

超多芯イメージファイバを用いた高精度非接触真円度測定法に関する研究

Proposed Method of High-Precision Non-Contact Roundness Measurement

using a Ultra-multi-core Imaging Plastic Optical Fiber

川島 信

Makoto Kawashima

田中佑育

Yusuke Tanaka

キーワード：非接触真円度測定，光測距，マルチコアPOF，イメージファイバ

1. はじめに

環境負荷の低減, エネルギーセキュリティの向上, 新規成長産業の創出などの観点から HV, EV 更に燃料電池自動車等いわゆる次世代自動車導入推進が叫ばれている. これら次世代自動車には高性能電気モータが不可欠であり, 生産量の大幅増大が予測されている[1]. 我々は先にこれら電気モータのブロックコア導入によるステータ製造工程において, 内壁面の真円度測定を高精度に実現できる方法を提案した[2] [3]. しかしながら, 文献[2]の提案方式は, レーザ反射光レベルを基に測距を行うもので, 測定対象壁面における汚れ・傷により, 測定精度の低下が懸念された. さらに, 文献[3]で提案した方式はこの欠点を克服するものではあるが, レーザ光反射レベルのピーク位置を元に高精度測距を行うもので, ピーク点検出に長時間を要すると言う欠点を有していることが判明した.

本論文は, これらの欠点を克服する方法を提案するもので, 基本的には μm オーダの高精度測定が極めて短時間で可能となる. 電気モータの製造ラインのみならず, 簡便かつ短時間で高精度測距が可能なことから, 広範な応用が可能であると考えられる.

2. 真円度測定の概要と外部条件

本章では, 「ブロック分割型ステータ製造方式」における内壁面の真円度測定を実現するに際して要求される諸条件, ならびにこれら条件を満足させるための測定法の候補技術を挙げ, 上記要求条件に基づき比較検討を行って最適方式を選定する.

2.1 真円度の測定対象と要求条件

真円度(roundness)とは円筒形態の幾何学的に正しい円からの狂いの大きさと定義され, 本研究では電気モータのステータ内壁面を測定対象として検討を進める. 通常, 電気モータのステータはプレス打抜きされた珪素鋼板を積層した上で, 溝内に銅線を捲くことによって製造される. 一方, ブロック分割型ステータコア製造では, ステータコアを電極数に分割し, 分割された個々のコアに銅線捲き付けの作業を行った後, 図 1 に示す如く, 溶接によりステータを結合する生産方式である.

銅線の巻き線工程が簡易化, 高速化されるという利点がある.

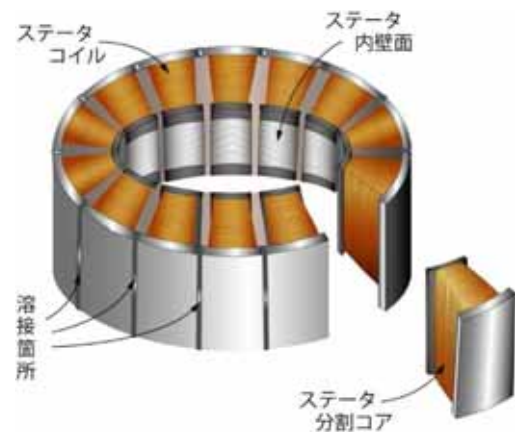


図 1 ブロック分割型ステータコアの概観

次世代自動車に導入する電気モータの種別は, 車輪駆動用モータ等の大電力用を含め, 小型のパワーウィンドウ駆動用モータなど多岐にわたり, ステータサイズもモータの出力規模に応じて様々なものとなる.

以上を考慮すると、真円度測定における高出力電気モータ用ステータの内壁面真円度計測に関する条件は以下となる。

- ステータ内壁面に空隙等が存在し複雑な構造となることから、探針測定方式の採用は不可能。非接触型の測定方式が大前提となる。
- 内壁面の真円度測定精度は $100\mu\text{m}$ が要求され、将来的には $10\mu\text{m}$ 以下の測定が可能となることが望ましい。

2.2 非接触型高精度微小距離測定技術の概要

非接触で微小距離を測定可能な既存測定技術とそれらを比較した結果を表1に整理する。

表1 非接触型の微小距離測定技術の比較

	光計測	静電計測	音響計測
反射信号到達時間 ($10\mu\text{m}$ 精度)	66fs Δ	—	58ps
特徴 ($10\mu\text{m}$ 精度)	受光量検出 $\odot$	静電容量検出 $0.89\mu\text{F}$ ($10\mu\text{m}$) $\bigcirc$	—
センシング系構築の 難易度	反射時間計測 Δ 受光量計測は有望 $\odot$	技術的に確立済み 電気力線の 整形が必要 Δ	超音波の位相差計 測制度が難しい $\times$ (1MHzの超音波信号 の使用必須)
総合評価	$\odot$ (受光量計測法)	$\bigcirc$	$\times$

表1に示す測距技術の中、超音波を用いる音響計測は、超音波反射信号のラウンドトリップ時間から距離を計測するものであるが、数 mm 先の対象を数 $10\mu\text{m}$ 精度で計測するためには、超音波信号の高精度位相計測が必要となり、測定系の構築が困難となる。静電計測法は最も一般的な技術で実用化例も多いが、センサヘッドと測定対象間の距離を高精度に計測するには電気力線の高度な整形が必須で、センサの小型化が難しく必然的に高価となる。既に商品化された計測機からもその傾向がうかがえる。これらの理由から、真円度測定において音響計測や静電計測を測距手法として用いることは技術面、価格面共に困難であると判断した。

一方、光計測法の内、位相計測による距離測定は、他手法と同様、超高速で高度な光・電気信号系を構築する必要があり、他の計測法以上に困難を伴

うと考えるが、反射光レベルによる距離測定は位相計測法程の高精度測距は望めないものの、より容易に計測系を構築することができると考えられる。

以上より、本研究では光信号を用いた反射光信号レベル測定を高度化することにより、微小距離を測定する新たな手法を提案する。

3. 新たな非接触真円度測定法の提案

3.1 超多芯イメージファイバを導入した測距法の測定原理

レーザ光による測距では光のラウンドトリップ時間を計測する方法が一般的であるが、 $100\mu\text{m}$ 程度の距離の伝搬時間測定は、超高速信号解析が必須となり、本研究への適用は得策ではない。一方、測定対象との距離を簡単に反射光の受光レベルから求めると、被測定体の反射面の汚れの度合い、部材の反射率等により、測定精度が著しく低下する。この課題を克服する測距法として文献[3]において、反射光レベルのピーク位置を求めることにより、高精度測距を可能とする方法を提案した。この測距法は受光ファイバを微小移動させることによって、ピーク受光位置を見出すことにより測距を行うものであるが、ピーク受光点の探索に長時間を要することが判明した。

この課題を克服するために、本研究では図2に示すように、受光ファイバとして超多芯イメージファイバを導入する新しい測定原理を提案する。

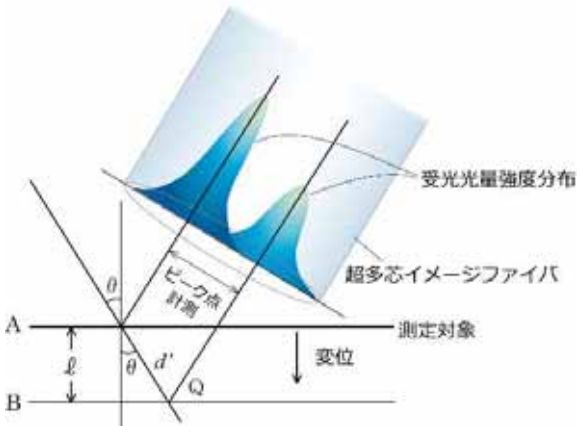


図2 超多芯イメージファイバを用いた測距法の測定原理

送光用単芯 POF (POF: Plastic Optical Fiber) から放射された LED 光は被測定物壁面 A で反射し、受光用超多芯イメージファイバにより受光される。被測定物壁面 A が距離 l だけ変位すると、レーザ光は Q 点を経て、被測定物壁 A の場合とは異なるイメージファイバ内位置に入射することとなる。両者の反射レベルがそれぞれ最大となる受光用 POF の間隔を d とすると、被測定対象 A, B 間の距離 l は以下の様に求めることができる。

$$\begin{aligned} l &= d' \cos \theta \\ &= d \cdot \frac{\cos \theta}{\cos \left(\frac{\pi}{2} - 2\theta \right)} \\ &= \frac{d}{2} \cdot \frac{1}{\sin \theta} \end{aligned} \quad (1)$$

3.2 提案する真円度測定系の基本構成

前節で述べた様に、本測定法は測定対象からの反射光レベルの“ピーク位置間隔をイメージファイバで取り込み測定”することによって高精度測距を行う点が、既提案の方法とは根本的に異なる。この測距原理に基づいた真円度測定系の構成を図 2 に示す。

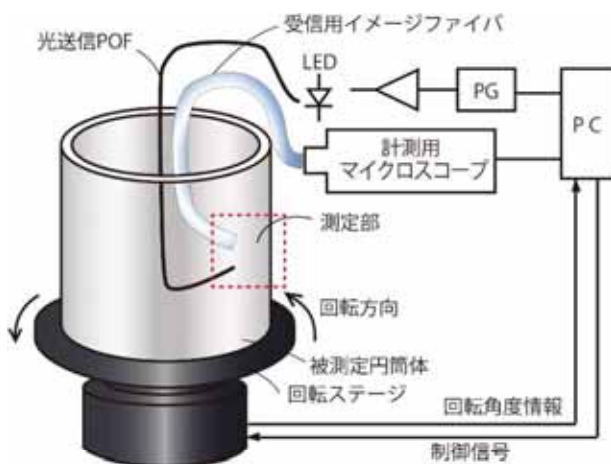


図 3 高精度真円度測定法の基本構成

真円度測定系は LED 光を単芯 POF により伝送し、被測定体壁面に照射して、被測定物壁面に照射する。壁面からの反射光は超多芯イメージファイバにより受光し、デジタルマイクロスコープによって受光プロファイルの画像計測を行って受光ピー

ク位置を求める。受光用超多芯イメージファイバは 7,400 芯 (外径 2.5mm) であり、基本的には $25\mu\text{m}$ 分解能で式 (1) 距離 d の計測が可能となる。

提案する測定原理の立証ならびに基本特性を検証するための基礎実験を行った。LED 光を被測定物壁面に照射し、その反射光を超多芯イメージファイバで受光した受光強度分布プロファイル測定結果を図 4 に示す。同図 a) は受光 POF の受端におけるデジタルマイクロスコープ撮像結果である。これを 3 次元解析することにより、受光強度分布プロファイルを求めたものが同図 b) である。両測定結果共に、その中心部に LED チップ発光部の形状と思われる高強度部位の存在が見てとれるが、同図 c) の 2 次元強度分布特性 (図 3 b) の中心を通

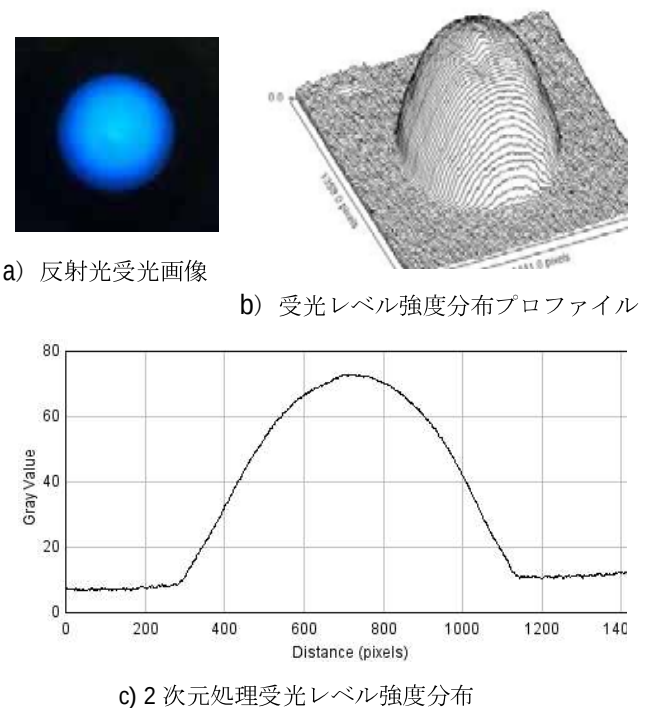


図 4 LED 反射光の強度分布測定結果

を求めることは十分可能であることが分かる。また、画像解析を適用することが可能となるため、ピーク値間の距離の導出も極めて簡略化でき、高速計測が可能となる。さらに計測の高速性を利用した多数回反復計測による測定精度向上も望める。

3.3 提案測定法の特長

前節の基礎実験の結果として、新たに提案する測距法は以下の特徴を有することが分かる。

- ① 測定精度として、少なくとも $20\mu\text{m}$ オーダの実現が可能である。高度な画像解析技術の応用により、更なる測定精度の向上が期待できる。
- ② 測定ヘッドが可撓性を有するプラスチックファイバのみで構成可能であることから、小型円筒体の計測が可能、センサの小型化実装、更に測定系全体としても経済化が望める。

こうしたことから、提案方式は既存測距方式に比し多くの利点を有する距離測定法であることが判明した。

4. 真円度測定系の構成法

4.1 真円度測定系の構成

電気モータのステータの内壁面の計測は正確には円筒度測定と呼ぶのが適切であるが、本文では「真円度測定」と呼ぶことにする。ステータの内壁面真円度測定システムの基本構成を図3に示した。同図に示す被測定円筒体は、ここでは電気モータのステータに該当する。

真円度測定システムでは、送光側と受光側の各ファイバを対向させて設置し、それらをLED光の送・受光ポイントとして被測定物に照射させることにより壁面—センサ間距離を計測する。

PG(Pulse Generator)から測定用パルス信号を送出し、LED(Light-emitting Diode)を駆動することによって光信号を光送信用POFに注入する。送信光は光送信POFを導波路として端面まで進み、センサヘッド先端から被測定円筒体の内壁面に向けて放射される。ここで、提案手法では3.1節で述べた通り、従来の光受信用POFに代えて、画像伝送が可能なイメージファイバを対向設置する。光送信POFからの放射光は被測定物内壁面で反射し受光用イメージファイバに入射する。この入射光はイメージファイバを伝搬した後、計測用デジタルマイクロスコープに導かれ撮像される。撮像画像は画像解析によって反射光強度分布が抽出され反

射光のピーク受光位置が導出される。回転ステージを例えば1度ずつ回転させ計測を進め、長手方向に対しても同様の測定を繰り返すことにより、円筒度の計測が可能となる。

4.2 回転ステージと被測定円筒体中心のずれの補正

ステータ等、被測定円筒体の中心軸と測定用回転ステージの回転中心とのずれは測定精度を低下させる原因となるため、可能な限り抑える必要がある。図3の測定系を用いて被測定物を回転させながら反射光レベルを計測した場合、回転軸のずれにより、測距計測信号波形は図5に示す如く正弦波状のうねりを含んだものとなる。

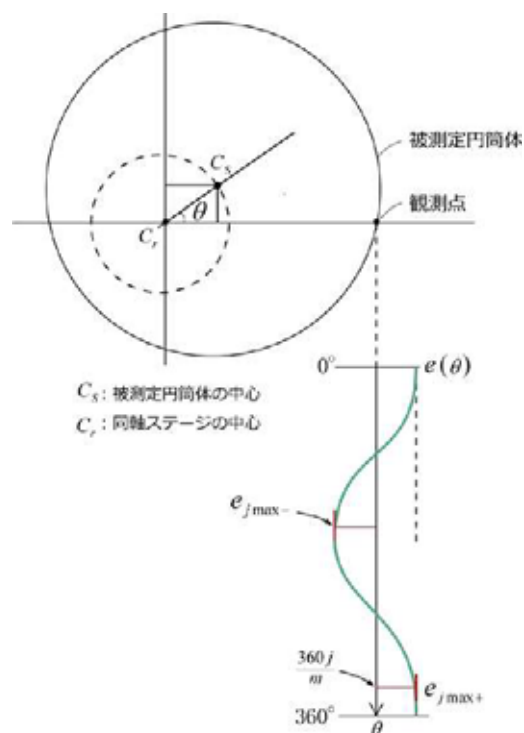


図5 被測定円筒体の中心軸と回転ステージ中心のずれによる受光信号レベル変動[7]

測距計測信号をフーリエ解析し、その基本波成分に着目すると、基本波成分は円周を一周期とし、その振幅は中心軸偏移量を、位相は偏移が生じる角度を示すこととなる。これら位相と振幅とから回転ステージ上の被測定ステータの中心軸の変位(ずれ)量を求め、回転ステージの中心軸と合致させることにより、精密測定が可能となる。これ

らの詳細は文献[7]に詳述した。

なお、この補正を実施せずとも、壁面変位特性を測定することは可能であるが、被測定体と回転ステージの中心軸のずれは、測定動作中の測定系に無用の振動等を発生させ、測定精度低下要因となるため補正しておくことが重要となる。

4.3 真円度測定の計測制御フロー

前節までの検討を踏まえ、提案する真円度測定法の手順について記述する。円筒体内壁面の形状計測は、最初に回転ステージの中心からセンサヘッドを円筒体内壁面付近に設置し、ピーク点移動量計測により回転ステージ中心軸一壁面距離を測定する。次に真円度計測ステップとして、回転ステージを一定角度ずつ回転させることにより円周方向の真円度測定を実施する。円筒体の長手方向について同様の計測を順次繰り返すことにより、最終的に円筒体内壁面全体の測定を完了する。これら一連の真円度測定処理フローを図6に示す。同図に示す測定処理フローの自動化を行った。その詳細については付録に記述する。

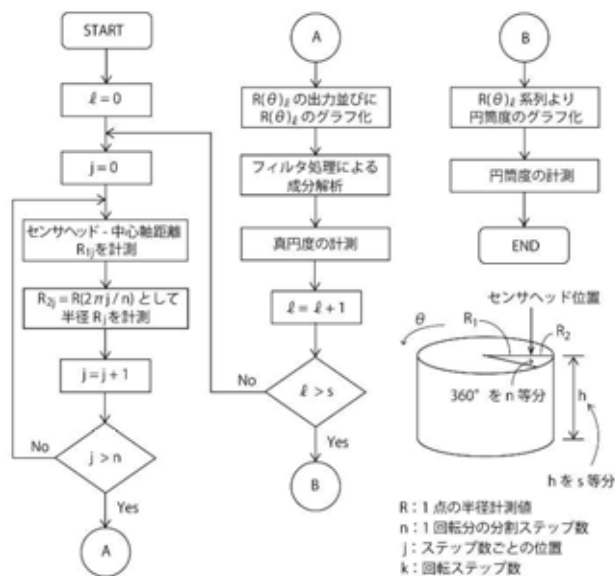


図6 真円度測定計測制御フロー

5. 新提案真円度測定法に関する実証・評価実験

新たに提案した真円度測定原理の基本動作確認ならびに JIS 規格に従った評価法による測定精度

等について検討を進めた、

本章では提案真円度測定法のフィージビリティ確認のための実証実験結果並びに評価結果について述べる。

5.1 真円度測定実験系の基本構成

超多芯イメージファイバを導入したピーク点移動量計測法に基づく測距システム実験系の構成ならびに概観を、それぞれ図7、図8に示す。

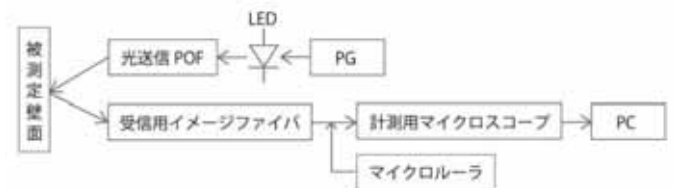
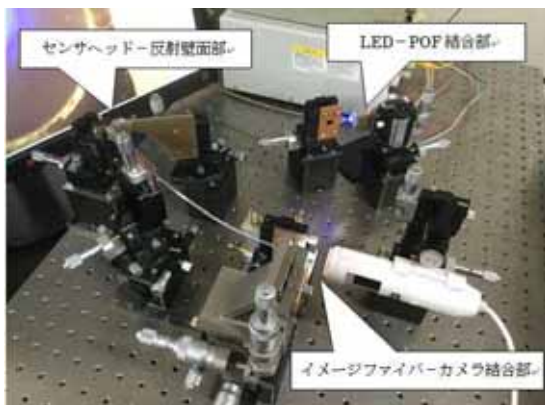
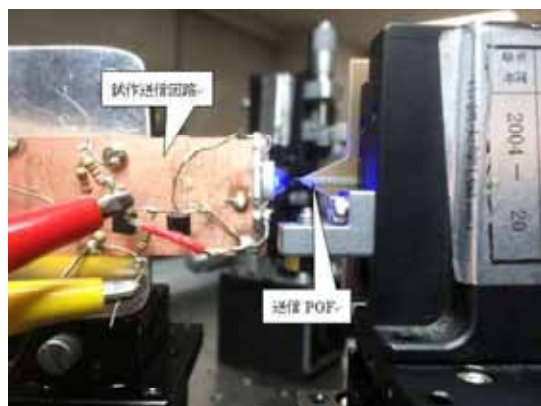


図7 ピーク点移動量計測による測距システム実験系の基本構成

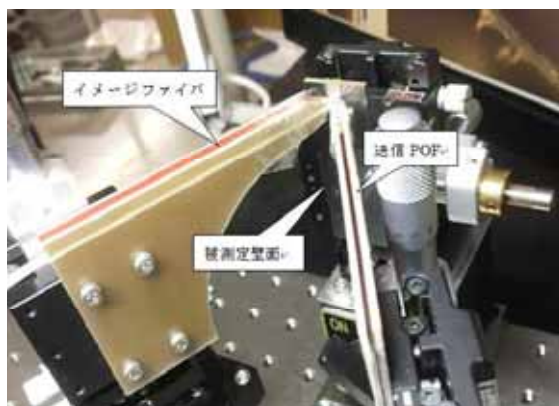
具体的には、図8に示すように光学実験定盤上に複数の精密光学移動台を配置することにより、送受光回路、単芯 POF、超多芯イメージファイバ、反射壁面板、計測用デジタルマイクロスコプなどを配置・固定して評価実験を実施した。被測定壁面には厚さ 2.0mm のステンレス板を採用した。LED からの送出光は光送信 POF を経て被測定壁面に放射される。その反射光は受光用超多芯イメージファイバに入射し、計測用マイクロスコプまで導かれる。最終的に超多芯イメージファイバ受端面を計測用マイクロスコプにてキャプチャした画像を PC に読み込み、画像解析を行うことで反射光の強度分布を数値化し、光のピーク点を計測する。また、イメージファイバの受端面と同一平面を形成する様、マイクロルーラ(最小目盛単位 0.050mm)を並置した。マイクロルーラの目盛を読み取り画像解析のリファレンスとして用い、最小測定単位の基準値を定めた。測定光については、安価な高輝度青色 LED を用いた。送出信号形式は受光レベルが安定して計測可能であれば良いことから単純矩形波信号とした。これにより、可視光下で低速度帯での計測が可能となり、測定動作の目視検証、使用部品の低廉化など多くの利点を得ることができた。



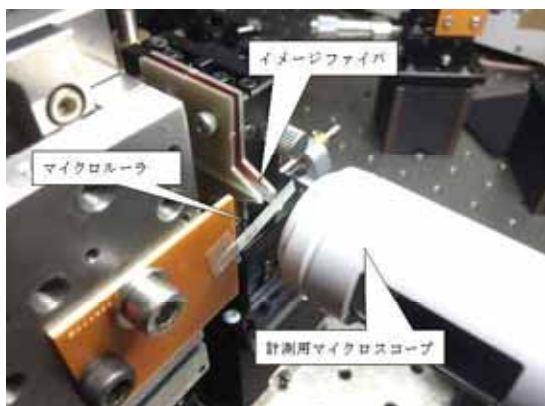
(a) 実験系全体



(b) LED - POF 結合部



(c) センサヘッド - 反射壁面部



(d) イメージファイバ - スコープ結合部

図 8 ピーク点移動量計測実験系の概観

5.2 実験結果

(1) イメージファイバを用いた反射光量分布測定

図 9 に示す画像は、超多芯イメージファイバにより送られた壁面反射光を計測用マイクロスコープでキャプチャしたものである。この画像を MATLAB を用いることによりグレースケール化したのち、輝度の強度分布プロファイルとしてプロットしたものが図 10 に示す三次元受光信号レベル分布解析結果である。

反射受光量レベルがピーク点を示す位置

$x = 1400$ における断面の y 軸方向の光強度分布を抽出した結果、図 11 に示す受光強度分布解析結果が得られた。

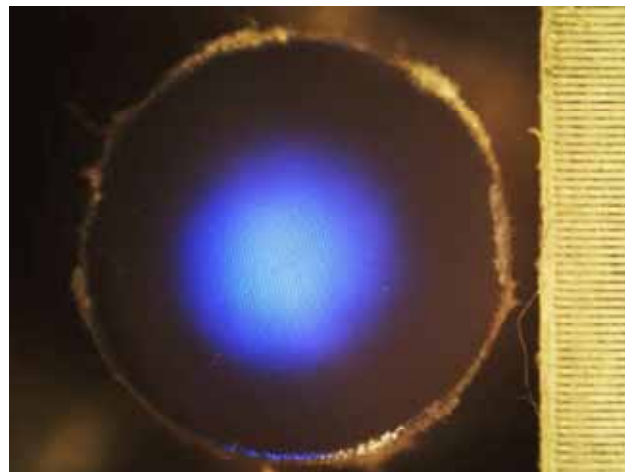


図 9 デジタルマイクロスコープによるイメージファイバ受光端面のキャプチャ画像

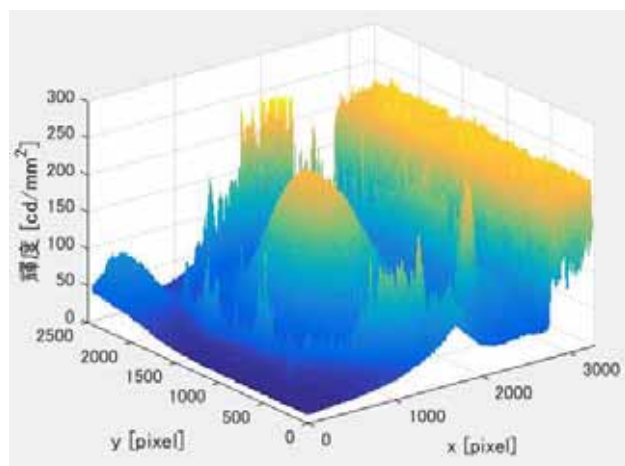


図 10 三次元反射光強度レベル解析結果

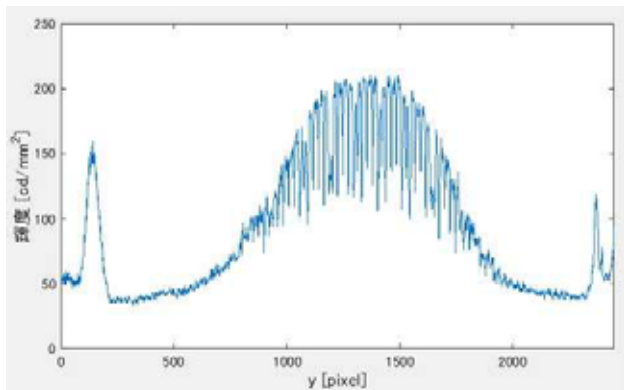


図 11 二次元反射光量分布の解析結果

図 9 のキャプチャ画像から超多芯イメージファイバを介した壁面反射光のマイクロスコプカメラまでの導光が可能であること、同画像に対する画像解析により、図 10、図 11 に示す反射光の受光強度分布が抽出可能であることなどが判明した。図 11 の解析結果は受光信号のピークレベル受信位置の精密測定が可能であることを示唆している。

(2) マイクロルーラのエッジ検出による測定精度の評価実験

超多芯イメージファイバ端面に並置したマイクロルーラをデジタルマイクロスコプにて撮像した画像を図 12 に示す。また、この画像からマイクロルーラ部分の輝度変化、即ちルーラの日盛エッジを抽出した画像解析結果を図 13 に示す。

図 13 に示す解析結果から、両端を除いた 54 個のマイクロルーラの日盛線のエッジが確認でき、図 12 のキャプチャ画像からもマイクロルーラの日盛線数は 54 個であり一致した。マイクロルーラの日盛線エッジ検出から測定原理の精度を評価する基準となる最小測定単位を決定する。エッジ検出では最も輝度の低い部分を日盛線の中心と判断した。n = 54 個の各日盛線が何個の pixel 数で構成されるかを計測し、1 日盛(0.05mm)あたりを pixel 数で分割して、その平均値をとったものを最小測定単位 X とすると、X は次式により求まる。

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = 0.0011 \quad (2)$$

式 (2) より、本実験系では 1pixel あたりおよそ

0.001mm となることが分かる。以後、本実験ではマイクロルーラから 1pixel あたりの長さを読み取ったものを最小測定単位の基準として計測を進める。ただし、ピーク点移動量計測の計算途中に最小測定単位を 0.001 として計算を行うと、数値の丸めによる誤差が大きくなる。一般的に計算途中では誤差を丸め誤差を最小限に抑えるため有効桁数+1 桁で計算を行う。(2)式では最小測定単位は 0.001mm としたが、数値計算上ではさらに下 1 桁、位を下げ 0.0011mm として計測を進めることとした。

エッジ抽出

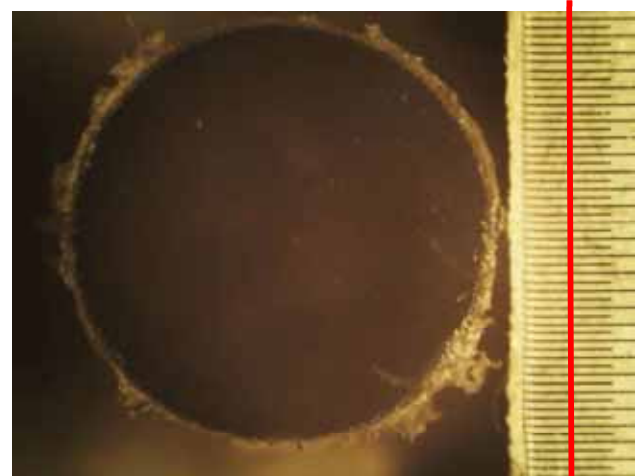


図 12 超多芯イメージファイバ(外径 2mm φ)とマイクロルーラ並置状況のキャプチャ画像

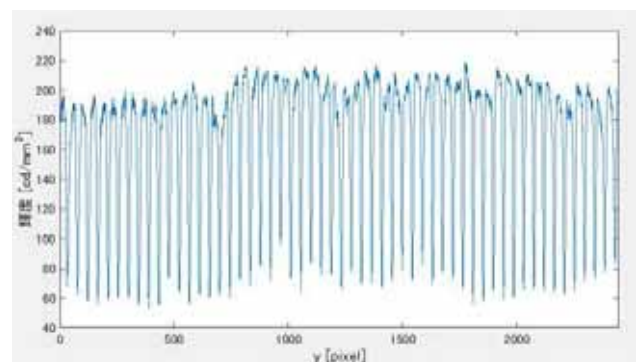


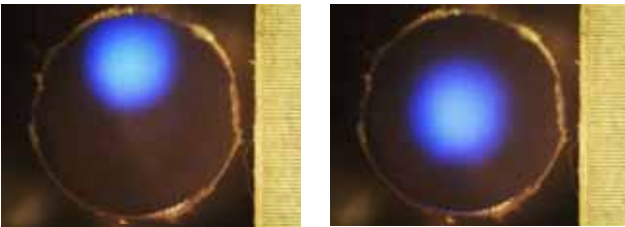
図 13 マイクロルーラ日盛のエッジ抽出結果

(3) イメージファイバを用いた反射光量ピーク点移動量計測

超多芯イメージファイバを導入した測定系を用いて、壁面変位に対する反射光量ピーク点移動量計測を実施した。壁面変位が生じる前(被測定壁面 A)のキャプチャ画像を図 14(a)に、壁面に変位を与

えた状態(被測定壁面 B)のキャプチャ画像を図 14 (b)に示した。

この評価実験において、壁面に与えた変位量は $\ell = 0.60\text{mm}$ であり、POF とイメージファイバの設置角度は $2\theta = 60$ 、また、目盛線の最小測定単位として扱う計算値は 0.0011mm である。ここでは、変位量 ℓ を理論値 X として扱う。二つの画像から反射光量のピーク点を解析したものを図 15 に示す。なお、これ以後、反射光量分布の視認性確保のため、ファイバ端のマイクロルーラ情報を除去し表示している。図 15 から反射光のピーク輝度部分が移動している様子が明確に判別できる。



(a)壁面変位 $\ell=0.00\text{mm}$ (b) 壁面変位量 $\ell=0.60\text{mm}$
図 14 壁面変位を与えた場合の
反射光キャプチャ画像

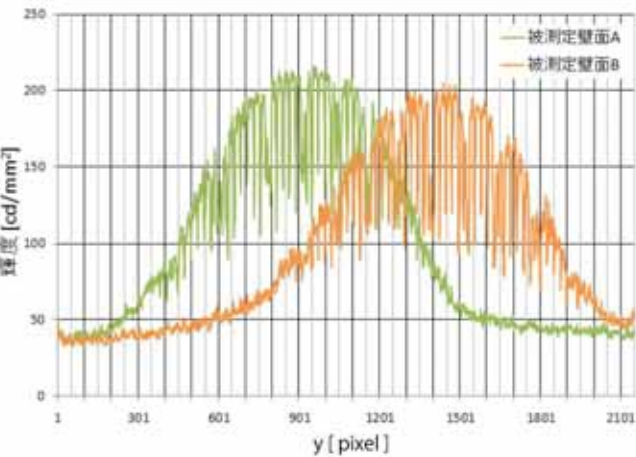


図 15 反射壁面変位に対するピーク点移動量計測結果

図 15 に示す結果は、壁面 A での反射光量分布に対し、壁面 B での反射光量分布は壁面の変位(距離微増)に伴い、その反射光量分布の最強度値が減少するとともに、反射光量分布幅が広がることを示している。同画像に対し FIR 型のローパスフィルタをかけた後、二つの反射光量分布のピーク

点を導出して、その移動量を求める。

測定系に与えた条件とピーク点移動量の計測結果を(1)式に代入することで壁面変位量を導出する。この条件下で行った実測結果を表 2 に示す。

表 2 ピーク位置変位量の実測結果

試行回数 n	計測値 x [mm]
1	0.543
2	0.578
3	0.564
4	0.581
5	0.588
6	0.597
7	0.545
8	0.523
9	0.588
10	0.559
合計	5.666
平均	0.567

表 2 の結果を元に、図 14 (a) (b) と同様の壁面変位を与えた実験画像 20 枚(試行回数 ($n = 10$))を用意し、その解析結果から計測値の平均値 $\bar{x}$ と理論値 ℓ の比較を行う。

表 2 より、計測値の平均値 $\bar{x}$ は、

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0.567 \quad (3)$$

と求まり、与えた壁面変位量との差異は、 0.04mm 以下となることが分かった。紙幅の関係から詳細は割愛するが、壁面変位量 $\ell = 0.60\text{mm}$ において 0.077mm の測定精度が保証されることも判明した。

5.3 真円度測定の高精度化に関する考察

前節までの検討により反射光量分布をとらえることができ、提案手法による壁面変位測距が有用であることが判明したが、光量分布端以外にもイメージファイバの縁端等に高輝度値が検出されて

いる．現時点での計測では，二次元的に反射光量分布のピーク点を解析しているため，ピーク点を誤検出する可能性は低い，今後，より高精度に解析を行うため三次元の反射光量分布からピーク点を計測するとした場合，反射光量ピーク点の検出を誤る可能性がある．よって，イメージファイバのエッジ検出を行った後に，その検出範囲内に限定したピーク点検出処理を行うような解析アルゴリズムが必須になると考えられる．

さらなる実験で，マイクロルーラが目盛線のエッジが検出できた．目盛線の検出は，真円度測定法において最小測定単位を決定する非常に重要な指標となる．しかし，マイクロルーラは素材がプラスチックで構成されているため，温度による膨張や，動的な加圧による形状変化などの影響を受けやすいことを念頭において，測定系を評価する必要がある．また，反射光量分布の二次元解析は壁面方向とマイクロルーラが目盛読み込み方向にずれが生じると，大きな誤差を生む要因となる．図 16 に超多芯イメージファイバによるピーク点移動量計測の三次元解析原理を示す．

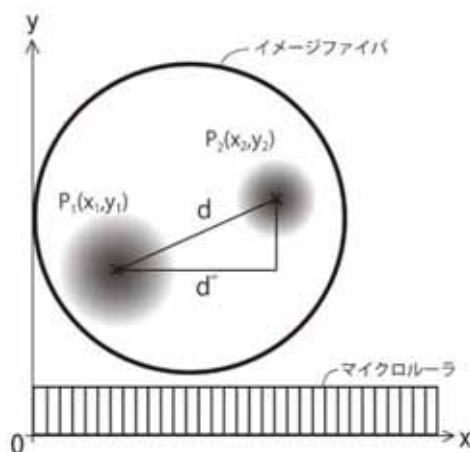


図 16 イメージファイバによるピーク点移動量計測の三次元解析原理

図 16 の三次元解析原理図では，壁面のある点における受光レベル分布を $f_1(x, y)$ ，他の点における受光レベル分布を $f_2(x, y)$ とすると，そのピーク点 $P_1(x_1, y_1)$ ， $P_2(x_2, y_2)$ はそれぞれ，(4)，(5) 式より求めることができる．

$$P_1(x_1, y_1) : \frac{\partial}{\partial x} f_1(x, y) = 0 \quad (4)$$

$$\text{and } \frac{\partial}{\partial y} f_1(x, y) = 0$$

$$P_2(x_2, y_2) : \frac{\partial}{\partial x} f_2(x, y) = 0 \quad (5)$$

$$\text{and } \frac{\partial}{\partial y} f_2(x, y) = 0$$

さらに，これら 2 つのピーク点間の距離 d は，次式 (6) により求められる．

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (6)$$

(6) 式から求められた値の円周方向成分が内壁面の真円性を低下させる成分値であり，ベクトル解析によってこの成分値は容易に算出可能である．今後は三次元軸上から反射光量分布のピーク点を検出する方法へと移行し，測距精度の向上をはかって行く必要がある．

これまで，超多芯イメージファイバを用いることにより変位量計測が可能であることを明らかにし，5.2 節末においてその測定精度は 0.077mm/0.60mm であることを明らかにした．しかし，同結果は或る測定範囲内に限定した測定結果を述べたに過ぎない．研磨時における加圧によるイメージファイバの塑性変形などを考慮すると，異なる壁面変位値域においては，必ずしも測定精度の推移が線形性を示すとは限らない．

本測定法における線形性の検証として，壁面変位量を細かく設定し，各変位量における測定精度の評価を行った．

図 17 (a)(b)(c)(d)(e)(f) に示す如く 0.20mm ずつ壁面変位を与えた場合のキャプチャ画像 60 枚 (試行回数 $(n = 10)$) を実験によりキャプチャし，計測値平均 $\bar{x}$ と理論値 l の比較を行った．その解析結果を図 18 に示す．

図 18 の解析結果より，壁面変位量の増加に伴って反射光量分布のピーク輝度値が低下し，裾の幅の広がることを確認した．

本測定結果の解析においては、FIR 型のローパスフィルタによってコア間暗部による信号を除去した上で、ピーク点移動量を解析し、実測データと理論値から、信頼性理論で定義された正確度 δ と精密度 ε を算出、最後に精度 τ を求め評価する。正確度 δ のばらつきを図 19 に、精密度 ε のばらつきを図 20 に、測定精度 τ のばらつきを図 21、表 3 にそれぞれ示す。

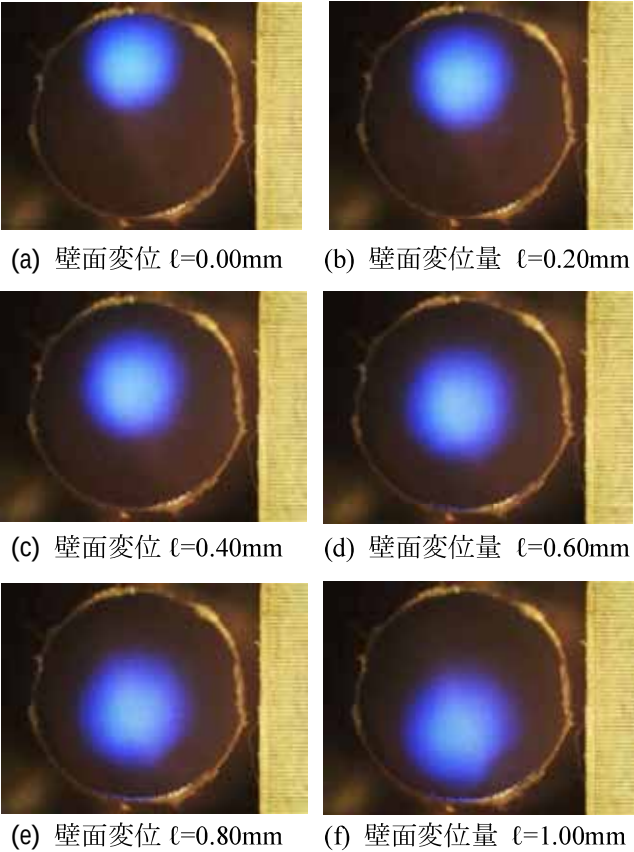


図 17 0.20mm 毎に壁面変位を与えた場合の反射光キャプチャ画像

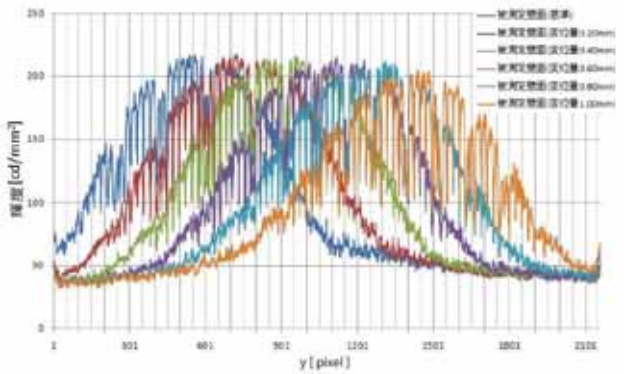


図 18 壁面変位量毎の反射光量分布ならびにピーク位置の解析結果

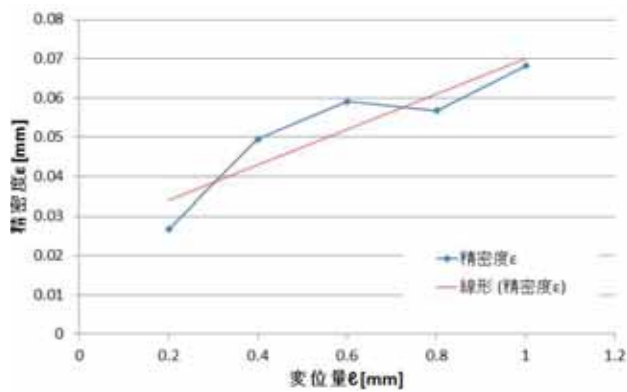


図 19 壁面変位量毎の精密度 ε のばらつき

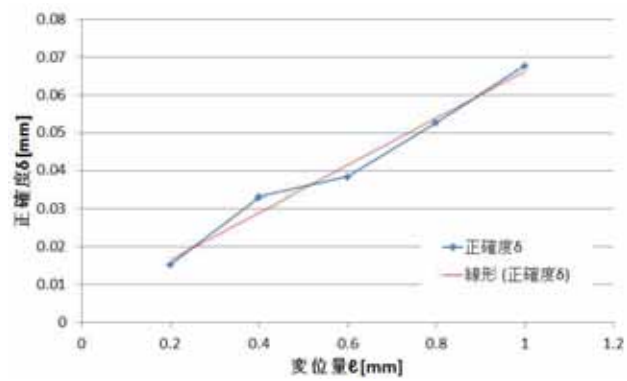


図 20 壁面変位量毎の正確度 δ のばらつき

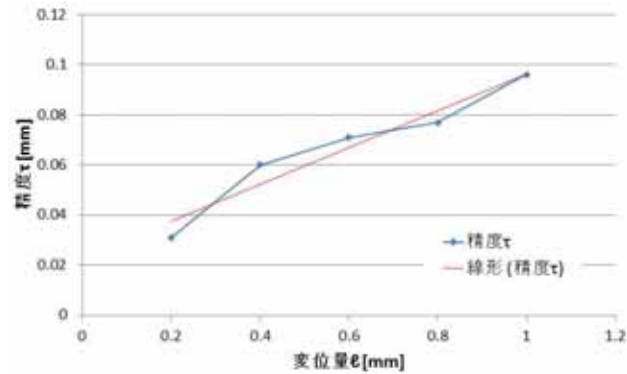


図 21 壁面変位量毎の測定精度 τ のばらつき

表 3 変位量毎の測定精度 τ のばらつき

壁面変位量 l [mm]	測定精度 τ [mm]
0.2	0.031
0.4	0.060
0.6	0.071
0.8	0.077
1.0	0.096

図 21の結果より，どの変位量においても，その測定精度はおおよそ線形性を示すと判断できる．測定精度のばらつきに対し，最小二乗法を用いて回帰直線を求め，変位量における測定精度を(7)式より算出する．

$$E(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 \quad (7)$$

表3の測定値のばらつきと壁面変位量より係数 a, b を求めると，回帰直線は，

$$y = 0.0735x + 0.0229 \quad (8)$$

と表すことができる．(8)式において $x = 1$ とすると，

$$y = 0.0964 \quad (9)$$

と求められることから，本測定法によれば壁面変位量 1.00mm に対し約 0.10mm の測定精度をもつものと判断できる．保証される範囲は今回計測を実施した変位量 $l = 1.00\text{mm}$ までの範囲である．同測定結果より，その線形性はさらに壁面変位量を増やした後も保たれると考えられる．これらのことから，ピーク点の検出が困難となるイメージファイバの端面外周部を除き，壁面変位が約 2.00mm 以内であれば反射壁面のピーク点移動量計測が可能であると判断できる．

6. 結論

今後急速に進展するであろう次世代自動車の基幹駆動源となる電気モータのステータを対象とした真円度測定法の研究を推進した．

本章では本研究で得られた一連の研究成果をまとめる．

6.1 本研究の推進方針ならびに研究成果

研究推進に当たり，下記の研究計画を立案し，概ねこの計画に従って研究を進めることができた．

- (i) 超多芯イメージファイバを用いた反射光量ピーク点移動量瞬時計測の提案
- (ii) 回転ステージ中心軸一壁面距離計測の提案
- (iii) LED 駆動の為に CML 回路の設計・構築
- (iv) POF とイメージファイバの端面研磨法の確立
- (v) POF とイメージファイバの最適対向角度の明

確化

- (vi) ピーク点移動量計測に適した定遅延量ノイズ除去デジタルフィルタの設計・構築

以下，各研究段階における主要な成果を以下に要約する．

- (i) 超多芯イメージファイバを用いた反射光量ピーク点移動量瞬時計測を提案することにより，PC 上での画像解析による反射光量ピーク点の検出とピーク点の移動量計測を瞬時に解析でき，測定時間の大幅な短縮を実現した．また，受光側ファイバを固定可能なセンサ方式としたため，外乱等によるセンサモジュールの物理的変位を排除でき，測定系の信頼度を向上させることができた．
- (ii) 回転ステージ中心軸一壁面距離計測を提案することで，JIS B 7451 真円度測定機に定義された半径法に従い，真円度測定の評価を可能とする計測系の構築に成功した．
- (iii) LED 光源駆動回路として CML 回路を構築したことにより，定電流特性を用いて安定な LED の駆動動作を実現した．また，電源側で LED 光の出力レベルを任意に設定できるため，被測定壁面の反射率に関わらず安定した反射光レベルの調整が可能となった．
- さらに，発光素子を LD から，可視光源の LED へと変更することにより，実験を容易化し安価なマイクロスコープによる反射光の受光レベル測定を可能とした．
- (iv) 卓上研磨加工機と 3D プリンタで作成したファイバ専用固定具を組み合わせることで，これまで困難であったプラスチックファイバの均一な平面研磨法を確立し，一様な POF 放出光の確保とイメージファイバによる反射光の安定的低損失伝搬を実現した．
- (v) 上記(iv)(v)で構築した回路と検案された POF を用いて，最適に反射光を確保するセンサヘッドの構成法を明確化した．
- (vi) FIR 型のローパスフィルタを作成し，反射光量分布に対し，正確にノイズを除去するフィル

タを作成した。同フィルタは反射光量ピーク点移動量計測の測定が反射光レベルに左右されないという特徴と、LED 送光回路で出力光レベルを調節できる構成を利用している。

以上述べたように、非接触型真円度測定法として提案した”反射光量ピーク点移動量計測法”の研究を推進し、最終的に測定最小単位として0.001mm、測定精度として0.10mm/1.00mmを達成することができた。本測定法は、測定用センサヘッドの構造、測定系全体の構成の簡便さなどを考え合わせても、工学的、産業的に大変優れた計測法であると考えられる。

6.2 今後の課題

今後検討すべき課題を以下に列挙する。

(i) イメージファイバを用いたピーク点移動量瞬時計測に関する課題

(ii) 回転ステージ壁面距離計測に関する課題

これらの中、(i)項に関し、本論文ではイメージファイバを用いた反射光量ピーク点移動量瞬時計測についての最小測定単位、測定精度、適用可能範囲を述べたが、今回実証実験を行う際に与えた壁面変位量に対し、その精度の線形性を確認したのは1.00mmの範囲である。イメージファイバの端面の直径は2.50mmあるため、今回実験を行った最大変位量よりも多くの壁面変位量に対応することが理論的に可能である。しかし、イメージファイバには研磨加工に伴う加圧により、ファイバ内に歪みが生じている可能性がある。よって、壁面の変位量をさらに増やし、その測定精度の評価を行った場合の精度のばらつきが線形性を示すかどうか確認しておくことが重要となる。

反射光量分布の二次元解析は壁面方向とマイクロルーラの見盛読み込み方向にずれが生じると、大きな誤差を生む要因となる。そこで、今後は三次元軸上から反射光量分布のピーク点を検出する方法をとるのが望ましい。しかし、イメージファイバの端やマイクロルーラの輝度値と、反射光量分布のピーク点の誤検出には特段の注意を要する。

その解決策として、イメージファイバのエッジ検出を行った後に、その範囲内だけでピーク点検出処理を行うような解析アルゴリズムの提案が考えられる。また、マイクロルーラは、プラスチック素材で構成されているため、温度変動による膨張収縮や、加圧による形状変化などを受けやすい。これらの点に留意し、測定系を改良していく必要がある。

(ii)項について本論文では、反射光量ピーク点移動量計測原理を応用し、回転ステージ中心軸と壁面の距離を計測する技術を提案したが、まずは測定精度の低下の原因を解消する必要がある。大幅に測定精度が低下した原因として特に挙げられるのが、測定系を構築する際のPOF放射光の壁面に対する反射点と垂線をなすイメージファイバの端を、完全に一致するよう設置することが実証実験では極めて困難なことである。そのため、測定系構築における人の手による誤差を極力解消する方法、もしくは構築の際に誤差が生じにくいような測定系構成法に改良し、測定系構築の不確かさを排除した状態にて測定精度を評価する必要がある。

また、イメージファイバの端の位置を検出する際に、イメージファイバとファイバ外の位置の区別が困難であるため、イメージファイバの端検出のアルゴリズムを提案する必要がある。

今後は提案手法による真円度測定系の構築を行い、最小測定単位、測定可能範囲、測定精度などをより詳細・厳密に評価し、検証していくことが重要である。

7. おわりに

非接触の高精度真円度測定法として、新たに超多芯イメージファイバを用いる方法を提案した。基本実験の結果、20 μ m程度の測定精度が得られることが判明し、経済的に測定系を構築することが可能となることも明確となった。

今後、検討すべき課題は測定系構成法の具体化、測定系構築並びにこれを用いた測定精度、所用測

定時間の評価などである。

本研究は経済産業省の戦略的基盤技術高度化支援事業助成を得て推進したものである。

【参考文献】

- [1] “次世代自動車戦略 2014”，経済産業省, 014.11,
<http://www.meti.go.jp/press/2014/11/20141117003/20141117003-A.pdf>
- [2] 鈴木正慶, 中津道徳, 永井義明, “自動車産業の未来と中部圏”, 中部大学経済研究所紀要, Vol1.21, 2011.
- [3] 吉田健一郎, “EV・PHV 普及に向けた経済産業省の取組について”, 経済産業省, 2015.6.8,
<http://www.chademo.com/wp/pdf/japan/2015GA/2015GAMETI.pdf>
- [4] 森川渡, “分割コア式ワークの巻線方法, 巻治具, 保持治具, および分割コア式ワーク”. 特開 2012-039830, 2012.
- [5] 田中佑育, “POF を用いた高精度非接触真円度測定法に関する研究”, 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, F4-1, 2014. 9. 9.
- [6] 籠橋慧, “POF を用いた高精度非接触真円度測定法に関する研究”, 卒業論文, 2015.
- [7] 川島信, “同軸型プラスチックファイバを用いた高精度真円度測定法”, 情報科学研究ジャーナル論文, Vol. 20, pp, 43-52, 2013. 3.
- [8] 川島信, “超多芯イメージファイバを用いた高精度非接触真円度測定法”, 情報科学研究ジャーナル論文, Vol. 21, pp, 75-76, 2014. 3.
- [9] 田中佑育, “POF を用いた高精度非接触真円度測定法に関する研究”, 信学技報, vol. 115, no. 212, MICT2015-33, pp. 9-14, 2015. 9.
- [10] “調査・統計 EV 等 保有台数統計”, 一般社団法人 次世代自動車復興センター, 2015,
<http://www.cev-pc.or.jp/tokei/hanbai.html>
- [11] “JIS B 745 真円度測定器”, 日本工業標準調査会, 1997. 11. 20.
- [12] “JIS B 062 幾何偏差の定義及び表示”, 日本工業標準調査会, 1984. 2. 1.
- [13] “精密機器の豆知識 真円度測定器編”, mitutoyo, <http://mitutoyo.co.jp/products/shinen/menu/shinen.pdf>.
- [14] “ZIS Z 8103 計測用語”, 日本工業標準調査会, 2000, 7, 20.
- [15] 蒲和也, “同軸マルチコア POF を用いた光回転リンクジョイントの構成法に関する研究”, 修士論文, 2011.

- [16] “Xeon 3 Power Blue Star LED OSB5XNE3C1S VER C.2 datasheet”, 浜松フォトニクス,
http://akizukidenshi.com/download/ds/optosupply/OSB5XNE3C1S_ver_c2.pdf



川島 信

情報工学科教授
IoT に向けたセンサー
ネットワークシステム,
エネルギーハーベスティング
技術等の研究・実用化
に従事



田中祐育

情報工学専攻
プラスチックファイバを
用いた高精度非接触真円
度測定法について計測原
理・アルゴリズムの研究,
計測システムの構築
ならびに実証実験の推進
に従事

【付録】

A. 被測定物壁面反射光の受光法

被測定物からの反射光の検出機構として考えられる測定法を表 A.1 に列挙する．各測定法の特徴を比較した後，真円度測定系において最適なものを選定する．

表 A.1 反射光の受光機構技術の比較

	ファイバ移動	ファイバアレイ	イメージファイバ
最小測定単位 (分解能)	0.5 μ m ◎	250 μ m △	基準とする目盛と カメラの画素数に 左右される ○
センサヘッド サイズ	○	○	△
計測時間	二分木探索などを用いてピーク点を算出する必要あり △	一度の計測でピーク点計測可能 ◎	一度の計測でピーク点計測可能 ◎
測定系による 測定誤差	ヒステリシスを持つ ×	移動誤差がない 複数PDによる個体差 ×	移動誤差がない ◎
測定系構築の 容易度	容易 ◎	コア-PD間の設計が極めて困難 ×	容易 ◎
総合評価	△	△	◎

受光ファイバを微細移動させるために New Scale Technologies 社の M3-L を用いた．この微細移動駆動素子は 0.5 μ m 精度で受光ファイバを移動させることが可能な機構デバイスである．しかしながら，M3-L はヒステリシス特性を持つため，ピーク点計測を繰り返すうちに移動誤差が生じると考えられる．これに対しファイバアレイは，受光側のファイバを移動する必要がないため，移動誤差が生じないという特徴を持つ．しかし，受光した光強度レベルを計測するための PD が複数個必要な為，各 PD の個体差による誤差が生じると考えられる．一方，イメージファイバは受光部を移動させる必要がないため，測定系による誤差発生は極小と考えられる．また，イメージファイバを通して得られた光の強度分布はカメラでキャプチャされ，ピーク点やピーク点の移動量計測を PC 上で解析するため，計測時間が極めて短い時間となるという特徴を持つ．以上の検討結果から提案真円度測定系では受光側の検出ファイバとして超多芯イメージファイバを用いる方法を提案する．

B. 真円度測定系に適用可能なプラスチック光ファイバ

B.1 送光用プラスチックファイバ

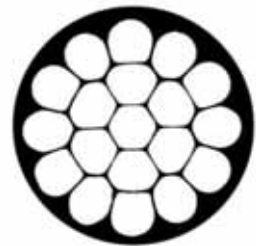
真円度測定系で光送信導波路として使用する POF の詳細を表 B.1 に示し，POF の概観を図 B.1 に示す．

表 B.1 送光用プラスチックファイバの仕様

項目	詳細
型番	SMCN-750P-6
メーカー	旭化成イーマテリアルズ
コア材	PMMA
クラッド材	フッ素化ポリマー
構造	SI
コア数	19(マルチコア)
開口数	0.5
直径	1



(a) POF の概観



(b) POF 断面のイメージ図

図 B.1 POF の概要

本プラスチックファイバ (POF) は，樹脂被膜径が 0.25mm，コア径が 0.75mm のものである．このサイズの POF の利点として端面に多少の汚れや傷，光軸のずれがあっても光の伝送が可能である特徴が挙げられる．信号の減衰が大きく長距離伝送には向かないという一面もあるが，真円度測定系において用いる POF の長さはせいぜい 200mm~300mm 程度と短いため，信号の減衰は無視できる．

B.2 受光用超多芯プラスチックイメージファイバ

反射光の受信光導波路として使用するイメージファイバについて記述する．イメージファイバとは画像伝送用の超多芯のコアの集合体からなるフ

ファイバである．通常の POF と比較すると直径 2.5mm と太く，若干可撓性能が低下するものの，試作小型センサヘッドを形成するうえでは特に問題となることはない．受光側にイメージファイバを固定し計測を実施するため，例えば，ピーク点移動量計測のピーク点を受光側に POF を設置して探索した場合と比べると，受光 POF 位置移動に伴う誤差発生が基本的に存在しないという特徴を持つ．受光側のファイバの移動誤差を排除することで，測定系の信頼度を向上させることができる．使用するイメージファイバの詳細を表 B.2 に，その概観を図 B.2 に示す．

表 B.2 イメージファイバの詳細

項目	詳細
型番	MBI-2500
メーカー	旭化成イーマテリアルズ
ファイバ径	2.5mm
コア数	7400 芯
開口数	0.5



図 B.2 超多芯イメージファイバの概観

C. プラスチックイメージファイバの端面研磨法

POF とイメージファイバの端面研磨法について記述する．未研磨の POF とイメージファイバにより LED 光の送光，反射光量の計測を進めた場合，各ファイバ端面の無数の傷により反射光強度の低下，強度分布に予想できないノイズが発生し著しく S/N 比が低下する．これらの影響を回避するため特に超多芯イメージファイバについてはその端面を卓上半自動研磨機を用いた端面研磨を施す必要がある．研磨加工機はマルトー社製卓上半自動研磨機 ML-150P を使用，POF とイメージファイバを固定するために mojoTM3D プリンタを用いて固定具を作成し研磨を施した．

ファイバの端面研磨では，まず，研磨加工機の回転ステージ上に使用する研磨用紙をテープで接着させる．次に黄銅の固定器の中心にイメージファイバの型が合うように 3D プリンタで作成した固定具を装着しその中心にイメージファイバを固定する．そして，水流の下で研磨加工機を低速で回転させつつイメージファイバの端面を研磨する．研磨用紙は順に粒度の低いものから高いものへと変えてゆきながら慎重に端面研磨を行う必要がある．