

MEASUREMENT OF THE INNER 3D SHAPE OF ACCELERATOR CAVITIES

Kazuhiro Enami^{1,A)}, Tatsuya Kume^{A)}, Yasuo Higashi^{A)}, Kenji Ueno^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract (英語)

We strive to develop a 3D coordinate measuring machine, which can measure the inner shape of an accelerator cavity with a complex shape without contact. Currently, the ILC (International Linear Collider) project is progressing through international collaboration. The major goal of ILC is to produce and investigate Higgs bosons. ILC consists of two linear accelerators facing each other, and will hurl some 10 billion electrons and positrons toward each other at nearly the speed of light^[1]. The cavity is an important component to accelerate particles to near light speed. A cavity's inner 3D shape influences the accelerating performance. Therefore, it is important to measure the inner 3D shape of a cavity. However, it is difficult to measure the inner shape of cavities with complex shapes. We are developing a highly accurate, inner shape measuring machine using triangulation method.

加速管の内部三次元形状の測定

1. はじめに

本研究の目的は、超伝導加速管の内面の三次元形状の非接触測定である。

超伝導加速空洞は、一般的にハーフセルを溶接することで作製されている。ハーフセルの段階ではその形状測定が可能であるが、赤道部を溶接してセルとなった状態ではその内部形状は測定できない。また、現在開発中のシームレス加速管(Fig.1)は、パイプからハイドロフォーミングで一体成型するもので、コスト削減や信頼性向上の利点があるが、最初から最後まで内部形状は測定不可能である。内部三次元形状を得るためには、三次元測定機を用いて外部形状を測定し、これに超音波厚さ測定の数値を加える手法も考えられるが、アイリス部では厚さ測定が困難であることや、三次元測定機での外部形状の測定が困難、時間がかかる。加速管の姿勢変化によるたわみ検出が困難、加速管がジャケット等でおおわれている場合には測定できない。といった問題がある。そこで、画像測定を用いた非接触測定プローブを加速管内に挿入し、内部から直接三次元形状を測定する装置を考案し、開発・測定実験をおこなう。

2. 開発の流れ

加速管の内部の三次元形状の開発の概要について述べる。目標精度は0.1mmとし、この精度で加速管内部全面を非接触で三次元形状測定する。以下に、開発の流れとその課題について述べる (Fig.2)

1. レーザによる距離測定の開発(一次元測定)
 - (ア) 測定原理の確認
 - (イ) 測定精度・信頼性の確保
2. 測定ユニット回転による断面測定(二次元測定).
 - (ア) 二次元形状の導出
 - (イ) 二次元形状キャリブレーション
3. 測定ユニットを回転軸にそって直進させることによる全面の測定(三次元測定).
 - (ア) 測定ユニットの小型化
 - (イ) 三次元形状キャリブレーション

最終的な加速管測定装置の概要はFig.5のようになる。加速管を固定し、測定ユニットを挿入して測定する。これにより、据え付けられた状態の加速管でも測定可能、重力によるたわみも測定可能という利点がある。



Fig. 1. Seamless three-cell cavities made by necking and hydroforming (test modules made of copper).

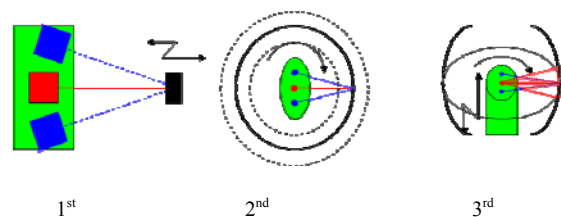


Fig. 2. Development Plan (Red: laser, Blue: camera)

¹ E-mail: gakkai@kasokuki.com

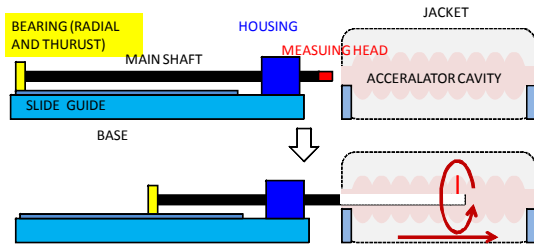


Fig. 3 9-cells measuring system

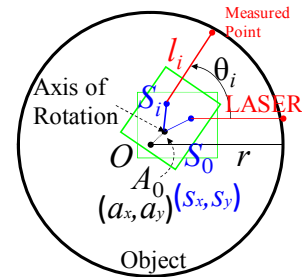


Fig. 5. Parameters to be considered.

3. 距離測定

測定原理として、カメラ-レーザを用いた三角測量法を採用する。本方法は、非接触測定が可能で測定範囲が広く、表面物性に左右されない利点がある。

三角測量は、原理的にカメラからレーザまでの基線長が長いほど精度が向上する。しかし、内部形状測定のためには測定システムを加速管内部に挿入する必要がある。このため基線長を大きくとり精度を上げることが困難である。そこで、短い基線長でも精度を維持するため、サブピクセル演算と誤差キャンセリングを採用した。誤差キャンセリングとは、レーザをはさんで対向するカメラの測定誤差は負の相関があることを利用して、誤差をキャンセリングするものである、実験の結果、最も測定精度の悪化する領域でも0.7mm以下の分解能を得た(Fig.4)^[2]。

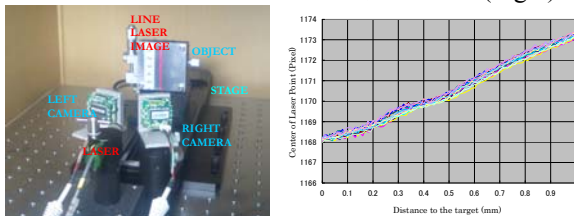


Fig. 4. Experimental setup and result

4. 二次元断面測定

前章の距離測定装置をユニット化して回転させることで、断面の形状が測定可能になる。

理想的には測定された距離を l 、与えた回転角を θ とすると、測定された点の座標は $(l\cos\theta, l\sin\theta)$ となるが、実際には回転中心と測定原点はずれており、このずれベクトルがわからないと正しく座標を求める事ができない(Fig.5)。そこで、円筒アーティファクトの測定による校正手法を考案した(Fig.6)。Fig.7(left)は $\phi 100\text{mm}$ のアーティファクトを測定したデータである。左上部の変形は、測定ユニット原点、測定ユニットの回転中心、アーティファクトの中心がそれぞれ一致しないことに起因するものである。ここで、このデータがアーティファクトの既知の直径に一致するよう、パラメータを求め、再構築したデータがFig.7(middle)である。生データの歪みは除去され、アーティファクトの円形状が再現されている。次に、このパラメータを用いて $\phi 150\text{mm}$ のアーティファクトを測定した。結果をFig.7(right)に示す。その形状が測定できていることが示されている。



Fig. 6. Cylindrical artefacts and experimental setup.

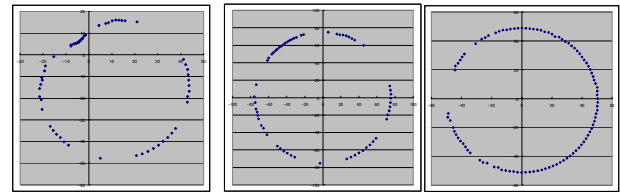


Fig. 7. Calibration Result: Raw data (Left) and reconstructed data (Middle) and Measurement result (Right)

5. 三次元形状測定

本章では、シングルシームレス加速管の三次元形状測定をおこなう。本実験のためにシングルセル測定装置を開発した(Fig.8)。構造は、縦型門型構造を採用した。回転・直進が可能なボールスプラインを主軸とし、先端に設置した測定ユニットをセル内に挿入して測定する。

アイリス部から挿入可能な測定ユニットを作成した。カメラの光軸をミラーで折り曲げることで $\phi 72\text{mm}$ のサイズに抑えながら、基線長を大きくとっている。

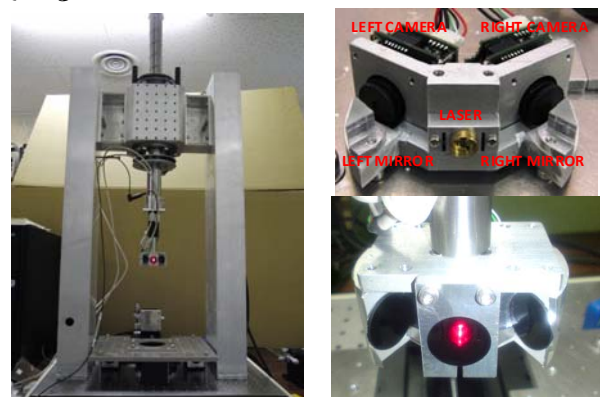


Fig. 8. Left: One-cell measuring machine (Left). Measuring Head (Top: bare, Bottom: with ND filter and light shielding cover).

測定の手順は以下のようになる

1. 測定ユニットの校正：測定ユニットの作成時に一度実行する。
2. アーティファクト校正：測定ユニットを測定機本体に取り付けた時点で実行する
3. セルの三次元測定

前章では二次元のアーティファクト校正をおこなったが、セル測定ではアーティファクト校正を三次元に拡張し、測定器の三次元校正をおこなった^[3]。

この校正されたパラメータをもとに、シングルセルの測定実験をおこなった(Fig.9)。Fig.10 に測定結果を示す。格子点が欠けている箇所は、測定に失敗した箇所である。これは、レーザスポット像が正しくカメラで捉えられないためにおこる現象である。取得に失敗した点はあるものの、シームレス加速管の内部形状は取得できている。

Fig.11 は、測定信頼性をマッピングしたものである。本測定は誤差キャンセリングのためカメラを2台装備しており、両カメラの距離出力の差が小さければ信頼性が高いといえる。出力差の絶対値 d をとり、以下のようにマッピングした。

- 青： $0\text{mm} < d < 0.2\text{mm}$
- 緑： $0.2\text{mm} < d < 0.4\text{mm}$
- 黄： $0.4\text{mm} < d$
- 赤：片方測定不能
- 欠：両方測定不能

なお、本システムは誤差キャンセリングシステムを採用し、左右カメラの誤差がキャンセルされるようになっている。従って、両カメラの出力差が大きい事が、必ずしも最終的な出力の誤差が大きいことを意味しない。ただし、片方測定不能の赤い格子の点では、出力誤差も大きくなる。軸方向に対する半径の増加率 $\Delta R/\Delta Z$ が大きくなるほど、測定の信頼性が落ちていることがわかる。赤道部とアイリス部では信頼性が高いことがわかる。このため、同軸度等は高精度で測定できることが期待できる。今後、三次元測定機による測定結果との比較による精度確認をおこなう。



Fig. 9. Seamless cavity (Nb/Cu clad) left: inside of the cavity

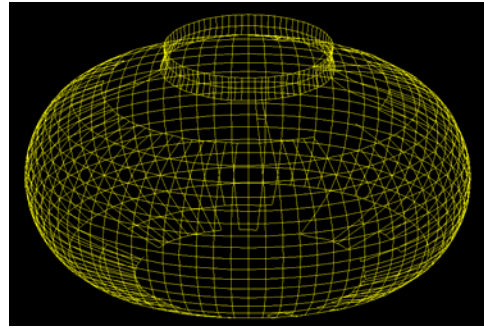


Fig. 10. Measured 3D data (Null points are failed to be measured)

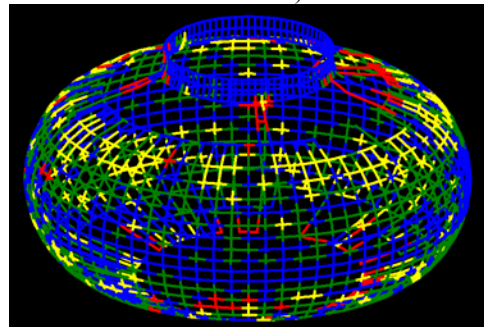


Fig. 11. Reliability map (Blue: $d < 0.2\text{mm}$, Green: $0.2\text{mm} < d < 0.4\text{mm}$, Yellow: $0.4\text{mm} < d$, Red: One-side Measured, Null: Failed to measure)

6. 結論・展望

加速管の内部三次元形状測定装置の考案・開発をおこなった。本報までで、レーザを用いた三角測量法で加速管の内部形状測定が可能であることを示し、1セルの内部形状測定をおこなった。現在、Fig.3に示す横型の9セル測定器を開発中であり、これを用いて多連空洞の測定を目指す。

参考文献

- [1] International Linea Collider Communication
site: <http://www.linearcollider.org/cms/>
- [2] K.ENAMI, T.KUME, Y.HIGASHI, K.UENO, “Development of inner 3D Shape non-contact measurement system for bellows pipe 3rd report”, 2007 JSPE spring conference, pp. 1153-1154, Kanagawa, Japan, March. 2007.
- [2] K.ENAMI, T.KUME, Y.HIGASHI, K.UENO, “Development of inner 3D Shape non-contact measurement system for bellows pipe 5th report”, 2008 JSPE autumn conference, pp. 293-294, Sendai, Japan, Nov. 2008.