白色が強い信号強度で、黒色が弱い信号強度を示している。図 6.6 より、領域 A1、領域 A3 が灰色となっており、領域 A2、領域 A4 が黒色になっていることから、想定した信号が検出されていることがわかる。本結果より、ページ間差動強度増幅検出法が強度検出可能であることを確認した。なお、以降、灰色で示す信号が検出されている領域を強度領域、黒色で示す信号が検出されている領域をゼロ強度領域と呼ぶ。

次に、ページ間差動強度増幅検出法の増幅率の検証を行った。図 6.9 は、オシレータ光、再生光の振幅比と増幅率の関係の測定結果である。縦軸は、測定した信号の増幅率を示している。また、横軸はオシレータ光に対する再生光の振幅比を示している。本図より、オシレ

ータ光、再生光の振幅比と増幅率はほぼ同じとなっていることがわかる。

以上の検討より、ページ間差動強度増幅検出法のページ間の強度差の検出および信号増幅検出が可能であることを実験で確認した。

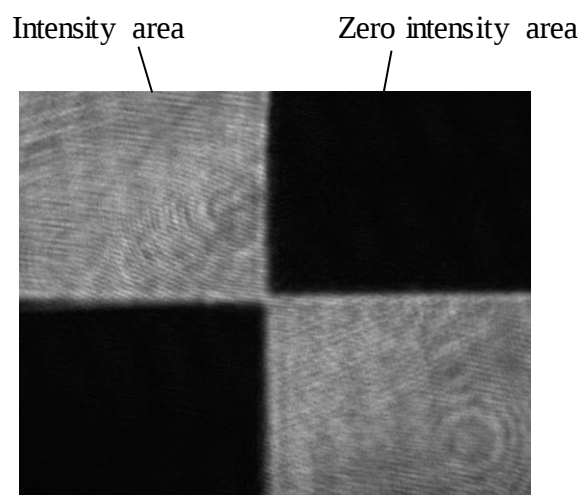


図 6.8 ページ間差動増幅検出法の測定結果

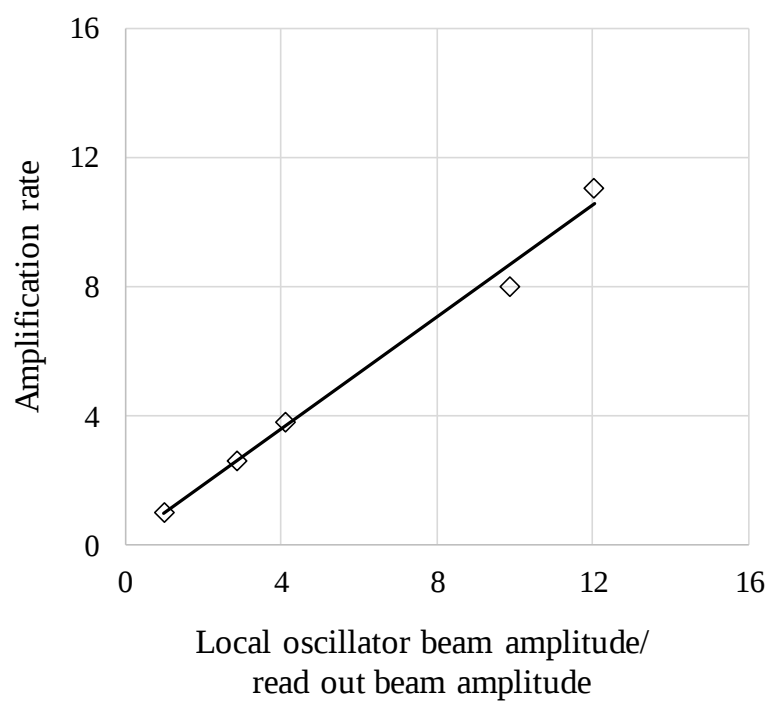


図 6.9 オシレータ光と再生光の振幅比と増幅率の関係の測定結果

6.5.3 評価方法

次に、定量評価について説明する。図 6.10 は、評価方法を示している。(a)は、評価した領域を示している。本評価では、水平 590 画素、垂直 462 画素の 4 領域を使って評価を行った。全領域を使わなかった理由は、図 6.5(a)のリレーレンズの収差性能が悪く、マスクの境界部からの回折光の影響があったためである。なお、実際のホログラフィックメモリの光学では、SLM の 1 画素精度で検出するため、リレーレンズは最適設計される点を考慮すると実用上では問題とならないと判断する。

図 6.10(b)は、再生光の強度のヒストグラムのイメージを示している。2 つの分布は、強度領域とゼロ強度領域を示している。ここで、 Av_1 、 σ_1 は、強度領域の平均値と標準偏差を示している。また、 Av_0 、 σ_0 は、ゼロ強度領域の平均値と標準偏差を示している。また、2 つの分布の間隔 d は、

$$d = Av_1 - Av_0 \quad (6.19)$$

で示される。ここで、2 つの分布が分離されるためには、間隔 d が 2 つの分布のばらつき($3(\sigma_0 + \sigma_1)$)よりも大きいければよい。また、平均値、標準偏差は再生光の光量によって変わってしまうので、平均値 Av_1 で標準化した 2 つの信号の分離量を表す評価指標として、

$$E = \frac{d - 3(\sigma_0 + \sigma_1)}{Av_1} \quad (6.20)$$

を用いた。ここでは、本指標を分離の割合と呼ぶ。分離の割合が 0 より大きければ、2 つの分布が分離されていることになる。この考え方は、第 5 章の位相検出の評価指標と同様の考え方である。図 6.11 は、ページ間差動強度増幅検出法のヒストグラムを示している。ここでは、再生光とオシレータ光の強度を 1 : 1 とした。本図より、強度領域の強度信号の平均値 Av_1 は 129.4、標準偏差 σ_0 は 17.7 であった。また、ゼロ強度領域の強度信号の平均値 Av_0 は 4.8、標準偏差 σ_0 は 2.0 であり、分離の割合 E は 0.5 であった。本図で、強度領域の標準偏差 σ_1 とゼロ強度領域の標準偏差 σ_0 が大きく異なるのは、再生光の強度分布ずれが影響している。

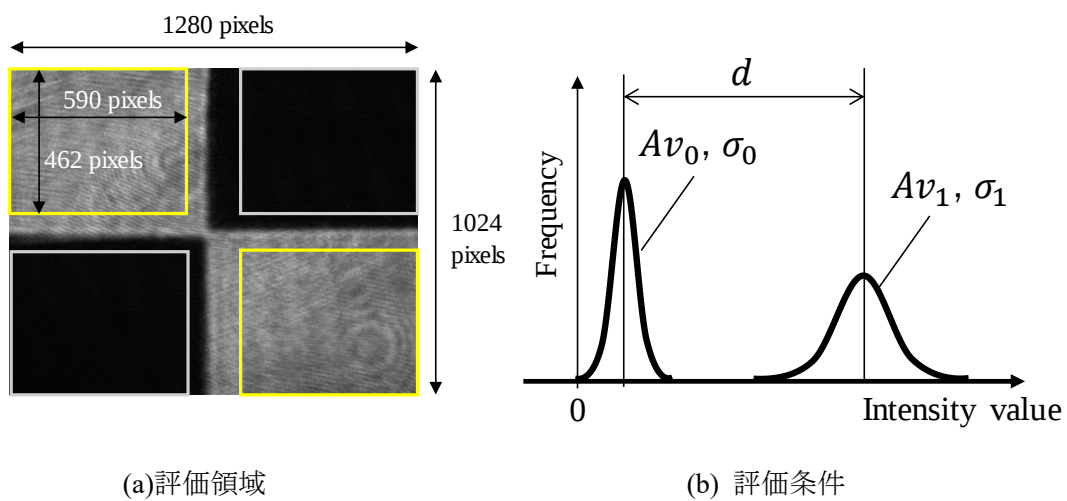


図 6.10 評価方法

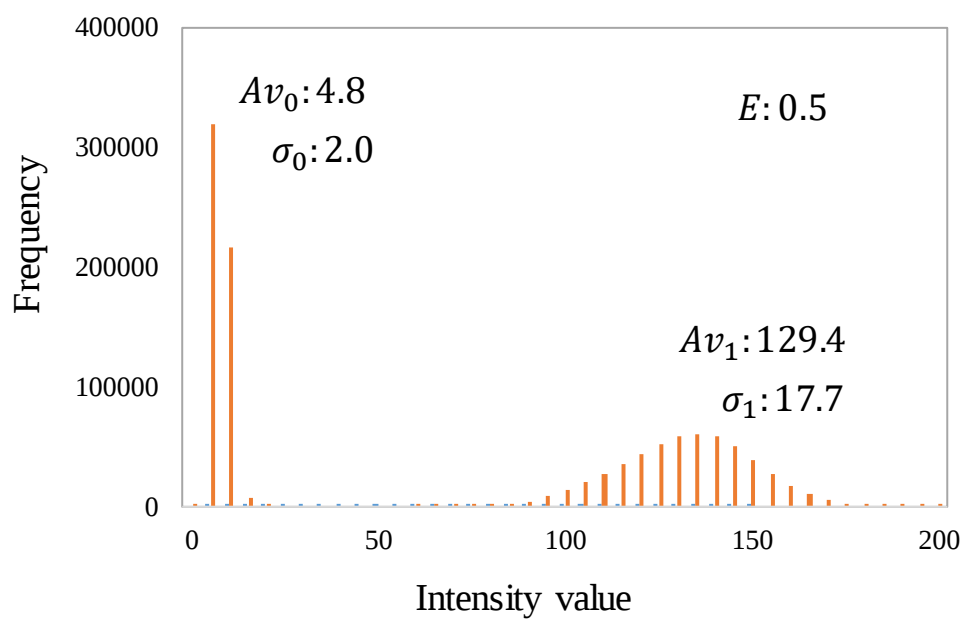


図 6.11 ページ間差動強度増幅検出法で得られた結果のヒストグラム

6.6 耐環境性に関する実験

本研究では、ページ間差動強度増幅検出法の強度ずれ、波面ずれに対するロバスト性の原理検証を行った。

6.6.1 強度ずれの影響

上述したように、プローブ光に対する再生光の強度比を小さくできると、記録容量の観点、記録・再生速度の観点で非常に有利となる。そこで、本研究では、再生光の強度を小さくしたときの影響について検討を行った。

図 6.12 は、再生光の強度依存性を示している。ここには、左から再生光を直接検出した場合、ホモダイン強度増幅検出法、ページ間差動強度増幅検出法の場合を示している。また、図 6.12 の下の行は、上の行の再生光の強度を 1 としたときの再生光の強度比を示している。ここで、直接検出とは、オシレータ光を使わずにカメラで直接検出した結果を示している。なお、直接検出の場合は、1 つのカメラで検出することから、ホモダイン強度増幅検出法、ページ間差動強度増幅検出法に対し、4 倍の再生強度で信号を検出している。さらに、再生光を直接検出した場合には、カメラのゲインを変えることにより、検出強度を大きくした。そして、ホモダイン強度増幅法およびページ間差動強度増幅法では、上の行は再生光とオシレータ光を 1:1 とした場合を示しており、下の行は、再生光のみを 1/145 の強度にしている。

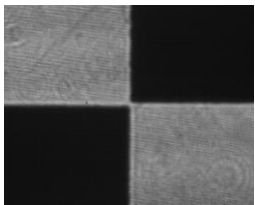
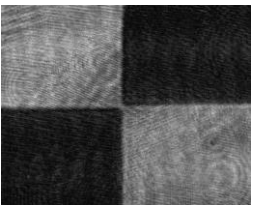
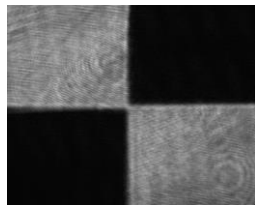
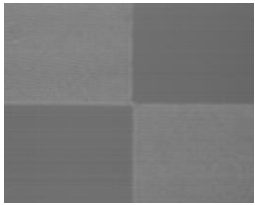
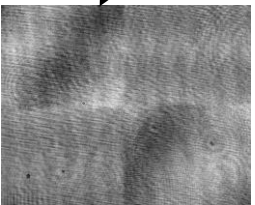
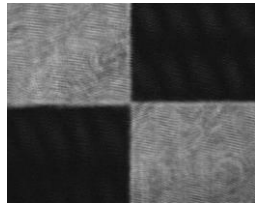
	Read out beam	Interferometric amplification	
		Homodyne intensity amplification	Page differential intensity amplification
Read out beam intensity rate 1			
Read out beam intensity rate 1/145			

図 6.12 再生光の強度依存性

本図より、再生光の直接検出の S/N が低下してしまった状態であっても、ページ間差動強度増幅法は、信号を分離できていることがわかる。一方で、ホモダイン強度増幅法は、信号を分離できていないことがわかる。さらに、矢印に示す部分に波面のずれの影響が確認できる。

図 6.13 は、再生光の強度分布を示している。(a)は、強度分布の位置を示している。そして、(b)、(c)、(d)は、再生光の直接検出、ホモダイン強度増幅検出、ページ間差動強度増幅検出の強度を示している。(b)、(c)、(d)では、(a)に示した 320 画素目の列の信号を抜き出した。なお、各信号ともに強度領域が 1 となるように標準化した。

直接検出は、強度比が 1 の場合、強度領域、ゼロ強度領域で信号が完全に分離できていることがわかる。なお、強度領域で信号が変動しているが、これは再生光のもともとの強度分布ずれの影響である。一方、強度比が $1/145$ の場合、カメラのゲイン増加に伴い S/N が劣化してしまうことがわかる。

ホモダイン強度増幅検出は、再生信号強度比が 1 の場合、強度領域、ゼロ強度領域で信号が分離できているが、ゼロ強度領域に大きなノイズが発生している。また、再生信号強度比が $1/145$ の場合には、強度領域、ゼロ強度領域ともに信号が検出できていないことがわかる。これらは、カメラ間のオシレータ光の強度ずれに起因すると考える。

ページ間差動強度検出法は、強度比が 1 の場合には、強度領域、ゼロ強度領域で信号が完全に分離できていることがわかる。特に、ゼロ強度領域は、直接検出と同じく、信号強度が非常に小さくなっていることがわかる。さらに、再生信号強度比が $1/145$ の場合でも、強度領域、ゼロ強度領域で信号が分離できていることがわかる。そして、増幅前後での強度領域の 2 本の線が重なっていることから、強度増幅に伴って信号が大きく変化していないことがわかる。

図 6.14 は、分離の割合の強度比依存性を示している。縦軸は分離の割合、横軸はオシレータ光に対する再生光の強度比を示している。この結果より、ホモダイン強度増幅検出では、強度比が $1/10$ でも分離の割合がゼロとなってしまうことがわかった。このため、ホモダイン強度増幅法は、オシレータの強度が均一な場合にのみ効果を発揮し、本実験のような、オシレータ光の強度分布がずれが大きい場合には増幅方式として効果が期待できないことがわかった。それに対し、ページ間差動強度増幅検出法は、再生光の光量を低下しても、直接検出よりも分割の割合が大きいことがわかった。

以上より、ページ間差動強度増幅検出法は、直接検出、ホモダイン強度増幅検出よりも、弱い再生信号を増幅検出できることを実験で確認した。

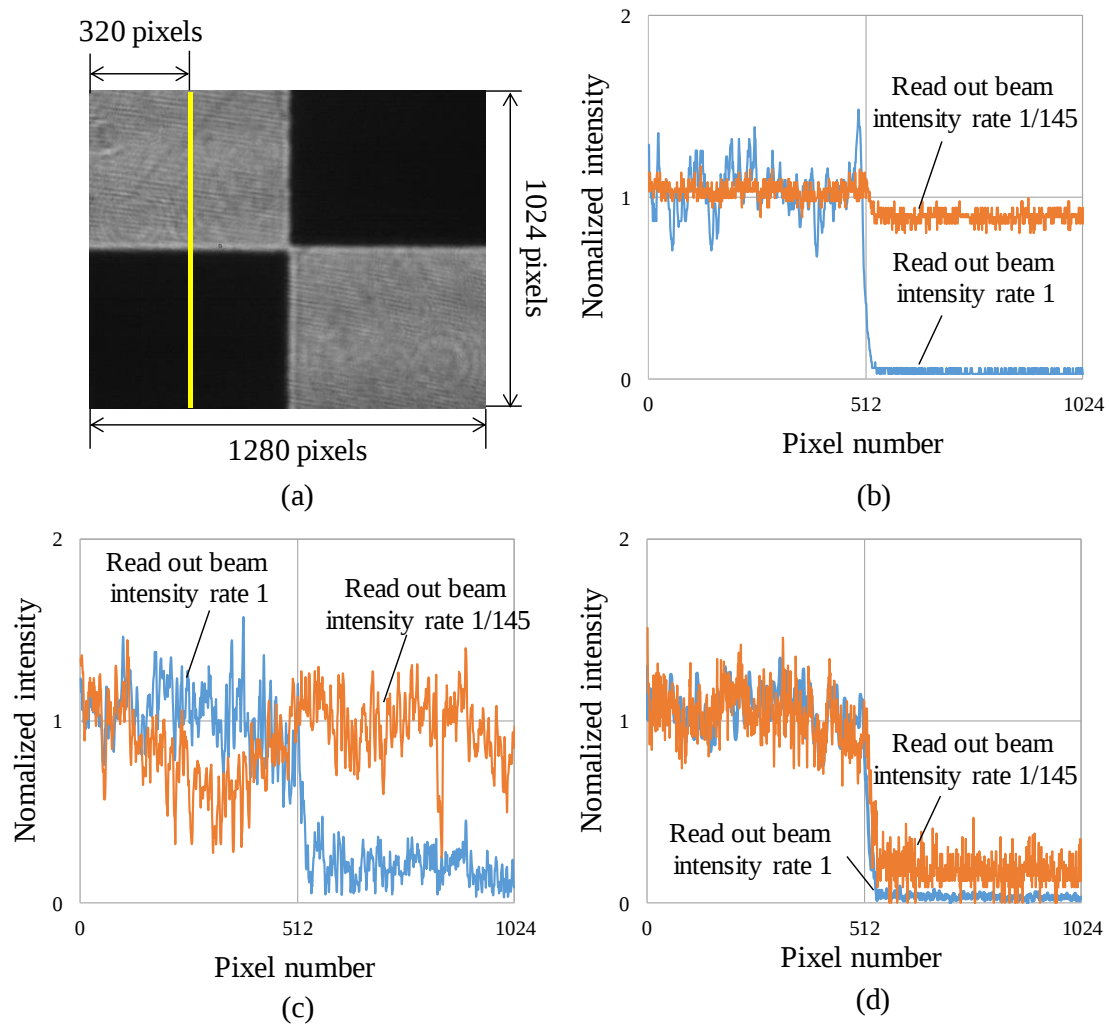


図 6.13 再生光の強度分布

(a)強度分布の位置、(b)再生光の直接検出、(c)ホモダイン強度増幅検出法、(d)ページ間差動強度増幅検出法

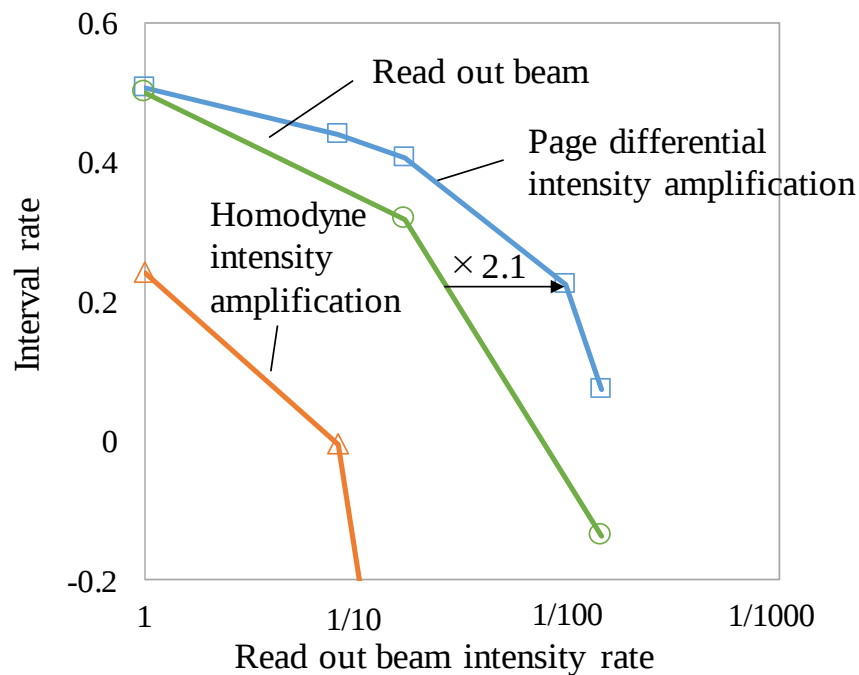


図 6.14 分離の割合の再生光強度比依存性

6.6.2 波面ずれの影響

次に波面ずれに対するロバスト性について検討を行った。図 6.15 は、チルト収差が 0λ と 2λ (peak to valley)のときのページ差動強度増幅検出法の再生光の強度を示している。なお、チルト収差は、図 6.5(a)の光学系内に配置したオシレータ光を反射するミラーを傾けて発生させた。ここで、本実験のオシレータ光に対する再生光の強度比を $1/100$ とした。左側が再生光の強度、右側がホモダイン位相検出法で検出した位相を示している。本図から、再生光の強度は波面ずれにほとんど依存していないように見える。

図 6.16 は、ページ間差動強度増幅検出法の分離の割合のチルト収差依存性を示したものである。縦軸は分離の割合、横軸はチルト収差依存性を示している。この結果から、チルト収差対して、分離の割合が低下しないことがわかる。

以上より、ページ間差動強度増幅検出法は検出原理どおり、オシレータ光の波面ずれに影響しないことを実験で確認した。

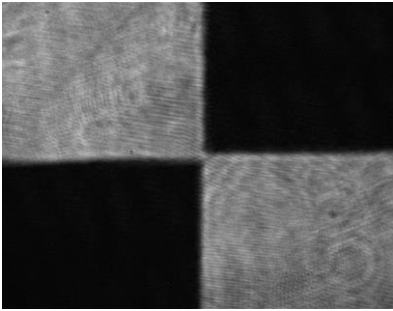
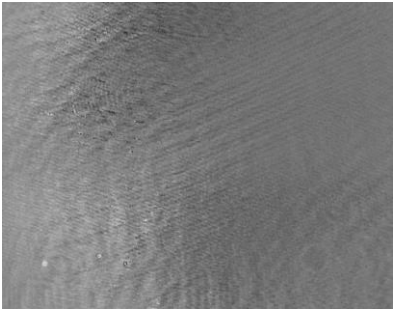
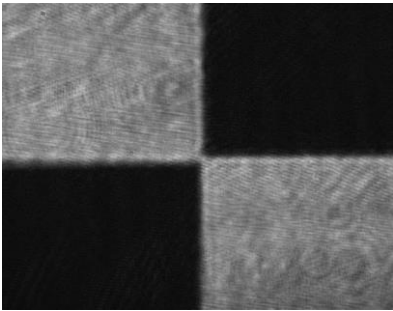
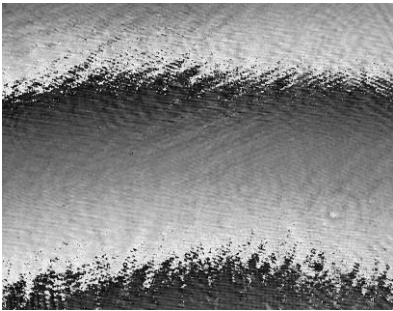
	Intensity amplification	Phase profile
Tilt aberration 0λ (Peak to valley)		
Tilt aberration 2λ (Peak to valley)		

図 6.15 チルト収差が 0λ と 2λ (peak to valley)のときの再生光

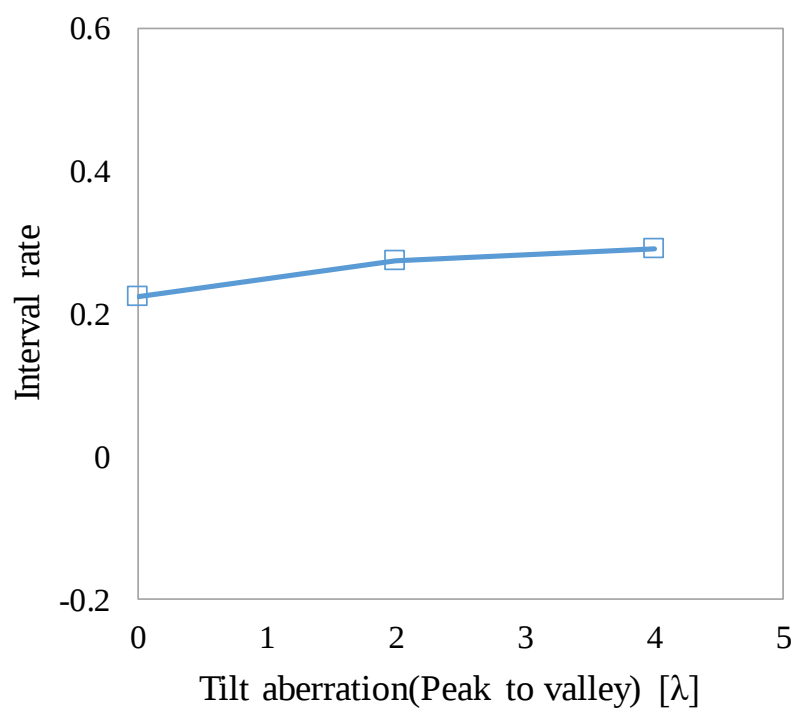


図 6.16 分離の割合のチルト収差依存性

6.7 考察

以上の検討により、ページ間差動強度増幅検出法は、干渉信号検出を用いて微弱な再生光を増幅検出できることを確認した。また、干渉信号検出の外乱要因であるオシレータ光の強度ずれや波面ずれの影響を受けにくいことを確認した。ここでは、解析計算、シミュレーションを用いて実験結果に関する考察を行う。

6.7.1 ページ間の位相ずれの影響に関する検討

ページ間差動信号増幅法は、2つのページの位相が同じであることを仮定している。ここでは、空気、温度変化などにより、ページ間の位相がずれる場合について検討を行った。再生光の位相が変化する場合、 n ページと $n+1$ ページのカメラ1の検出強度差 $\Delta I_1(x, y, P_n)$ は、(6.12)式に対して、

$$\begin{aligned}\Delta I_1(x, y, P_n) &= I_1(x, y, P_1) - I_1(x, y, P_2) \\ &= \frac{1}{4}(A(x, y, P_1)^2 - A(x, y, P_2)^2) + \frac{1}{2}B(x, y)[A(x, y, P_1)\sin\{\theta(x, y) - \phi(x, y)\} - \\ &A(x, y, P_2)\sin\{\theta(x, y) - \phi(x, y) + \gamma\}] \quad (6.21)\end{aligned}$$

と書き換えられる。ここでは、ページ間で位相 γ だけ変化したことを考慮した。そして、(6.13)式から(6.18)式と同様の演算を行うと、検出される信号 $I_{AP}(x, y, P_1)$ は、

$$I_{AP}(x, y, P_1) = B(x, y)\sqrt{A(x, y, P_1)^2 + A(x, y, P_2)^2 - 2A(x, y, P_1)A(x, y, P_2)\cos\{\gamma\}} \quad (6.22)$$

となる。この式でページ間の位相差が無い場合には、(6.22)式は(6.18)式と同じとなる。ページ間の位相差がある場合であっても、1ページ目の振幅 $A(x, y, P_1)$ または2ページ目の振幅 $A(x, y, P_2)$ がゼロの場合には、影響しない。唯一、影響する条件としては、1ページ目の振幅 $A(x, y, P_1)$ と2ページ目の振幅 $A(x, y, P_2)$ がともに値を持つ条件である、理想的な演算では、1ページ目と2ページ目の差動となり完全に消去されるはずが、ページ間の位相差が発生することで、信号が残留することを示している。

図 6.17 は、増幅信号のページ間の位相差依存性を示している。縦軸は、標準化した検出信号、横軸はページ間の位相を示している。ここでは、1ページ目と2ページ目の再生光の強度を I_r とした。また、オシレータ光の振幅が再生光の振幅の k 倍の場合を示している。

図 6.17 より、理想的にはゼロで検出される信号が、ページ間の位相により値を持つことがわかる。ここで、 n ページの再生光強度が I_r 、 $n+1$ ページの再生光強度が0のとき、本図では縦軸の1となる。すなわち、ページ間の位相差が60度発生すると、0のはずの信号が、 kI_r となってしまうことが明らかとなった。

以上より、ページ間の位相差を小さくすることが、ページ間差動強度増幅検出法にとって非常に重要であることを明確にした。ページ間の位相差を小さくするためには、ページ間の移動時間を短くすることが有効であると考ええる。本研究では、ホログラフィックメモリの高速化技術について検討を行った。これについては7章で説明する。

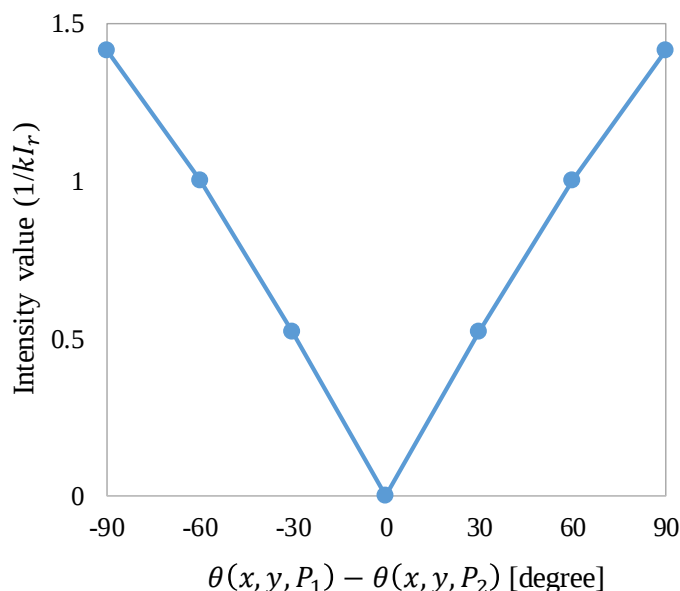


図 6.17

6.7.2 大容量化、高速化に関する検討

次に、強度増幅検出の効果について見積りを行った。図 6.14 に示すように、ページ間差動強度増幅検出は、直接検出よりも弱い再生信号で再生できる。例えば、直接検出の場合に分離の割合が 0.2 で再生限界と考えた場合、ページ間差動強度増幅法はその 1/2.1 倍の再生強度でも対応できることになる。これは、記録媒体からの再生光の回折強度が 1/2.1 でよいことに相当する。例えば、記録容量が記録媒体の M# の制約で決まっている場合、(5.15) 式より、ページ間差動強度増幅検出を適用することで、1.5 倍の記録容量(ページ数)を実現できる。そして、ここで再生時に露光時間とページ移動時間が同じであると仮定した場合、ページ間差動強度増幅法を適用することで露光時間が 1/2.1 倍となるので、全体として 1.4 倍の高速化を実現できる。

6.7.3 再生光強度パターン

再生光の強度パターンについて検討を行った。本検討では、図 6.6 に示すように、2 ページ目の再生光の強度をゼロとして測定を行った。このため、1 ページ目の再生光の強度が I_r またはゼロ、2 ページ目の再生光の強度がゼロの条件しか検討できていなかった。そこで、2 ページ目の再生光の強度を I_r として同じ測定を行った。図 6.18 は、その結果を示している。

ここでは、オシレータ光に対する再生光の強度比を $1/145$ とした。本結果より、すべての条件で、強度増幅信号が得られることを確認した。

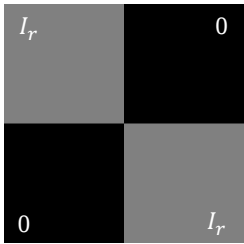
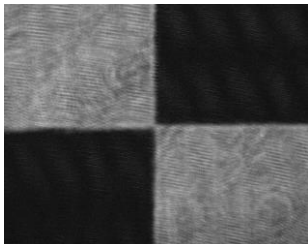
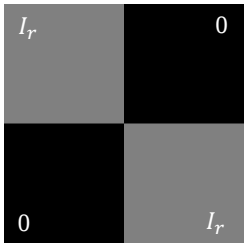
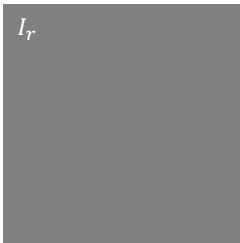
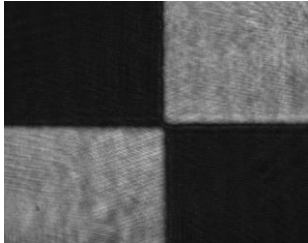
	Readout beam phase (Intensity profile of SLM)		Reconstructed phase
	Page1	Page2	
Intensity profile 1			
Intensity profile 2			

図 6.18 異なる信号位相パターン(実験)

6.8 まとめ

本章では、時間の概念を強度信号に拡張した、ページ間差動強度増幅検出法を強度変調型ホログラフィックメモリに適用することを提案した。ページ間差動強度増幅検出法は、ページ間の再生光の強度の差を増幅して検出する。ページ間差動強度増幅検出法は 4 つのカメラを用いてリアルタイム検出を実現する。また、同じカメラで検出した 2 つの信号の差動演算を行うことで、オシレータ光の強度ずれの影響を受けにくい。そして、強度増幅演算で位相項を消去するので、波面ずれにも影響しない。

本検討では、ページ間差動強度増幅検出法の増幅の効果を実験で確認した。また、増幅率の検討から、従来に対し、記録容量(ページ数)を 1.5 倍にすることができる見込みを得た。さらに、本方式により、記録再生速度を 1.4 倍高速化できる見込みを得た。

第 7 章 ホログラフィックメモリ高速再生技術

7.1 はじめに

本章では、ページ間差動位相検出法、ページ間差動強度増幅検出法をさらに耐環境性を向上するため、高速性と高精度化を両立する新たなプローブ光の角度制御技術を提案する。本技術の角度制御信号の生成方法および実験結果について議論し、高速化の実現性を示す。

7.2 従来技術とその課題

角度多重方式のホログラフィックメモリシステムでは、信号光と参照光との間の干渉縞パターンとしてホログラムが記録媒体に記録される。この記録原理は、CD(Compact Disc)、DVD(Digital Versatile Disc)、BD などの従来の光ディスクシステムとは全く異なるため、安定した信頼性の高い記録・再生のための新しいサーボ制御方式が必要となる。このため、フォーカス[65]、位置[66-68]、角度[69-73]の制御方法や、それらの制御を統合した最適化の制御アルゴリズム[74]など、様々提案されている。特に角度多重の場合には、狭いブラッグ選択性を利用するため、再生時のプローブ光の角度を高精度に制御する必要がある。プローブ光の角度が正確に制御されないと、再生強度の不足やページ間のクロストークなどによる S/N 低下により、再生性能が劣化する。このため、角度多重のホログラフィックメモリでは、ページ間のクロストークを考慮し、角度誤差をミリ度オーダーで合わせる必要がある。ホログラフィックメモリのマージン検討では、5 ミリ度に抑える必要があるとの報告がある。[75, 76]。

プローブ光の角度制御制御方式は複数提案されている。例えば、記録媒体の傾きを高精度に測定することでプローブ光の角度誤差を補正する方式が提案されている[69]。この方式は、ホログラフィックメモリ光学系とは異なる外部の角度計測器によって記録媒体の傾きを高精度に測定し、ガルバノミラーの角度を制御することでプローブ光の角度を最適化する角

度制御方式である。この方式は、記録媒体が傾いているのみの条件では有効であるが、例えばプローブ光の波長ずれ、温度ずれなどが発生したことに伴う最適角度のシフトを補正できない課題がある。また、別のプローブ光の角度制御方式として、記録媒体内に記録されたホログラムからの再生光を用いた角度制御方式が提案されている[70-72]。これらの角度制御方式は、ホログラムから回折した再生光をカメラで検出し、その2次元データを用いてプローブ光の角度補正を行う。再生光が最大となる角度にプローブ光を制御できるため、波長ずれ、温度ずれに伴う角度シフトを補償できる一方で、これらの方式は、カメラからの出力を用いているため、高速制御については課題がある。

これに対し、高速な信号出力が可能な光検出器を用いた角度制御方式が提案されている[73]。図 7.1 は、光検出器を用いた角度制御方式を示している。この方法は、隣接するブックの回折光を用いることを特徴としている。ここで図 7.1 のブック A 内のページを再生する場合を考える。本角度制御方式では、ブック A の隣接ブックであるブック B とブック C を用いて角度制御信号を生成し、その信号をもとにプローブ光の角度を制御する。再生するブック A のページの記録角度を角度 k とした場合、ブック B には、角度 $k - \delta$ のページを記録する。また、ブック C には、角度 $k + \delta$ のページを記録する。そして、再生時には、3つのブックにプローブ光を入射し、ブック B、ブック C からの2つの回折光を分離型の検出器で検出する。このとき、各回折光の検出強度と角度制御信号は、図 7.2 のように表される。この検出方式は、各ブック内のページから回折する光の強度ピークの角度がずれていることが特徴である。角度制御信号は、ブック B とブック C のページからの回折光の差動信号から生成される。角度制御信号は、図 7.2 に示すように S 字形状となる。この角度制御信号は、ゼロクロス点に対して信号が正負に検出されるため、符号に応じてプローブ光の方向を制御することができる。また、そのずれ量は、角度制御信号の強度で示されるため、強度に応じて角度変位を制御することができる。これにより、この角度制御信号を用いてゼロクロス点に高精度に制御することができる。このとき、S 字のゼロクロス点は、ブック B 内のページの回折光のピーク角度 $k - \delta$ とブック C 内のページの回折光のピーク角度 $k + \delta$ の間となる。すなわち、ブック A 内のページのピーク角度 k に制御される。

この角度制御方式は、2つの回折光を用いている点、高速な光検出器を用いている点が技術的に興味深い。特に、画像処理等を用いずに、差動信号のみで角度制御信号が得られる点など、従来の BD、DVD、CD などの光ディスク装置の制御技術が踏襲されていると考えられる。本角度制御技術は、高速性の観点では、非常に有効であるが、精度の観点で以下の課題がある。

- ・(記録時)ブック間の回折効率を一致させる必要がある
- ・(記録時)ブック間で角度を高精度に合わせる必要がある
- ・(再生時)大きなプローブ光が必要となり、再生光の S/N が得られない
- ・(再生時)ブック間の回折強度を一致させるため、プローブ光の強度分布を均一にする必要がある

・(再生時)ブック間の回折強度を一致させるため、プローブ光が無収差である必要がある。特に、プローブ光が無収差である条件を満たすことが困難であると考ええる。ホログラフィックメモリは、ブラック選択性を用いて高密度に記録しているため、回折強度はプローブ光の波面に依存する。3つのブック間で、波面を一致させるためには、波面収差が許容されなくなる。これは実用上、対応困難であり、実際の光学系では、大きな角度誤差を発生すると考える。

以上のように、従来方式は、精度と速度を両立することができなかった。そこで、本検討では、高精度かつ高転送レートを実現するため、新しい制御方式を提案する。そして、プローブ光の角度誤差5ミリ度以内をめざす。

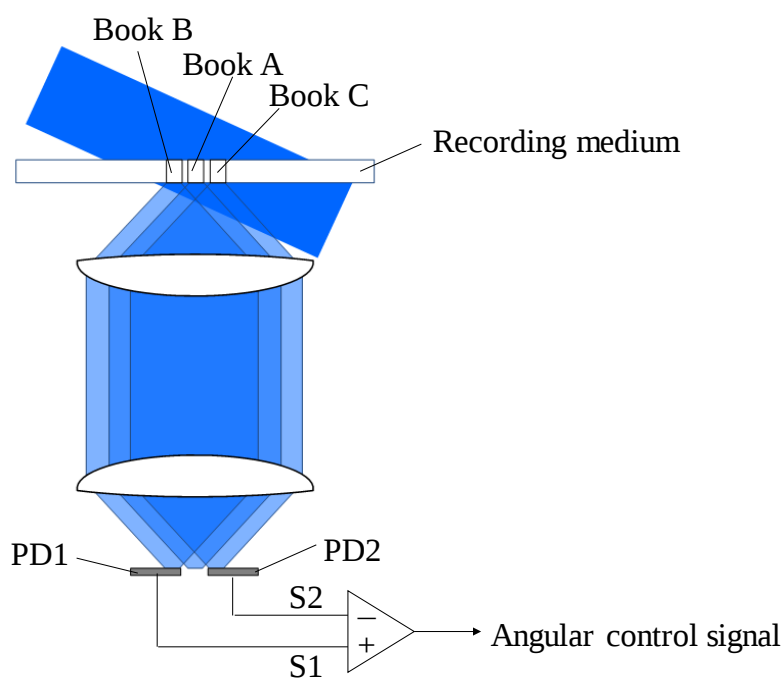


図 7.1 従来提案された角度制御信号生成光学系

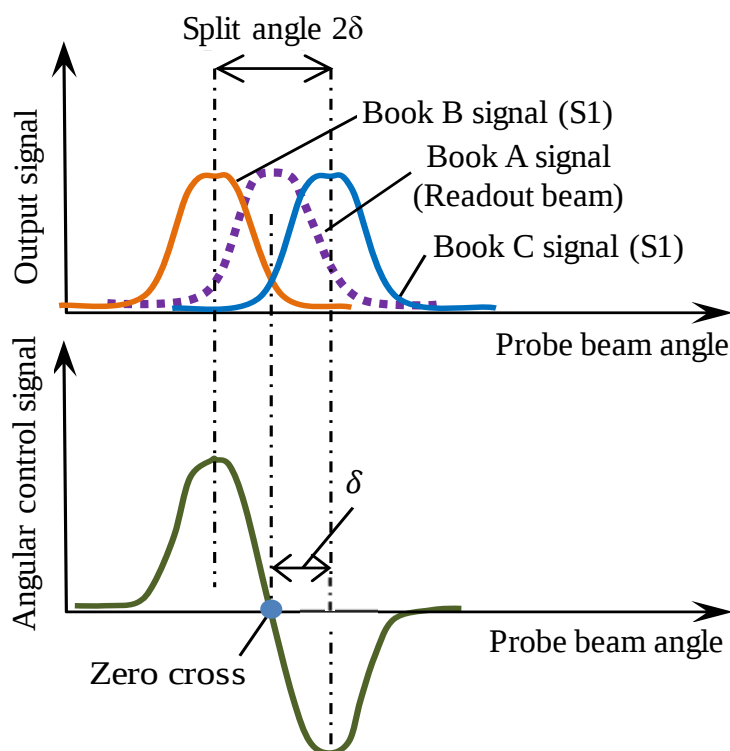


図 7.2 各回折光の検出強度と角度制御信号

7.3 プローブ光角度制御技術の原理

7.3.1 光学系

角度制御信号を得るために、2つのビームを使う光学システムを提案する。図 7.3 は、記録時のホログラフィックメモリ光学系を示している。まず、記録方法について説明する。ECLD から出射した光ビームは、ビームエキスパンダ 1、HWP1 を経て、PBS1 に入射する。HWP1 は、記録と再生に応じて出射後の光ビームの偏光状態を変え、P 偏光と S 偏光の比率を制御する。記録時、HWP1 からの透過光を P 偏光と S 偏光の両方を含む偏光とすることで、PBS1 にて、光ビームを信号光と参照光の 2つの光路に分岐する。信号光はビームエキスパンダ 2、HWP2、リレーレンズ 1、PBS2、QWP を経て、位相変調型の SLM に入射する。ここでは、SLM は、記録する 2次元ページデータに従って位相情報を重畳する。そして、SLM を反射した信号光は再度 QWP を透過し、S 偏光に変換される。QWP を出射した信号光は、PBS2 を反射し、リレーレンズ 2 内に配置されたポリトピックフィルタ、HWP3 を経て、対物レンズにより記録媒体に照射される。

一方、PBS1 を反射した参照光は、HWP4 を経て、ウォラストンプリズムに入射する。ウォラストンプリズムは、入射した P 偏光と S 偏光を角度分離する素子である。記録の場合、

ウォラストンプリズムは S 偏光のみが入射するため、S 偏光の参照光がそのまま透過する。ウォラストンプリズムを透過した参照光は、ガルバノミラー1、スキャナレンズを経て記録媒体に入射する。ここで、信号光と参照光は同じ位置に照射され、記録媒体内で干渉縞が生じる。この干渉縞をホログラムとしてディスク内の記録媒体に記録する。次に信号光に重畳する SLM の位相情報を変える。そして、ガルバノミラーの内部に有するロータリーエンコーダーをもとにガルバノミラーの角度を制御し、参照光の入射角度を変更し、角度多重記録を行う。そして、ブック内に所定数のページを記録した後、記録媒体を移動させることで、新たな記録を行う。これを繰り返すことで、記録媒体全面の記録を行う。

次に、再生方法について説明を行う。図 7.4 は再生時の光路を示した図である。再生時、HWP1 からの透過光を P 偏光と S 偏光の両方を含む偏光とすることで、PBS1 にて、光ビームをオシレータ光とプローブ光の 2 つの光路に分岐する。PBS1 を透過したオシレータ光はビームエキスパンダ 2、HWP2、リレーレンズ 1 を経て、PBS2 に入射する。再生時、HWP2 は P 偏光を S 偏光に変換する。これにより、オシレータ光は PBS2 を反射し、リレーレンズを経て位相検出光学系に入射する。

一方、PBS1 を反射したプローブ光は HWP4 に入射する。HWP4 は、S 偏光を P 偏光と S 偏光の両方を含む偏光に変換する。HWP4 を透過したプローブ光は、ウォラストンプリズムに入射する。ウォラストンプリズムは、P 偏光と S 偏光のプローブ光を角度分離する。このとき、P 偏光に対する S 偏光の伝搬方向は、角度 ρ ずれている。ここで、S 偏光をプローブ光、P 偏光をサーボ光と呼ぶ。ここでは、S 偏光と P 偏光の強度比は 9 : 1 となっている。ウォラストンプリズムを透過したプローブ光とサーボ光は、スキャナレンズを経て、記録媒体に入射する。

図 7.5 は、記録媒体付近の偏光状態と検出信号を示している。(a)は、記録媒体付近のプローブ光とサーボ光の偏光状態とその光路を示している。また、(b)は、光検出器 1 と光検出器 2 の検出信号を示している。記録媒体にプローブ光とサーボ光が入射するとその角度に応じて、2 つ回折光が発生する。そして 2 つの回折光は PBS3 を経て、光検出器 1、光検出器 2 に入射する。このとき、プローブ光の回折光は S 偏光、サーボ光の回折光は P 偏光なので光検出器 1 にはプローブ光の回折光、光検出器 2 にはサーボ光の回折光が入射する。なお、プローブ光とサーボ光は分離角度 ρ だけ角度がずれているので、図 7.5(b)のように光検出器 1 の信号 S1 と光検出器 2 の信号 S2 は分離角度 ρ だけずれた信号が検出される。そして、2 つの検出信号から角度制御信号が生成され、その信号を用いてガルバノミラー1 が制御される。

一方、記録媒体を透過したプローブ光とサーボ光は、ガルバノミラー2 を反射する。ガルバノミラー2 は、ガルバノミラー1 と同期がとられており、ガルバノミラー2 は、入射したプローブ光を高精度に垂直に反射することができる。そして、ガルバノミラー2 を反射したプローブ光は、記録媒体内のホログラムに照射され、対物レンズの方向に再生光が発生する。この再生光は、対物レンズ、HWP3、ポリトピックフィルタを含むリレーレンズ 2、PBS2、

リレーレンズ 3 を経て位相検出光学系に入射する。

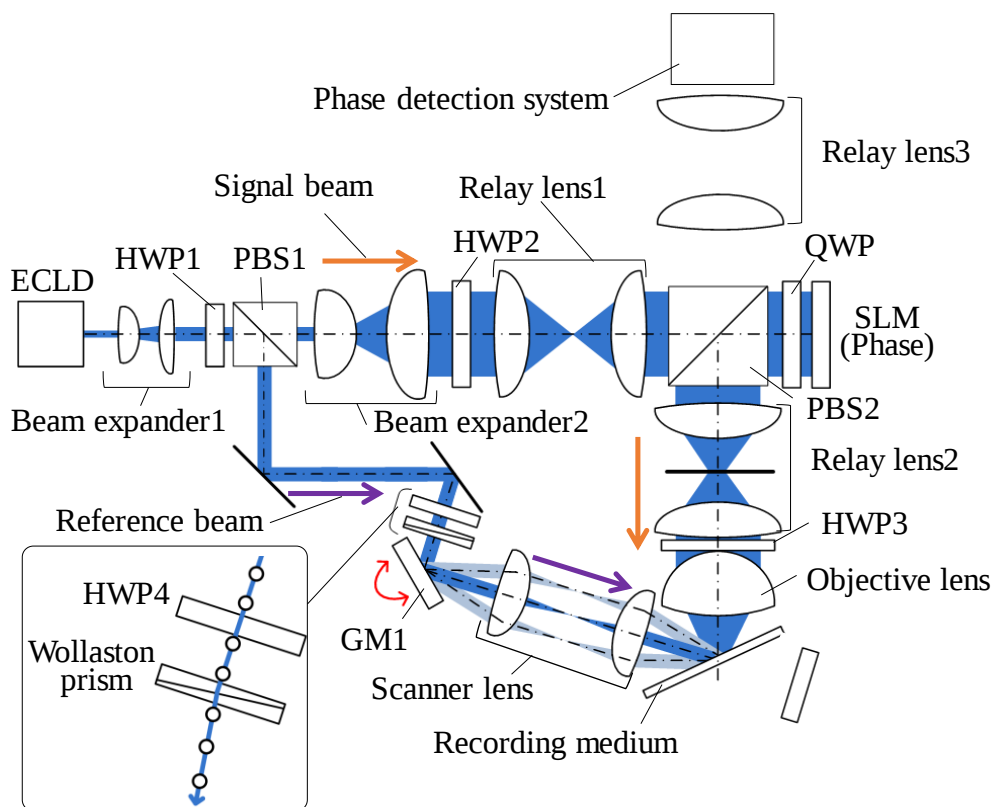


図 7.3 ホログラフィックメモリ光学系(記録時)

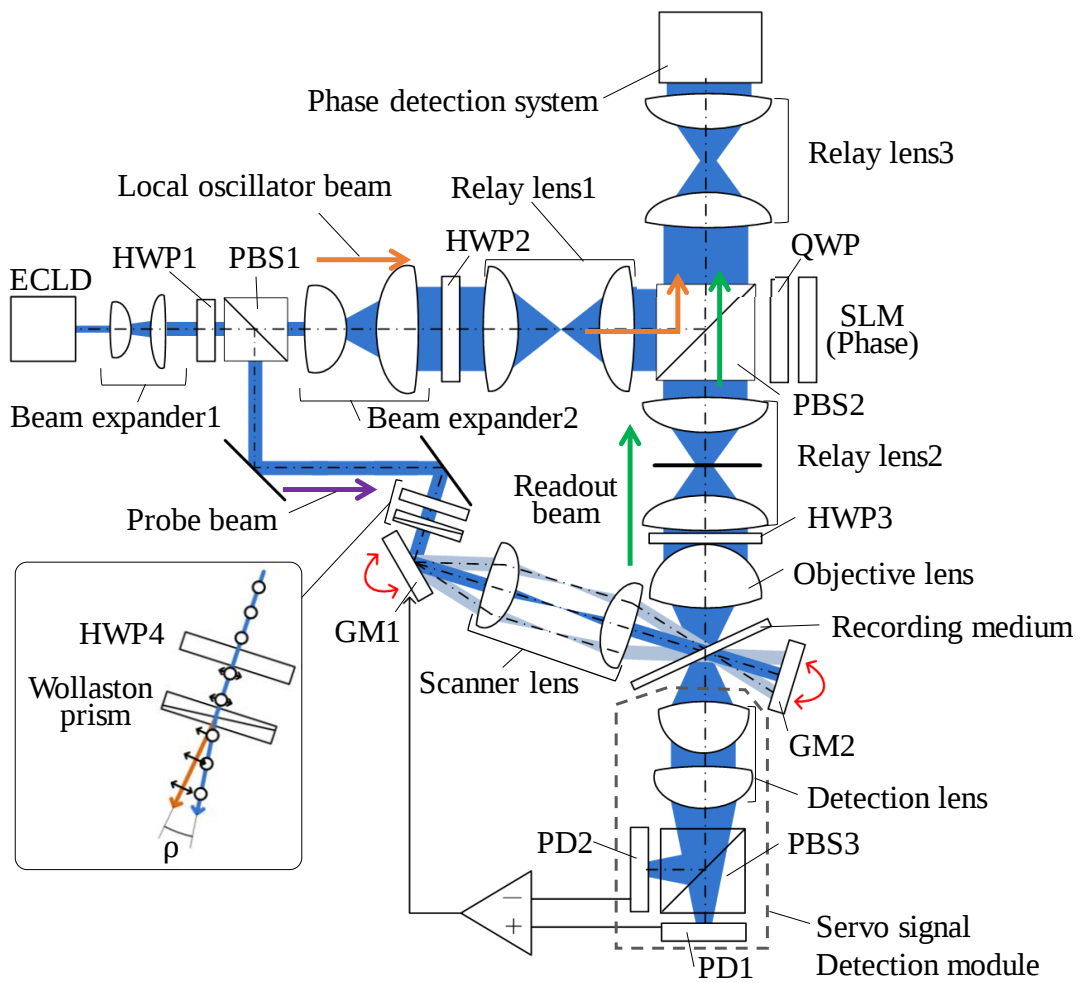
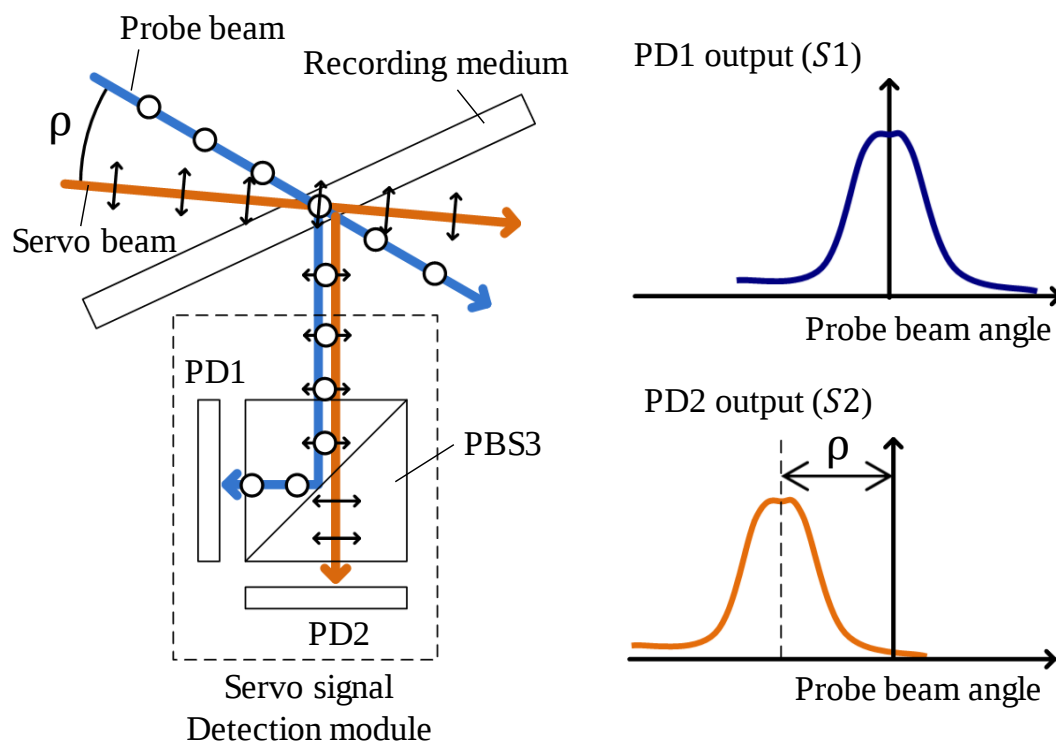


図 7.4 ホログラフィックメモリ光学系(再生時)



(a) 記録媒体付近の偏光状態

(b) 検出信号

図 7.5 記録媒体付近の偏光状態と検出信号

7.3.2 角度制御信号検出原理

図 7.6 に、検出された信号 $S1$ 、信号 $S2$ 、角度制御信号の関係を示す。なお、横軸はプローブ光の角度としたが、これはガルバノミラー1 の角度と理解することもできる。図 7.5 に示したように、光検出器 1 の信号 $S1$ と光検出器 2 の信号 $S2$ は分離角度 ρ だけずれて検出される。ここで、角度制御信号(ACS : Angular Control Signal)は、

$$ACS = S2 - S1 \quad (7.1)$$

で示される。角度制御信号は S 字形状となる。この角度制御信号は、ゼロクロス点に対して信号が正負に検出されるため、符号に応じてプローブ光の方向を制御することができる。また、そのずれ量は、角度制御信号の強度で示されるため、強度に応じて角度変位を制御することができる。これにより、この角度制御信号を用いてゼロクロス点に高速かつ高精度に制御することができる。ただし、再生光とプローブ光が同じ角度で強度ピークとなることから、このゼロクロス点は目標角度となっていない。プローブ光とサーボ光の回折光の信号を用いているので、ゼロクロス点はプローブ光とサーボ光の回折光のピークの中心となる。この

ため、ゼロクロス点は、目標角度から角度 $\rho/2$ だけずれていることになる。そこで、本角度制御では、ガルバノミラー1の内部に有するロータリーエンコーダーをもとにゼロクロス点から $\rho/2$ だけ、プローブ光の角度を傾ける制御を行う。ガルバノミラーの内部に有するロータリーエンコーダーは、高精度の分解能があり、例えば Thorlabs 社の VS001 では 0.8 ミリ度である。

以上のように、提案方式では角度制御信号をもとに、ゼロクロス点に制御し、その角度からガルバノミラーを用いて最適角度にプローブ光の角度を制御する。提案方式は、2つのビームを記録媒体に入射する点、1つのブックからの回折光を用いる点が特徴である。このため、7.2節で示した課題は、以下のように解決される。

- ・(記録時)ブック間の回折効率を一致させる必要がない
- ・(記録時)ブック間で角度を高精度に合わせる必要がない
- ・(再生時)大きなプローブ光が必要ない
- ・(再生時)ブック間の回折強度を一致させる必要がない

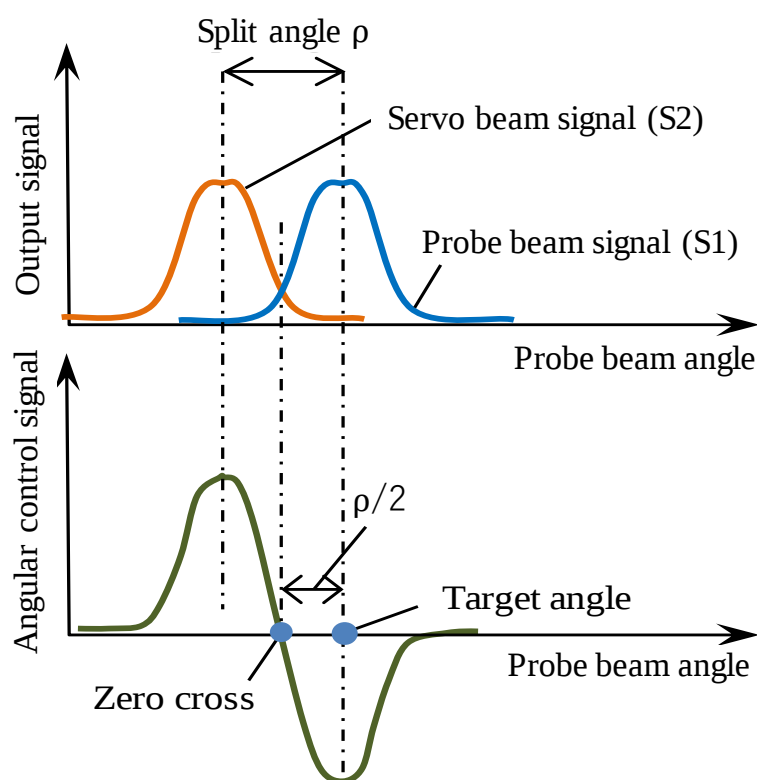


図 7.6 検出信号と角度制御信号の関係

7.3.3 特徴

プローブ光の角度を制御する新しい角度制御方式は、5 つの特徴がある。

① 角度制御信号の安定性

外乱に対して安定かつ高精度な角度制御が望まれる。再生時のプローブ光の角度を変える要因として、記録媒体の傾き、記録媒体の温度ずれ、プローブ光の波長ずれがある。再生時の記録媒体の傾きが、記録時の記録媒体の傾きと異なる場合、それを考慮したプローブ光の制御が必要となる。そして、ホログラフィックメモリでは、記録媒体の温度ずれが発生すると、ブラッグ条件を満足するため、レーザーの波長とプローブ光の角度を変えて再生する必要がある。また、プローブ光の波長ずれがあると、プローブ光の角度を変えて再生する必要がある。

従来の記録媒体の傾きを測定するプローブ光の角度制御方式[69]では、ディスクチルトに依存した補償しかできないため、例えば媒体の温度変化に伴う角度シフトに対応できない課題があった。これに対し、提案方式では、回折光を用いるため、角度シフトに依存しない特徴がある。図 7.7 は、外乱による角度シフトが発生したときの角度制御信号を示している。外乱により、通常状態から、プローブ光の最適角度がシフトすると、同じ量だけサーボ光の角度がシフトする。これに伴い、角度制御信号も同じ量だけシフトするので、安定した再生が実現できる。このため、本角度制御信号は従来対応が困難であった、記録媒体の温度ずれ、プローブ光の波長ずれなどにも対応が可能である。

② リアルタイム制御

従来のカメラからの 2 次元データを用いたプローブ光の角度制御方式は、高速性に関して 2 つの課題がある。1 つ目はデータの転送時間である。カメラは、露光時間、データ転送時間が必要であり、露光している途中で信号を出力することができない。特にホログラフィックメモリでは、記録再生の高転送レートを実現するため、高画素のカメラを利用しており、信号出力に伴う時間は長い。高画素カメラのフレームレートは、通常数 10fps(frames per second)であり、早いものでも 1000fps 程度である。2 つ目は、処理時間である。従来方式は、カメラで取得した 2 次元データを処理することで、角度ずれを算出する。2 次元データを解析するのに時間がかかり、高速に角度を制御することは困難である。

それに対し、提案方式はそれらの課題を解決することができる。1 つ目は光検出器を使っている点である。提案方式は、プローブ光、サーボ光の回折光を単受光面のフォトダイオードの検出器で検出するだけなので、高速な信号を出力することができる。一般的な可視領域のシリコンフォトダイオードであれば、駆動周波数が 10MHz から 100MHz なので、カメラに比べると非常に速く信号を出力することができる。2 つ目は、差動信号を用いる点である。提案方式は、光検出器から得られた 2 つの強度信号を使うだけなので演算に時間をかけることがない。このため、提案方式は高速にガルバノミラーの角度を制御することができる。

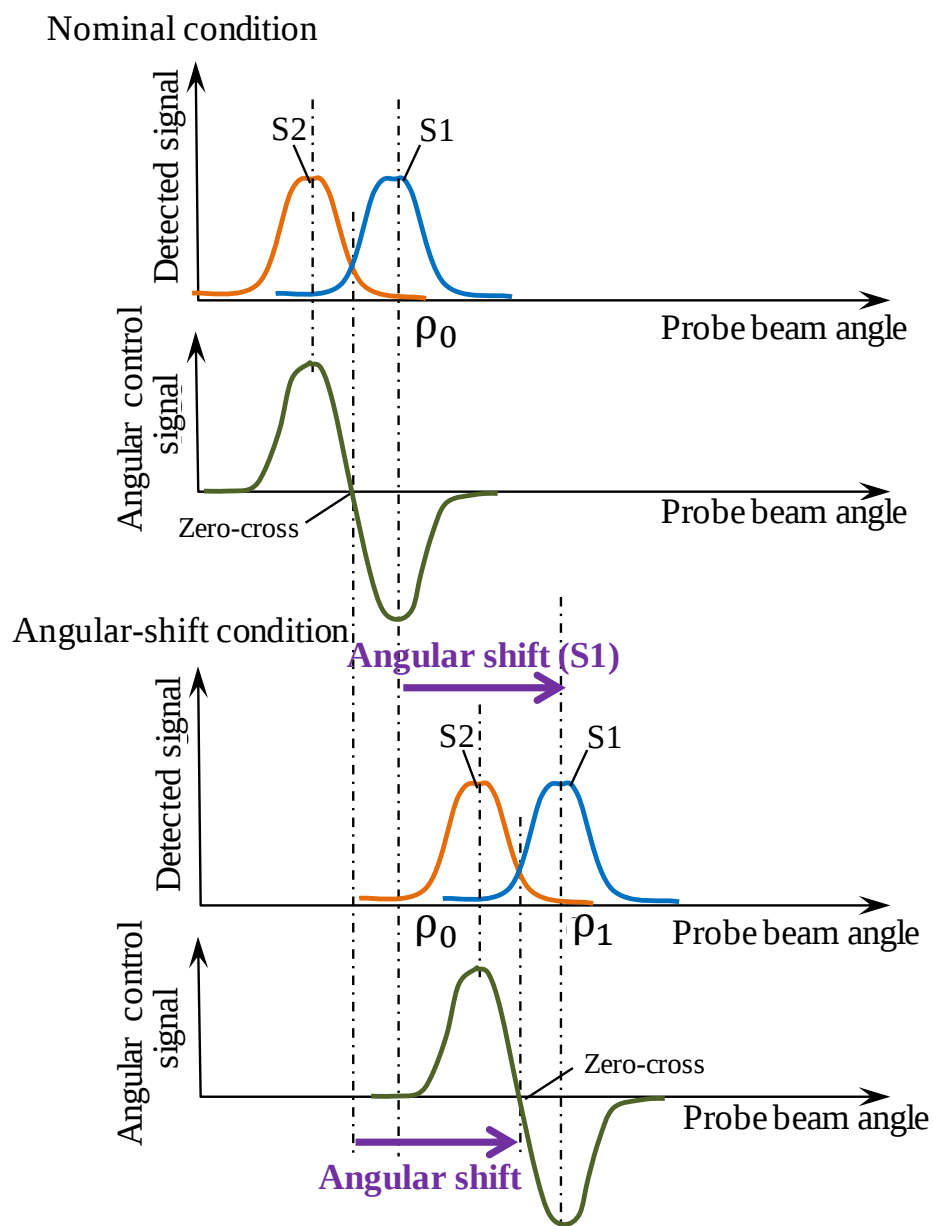


図 7.7 外乱による角度シフトが発生したときの角度制御信号

③ 不要光の排除

プローブ光とサーボ光を偏光で分離したことにより、再生光の観点で有利となっている。図 7.8 は再生光の検出を示している。記録媒体を透過したプローブ光とサーボ光は、ガルバノミラー2を反射し、再び記録媒体に入射する。このとき、記録媒体内のホログラムから回折光が発生する。プローブ光の回折光は再生光である。また、サーボ光の回折光は再生光のピーク角度からずれているため、隣接ページの不要な光が含まれている。このため、ここで

はサーボ光の回折光を不要光と呼ぶ。そして、記録媒体を回折した再生光と不要光は、対物レンズを経て、HWP3に入射する。HWP3は入射した偏光を90度回転する。これに伴い、再生光がP偏光、不要光がS偏光となる。HWP3を透過したP偏光の再生光はPBS2を透過し、位相検出光学系で検出される。一方、S偏光の不要光はPBS2を反射し、SLMに入射する。このため、不要光は、位相検出光学系に入射しないのである。提案方式では、2つのビームを偏光で分離したことにより、外乱となるサーボ光の回折光を排除している。

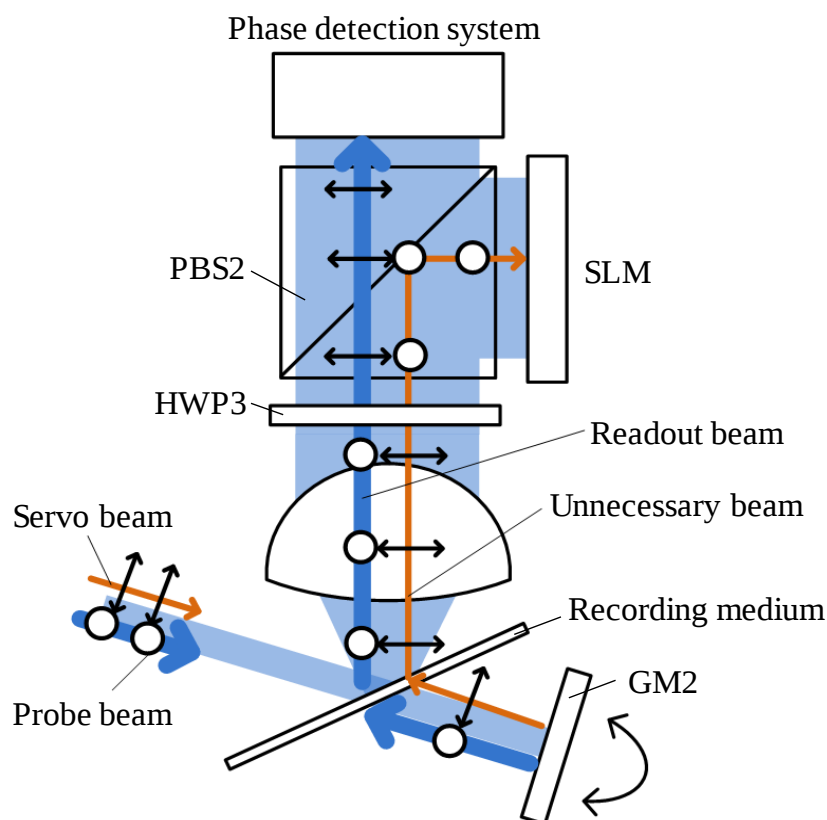


図 7.8 再生光検出

④ 再生光の効率

本提案方式の再生では、高い再生光の効率が維持される。本提案方式は、サーボ検出モジュールを追加することで実現している。サーボ信号検出モジュールは従来利用されていなかった再生光と異なる方向の回折光を検出しているため、再生信号に影響を与えていない。また、プローブ光とサーボ光の強度を9:1としたことで、再生光が10%低下しただけであり、角度制御信号を出力しない光学系とほとんど同じ効率を実現した。なお、プローブ光とサーボ光の強度比については、未検討であり、例えばBD、DVD、BDでは、12~20:1の強

度比で制御信号を生成していることから、さらなる効率改善の可能性はあると考える。

⑤ 記録性能

ホログラフィックメモリの光学系は記録と再生の光学系を共有することが課題となる。本提案方式は記録光学系に影響しない構成となっている。

図 7.4 の再生光学系では、HWP4 とウォラストンプリズムでプローブ光、サーボ光を生成したが図 7.3 の記録光学系では、HWP4 を光軸中心に回転することで、ウォラストンプリズムからは参照光のみが生成されるような構成とした。また、サーボ信号検出モジュールは、記録には作用しないため、記録には影響を与えない。

以上のような構成とすることで記録に影響しない角度制御方式を実現した。

7.4 分離角度の最適化

安定した角度制御信号を生成するために、最適なプローブ光とサーボ光の分離角度 ρ をシミュレーションにより求めた。本検討では、表 7.1 に示す条件と k 空間モデル[77]を用いてシミュレーションを行った。

図 7.9 は、角度制御信号の分離角度依存性について検討した結果である。(a)は角度制御信号と各要素の関係、(b)、(c)、(d)は振幅比、検出範囲、検出感度の分離角度依存性を示している。(b)、(c)、(d)の複数の線は記録時の参照光の角度を示している。

制御信号をもとに制御を行うためには、図 7.9(a)に示した振幅比、検出範囲、検出感度について考慮する必要がある。図 7.9(b)は、振幅比の分離角度依存性を示している。縦軸は、プローブ光のピーク強度の 2 倍に対する角度制御信号の振幅比を示している。横軸は分離角度を示している。本図より、分離角度が小さいと角度制御信号の振幅が得られなくなることがわかる。ここでは、ホログラムからの回折光は非常に弱いこと、サーボ光の強度が弱いことを考慮し、なるべく振幅を大きくしたいと考え、振幅比は 90%以上を基準とした。これにより、振幅の観点からは分離角度 ρ は 27 ミリ度以上とする必要があることがわかった。

図 7.9(c)は、角度検出範囲を示している。縦軸は制御信号の角度検出範囲、横軸は分離角度を示している。制御の観点から角度検出範囲は大きい方が望ましい。例えば、ページ間の移動時に、検出範囲が狭いとゼロクロス点に制御できなくなることがある。特に制御の高速化を考慮すると角度検出範囲は大きくしたい。このため、制御の観点から分離角度 ρ は 30 ミリ度以上が必要と考えた。

図 7.9(d)は、検出感度を示している。縦軸は検出感度、横軸は分離角度を示している。検出感度は角度制御信号の傾きを示しており、傾きが大きいほど、角度ずれに対する角度制御信号の変化量が大きいため、高精度な制御を実現できる。感度が大きくなる分離角度の範囲

は、28 ミリ度から 34 ミリ度の範囲となる。振幅および検出範囲の観点で分離角度は大きい方がよい、分離角度は 34 ミリ度が良いと考えた。

以上の検討の結果、参照光記録角度 33 度から 63 度までを考慮した振幅比、検出範囲、検出感度の検討から分離角度 ρ を 34 ミリ度と決定した。

表 7.1 シミュレーション条件

Parameter	Value
Number of pages	1
Wavelength	405 nm
Reference-beam incident angle	33 – 63 degrees
Signal-beam incident angle	25 degrees
Signal-beam angle range	75 degrees
Recording-medium refractive index	1.5
Medium-recording-layer thickness	1.5 mm

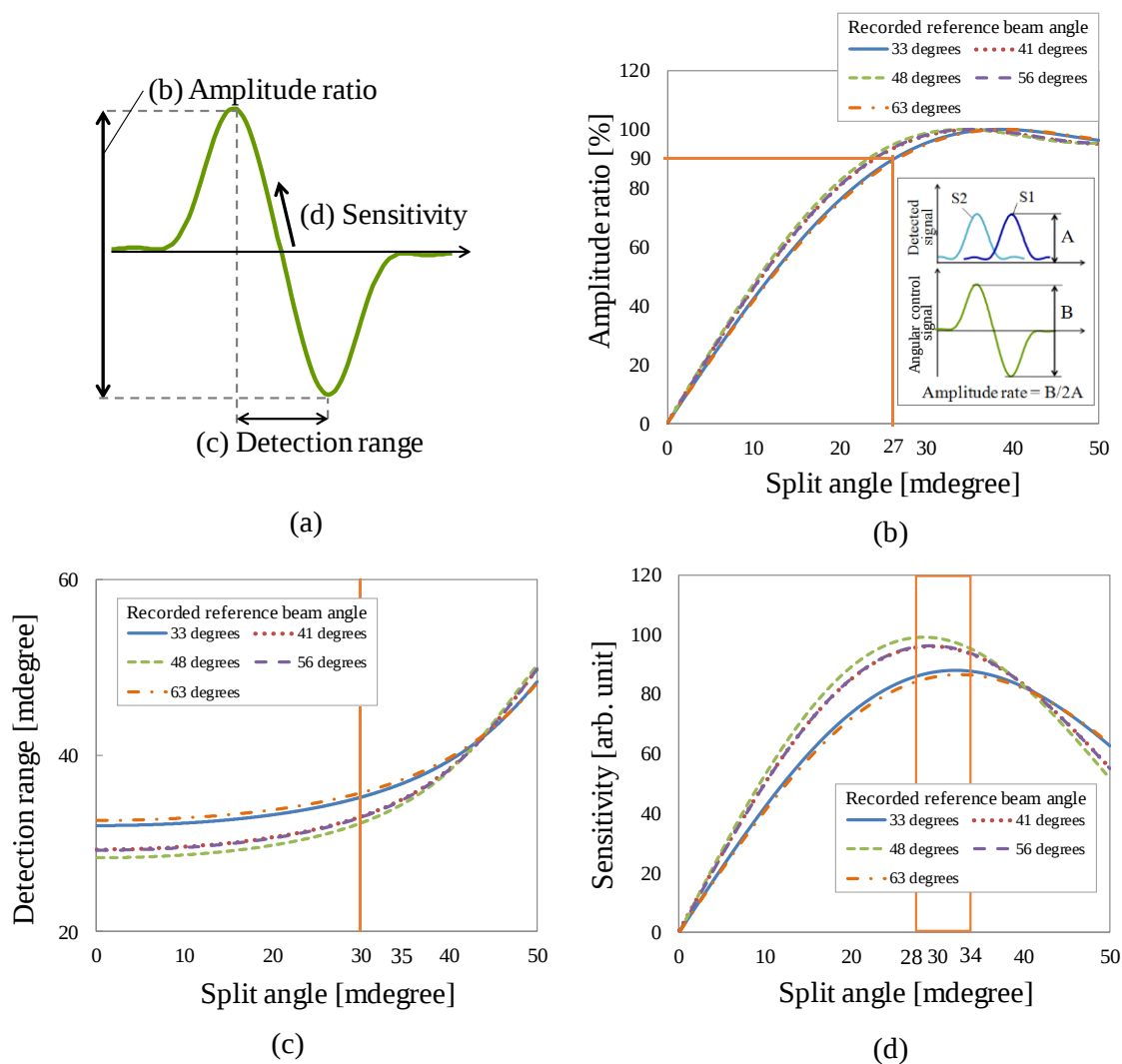


図 7.9 角度制御信号の分離角度依存性

(a)角度制御信号と要素の関係、(b)振幅比、(c)角度検出範囲、(d)検出感度

7.5 角度制御信号の原理検証

本検討では、表 7.1 に示す条件および k 空間モデルを用いてシミュレーションを行った。また、プローブ光とサーボ光の分離角度 ρ は 34 ミリ度とした。図 7.10 は、角度制御信号のシミュレーション結果である。縦軸は角度制御信号、横軸はプローブ光の角度を示している。本図より、角度制御信号が、目標角度に対して分離角の半分だけずれていることを確認した。

次に、角度制御信号を実験的に評価した。表 7.2 に示す記録再生条件で評価を行った。図 7.11 は、角度制御信号の測定結果である。縦軸は、角度制御信号、横軸はプローブ光の角度

を示している。なお、本測定では参照光角度 35 度、45 度、55 度で記録されたホログラムを用いて角度制御信号を検出した。

測定の結果は、S 字の形状などシミュレーション結果と定性的に一致していることを確認した。図 7.12 は、角度誤差の参照光の記録角度依存性を示している。縦軸は角度制御信号の角度誤差、横軸は参照光の記録角度を示している。この結果から、シミュレーション、測定結果ともにほとんど誤差を発生していない。

以上より、プローブ光とサーボ光を用いた角度制御信号は高精度に最適角度を検出できることをシミュレーションと実験で確認した。なお、本角度制御信号を用いたガルバノミラー制御の検討で、ページ間の移動時間 $300\mu\text{s}$ を実現したとの報告がされた[78]。本角度誤差信号を用いた高速なプローブ光の角度制御実現の目途を得た。これにより、 $300\mu\text{s}$ より長い時間変化の空気の流れや温度変化などの外乱を抑制できると考える。

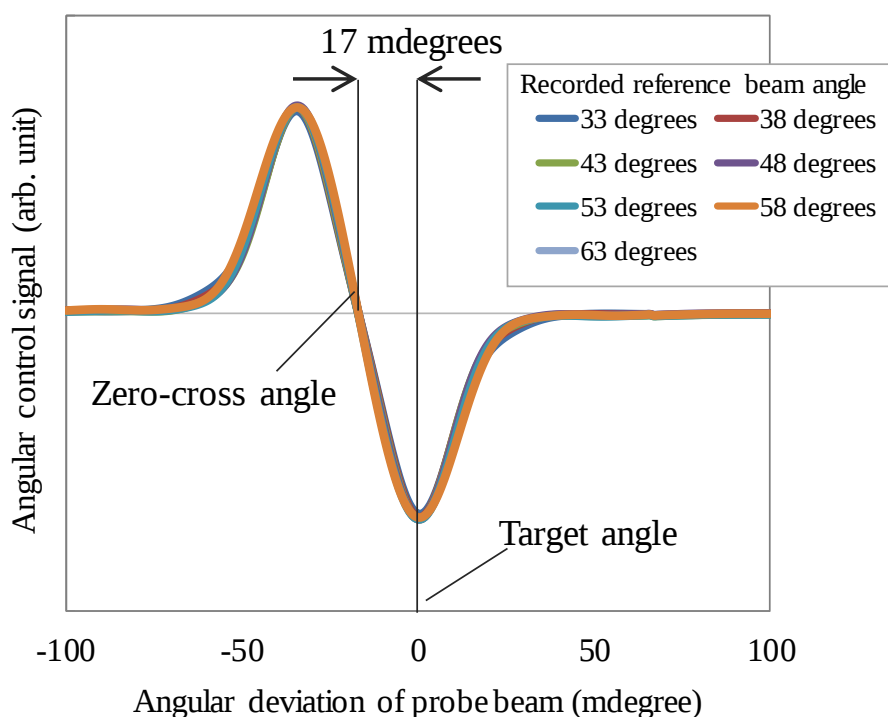


図 7.10 角度制御信号のシミュレーション結果

表 7.2 実験条件

Parameter	Value
Number of pages	3
Wavelength	405 nm
Split angle	34 mdegrees
Reference-beam incident angle	35, 45, 55 degrees
Signal-beam incident angle	25 degrees
Signal-beam angle range	75 degrees
Medium-recording-layer thickness	1.5 mm

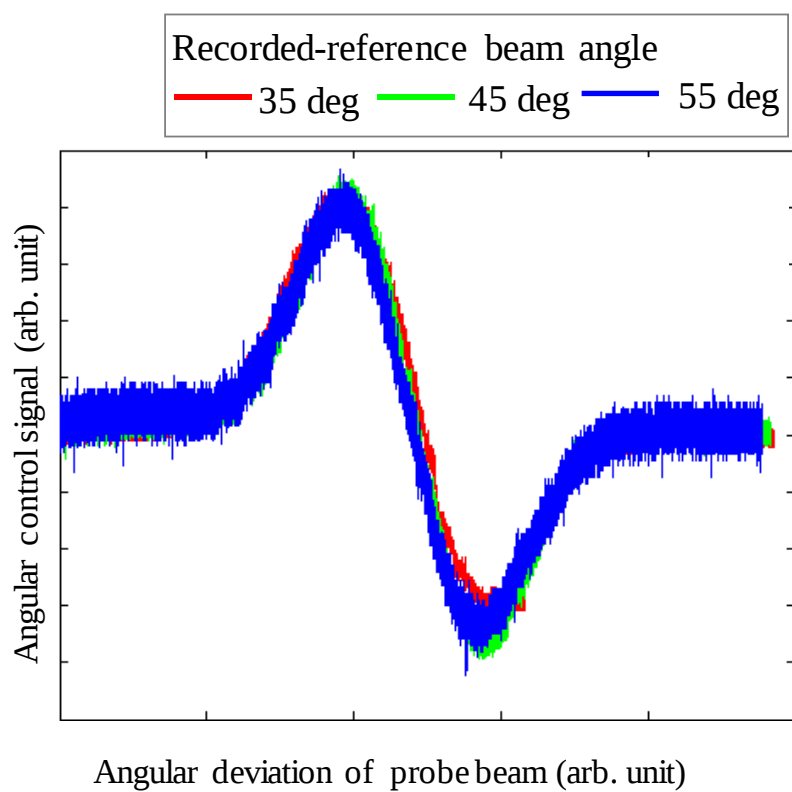


図 7.11 角度制御信号の測定結果

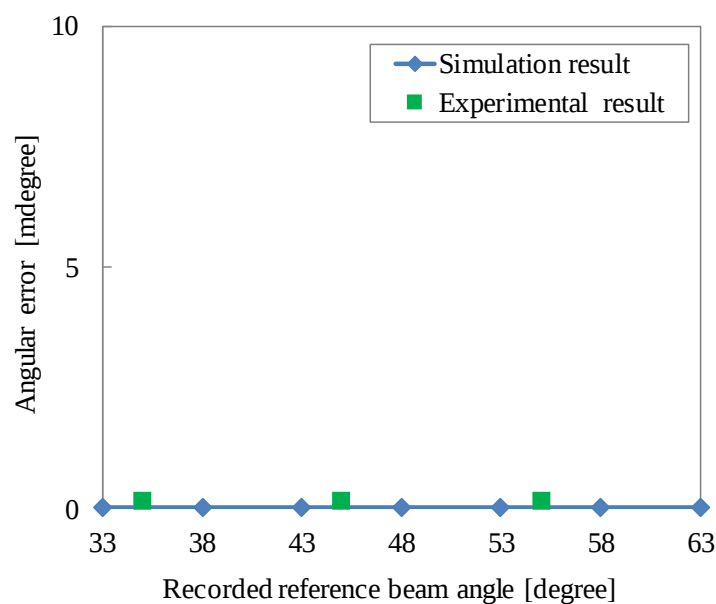


図 7.12 角度誤差の参照光の記録角度依存性

7.6 考察

7.3 節で、ゼロクロス点はプローブ光とサーボ光のピークの間中心となると説明したが、例えば、ホログラムの回折光強度のプローブ光角度依存性が非対称であった場合、ゼロクロス点がずれることが懸念される。そこで、ここではシミュレーションを用いて外乱についての考察を行う。なお、ここでは従来方式として記録媒体の傾きを測定し、プローブ光の角度補正を行う方式[69]を比較対象とした。表 7.3 は、検討で考慮した外乱条件である。ここでは、プローブ光の角度が変わる要因として、記録媒体の傾き、波長ずれ、媒体の温度ずれについて検討を行った。

表 7.3 外乱条件

Parameter	Value
Recording-medium tilt	-0.2 – 0.2 degrees
Wavelength deviation of the reference beam	-0.1 – 0.1 nm
Recording-medium-temperature deviation (wavelength compensation)	-10 – 10 °C
Variable wavelength range for compensation	400 – 410 nm
Recording-medium-temperature deviation (non-wavelength compensation)	-0.35 – 0.35 °C
Thermal-shrinkage rate	0.082%/°C

7.6.1 記録媒体の傾きの影響

図 7.13 は、記録媒体が傾いたときの角度誤差のシミュレーション結果である。(a)は角度誤差の記録媒体の傾き依存性を示しており、参照光角度を 48 度で記録した場合の再生時の角度誤差を示している。縦軸は角度誤差、横軸は記録媒体の傾きを示している。本図より、従来方式、提案方式ともに記録媒体の傾きでは角度誤差を発生しないことがわかる。

図 7.13(b)は、記録媒体の傾きを 0.1 度としたときの、参照光記録角度依存性を示している。縦軸は角度誤差、横軸は参照光の記録角度を示している。本図より、従来方式、提案方式ともに参照光の記録角度によらないことを確認にした。

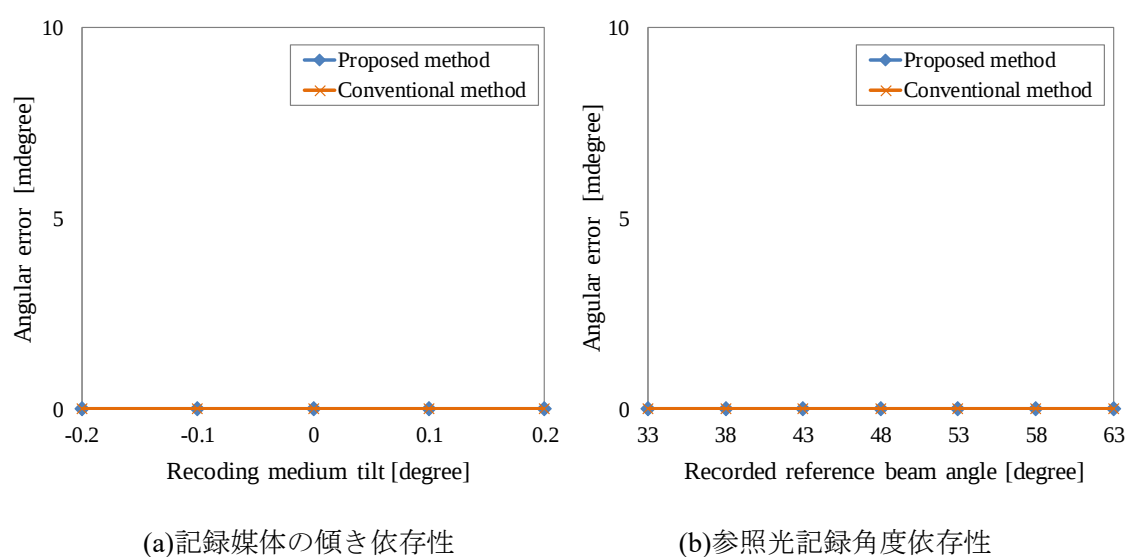


図 7.13 記録媒体が傾いたときの角度誤差

7.6.2 波長ずれの影響

図 7.14 は、波長ずれがあるときの角度誤差のシミュレーション結果である。(a)は角度誤差の波長ずれ依存性を示しており、参照光角度を 48 度で記録した場合の再生時の角度誤差を示している。縦軸は角度誤差、横軸は波長ずれを示している。従来方式の場合、波長ずれに伴い、大きな角度誤差を発生している。それに対し、提案方式はわずかに誤差を発生しているものの、従来方式よりも補償できていることがわかる。ホログラフィックメモリの再生性能はプローブ光の波長に依存することは知られている[75]。本システムでは、ECLD によって 0.1nm の精度で調整される[57, 58]とした。

図 7.14(b)は、波長ずれが 0.1nm のときの、参照光記録角度依存性を示している。縦軸は角度誤差、横軸は参照光の記録角度を示している。従来方法の場合は、参照光の記録角度に応じて変化する。それに対して、提案方式は参照光の記録角度にほとんど依存しない。図 7.14(b)の提案方式の角度誤差は最大 2.6 ミリ度であった。

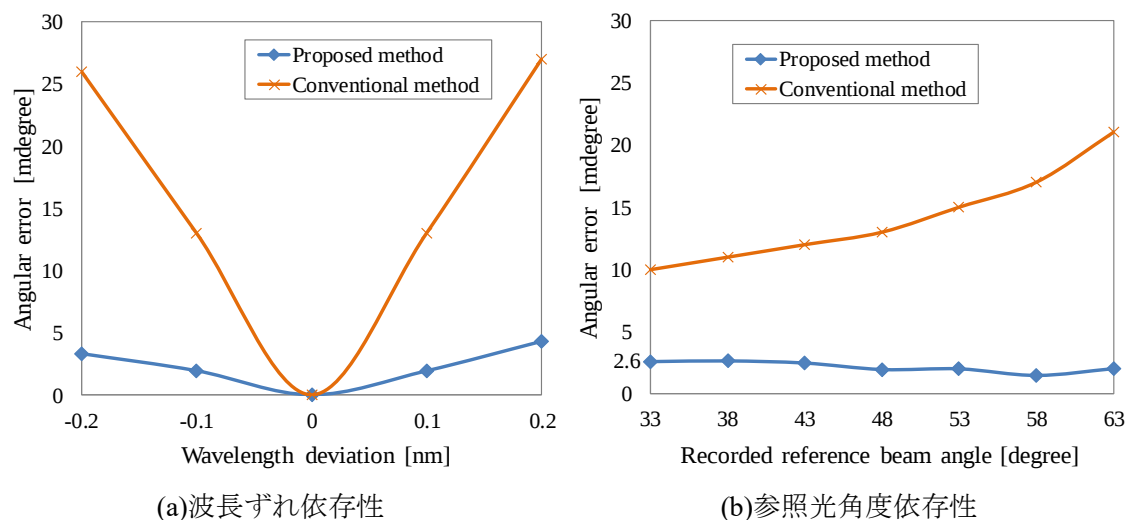


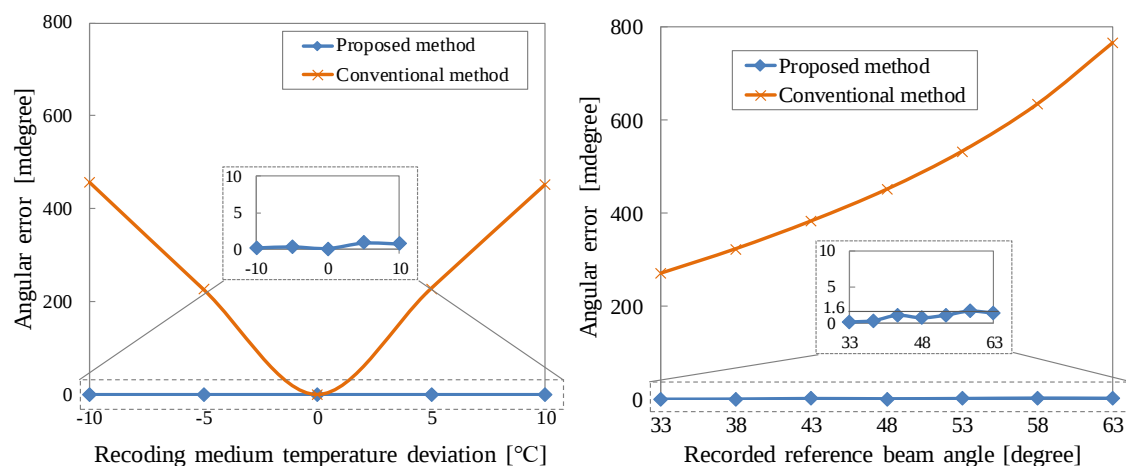
図 7.14 波長ずれがあるときの角度誤差

7.6.3 記録と再生時の記録媒体温度差の影響

図 7.15 は、記録時と再生時に記録媒体の温度に差があったときの角度誤差のシミュレーション結果である。(a)は、角度誤差の記録時と再生時の記録媒体温度差依存性を示しており、参照光角度を 48 度で記録した場合の再生時の角度誤差を示している。縦軸は角度誤差、横軸は記録時と再生時の記録媒体の温度差を示している。なお、ここでは各温度差の条件で、ECLD の波長シフトによる温度補償[77]を行う条件でのシミュレーション結果である。

従来方式は、記録時と再生時に媒体に温度差があるとプローブ光の角度を最適角度に制御できないことがわかる。それに対し、提案方式は、記録時と再生時に媒体に温度差があっても角度誤差は非常小さい。

図 7.15(b)は、記録時に対して再生時の記録媒体の温度差が 10°C のときの、参照光記録角度依存性を示している。縦軸は角度誤差、横軸は参照光の記録角度を示している。ここでは、参照光の記録角度 33 度で ECLD の波長シフトによる温度補償を行い、他の角度では補正を行わない条件とした。これは、各ブックを再生するときに 33 度からページの再生が始まる、各ブック開始時点で温度補正をする条件としたためである。従来方式は記録媒体の温度ずれに伴って非常に大きな角度誤差を発生している。それに対し、提案方式は、参照光の記録角度の全範囲でも 1.6 ミリ度と非常に小さな角度誤差である。



(a) 記録時と再生時の記録媒体温度差依存性

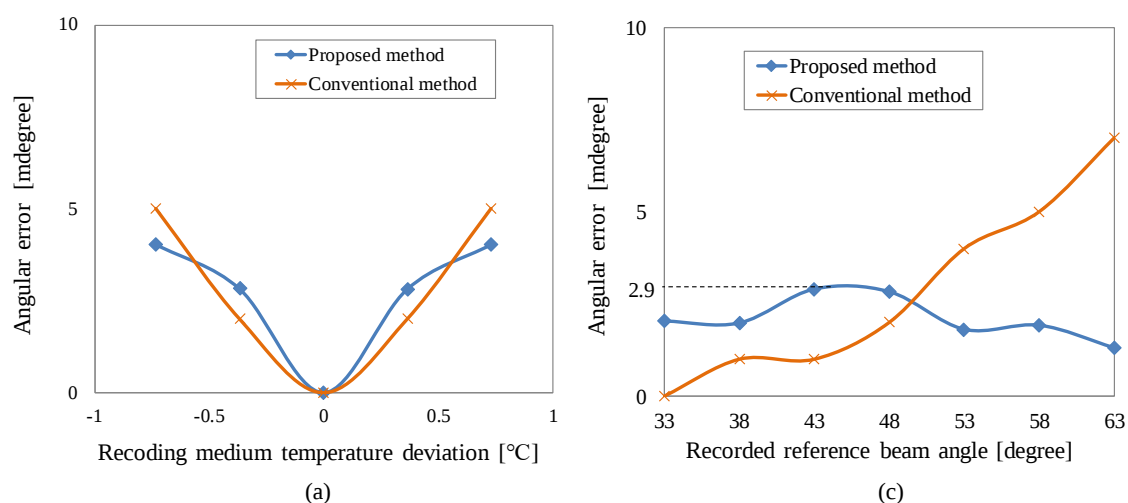
(b) 参照光角度依存性

図 7.15 記録時と再生時に記録媒体の温度に差があったときの角度誤差

7.6.4 記録媒体温度ずれの影響

図 7.16 は、温度ずれがあるときの角度誤差のシミュレーション結果である。7.6.3 項では ECLD の波長シフトによる温度補償を行ったが、ここでは補償を行わない条件とした。(a)は角度誤差の温度ずれ依存性を示しており、参照光角度を 48 度で記録した場合の再生時の角度誤差を示している。縦軸は角度誤差、横軸は温度ずれを示している。温度がずれした場合、従来方式、提案方式は、同程度の角度誤差を発生していることがわかる。なお、温度は適時、ECLD によって補償されるため、 0.35°C (波長シフト 0.1nm)以上とはならないとした。

図 7.16(b)は、記録媒体の温度ずれが 0.35°C のときの、参照光記録角度依存性を示している。縦軸は角度誤差、横軸は参照光の記録角度を示している。従来方式は参照光の記録角度に大きく依存して変化する。一方、提案方式はほとんど依存していない。そして提案方式は、最大 2.9 ミリ度の角度誤差を発生することを確認した。



(a)媒体温度依存性

(b)参照光角度依存性

図 7.16 記録媒体の温度ずれがあったときの角度誤差(温度無補償)

7.6.5 補正精度の見積り

本提案の補正精度を見積る。表 7.4 は、表 7.3 に示した外乱によって発生する角度誤差を示している。(a)は記録媒体の角度ずれは完全に補正できたため、0 ミリ度とした。(b)の波長ずれは 0.1nm の波長ずれがあるときの角度誤差の最大値 2.6 ミリ度とした。(c)の記録時と再生時の記録媒体の温度差は、10°Cの温度差があるときの角度誤差の最大値 1.6 ミリ度とした。そして、(d)の記録媒体の温度ずれは 0.35°Cの温度ずれがあるときの角度誤差 2.9 ミリ度とした。ここで、(b)の波長ずれと(d)の温度ずれは等価であるので、角度誤差が大きい、(d)を用いた。この結果、発生する角度誤差を 3.3 ミリ度と見積もった。

以上の検討により、本提案の角度制御信号は、目標であった角度誤差 5 ミリ度以下の実現の見込みを得た。

表 7.4 外乱によって発生する角度誤差

Parameter		Angle error value
(a) Recording-medium tilt	-0.2 – 0.2 degrees	0 mdegree
(b)Wavelength deviation of the reference beam	-0.1 – 0.1 nm	2.6 mdegrees
(c) Recording-medium-temperature deviation (wavelength compensation)	-10 – 10 °C	1.6 mdegrees
(d) Recording-medium-temperature deviation (non-wavelength compensation)	-0.35 – 0.35 °C	2.9 mdegrees
Total (worst case $\sqrt{(a)^2 + (c)^2 + (d)^2}$)		3.3 mdegrees

7.7 まとめ

本章では、ページ間差動位相検出法およびページ間差動強度増幅検出法の耐環境性を向上するため、高速かつ高精度なプローブ光の角度制御技術を提案した。本角度制御技術は、まず角度制御信号をもとにゼロクロス点に、ガルバノミラーを用いてプローブ光の角度を制御する。次にガルバノミラー内部に有するロータリーエンコーダーを用いて最適な角度にプローブ光を制御する。角度制御信号は、従来の光ディスクで用いられていた制御信号と同様の信号となっており、高速化が可能な信号である。そして、角度制御技術は偏光を用いることで記録に影響することなく、高速、高精度な再生を行える。

本検討では、角度制御信号の設計および試作を行い、その精度を実験で確認した。また、記録媒体の傾き、波長ずれ、記録時と再生時の記録媒体の温度差、記録媒体の温度ずれのシミュレーション検討を行い、外乱要因があっても角度誤差 3.3 ミリ度を達成できる見込みを得た。

本角度制御信号を用いたガルバノミラー制御の検討で、ページ間の移動時間 $300\mu\text{s}$ を実現したとの報告がされた[78]。本角度誤差信号を用いた高速なプローブ光の角度制御実現の目途を得た。これにより、空気の流れや温度変化などの外乱をさらに抑制できると考える。

第 8 章 結論

本論文では、干渉計測法に時間の概念を取り入れた新しい干渉計測法を提案した。

第 2 章では、製造ラインおよびホログラフィックメモリに適用するために必要な 4 条件 (測定対象物の形状測定が可能、リアルタイム測定が可能、耐環境性が高い、微弱光の検出が可能) から、干渉計測法の中でホモサイン位相検出が最良であると判断した。また、位相シフト法のアルゴリズムの検討から、カメラの感度ずれに強く、カメラの数も少ない 4 回測定の位相シフト法アルゴリズムが良いと判断した。これにより、4 つのカメラを用いたホモサイン位相検出法で耐環境性に関する課題を抽出した。

ホモサイン位相検出法は、複数のカメラ間の検出信号の強度の差動演算を用いて、物体光と参照光の位相差を検出する。このため、ホモサイン位相検出法は、物体光、参照光の波面ずれの影響を受ける。また、カメラの感度ずれ、ほこり、汚れなどによるカメラ間の検出信号の強度ずれの影響を強く受ける。

第 3 章では、カメラ間の強度ずれによる位相誤差は、参照光の定数項($B(x,y)^2$)が影響していることを明らかにし、参照光の定数項を完全に消去する新しい検出方式を提案した。本方式は、同じカメラの n 回目の検出信号と $n+1$ 回目の検出信号の差動信号を演算し、それらの信号から、 $n+1$ 回目の物体光と n 回目の物体光の位相差 $\theta_n - \theta_{n+1}$ を得る。これにより、参照光の定数項を完全に消去できるため、従来のホモサイン位相検出法に対してロバスト性の向上が見込める。製造ライン向け位相検出では、位相差 $\theta_n - \theta_{n+1}$ に対し復元処理を行うことで、従来のホモサイン位相検出法と同じ位相信号を検出する。そして、ホログラフィックメモリ向けでは、新たにページ間の位相の差を検出するページ間差動位相検出法を新たに提案した。

第 4 章では、製造ライン検査の干渉計測法として、時間微分位相検出法を新たに提案した。時間微分位相検出法は、測定対象物の位相の時間変化を検出する。そして、従来のホモサイン位相検出法と同様に 4 つのカメラを用いることでリアルタイムの位相検出を実現した。ホモサイン位相検出法では、カメラ間の検出信号の強度の差動演算を用いて、物体光と参照光の位相差を検出する。このため、ホモサイン位相検出法はカメラの感度ずれ、ほこり、汚れなどによるカメラ間の検出信号の強度ずれの影響を強く受ける。また、物体光、参照光の波面ずれの影響を受ける。

これに対し、時間微分位相検出法は、同じカメラで検出した時間の異なる 2 つの検出信号の強度の差動演算を用いるため、強度ずれの影響は大幅に低減される。また、本検出法は製造ラインで移動する測定対象物の位相の時間変化のみを検出するため、物体光、参照光の波面ずれに影響しない。さらに、干渉効果を利用することで微弱光の検出も可能である。

一方で、時間微分位相検出法は、物体光の位相の時間変化なので、ホモダイン位相検出法と同様の位相情報を得るには、位相復元が必要となる。本検討では、位相の復元を行うことで時間微分位相検出法が、ホモダイン位相検出法と同様の位相成分となることを実験で確認した。また、ホモダイン位相検出法では検出が困難な強度ずれ、波面ずれ(チルト収差 $(3.5\lambda(\text{peak to valley}))$)の条件でも微弱光(参照光に対する物体光の光量 $1/200$)から高精度な位相情報が得られることを実験で確認した。

そして、時間微分位相検出法の課題について2つ検討を行った。測定対象物の強度分布の移動に伴う高さ誤差に関して検討を行った。本検討により、測定対象物の位相が変化しない領域に対する位相が変化する領域の効率87%以上であれば、測定精度 $1/100\lambda$ を実現できることがわかった。一方で、測定対象物によっては複雑な効率の分布が存在する可能性もある。この課題については例えば、物体光の強度を検出し、その強度情報により補正することが考えられる。ただし、微弱光の検出の観点から増幅検出との兼ね合いとなるため、測定対象物に合わせた最適化が必要となると考える。

また、ラインの振動などによる測定対象物の垂直方向への変位の影響について検討を行い、測定間の垂直方向の変位量を2画素以下にする必要があることがわかった。水平方向の移動量が58画素なので、測定対象物の移動方向が水平方向に対して2度以下が許容値となる。例えば、半導体検査では、ウェハを高精度に回転しているため、このような課題はないが、通常のライン検査を想定すると、垂直方向の変位に対する管理が必要となることが懸念される。

以上の検討より、測定対象物は限定されるが、強度ずれ、波面ずれに対してロバスト性が高く、微弱な物体光も検出可能な位相検出方式の実現の目途を得た。

第5章では、ホログラフィックメモリ向けにページ間の位相差を検出するページ間差動位相検出法を新たに提案した。ページ間差動位相検出法は、時間微分位相検出法をホログラフィックメモリの2次元データの検出に拡張した検出法である。本検討では、ホログラフィックメモリ特有のページ間の再生光の強度ずれの影響に対し、記録する位相を最適化することで、その影響を低減できることを実験で確認した。

そして、実験およびシミュレーションの結果をもとに位相多値記録の見積りを行い、強度ずれ、波面収差(チルト収差 $2.5\lambda(\text{peak to valley})$)、位相可変素子の位相ずれ(1%)、オシレータ光に対する再生光の強度比が $1/100$ 、の条件で位相4値記録を実現できる目途を得た。さらに、従来に対し10倍の記録容量(ページ数)、記録再生速度を2倍の高速化を実現できる目途を得た。

第6章では、時間の概念を強度信号に拡張した、ページ間差動強度増幅検出法を強度変調型ホログラフィックメモリに適用することを提案した。ページ間差動強度増幅検出法は、ページ間の再生光の強度の差を増幅して検出する。ページ間差動強度増幅検出法は4つのカメラを用いてリアルタイム検出を実現する。また、同じカメラで検出した2つの信号の差動演算を行うことで、オシレータ光の強度ずれの影響を受けにくい。そして、強度増幅演算で

位相項を消去するので、波面ずれにも影響しない。

本検討では、ページ間差動強度増幅検出法の増幅の効果を実験で確認した。また、増幅率の検討から、従来に対し、記録容量(ページ数)を 1.5 倍にすることができる見込みを得た。さらに、本方式により、記録再生速度を 1.4 倍高速化できる見込みを得た。

第 7 章では、ページ間差動位相検出法およびページ間差動強度増幅検出法の耐環境性を向上するため、高速かつ高精度なプローブ光の角度制御技術を提案した。本角度制御技術は、まず角度制御信号をもとにセロクロス点に、ガルバノミラーを用いてプローブ光の角度を制御する。次にガルバノミラー内部に有するロータリーエンコーダーを用いて最適な角度にプローブ光を制御する。角度制御信号は、従来の光ディスクで用いられていた制御信号と同様の信号となっており、高速化が可能な信号である。そして、角度制御技術は偏光を用いることで記録に影響することなく、高速、高精度な再生を行える。

本検討では、角度制御信号の設計および試作を行い、その精度を実験で確認した。また、記録媒体の傾き、波長ずれ、記録時と再生時の記録媒体の温度差、記録媒体の温度ずれのシミュレーション検討を行い、外乱要因があっても角度誤差 3.3 ミリ度を達成できる見込みを得た。

本角度制御信号を用いたガルバノミラー制御の検討で、ページ間の移動時間 $300\mu\text{s}$ を実現したとの報告がされた[78]。本角度誤差信号を用いた高速なプローブ光の角度制御実現の目途を得た。これにより、空気の流れや温度変化などの外乱をさらに抑制できると考える。

本研究では、提案した位相検出方式に対し、強度ずれ、波面ずれの検討を行い、従来のホモダイン位相検出法よりも耐環境性の高い干渉計測法であることを示した。これ自体は非常に有効な技術であると考えるが、製造ライン適用には、測定対象物の効率分布や垂直方向の移動により、高さ誤差が発生することがわかった。また、実際の製造現場やデータセンターでは、振動などの別の課題もあることが懸念される。そして、本光学系はカメラを 4 台使用するため、例えば既存の装置に組み込むなどの要求があった場合、小型化が課題となることも懸念される。実際のインライン検査は高速性が望まれると考えており、今回の光学系のようなカメラ検出では速度が要求を満たせない可能性がある。これについてはラインセンサなどの高速な一次元センサを用いることで対応できると考えるが 4 つの一次元センサの調整などの課題は残る。今後、検査やホログラフィックメモリなどで、要求される仕様に応じて光学系、信号処理、サーボ等で対応する必要があると考える。

上述した課題を解決し、本技術が検査装置、情報記録装置などに適用され、人々の安心安全な社会を構築する手助けになることを期待する。

参考文献

- [1] B. Pinto, J. Saito, W. Shen, L. Cheung, A. Wang, "New Inspection Technology for 45nm Wafers," Yield Management Solutions, Spring 2007, 28 (2007).
- [2] K. Kapkin, K. Kim, J. Saito, H. Suh, C. G. Koh, D. J. Kim, B. S. Moon, S. H. Pyi, "A New Approach to Identifying Large, Yield-Impacting Defects on Polished Si Wafers," Yield Management Solutions, Summer 2007, 3 (2007).
- [3] M Ueharam, W Yashiro, and A Momose, "Effectiveness of X-ray grating interferometry for non-destructive inspection of packaged devices," J. Appl. Phys., 114 (2013).
- [4] C. Otani, Y. Sasaki, T. Yuasa, M. Siga, H. Kasuga, H. Ohmori, "THz 3D Imaging Phase-shifting Interferometry," in 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, (Optical Society of America, 2013), paper TuC2_5 (2013).
- [5] 松岡利幸、菅井雅也、"表面形状をナノメートル分解能で測定可能なナノリードの開発" アンリツテクニカル、83、45 (2006).
- [6] IDC 広報発表(2019)
<https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prJPI45371219> (閲覧日 : 2020 年 1 月 1 日)
- [7] K. Tajima, Y. Nakamura, and T. Hoshizawa, "High-density recording in holographic data storage system by dual 2-level run-length-limited modulation," Jpn. J. Appl. Phys. 55, 09SA09 (2016).
- [8] K. Zukeran, A. Okamoto, M. Takabayashi, A. Shibukawa, and A. Tomita, "38-Level Spatial Quadrature-Amplitude Modulation Recording with Double-Referential Holography," ISOM Tech. Dig., Th-L-06 (2012).
- [9] T. Utsugi "Spatial Differential Encoding and Wavefront Estimation for phase Multi-level Holographic Data Storage," ISOM Tech. Dig., Tu-G-02 (2017).
- [10] W. Sun, G. Wang, N. Fang, and E. S. Yeung, "Wavelength-Dependent Differential Interference Contrast Microscopy: Selectively Imaging Nanoparticle Probes in Live Cells," Analytical Chemistry, 81, 22, 9203 (2009).
- [11] J. Rogers and C. W. Keevil, "Immunogold and Fluorescein Immunolabelling of Legionella pneumophila within an Aquatic Biofilm Visualized by Using Episcopic Differential Interference Contrast Microscopy," APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY, 58, 2326 (1992).
- [12] J. Tanaka, M. Nagashima, K. Kondo, Y. Hoshino, J. Kiyohara, C. Makifuchi, S. Nishino, S. Nagatsuka, A. Momose, "Cadaveric and in vivo human joint imaging based on differential phase contrast by X-ray Talbot-Lau interferometry," Z. Med. Physik, 23, 222 (2013).
- [13] J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White and D. J. Brangaccio,

- “Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses,” *Appl. Opt.* 13, 2693 (1974).
- [14] P. K. Rastogi, “Holographic Interferometry,” ed. K. Creath (Springer, Berlin, 1994) p. 109.
- [15] D. Malacara, “Optical Shop Testing,” ed. H. Schreiber and J. H. Bruning (Wiley, New York, 2008) 3rd ed., p. 557.
- [16] E. Wolf “Progress in Optics,” ed. K. Creath (Elsevier, North Holland, 1988) 26th ed., p. 357.
- [17] B. Bhushan, J. C. Wyant, and C. L. Koliopoulos, “Measurement of surface topography of magnetic tapes by Mirau interferometry,” *Appl. Opt.* 24, 1489 (1985).
- [18] I. Yamaguchi, T. Ida, M. Yokota, and K. Yamashita, “Surface shape measurement by phase-shifting digital holography with a wavelength shift,” *Appl. Opt.* 45, 7610 (2006).
- [19] C. P. Brophy, “Effect of intensity error correlation on the computed phase of phase-shifting interferometry,” *J. Opt. Soc. Am. A*, 7, 537 (1990).
- [20] X. F. Meng “Two-step Phase-shifting interferometry and its application in image encryption,” *Opt. Lett.* 31, 1414 (2006).
- [21] P. K. Rastogi, “Holographic Interferometry,” ed. K. Creath (Springer, Berlin, 1994) p. 122.
- [22] P. Hariharan, B. F. Oreb, and T. Eiju, “Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm,” *Appl. Opt.*, 26, 2504 (1987)
- [23] P. Gregorčič, T. Požar, and J. Možina, “Quadrature phase-shift error analysis using a homodyne laser interferometer,” *Opt. Express*, 17 16322 (2009).
- [24] T. Keem, S. Gonda, I. Misumi, Q. Huang, and T. Kurosawa, “Simple, real-time method for removing the cyclic error of a homodyne interferometer with a quadrature detector system,” *Appl. Opt.*, 44, 3492 (2005).
- [25] S. Rerucha, Z. Buchta, M. Sarbort, J. Lazar and O. Cip, “Detection of Interference Phase by Digital Computation of Quadrature Signals in Homodyne Laser Interferometry,” *Sensors*, 12, 14095 (2012).
- [26] P. Gao, B. Yao, I. Harder, J. Min, R. Guo, J. Zheng, and T. Ye, “Parallel two-step phase-shifting digital holograph microscopy based on a grating pair,” *J. Opt. Soc. Am. A* 28, 434 (2011).
- [27] A. Okamoto, K. Kunori, M. Takabayashi, A. Tomita, and K. Sato, “Holographic diversity interferometry for optical storage,” *Opt. Express* 19, 13436 (2011).
- [28] Y. Awatsuji, M. Sasada, and T. Kubota, “Parallel quasi-phase-shifting digital holography,” *Appl. Phys. Lett.* 85, 1069 (2004).
- [29] J. Millerd, N. Brock, J. Hayes, M. N.-Morris, M. Novak, and J. Wyant, “Pixelated Phase-Mask Dynamic Interferometer,” *Proc. SPIE*, 5531, 304 (2004).
- [30] B. T. Kimbrough, “Pixelated mask spatial carrier phase shifting interferometry algorithms and associated errors,” *Appl. Opt.* 45, 4554 (2006).
- [31] 北川克一、“光干渉法による三次元計測、”計測と制御、第 50 巻、第 2 号 (2011).
- [32] 日立ハイテクノロジーズホームページ

<https://www.hitachi-hightech.com/jp/science/products/microscopes/csi/> (閲覧日 : 2020 年 1 月 1 日)

- [33] S. B. Mehta and C. J. R. Sheppard, "Partially coherent image formation in differential interference contrast (DIC) microscope," *Opt. Express*, 16, 19462 (2008).
- [34] S. Terakawa, "Differential Interference Contrast Microscope," *MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY*, 15, 702 (1997).
- [35] D. D. Nolte, "Optical Interference for Biology and Medicine," (Springer, New York, 2011) p. 255.
- [36] C.J. Cogswell, N.I. Smith, K.G. Larkin, and P. Hariharan, "Quantitative DIC microscopy using a geometric phase shifter," *Three-Dimensional Microscopy Image Acquisition and Processing IV*, 72 (1997).
- [37] T. J. McIntyre, C. Maurer, S. Fassel, S. Khan, S. Bernet, and M. R. Marte, "Quantitative SLM-based differential interference contrast imaging," *Opt. Express*, 18, 14063 (2010).
- [38] 伊藤雅英、石渡裕、塚田明宏、谷田貝豊彦、"位相変調型微分干渉顕微鏡—透過物体の位相分布の定量測定—," *光学*, 30, 605 (2001).
- [39] C. Oh, S. O. Isikman, B. Khademhosseini, and A. Ozcan, "On-chip differential interference contrast microscopy using lensless digital holography," *Opt. Express*, 18, 4717 (2010).
- [40] M. Takeda, H. Ina and S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," *J. Opt. Soc. Am.*, 72, 156 (1982).
- [41] K. H. Womack, "Interferometric phase measurement using spatial synchronous detection," *Opt. Eng.* 23, 391 (1984).
- [42] P. K. Rastogi, "Holographic Interferometry," ed. K. Creath (Springer, Berlin, 1994) p. 132.
- [43] K. Itoh, "Analysis of the phase unwrapping algorithm," *Appl. Opt.*, 21, 2470 (1982).
- [44] G. Fornaro, A. Pauciullo, and E. Sansosti, "Phase Difference-Based Multichannel Phase Unwrapping," *IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING*, 14, 960 (2005)
- [45] H. J. Coufal, D. Psaltis, and G. T. Sincerbox, "Holographic Data Storage," (Springer, Berlin, 2000), p. 10.
- [46] P. J. V. Heerden, "Theory of Optical Information Storage in Solids," *Appl. Opt.* 2, 393 (1963).
- [47] J. H. Hong, I. McMichael, T. Y. Chang, W. Christian, and E. G. Paek, "Volume holographic memory systems: techniques and architectures," *Opt. Eng.* 34, 2193 (1995).
- [48] H. Horimai and X. Tan, "Holographic versatile disc system," *Opt. Rev.* 12, 90 (2005).
- [49] M. Sato, M. Ogasawara, Y. Ito, S. Tanaka, and T. Iida, "New coaxial interference method for consumer holographic memory," *Jpn. J. Appl. Phys.* 46, 3850 (2007).
- [50] K. Tanaka, M. Hara, K. Tokuyama, K. Hirooka, K. Ishioka, A. Fukumoto, and K. Watanabe, "Improved performance in coaxial holographic data recording," *Opt. Express* 15, 16196 (2007).
- [51] T. Shimura, S. Ichimura, R. Fujimura, K. Kuroda, "Analysis of a collinear holographic storage system: introduction of pixel spread function," *Opt. Lett.* 31, 1208 (2006).
- [52] F. H. Mok, "Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate," *Opt. Lett.*, 18, 915

(1993)

- [53] J. Ashley, M.-P. Bernal, G. W. Burr, H. Coufal, H. Guenther, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, B. Marcus, R. M. Macfarlane, R. M. Shelby, and G. T. Sincerbox, "Holographic data storage," IBM J. Res. Dev. 44, 341 (2000).
- [54] K. Anderson and K. Curtis, "Polytopic multiplexing," Opt. Lett. 29, 1402 (2004).
- [55] T. Hoshizawa, K. Shimada, K. Fujita, and Y. Tada, "Practical angular-multiplexing holographic data storage system with 2 terabyte capacity and 1 gigabit transfer rate," Jpn. J. Appl. Phys. 55, 09SA06 (2016).
- [56] K. Curtis, L. Dhar, A. Hill, W. Wilson, and M. Ayres, Holographic Data Storage (Wiley, New York, 2010), p. 17.
- [57] M. R. Ayres, "Coherent techniques for terabyte holographic data storage," ODS Tech. Dig., 7730-1 (2010).
- [58] M. Omori, H. Kondo, T. Miyata, N. Moria, H. Matsuo, T. Sasamuro, S. Okauchi, J. Ensher, R. Harris, A. Wegner, J. Cozakos, "Enhancement of a Tunable Blue Laser for Holographic Data Storage," ODS Tech. Dig., 7730-28 (2010).
- [59] J. Ensher, A. Wegner, J. Cozakos and R. Mandeville, "A laser module for Holographic Data Storage," ODS Tech. Dig., 7730-29 (2010).
- [60] K. Curtis, L. Dhar, A. Hill, W. Wilson, and M. Ayres, Holographic Data Storage (Wiley, New York, 2010), p. 87.
- [61] 志村努, "ホログラフィックメモリの記録材料評価法の標準化にむけて," レーザー研究, 38, 338 (2010).
- [62] M. Hosaka, T. Ishii, A. Tanaka, S. Koga, and T. Hoshizawa, "1 Tbit/inch² Recording in Angular-Multiplexing Holographic Memory with Constant Signal-to-Scatter Ratio Schedule," Jpn. J. Appl. Phys., 52, 09LD01 (2013).
- [63] H. Mikami, T. Shimano, T. Kurokawa, T. Ide, J. Hashizume, K. Watanabe and H. Miyamoto, "Amplification of Optical Disk Readout Signals by Homodyne Detection," Jpn. J. Appl. Phys., 48, 03A014 (2009).
- [64] T. Ide, K. Osawa, H. Mikami and K. Watanabe, "Reduction of Interlayer Crosstalk of Multilayer Optical Disc by Using Phase-Diversity Homodyne Detection," Jpn. J. Appl. Phys., 51, 08JE01 (2012).
- [65] T. Fujita and H. Horikoshi, "Focus Sensing Method Using Far-Field Diffracted Waves and Its Application to Holographic Data Discs," Jpn. J. Appl. Phys., 48, 03A037 (2009).
- [66] Z. Göröcs, T. Sarkadi, G. Erdei, and P. Koppa, "Hologram positioning servo for phase-encoded holographic data storage systems," Appl. Opt., 49, 611 (2010).
- [67] H.-C. Song, N. Kim, D.-H. Kim, S.-Y. Lim, J. H. Cho, H. Yang, N.-C. Park, K.-S. Park, and Y.-P. Park, "Tracking servo method using reflective optical filter for holographic data storage system," Microsyst Technol (2011) 1057.

- [68] C. W. Lee, B. S. Kwak, C. C. Chung, and M. Tomizuka, "Design of the Tracking Controller for Holographic Digital Data Storage," *IEEE/ASME TRANS. MECHATRONICS*, 15, 242 (2010).
- [69] S.-H. Kim, J. H. Kim, Y. Lee, H. Yang, J.-Y. Park, K.-S. Park, and Y.-P. Park, "Tilt detection and servo control method for the holographic data storage system," *Microsyst Technol*, 15, 1695 (2009) .
- [70] M. Ayres, A. Hoskins, P. C. Smith, and J. Kane, "Wobble alignment for angularly multiplexed holograms," *ISOM and ODS Tech. Dig. ThC01* (2008).
- [71] J. H. Kim, H. Yang, N. Kim, W. Jeong, and J. B. Park, "Pattern analysis for tilt servo control in holographic data storage system," *Microsyst Technol*, 18, 1677 (2012).
- [72] T. Usui, A. Ogawa, H. Okano, K. Watanabe, K. Kuroda, S. Tatsuta, and Y. Kubota, "Temperature Compensation Servo Algorithm for Holographic Data Storage," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 49, 08BKD04 (2010).
- [73] N. Kim, K. Junga, K. Kima, P. Yoona, J. Parka, and J. Park, "A Novel Angle Servo for Holographic Data Storage System," *ISOM Tech. Dig.*, 66201M (2007).
- [74] S.-Y. Lim, J. Lee, J.-S. Lee, W. Jeong, H. Yang, N.-C. Park, K.-S. Park, and Y.-P. Park, "Disturbances Analysis Considering an Effective Servo System for Holographic Disc Drive," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 52, 09LF03 (2013).
- [75] T. Ishii, K. Shimada, S. Hughes, A. Hoskins, and K. Curtis, "Margin Allocation for a 500GB Holographic Memory System using Monocular Architecture," *ODS Tech. Dig.*, PD1(2009).
- [76] K. Curtis, L. Dhar, A. Hill, W. Wilson, and M. Ayres, *Holographic Data Storage* (Wiley, New York, 2010) , p. 352.
- [77] K. Curtis, L. Dhar, A. Hill, W. Wilson, and M. Ayres, *Holographic Data Storage* (Wiley, New York, 2010) , p. 26.
- [78] K. Yamada, T. Ogata¹, M. Hosaka¹, K. Fujita, and A. Okuyama, "High-speed reference-beam-angle control technique for holographic memory drive," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 55, 09SA04 (2016).

研究業績

本研究に関する投稿論文

1. K. Yamazaki, M. Hosaka, K. Yamada, T. Ogata, K. Shimada, “Ultra-narrow interval angular control signal for holographic data storage system,” Opt. Rev. 23, 848-858 (2016).
2. K. Yamazaki, Y. Takashima, “Environmentally Robust Phase Detection Methods for Industrial Non-destructive Inspection,” Jpn. J. Appl. Phys., 57, 09SB04 (2018).
3. K. Yamazaki, M. Yamaguchi, “Environmentally Robust Phase Detection for Holographic Data Storage,” Jpn. J. Appl. Phys., 58, SKKD01 (2019).
4. K. Yamazaki, M. Yamaguchi, “Time-Differential Phase Detection Method for Robust Industrial Inspections,” Opt. Lett., Under revision.

本研究に係る国際会議発表

1. K. Yamazaki, M. Hosaka, K. Yamada, T. Ogata, K. Shimada, “Holographic Data Storage for Realizing Angular Multiplexing employing Ultra-narrow Angular Interval,” ODF Tech. Dig., 2S3-13 (2016).
2. K. Yamazaki, Y. Takashima, “Environmentally Robust Phase Detection Methods for Industrial Non-destructive Inspection,” ISOM Tech. Dig., Tu-J-39 (2017).
3. K. Yamazaki, M. Yamaguchi, “Environmentally Robust Phase Detection for Holographic Data Storage,” ISOM Tech. Dig., Tu-J-09 (2018).¹⁾

*1) Poster Award

学会における発表

1. 山崎 和良、山口 雅浩、“ホログラフィックメモリのページ間の強度差分信号の増幅検出に関する検討”、Optics & Photonics Japan 講演予稿集、3pP11 (2019).

寄稿

1. 山崎 和良、保坂 誠、嶋田 堅一、山田 健一郎、緒方 岳、“超狭角度多重のホログラフィックデータシステムの再生技術”、日本光学会第 46 巻、第 6 号 (2017)

特許

1. (登録番号)特許第 5726816 ホログラム用光ピックアップ装置、光情報記録再生装置、光情報記録再生方法、及び光情報装置

2. (登録番号)P8937855 Holographic optical pickup device, optical information recording and reproducing device, and method of reproducing optical information, having angular variable element arrangements for changing a light angle
3. (登録番号)PZL201310244134.3 ホログラム用光ピックアップ装置及び光情報記録再生装置
4. (登録番号)特許第 6158311 ホログラム記録再生装置、角度多重記録再生方式
5. (登録番号)P9508377 Hologram recording and reproducing device, and angular multiplexing recording and reproducing method
6. (登録番号)PZL201380075330.0 ホログラム記録再生装置、角度多重記録再生方式
7. (出願番号)P15/467365 Interference measurement device

謝辞

本論文は2017年4月から2年間、東京工業大学工学院情報通信系の社会人博士課程および株式会社日立製作所に在籍し、執筆したものです。

本研究を行うにあたり、多大なるご指導ご鞭撻を賜った本学 山口雅浩教授に心から感謝いたします。また、論文審査等において、貴重なご指導とご助言を頂いた本学 中村健太郎教授、金子寛彦教授、小尾高史准教授、渡辺義浩准教授に深く感謝いたします。

本研究は、アリゾナ大学光科学部客員研究員として、赴任したことをきっかけにして開始した研究です。アリゾナ大学 高島譲准教授には、本研究に関して多くのご助言をいただくとともに研究以外の面でもお世話になりました。厚く御礼申し上げます。干渉測定で世界的に有名な大学で研究ができ、非常に刺激を受けました。

また、本研究のご理解、ご支援いただいた、株式会社日立製作所 研究開発グループ エレクトロニクスイノベーションセンタ 光学情報処理研究部 星沢部長に深く感謝いたします。

そして、事務手続きなどでお世話になりました研究室秘書の駒井恭代様に感謝申し上げます。

最後に、最大の理解者であり、いつもそばにいてくれる妻の芙実、笑顔が最高の息子理久、可愛い娘の花穂に感謝します。