

博士論文

FMCW 法を用いた距離計測および形状計測の高精度化に関する研究

指導教員 高橋 哲 教授

東京大学大学院 工学系研究科 先端学際工学専攻

学生証番号 37-187274

針山 達雄

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	2
1.2 形状計測技術の現状	6
1.3 本研究の目的と概要	8
1.4 本論文の構成	10
第2章 計測原理	12
2.1 緒言	13
2.2 FMCW 法	14
2.3 リサンプリング法	16
2.4 FMCW 法における課題	19
2.5 結言	20
第3章 距離計測基本光学系の開発	21
3.1 緒言	22
3.2 FMCW 法に用いる光源の選定	23
3.3 VCSEL の基本特性	25
3.3.1 波長掃引幅	25
3.3.2 波長掃引の周波数応答	25
3.3.3 レーザ線幅計測	25
3.4 リサンプリングシミュレーション	28
3.5 距離計測の基本特性評価	33
3.5.1 実験装置構成	33
3.5.2 評価結果	33
3.6 形状計測のデモンストレーション	36
3.6.1 装置構成	36
3.6.2 評価結果	36

3.7 結言	39
第4章 狭隘部3次元形状計測装置の開発	40
4.1 緒言	41
4.2 装置構成の提案	42
4.2.1 広範囲高精度計測を実現する距離のゲイン補正とオフセット補正	42
4.2.2 偏光を用いた測定方向切替	42
4.2.3 開発した狭隘部3次元形状計測装置	43
4.3 開発装置の精度評価	46
4.3.1 レーザ干渉計との比較評価	46
4.3.2 リングゲージを用いた評価	46
4.3.3 ブロックゲージを用いた評価	46
4.3.4 内部に段差を有する形状測定のデモンストレーション	46
4.4 結言	49
第5章 周囲環境温度に対するロバスト性評価と誤差低減手法の提案	50
5.1 緒言	51
5.2 環境温度を変えた評価	52
5.2.1 評価方法	52
5.2.2 評価結果	52
5.3 誤差発生メカニズムの検討	55
5.4 シミュレーション解析	58
5.4.1 距離オフセット誤差の解析	58
5.4.2 距離ゲイン誤差の解析	60
5.5 偏光特性に基づいた測定誤差低減手法の提案	62
5.6 実験検証	65
5.6.1 距離オフセット誤差低減手法の評価	65
5.6.2 距離ゲイン誤差低減手法の評価	67
5.7 結言	69
第6章 粗面・傾斜面に対するロバスト性評価と誤差低減手法の提案	70
6.1 緒言	71
6.2 粗面・傾斜面測定の課題	72
6.3 スペックル起因の測定誤差の発生メカニズムの解明	74
6.4 FMCWの検出波形の特徴量に基づく測定誤差低減法の提案	76
6.5 誤差低減手法の基礎実験評価	78

6.6 提案手法の表面性状に対してのロバスト性評価	83
6.6.1 様々な表面粗さ，傾斜角度での評価	83
6.6.2 形状測定精度の評価	83
6.7 提案手法の狭隘部 3 次元形状装置への適用	87
6.8 結言	90
第 7 章 結論	91
7.1 結言	92
謝辞	94
参考文献	95

第1章 序論

1.1 研究背景.....	2
1.2 形状計測技術の現状	6
1.3 本研究の目的と概要	8
1.4 本論文の構成	10

1.1 研究背景

近年 Lidar をはじめとして、光を使って非接触で計測対象までの距離を測定する技術が着目されている。例えば、自動車分野では自動運转向けのための Lidar 技術の開発が進んでいる(Figure 1.1) [Li 2020]。レーザは非接触で高速に対象までの距離を測定可能であるため、瞬時に周囲の状況を得る必要がある自動運转向けの計測に適している。現在、実用化に向けて、小型で安価なセンサ開発が進められている。またプラントや建屋の施工向けの計測として、レーザスキャナを用いた測定が行われている(Fig.1.2) [LIU 2012]。建屋の劣化検査や、設計データのない建屋の形状のモデル化を目的に、レーザスキャナにて建屋の形状を測定し、測定結果を基に、3D モデルを生成し、建物や配管の配置を正確に認識することに用いられている。

自動運转向けの Lidar や、建屋の形状計測向けのレーザスキャナと比較して、高精度計測が求められるモノづくり現場においても非接触かつ自動で形状計測するニーズが高まっている。例えば、モノづくりにおいて、熟練者不足や海外生産拠点での品質維持が課題となっており、デジタル化によって、属人性がなく、どこでも同品質を維持することが望まれている。その一例として、AI や IoT センシングなどのデジタル技術を活用し、高品質、高付加価値な製品を短期間で効率的に製造することをめざすスマートファクトリ(Fig.1.3)が進行している[経済産業省 2017]。こうしたデジタル化の潮流の中で、検査や計測工程においては、製造中の部品の 3 次元形状データを自動で高精度に取得し、前後の工程条件の管理や、製品の品質管理のために計測データを利活用することが重要となる[阿部 2019]。

なかでも、自動車、航空機、建設機械の油圧機器やエンジン機器等の内部に流路面や摺動面をもつ部品に対しては、穴の内面形状が製品の性能に直結するため、高精度な加工と検査が要求される(Fig.1.4)。そうした内面の狭い穴(本論文では $\phi 100\text{ mm}$ 以下の狭い穴を狭隘部と呼ぶ)の形状を高精度に把握する主な手段として、CMM (Coordinate Measuring Machine)や、オンマシン方式のタッチプローブのような接触式プローブが存在する。接触式プローブは主として点計測のため、基準平面の位置の割り出しや寸法評価には適しているが、3 次元的な幾何形状を得るには長時間の計測を要する点に課題がある。また穴形状が急変している場合、プローブがワーク表面に接触できず測定できないといった課題もある。

こうした非接触計測へのニーズを受けて、本研究ではレーザを用いた非接触形状計測の技術開発に着目した。特に狭隘部の形状計測はニーズが高いものの、狭く複雑な形状をしているため、技術的難易度が高く、実現が困難であった。狭隘部の非接触計測が実現すれば、より高度なモノづくりが可能となり、その社会的価値は高い。そこで本研究では狭隘部 3 次元形状計測技術の開発に取り組むこととした。

技術開発するにあたり、モノづくり現場でのニーズ調査結果に基づき、狭隘部 3 次元形状計測装置の仕様を下記にまとめた。

- ・測定範囲 3~50 mm(単純円筒の内壁の場合 $\phi 6\sim 100\text{ mm}$ に相当)
- ・測定精度 単純円筒の場合 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$ 、複雑形状の場合 $\pm 20\text{ }\mu\text{m}$

- ・測定速度 1断面 1秒以内(1断面当たりの測定点密度 10,000 点 : 10 kHz に相当)
- ・環境温度 精密測定が困難な製造現場温度環境(20~30℃内で大きく変動)
- ・対象内面性状 散乱面(表面粗さ Rz 3.2~6.4 μm)

測定範囲 3~50 mm は, 測定ニーズのおよそ 9 割をカバーすることができる。測定精度に記載の単純円筒とは, Fig.1.5(a)に示すように円筒形状をしている部品であるが, 油圧機器の摺動面のように製品性能に直結するため, 加工公差が厳しく, 測定精度 $\pm 5 \mu\text{m}$ という高い測定精度が求められる形状をさす。また複雑形状とは, Fig.1.5(b)に示すように内部に複合された形状を持つ部品, 例えばボールねじの雌ねじのように円筒面にねじが切られた形状などをさす。本形状は, 加工が難しいため, 単純円筒と比較して測定精度は $\pm 20 \mu\text{m}$ と緩和される。測定速度が 1 断面 1 秒以内であれば, 様々な分野への適用が可能である。さらに実適用するためには, 製造現場の温度環境(20~30℃内で大きく変動)や実ワークの内面性状(表面粗さ Rz 3.2~6.4 μm)の条件をすべて満たすことが必須である。また仕様には記載はないが, 産業応用するためには, 装置構成はシンプルで, 構成部品は低コストなものが望ましい。これらの要求を満たす狭隘部 3 次元形状計測装置を開発するにあたり, 現状の光を用いた距離計測技術および形状計測技術について次節にまとめる。

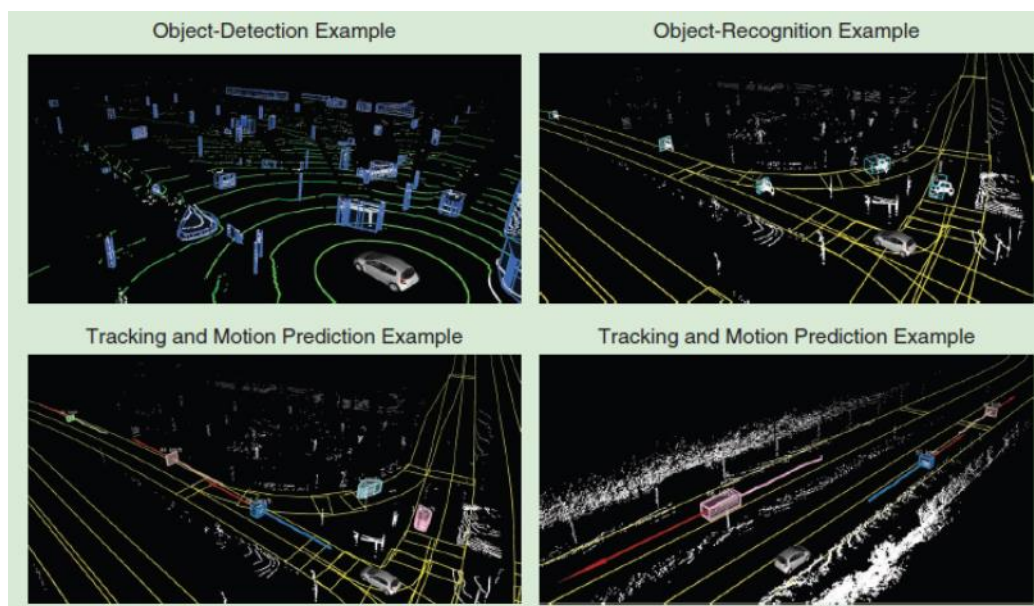


Fig.1.1 Example of automobile lidar application[Li 2020].

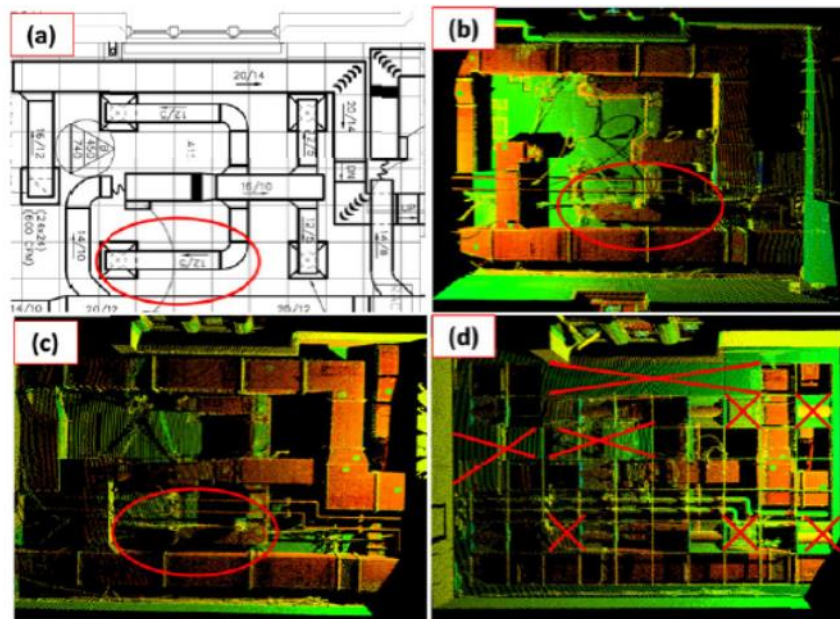


Fig.1.2 Example of laser scanner application for building information modeling[Liu 2012].

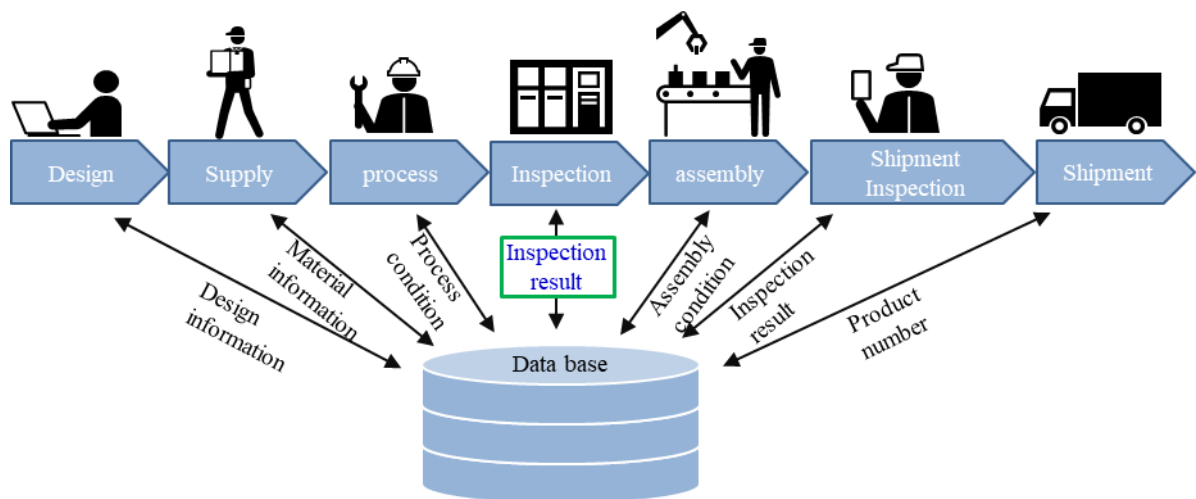


Fig.1.3 Schematic drawing of smart factory. Realizing total optimization by collecting each process information.

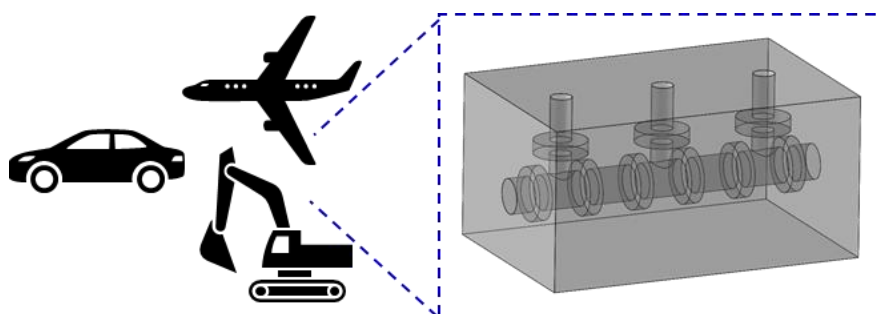


Fig.1.4 Schematic drawing of narrow-space mechanical parts.

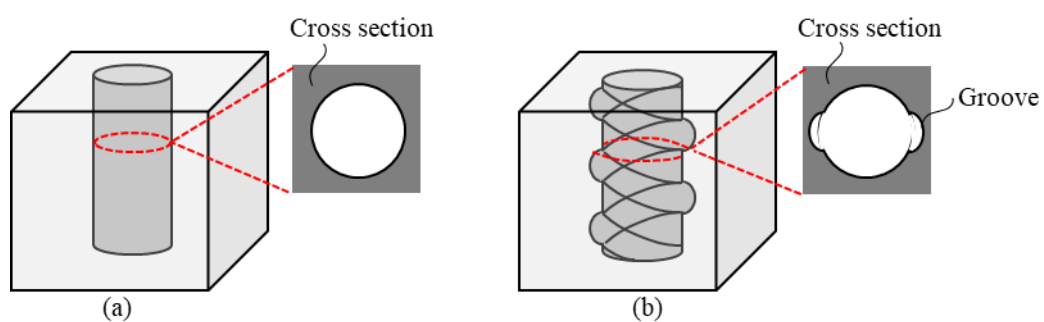


Fig. 1.5 Schematic of target shape:
(a) simple cylindrical shape, (b) complex shape.

1.2 形状計測技術の現状

レーザ距離測定方式には、代表的なものとして以下のものがある。それぞれの概略図を Table 1.1 にまとめる。また各手法の測定範囲と測定精度に関して Fig.1.6 に示す [Berkovic 2012]。

①TOF (Time-of-Flight) 法[[Liu 2018] : パルス光を測定対象に照射し、戻り光の飛行時間から、対象までの距離を測定する方法。測定範囲は数百 m と広いが、測定精度は数十 mm と低く、主に自動車向けの Lidar に用いられる。精度が低い理由は、パルス光の戻りを高精度な時間分解能で測定する必要があるが、例えば、 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ で進むパルス光を 10GHz の時間分解能で測定したとしても距離精度は 30mm となり、検出回路の物理的な検出時間の制約のためである。

②フェーズシフト法[Hwang 2012] : 強度変調したレーザ光を測定対象に照射し、戻り光の強度変化の位相から、対象までの距離を測定する方法。測定範囲は数十 m と広いが、測定精度は数 mm と低い。主にプラントや建屋向けの形状計測に用いられる。強度変調周波数に比例して測定精度は向上するが、応答速度が高いほど、電気回路の制約から検出器の受光面積を小さくする必要があるため、遠方の微弱な光を検出することができない。よって、測定精度と測定距離のトレードオフから測定精度が限定される。

③FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave)法[石岡 2001],[Iiyama 2006] : レーザ光の周波数を掃引しながら測定対象に照射し、戻り光と参照光の差周波数から、対象までの距離を測定する方法。従来の報告では、測定範囲は数十 m と広いが、測定精度は数 mm と低いものであった。後述するが、測定精度はレーザの光周波数掃引幅に依存し、近年新たな光源の開発により、測定精度が数 μm と飛躍的に向上している。

④三角測量法[金田 1991] : レーザ光源と検出器の距離及び、レーザ光源と検出器とレーザ照射位置から成る三角形の角度から、対象までの距離を測定する方法。代表例として、光切断法や縞パターン投影法などがある。測定範囲は数十 mm から数百 mm と近距離を、測定精度は数百 μm から数十 μm と高精度に測定する。近年、モノづくりの現場での活用が始まっている。

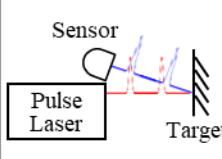
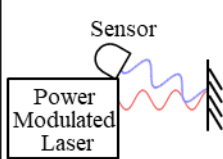
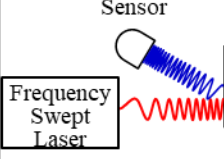
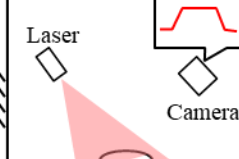
我々の研究対象とするモノづくりの現場適用に向けては、④の三角測量法が測定距離及び測定精度としては満たしている。しかし三角測量法は、斜めからレーザを対象に照射して、反射した光を斜めから検出することで、対象までの距離を測定するために、測定対象が複雑な形状をしている場合は死角ができてしまい測定できない箇所が発生する。本研究で対象とする狭隘部は狭く入り組んだ穴形状であるため、三角測量法では死角のために測定が困難である。そのため、①～③の方式のように、レーザの照射軸と検出軸が同一の距離計測方式が望ましい。

①の TOF や②のフェーズシフト法に関しては、近年、光コムレーザを用いた方式が提案されている。光コム同士のセルフビートダウン方式を用いた方式や、光コムのパルス干渉を用いた方式などがある [Minoshima 2000], [Matsumoto 2012], [Onoe 2016]。また産業応用に成功している例として、繰り返し周波数の異なる 2 つの光コムを用いた

方式がある[清田 2022]。しかし、光コムレーザは高価であり、かつ安定して発振するためには、周囲環境温度が一定であることが望ましい。周囲環境温度が安定していないモノづくりの現場では取扱いに注意を要する課題がある。

本研究では③の FMCW を選定することにした。2 章の測定原理で詳細は説明するが、FMCW 法は、シンプルな構成で高精度化を実現可能な特徴を有する。測定精度は光源の光周波数掃引幅に依存する。近年新たな光源の開発により、高精度化を実現している例がある。例えば、参考文献[Baumann 2014]では、1 m の距離を 0.1 μm 以下の精度での計測が報告されている。しかし、測定用の ECL(External Cavity Laser)と光コムレーザを用いており、装置構成が複雑であり、かつレーザを 2 台用意する必要があるため装置コストが高額となる。また他の研究例として、MEMS-VCSEL(Micro Electro Mechanical Systems - Vertical Cavity Surface Emitting Laser)を用いることで 1m の距離を数 μm の精度で測定した結果が報告されている[Wang 2016]。しかし MEMS-VCSEL は市販化されているものの、まだ一般的に普及はしておらず、装置コストが高価になる。

Table 1.1

Method	Time of flight	Phase shift	FMCW	Triangular
Principle	 Time $\propto$ Distance	 Phase $\propto$ Distance	 Frequency $\propto$ Distance	

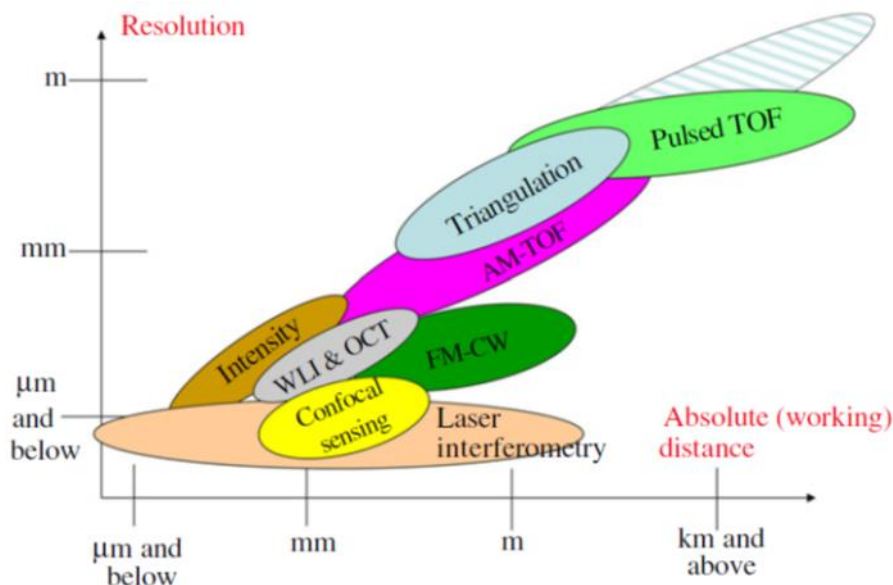


Fig. 1.6 Measurement range and measurement resolution for each measurement method[Berkovic 2012].

1.3 本研究の目的と概要

1.2 節で述べたように本研究では、距離測定方法として、FMCW 法を選定することとした。同節で述べたように、FMCW 法は測定精度が光源に依存する。近年高価な光源を使って高精度化を実現した例はあるが、比較的安価な光源を用い、信号処理を工夫することで、高精度化を実現できれば、産業用途への活用が広がる。また FMCW 法はレーザの照射軸と受光軸が同一なため、三角測量と比較して死角が生じにくく、狭く複雑な穴形状を測定するためには、より適した方式である。

Fig.1.7 にレーザの照射軸と受光軸が同一な光学系(FMCW 法を含む)を用いた形状計測装置の構成例を示す。Fig.1.7(a)に一般的な 3 次元形状計測装置の概略図を示す。距離計測用のレーザをファイバフォーカサによって空間に射出する。ミラー走査機構(例えばガルバのミラー)によって、レーザを 2 次元に走査することで対象の 3 次元形状を測定する。

次に Fig.1.7(b)に狭隘部 3 次元形状計測装置の概略図を示す。距離計測用のレーザをファイバフォーカサによって空間に射出する。レーザは回転モータに取り付けられたシャフト内を通過し、シャフト先端のミラーで反射して対象に照射する。シャフトを回転させることで、対象の断面の形状を測定し、さらにプローブを Z 軸方向に走査することで、対象の 3 次元形状を測定する。

FMCW 法に基づく高精度距離計測および形状計測を実現するための本研究の取組みに関して以下に説明する。まず先述したように、産業応用するためには、装置構成はシンプルであり、構成部品は低コストなものが望ましい。FMCW 法では光源が測定精度を決めるが、比較的安価な光源を用い、信号処理を工夫することで、高精度化を実現できれば、産業用途への活用が広がる。そこで、FMCW 用の光源の選定および信号処理方法を含む距離計測の基本光学系を開発することとした。

また特に精密測定に多大な影響をおよぼす次の 2 点の問題点を解決する手法を開発することとした。

1 点目は環境温度変動である。高精度な加工を行う現場では、温度が安定していることが望ましく、温調の重要性が高まってきている。また μm 程度の高精度な計測を行う場合においても温度が安定していることが望ましい。しかしながら、製造現場では、加工機等の稼働により、 10°C 程度の急激な変動が生じる場合がある。そのため、温度変動が生じる製造現場であっても精密測定することが必須となる。そこで本研究では、周囲環境温度が急激に変動しても安定して測定できる手法の開発に取り組んだ。

2 点目は対象の表面性状である。測定対象は機械加工部品であるため様々な面粗さを有する。一般的に、FMCW 法を含む光計測はそうした対象の表面性状の影響を受けやすい。さらに対象が複雑な形状をしていた場合、面が傾斜しているため、レーザの入射角度が大きく変動する。そのため表面粗さが光学応答に与える影響も異なるため、安定した測定を行うことは困難となる。そこで本研究では、対象の面粗さやレーザの入射角度が変動しても安定して測定できる手法の開発に取り組んだ。

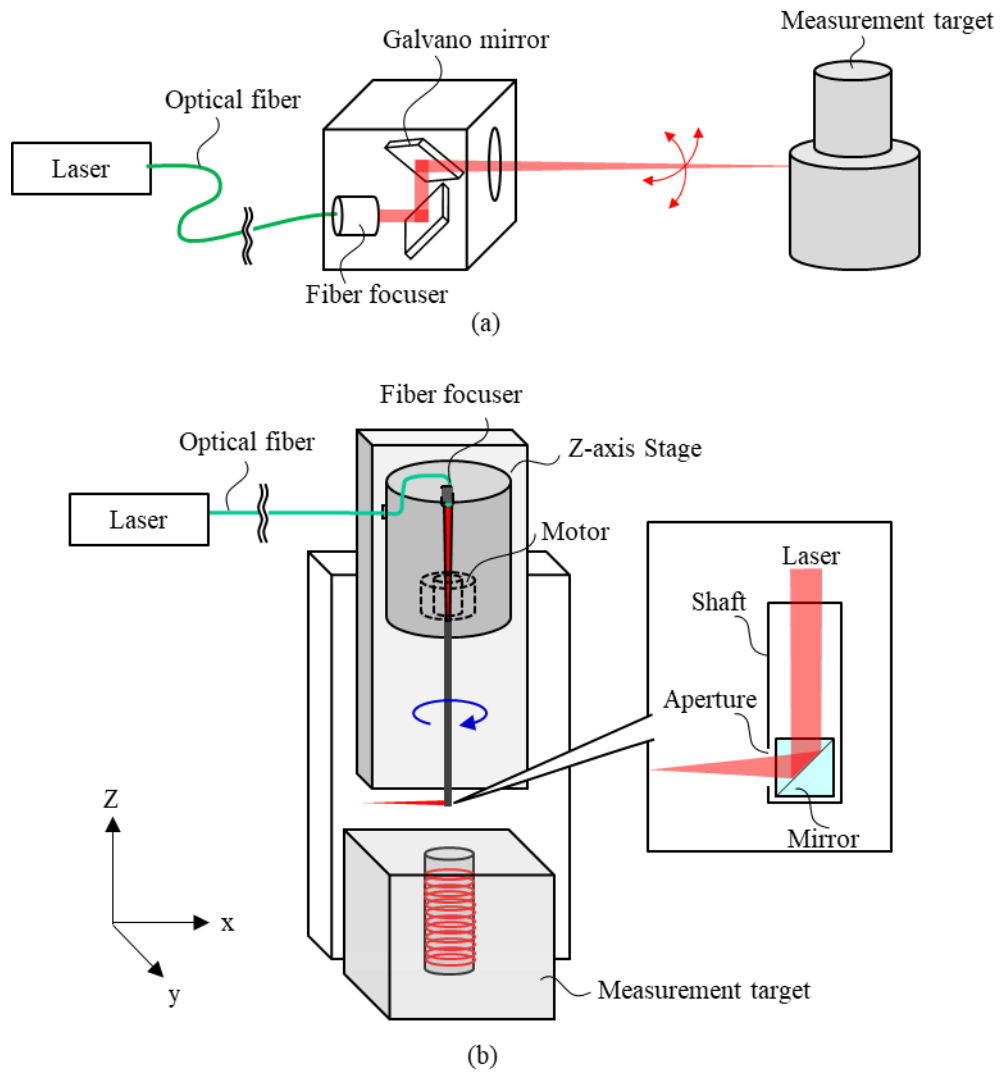


Fig. 1.7 Schematic of shape-measurement device:
(a) 3D shape measurement scanner, (b) narrow-space shape-measurement probe.

1.4 本論文の構成

Fig.1.8 に本論文の構成を示す。本論文は FMCW 法を用いた距離計測および形状計測手法の高精度化に関する。中でも測定ニーズが高いが、技術的難易度が高いために実現が困難である狭隘部 3 次元形状計測装置の開発に関する。

2 章は「計測原理」と題し、本装置開発で用いることにした FMCW 法の原理について説明する。また 3 章で行ったレーザの特性に基づき測定精度向上のために用いることにしたリサンプリング手法についても説明する。

3 章は「距離計測基本光学系の開発」と題し、FMCW 法に基づく距離計測基本光学系の開発について説明する。計測精度に影響する光源に関して、候補を列挙し、各光源の物理特性に基づく選定について説明する。さらに選定した VCSEL の特性評価結果を説明する。また VCSEL を光源とする基本光学系を構築し、高精度化を実現する信号処理(リサンプリング含む)内容について、シミュレーションおよび実験の両面から検証したので、その結果について報告する。最後に開発した距離計測基本光学系を用いた 3 次元形状計測のデモンストレーションとして、ガルバノミラーを用いてレーザを走査した計測を行ったので、その結果についても報告する。

4 章は「狭隘部 3D 形状計測装置の開発」と題し、距離計測基本光学系を搭載した狭隘部 3 次元形状計測装置について説明する。本装置の特徴である(a)同一のプロープで幅広い内径($\phi 6 \sim 100 \text{ mm}$)を高精度に計測できることと、(b)光学系内部でレーザの偏光を切り替えることで、狭隘部の側面と奥行きの計測方向切り替えが瞬時にできることについて報告する。さらに開発装置を使った精度評価結果についても報告する。

5 章は「周囲環境温度に対するロバスト性評価と誤差低減手法の提案」と題し、開発した狭隘部 3 次元形状計測装置の周囲環境温度変化に対するロバスト性の評価結果について述べる。さらに評価の結果、生じた測定誤差に対して、その発生メカニズムの解明と、誤差低減手法を考案したので、その内容について報告する。

6 章は「粗面・傾斜面に対するロバスト性評価と誤差低減手法の提案」と題し、測定対象が複雑形状をしていた場合を想定して、対象の面粗さや傾斜角度の変化に対するロバスト性の評価結果について述べる。さらに評価の結果、生じた測定誤差に対して、その発生メカニズムの解明と、誤差低減手法を考案したので、その内容について報告する。

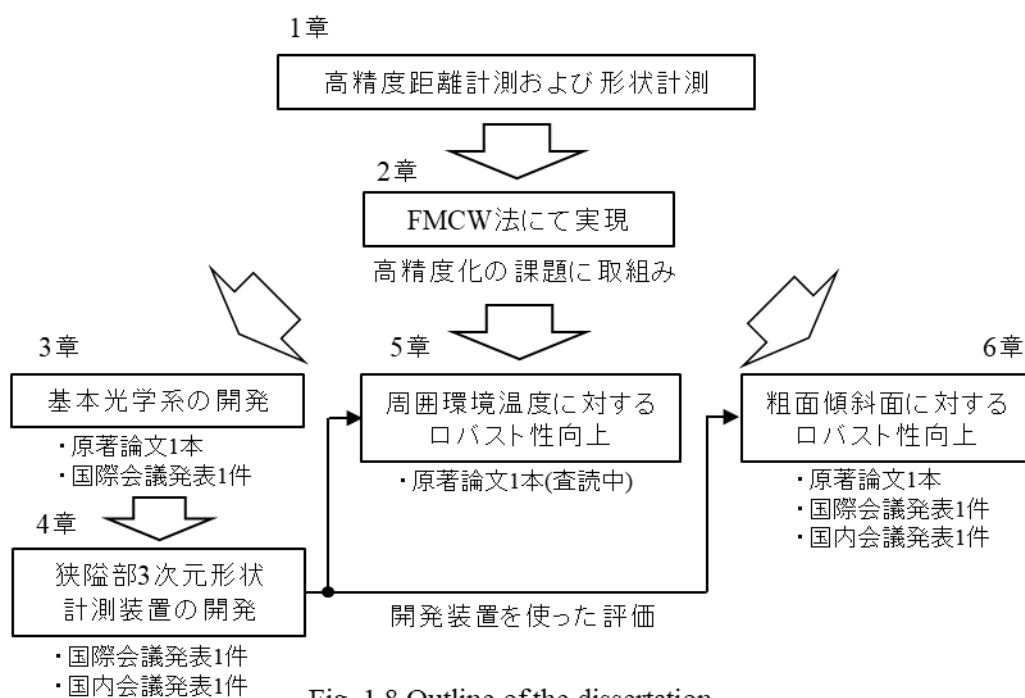


Fig. 1.8 Outline of the dissertation.

第2章 計測原理

2.1 緒言	13
2.2 FMCW 法.....	14
2.3 リサンプリング法	16
2.4 FMCW 法における課題	19
2.5 結言	20

2.1 緒言

本章では，本研究で用いることにした FMCW 法の原理について説明する。また FMCW 法において，印加電流に対するレーザの光周波数掃引の非線形性によって生じる測定誤差を低減するために用いるリサンプリング法についても説明する。3 章で詳細は説明するが，レーザの特性評価結果から，光周波数掃引を正弦波形状で行う必要があり，正弦波形状による非線形性を補正するためにリサンプリング法を用いる。

2.2 FMCW 法

FMCW 法とは計測中にレーザの波長を変化させて、計測対象から反射して戻ってきたレーザ光の波長変化量から、計測対象までの距離を計測する手法である [Iiyama 2006]。Fig.2.1(a)に基本光学系を示す。波形生成器(Waveform Generator)にて半導体レーザ(Laser diode)の駆動電流を三角波で変調すると、一定の変調速度で時間的に周波数掃引された FM(Frequency Modulation)光が発生する。その FM 光をビームスプリッタ(Beam Splitter)で2つに分割し、一方を測定対象物(Target)に照射し、もう一方を参照ミラー(Reference Mirror)で反射させる。測定対象からの戻り光と参照光の干渉光を受光器(Photo Receiver)にて検出し、検出されるビート信号を解析する。Fig.2.1(b)に測距原理図を示す。参照光(Reference Light)と測定光(Measurement Light)の受光器における光周波数の時間変化を示しており、横軸は時間(Time)であり、縦軸は光周波数(Optical Frequency)である。Fig.2.1(a)に示すように、参照光と測定光にはターゲットまでの距離差 L_2-L_1 に応じた時間差があるため、受光器上で光周波数差が生じ、その周波数差に応じたビート信号が発生する(Fig.2.1(c))。ビート周波数 f_b 、出力光と参照光の受光器への到着時間の差 Δt 、周波数掃引幅 $\Delta \nu$ 、変調周期 T には次式の関係があることがわかる。

$$\Delta t = \frac{T}{\Delta \nu} f_b \quad (2.1)$$

よって、距離 L は大気中の光速度 c を用いて、次式のように算出できる。

$$L_2 - L_1 = \frac{1}{2} c \Delta t = \frac{cT}{2\Delta \nu} f_b \quad (2.2)$$

式(2.2)よりビート周波数 f_b を解析することで、距離差 L_2-L_1 を求めることが可能である。ビート周波数の算出は FFT(Fast Fourier Transform)を用いる。Fig.2.1(c)で得られたビート信号に対して、Fig.2.1(d)に示すように FFT によりスペクトルを算出し、スペクトルのピーク位置を求めることで距離を算出する。また Fig.2.1(d)中の FFT スペクトル幅 w は波長掃引幅 $\Delta \nu$ から決まる。波長掃引幅が広いほど、スペクトル幅は狭くなり、距離分解能が向上する。

精度良く距離を測定するためには、ビート周波数 f_b が変調周期 T の間、一定である必要がある。しかし半導体レーザの特性として注入電流の変化量に対して光周波数の変化量は非線形である。そのため、ビート周波数は一定とはならず、FFT スペクトルの線幅が大きくなり、測定精度が劣化する。そこで測定用の光学系とは別に一定の光路差を設けた参照用の光学系を設け、参照用の光学系で発生するビート波形を用いて、測定ビート波形をリサンプリングすることで非線形性の課題を解決する方法が知られている [Ahn 2005]。

3 章で詳細は説明するが、本研究において、レーザの特性評価結果から、光周波数掃引を正弦波形状で行う必要があり、正弦波形状による非線形性を補正するためにリサンプリング法を用いる。次節にてリサンプリング法について説明する。

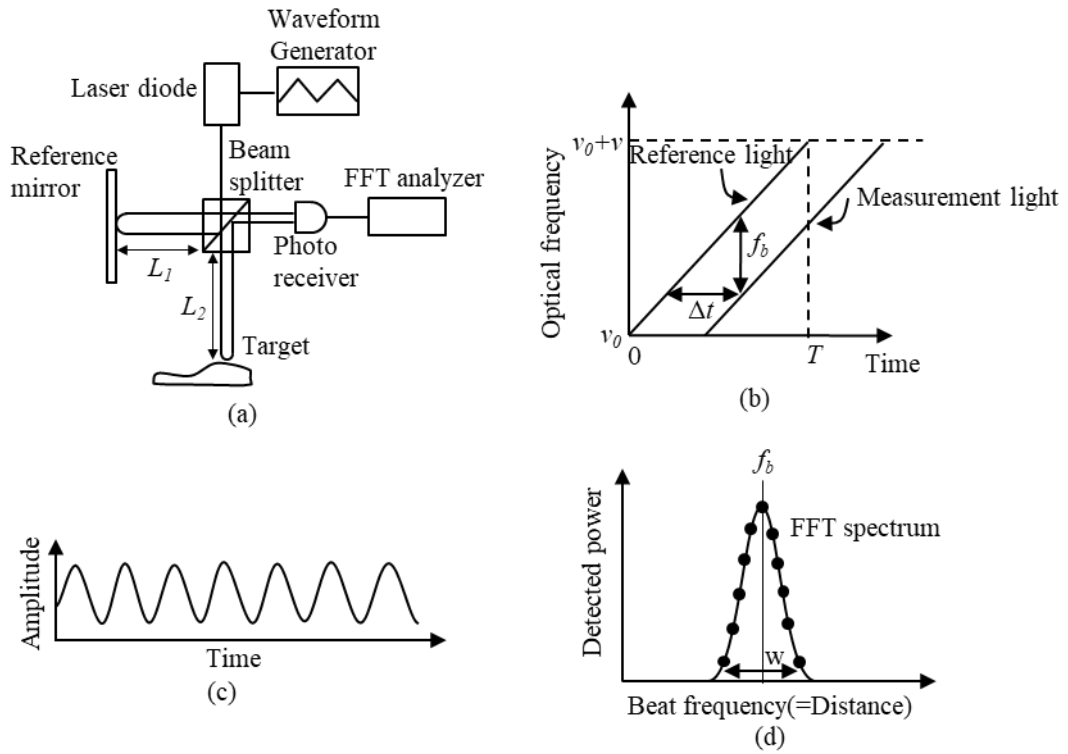


Fig. 2.1 Principle of FMCW. (a)Optical setup of FMCW. (b)Drawing of optical frequency sweeping. (c)Interference beat signal. (d)Drawing of FFT spectrum.

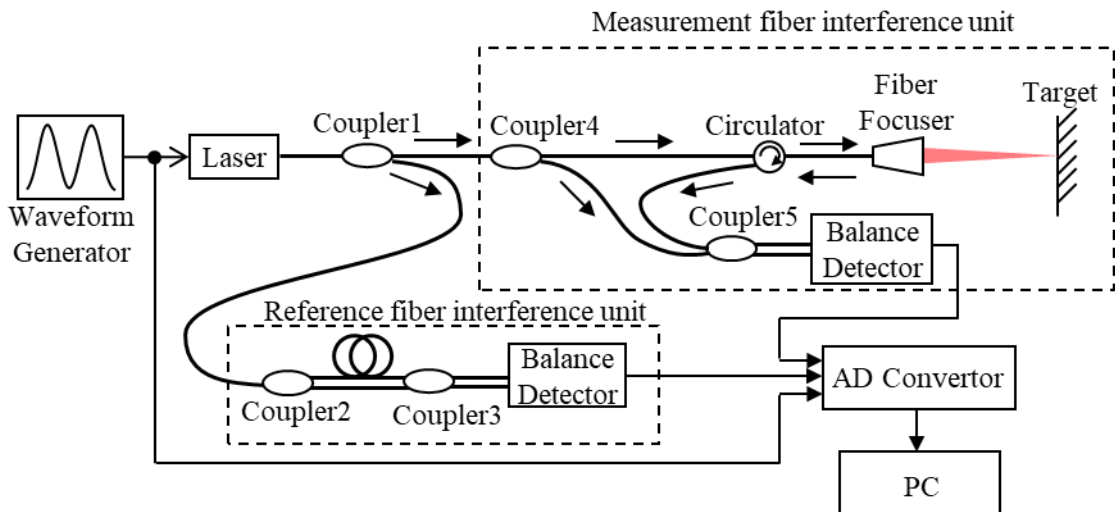


Fig. 2.2 Optical setup for resampling method.

2.3 リサンプリング法

Fig.2.2 にリサンプリング法に用いる光学系の構成図を示す。なお本光学系は光ファイバ部品を用いた構成を示す。実際に開発した装置においても光ファイバ部品を用いて光学系を構成している。任意信号発生器(Waveform Generator)により LD(Laser Diode)駆動電流に変調をかけることによって、光周波数の掃引を行う。LD からの射出光の一部をファイバカプラ 1(Coupler1)によって参照ファイバ干渉ユニットに導光する。参照ファイバ干渉ユニットではレーザ光はファイバカプラ 2(Coupler2)によって更に2分岐され、一定の光路差を設けた後、ファイバカプラ 3(Coupler3)によって合波され、差動受光器(Balance Detector)に受光されるように構成されている。これはマッハツェンダー干渉計の構成となっており、差動受光器では光路差に比例した一定のビート信号が発生する。発生したビート信号は参照ビート波形として、AD コンバータに送られる。一方、参照ファイバ干渉ユニットに導かれなかった光は、測定ファイバ干渉ユニットに導かれる。ファイバカプラ 4(Fiber coupler4)によって分岐され、一部はファイバカプラ 5(Fiber coupler5)に参照光として導かれ、残りの大部分はサーキュレータ(Circulator)を通過し、ファイバフォーカサ(Fiber Focuser)により空間に照射され、対象(Target)に照射される。対象(Target)から反射した光は再びファイバフォーカサ(Fiber Focuser)で光ファイバに集められ、サーキュレータ(Circulator)でファイバカプラ 5(Coupler5)方向に向きを変えて、ファイバカプラ 5(Coupler5)部分で参照光と合流した後、差動受光器(Balance Detector)に受光され、参照光と測定光の干渉によりビート信号が発生する。発生したビート信号はターゲットビート波形として、AD コンバータに送られる。

Fig.2.3 を用いてリサンプリング法について説明する。Fig.2.3(a)は参照ビート波形を示す。注入電流の変化量に対して半導体レーザの光周波数の変化量は非線形であるため、時間によってビート周波数が変動している。参照ビート波形の位相進みを求めるために参照ビート波形に対してヒルベルト変換を行い、90 度位相の進んだ波形を生成する(Fig.2.3(b))。参照ビート波形 W_b とヒルベルト変換後の波形 W_h から式(2.3)に従い複素波形 A を求める。複素波形 A から式(4)により参照ビート波形の位相 α を求める(Fig.2.3(c))。さらに位相 α に対して、位相接続を行う(Fig.2.3(d))。

$$A = W_b + jW_h \quad (2.3)$$

$$\alpha = \angle A \quad (2.4)$$

求めた位相が時間軸に対して線形になるように、新たなサンプリングタイミングを補間により求める。Fig.2.3(e)を用いてサンプリングタイミングの補間方法を説明する。Fig.2.3(e)にて、縦の Phase 軸が等間隔となるように横の Time 軸を分割する。式で表すと下記のように表される。

$$n\Delta\varphi = \alpha(t_n) \quad (2.5)$$

ここで n はサンプリング番号、 $\Delta \phi$ は分割する位相の刻み幅、 t_n は新たに求められるサンプリングタイミングである。サンプリングタイミング t_n は、その前後の元のサンプリング時間から次式により、線形補間によって表される(Fig.2.3(e)拡大部分参照)。

$$t_n = t_s + (t_{s+1} - t_s) \frac{n\Delta\phi - \phi_s}{\phi_{s+1} - \phi_s} \quad (2.6)$$

このサンプリングタイミングで参照ビート信号をリサンプリングすると、位相は Fig.2.3(f) のように線形に変化する。

Fig.2.3(e) で求めたサンプリングタイミングを用いて、ターゲットビート波形をリサンプリングすることで、レーザの掃引周波数の非線形性を補正する。Fig.2.3(g),(h) を用いて具体的に説明する。Fig.2.3(g) はリサンプリング前のターゲットビート波形を示す。サンプリング時間間隔が一定であるため、ビート周波数が時間によって変化している。一方、Fig.2.3(h) はビート周波数が一定になるようにサンプリングタイミングを決めているため、検出されるビート周波数は一定になる。Fig.2.3(g) のビート波形をフーリエ変換した結果を Fig.2.3(i) に示す。ビート周波数が一定でないため、フーリエ変換後のピーク波形は広がりを持っており、精度良くピーク位置を求めることはできない。つまり、精度良く距離を求めることは困難である。一方、Fig.2.3(h) のビート波形をフーリエ変換した結果を Fig.2.3(j) に示す。ビート周波数が一定であるため、フーリエ変換後のピーク波形が急峻になり、精度良くピーク位置を求めることが可能である。つまり精度良く距離を求めることが可能となる。

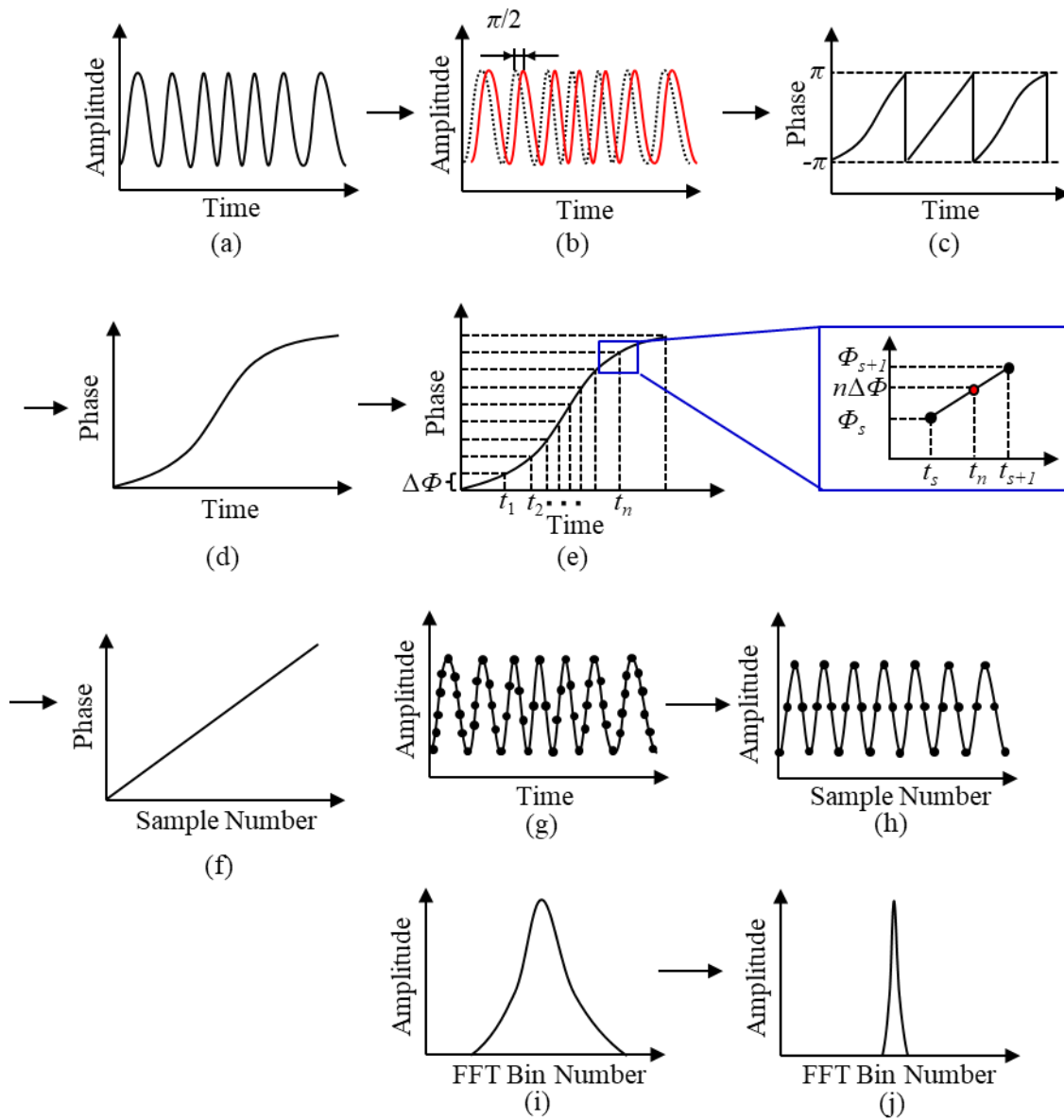


Fig. 2.3 Resampling method. (a) Reference beat signal. (b) Hilbert transform. (c) Phase of reference beat signal. (d) Phase wrapping of reference beat signal. (e) Interpolation of sampling time. (f) Phase of reference beat signal after resampling. (g) Target beat signal before resampling. (h) Target beat signal after resampling. (i) FFT of target beat signal before resampling. (j) FFT of target beat signal after resampling.

2.4 FMCW 法における課題

1.3 節で説明した本研究で取り組む FMCW の課題について 2.2, 2.3 節で説明した FMCW 法の計測原理に基づき再度説明する。

1. 距離計測基本光学系の開発

2.2 節の FMCW の原理で説明したように、光源の波長掃引幅が広いほど、スペクトル幅は狭くなり、距離分解能が向上する。よってレーザ光源には波長掃引幅の広いものが望ましい。しかし波長掃引幅の広い光源は、現状では部品価格が高い。そこで、本研究のアプローチとして、比較的安価な光源を用い、信号処理を工夫することで、高精度化を実現することとした。本課題については第 3 章にて取り組む。

2. 周囲環境温度に対するロバスト性評価と誤差低減手法の提案

2.3 節で説明したリサンプリング法において、参照ファイバ干渉ユニットにおいては光路長差が距離の基準(距離のゲイン)となるため正確な長さを求める必要がある。ファイバは温度が変化すると屈折率が変化し、光路長が変わる。よって、正確な長さを求めるためには、ファイバの温度を測定し、熱による光路長変化を補正する必要がある。また測定ファイバ干渉ユニットにおいては、干渉計の距離差が対象までの距離を決める。そのため途中のファイバの光路長変化が生じると距離のオフセットが変動するため、プローブ先端から測定対象までの距離以外の光路長変化を補正する必要がある。第 5 章では、それぞれ距離のゲインおよびオフセットを補正する方式を提案したので、その内容について説明する。また提案した補正では低減できない偏光起因の誤差が発生したため、その誤差発生メカニズムの解明と誤差低減手法についても説明する。

3. 粗面・傾斜面に対するロバスト性評価と誤差低減手法の提案

測定ファイバ干渉ユニットでは、測定光と参照光の干渉によって測定対象までの距離を測定する。このときに測定対象の面粗さ起因で光の波面が乱れた場合、測定誤差が発生する。また測定対象が傾斜していた場合には、その影響はさらに大きくなる。第 6 章では、粗面・傾斜面測定時に発生する誤差の発生メカニズムの解明と誤差低減手法について説明する。

2.5 結言

本章では、FMCW 法の原理について説明した。また印加電流に対するレーザの光周波数掃引の非線形性によって生じる測定誤差を低減するためのリサンプリング法についても説明した。最後に第 1 章で説明した本論文で取り組む課題について、FMCW 法の原理に基づき再度説明した。

第3章 距離計測基本光学系の開発

3.1 緒言	22
3.2 FMCW 法に用いる光源の選定	23
3.3 VCSEL の基本特性	25
3.3.1 波長掃引幅	25
3.3.2 波長掃引の周波数応答	25
3.3.3 レーザ線幅計測	25
3.4 リサンプリングシミュレーション	28
3.5 距離計測の基本特性評価	33
3.5.1 実験装置構成	33
3.5.2 評価結果	33
3.6 形状計測のデモンストレーション	36
3.6.1 装置構成	36
3.6.2 評価結果	36
3.7 結言	39

3.1 緒言

本章では2章で説明したFMCW法に基づき開発した距離計測基本光学系について説明する。まず3.2節にて、FMCW法において計測精度を決める光源に関して、候補を列挙し、我々のアプリケーションに最適な光源の選定を行ったので、その結果について説明する。続いて3.3節にて、選定したVCSELの特性評価結果について説明する。特性評価結果より、VCSELの光周波数掃引を正弦波で行うこととなったため、3.4節にて、正弦波で掃引した場合の非線形性の補正について、リサンプリングシミュレーションを用いて評価した。3.5節にて距離計測基本光学系の構成と、測定精度の実験検証結果について説明する。最後に3.6節にて距離計測基本光学系を用いた形状計測のデモンストレーション結果について説明する。

3.2 FMCW 法に用いる光源の選定

FMCW 用光源の候補としては、DFB, DBR, VCSEL, MEMS-VCSEL, ECL などがある。それぞれのレーザの特徴について説明する。

DFB(Distributed Feedback)レーザ[布谷 2012]: 共振器内部に回折格子構造を持つモードホップフリーなシングルモードレーザである。回折格子構造は、活性層の上部に形成されている(活性層とクラッド層の境界が回折格子形状になっている)。DFB レーザでは、活性層で発生した光のうち回折格子の作用を受けた光だけが共振器内に戻る(帰還)。この回折格子構造が選択する光が持つ特定波長(1つのモード)のみが強め合うため、シングルモード発振する。DFB レーザはその構成から、波長安定性が非常に高く、シングルモード発振し、線幅は非常に狭い(数 MHz 程度であり、コヒーレント長は数十 m 程度)。しかし、電流制御による波長可変幅は狭い(1~2nm 程度)。

DBR (Distributed Bragg Reflector) レーザ[布谷 2012]: ファブリ・ペローレーザの活性層の導波路の延長線上に回折格子構造を造ったレーザである。回折格子ではある波長(1つのモード)だけが活性層に戻る方向に反射され、その他の光は活性層に戻らない。これにより、DBR レーザは単一の波長だけが発振するシングルモードレーザとなる。DBR レーザの活性層 (Active Layer) と Feedback Layer の間は位相制御領域 (Phase Section) である。この領域で位相制御をすることによって位相のみを制御できる。これらの制御により、DBR レーザは広いレンジで単一波長動作が可能になる。しかし、活性層と位相制御領域に加える電流の調整が難しく、モードホップが生じる場合がある。

VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting Laser)[宮本 2009]: 一般的に半導体レーザは基板面と平行方向に光を共振させ、その方向に光を出射させる。一方で、面発光レーザは反射鏡に半導体もしくは誘電体の積層構造から成る高反射分布ブラッグ反射器 DBR を用いることにより、基板面に対して垂直方向に光を共振させ、面と垂直方向に出射させる。低電流値で高速変調が可能である。また短共振器構造のため単一縦モード動作ができる。

MEMS-VCSEL[Grulkowski 2013]: 波長可変デバイスは、共振器長を変化させるために MEMS を集積したデバイスにより、大きな波長可変幅や高速可変動作が報告されている。反射鏡を形成した微小な梁(はり)を熱や電気により動かすことで共振器長を変化させて波長可変する。すでに製品化されている製品もあるが、まだ一般的に普及しておらず、装置価格が高い。

ECL(External Cavity Laser)[布谷 2012]: 半導体レーザの出力光はレンズによってコリメートされ、回折格子に入射される。回折格子はフィードバック(反射)を生じさせ、安定した出力波長を選択するために用いられる。ECL はレーザの線幅が狭く、また広帯域に波長可変である。しかし掃引周波数は数十 Hz と遅い。

1.1 節で説明した狭隘部形状計測に必要な仕様を再度記載する。

- ・測定範囲 3~50 mm(単純円筒の内壁の場合 ϕ 6~100 mm に相当)
- ・測定精度 単純円筒の場合 $\pm 5 \mu\text{m}$, 複雑形状の場合 $\pm 20 \mu\text{m}$

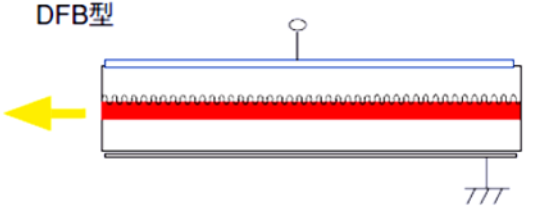
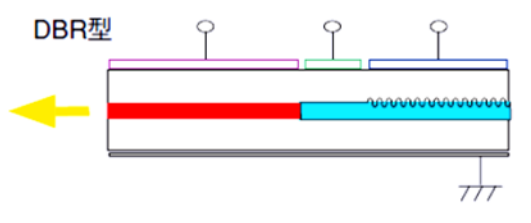
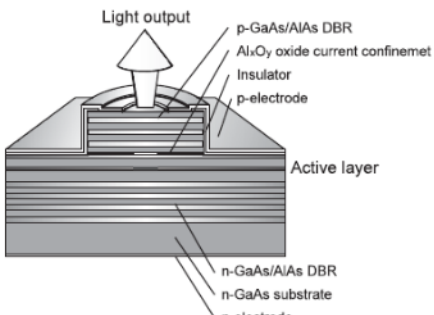
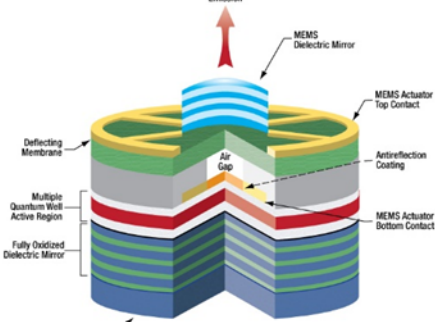
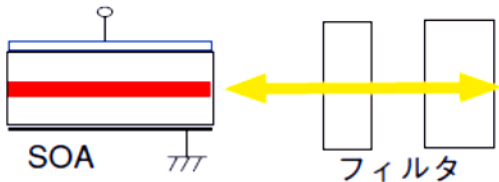
- ・測定速度 1断面 1秒以内(1断面当たりの測定点密度 10,000点 : 10 kHz に相当)
- ・環境温度 精密測定が困難な製造現場温度環境(20~30℃内で大きく変動)
- ・対象内面性状 散乱面(表面粗さ Rz 3.2~6.4 μm)

本研究では、モノづくり現場への非接触形状計測の活用を広げることを目的とし、光源選定に関しては、測定精度と部品価格に重きを置く。DFB, DBR と比較して、光周波数掃引幅が広く、また MEMS-VCSEL よりも安価に入手可能な VCSEL を選定し、評価することとした。ECL は掃引周波数が数十 Hz 程度のため測定に必要な仕様を満たすことができない。VCSEL の性能評価項目は以下の3つとする。

- 1.波長掃引幅：測定精度に関連
- 2.波長掃引の周波数応答：測定速度に関連
- 3.レーザ線幅(コヒーレント長)：測定距離に関連

仕様に記載の環境温度及び対象内面性状に関しては直接光源の性能とは関係しないため、光源の性能評価項目には含まない。次節にて、VCSEL の特性評価について述べる。

Table3.1 Comparison of laser source

(a) DFB	(b) DBR
 DFB型	 DBR型
(c) VCSEL	(d) MEMS-VCSEL
	
(e) ECL	
 SOA フィルタ	

3.3 VCSEL の基本特性

3.3.1 波長掃引幅

VCSEL に加える電流と発振波長の関係性を評価した[Hariyama 2018]。評価方法は、VCSEL に電流を加えたときに VCSEL から発する光の波長を光スペクトルアナライザで測定し、光周波数に換算した。評価結果を Fig.3.1 に示す。Fig.3.1(a)に光スペクトルアナライザの計測結果を示す。横軸は注入電流を、縦軸は発振波長をそれぞれ示す。グラフより、注入電流 2mA 以上のときに光が出射し、電流の増加に伴い波長が長くなることが分かる。波長から光周波数のシフトに換算した結果を Fig.3.1(b)に示す。グラフの縦軸は注入電流 2 mA の時の光周波数を基準とし、ここからの周波数シフトを示す。注入電流増加に伴い周波数シフトが増加していることがわかる。VCSEL に加えることができる最大電流値 14 mA 時には発振開始時から約 1300 GHz 周波数がシフトした。またその応答は与える電流に対して非線形であることがグラフから読み取れる。また Fig.3.1(c)に光出力強度を示す。注入電流 8mA 時に出力強度が最大値 0.8mW となり、その後、減衰していることがわかる。このレーザの特性を考慮して、VCSEL に加える電流変調範囲を中心電流値 8 mA、振幅 4 mA とする。

3.3.2 波長掃引の周波数応答

次に VCSEL の波長掃引の周波数応答を評価した。評価方法は、VCSEL に正弦波で変調電流を加え、VCSEL から発する光の波長を光スペクトルアナライザで測定する。正弦波の変調周波数を上げていき、光スペクトルアナライザで測定される波長の振れ幅を評価する。Fig.3.2 に評価結果を示す。横軸は変調周波数を示し、縦軸はレーザの波長振れ幅を示す。グラフより、周波数が高くなるにつれて振れ幅が減少し、およそ 10 kHz にて振れ幅が $1/\sqrt{2}$ になっていることがわかる。この結果から、波長掃引の周波数応答は 10 kHz であることがわかった。

3.3.3 レーザ線幅計測 8mA

次に VCSEL の発振周波数の線幅計測を行った。線幅はコヒーレント長と次式の関係にある。

$$L_c = \frac{c}{W_{line}} \quad (3.1)$$

ここで、 L_c はコヒーレント長、 W_{line} は線幅を示す。よってレーザの線幅計測からコヒーレント長、つまり計測可能距離を算出することが可能である。レーザの線幅を計測するための構成を Fig.3.3 に示す。レーザから射出する光をファイバカップラによって 2 分岐し、一方を 25 km のファイバに通し、もう一方を AOM に通す。今回の評価では 25 km のファイバを用いたが、レーザのコヒーレント長以上の長さであれば良い。また AOM には 80 MHz の変調電流を加えた。今回の評価では変調周波数 80MHz とし

たが、測定される線幅以上の周波数であれば良い。25kmのファイバおよびAOMを通過した光はファイバカップラによって合流し、差動受光器によって検出され、スペクトラムアナライザによって周波数解析される。Fig.3.4に評価結果を示す。横軸は周波数を示し、縦軸は検出強度を示す。評価結果より、半値幅は10MHzであった。式(3.1)より、コヒーレント長は30mとなり、往復伝搬する計測可能距離は15mであることがわかった。

3.2.1節から3.2.3節のVCSELの評価結果から以下の結論を得た。

- 1.波長掃引幅：6.5nm
- 2.波長掃引の周波数応答：10kHz、ただし10kHz掃引時の波長掃引幅は4.4nm
- 3.レーザ線幅(コヒーレント長)：10MHz、測定可能距離は15m

以上から、2.と3.の条件は目標仕様を満たすことを確認した。10kHzでの波長掃引幅4.4nmから得られる測定精度について検討した。参考文献[Baumann 2014]では10nmの波長掃引幅で0.1 μ mの測定精度を実現していることが報告されている。よって波長掃引幅4.4nmにて、目標精度 $\pm 5\mu$ mの精度を達成できる可能性は十分に高い。ここで考慮すべきは、10kHzの周波数応答が正弦波形で得られた結果ということである。FMCW法ではFig.2.1で示したようにビート周波数が一定であるためには光周波数掃引は線形であることが望ましい。このために、正弦波で周波数掃引した場合は、測定精度劣化が生じる。そこで、周波数掃引の非線形性を補正するリサンプリング手法を用いることで、正弦波による周波数掃引の非線形性を補正する。そこで、まずシミュレーション解析によって、正弦波形状であってもリサンプリングが有効に作用するか評価を行った。なお参考文献[Ahn 2005]では正弦波波形に対するリサンプリングの有効性までは検証されていない。

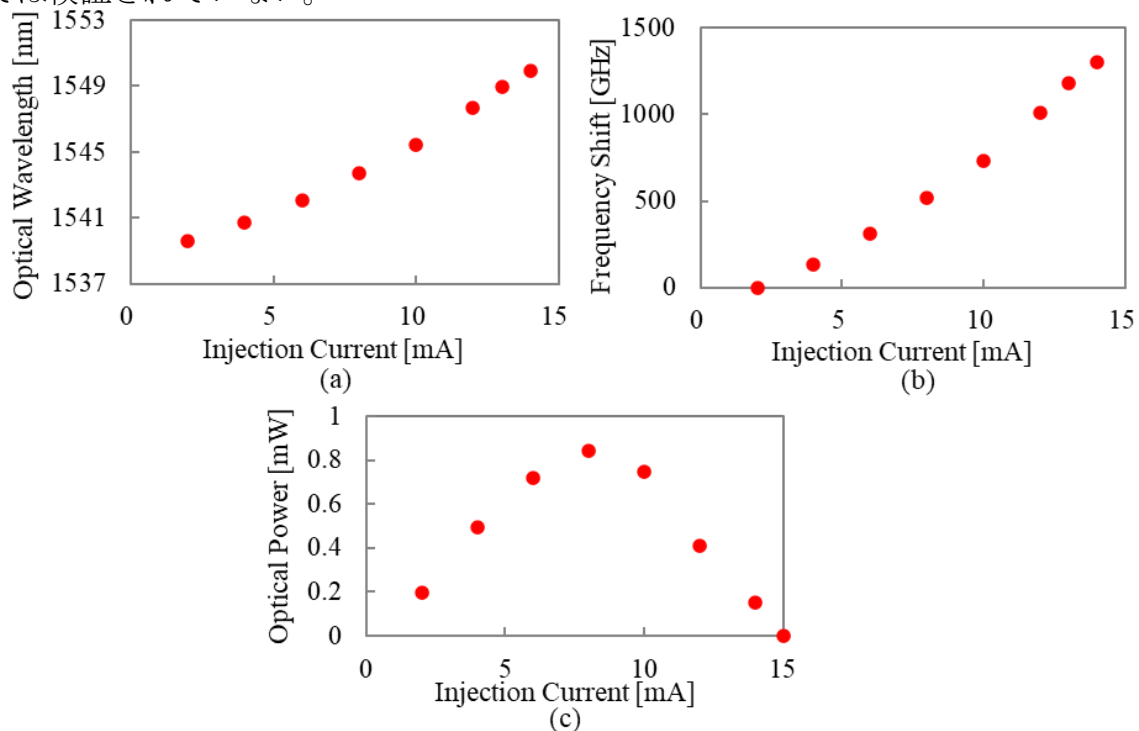


Fig. 3.1 Current response of the LD: (a) Wavelength response, (b) Optical frequency response based on current 10mA (c) Output power

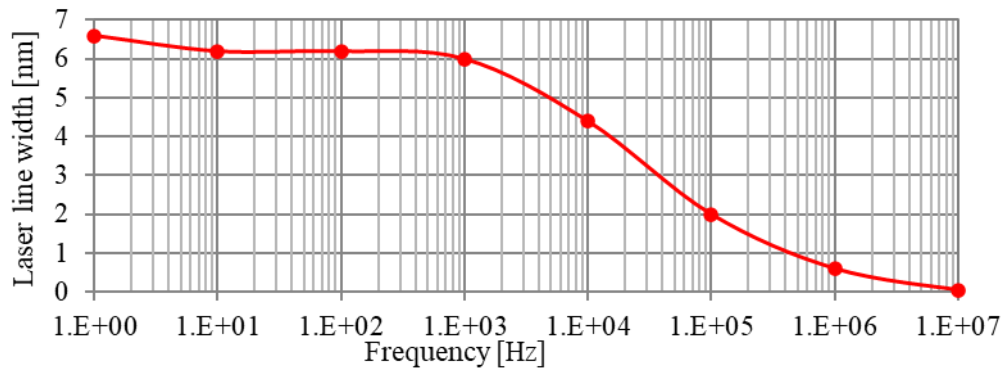


Fig. 3.2 Frequency response of the LD

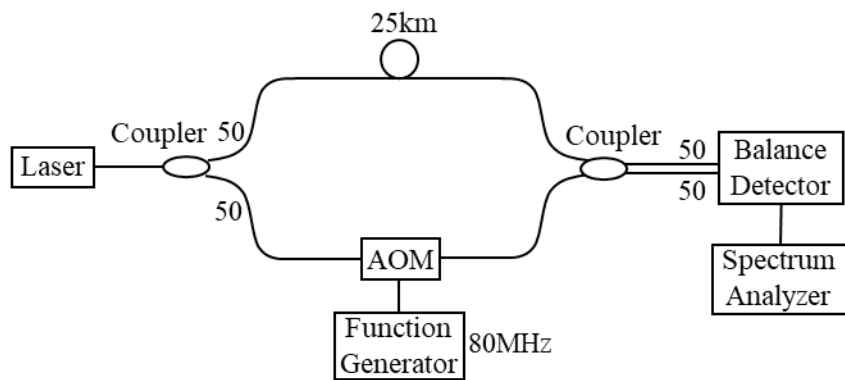


Fig. 3.3 Setup for linewidth measurement

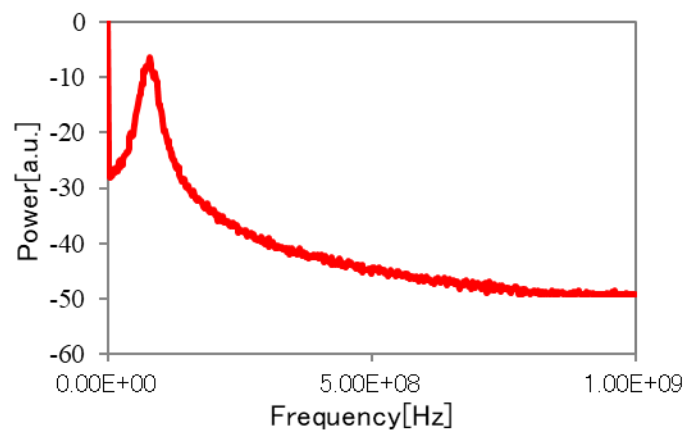


Fig. 3.4 Linewidth measurement result

3.4 リサンプリングシミュレーション

数値シミュレーションには MatlabTM を用いた。シミュレーションで想定する光学系は Fig.3.5 に示した構成とする。レーザは 3.2 節で評価した VCSEL の特性をモデル化した。光周波数掃引幅は ± 275 GHz (波長掃引幅 4.4 nm に対応) とし、変調周期は 10 kHz の正弦波とした。周波数変調した光をそれぞれ、参照ファイバ干渉ユニットおよび測定ファイバ干渉ユニットに導光する。それぞれの干渉計では光ファイバ長で 1 m の光路差を持たせている。これは 3.5 節で実験に用いた光ファイバの光路差から決定した。空気中の往復伝搬の片道分の距離としては $1 \text{ m} \times 1.5$ (ファイバ屈折率) $\div 2$ (往復距離) $= 0.75 \text{ m}$ に相当する。また検出器のサンプリング周波数は 250 MS/s とした。これも 3.5 節で実験に用いたオシロスコープのサンプリング周波数から決定した。

リサンプリングシミュレーションモデルについて順次説明する。モデル化した VCSEL の光周波数掃引波形を次式で表す。

$$f = A \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \quad (3.2)$$

ここで f はレーザの光周波数、 A は光周波数掃引振幅、 T は変調周期、 t はサンプリング時間である。Fig.3.6 に光周波数掃引波形のシミュレーション波形を示す。100 μs (10 kHz) の間に ± 275 GHz の光周波数掃引が行われる。

次に参照ファイバ干渉計ユニットで発生する参照ビート周波数を求める。FMCW 法では、光路差が干渉ビート周波数を発生させるため、得られる参照ビート周波数は次式で表される。

$$f_{beat} = A \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) - A \sin\left(2\pi \frac{(t-\Delta t)}{T}\right) \quad (3.3)$$

ここで Δt は参照光学系の光路差による時間差を示す。つまり光が空気中の往復伝搬の片道分の距離 0.75 m 進む時にかかる時間である。Fig.3.7 にシミュレーション波形を示す。1 掃引周期中、ビート周波数は 0 から増加し、90 MHz 付近で最大周波数となり、減少し、一旦 50 μs で 0 になり、再度増加していることがわかる。

次に次式により、Fig.3.7 で求めた参照ビート周波数を積分することで参照ビート波形を生成した。

$$I_{beat} = \cos(2\pi \int f_{beat}(t) dt) \quad (3.4)$$

Fig. 3.8 に生成したシミュレーション波形を示す。Fig. 3.8(a) は参照ビート波形を求める範囲を示す。参照ビート波形を求める範囲は周波数掃引の前半部分の 0 ~ 50 μs の範囲とし、さらに両端は周波数が遅く不安定であるため、全データに対して 10% 分除

いた領域とした。Fig. 3.8(b) は求めた参照ビート波形を示す。Fig. 3.8(c) は参照ビート波形の前半部分 W1 の拡大図を示し、Fig. 3.8(d) は少し進んだ W2 の拡大図を示す。前半部分は周波数が遅く、時間が進むことで、周波数が早くなっていることがわかる。

次に参照ビート波形に対してヒルベルト変換を行い、90 度位相の進んだ波形を生成し、参照ビート波形とヒルベルト変換後の波形から 2 章で説明した式(2.3)に従い複素波形を求め、式(2.4)により参照ビート波形の位相 α を求めた。Fig.3.9 にシミュレーションにより求めた位相を示す。Fig.3.9(a)は全体の位相を示し、Fig.3.9(b)は Fig.3.9(a)中の W3 の領域の拡大図を示す。さらに位相接続した結果を Fig.3.9(c)に示す。Fig.3.9(c)を確認すると掃引の始めと終わりの位相の進みが緩やかになっていることが読み取れる。これはレーザの掃引波形を正弦波としているためである。本位相データから位相が線形になるように新たなサンプリング時間を補間により求めた。

次に測定ファイバ干渉ユニットにて生成される測定ビート波形を生成した。これは参照ビート波形生成と同様の手順で生成した。ターゲット計測のマッハツェンダー干渉計の光路差は 0.75m とした。次に測定ビート波形を FFT してピーク位置を算出する。まずリサンプリング前のターゲットビート波形の FFT 結果を Fig.3.10 に示す。FFT では、元のデータ点数 10,000 点に対して、22,768 点のゼロデータを追加し、32,768 点とすることで分解能の向上を図った[Watanabe 1993]。Fig.3.10(a)は全体波形を示し、ピーク点近傍の領域 W4 の拡大図を Fig.3.10(b)に示す。リサンプリング前は FFT のピークが広がっており、精度よくピーク位置を算出することができない。次に Fig.3.9 で新たに求めたサンプリング時間を用いて、ターゲットビート波形をリサンプリングした。リサンプリング後のターゲットビート波形の FFT 結果を Fig.3.11 に示す。Fig.3.11(a)は全体波形を示し、ピーク近傍の領域 W5 の拡大図を Fig.3.11(b)に示す。リサンプリング後は FFT のピークが急峻になっていることがわかる。半値全幅で 0.36 mm である。理論的な線幅は次式で表される。

$$\Delta L = \frac{c}{n\Delta\nu} \quad (3.5)$$

今回 $\Delta\nu$ は 550 GHz、ファイバの屈折率 n は 1.5、 ΔL は 0.36mm となり、実験値と一致する。さらに得られた FFT ピークに対してピーク補間することで、参考文献[Baumann 2014]ではピーク幅 150 μ m に対して、0.1 μ m の測定精度を達成しており、本実験で得られたピーク幅 0.36mm に対して、本研究の目標精度 $\pm 5\mu$ m を得られることは十分に期待できる。

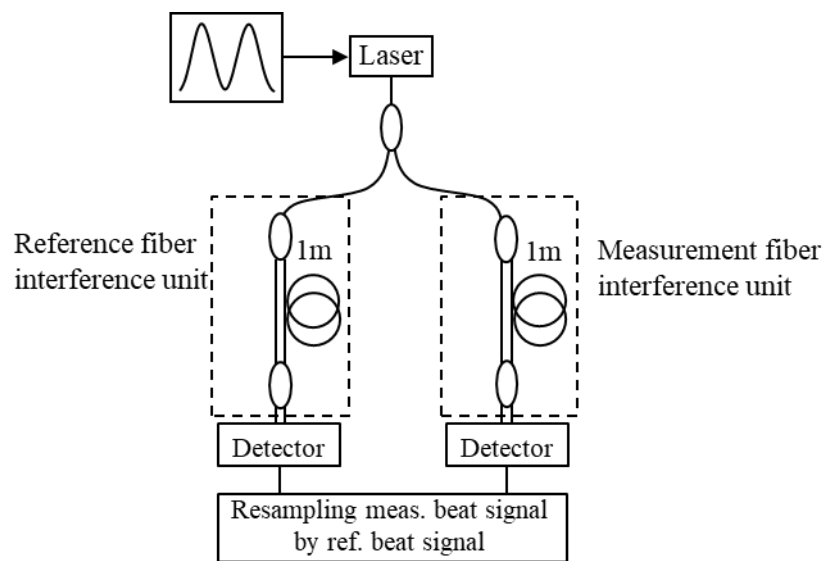


Fig. 3.5 Resampling model

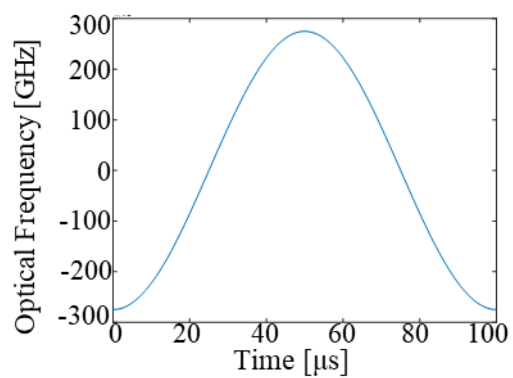


Fig. 3.6 Optical frequency modulation.

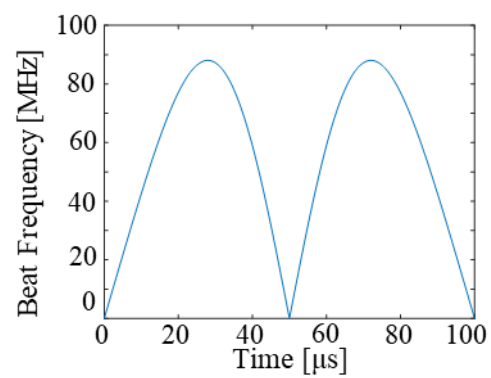


Fig. 3.7 Reference beat frequency.

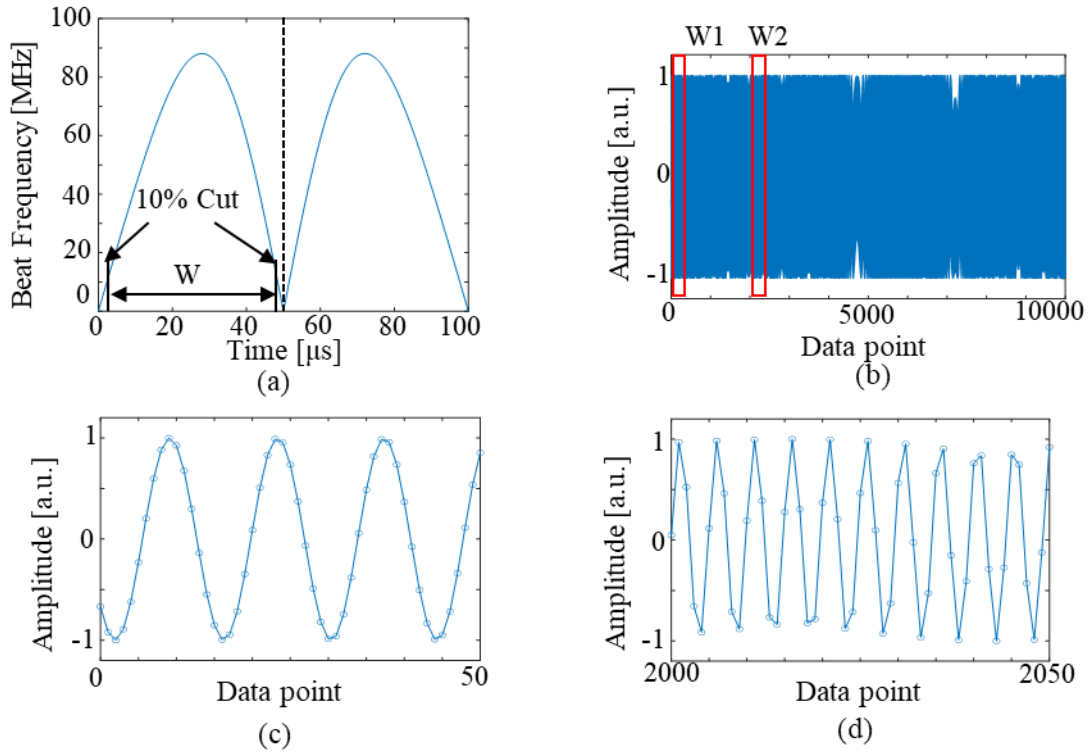


Fig. 3.8 Reference beat waveform. (a) Analysis region of reference beat frequency. (b) Reference beat signal. (c) Expanded W1 view of reference beat signal. (d) Expanded W2 view of reference beat signal.

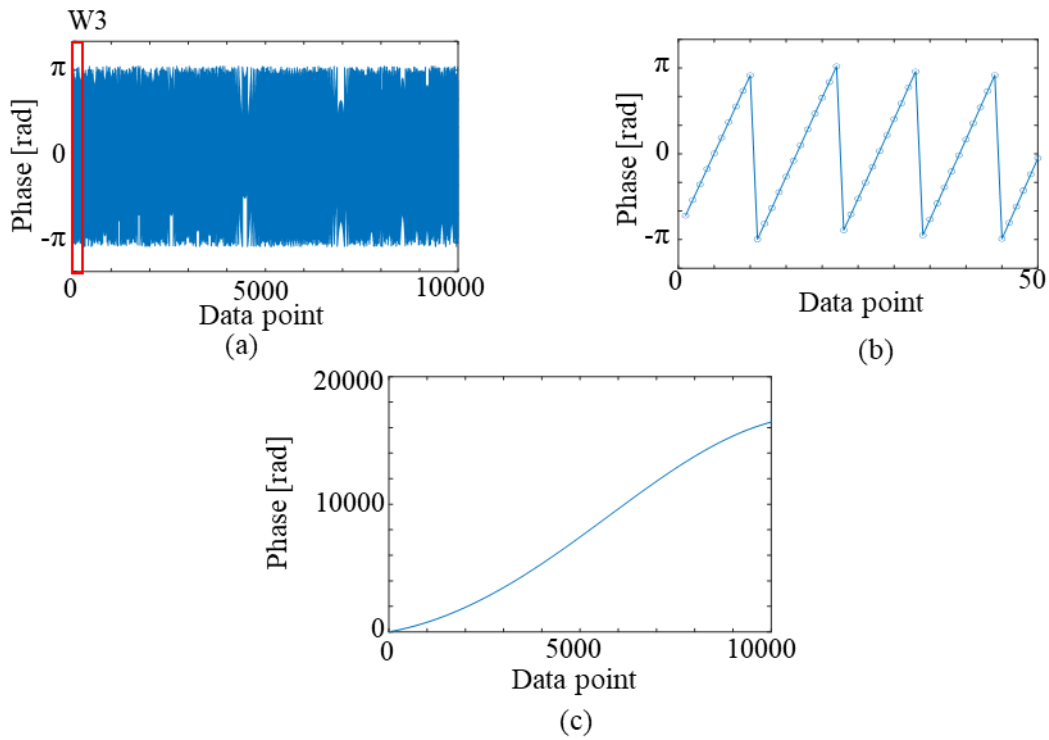


Fig. 3.9 Phase of reference beat signal. (a) Phase signal before wrapping. (b) Expanded W3 view of phase signal. (c) Phase signal after wrapping

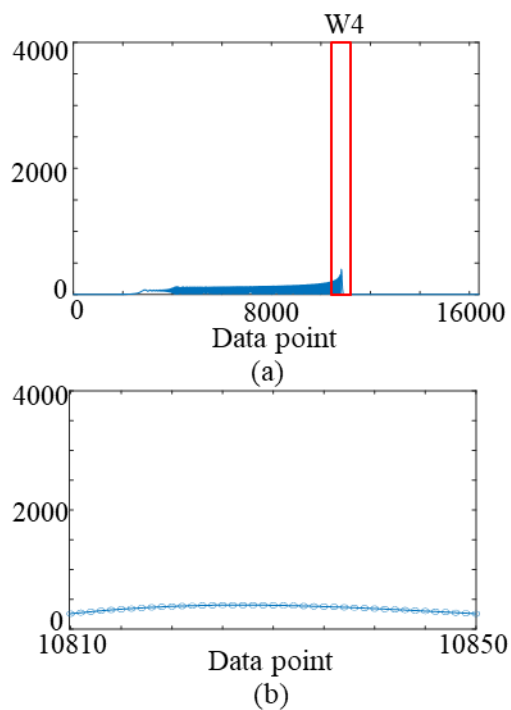


Fig. 3.10 FFT of target beat signal before resampling. (a) Whole signal (b) Expanded W4 view of whole signal.

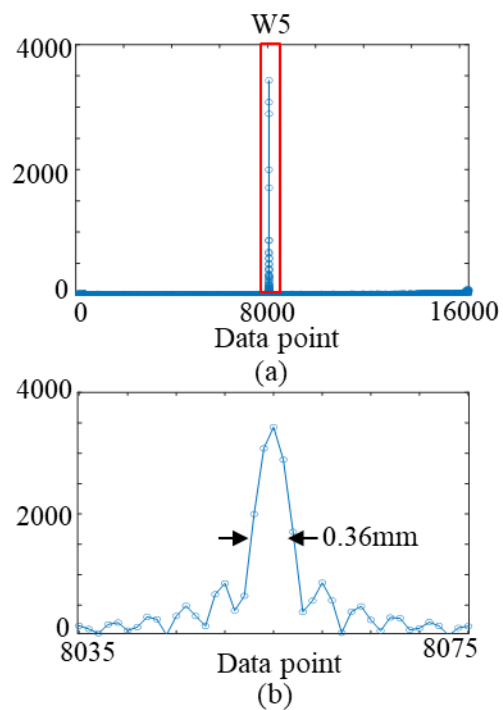


Fig. 3.11 FFT of target beat signal after resampling. (a) Whole signal (b) Expanded W5 view of whole signal.

3.5 距離計測の基本特性評価

3.5.1 実験装置構成

3.2 節のリサンプリングシミュレーションより、正弦波で光周波数掃引した場合でも補間により、理論値程度のピークスペクトル幅が得られることを確認した。次に VCSEL を用いて距離計測の感度および静止安定性の実験評価を行った。Fig.3.12 に実験装置構成を示す。VCSEL を正弦波の電流で変調する。VCSEL の出力強度は 0.8mW のため SOA を用いて 10mW まで増加させる。これは、レーザの安全規格上、波長 1550nm 帯レーザを保護メガネなしで空間中に照射できる光量(クラス 1)は 10mW であり、その最大まで用いるためである。またレーザへ反射光が戻ることを防ぐために VCSEL の後にアイソレータを挿入した。レーザ光をカップラ 1 によって 90 : 10 に 2 分岐し、10%の光を参照ファイバ干渉ユニットに導光する。参照ファイバ干渉ユニットでは、カップラ 2 によって 50 : 50 に分岐し、一方の光路に 1m の光ファイバを追加し、再度カップラ 3 によって合波し、バランスディテクタで受光する。一方、カップラ 1 によって分岐された 90%の光は測定ファイバ干渉ユニットに導光する。カップラ 4 によって、90 : 10 に分岐し、一方の光路に 1m の光ファイバを追加し、さらに微弱光に対する検出感度を評価するためアッテネータを追加する。カップラ 5 によって合波された後、バランスディテクタで受光する。本評価では、外乱の影響を除くため、光を空間には照射せずに、すべて光ファイバの光学系で評価した。

3.5.2 評価結果

Fig.3.12 の実験装置で得られたビート波形を Fig.3.13 に示す。青線は参照ビート波形を示し、赤線は測定ビート波形を示す。Fig.3.13(a)の W 部分の拡大図を Fig.3.13(b)に示す。正弦波状のビート波形が検出されていることがわかる。

次にリサンプリング後のターゲットビート波形の FFT 結果を Fig.3.14 に示す。Fig.3.14(a)は FFT の全体図を示し、Fig.3.14(a)のピーク近傍の拡大図を Fig.3.14(b)に示す。Fig.3.14(b)から FFT の半値全幅は約 0.4 mm であることがわかる。

次にターゲット測定光路に挿入したアッテネータの減衰率を -50dB から -90dB まで変えた時の静止安定性を評価した。静止安定性は 50 回計測したときの距離測定バラつき(σ)を評価した。Fig.3.15 に評価結果を示す。横軸は FFT 点数を示し、縦軸は振幅を示す。Fig.3.15(a)はアッテネータとして -50 dB を挿入した時の結果であり、静止安定性は 0.6 μm であった。Fig.3.15(b)~(e)はアッテネータを -60dB ~ -90dB 挿入した結果を示す。減衰率を上げるに従い信号強度が減衰していることがわかる。Fig.3.15(f)はアッテネータ挿入時に得られる静止安定性(σ)を示す。減衰率の増加に伴い静止安定性が悪化していることがわかる。散乱面からの反射を想定した実用レベルでの検出強度は -60 ~ -70 dB であり、その時の静止安定性はそれぞれ 1.0 μm , 1.3 μm であった。測定バラつきは本研究の目標精度 $\pm 5\mu\text{m}$ に対して十分に小さい。FMCW では、測定光と参照光との干渉信号を検出するため、検出信号は測定光の電場の振幅つまり、検出強度のルートに比例する。よって、検出強度が低下しても検出信号はそのルートでしか減衰し

ないため、微弱な光に対して検出感度が高いという特徴を有する。

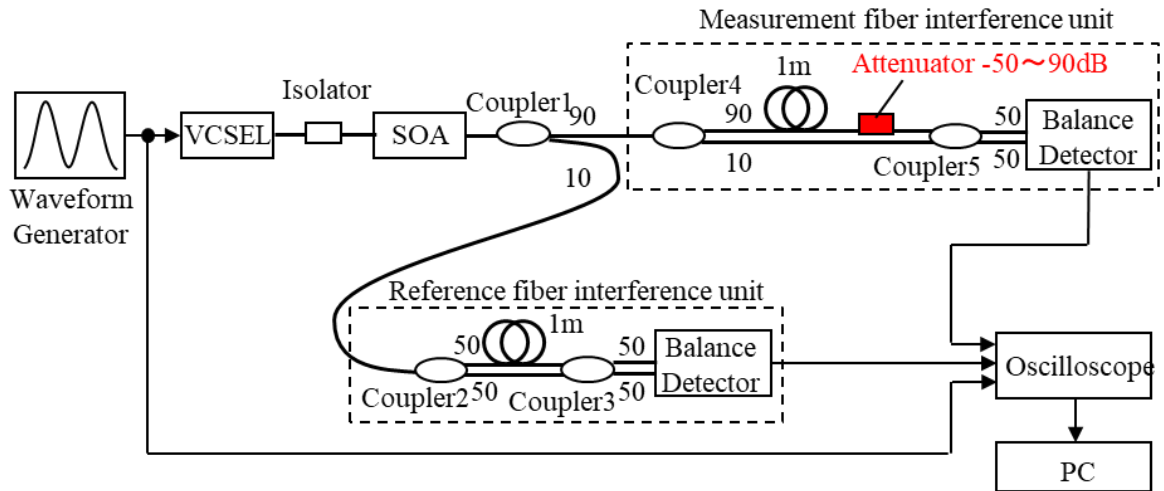


Fig. 3.12 Setup for evaluating resampling method

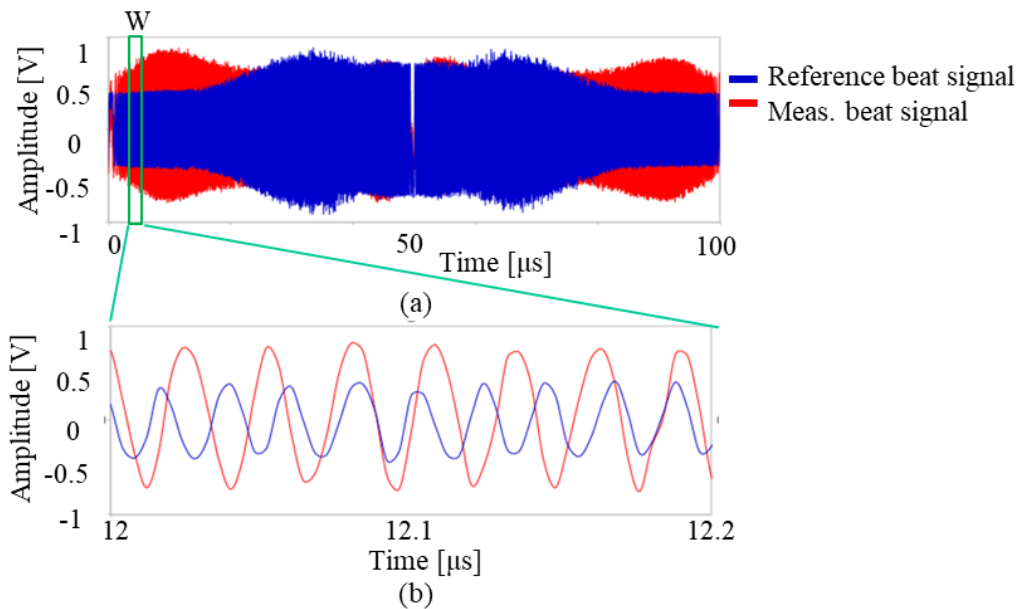


Fig. 3.13 Raw signal. (a) Raw signal during two periods. (b) Expanded W view.

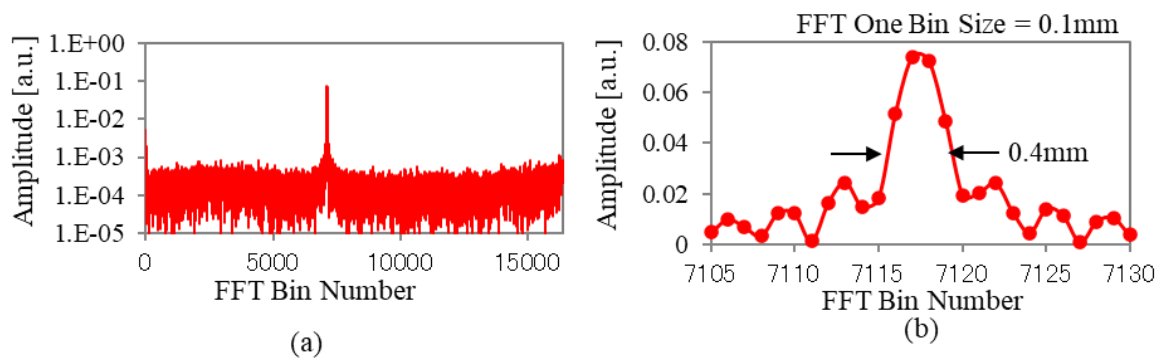


Fig. 3.14 Phase of reference beat signal.
(a) Whole region (b) Expanded view near peak region.

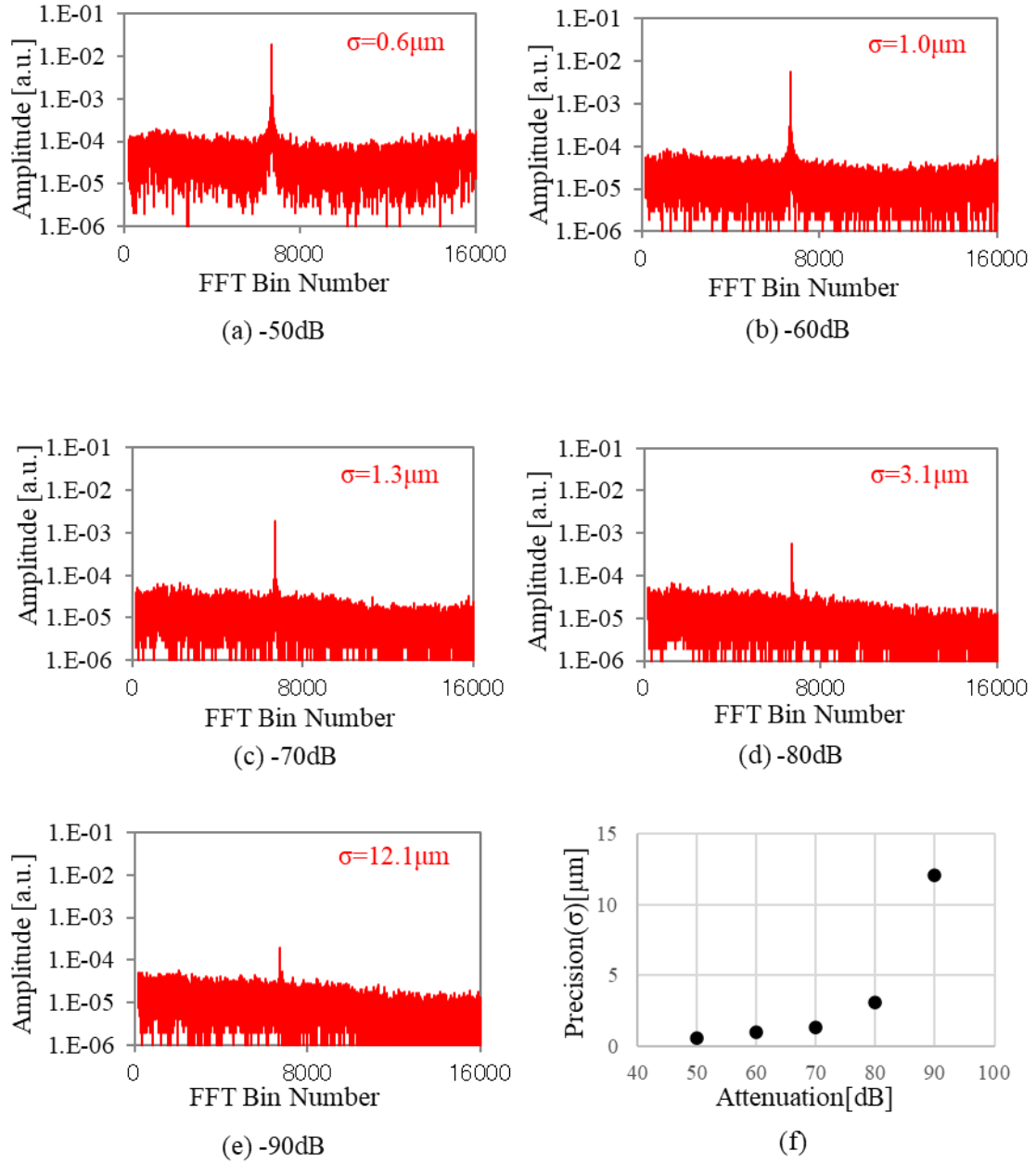


Fig. 3.15 Evaluation result of sensitivity and precision. (a)-50dB attenuation result. (b)-60dB attenuation result. (c)-70dB attenuation result. (d)-80dB attenuation result. (e)-90dB attenuation result.

3.6 形状計測のデモンストレーション

3.6.1 装置構成

本論文の主目的である狭隘部形状計測装置の開発は 4 章で説明するが、本節では、狭隘部形状計測装置の開発に先立ち、構築した距離計測基本光学系を用いて形状計測のデモンストレーションを行ったので、その結果について説明する。Fig.3.16 光学系の構成を示す。Fig.3.12 の構成とほぼ同様の構成であるが、カプラ 4 で分岐した 90%の光はサーキュレータを追加して、ファイバフォーカサにて空間中に射出された後にガルバノミラーによって、2 次元に走査され、測定対象に照射される。対象から反射した光はファイバフォーカサによって集光され、サーキュレータによって、カプラ 5 に導光され、カプラ 4 から導光された光とカプラ 5 で合波されて差動検出器にて検出される。

3.6.2 評価結果

形状計測のデモンストレーションとして、まずは表面に微小な凹凸を有するコインを計測した。Fig. 3.17 に計測結果を示す。Fig. 3.17(a) に対象とする 25 セントコインを示す。ガルバノミラーから距離約 0.7m 地点に対象を設置して評価を行った。Fig. 3.17(b) に 3D レンダリング結果を示し、Fig. 3.17(c) に高さデータを示す。本結果から、コイン表面の±0.2mm 程度の凹凸が計測可能であることを確認した。

次に中型のサンプルを測定した。Fig. 3.18 に計測結果を示す。Fig. 3.18(a) に対象のガスシリンダと光学ポストを示す。ガルバノミラーから距離約 1.2m 地点に対象を設置して評価を行った。Fig. 3.18(b) にガルバノミラーからの距離データを示す。この結果から、ガスシリンダおよび光学ポスト共に計測できていることがわかる。また対象の円筒部分の端の傾斜した部分まで計れていることから、微弱光検出にも強いことがわかる。

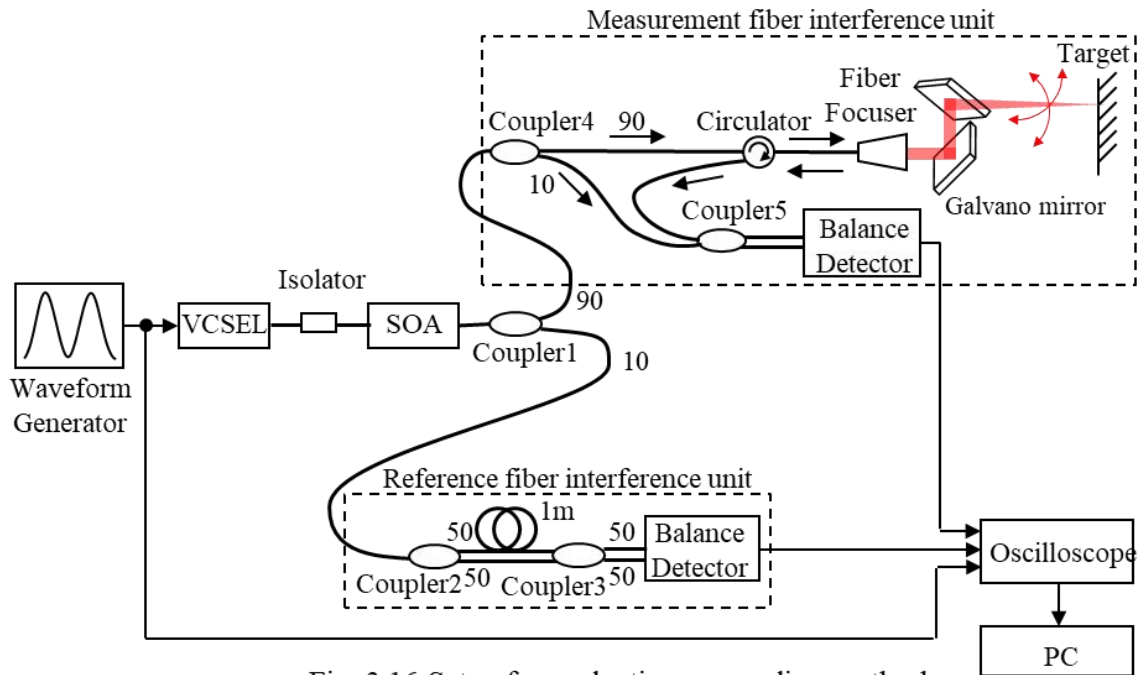


Fig. 3.16 Setup for evaluating resampling method

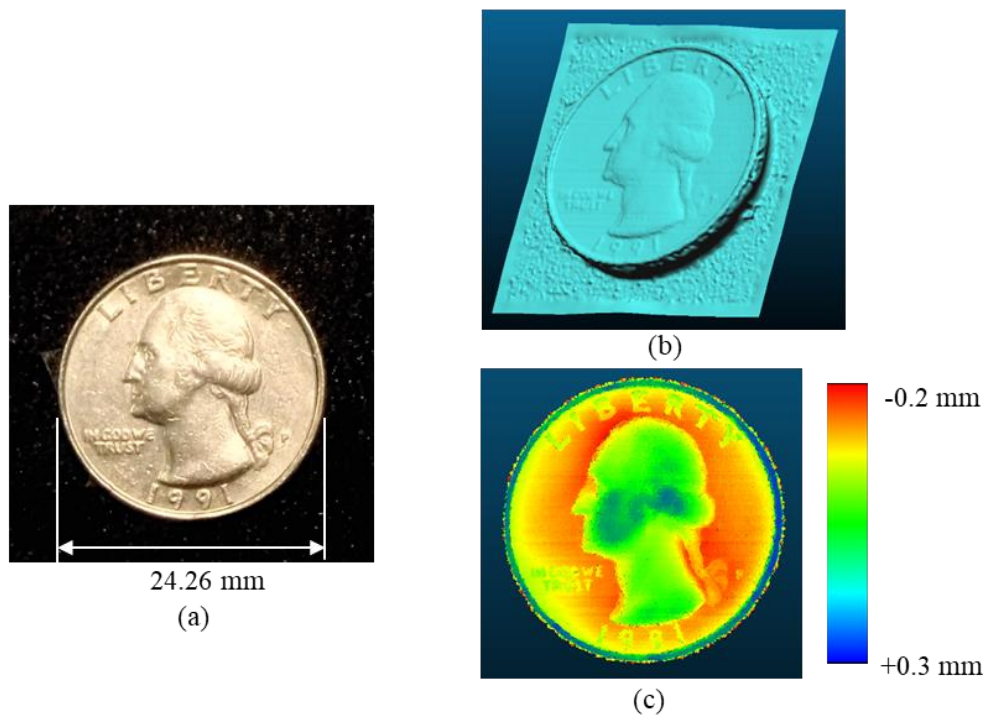


Fig.3.17 Measurement result of quarter Coin (a) Target, (b) Measurement Result, (Mesh Data), (c) Measurement Result (Height Data).

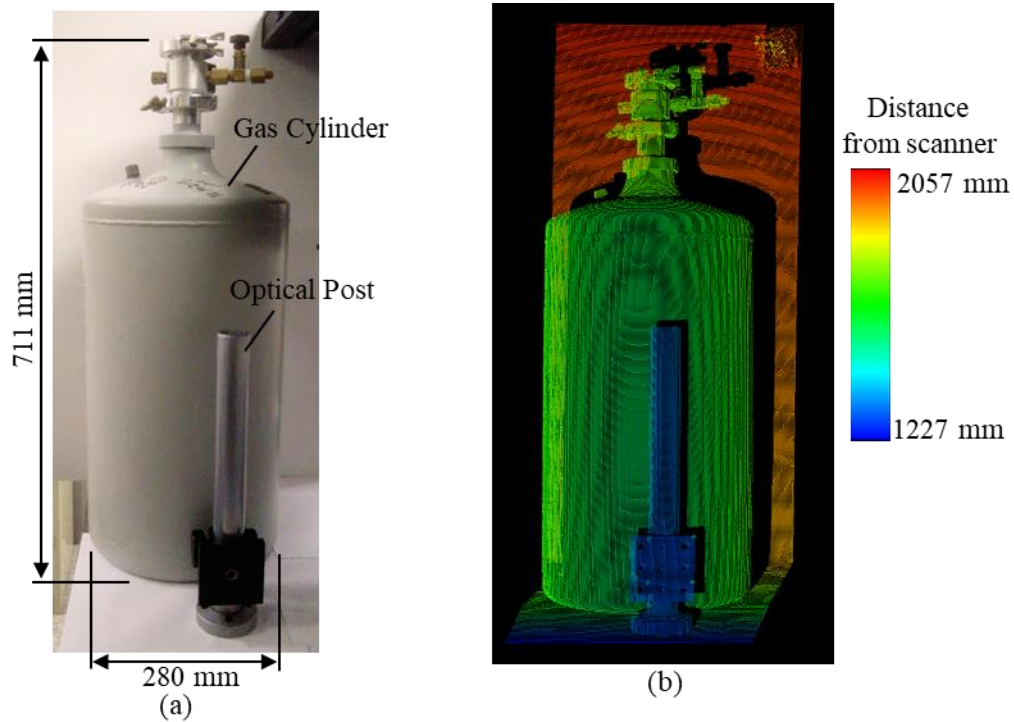


Fig. 3.18 Measurement result of Gas Cylinder and Optical Post (a) Target, (b) Measurement Result.

3.7 結言

本章では FMCW 法に基づき開発した距離計測基本光学系について説明した。

(1)FMCW 法において計測精度を決める光源に関して、候補を列挙し、それぞれの光源の物理特性に基づき VCSEL を選定した。選定した VCSEL の特性評価結果から、1 章で説明した狭隘部 3 次元形状計測装置に求められる仕様を満たすためには光周波数掃引は正弦波で行う必要があることがわかった。

(2)リサンプリングシミュレーションによって、正弦波で光周波数掃引した場合に得られる FFT スペクトル線幅を解析した。評価の結果、リサンプリングによって、光周波数掃引の非線形性が補正されて、理論値程度のスペクトル線幅が得られることを確認した。

(3)距離計測基本光学系を構築し、測定精度を評価した。検出光路にアッテネータを挿入して減衰させ、検出感度も同時に評価した。評価の結果、減衰率-50 dB にて静止安定性 $0.6\ \mu\text{m}(\sigma)$ が得られ、さらに散乱面からの反射を想定した実用レベルでの検出強度 -60~-70 dB の場合でも $1.0\sim1.3\ \mu\text{m}(\sigma)$ と目標精度 $\pm 5\ \mu\text{m}$ を十分に下回り、安定した測定が可能であることを確認した。

(4)狭隘部形状計測装置開発に先立ち、構築した距離計測基本光学系を用いて形状計測のデモンストレーションを行った。レーザをガルバノミラーによって、2 次元に走査することで、対象の 3 次元形状を測定した。評価の結果、表面に $\pm 0.2\ \text{mm}$ 程度の微小凹凸を有するコインの表面形状の測定が可能であることを確認した。さらに 1 m 程度離れた中型のサンプルに対しても形状計測可能であることを確認した。

第4章 狭隘部 3 次元形状計測装置 の開発

4.1 緒言	41
4.2 装置構成の提案	42
4.2.1 広範囲高精度計測を実現する距離のゲイン補正とオフセット補正	42
4.2.2 偏光を用いた測定方向切替	42
4.2.3 開発した狭隘部 3 次元形状計測装置	43
4.3 開発装置の精度評価	46
4.3.1 レーザ干渉計との比較評価	46
4.3.2 リングゲージを用いた評価	46
4.3.3 ブロックゲージを用いた評価	46
4.3.4 内部に段差を有する形状測定のデモンストレーション	46
4.4 結言	49

4.1 緒言

本章では，3 章で説明した距離計測基本光学系を搭載した狹隘部 3 次元形状計測装置について説明する。4.2 節では開発した装置の構成について説明する。4.3 節では開発した装置の精度評価および狹隘部の形状計測について説明する。

4.2 装置構成の提案

Fig.4.1 は狭隘部形状計測装置の概略図を示す[Maruno 2018], [針山 2021]。本装置の特徴は, (a) 同一のプローブで幅広い内径($\phi 6 \sim 100 \text{ mm}$)を高精度に計測できることと, (b) 光学系内部でレーザの偏光を切り替えることで, 狭隘部の側面と奥行き方向切り替えが瞬時にできることである。狭隘部に対する計測ニーズとして, 穴の側面方向だけではなく, 深さ方向の計測も求められる場合がある。そこで同一プローブで両方向の計測を可能にする技術を開発した。Fig.4.1 に示すように, レーザから射出した光に対して, 偏光切替器で偏光を制御することで, 側面方向と奥行き方向の計測モードの切り替えを行う。対象に対してプローブを挿入して, 側面方向計測モードにて, プローブを回転しながら1断面計測し, さらにZ方向にプローブを送ることで, 対象内面の3D形状計測を行う。また奥行き方向計測モードにて, 測定対象を水平に走査することで, 対象の穴深さ等を計測することが可能となる。

4.2.1 広範囲高精度計測を実現する距離のゲイン補正とオフセット補正

まず, (a)の特徴について説明する。Fig.4.2(a)に光学系の構成を示す。広範囲を高精度で測定するために測定距離のゲイン補正とオフセットの補正を行っている。まず距離のゲイン補正について説明する。2.3節のリサンプリング法で説明したように, 周波数変調されたレーザ光をカプラによって2つに分岐して, 距離の基準となる参照ファイバを測定する参照ファイバ干渉ユニットと, 対象を測定する測定ファイバ干渉ユニットに導光する。測定ファイバ干渉ユニットで生成されたビート信号を参照ファイバ干渉ユニットで生成されたビート信号を用いてリサンプリングすることで, レーザの光周波数掃引の非線形性を補正して, 対象までの距離を精度よく算出する。ここで参照ファイバ長は距離の基準となるため正確な長さを知る必要がある。そこで, 参照ファイバの温度をモニタし, 温度による光路長変化を補正することで, 距離の基準の補正つまり距離のゲインを補正している。

次に距離のオフセット補正について説明する。ファイバフォーカサによって導光された光はシャフト先端の偏光ビームスプリッタで反射して, 測定対象に照射される。このときに, 対象までの経路中の光ファイバやシャフトの熱膨張により, 測距値が変動してしまう。そこで, 測定対象とは別に偏光ビームスプリッタ端面からの反射光を測定し, Fig.4.2(b)に示すように, 測定対象距離から反射面距離を差し引くことで途中の光路変化, つまり距離のオフセットを補正している。以上の補正により, 広範囲高精度距離計測を実現している。

4.2.2 偏光を用いた測定方向切替

次に(b)の特徴について説明する。偏光を用いた光の照射方向の切り替え手法の詳細を Fig.4.3 に示す。プローブの先端部の偏光ビームスプリッタは, 入射面に平行に振動する光(P偏光)を透過させ, 入射面に垂直な方向に振動する光(S偏光)を反射させる性質を持つ。そのため, 偏光切替器で測距レーザの偏光をP偏光, S偏光に電氣的に切り替え制御することで, 測距レーザ照射方向を側面方向と奥行き方向に切り替える

ことができる。計測ビームを側面方向に向けたまま回転させるには、偏光ビームスプリッタの回転に応じて入射光の偏光方向を回転させ、偏光ビームスプリッタに対して相対的な偏光状態を一定に保つ必要がある。そのため、2枚の $\lambda/4$ 板を用いる。入射光の偏光方向に対して、1枚目の $\lambda/4$ 板の軸を45度に配置することで、直線偏光を円偏光に変換する。2枚目の $\lambda/4$ 板と偏光ビームスプリッタは回転モータに取り付けられており、モータとともに回転する。円偏光の光は2枚目の $\lambda/4$ 板を通過することで、再び直線偏光に変換され、モータの回転とともに偏光ビームスプリッタに対して常に一定の偏光入射方向を維持し、側面方向に向けたビームを回転させることができる。

4.2.3 開発した狭隘部 3 次元形状計測装置

4.2.1 節および 4.2.2 節に説明した技術に基づき開発した装置を Fig.4.4 に示す。光源は制御ボックス内に搭載され、計測ヘッドまで光ファイバで導光する。距離計測基本光学系の計測範囲は 225 mm であり、計測速度は 10,000 点/秒(10 kHz)である。計測プローブは長さ 150 mm, $\phi 5$ mm であり、先端部の開口から光を出射する。主要な機械加工部品に対応するため、照射ビームの焦点深度で直径換算 $\phi 6 \sim 100$ mm をカバーできるようにレンズ設計している。レンズ設計を変更することで、距離計測基本光学系の最大計測レンジの 2 倍の 450 mm の直径まで計測することが可能である。計測対象を XY 軸ステージに搭載し、プローブを Z 軸方向に走査することで、対象の直径寸法や内部形状を計測する。目標とする計測精度は単純円筒の場合は $\pm 5 \mu\text{m}$ 、複雑形状の場合は $\pm 20 \mu\text{m}$ である。

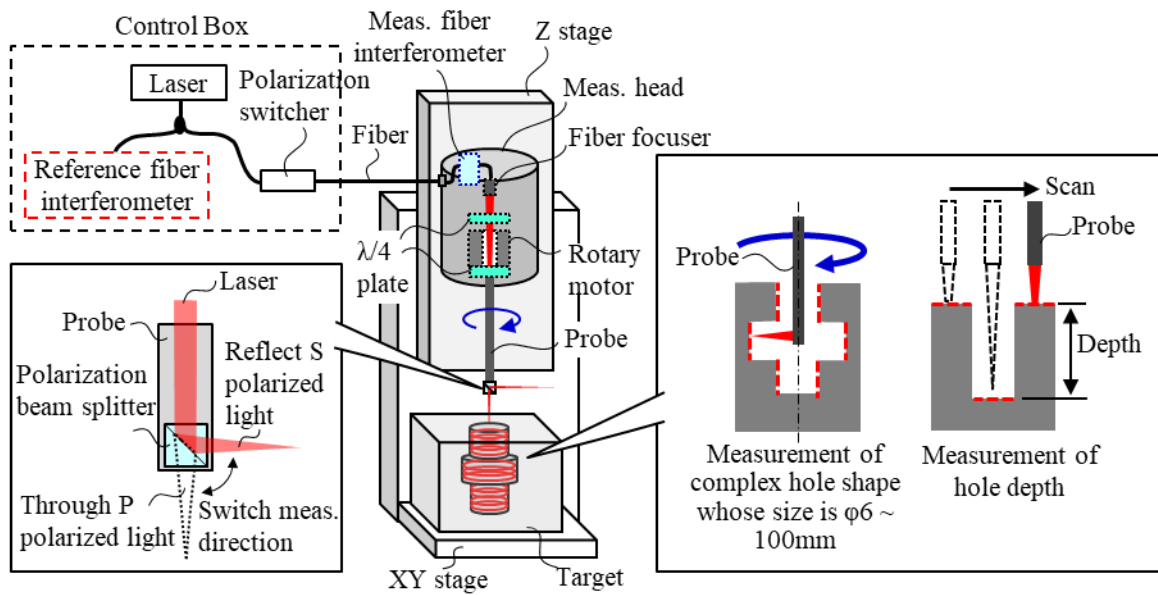


Fig.4.1 Schematic drawing of narrow-space 3D shape measurement equipment.

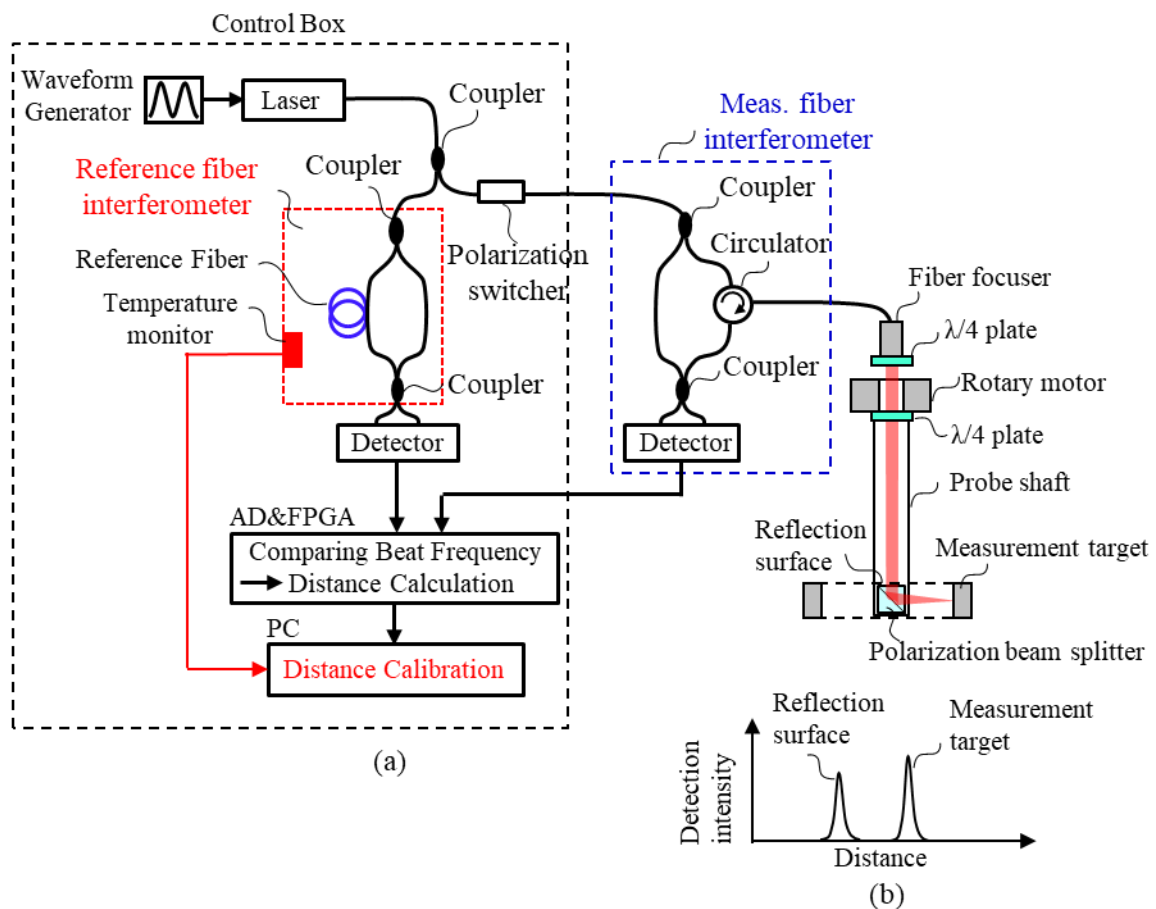


Fig.4.2 Principle of distance gain and offset correction method. (a)Schematic drawing of optical system for distance gain and offset correction. (b) FFT spectrum of measurement target and reflection surface.

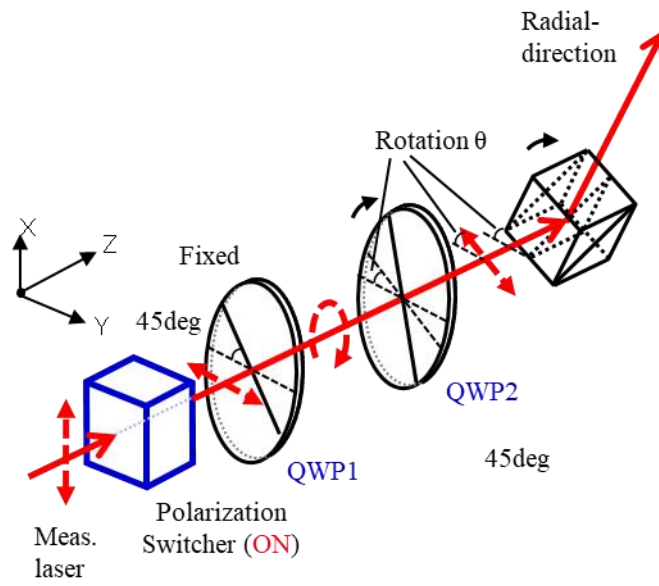


Fig.4.3 Schematic drawing of measurement direction switching method.

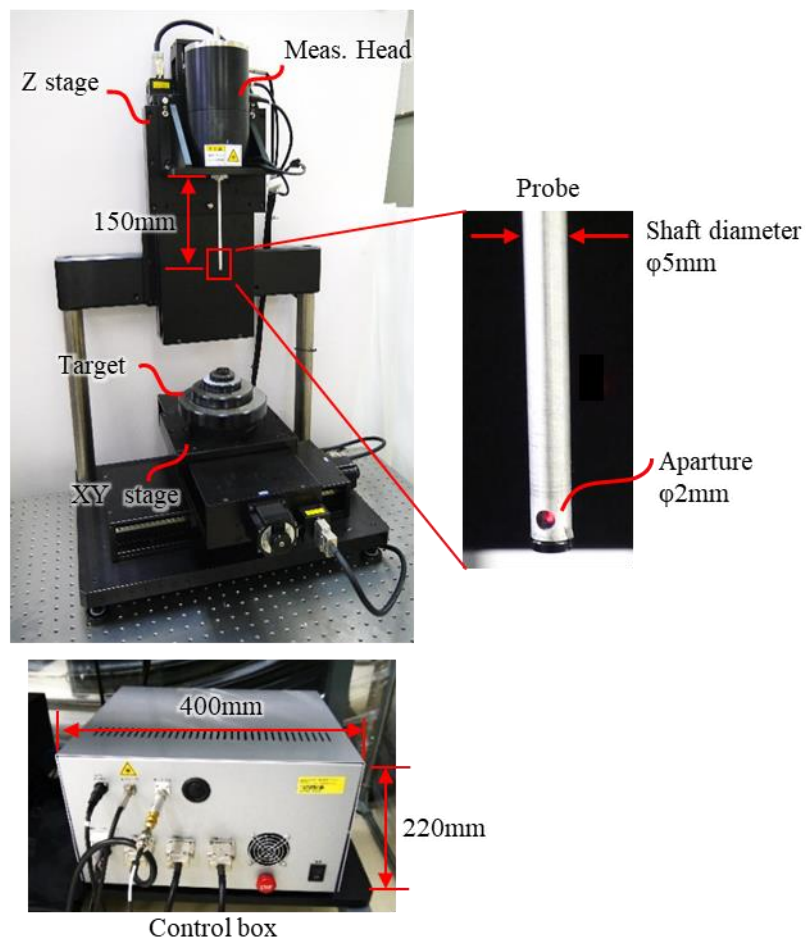


Fig.4.4 Developed narrow-space 3D shape measurement equipment.

4.3 開発装置の精度評価

4.3.1 レーザ干渉計との比較評価

まず距離計測基本光学系の距離測定性能評価を行った。Fig.4.5(a)に評価構成を示す。評価にはレーザ干渉計を用いた。レーザ干渉計は絶対位置の測定はできないが、対象を動かしながら測定する相対的な測定は可能であり、測定精度は $0.1\ \mu\text{m}$ 以下である。距離計測基本光学系から射出する光を光ファイバコリメータによって、空間に照射する。レーザ干渉計の光とビームスプリッタによって同一光路とし、リニアガイドに搭載したレトロリフレクタに照射する。レトロリフレクタの距離を連続的に変えながら、レーザ干渉計と測距光源の測距値の比較を行う。評価結果を Fig.4.5(b)に示す。横軸は移動距離、縦軸はレーザ干渉計を真値とした距離計測基本光学系の距離誤差を示す。評価の結果、距離 300 mm にわたり、レーザ干渉計との誤差は $\pm 1\ \mu\text{m}$ 以内であることを確認した。

4.3.2 リングゲージを用いた評価

次にプローブの内径計測精度の評価を行った。評価の構成を Fig.4.6(a)に示す。評価には真値が刻印された $\phi 6, 16, 30, 60, 100\text{ mm}$ のリングゲージを用いた。各リングゲージに対して、10 回測定を行い、その平均値とバラつき (2σ) を評価した。なおリングゲージの刻印値は 20°C で値付けされており、今回実験室は 23.5°C の環境で評価したため、リングゲージの熱膨張を加味して、 20°C 換算の寸法に温度補正して比較した。評価結果を Fig.4.6(b)に示す。横軸はリングゲージ寸法を示し、縦軸はリングゲージ刻印値と測定値の誤差である。またエラーバーは測定バラつき (2σ) を示す。評価の結果、最大誤差は $0.8\ \mu\text{m}$ となり、 $\phi 6 \sim 100\text{ mm}$ のリングゲージにて目標精度 $\pm 5\ \mu\text{m}$ 以内となることを確認した。

4.3.3 ブロックゲージを用いた評価

次にプローブの奥行き計測精度の評価を行った。評価の構成を Fig.4.7(a)に示す。評価には真値が値付けされたブロックゲージを用いる。ブロックゲージの研磨面を他のブロックゲージとリングし、上面の研磨面までの距離を測定し、次に X ステージを走査し、他のブロックゲージの研磨面までの距離を測定することで、ブロックゲージ高さを測定する。評価に用いたブロックゲージは 2, 15, 25, 47 mm である。各ブロックゲージに対して上面、下面それぞれ 1 ms 間の測定の平均値を算出し、その差から高さを算出した。同様の測定を 10 回を行い、平均値とバラつき (2σ) を評価した。評価結果を Fig.4.7(b)に示す。横軸はブロックゲージ寸法を示し、縦軸はブロックゲージ寸法と測定値の誤差である。またエラーバーは測定バラつき (2σ) を示す。評価の結果、最大誤差は $2.4\ \mu\text{m}$ となり、2~47 mm のブロックゲージにて目標精度 $\pm 5\ \mu\text{m}$ 以内となることを確認した。

4.3.4 内部に段差を有する形状測定のデモンストレーション

最後に内部に段差を有する形状の測定を行った。Fig.4.8 に対象形状を示す。対象形状は内径 10 mm の狭い穴の中間に内径 80 mm の広がりを持つ穴を有しており、従来

の接触式の測定器では内部形状の測定が困難である。この部品の内部形状を開発した装置で測定した点群データを Fig4.8(b)に示す。測定結果より、非接触で広範囲を測定可能な本装置を用いることで、異なる内径を持つ構造であっても、死角なく測定できることを確認した。

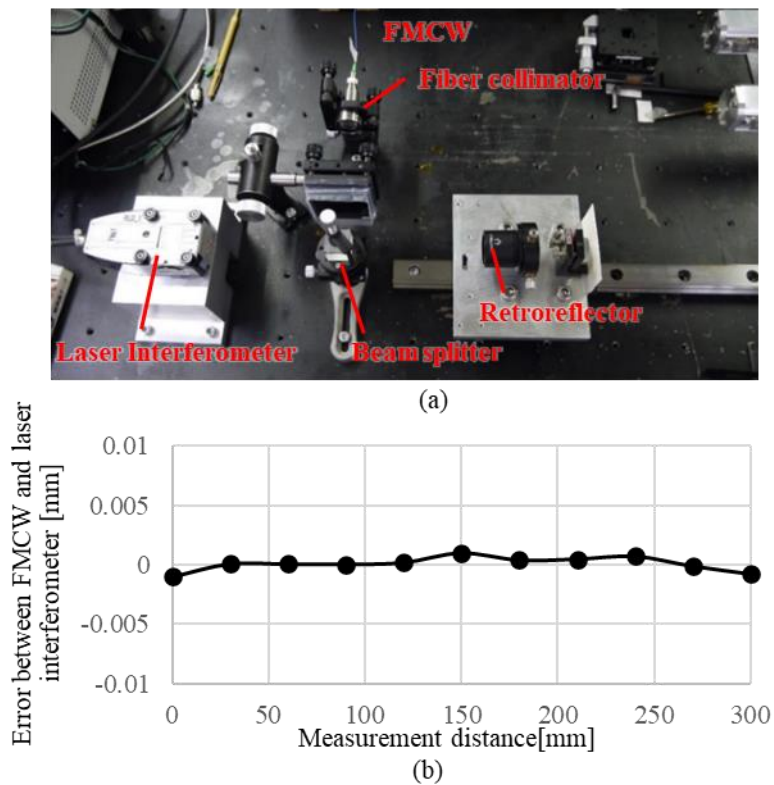


Fig.4.5 Distance measurement evaluation.
(a) Setup of evaluation. (b) Evaluation result.

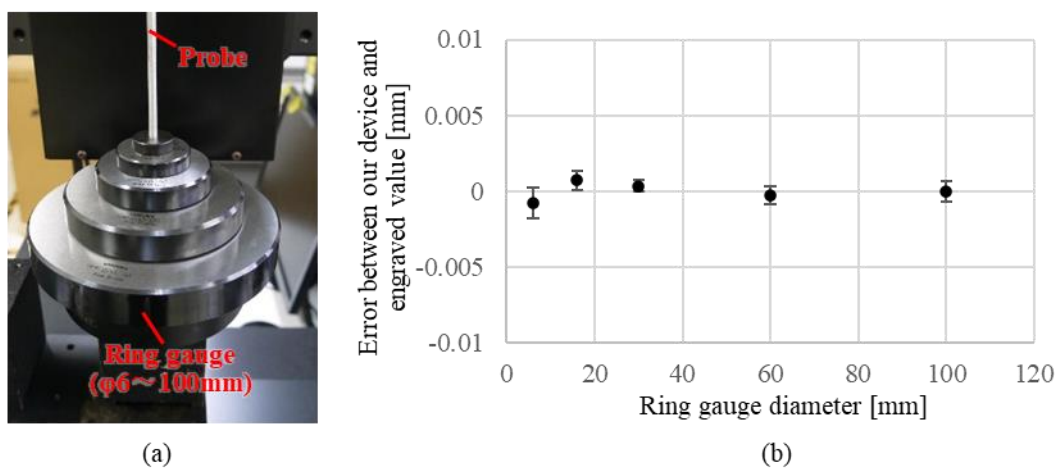


Fig. 4.6 Inner diameter measurement evaluation.
(a) Setup of evaluation. (b) Evaluation result.

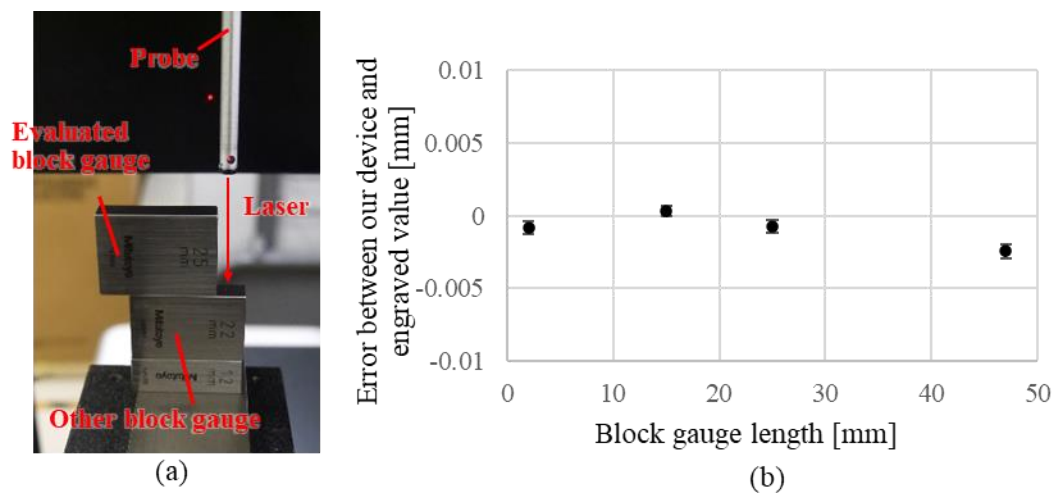


Fig. 4.7 Depth measurement evaluation.
(a) Setup of evaluation. (b) Evaluation result.

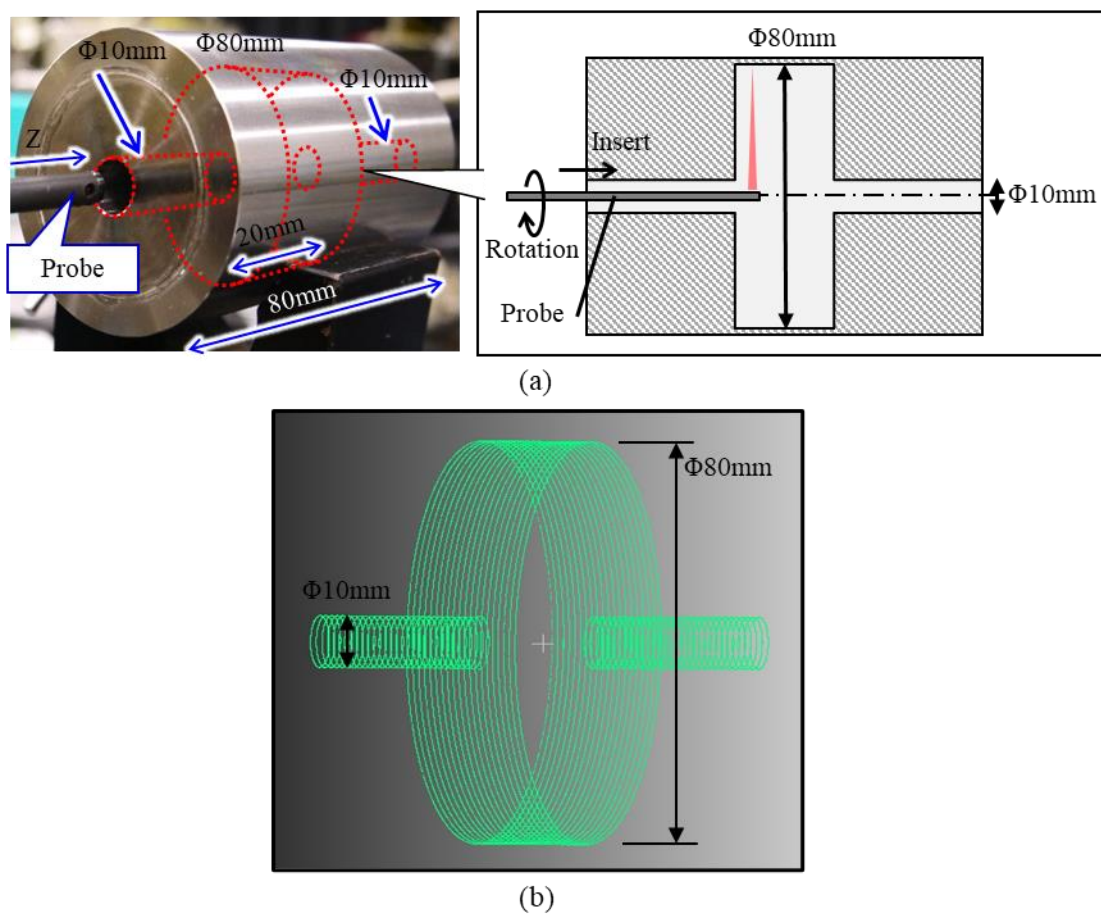


Fig. 4.8 Measurement result of sample which has step height inside. (a) Target shape. (b) Measurement result.

4.4 結言

本章では距離計測基本光学系を搭載した狹隘部 3 次元形状計測装置について説明した。

(1)開発装置の特徴は、 $\phi 6 \sim 100 \text{ mm}$ と幅広い内径を測定できることと、出射光の偏光を切り替えることで、狹隘部の側面と奥行き of 測定方向切替えが可能なことである。

(2)開発装置の精度評価を行った。まず距離計測基本光学系の距離測定精度評価として、レーザ干渉計と比較した結果、 300 mm の範囲において、測定誤差は $\pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ 以内となることを確認した。次にプローブの内径計測精度を評価した結果、 $\phi 6 \sim 100 \text{ mm}$ のリングゲージの刻印値との誤差は $\pm 0.8 \text{ }\mu\text{m}$ 以内であることを確認した。最後にプローブの深さ方向の測定精度を評価した結果、 $2 \sim 47 \text{ mm}$ のブロックゲージ高さとの誤差は $\pm 2.4 \text{ }\mu\text{m}$ 以内であることを確認した。

(3)開発装置を用いて、従来の接触式の測定器では測定困難な内部に段差を有する形状計測のデモンストレーションを行った。入口の内径 10 mm で、内部に 80 mm の広がりを持つ穴形状を測定した結果、死角なく両方の穴形状を測定することが可能であることを確認した。

第5章 周囲環境温度に対するロバスト性評価と誤差低減手法の提案

5.1 緒言	51
5.2 環境温度を変えた評価	52
5.2.1 評価方法	52
5.2.2 評価結果	52
5.3 誤差発生メカニズムの検討	55
5.4 シミュレーション解析	58
5.4.1 距離オフセット誤差の解析	58
5.4.2 距離ゲイン誤差の解析	60
5.5 偏光特性に基づいた測定誤差低減手法の提案	62
5.6 実験検証	65
5.6.1 距離オフセット誤差低減手法の評価	65
5.6.2 距離ゲイン誤差低減手法の評価	67
5.7 結言	69

5.1 緒言

本章では 4 章で開発した FMCW 法に基づく狭隘部 3 次元形状計測装置の環境温度に対するロバスト性評価を行う。目標とする温度範囲は 20～30℃である。5.2 節にて、環境温度を変えた評価方法および評価結果について説明する。5.3 節にて、温度変化時に生じる誤差発生メカニズムについて説明する。5.4 節にて、誤差発生メカニズムの妥当性を数値解析により検証したので、その結果について説明する。5.5 節にて、誤差発生メカニズムに基づき考案した誤差低減手法について説明する。5.6 節にて、誤差低減手法の実験評価結果について説明する。

5.2 環境温度を変えた評価

5.2.1 評価方法

開発した狭隘部3次元形状計測装置の周囲温度の変化に対するロバスト性を評価するために、装置を恒温槽に入れ、槽内の温度を変えて測定性能を評価した。評価の構成を Fig.5.1 に示す。測定対象は寸法が既知である $\phi 100$ mm のリングゲージとした。リングゲージ直径を一定時間間隔で測定し、環境温度を変えた時に得られる直径値を評価する。また同時に RTD (Resistance Temperature Detector) を用いて、恒温槽の空気温度、リングゲージの表面温度、計測ヘッド内温度、制御ボックス内の参照ファイバ干渉ユニットの温度を測定する。

5.2.2 評価結果

恒温槽の温度を変えた時に得られた温度測定結果を Fig.5.2 に示す。室温は 20°C から測定開始し、1 時間に 10°C の温度勾配で 30°C まで加熱した。その後、2 時間の間 30°C に保った後に、1 時間に 10°C の温度勾配で再び 20°C まで冷却した。その後、3 時間の間 20°C に保った。Fig.5.2 の Air temp. はリングゲージ横の空気温度の測定結果である。Box temp. は参照ファイバ干渉ユニット内の温度を示し、参照ファイバの熱による光路長変化を補正するために用いる。Head temp. は計測ヘッド内の温度であるが、今回補正には用いていない。Ring gauge temp. はリングゲージ表面の温度であり、リングゲージの熱膨張を補正するために用いる。

Fig.5.3 に4章で説明した距離のオフセット補正とゲイン補正をしない場合のリングゲージの測定結果を示す。図中、黒点は測定結果を示し、青点はリングゲージの温度測定結果に基づき、リングゲージの熱膨張を補正した理論値を示す。理論値は 20°C の時に、リングゲージの刻印値と一致するように計算した(リングゲージ刻印値はメーカーにて 20°C の時に校正された値である)。また開発装置は、 20°C のときにリングゲージ刻印値と測定値が一致するように校正をしている。測定結果をみると、図中 A 部で測定値が理論値に対して大きくなり、その後、図中 B で減少に転じていることがわかる。これは、Fig.5.2 の計測ヘッド内の温度(Head temp.)に関連した動きをしており、ヘッド内の光ファイバやシャフトが熱の影響を受けて、距離のオフセットが変動しているためである。そこで、Fig.5.4 に距離のオフセット補正をした結果を示す。Fig.5.3 と比較して、測定値と理論値との差は減少したが、図中 A 部および B 部で依然、理論値との差がある。これは Fig.5.2 の参照ファイバ格納ボックス内の温度(Box temp.)と関連しており、距離のゲイン補正をしていないためである。そこで、Fig.5.5 に距離のゲイン補正をした結果を示す。Fig.5.4 と比較して、図中 A 部および B 部でも、測定値と理論値の差が減少していることがわかる。しかし、図中 A 部および B 部に測定値に周期的な変動が生じていることがわかる。変動を見やすくするため、Fig.5.6 に測定値と理論値の差分を示す。温度との関係を把握するために、同図に計測ヘッド内の温度を示す。図中 A' の温度上昇時に偏差の周期が細かく変動し、温度上昇の勾配が緩まった図中 B' では周期が大きくなり、温度が下降する図中 C' では周期が細かく変動し、温度降下の

勾配が緩まった図中 D'では周期が大きくなっていることがわかる。よって温度変化に関連した周期変動をしていることがわかる。その変動振幅は全幅で $4\sim 5\mu\text{m}$ 程度であり、これは、目標精度 $\pm 5\mu\text{m}$ に対して、問題となる誤差である。

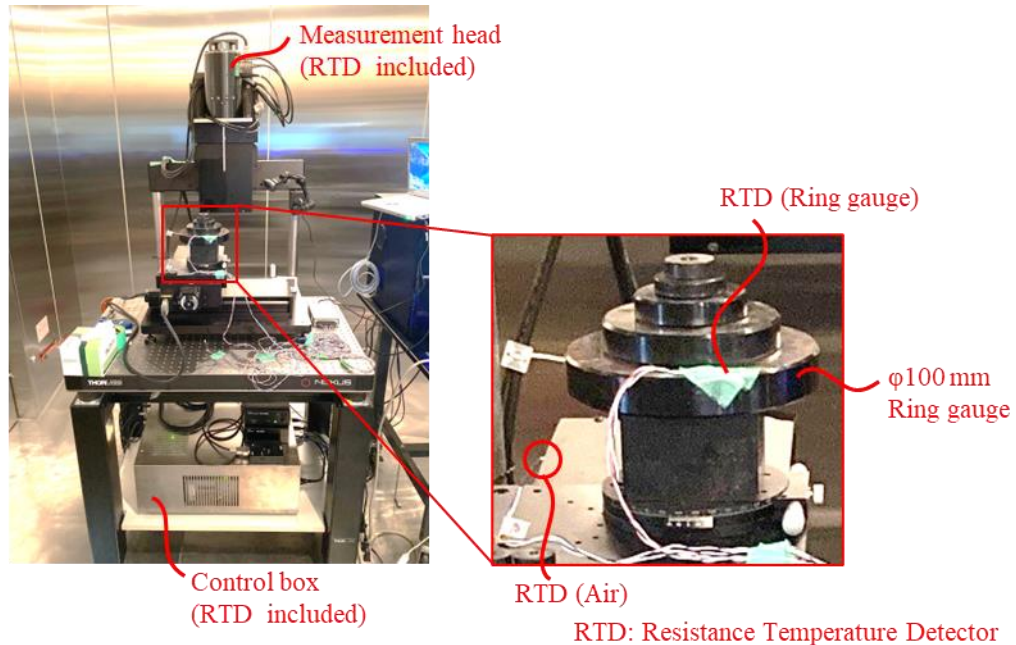


Fig.5.1 Setup of thermal evaluation of developed equipment in temperature-controlled room.

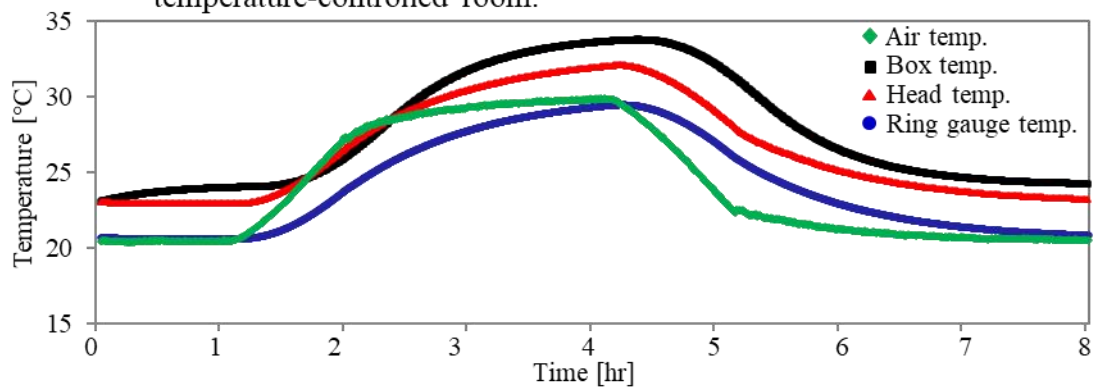


Fig.5.2 Temperature measurements.

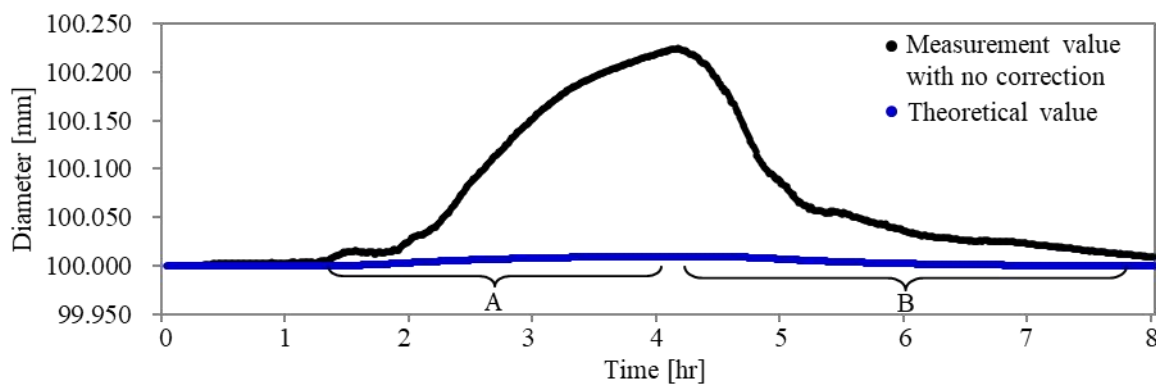


Fig.5.3 Measurement result of $\phi 100\text{ mm}$ ring gauge diameter with no correction.

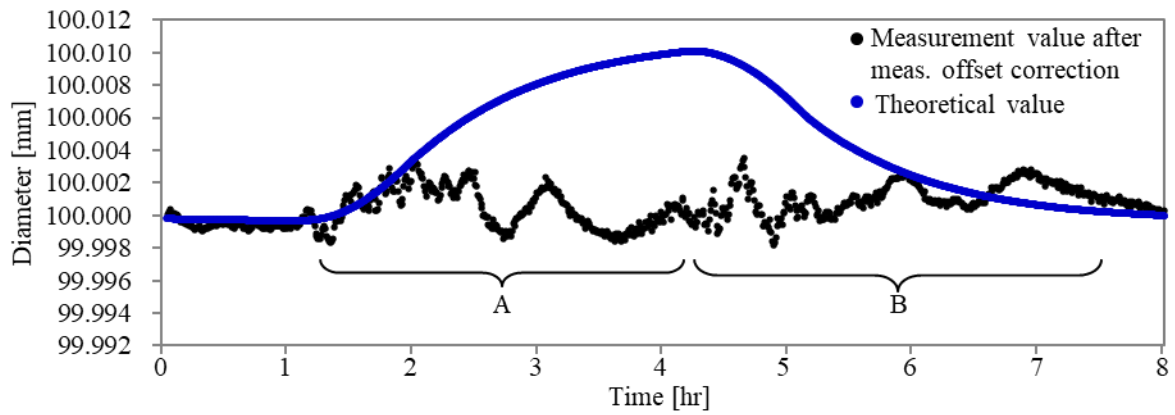


Fig.5.4 Measurement result of $\phi 100$ mm ring gauge diameter after meas. offset correction.

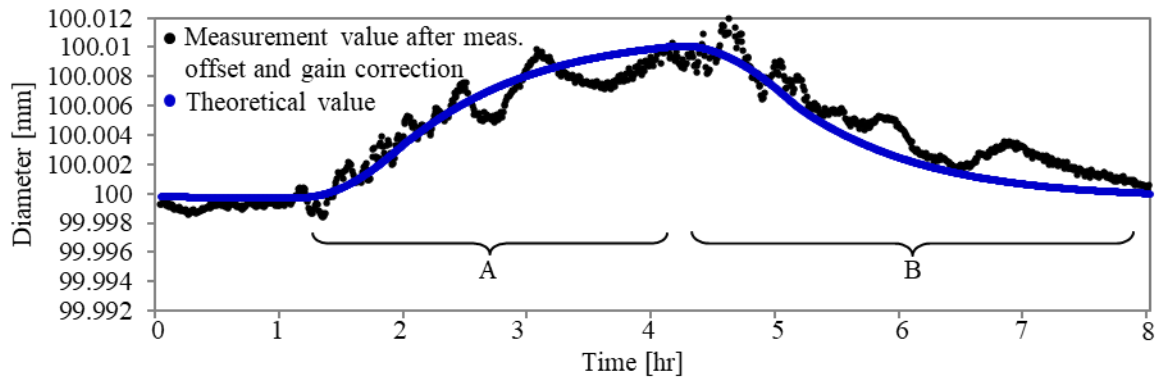


Fig.5.5 Measurement result of $\phi 100$ mm ring gauge diameter after meas. offset and gain correction.

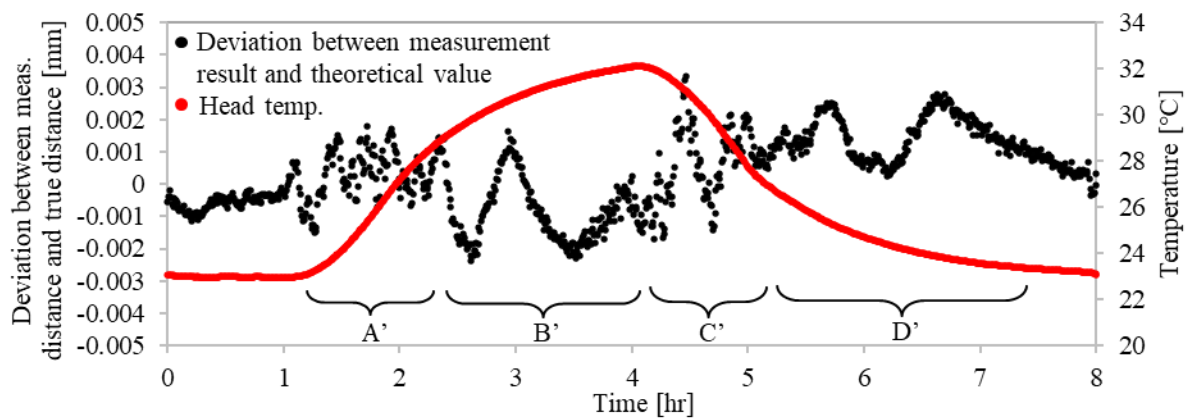


Fig.5.6 Deviation between measured and theoretical values.

5.3 誤差発生メカニズムの検討

温度変化時に測定値が周期的に変動する誤差発生メカニズムを検討した。誤差の原因は FMCW を構成する干渉計に導光される光の偏光の位相変化であると推測した。2 章の FMCW の原理説明で示した Fig.2.1(c)は、ある直線偏光成分のみによって距離測定した場合に得られる理想的なビート信号を示す。現実には、ある直線偏光成分に対して、偏光方向が直交する漏れ光が光ファイバ中では発生する。漏れ光の発生原因は、例えば、用いる光ファイバ光学素子(カプラ、サーキュレータ等)の消光比が低いため発生する。または、光ファイバコネクタを用いた場合に、コネクタ間の勘合具合によって消光比が低下して発生する。

以後、Fig.5.7 を用いて、漏れ光によって偏光の位相が変化した場合に生じる測定誤差について説明する。Fig.5.7(a)は受光器で得られる干渉ビート信号を示す。図中青線は偏光の主成分によって得られるビート信号を示す。赤線は偏光の主成分と直交する漏れ光成分によって得られるビート信号を示す。主成分と漏れ光成分のビート信号の振幅比は消光比と同程度となる。ここで、偏光の主成分は光ファイバの *slow* 軸を通過し、漏れ光成分は光ファイバの *fast* 軸を通過する場合を考える(偏波面保存ファイバにおいては、光の偏光方向を保持するために、光ファイバに複屈折率を持たせており、光がゆっくり進む方向を *slow* 軸、速く進む方向を *fast* 軸と呼ぶ)。このとき *slow* 軸と *fast* 軸の屈折率の差によって、通過する光に光路差が生じる。この屈折率に応じた光路差が測定誤差の原因となる。次に開発した装置で生じる具体的な光路差について説明する。

4 章の Fig.4.2(a)で示した狭隘部 3 次元形状計測装置の光路図中、青点線で示す測定ファイバ干渉ユニットでは、カプラで 2 つに分離した光路のうち、サーキュレータを通過して、対象に照射される光は空間を通過するため、*slow* 軸と *fast* 軸間で、光路差は生じない。もう一方の光は光ファイバを通過するため、*slow* 軸と *fast* 軸間で、光ファイバ長さに応じた距離差が生じる。例えば、Fig.4.2(a)において、光ファイバフォーカサと測定対象の間に FMCW 法の干渉原点が存在するとする。ここで、干渉原点とは、Fig.2.1 で示した参照光と測定光の距離差が等しい位置をさす。光ファイバフォーカサから干渉原点までの距離が 180 mm とする。その場合、その長さと等しくなるための参照光路の光ファイバ長は $180 \text{ mm} \times 2 (\text{往復光路}) \div 1.5 (\text{光ファイバ屈折率}) = 240 \text{ mm}$ となる。ここで、*slow* 軸と *fast* 軸を通過する光の波長が 1 周期分ずれる距離をビート長と呼ぶ。光ファイバの材質にも依存するが、例えば、波長 $1.55 \mu\text{m}$ の光ではビート長は 5mm 程度となる。その場合、240mm の光ファイバを通過するときに *slow* 軸と *fast* 軸間の光路差は $240 \text{ mm} \div 5 \text{ mm} \times 1.55 \mu\text{m} = 74 \mu\text{m}$ 生じることになる。距離測定においては、空間片道測定光路は $74 \mu\text{m} \div 2 (\text{往復}) = 37 \mu\text{m}$ となる。

Fig.5.7(a)で示したビート信号において、偏光の主成分と漏れ光成分間で、距離差が生じた場合に、そのビート信号を FFT した結果を Fig.5.7(b)に示す。図中、青破線は、偏光の主成分のビート信号成分(光ファイバの *slow* 軸を通過)を FFT した結果得られるピーク強度を示し、赤破線は偏光の漏れ光成分のビート信号成分(光ファイバの *fast* 軸を透過)を FFT した結果得られるピーク強度を示す。このときにそれぞれのピーク

位置が、光周波数掃引幅で決まる FFT ピーク幅(Fig.2.1(d)の ΔL をさし、本装置では約 $360 \mu\text{m}$)以上に離れて入れば、測定誤差は生じない。しかし、実際には、測定ファイバ干渉ユニットでは $37 \mu\text{m}$ の距離差となり、これは FFT ピーク幅よりも小さいため、Fig.5.7(c)に示すように偏光の主成分のピークと漏れ光成分のピークの裾野が重なり合い、緑線で示す両者の合成成分が検出される。ここで光ファイバに熱が加わった際に光ファイバに応力が作用し、slow 軸に対する fast 軸の成分の位相が変化するため、偏光の主成分のピークに対する漏れ光成分のピークの位相が変化する。そうすると合成成分のピーク位置が変化するため、測定誤差が生じる。

Fig.5.7(d)は測定ファイバ干渉ユニットを構成する光ファイバに熱が加わった場合に生じる距離誤差を示す。横軸が真の距離、縦軸が測定距離を示す。fast 軸への漏れ光がない理想的な場合に得られる測定距離を図中の実線とする。fast 軸への漏れ光が発生し、さらに光ファイバに温度変化が加わった場合に距離のオフセット変動が生じる。slow 軸に対する fast 軸の位相状態によって、オフセット変動量は異なるが、図中の破線のように実線に対して、オフセット量が大きく生じたり、小さく生じたりし、距離誤差が発生する。

同様の事象は参照ファイバ干渉ユニットにも生じると考えられる。Fig.4.2(a)で示した構成において、参照ファイバ干渉ユニットの光路差は 300 mm (対応する空間片道測定光路は $300 \text{ mm} \div 2(\text{往復光路}) \times 1.5(\text{ファイバ屈折率}) = 225 \text{ mm}$)とする。ここで、測定光の波長を $1.55 \mu\text{m}$ とし、光ファイバのビート長を 5 mm とすると、slow 軸と fast 軸間の光路差は $300 \text{ mm} \div 5 \text{ mm}(\text{ビート長}) \times 1.55 \mu\text{m}(\text{波長}) = 93 \mu\text{m}$ 生じることになる。距離測定においては、空間片道測定光路は $93 \mu\text{m} \div 2(\text{往復}) = 46.5 \mu\text{m}$ となる。先ほど説明した測定ファイバ干渉ユニット同様に、漏れ光の影響で距離誤差が生じる。Fig.5.7(e)に光ファイバに熱が加わった場合に生じる距離誤差を示す。横軸が真の距離、縦軸が測定距離を示す。fast 軸への漏れ光がない理想的な場合に得られる測定距離を図中の実線とする。fast 軸への漏れ光が発生し、さらに光ファイバに温度変化が加わった場合に、slow 軸を通過する光のビート信号に fast 軸を通過するビート信号の影響が加わり、リサンプリングに用いる参照ビート信号に誤差が重畳するため、距離のゲイン変動が生じる。slow 軸に対する fast 軸の位相状態によって、ゲイン変動量は異なるが、例えば、Fig.5.7(e)の破線に示すように、実線に対して、ゲイン変動量が大きく生じたり、小さく生じたりする。ここで着目すべきは、測定ファイバ干渉ユニットで漏れ光が発生した場合は、Fig.5.7(d)に示したように距離のオフセット誤差を生じたが、参照ファイバ干渉ユニットで漏れ光が発生した場合は、Fig.5.7(e)に示すように距離のゲイン誤差が生じ、誤差の出方が異なることである。

本モデルの妥当性を検証するために、次章にて、リサンプリングシミュレーションを用いて偏光の漏れ光の影響を解析した。

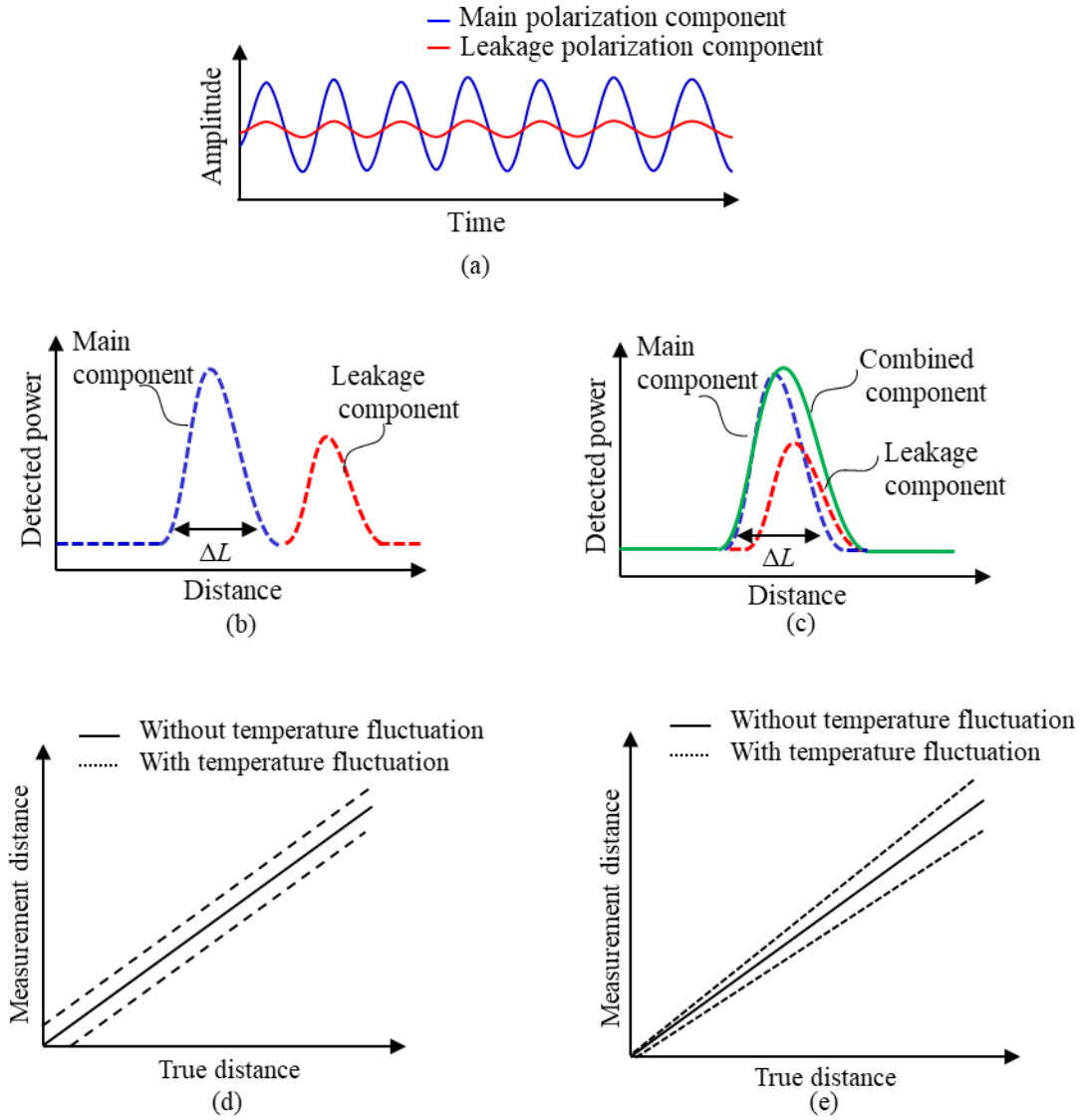


Fig.5.7 Schematic drawing of error mechanism based on polarization leakage. (a) Beat signal of main polarization component and leakage polarization component. (b) FFT spectrum when the distance between main component and leakage component is longer than FFT spectrum width ΔL . (c) FFT spectrum when the distance between main component and leakage component is shorter than FFT spectrum width ΔL . (d) Distance measured when the measurement fiber interferometer is heated. (e) Distance measured when the reference fiber interferometer is heated.

5.4 シミュレーション解析

5.4.1 距離オフセット誤差の解析

本解析には3章で説明したリサンプリングシミュレーションを用いた。漏れ光の影響を評価するために、従来のリサンプリングモデルに対して、漏れ光同士の干渉の項を追加した。下記式で第2項が該当する。

$$I = A * \cos(2\pi \int f_{beat}(t)dt) + B * \cos(2\pi \int f_{beat2}(t)dt + phase) \quad (5.1)$$

ここで、 I は干渉ビート信号、 A は偏光の主成分の光強度、 f_{beat} は偏光の主成分の干渉ビート周波数、 B は偏光の漏れ光成分の光強度、 f_{beat2} は偏光の漏れ光成分の干渉ビート周波数、 $phase$ は偏光の漏れ光成分の周波数の位相である。ここで B は偏光の主成分に対する漏れ光成分の消光比で決まる。例えば、消光比が20 dB (1/100)であれば、 $B = A/100$ となる。また f_{beat2} は f_{beat} に対して、光ファイバのビート長で決まる光路差分の差が生じる。5.3節で述べたように測定ファイバ干渉ユニットにおいて、2分岐した光路の光ファイバ長さの差が240 mmとすると、ビート長によるslow軸とfast軸の光路差は74 μm となる。距離測定においては、空間片道測定光路は74 $\mu\text{m} \div 2$ (往復)=37 μm となる。よって、対象までの距離を測定した時に得られる周波数 f_{beat} に対して、周波数 f_{beat2} は37 μm 分だけ距離が短くなった時に得られる周波数となる。また $phase$ はファイバの熱による応力変化により、 $-\pi$ から π まで取りうる。

本モデルに基づき、距離測定時の漏れ光の影響を評価した。対象までの距離を0～50 mmまで変化させ、 $phase$ を $-\pi$ から π まで変化させたときの測定値と真値との比較を行う。距離50 mmは ϕ 100 mmリングゲージ測定時に対応する。消光比は別途偏光計で測定した実測値15dBとした。今回用いたファイバ光学素子は消光比20 dBであるが、素子間で一部ファイバコネクタ接続をしており、消光比が低下したと考える。Fig.5.8にシミュレーション結果を示す。Fig.5.8(a)は $phase$ が70 deg時の結果である。グラフ横軸は対象までの距離を示し、縦軸は測定値(シミュレーション解析によって算出された距離)と真値(シミュレーション上の設定距離)との偏差を示す。Phaseが70 degのときを基準として、Fig.5.8(b)は $phase$ が160 deg時の結果を示す。Fig.5.8(a)に対して、測定値と真値との偏差が、対象の距離によらず約-1 μm オフセットしていることが判る。Fig.5.8(c)は $phase$ が340 deg時の結果である。Fig.5.8(a)に対して、測定値と真値との偏差が、対象の距離によらず約+1 μm オフセットしていることが判る。以上の結果より、Fig.5.8(d)で説明したように漏れ光の位相によって距離のオフセット変動が生じることがわかる。さらに $phase$ を $-\pi$ から π まで連続的に変化させた結果をFig.5.9に示す。測定対象までの距離は50 mm(ϕ 100 mmリングゲージ測定距離)とした。グラフ横軸は位相を示し、縦軸は測定値と真値との偏差を示す。解析結果より、漏れ光の位相が変化することで、測定値と真値との偏差が周期的に変動することがわかる。これにより、Fig.5.6の評価結果に周期変動が生じることが説明できる。また周期変動の振幅はFig.5.6では全幅で4～5 μm であった。Fig.5.9のシミュレーション結果において振幅は全幅で2.1 μm であったが、直径測定時はオフセット変動が2倍で効いてくる

ので $4.2\ \mu\text{m}$ となり, おおよそ実測値と一致することがわかる。

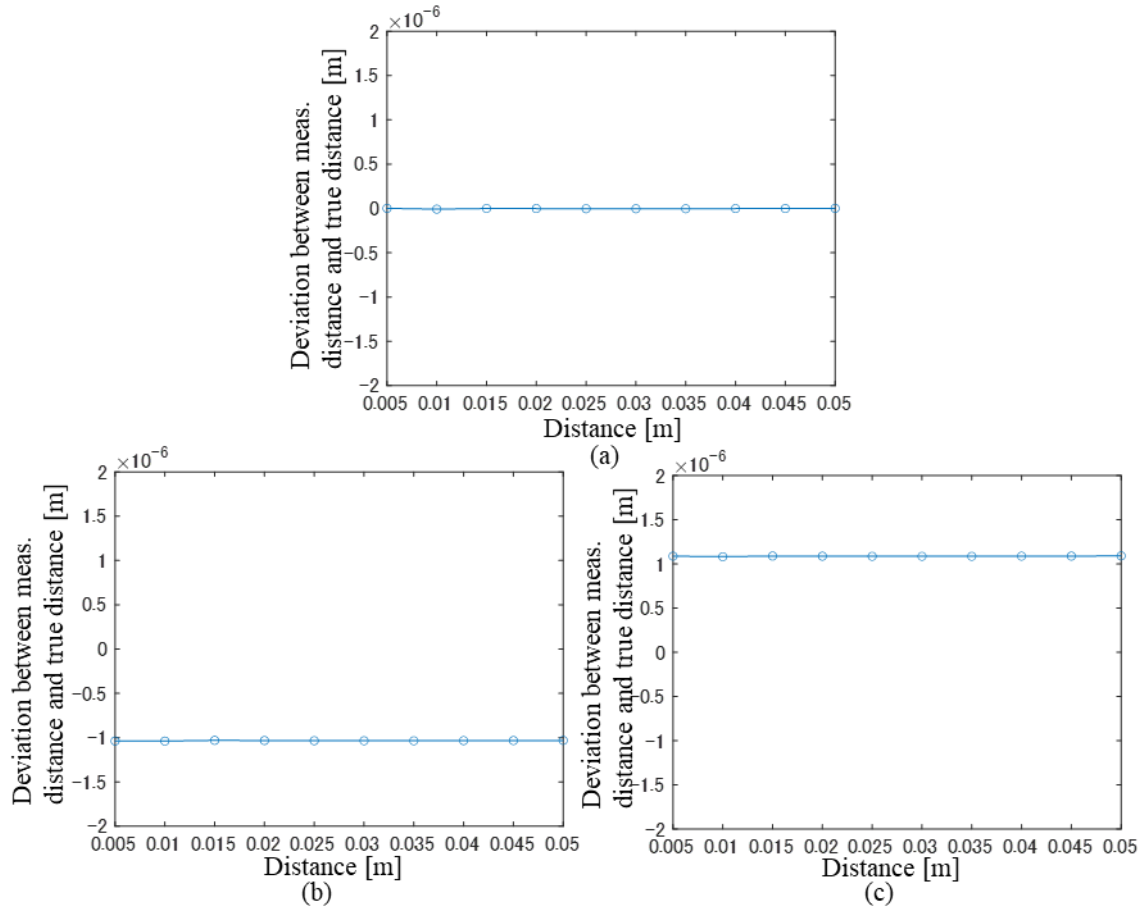


Fig.5.8 Simulation effect of polarization leakage in measurement fiber interferometer. (a) Phase of leakage component is 70 deg. (b) Phase of leakage component is 160 deg. (c) Phase of leakage component is 340 deg.

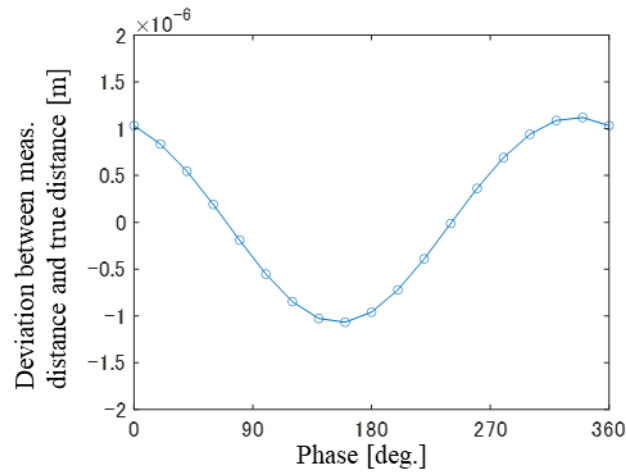


Fig.5.9 Measurement error versus phase of polarization leakage. Target distance is 50 mm.

5.4.2 距離ゲイン誤差の解析

次に参照ファイバ干渉ユニットにおいて、リサンプリングシミュレーションを用いて漏れ光の影響を評価した。5.3 節で述べたように参照ファイバ干渉ユニットにおいて、2 分岐した光路の光ファイバ長さの差が 300 mm とすると、ビート長による slow 軸と fast 軸の光路差は 93 μm となる。よって f_{beat2} は 300 mm に対して、93 μm 距離が短くなった時に得られる周波数となる。また $phase$ はファイバの熱による応力変化により、 $-\pi$ から π まで取りうる。対象までの距離を 0~50 mm まで変化させ、 $phase$ を $-\pi$ から π まで変化させたときの測定値と真値との比較を行う。距離 50 mm は ϕ 100 mm リングゲージ測定時に対応する。消光比は別途偏光計で測定した実測値 14 dB とした。測定ファイバ干渉ユニット同様に、今回用いたファイバ光学素子は消光比 20 dB であるが、素子間で一部ファイバコネクタ接続をしており、消光比が低下したと考える。Fig.5.10 にシミュレーション結果を示す。Fig.5.10 (a)は $phase$ が 60 deg 時の結果である。グラフ横軸は対象までの距離を示し、縦軸は測定値と真値との偏差を示す。 $phase$ が 60deg のときを基準として、Fig.5.10 (b)は $phase$ が 150 deg 時の結果を示す。Fig. 5.10 (a)に対して、測定値と真値との偏差が、対象までの距離に応じて大きくなっていることが判る。つまり距離ゲインが大きくなっている。Fig.5.10 (c)は $phase$ が 330 deg 時の結果である。Fig. 5.10 (a)に対して、測定値と真値との偏差が、対象までの距離に応じて小さくなっていることがわかる。つまり距離ゲインが小さくなっている。以上の結果より、Fig.5.7 (e)で説明したように漏れ光の位相によって距離のゲイン変動が生じることがわかる。さらに $phase$ を $-\pi$ から π まで変化させた結果を Fig.5.11 に示す。測定対象までの距離は 50 mm (ϕ 100 mm リングゲージ測定距離) とした。グラフ横軸は位相を示し、縦軸は測定値と真値との偏差を示す。解析結果より、漏れ光の位相が変化することで、測定値と真値との偏差が周期的に変動することがわかる。Fig.5.11 のシミュレーション結果において振幅は全幅で 0.8 μm 程度となった。直径算出値はこの 2 倍で効いてくるため 1.6 μm 程度の誤差を生じることがわかる。

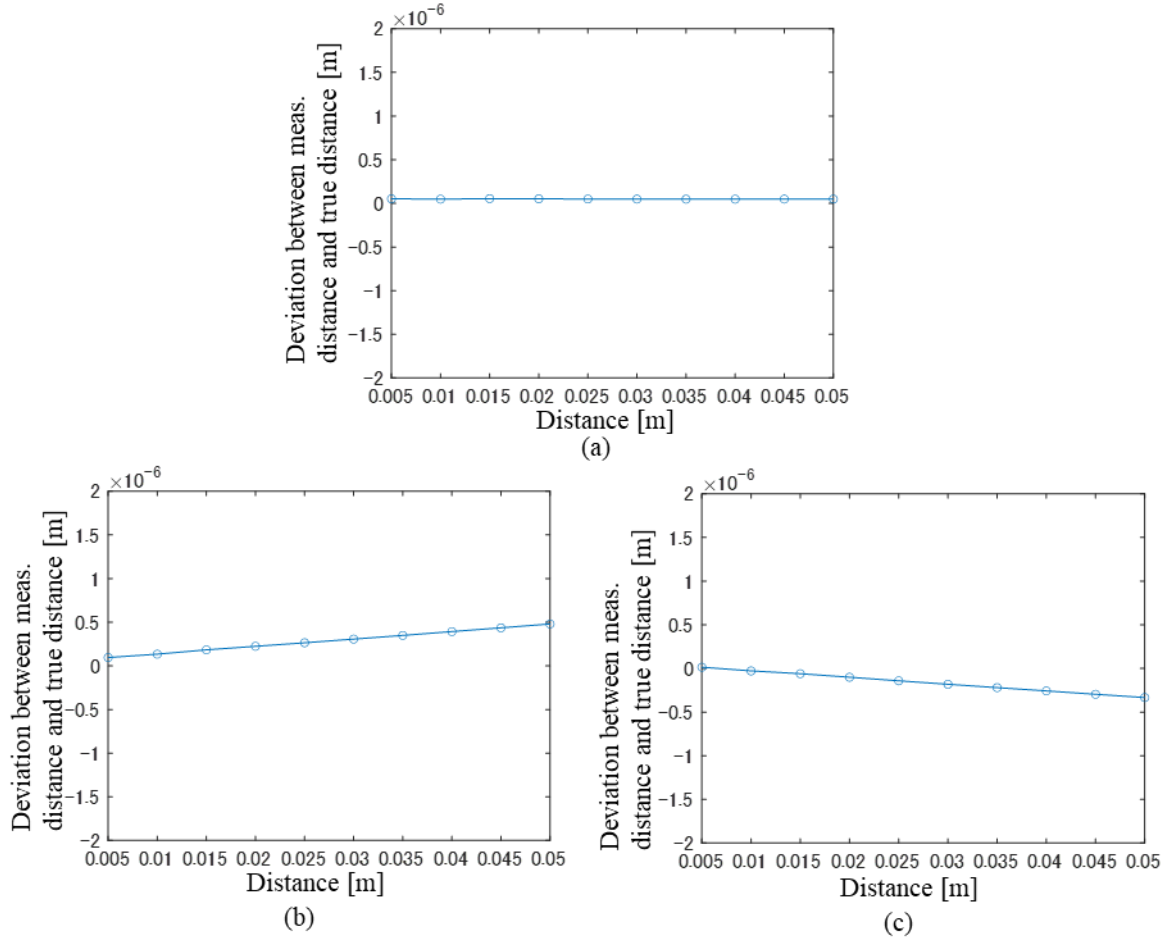


Fig.5.10 Simulation effect of polarization leakage in reference fiber interferometer. (a) Phase of leakage component is 60 deg. (b) Phase of leakage component is 150 deg. (c) Phase of leakage component is 330 deg

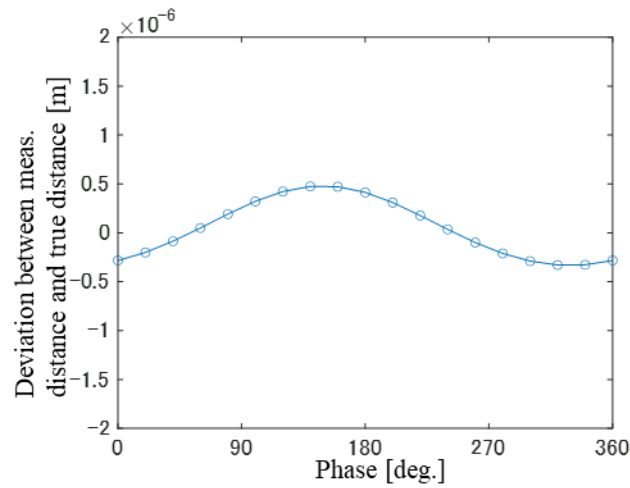


Fig.5.11 Measurement error versus phase of polarization leakage. Target distance is 50 mm.

5.5 偏光特性に基づいた測定誤差低減手法の提案

測定ファイバ干渉ユニットと参照ファイバ干渉ユニットで誤差低減手法が異なるため、それぞれの特性に応じた手法を提案した。まず、測定ファイバ干渉ユニットでは、偏光切替を行うため、slow 軸と fast 軸の両方の偏光を透過させる必要がある。そこで、偏光成分(光ファイバの slow 軸と fast 軸)間に距離差を設けることで、距離測定に対する漏れ光の位相変化の影響を低減する方法を考案した。具体的には、偏光ビームスプリッタを用いて、光を slow 軸と fast 軸に分離し、距離差を設けた後に、偏光ビームコンバイナによって合波する。一方、参照ファイバ干渉ユニットでは、1 つの偏光しか透過させないため、消光比を上げることで漏れ光を低減する手法を適用する。具体的にはポラライザを挿入することで実現可能である。

まず、測定ファイバ干渉ユニットにて、偏光ビームスプリッタ/コンバイナを用いて偏光に応じて距離差を設ける方式において、slow 軸と fast 軸間の偏光の距離差と、それに対応して発生する距離誤差の関係をシミュレーション解析によって求めた。解析結果を Fig.5.12 に示す。本結果は、対象までの距離 50 mm(ϕ 100 mm リングゲージ測定時距離)の結果である。グラフ横軸は偏光に応じた距離差(slow 軸と fast 軸の光路差を 2 で割って、屈折率 1.5 を乗じた空間片道測定光路)を示し、縦軸は漏れ光の位相が 0~360 度変化したときに得られる測定偏差の最大値と最小値の差を示す。

Fig.5.12(a)の距離差が 0.25 mm 地点(A)と、5 mm 地点(B)の FFT 波形をそれぞれ Fig.5.12(b),(c)に示す。Fig.5.12(b)では、Fig.5.7(c)で説明したように偏光の主成分のピークと漏れ光成分のピークが重なっており、1 つのピークとなっている。本結果に対して、漏れ光の位相を 0~360 度変えた時に得られる測定偏差の結果を Fig.5.12(d)に示す。漏れ光の位相変化に伴い測定偏差が $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 程度変化している。一方 Fig.5.12(c)では、偏光の主成分のピークと漏れ光成分のピークが分離している。本結果に対して、漏れ光の位相を 0~360 度変えた時に得られる測定偏差の結果を Fig.5.12(e)に示す。漏れ光の位相が変化しても測定偏差は変化しないことがわかる。本解析結果より、slow 軸と fast 軸の光路差を設けることによって、漏れ光成分の位相変化による測定誤差を低減可能であることを確認した。

次に、参照ファイバ干渉計において、消光比による漏れ光の影響をシミュレーション解析した。解析結果を Fig.5.13 に示す。グラフ横軸は消光比を示し、縦軸は漏れ光の位相が 0~360 度変えた時に得られる測定偏差の最大値と最小値の差を示す。一般的なポラライザの消光比は 25~30 dB 程度であり、消光比 25 dB 以上であれば、測定偏差は $0.1 \mu\text{m}$ 以下に抑えられることがわかった。以上の解析結果に基づき、実験評価を行った。

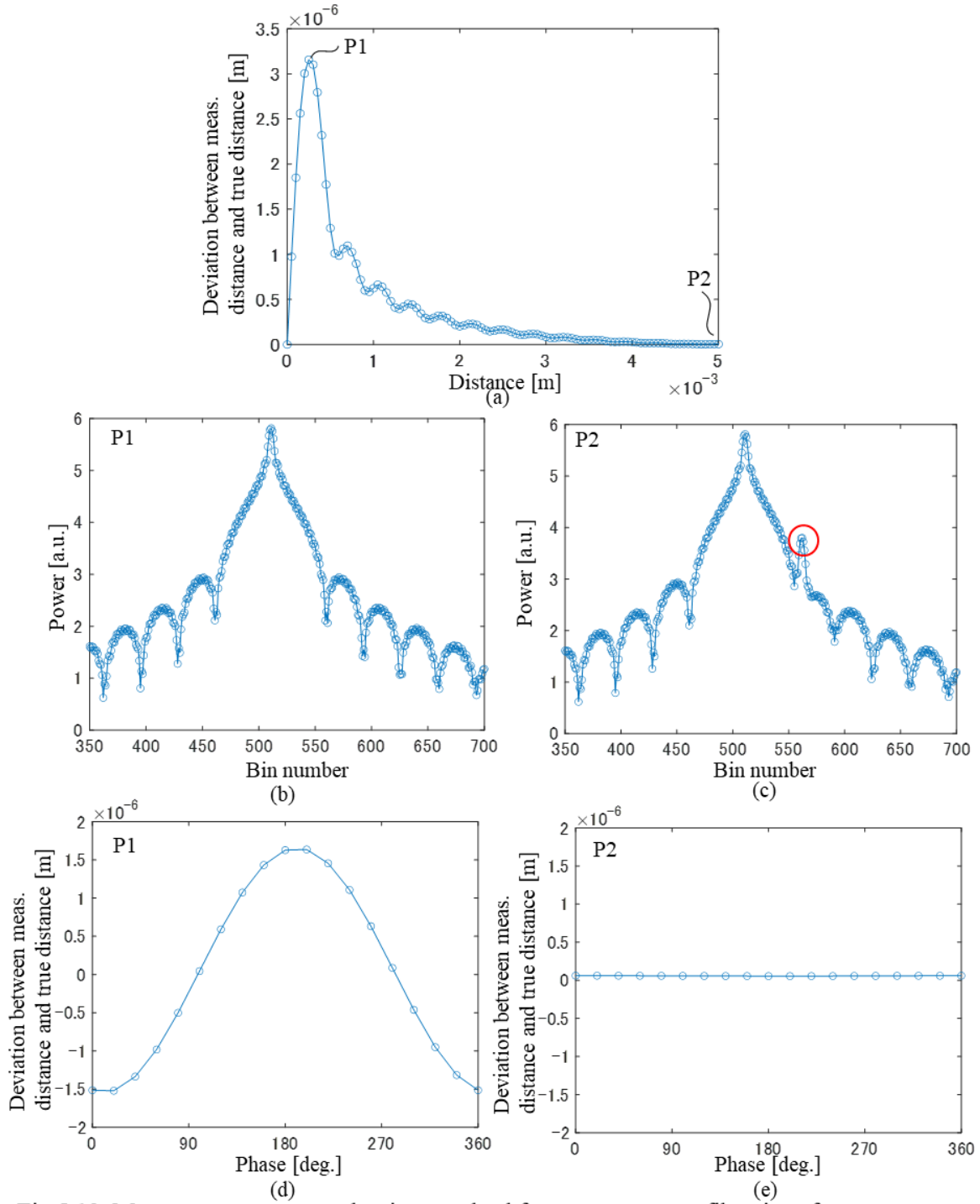


Fig.5.12 Measurement error reduction method for measurement fiber interferometer unit. (a) Measurement error versus distance of polarization leakage. Target distance is 50 mm. (b) FFT spectrum of beat signal when distance between the main component and leakage component is 0.25 mm (A). (c) FFT spectrum of beat signal when distance between the main component and leakage component is 5 mm (B). (d) Measurement error when distance between the main component and leakage component is 0.25 mm (A). (e) Measurement error when distance between the main component and leakage component is 5 mm (B).

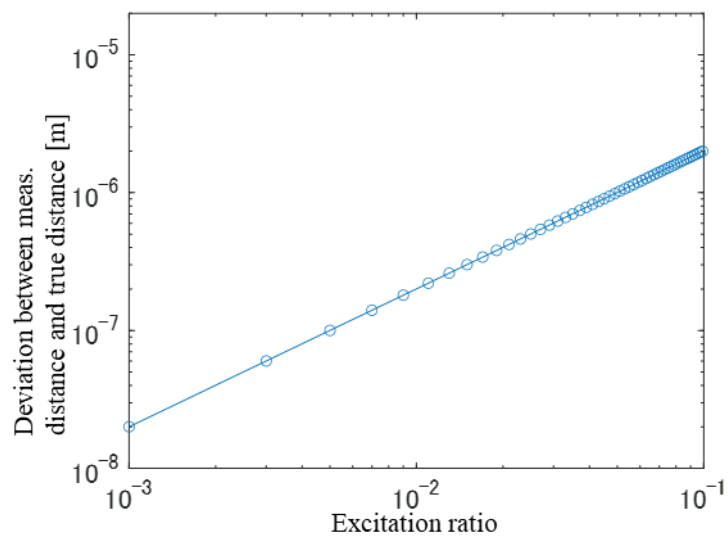


Fig.5.13 Measurement error versus extinction ratio of polarization leakage.

5.6 実験検証

5.6.1 距離オフセット誤差低減手法の評価

測定ファイバ干渉ユニットに対して、偏光ビームスプリッタ/コンバイナを用いて slow 軸と fast 軸間に距離差を設ける方式の実験評価を行った。Fig.5.14 に光学系の構成を示す。サーキュレータとファイバフォーカサ間に偏光ビームスプリッタ/コンバイナを挿入した。評価に用いた偏光ビームスプリッタ/コンバイナは Thorlabs 社の PFC1550A である。消光比は 20 dB である。また slow 軸と fast 軸の光路差は 5.4 節のシミュレーション結果に基づき 10 mm とした。

ここで偏光起因の測定誤差の発生個所について説明する。図中吹き出しに示すように、測定光は PBS(Polarization Beam Splitter)を通過した後に、対象に照射される。装置に用いている PBS の消光比は 30 dB(1:1000)であり、対象照射時に漏れ光の影響は低減される。本装置では、距離のオフセット補正のために PBS 入射面の反射を利用している。PBS 入射面での反射は偏光の漏れ光の影響を受けるため、原点測定データに漏れ光の影響が重畳すると考える。補足として、PBS 出射面を距離原点とする方法も考えられる。しかし、別途実施した評価で、PBS 出射面を距離原点に用いるために、出射面の反射コートの反射率を高めたところ、測定対象との距離が近く、対象の測定結果に影響を与えたため、出射面を距離原点とする方式は採用していない。

偏光ビームスプリッタ/コンバイナ挿入後の評価結果を Fig.5.15 に示す。図中黒点は測定値を示し、青点は熱膨張を加味したリングゲージ直径の理論値を示す。Fig.5.16 は測定値と理論値との偏差を示す。図中、黒点は偏光ビームスプリッタ/コンバイナを挿入する前の結果であり(Fig.5.6 の結果と同一)、青点は挿入後の結果である。偏光ビームスプリッタ/コンバイナを挿入することで、周期変動が大きく減少していることがわかる。本結果より、偏光ビームスプリッタ/コンバイナを用いた方式の有効性を確認した。しかし、温度変化の勾配が大きい箇所(図中 A' 部および C' 部)で依然、2 μ m 程度の周期変動が生じていることが判る。そこで次に参照ファイバ干渉ユニット側の対策を行うこととした。

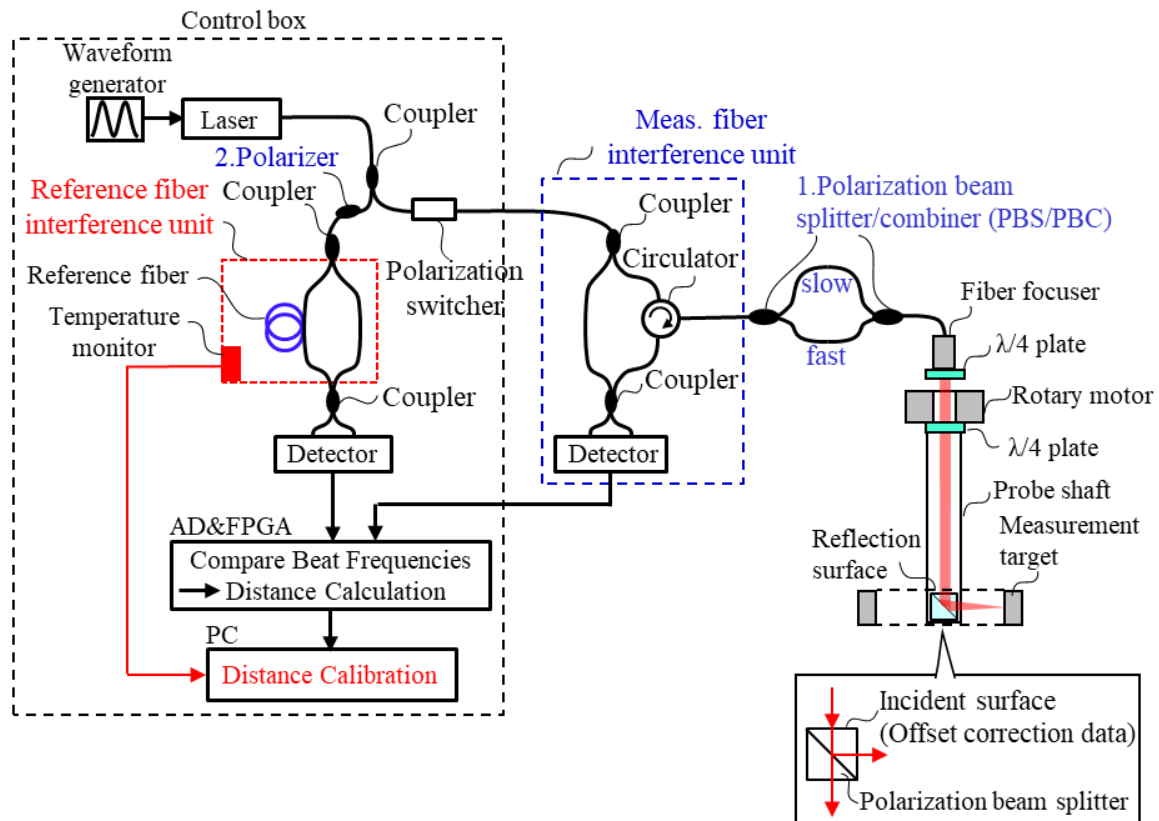


Fig.5.14 Schematic drawing of reducing the polarization leakage in measurement fiber interferometer unit.

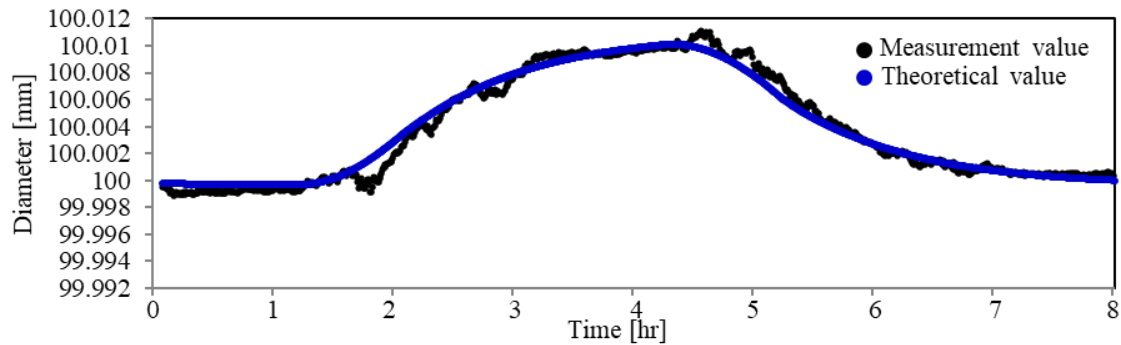


Fig.5.15 Measurement result of $\phi 100$ mm ring gauge diameter after inserting PBS/PBC.

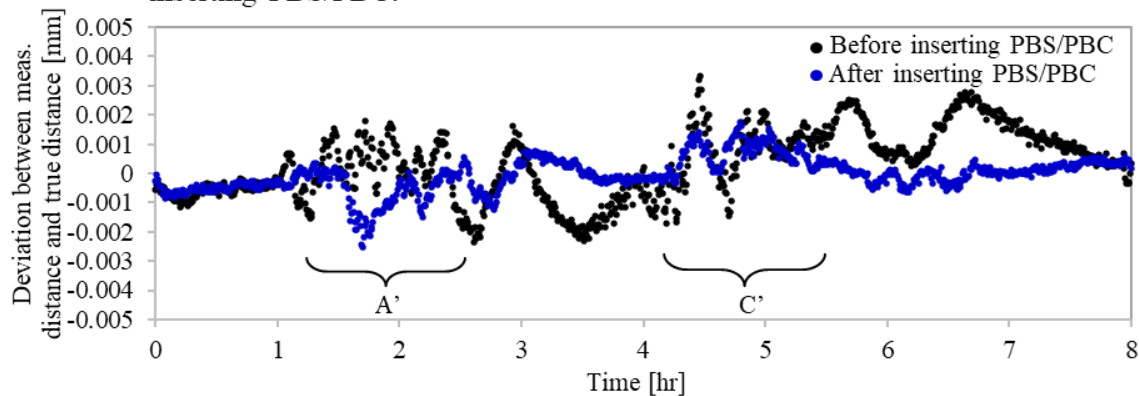


Fig.5.16 Deviation between measured and theoretical values.

5.6.2 距離ゲイン誤差低減手法の評価

参照ファイバ干渉ユニットのカプラの手前にポラライザを挿入することで消光比を高めることとした。用いたポラライザは Thorlabs 社の 1550IP である。消光比は 28 dB である。ポラライザ挿入後の結果を Fig.5.17 に示す。図中黒点は測定値を示し、青点は熱膨張を加味したリングゲージ直径の理論値を示す。Fig.5.18 は測定値と理論値との偏差を示す。図中、黒点はポラライザを挿入する前の結果であり (Fig.5.16 の青点の結果と同一)、青点は挿入後の結果である。ポラライザを挿入することで、温度変動箇所 (図中 A' 部および C' 部) で生じていた $2\text{ }\mu\text{m}$ 程度の変動が $1\text{ }\mu\text{m}$ 程度に減少し、その有効性を確認した。

依然生じている $1\text{ }\mu\text{m}$ 程度の変動成分について考察する。Fig.5.19 は測定ファイバ干渉ユニットの消光比と測定誤差の関係をシミュレーション解析によって求めた結果である。グラフ横軸は消光比を示し、縦軸は漏れ光の位相が $0\sim 360$ 度変えた時に得られる変動の最大値と最小値の差を示す。今回評価に用いた偏光ビームスプリッタ/コンバイナは消光比 20 dB を用いており、その時の測定誤差は約 $0.6\text{ }\mu\text{m}$ となる。距離オフセットは測定値に対して 2 倍で効いてくるので、誤差は $1.2\text{ }\mu\text{m}$ となり、Fig.5.18 の実験で生じた誤差量と同等の結果となることが判る。今回の評価では、目標精度 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$ に対して、誤差は $1.2\text{ }\mu\text{m}$ と小さいが、今後さらに測定精度を向上させる場合は、消光比の高い偏光ビームスプリッタ/コンバイナを用いる必要がある。

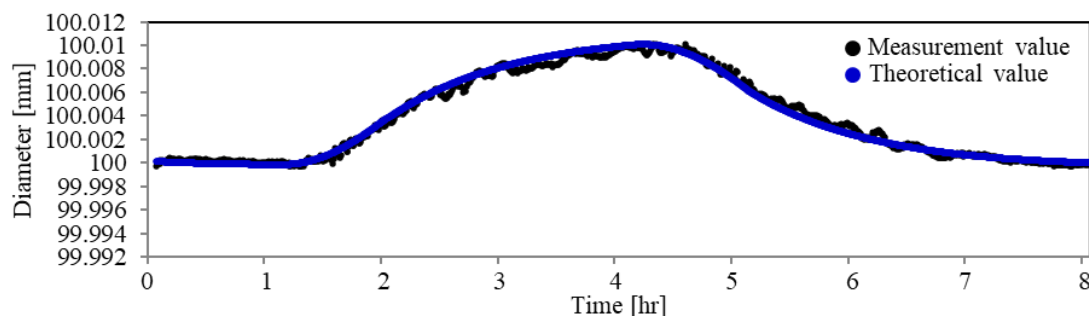


Fig.5.17 Measurement result of $\phi 100$ mm ring gauge diameter after inserting PBS/PBC and polarizer.

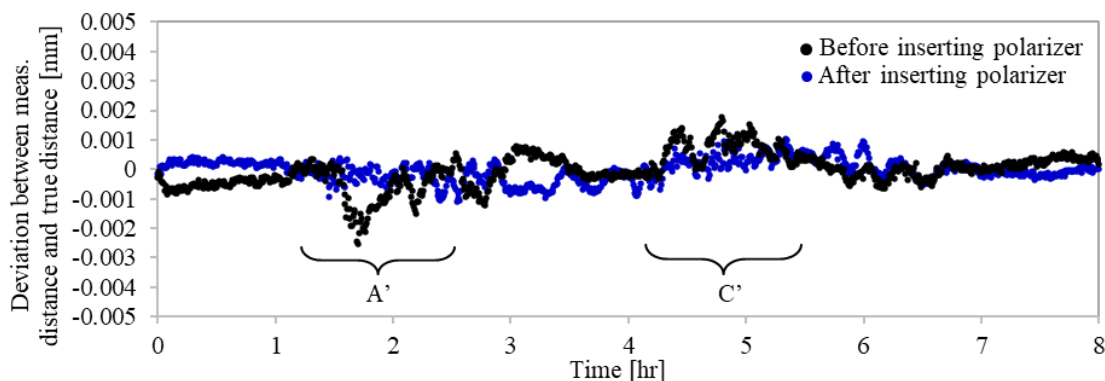


Fig.5.18 Deviation between measured and theoretical values.

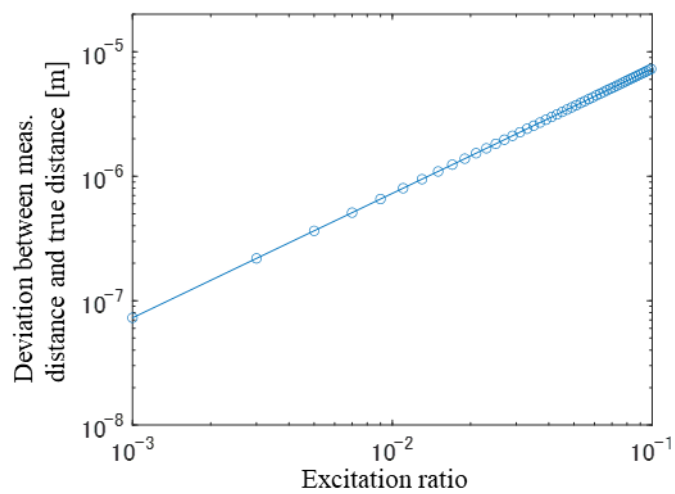


Fig.5.19 Measurement error versus extinction ratio of polarization leakage.

5.7 結言

狭隘部 3 次元形状計測装置の環境ロバスト性の確保に向け，測定精度の背景温度依存性を評価した結果，以下の結論を得た。

(1) 20～30 °C の温度変化の条件下で，温度上昇および下降時に温度変化に伴う測定誤差が 5 μm 程度生じることが判明した。これは目標精度 $\pm 5 \mu\text{m}$ に対して影響のある値である。

(2) 測定誤差の原因は，光ファイバの slow 軸偏光と fast 軸偏光の位相変化であると推測し，偏光の位相状態をモデル化したリサンプリングシミュレーションを行った。解析の結果，FMCW を構成している参照ファイバ干渉ユニットと測定ファイバ干渉ユニットの 2 つの干渉ユニットにおいて，異なる温度特性があることが判明した。光周波数掃引の非線形性を補正する参照ファイバ干渉ユニットでは，偏光の位相変化が距離のゲイン誤差を生じさせることを解明した。一方，測定ファイバ干渉ユニットでは，偏光の位相変化が距離のオフセット誤差を生じさせることを解明した。本解析によって，わずかな消光比の低下が FMCW の距離システムに大きく影響することを明らかにした。

(3) それぞれの干渉ユニットの特性に応じた測定誤差抑制手法を提案した。参照ファイバ干渉ユニットでは，光ファイバの slow 軸偏光のみしか測定に用いないため，fast 軸偏光成分を低減する手法とした。一方，測定ファイバ干渉ユニットに対しては，光ファイバの slow 軸偏光と fast 軸偏光の両方を測定に用いるため，slow 軸偏光と fast 軸偏光間に距離差を設けることで，測定誤差を低減する手法とした。

(4) 提案手法を開発装置に実装して実験評価を行った。評価の結果，測定誤差を 5 μm から 1 μm 程度まで低減し(目標精度 $\pm 5 \mu\text{m}$)，提案手法の有効性を確認するとともに，装置のロバスト性を向上した。

第6章 粗面・傾斜面に対するロバスト性評価と誤差低減手法の提案

6.1 緒言	71
6.2 粗面・傾斜面測定 of 課題	72
6.3 スペックル起因の測定誤差の発生メカニズムの解明	74
6.4 FMCW の検出波形の特徴量に基づく測定誤差低減法の提案	76
6.5 誤差低減手法の基礎実験評価	78
6.6 提案手法の表面性状に対してのロバスト性評価	83
6.6.1 様々な表面粗さ，傾斜角度での評価	83
6.6.2 形状測定精度の評価	83
6.7 提案手法の狭隘部 3 次元形状装置への適用	87
6.8 結言	90

6.1 緒言

本章では FMCW 法に基づく狭隘部 3 次元形状計測装置の粗面・傾斜面に対するロバスト性評価について説明する。6.2 節にて粗面・傾斜面測定時の課題について説明する。6.3 節にて粗面・傾斜面測定時の誤差発生メカニズムについて説明する。6.4 節にて提案する誤差低減手法について説明する。6.5 節にて誤差低減手法の基礎実験評価について説明する。6.6 節にて誤差低減手法の表面性状に対するロバスト性評価について説明する。6.7 節にて狭隘部 3 次元形状計測装置への提案手法の適用結果について説明する。

6.2 粗面・傾斜面測定の課題

開発した狭隘部3次元形状計測装置は、Fig.6.1 (a)に示すように、主にプローブまでの距離(L)が一定の単純な円筒形状の計測に用いられるが、ボールねじやインペラのよう複雑な内部形状を測定する場合もある。Fig.6.1 (b)は、ボールねじのような複雑な形状で、溝の位置でプローブに対して傾斜面を持つ例である。本章では、測定対象を単純な円筒形状の部品から、複数の方向の傾斜面を持つ複雑形状部品に拡張するために、測定誤差の発生メカニズムを明らかにし、測定誤差の低減手法を提案したので、その内容について説明する。また複雑形状部品の仕様は、ニーズ調査結果に基づき、表面粗さ R_z が $3.2 \sim 6.4 \mu\text{m}$ 、測定レーザ照射角が $0 \sim 40$ 度、必要測定精度が $\pm 20 \mu\text{m}$ とした。ここで、照射角とは、表面法線とレーザ光のなす角度と定義する。

傾斜面測定時のモデルを Fig.6.2 に示す[Hariyama 2021]。測定光強度はガウス分布を形成する。Fig.6.2 (a)は理想的な拡散反射面のモデルである。表面から光が一様に散乱する場合、FMCW のスペクトル波形は図のように奥行き方向の距離に対してガウシアン分布を保ち、2章の Fig.2.1 (d)で示した FMCW の距離分解能で決まる FFT スペクトル分布との畳み込みから決まる分布となる。この場合、スペクトルは測定中心に対して対称であるため、スペクトルのピーク位置から正確に距離を算出することができる。しかし、実対象は機械加工面であり、粗さを有する。Fig.6.2 (b)は粗面を測定した場合のモデルである。レーザで粗面を測定した場合、スペックルが発生する。スペックルとは光の干渉現象であり、部分的に光の位相がそろった場合は反射強度が強くなり、位相がずれた場合は反射強度が弱くなる。スペックルが発生すると反射光強度が一様ではなくなるため、FMCW のスペクトル波形が Fig.6.2(b)のように歪む。この場合は、測定中心とピーク中心にずれ量 ΔL が生じ、測定誤差となる。スペックルを含む検出信号は、次式で表される[Baumann 2014]。

$$P(t) \sim \sum_i \exp[-((x_i - x_0) + (y_i - y_0))/(2\omega_0^2)] \times \exp[j4\pi c^{-1}z_i(v_0 + (\Delta v/T)t)] \quad (6.1)$$

$$T < t < T$$

ここで、 (x_i, y_i, z_i) は入射ビーム内における光の対象からの各散乱位置を示す。 (x_0, y_0) はビームの中心、 w_0 はビーム半径、 v_0 はレーザのキャリア周波数、 t は時間である。第1項のガウス係数は、対象への入射電界と参照光の電場との重なりで形成される。第2項の指数関数は、参照光の電場に対する対象からの反射光の電場の位相である。検出された信号は、各散乱位置からの総和となる。この和は z_i 、つまりターゲットの表面状態(粗さ)に依存し、一意に決定されることはない。よって、FMCW のスペクトルピークの歪み(Fig.6.2 (b))は統計的に決定する。

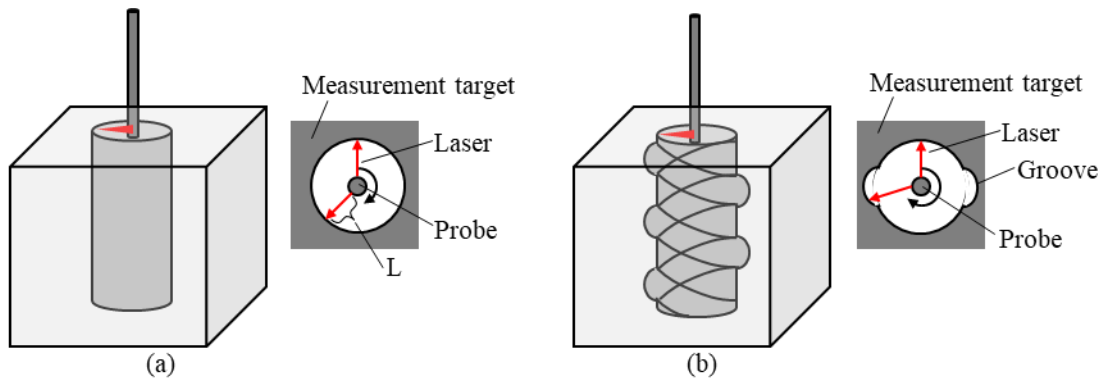


Fig. 6.1 Schematic of target shape:
(a) simple cylindrical shape, (b) complex shape.

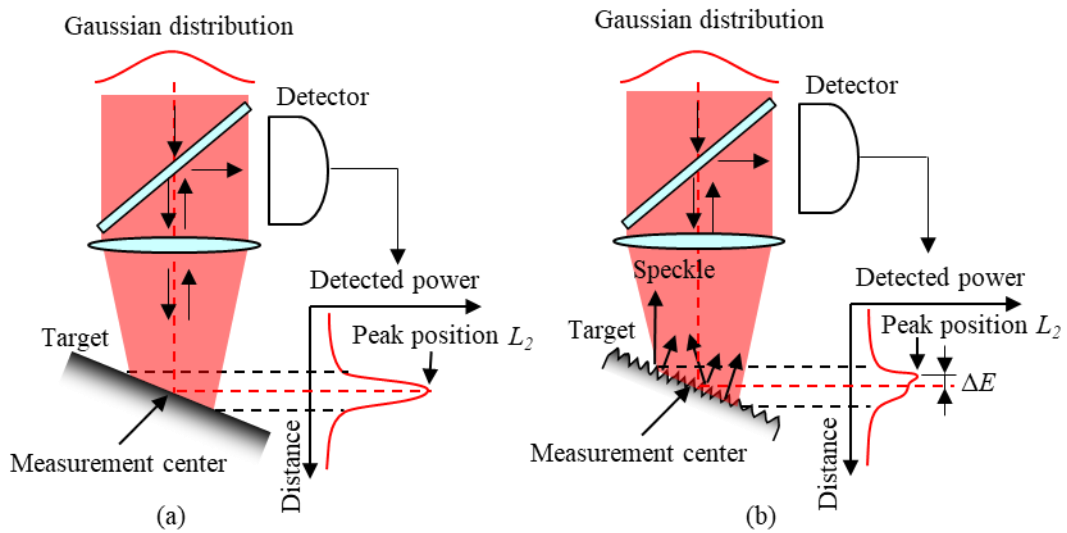


Fig. 6.2 Measurement error when measuring tilted target:
(a) ideal diffused reflection surface, (b) rough surface.

6.3 スペックル起因の測定誤差の発生メカニズムの解明

スペックルによる測定誤差の発生メカニズムを明らかにするため、実験データの解析を行った（実験設定については6.5節にて説明）。Fig.6.3は表面粗さ $Rz6.4\ \mu\text{m}$ の平面が30度傾斜した状態で、ビーム走査した際に得られる測定結果を示す。横軸はビーム走査位置を示し、縦軸は対象までの距離を示す。Fig.6.3(a)は照射ビーム径 $250\ \mu\text{m}$ の場合であり、Fig.6.3(b)は照射ビーム径 $120\ \mu\text{m}$ の場合である。Fig.6.3(a)の測定結果から、平面を測定しているにもかかわらず、測定結果が階段状になっていることがわかる。階段の幅は場所によって異なるが、 $200\sim 300\ \mu\text{m}$ 程度であり、段差は $60\sim 70\ \mu\text{m}$ 程度であり、表面粗さ $Rz6.4\ \mu\text{m}$ よりもはるかに大きい。また Fig.6.3(b)のビーム径が小さい場合は、階段の幅は場所によって異なるが、 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ 程度であり、段差は $30\sim 40\ \mu\text{m}$ 程度であり、Fig.6.3(a)と比較して階段幅、段差ともに小さくなっていることがわかる。

以上の結果に基づき推定した測定誤差モデルを Fig.6.4 に示す。傾斜面をビーム走査して測定する場合、ビーム照射領域で、強度が最も強くなるスペックル位置と測定中心に偏差がある場合、位置 P_a や P_c のように検出波形が歪み、測定誤差が発生する。またガウス分布を持つビーム中心から外れた位置でスペックル強度が強くなるため、検出強度も低下する。ビームを走査し、強度が最も強くなるスペックル位置と測定中心が一致した場合、 P_b 位置のように検出波形が対称になり、測定誤差が生じない。また、ビーム中心でスペックルが発生するため、検出パワーは増加する。

上記のモデルから、階段状誤差の幅と高さはビーム径と照射角度に依存することがわかる。スペックルが発生する位置は統計的に決まるため、測定位置によって必ずしも同じ値とはならないが、階段状誤差の幅はビーム径と同程度以下となり、段差の最大値はビーム径 D と傾斜角度 θ から $\pm D/2 \cdot \tan\theta$ 程度となる。これは Fig.6.3 の結果とよく一致する。

FMCW 測定において、スペックル起因の誤差に関しては先行研究[Baumann 2014]にて報告があるが、傾斜面測定時に生じる誤差までは言及しておらず、傾斜面測定時の誤差発生メカニズムを解明したのは、本研究が初となる。

スペックル誤差はビーム径に依存するため、ビーム径を絞ることで誤差を低減することが可能である。しかし、ビーム径を絞ると、焦点深度は浅くなるため、対象にビームを集光する必要がある。一般的に、対象にビームを集光する方法は2つある。一つは、各測定位置に応じてフォーカス位置を変える方法であり、もう一つは、焦点深度を深くする方法である。本研究では、測定時間や空間分解能を考慮して後者の方法を選択し、焦点深度を深くすることで、広範囲の測定を実現することとした。本研究では、数十ミリメートルの焦点深度を取得するために、ビーム径 $250\ \mu\text{m}$ を使用している。そのため、高精度な計測を行うためには、階段状の誤差を低減する技術が必要となる。

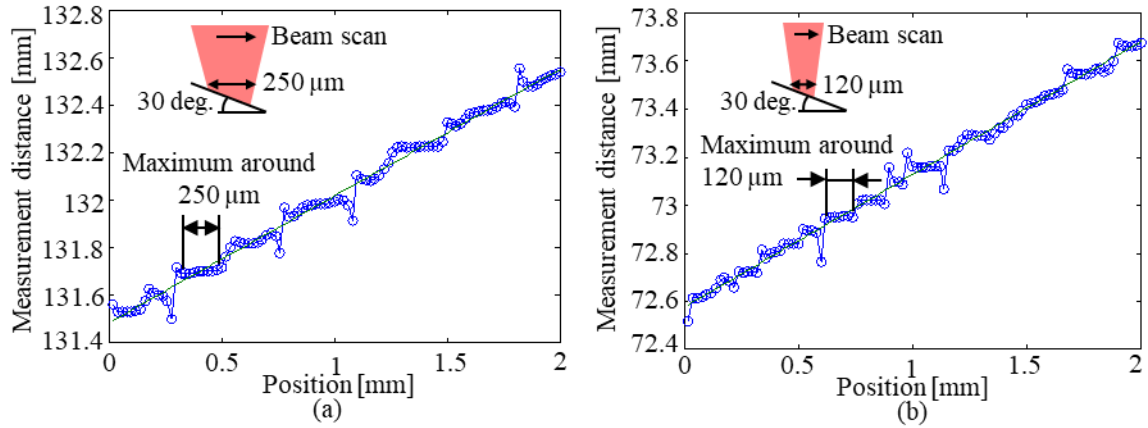


Fig. 6.3 Measurement error when tilted rough surface is measured with a scanning laser. Surface roughness is $R_z 6.4 \mu\text{m}$ and irradiation angle is around 30 deg. :
(a) beam diameter is $250 \mu\text{m}$, (b) beam diameter is $120 \mu\text{m}$.

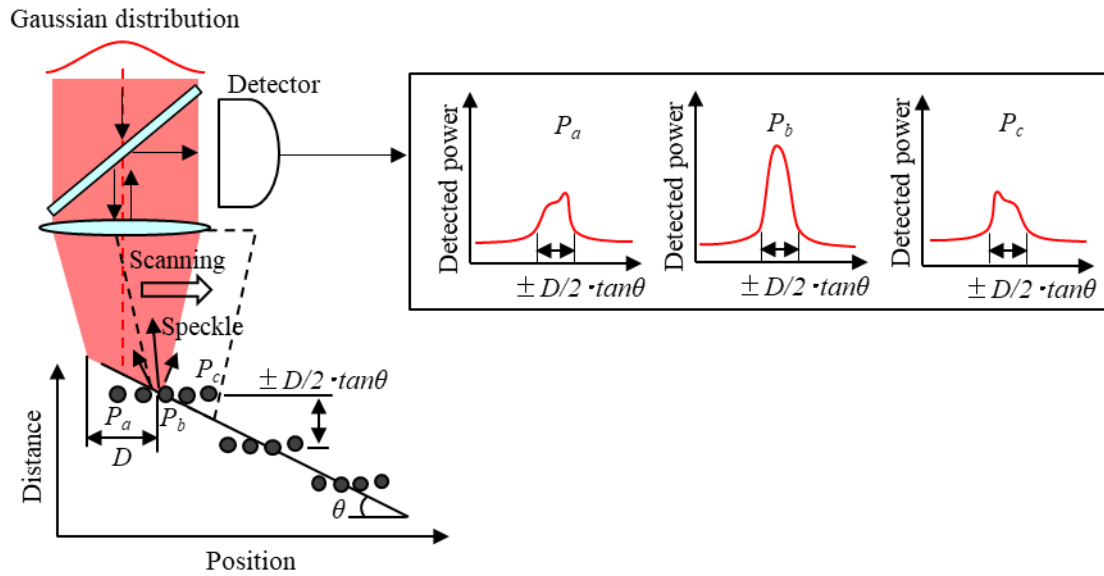


Fig. 6.4 Error model of measuring tilted rough surface with scanning laser

6.4 FMCW の検出波形の特徴量に基づく測定誤差低減法の提案

6.3 節で説明した測定誤差モデルに基づき、2 つの誤差低減技術を提案する。一つは、検出された波形歪みから測定誤差を補正する方式であり、もう一つは、検出された信号強度から測定誤差を補正する方式である。

まず、検出された波形歪みから測定誤差を補正する方式について説明する。Fig.6.5 は FMCW ビート信号の FFT スペクトルである。横軸は距離、縦軸は検出強度である。 x_i は FFT の各ビン、 p_i は位置 x_i の検出強度で、 i は 1 からデータ数 n までの値をとる。検出波形に歪みがある場合、検出ピーク位置 x_p は重心と一致しない。Fig.6.5 に示す特徴量 S から位置ずれ量を算出し、測定値から αS を減算することで補正測定結果を算出する (α は定数値)。特徴量 S は以下のように算出される。

$$S = \sum_{i=1}^n (x_i - x_p) p_i / \sum_{i=1}^n p_i \quad (6.2)$$

次に、検出された強度から測定誤差を補正する技術について説明する。この手法を局所最大強度法と定義した。Fig.6.6 は、測定距離と検出強度の関係を示したものである。Fig.6.6 (a) の上図において、横軸はビーム位置、縦軸は測定距離である。Fig.6.6 (a) の下図は、検出強度と測定距離の対応関係を示す。Fig.6.4 の誤差モデルで説明したように、スペックルの最大強度位置とビーム中心位置がずれると、測定誤差が生じ、検出強度が小さくなる。一致する場合は、測定誤差は生じず、検出強度は高い。検出強度の連続性から局所最大強度位置を算出し、その位置に対応する測定距離を抽出する。しかし、測定点が離散的であるため、Fig.6.6(b) に示すように、ピーク強度位置 L_2 が局所最大強度位置 L_{peak} と一致しない場合がある。 L_{peak} は、位置 L_2 、強度 p_2 、後方位置の強度 p_1 、前方位置の強度 p_3 を用いて、以下の式から算出される。

$$L_{peak} = L_2 + \frac{p_1 - p_3}{2(p_1 - 2p_2 + p_3)} \quad (6.3)$$

測定距離 D_2 、 D_1 、すなわち L_{peak} に対応する前後位置の測定距離を用いた線形補間から、 L_{peak} に対応する補正測定距離を算出する。

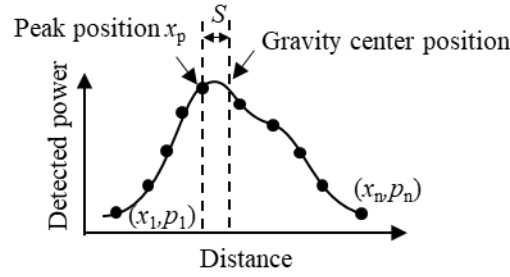


Fig. 6.5 Feature value S calculated using the deviation between peak position and gravity center position.

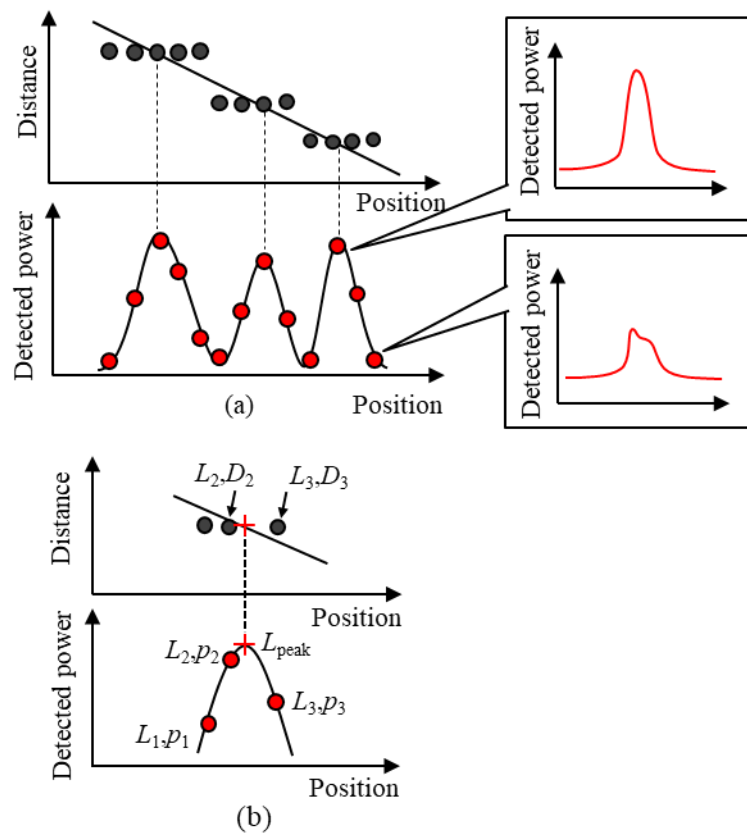


Fig. 6.6 Reliable points selected using local-maximum-power-based technique: (a) graph of all selected points, (b) enlarged view at a local maximum power position.

6.5 誤差低減手法の基礎実験評価

提案技術を評価するための基礎実験の構成を Fig.6.7, Fig.6.8 に示す。基礎実験では、表面粗さ起因の誤差のみを純粹に評価するために、狹隘部 3 次元形状計測装置は用いずに、構成がシンプルな距離計測基本光学系で評価を行った。Fig.6.7 は光学系構成を示す。3 章で説明した構成と同様の構成である。傾斜面の評価構成を Fig.6.8 に示す。ファイバフォーカサから射出した光を測定対象に照射する。計測対象は標準粗さ片とする。1 軸ステージを走査して、角度 θ 傾斜した測定対象面を測定する。1 軸ステージはシグマ SGSP20-35 で、位置決め精度は $5\text{ }\mu\text{m}$ である。

Rz $6.4\text{ }\mu\text{m}$ 、照射角が 30 度のときの測定結果は既に Fig.6.3(a) に示した。6.3 節で説明したように、階段状の誤差が発生している。Fig.6.9 の青点は、Fig.6.3(a) の測定距離からフィッティング直線を差し引いた測定結果を示す。階段状の誤差の周期はビーム径 $D\text{ }250\text{ }\mu\text{m}$ とほぼ一致しており、測定誤差は $63\text{ }\mu\text{m}$ (2σ) と、ビーム径 D と照射角 θ から推定される測定誤差 $\pm 250\text{ }\mu\text{m} / 2 \times \tan(30\text{ deg}) = 72\text{ }\mu\text{m}$ に近い値になっている。式(6.2)を用いて特徴量 S を算出し、Fig.6.9 に赤点としてプロットした。測定誤差と比較すると、形状偏差の大きい位置で S が大きいことがわかる。Fig.6.10 に、測定結果から S を引いて誤差を補正した結果を示す。補正の結果、形状偏差の大きい位置での測定誤差は減少した。しかし測定誤差は依然として大きく、その誤差量は $51\text{ }\mu\text{m}$ (2σ) であった。

これは、誤差の補正が十分でないためと考える。Fig.6.9 に示すように、形状偏差が大きい位置では S は大きい、完全には一致していない。Fig.6.9 の 1, 3, 5 の位置の FFT 波形をプロットしたのが Fig.6.11 である。横軸は FFT のビン番号、縦軸は検出強度である。位置 5 は測定誤差が小さい位置であり、検出波形は対称である。1 と 3 は 5 と比較して、測定誤差が大きい位置であるが、5 と同様な対称波形になっている。つまり測定誤差が波形に表れてない。

波形歪みが検出波形に表れなかった理由を Fig.6.12 に示す。スペックル発生位置とビーム照射位置の関係から、A, B, C と波形が歪んでいるが、FMCW 方式では、2 章の式 (3) で表される距離分解能を有するため、スペクトル形状は距離分解能が畳み込まれる。今回の実験では、距離分解能は約 $360\text{ }\mu\text{m}$ であった。その結果、検出波形は A', B', C' とぼやけてしまい、波形歪みの特徴量が失われたと推測する。今回評価に用いた光源では距離分解能が約 $360\text{ }\mu\text{m}$ であったが、より距離分解能の高い光源を用いることで、検出波形歪みに基づく本提案手法が有効である可能性がある。

次に、局所最大強度法による誤差低減を評価した。補正結果を Fig.6.13 に示す。Fig.6.13(a) は形状偏差と検出強度の両方をプロットした結果である。Fig.6.13(a) の青点線は、局所最大強度位置に対応する測定位置である。Fig.6.13(b) は、測定位置を 0 から 0.2 mm まで拡大したグラフである。式(6.3)を用いて局所最大強度に応じた測定位置を算出し、測定位置に応じた測定距離を線形補正して算出している。補正後、形状偏差は 0 mm 近傍まで減少している。Fig.6.13(c) は局所最大強度に応じた測定距離の総和をプロットしたものである。形状偏差が大幅に減少し、測定誤差は $6\text{ }\mu\text{m}$ (2σ) となった。補正の効果を表 6.1 に示す。 30 度傾いた粗面の測定条件では、補正しない場合は、測定誤差は $63\text{ }\mu\text{m}$ であった。また、波形歪みの特徴量 S から補正する手法では測定誤差

は $51\ \mu\text{m}$ となり，局所最大強度による補正では測定誤差は $6\ \mu\text{m}$ となった。これらの結果から，本研究では，局所最大強度法を採用することにした。

考察として，提案手法を一般的な平滑化手法と比較する。平滑化手法は，すべてのデータを用いて計算を行うため，測定誤差の大きい位置で大きな誤差を含んでしまう。一方，提案手法では，測定誤差の小さいデータのみを選択するため，平滑化手法よりも誤差が少ない結果を得ることができる。

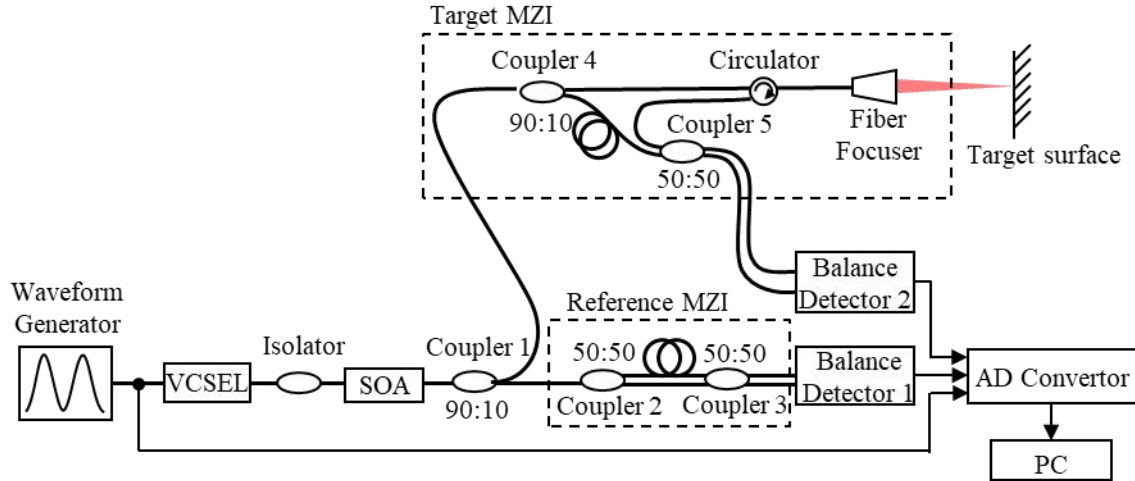


Fig. 6.7 Experimental setup.

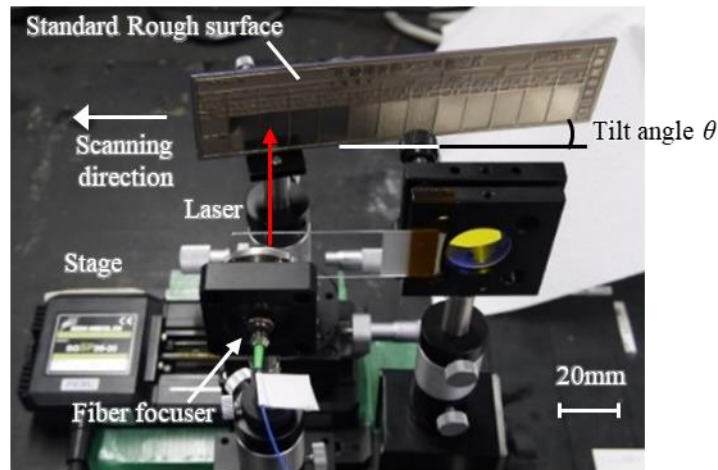


Fig. 6.8 Measurement setup for the tilted rough surface.

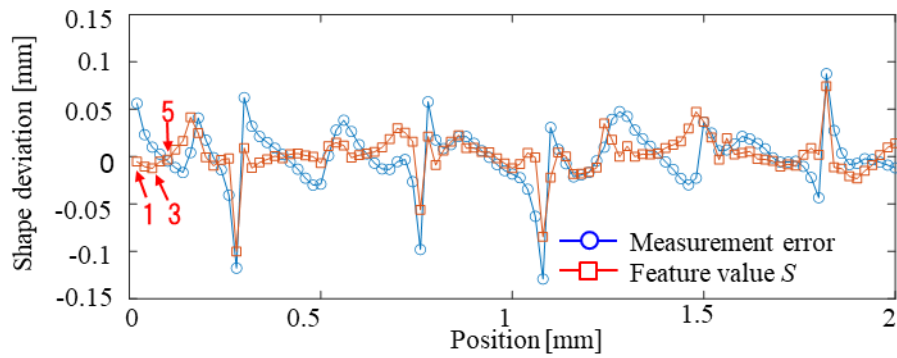


Fig. 6.9 Measurement results of tilted rough surface. R_z was $6.4\ \mu\text{m}$ and irradiation angle was $30\ \text{deg}$. Shape deviation removed fitting curve from Fig. 6.3(a).

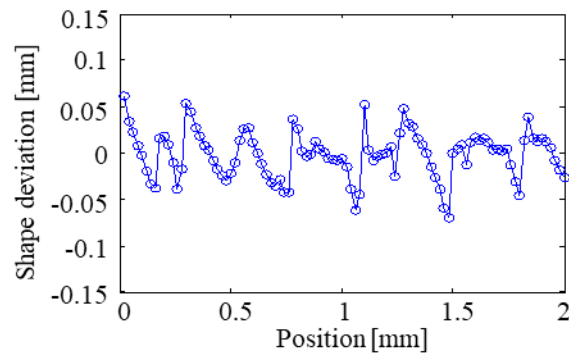
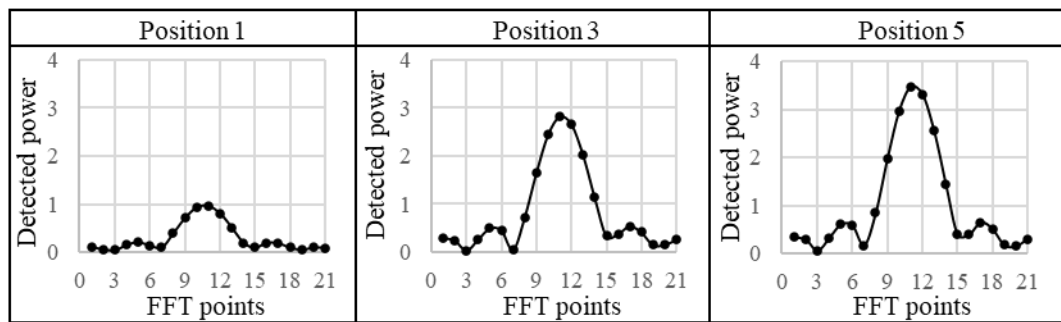


Fig. 6.10 Corrected results using S .



(b)

Fig. 6.11 Beat distribution of positions 1, 3, and 5 in Fig.6.9

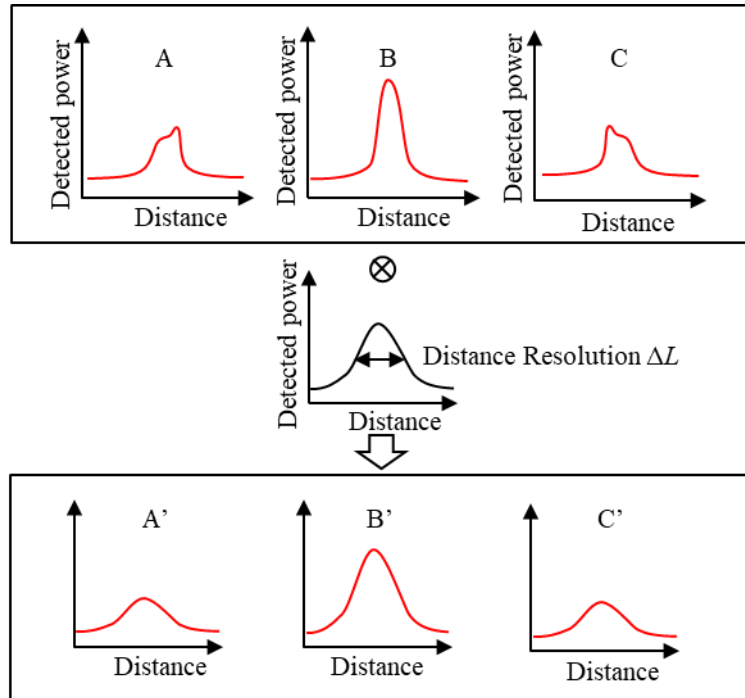


Fig. 6.12 Beat distribution convoluted by distance resolution.

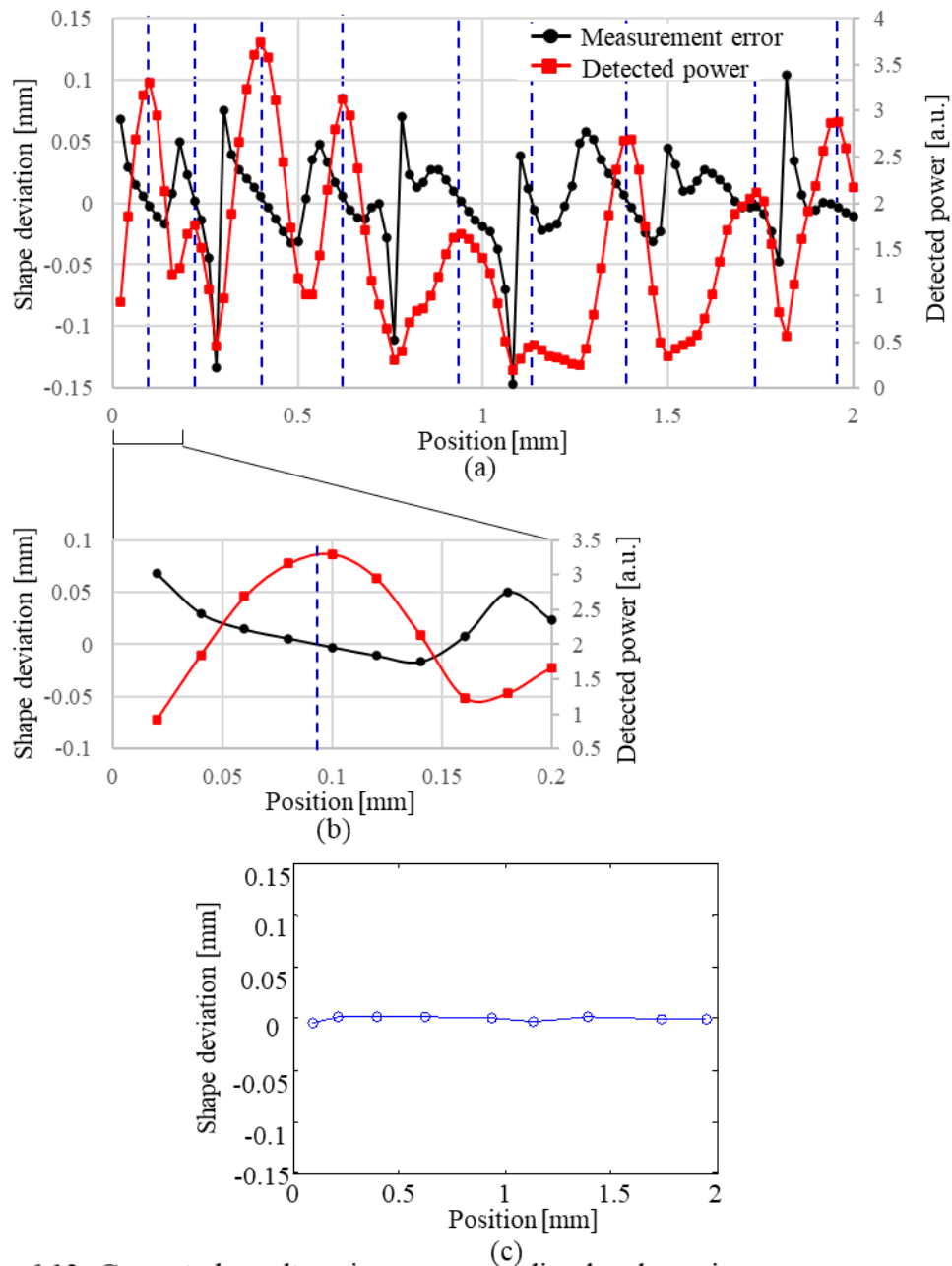


Fig. 6.13 Corrected results using corresponding local maximum power: (a) all data of shape deviation and detected power, (b) enlarged graph of position from 0 to 0.2 mm, (c) Corrected results of total local maximum power.

Table 6.1 Corrected result of both proposed techniques

	Measurement error (2σ) [μm]
Original data	63
Corrected result by using feature value S	51
Corrected result by using local maximum power	6

6.6 提案手法の表面性状に対してのロバスト性評価

6.6.1 様々な表面粗さ，傾斜角度での評価

局所最大強度法のロバスト性を評価するために表面粗さと照射角度を変えた評価を行った。評価の模式図を Fig.6.14 に示す。Fig.6.14 (a)は加工方向に直交する方向に角度 θ を変えた図を示し，Fig.6.14 (b)は加工方向に平行な方向に角度 θ を変えた図を示す。

Fig.6.15 は，加工方向に直交する方向に角度 θ を変化させた場合の評価結果を示す。Fig.6.15(a)~(d)は， R_z が 1.6, 3.2, 6.4, 12.5 μm の測定結果である。横軸は θ ，縦軸は測定結果からフィッティング直線を差し引いた測定誤差のばらつき (2σ) を示す。赤のプロットは補正前，青のプロットは局所最大強度法による補正後の測定結果を示す。 θ が大きいほど補正前の測定誤差は大きくなり，最大で 80 μm 近い測定誤差が発生している。これは，3 章で説明したように，測定誤差が θ に比例するためである。一方，補正後の測定誤差は， R_z , θ を変えたいずれの結果においても測定誤差は低減しており，測定誤差は複雑形状に対する要求精度 20 μm 以下となることを確認した。

Fig.6.16 は，加工方向に平行な方向に角度 θ を変化させた場合の評価結果を示す。Fig.6.16 (a)~(d) は R_z が 1.6, 3.2, 6.4, 12.5 μm の測定結果である。補正後の測定誤差はすべての R_z と θ で減少しており，測定誤差が 20 μm 以下となることを確認した。

次に，本実験の測定誤差について考察する。測定対象として標準粗さ片を使用しており，その測定偏差 (2σ) は粗さのピークで定義される R_z の 1/2 程度である。したがって， R_z 0.8, R_z 3.2, R_z 6.4, R_z 12.5 μm の測定偏差 (2σ) はそれぞれ，0.4 μm , 1.6 μm , 3.2 μm , 6.3 μm 程度となる。また本評価では，1 軸ステージを使用しており，その位置決め精度は 5 μm である。実験結果より，照射角が 0 度の場合，測定誤差は 10 μm 以下であり，粗さ起因の測定偏差とステージの位置決め誤差と同程度の誤差である。しかし，照射角が 10 度を超えると，測定誤差は粗さ誤差やステージの位置決め誤差よりもはるかに大きい。したがって，スペckルに起因する測定誤差は，傾斜面測定において支配的な誤差であり，本提案手法により，その誤差を効果的に低減することができる。

6.6.2 形状測定精度の評価

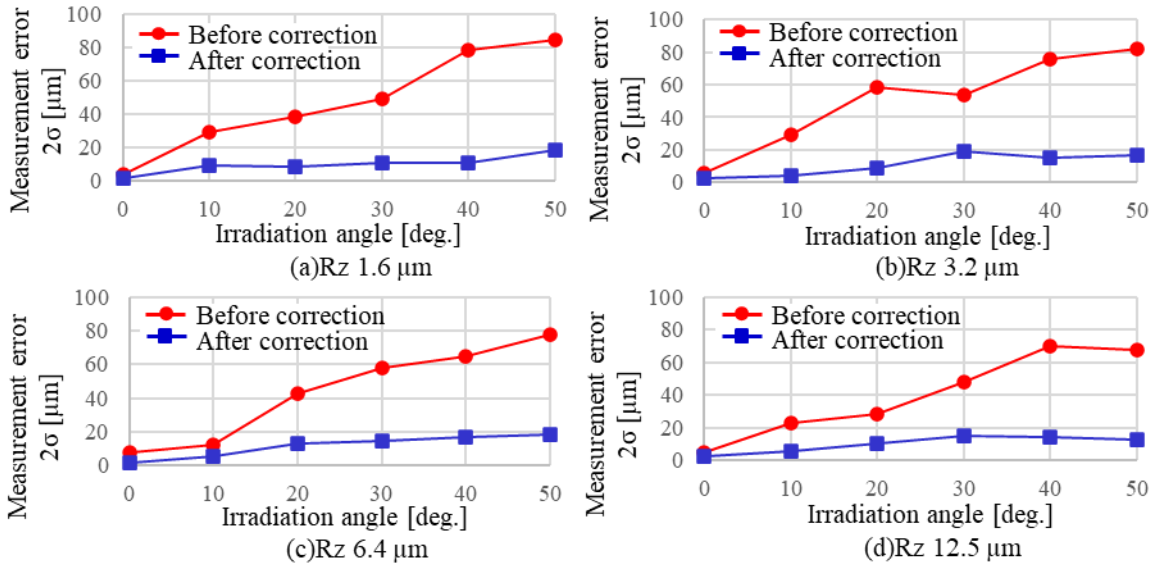
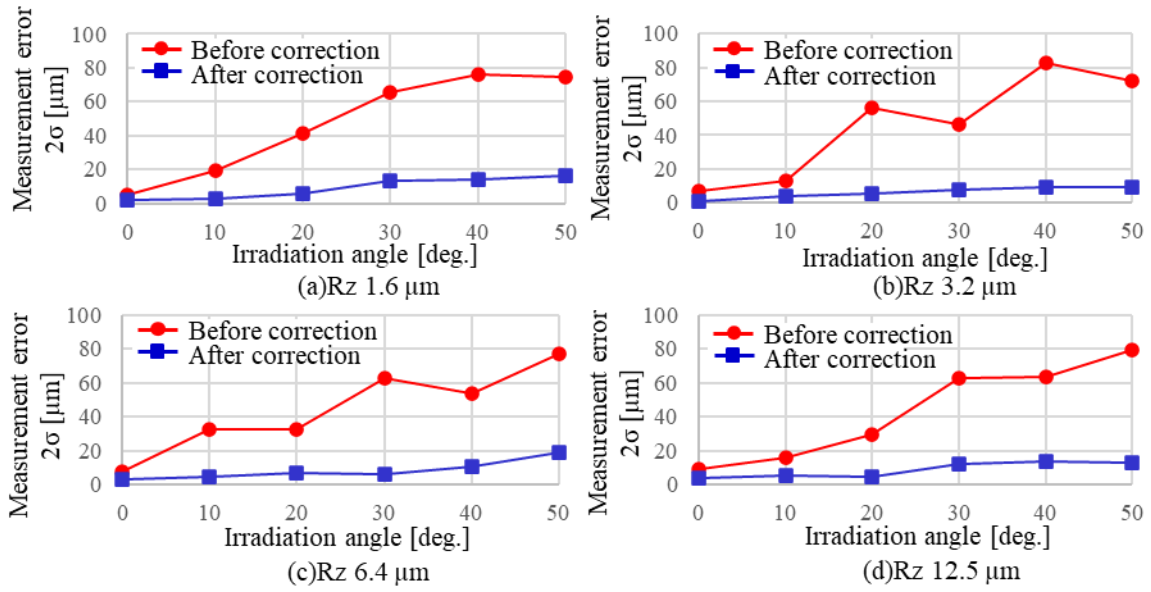
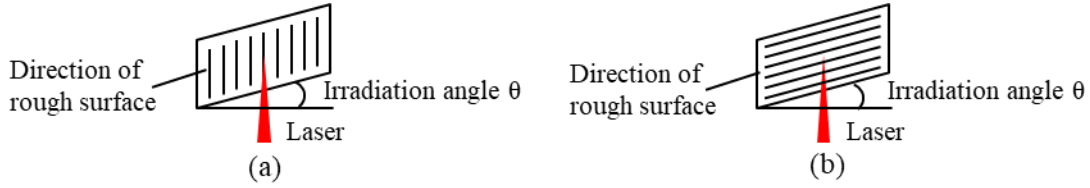
6.6.1 節にて，測定バラつき (Precision) について評価した。本節では，形状の測定精度 (Accuracy) に関して評価する。評価方法としては，円筒形状の表面形状を測定し，円筒半径の測定値を他の測定方法と比較する。

Fig.6.17 (a)は円筒形状をした粗さ標準片であり，粗さ R_z は 1.6 μm を選択した。Fig.6.17 (b)はビーム走査方向を示す。ビーム径 D は 250 μm で，加工方向に平行にビーム走査する。評価サンプルは円周方向に平行な方向に粗さを有するが，Fig.6.15 と Fig.6.16 の評価結果から，加工方向に対して，平行方向と直交方向で測定誤差はほぼ同じであり，提案手法は両方向で効果的に誤差を低減することがわかる。したがって，円周方向に平行な方向に粗さを有する円柱形状を用いた評価は妥当である。

まず，市販の表面粗さ計を用いて，円柱形状の表面を測定した。測定結果を Fig.6.18

(a)に示す。横軸は測定位置, 縦軸は測定距離である。測定結果に円フィッティングし, 得られた半径 12.382 mm を形状の真値と定義した。

次に, 実験装置を用いて円筒形状の面を測定した。測定結果を Fig.6.18 (b)に示す。照射角が大きいほど, 測定バラつきが大きくなることがわかる。測定結果に対して円フィッティングし, 得られた半径は 12.338 mm であった。表面粗さ計の測定結果に対する測定誤差は $46\text{ }\mu\text{m}$ であった。測定結果を局所最大強度法で補正し, 補正後の結果を Fig.6.18(c)に示す。Fig.6.18(b)に比べ, 傾斜面位置での測定バラつきが減少していることがわかる。円形フィッティング半径は 12.386 mm となり, 表面粗さ計との測定誤差は $4\text{ }\mu\text{m}$ であった。以上の結果から, 形状測定精度に関しても要求精度である $20\text{ }\mu\text{m}$ 以下であることを確認した。



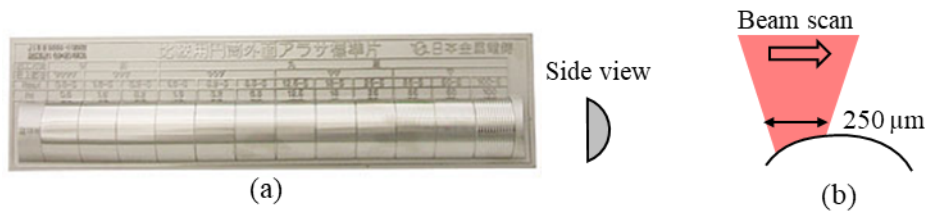


Fig. 6.17 Cylindrical-shaped rough surface:
(a) Standard cylindrical-shaped rough surface. (b) Beam-scan direction across cylindrical-shaped rough surface.

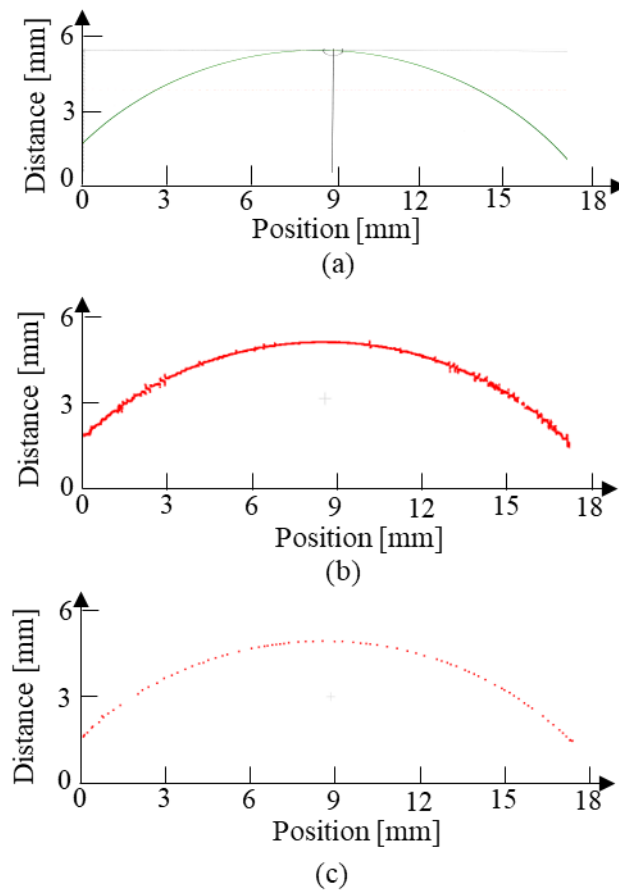


Fig. 6.18 Measurement results of cylindrical-shaped rough surface:
(a) measurement results with a surface-roughness tester, (b) measurement results before correction with our experimental setup, (c) measurement results after correction with our experimental setup.

6.7 提案手法の狭隘部 3 次元形状装置への適用

提案する局所最大強度法の実用性を評価するために、傾斜面を有する複雑形状として、工業製品で代表的なボールネジとトルクコンバータのインペラを対象に測定を行った。測定には、第 4 章で説明した狭隘部 3 次元形状測定装置を使用した。

まず、ボールネジの測定を行った。Fig.6.19 (a)にボールネジの写真を示す。ボールネジは内部に溝があり、接触式の測定器では内部形状を測定することが困難である。Fig.6.19(b)に測定風景を示す。対象にレーザを照射し、プローブを回転して、1 断面を測定する。Z 軸を走査することで、対象の 3 次元形状を測定する。Fig.6.19 (c)に測定結果を示す。測定結果より、形状の抜けなく、内部を測定できることを確認した。Fig.6.19 (c)の中央の図が断面 A を示し、右の図が拡大 A'を示す。傾斜を有する溝部の測定結果では測定バラつきが大きい。4 次多項式フィッティングし、測定結果からフィッティング曲線を差し引いた測定値の測定誤差は $79.5 \mu\text{m}$ (2σ)であった。次に Fig.6.19 (d)に局所最大強度法に基づく補正後の測定結果を示す。Fig.6.19 (d)の中央の図が断面 B を示し、右の図が拡大 B'を示す。補正後、測定誤差は減少し、4 次多項式フィッティング曲線を差し引いた測定値の測定誤差は $18.2 \mu\text{m}$ (2σ)であった。

次に、トルクコンバータのインペラを測定した。Fig.6.20 (a)にインペラの写真を示す。インペラは内部に流路形状を有するが、接触式の測定器では内部形状を測定することは困難である。Fig.6.20 (b)に測定風景を示す。プローブを流路内面に挿入して流路形状を測定する。Fig.6.20 (c)に測定結果を示す。測定結果より、形状の抜けなく、内部を測定できることを確認した。Fig.6.20 (c)の中央の図が断面 A を示し、右の図が拡大 A'を示す。傾斜を有する流路面の測定結果では測定バラつきが大きい。4 次多項式フィッティング曲線を差し引いた測定値の測定誤差は $43.8 \mu\text{m}$ (2σ)であった。Fig.6.20 (d)は局所最大強度法に基づく補正後の測定結果を示す。Fig.6.19 (d)の中央の図が断面 B を示し、右の図が拡大 B'を示す。補正後、測定誤差は減少し、4 次多項式フィッティング曲線を差し引いた測定値の測定誤差は $16.6 \mu\text{m}$ (2σ)であった。これらの結果から、提案した局所最大強度法は、工業用機械部品の形状測定に対しても有効であることがわかった。

ここで、測定データの測定不確かさについて考察する。市販の粗さ計で測定したボールネジの粗さは $Rz 9.4 \mu\text{m}$ 、トルクコンバータの粗さは $Rz 7.2 \mu\text{m}$ であった。粗さに起因する測定偏差(2σ)は、 Rz 値の約半分の値となり、それぞれ $4.7 \mu\text{m}$ 、 $3.6 \mu\text{m}$ 程度となる。また狭隘部 3 次元形状計測装置のプローブの振動は、別途市販のレーザ変位計で測定しており、 $1 \mu\text{m}$ 程度である。今回の測定では、ボールネジの測定偏差は $79.5 \mu\text{m}$ 、トルクコンバータの測定偏差は $43.8 \mu\text{m}$ であり、これらは、粗さ起因の測定偏差やプローブの振動よりもはるかに大きな値である。したがって、スペックルに起因する測定誤差が支配的であり、提案手法によって、その誤差を効果的に低減することができたと言える。

次に、提案手法の測定可能な空間周波数について述べる。提案手法は、ビーム径内の局所的な最大強度位置に対応する最小誤差点を抽出するため、測定可能な空間周波数はビーム径の 2 倍となる。

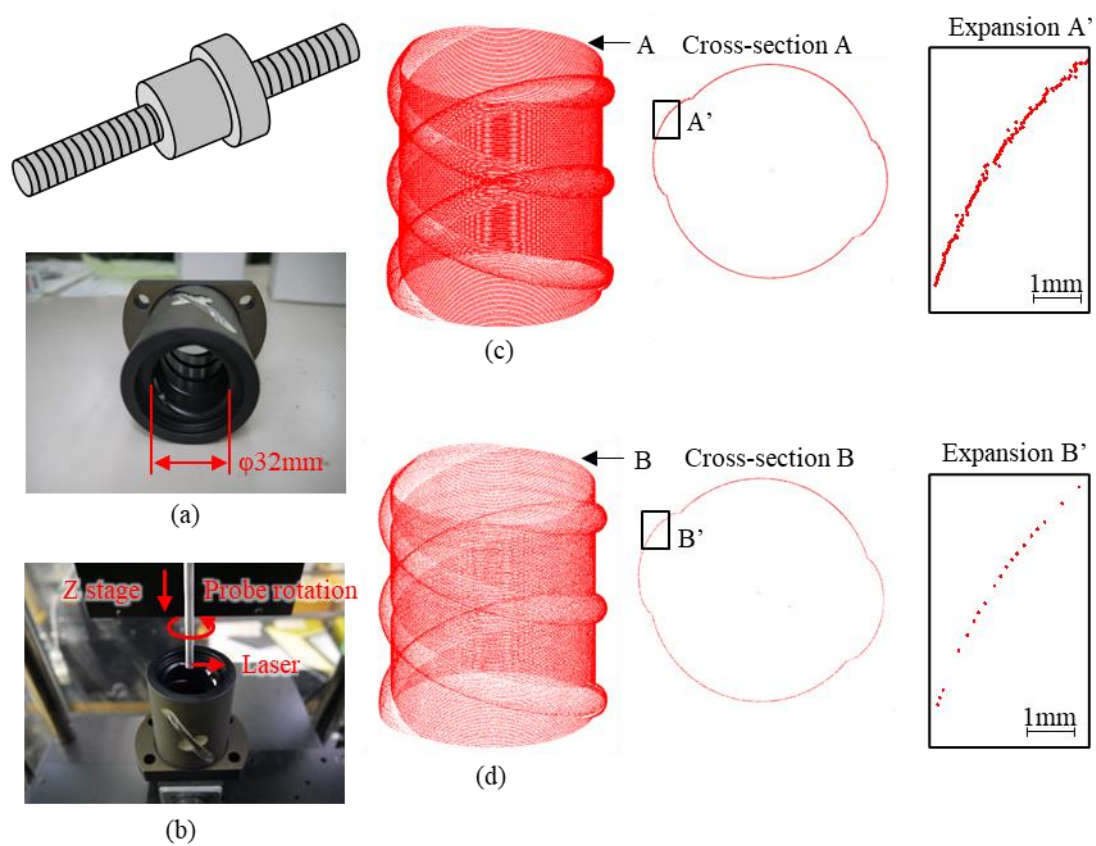


Fig. 6.19 Measurement results of ball screw:
 (a) Photograph of ball screw, (b) Measurement condition, (c) measurement results before correction, (d) measurement results after correction.

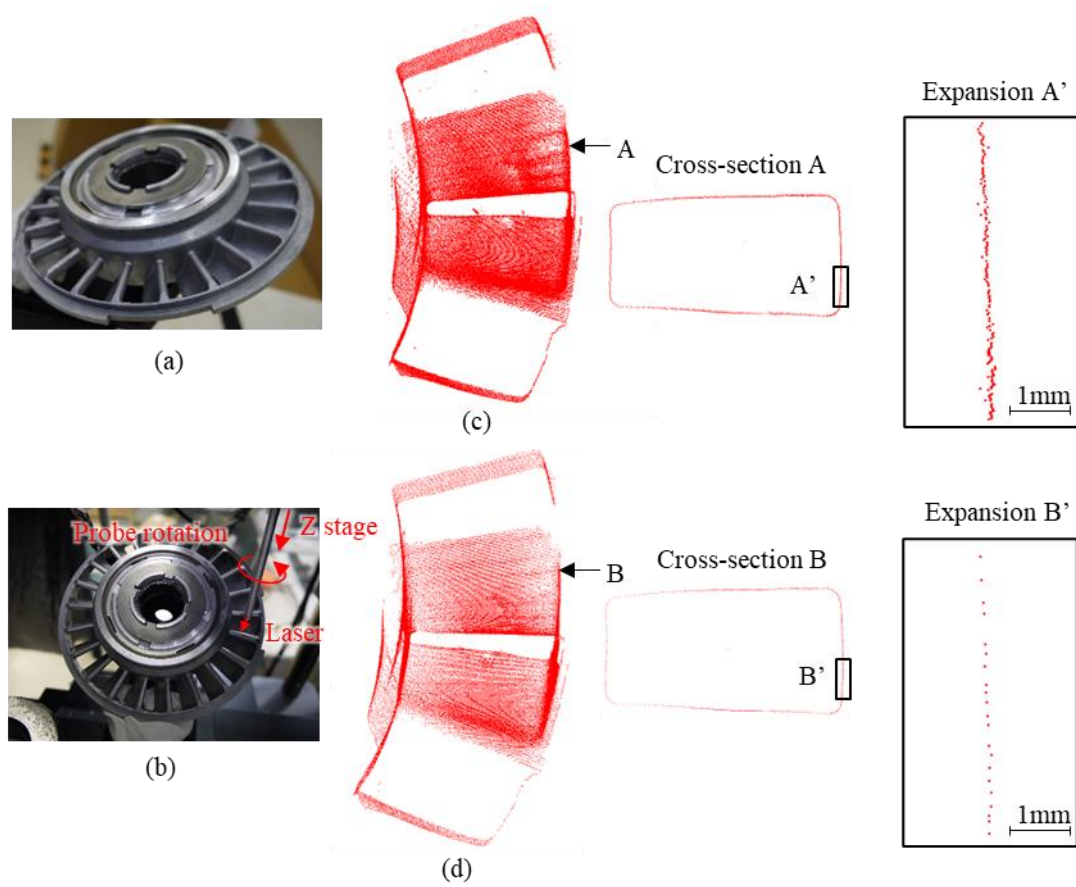


Fig. 6.20 Measurement results of torque-converter's impeller:
 (a) Photograph of impeller, (b) Measurement condition, (c) measurement results before correction, (d) measurement results after correction.

6.8 結言

3次元複雑形状の計測において、対象の表面粗さや傾斜角度に依存した測定誤差が生じる。本章では、粗面、傾斜面を測定する際に生じる測定誤差の発生メカニズムを明らかにし、さらに測定誤差を低減する手法を開発した。本章の結論は以下の通りである。

- 1) 測定誤差は対象表面で生じるスペックルに起因し、測定誤差量は、照射ビーム径および照射角度に依存することを解明した。
- 2) この解明に基づいて、検出波形と検出強度の光学的特性を利用した2つの誤差低減技術を提案した。一つは、検出波形のピーク位置と重心位置の偏差に基づく手法であり、もう一つは、検出強度の局所最大値に対応する測定距離を抽出する手法である。
- 3) 基礎評価から、本研究では、局所最大強度法を選定することとし、局所最大強度法の表面性状に対するロバスト性を評価した。局所最大強度法の評価の結果、表面粗さ R_z が $1.6 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 、照射角度が $0 \sim 50$ 度の範囲での測定において、最大 $80 \mu\text{m}$ 程度あった測定誤差が $20 \mu\text{m}$ 以下に低減することを確認した。
- 4) さらに局所最大強度法の形状測定精度を評価するために、市販の粗さ計で値付けした円筒形状サンプルの形状測定を行った。測定の結果、提案手法の適用前は、粗さ計との測定値の偏差は $44 \mu\text{m}$ となり、提案手法の適用後は、偏差は $4 \mu\text{m}$ となり、提案手法の有効性を確認した。
- 5) 複雑形状を有する工業製品として代表的なボールねじとトルクコンバータ用インペラの形状を、狭隘部3次元形状計測装置を用いて測定した。各サンプルの複雑な内面形状をデータ欠損なく測定可能であることを確認した。さらに提案手法を適用することで、測定誤差を低減し、工業製品に対する測定においても、本手法の有効性を確認した。

第7章 結論

7.1 結言	92
--------------	----

7.1 結言

近年 Lidar をはじめとして、光を使って非接触で計測対象までの距離を測定する技術が着目されている。またモノづくりの現場においても、製造品の品質管理を目的に、対象形状を非接触で高精度に計測する技術が求められている。なかでも、自動車、航空機、建設機械の油圧機器やエンジン機器等の内部に流路面や摺動面を持つ部品は、穴の内面形状が製品の性能に直結するため、高精度な計測が要求されるが、狭く複雑な穴(狭隘部)形状のために従来手法では測定が困難であった。そこで、本研究では、狭隘部の3次元形状を測定する技術開発に取り組んだ。狭隘部の計測が実現すれば、より高度なモノづくりが可能となり、その社会的価値は高い。以下に本論文の内容を総括する。

第1章では、ニーズ調査結果に基づき、開発する狭隘部3次元形状計測装置の仕様を以下のようにまとめた。

- ・測定範囲 3~50 mm(単純円筒の内壁の場合 $\phi 6\sim 100$ mm に相当)
- ・測定精度 単純円筒の場合 $\pm 5\ \mu\text{m}$ 、複雑形状の場合 $\pm 20\ \mu\text{m}$
- ・測定速度 1断面 1秒以内(1断面当たりの測定点密度 10,000 点 : 10 kHz に相当)
- ・環境温度 精密測定が困難な製造現場温度環境(20~30°C内で大きく変動)
- ・対象内面性状 散乱面(表面粗さ $R_z 3.2\sim 6.4\ \mu\text{m}$)

開発装置に適用する計測方式を列挙し、シンプルな構成で高精度化が実現可能な FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave)法に着目した。FMCW 法による装置開発を行う上で、装置構成、部品価格、環境ロバスト性を考慮して、「距離計測基本光学系とそれを搭載した狭隘部3次元形状計測装置の開発」、「周囲環境温度に対するロバスト性向上」、「粗面・傾斜面に対するロバスト性向上」の3つの研究内容に取り組むこととした。

第2章では、FMCW 法の原理について説明した。また FMCW 法において、印加電流に対するレーザの光周波数掃引の非線形性によって生じる測定誤差を低減するために用いるリサンプリング法についても説明した。

第3章では、FMCW 法に基づき開発した距離計測基本光学系について説明した。FMCW 法において計測精度に影響する光源に関して、候補を列挙し、各光源の物理特性に基づき、VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting Laser)を選定した。VCSEL の特性評価の結果、第1章で挙げた測定速度の仕様を満たすためには、光周波数掃引を正弦波とする必要があることがわかった。そこで、リサンプリング法により、掃引の非線形性を補正することで、理論値程度のFFTスペクトル線幅が得られることを確認した。次に開発した基本光学系の測定精度を評価した。検出光路にアッテネータを挿入して、検出光を減衰させ、検出感度も同時に評価した。評価の結果、散乱面からの反射を想定した実用レベルでの検出強度 -60~-70 dB において、測定バラつきが $1.0\sim 1.3\ \mu\text{m}(\sigma)$ と安定した測定が可能であることを確認した。

第4章では、距離計測基本光学系を搭載した狭隘部3次元形状計測技術を開発した。その特徴は、 $\phi 6\sim 100$ mm と幅広い内径を測定できることと、出射光の偏光を切り替えることで、狭隘部の側面と奥行きの測定方向切替えが可能なことである。プローブ

の内径計測精度を評価した結果、 $\phi 6 \sim 100 \text{ mm}$ の内径にて、最大誤差 $\pm 0.8 \text{ }\mu\text{m}$ 以内となることを確認した。プローブの深さ方向の測定精度を評価した結果、 $2 \sim 47 \text{ mm}$ の段差にて、最大誤差 $\pm 2.4 \text{ }\mu\text{m}$ 以内となることを確認した。

第 5 章では、狭隘部 3 次元形状計測装置の周囲環境温度に対するロバスト性を評価した。 $20 \sim 30^\circ\text{C}$ の温度変化の条件下で、温度上昇および下降時に温度変化に伴う測定誤差が $5 \text{ }\mu\text{m}$ 程度生じることが判明した。測定誤差の原因は、光ファイバの slow 軸偏光と fast 軸偏光の位相変化であると推測し、偏光の位相状態をモデル化した数値解析を行った。解析の結果、FMCW を構成している 2 つの干渉ユニットにおいて、異なる測定誤差が生じることが判明した。それぞれの干渉ユニットの特性に応じて偏光の位相変化を抑制する測定誤差抑制手法を提案した。提案手法を実験評価した結果、測定誤差を $5 \text{ }\mu\text{m}$ から $1 \text{ }\mu\text{m}$ に低減し、装置のロバスト性を向上した。

第 6 章では、3 次元複雑形状計測において、粗面、傾斜面測定のロバスト性を評価した。測定誤差は対象表面で生じるスペックルに起因し、誤差量は、照射ビーム径および照射角度に依存することを解明した。解明結果に基づき、検出波形と検出強度の光学的特性を用いた 2 つの誤差低減技術を提案した。基礎評価の結果から、本研究では検出強度に基づく手法を選定することにし、その手法の表面性状に対するロバスト性を評価した。評価の結果、表面粗さ R_z が $1.6 \sim 12.5 \text{ }\mu\text{m}$ 、照射角度が $0 \sim 50$ 度の範囲での測定条件において、最大 $80 \text{ }\mu\text{m}$ 程度近くあった測定誤差が $20 \text{ }\mu\text{m}$ 以下に低減することを確認した。さらに複雑形状を有する工業製品として代表的なボールねじとトルクコンバータ用インペラの形状を測定した結果、提案手法を適用することで、測定誤差を低減し、工業製品に対する測定においても、本手法の有効性を確認した。

謝辭

謝辭

参考文献

<和文文献>

[経済産業省 2017]

経済産業省 中部経済産業局:”モノづくりスマート化ロードマップ調査”, 2017.

[阿部 2019]

阿部誠: “非直交光学式三次元測定の動向と性能評価法の標準化”, 精密工学会誌, Vol. **85**, No. 5, pp388-394, 2019.

[石岡 2001]

石岡昌人, 栗林志頭真: 反射ターゲットを用いない高精度レーザ測長技術, 三菱重工技報, Vol. **38**, No 5 pp.274, 2001.

[金田 1991]

金田一: 三角測量法によるレーザ式変位計の高精度化, 計測自動制御学会論文集, Vol.27, No 8, pp.853, 1991.

[清田 2022]

清田 大樹, 今井 一宏, 興梠 元伸: “光コム干渉法を用いた三次元測定技術と産業応用”, 精密工学会誌, Vol. 88, No 5, pp.383-387, 2022.

[布谷 2012]

布谷伸浩, 石井啓之, 伊賀龍三: “高速波長可変分布活性 DFB レーザの開発”, NTT 技術ジャーナル, pp.48-52, 2012.

[宮本 2009]

宮本 智之: “VCSEL 技術の現状と課題”, Laser Review, Vol. 37, No 9, pp.649-656, 2009.

[針山 2021]

針山達雄, 丸野兼治, 渡辺正浩, 高橋哲: “レーザ測距を用いた広レンジ高精度狭隘部 3D 形状計測技術の開発”, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.637-638, 2021

< 英文文献 >

[Li 2020]

You Li and Javier Ibanez-Guzman: “Lidar for Autonomous Driving”, IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE, pp.50-61, 2020

[Liu 2012]

Xuesong LIU, Matineh EYBPOOSH and Burcu AKINCI: “Developing As-built Building Information Model Using Construction Process History Captured by a Laser Scanner and a Camera”, Construction Research Congress, pp.1232-1241, 2012

[Berkovic 2012]

G. Berkovic and E. Shafir, “Optical methods for distance and displacement measurements,” Adv. Opt Photonics **4**, 441–471 (2012).

[Liu 2018]

Jingyun Liu, Qiao Sun, Zhe Fan and Yudong Jia: “TOF Lidar Development in Autonomous Vehicle”, Optoelectronics Global Conference, pp.185-190, 2018

[Hwang 2012]

Sungui Hwang, Junhwan Jang and Kyihwan Park: “Solving 2pi ambiguity problem of a laser scanner based on phase-shift measurement method for long distances measurement”, International Conference on Control, Automation and Systems, pp.1250-1252, 2012

[Iiyama 2006]

K.Iiyama, M.Yasuda and S.Takamiya: Extended-range high-resolution FMCW reflectometry by means of electronically frequency-multiplied sampling signal generated from auxiliary interferometer, IEICE Trans. Electron, E89-C, 6 (2006) 823.

[Minoshima 2000]

K. Minoshima and H. Matsumoto: “High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser”, Appl.optics, **39**, 30, (2000) 5512.

[Matsumoto 2012]

H. Matsumoto, X. Wang, K. Takamasu and T. Aoto: “Absolute measurement of baselines up to 403 m using heterodyne temporal coherence interferometer with optical frequency comb”, Appl. Physics Express, **5** (2012) 046601.

[Onoe 2016]

T. Onoe, S. Takahashi, K. Takamasu and H. Matsumoto: “Non-contact precision profile measurement to rough-surface objects with optical frequency combs”, *Meas. Sci. Technol.*, 27, (2016) 124002.

[Baumann 2014]

E. Baumann, F. R. Giorgetta, J.-D. Deschênes, W. C. Swann, I. Coddington, and N. R. Newbury, "Comb-calibrated laser ranging for three-dimensional surface profiling with micrometer-level precision at a distance," *Opt. Express* **22** (21), 24914–24928 (2014).

[Wang 2016]

Z. Wang, B. Potsaid, L. Chen, C. Doerr, H.-C. Lee, T. Nielson, V. Jayaraman, A. E. Cable, E. Swanson, and J. G. Fujimoto, “Cubic meter volume optical coherence tomography,” *Optica* **3**, 1496–1503 (2016).

[Ahn 2005]

T.-J. Ahn, J. Y. Lee, and D. Y. Kim, “Suppression of nonlinear frequency sweep in an optical frequency-domain reflectometer by use of Hilbert transformation,” *Appl. Opt.* 44(35), 7630–7634 (2005).

[Grulkowski 2013]

Ireneusz Grulkowski, Jonathan J. Liu, Benjamin Potsaid, Vijaysekhar Jayaraman, James Jiang, James G. Fujimoto, and Alex E. Cable: “High-precision, high-accuracy ultralong-range swept-source optical coherence tomography using vertical cavity surface emitting laser light source”, *Optics Letters* Vol. 38, Issue 5, pp. 673-675, 2013.

[Hariyama 2018]

T. Hariyama, P. A. M. Sandborn, M. Watanabe and M. C. Wu, “High-accuracy range-sensing system based on FMCW using low-cost VCSEL”, *Opt. Express* Vol.7, pp.9285–9297 (2018).

[Watanabe 1993]

Masahiro Watanabe, Yoshitada Oshida, Yasuhiro Nakayama and Ryuichi Funatsu: Shot Leveling and Focusing with Interferometry for Optical Lithography of Sub-Half-Micron LSI, *Jpn.J.Appl.Phys.*, **32**, 12 (1993) 5867.

[Maruno 2018]

K. Maruno, T. Hariyama, A. Taniguchi and M. Watanabe, “Development of a Multi-Direction Optical”, 3rd 3D Metrology Conference, 2018.

[Baumann 2014]

E. Baumann, J.-D. Deschênes, F. R. Giorgetta, W. C. Swann, I. Coddington, and N. R. Newbury:

“Speckle phase noise in coherent laser ranging: fundamental precision limitations”, Opt. letters, 16, pp.4776–4779, 2014.

[Hariyama 2021]

Tatsuo Hariyama, Kenji Maruno, Masahiro Watanabe and Satoru Takahashi:”High-accuracy error-reduction method for 3D complex shape measurement with local-maximum-power-based technique of FMCW”, Precision Engineering, Vol.72, pp.69-82, 2021.

