

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007 ～ 2008

課題番号：19860281

研究課題名（和文） 複雑な管状構造物の内面形状非接触測定装置の開発

研究課題名（英文） 3D MEASUREMENT OF INTERNAL SHAPE OF COMPLEX SHAPED PIPE OBJECT

研究代表者

江並 和宏 (ENAMI KAZUHIRO)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・機械工学センター・助教

研究者番号：00370073

研究成果の概要：

本研究では加速管空洞の内部三次元形状測定装置の開発をおこなった。これは、電子-陽電子衝突実験用の直線加速器に用いる加速管空洞の内部三次元形状を0.1mmの精度で測定する装置である。加速管の1ユニットは、セルと呼ばれる単位空洞が9個連なった串団子状の複雑なベロー形状をもつ。その長さは約1000mm以上、直径は絞り・開口部φ80mm、赤道部φ210mmと大きく変化する。従来の手法では内部形状を測定できないため、管内に挿入する三次元形状測定器の開発を行った。

最初に基礎研究としてレーザを用いた距離測定の精度、信頼性向上をおこない、アーティファクト校正を用いた2次元形状の精密測定をおこなった。この結果をもとに、三次元測定可能な装置の製作・実験を行った。1セル測定装置を開発して内部形状が測定できることを確認し、ここで得られた知見をもとに、9連セルの測定装置を製作した。

これにより、加速管の開発に寄与し、ひいては高エネルギー物理学の発展に寄与できる。

また、本研究は工業的にも意義がある。CMMを始めとする現在の三次元形状測定は、殆どが対象の外部形状を測定する物である。比較的大型の複雑な形状を持つ工業製品の内部形状測定の需要は存在しており、本研究はそのような需要に応えられる。

通常、三次元測定器は、剛性を持たせ、恒温室等の環境で使用する事で精度を保証する。しかし、内部測定では剛性を保つことは困難で、可搬型で恒温室以外の環境でも測定するため、精度を保つことが困難となる。そこで、現場で校正を行い、三次元座標系を構築する円筒アーティファクト三次元校正システムを考案した。この結果、精度が向上する、環境の変化に強い、測定時に精密位置決めを必要としない、測定対象に比べて装置が小型になる等の利点が得られた。これは、多関節型CMMの精度・信頼性向上にも適用できる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,000,000	0	1,000,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	1,800,000	240,000	2,040,000

研究分野：精密測定

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：精密測定、三次元形状測定、非接触測定

1. 研究開始当初の背景

現在、世界共同で進められている国際リニアコライダー(ILC)計画では、電子・陽電子衝突実

験のため電子・陽電子を500GeV以上まで加速する超伝導加速管の開発をおこなっている。

2. 研究の目的

加速管の加速性能は以下の内部形状

- 1) サブミリメートルのマクロ形状
 - 2) サブマイクロメートルの表面物性
- によって左右される

1)は成形, 2)は研磨処理によって決定される
本研究は 1)の測定を目的とする. このとき,
0.1mm 程度の精度が要求される.

従来の加速管製作は,

- 1) ハーフセルの段階で接触三次元測定
- 2) ハーフセルを溶接して外面の三次元測定
- 3) 内面を電解・化学研磨.

というプロセスである, 現在開発中のシームレス加速管では一体成形のため, 従来の手法では三次元測定は不可能である. また, 最終段階での内面形状計測はおこなっていない.

現在, 加速管の内部形状測定に関しては

- 1) 三次元測定機で外部形状を測定し, 超音波測定による厚さデータを加えて内部形状とする.
 - 2) 半割にして内部を三次元測定機で測定
- の2種の測定手法を用いているが, それぞれ
- 1) 直接に内部形状を測定できない. 局所的な分布が測定できない.
 - 2) 全数検査ができない.
- という問題が生じている.

3. 研究の方法

本装置は, レーザを使って1次元測定器をおこない, これを回転させて2次元断面形状を測定し, 次いで回転軸の方向に直動させることで3次元内部形状を測定する. 研究も, この3プロセスに対応して3つの段階に分けておこなう

- 1) 距離測定装置の開発(1次元)
レーザ光を利用して距離測定をおこなう
- 2) 断面形状測定装置の開発(2次元)
上記のシステムをユニット化する. これを回転させて断面形状を得る
- 3) 三次元内部形状測定装置の開発(3次元)
測定ユニットをZ軸方向に移動させ, 内部三次元形状測定をおこなう.

上記の構成を選択した理由を以下に述べる.

目標は, Figure 1 で示した形状をもつ加速管の内部形状が測定できる装置の開発である. (a), (b)ともに高加速勾配の加速管であり, ILC 計画の採用候補となっている. (b)は(a)と比較して, 高加速勾配である. しかし,

- 軸に垂直な面がある.
- 直径(ϕ 約 210mm)に比して絞り部が狭い(ϕ 60mm)

という特徴があり, 測定面では不利である. この(b)を測定できれば(a)も測定可能なため, (b)タイプの測定可能な測定装置を目指す.

目標スペックを以下に示す.

○0.1mm 以下の測定精度

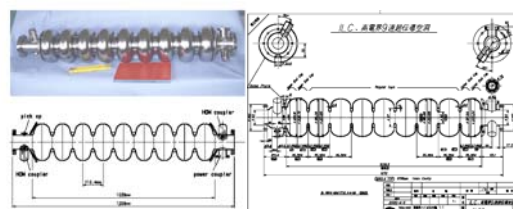
○非接触測定(測定面に傷をつけないため)

○ ϕ 60mm から ϕ 210mm の測定範囲

測定手法はレーザスリット光による三角測量を採用する. 比較的安価で, 高速な測定が可能なためである.

レーザスリットを用いた三角測量で内部を測定する配置はスリット光を回転させる手法とリングビームを軸方向に移動させる手法の2種類が考えられる(Fig.2). リングビーム法では, 軸に垂直に近い面の測定が不可能となるほか, カメラの死角が存在する. 一方, スリット光回転法は, 扇状に射出するスリット光を用いることで軸に垂直な面も測定でき, 基本的に円形を測定することになるため死角も存在しない. そこで, スリット回転法を採用することとする.

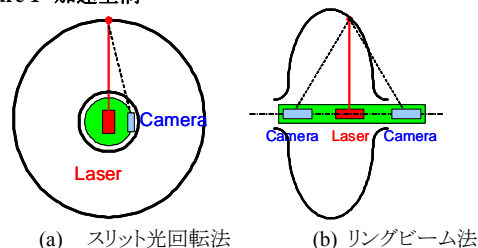
スリット光を一回転するだけでは測定範囲をカバーできないため, 軸方向の直動も加えて直動一回転の2軸をスキャンする.



(a) Tesla-Type

(b) Ichiro 空洞

Figure 1 加速空洞



(a) スリット光回転法

(b) リングビーム法

Figure 2 加速空洞測定装置

4. 研究成果

研究の各段階における主な成果を述べる.

距離測定装置の開発(1次元)

1.1.1 測定原理および精度の確認実験

加速管の内面測定に三角測量を用いる問題点として, 装置を ϕ 60mm におさめるという物理的制約のため, レーザ-カメラ間の基線長を大きく取ることが不可能であり, そのため測定分解能が制限されるという問題点がある. 測定分解能の向上のためサブピクセル演算をおこなうこととし, これによって目標とする測定分解能 0.1mm を達成できる事を確認するため, 以下に示す装置を用いて基礎実験をおこなった.

光学機器および測定ターゲットの配置は, 実際の加速管内面測定を想定しておこなった. 測

定システム及び条件の概要を Figure 3 に示す。レーザー-カメラ間の距離を 30mm とし、レーザー光軸に水平に移動する電動ステージ上に被測定物を配置した。基線から被測定物までの距離を X とし、X=30, 80, 130 の位置で被測定物を 20 μ m 間隔で 1mm 移動させ、このときのレーザー中心の画面状のピクセル位置を記録した。サブピクセル演算により、1 ピクセル以下の精度でレーザー中心位置を算出した。

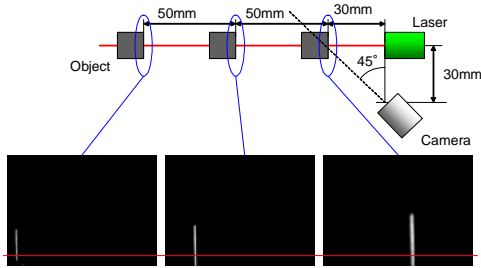


Figure 3 測定システムと取得画像

測定の結果を Figure 4 に示す。サブピクセル演算により、1 ピクセル以下の移動量も測定できていることがわかる。測定結果の傾きと標準偏差及び、標準偏差の 2 倍を傾きで割って測定分解能とした表を Table 1 に示す。測定点が遠くなるにつれ、画像上のピクセル移動量が小さくなり、それにともない測定分解能も低下している。しかし、最も悪い最外部でも、目標とする測定分解能 0.1mm を満たしている。このことから、本測定システムは、0.1mm の測定分解能で内部形状測定をおこなう能力を有していることが示せた。

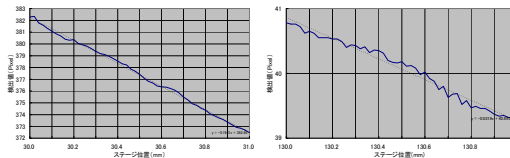


Figure 4 X=30, X=130 の実験結果

Table 1 測定分解能

X (mm)	30	80	130
傾き(Pixel/mm)	9.8	2.6	1.6
標準偏差(Pixel)	0.15	0.089	0.070
測定分解能(mm)	0.030	0.070	0.088

1.1.2 成果

提案するレーザーを使った三角測量法が、サブピクセル演算との併用により ILC 用の加速管内部形状非接触測定装置に適用可能な測定分解能を有することを示した。

測定精度, 信頼性の向上

1.2.1 カメラを 2 台用いた誤差の低減

基本原理をもちいて 0.1mm の分解能での測

定が可能であることを示したが、実機に組み込むことで測定条件が悪化することから、これを改善する必要がある。

2 台のカメラで測定面表面のテクスチャやレーザーの揺らぎなどによるランダムなレーザー中心の誤差による影響低減する方法を解析する。

従来の、1 カメラ-1 レーザの光学系を考え、以下のように座標、パラメータを決定する(Fig.5)。

レーザー光軸方向を pz 、垂直方向を px とする

N: 理想的なスポット光中心と物体の交点

Δsp : スポット光中心の物理的なずれ

T: ずれたスポット光中心

Vt: ずれた中心から求められる仮想光点

Δsc : カメラ処理によるスポット光中心ずれ

V: カメラ上の中心から求められる仮想交点

このとき、 $V-N$ が測定誤差ベクトルとなる。

各ベクトルは、それぞれ

$$T: (T_{pz}, T_{px}) = (N_{pz} - \Delta sp \times \tan \phi, N_{px} + \Delta sp)$$

$$Vt: (Vt_{pz}, Vt_{px}) = (N_{pz} - \Delta sp \times \tan \phi - \Delta sp / \tan \theta, N_{px})$$

$$V: (V_{pz}, V_{px}) = (N_{pz} - \Delta sp \times \tan \phi - \Delta sp / \tan \theta - \Delta sc / \sin \theta, N_{px})$$

$$V-N: V - N = (-\Delta sp \times \tan \phi - \Delta sp / \tan \theta - \Delta sc / \sin \theta, \Delta sp)$$

となる。

問題は、測定装置を小型化すると、 θ が小さくなり、それに従って、 Δsp の測定誤差に及ぼす影響が大きくなることである。

左カメラ観測時の Δsp を Δsp_L 、右カメラ観測時のものを Δsp_R とする。このとき、

$\Delta sp_R = \Delta sp_L$ (レーザー位置誤差が両カメラで等しい)かつ $\phi = 0$ (測定対象面がレーザーに垂直)であれば、 Δsp の及ぼす誤差は右左で逆のベクトルになるため、足し合わせてキャンセルできる。

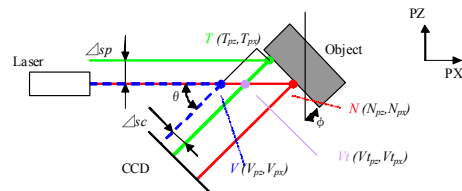


Figure 5 誤差解析

1.2.2 測定実験

カメラを 2 台用いた測定実験をおこなった (Fig.6, Fig.7). カメラ 2 台を、ラインレーザーと約 20 $^\circ$ の角度をつけ、レーザー光軸に対して対称に配置した。測定ターゲットをステージ上に配し、光軸にそって 1mm, 0.01mm 刻みで移動させた。このときのレーザースリット画像を取得し、スペクル除去のため移動平均フィルタをかけ、左右カメラの対応点でのレーザー中心位置を求めた。この結果を Figure 8, Figure 9 に示す。左カメラの測定分解能が 0.13mm, 右カメラの分解能が 0.16mm となった。

左右足し合わせた値の測定分解能は、

0.064mmとなった。もし、キャンセルングが有効でない場合、つまり左右カメラの誤差が互いに独立である場合には、この分解能は 0.1mm となるはずである。このことから、左右カメラの出力誤差には相関があり、キャンセルングが有効であることが確かめられた(Fig.10)。

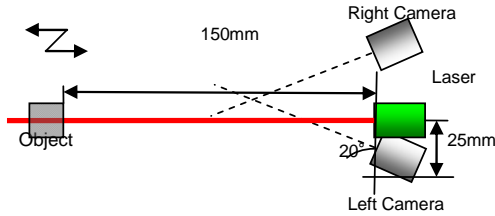


Figure 6 実験装置の概要

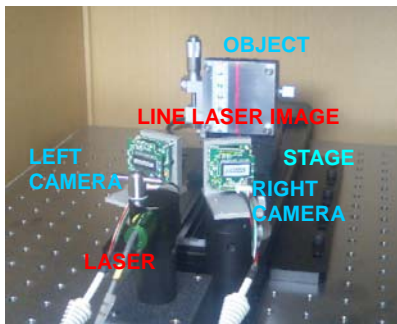


Figure 7 実験装置

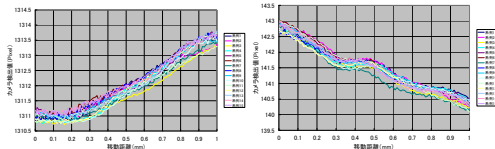


Figure 8 左カメラ測定結果 Figure 9 右カメラ測定結果

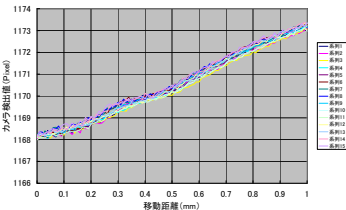


Figure 10 両カメラ測定結果測定分解能 0.064mm

1.2.3 成果

カメラを複数用いることにより、単カメラシステムと比べて測定誤差を低減させ、測定信頼性を向上させた。

断面形状測定装置の開発(2次元)

2.1.1 断面形状における問題点

次の段階として、断面形状測定を行った。ここでは、測定ユニットの測定値(測定系)から空間座標への変換が必要となる。回転中心と測定系原点が一致している場合には、回転角度 θ 、測定値 l から、回転中心を原点とした空間座標 $(l \cos \theta, l \sin \theta)$ を得ることができる。しかし、実際に

は回転中心と測定系原点とは一致しないため、これらの相対関係を校正で求める必要がある。

2.1.2 パラメータ及びその校正手法

測定系と回転中心の関係を示すモデルを Figure 11 に示す。レーザ光軸を X 座標にとったときの、真の回転中心からの測定系原点 $S_0(S_x, S_y)$ がパラメータとなる。特に S_x は直径の誤差に直接効いてくる。これを校正するため、中空円筒状の校正用アーティファクトを用いる。内径が既知であるアーティファクト内に測定ユニットを配置し、これを 360°スキャンして測定する。円筒を基準として以下のようにパラメータを設定する。円筒中心: O 円筒半径: r 装置の回転中心: A

i 番目の測定点における、

回転角: θ_i 測長器の測定値: l_i

測定系原点座標: S_i

測定点座標 - 測定系原点座標: L_i

このとき、各座標は以下のように表される。

$$A(a_x, a_y)$$

$$S_0(s_x, s_y)$$

$$S_i(s_x \cos \theta_i - s_y \sin \theta_i, s_x \sin \theta_i + s_y \cos \theta_i)$$

$$L_i(l_i \cos \theta_i, l_i \sin \theta_i)$$

これらから、各測定点における半径からの差の自乗和

$$\sum (r - |A + S + L|)^2$$

を最小にする A 及び S_0 を求める。

2.1.3 校正用アーティファクトの作製・測定実験

校正用アーティファクトの作製及びじっけん。Fig.6 に作製した校正用アーティファクトを示す。測定範囲を考慮して内径は $\phi 100\text{mm}$, $\phi 150\text{mm}$, $\phi 200\text{mm}$ の 3 種類を用意した。材質はアルミで、高さ 100mm, 外径はすべて $\phi 220\text{mm}$ となっている。これらを用いて構成実験をおこなう。校正用円筒形アーキテクチャ(Fig.12)を用いて、回転軸と測定ヘッドの測定原点の間のパラメータを推定し、断面形状の校正する実験を行った。Fig.14 に、校正時($\phi 150\text{mm}$ 使用)の生データをそのまま用いて構成したデータと、校正結果を用いて正しく円形状に構成されたデータを示す。また、この結果を用いて他のアーティファクト($\phi 100\text{mm}$)の測定実験を行い、円形状と、半径が測定できていることを示した(Fig.16)。

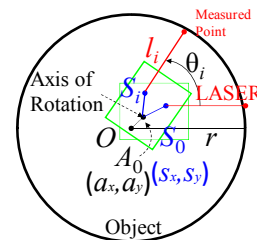


Figure 11 測定系, 回転軸, 円筒の関係



Figure 12 校正用アーティファクト Figure 13 測定ヘッド

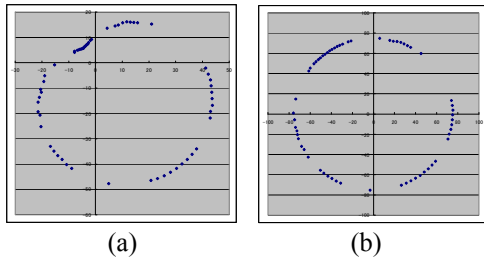


Figure 14 測定データと構成結果

- (a) 生データ. 回転軸のずれにより歪んでいる.
- (b) 校正後のデータ. 円形状が再現できている

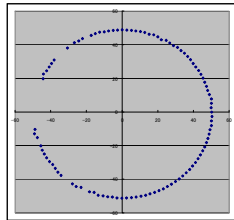


Figure 15 円筒形状測定結果(φ 100mm アーティファクト)

2.1.3 成果

中空円筒状の校正用アーティファクトにより、内部形状測定機のパラメータ校正をおこない、断面形状を正しく測定できることを示した。

三次元内部形状測定装置の開発(3次元)

3.1.1 縦型 1セル三次元形状測定装置の開発

最終目的は、9セル加速管を一度に測定できる内部形状測定装置であるが、その前段階として、1セル(長さ200mm程度)を測定可能な縦型装置の開発をおこない、内部三次元形状測定が可能であることを示した。装置の概要をFig.16に示す。定盤上に据え付けられた門型の台から、レーザ、カメラを搭載した測定ヘッドが垂直にぶらさがる構造になっている。

測定の手順を以下に示す。定盤上に1セル空洞を、光軸が定盤に垂直になるよう配置する。ここに上方から測定ヘッドを挿入する。測定ヘッドと本体はボールねじスプラインを介して接続され、モータを用いてこれを駆動させることにより並進、回転させることができる。こうして測定対象内部をレーザで走査し、形状を測定する。

3.1.2 アーティファクトを用いた校正(3次元)

2次元断面形状では回転軸のずれに起因する誤差を校正するために、円筒形アーティファクト

を用いた。本装置では、これに加えて並進軸のずれに起因する誤差も構成する必要がある。この構成にも円筒形アーティファクトを利用する。

φ100mmのアーティファクトを用いて3次元校正をおこない、その結果をもとにφ150mmのアーティファクトの測定実験を行った。実験は、φ150mmアーティファクトを適当に配置し、4つの水平方向の断面測定を行った。次に、アーティファクトを約1mmずらし、再び測定した。結果をTable 2に示す。1回目と2回目の中心位置のずれ量は、各断面の間で0.01mm以下の違いに抑えられており、また半径も0.01mm以下の違いに抑えられている。このことから、アーティファクトの中心位置、半径が高精度で測定できていることがわかる。

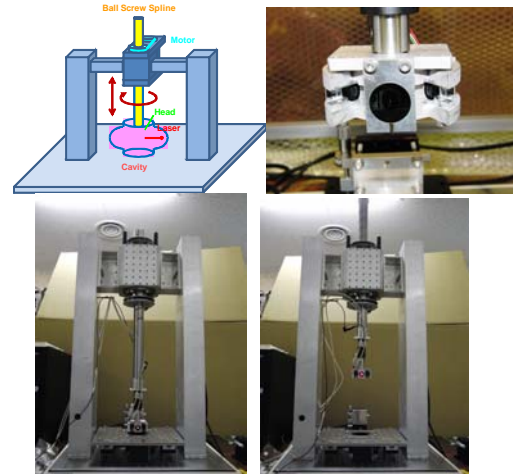


Figure 16 測定装置の概要

左上:装置概要 右上:測定ヘッド
左下:最下部測定時 右下:最上部測定時

Table 2 Result of experiment

	$z(\text{mm})$	$a_x(\text{mm})$	$a_y(\text{mm})$	$r(\text{mm})$
1st	0	-0.18434	-0.59561	75.08907
	20	-0.15655	-0.54167	75.07453
	40	-0.12090	-0.49558	75.09744
	60	-0.10693	-0.45694	75.08572
2nd	0	0.80185	-0.42825	75.09278
	20	0.83325	-0.37851	75.07901
	40	0.86383	-0.33760	75.10488
	60	0.88504	-0.29000	75.07718
Difference (2nd-1st)	0	-0.98619	-0.16736	-0.00371
	20	-0.98979	-0.16317	-0.00448
	40	-0.98473	-0.15798	-0.00743
	60	-0.99197	-0.16693	0.00854

3.1.3 セルの測定

縦型測定器を使用して、1セルの測定実験をおこなった。Fig.17が測定結果及び測定の信頼性Mapである。勾配の大きな部分では測定信頼性が落ちているが、性能に大きな影響を及ぼす赤道部、アイリス部では0.2mm以下(青線部分)の信頼性をもっていることがわかる。

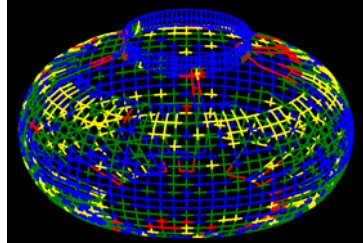
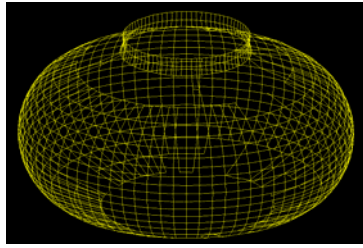


Figure 17 1 セル測定結果
(上:三次元形状,下:信頼性 MAP)

3.1.4 成果

1セルの縦型3次元形状測定を作成し、円筒のような単純形状であれば半径、中心等を高精度で測定できることを示した。また、加速管の内部形状を測定できることを示した。

3.2.1 横型1セル三次元形状測定装置の開発

現在 Figure 18 に示す横型測定器を製作しており、今後、9セルの測定実験をおこなう (Fig.19)。



Fig.18 横型9セル測定器

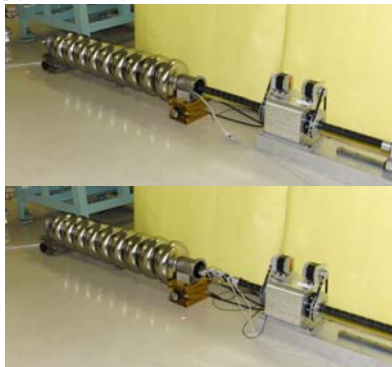


Fig.19 9セルの測定手法

4 結言

加速管の内部三次元形状測定装置の開発を基礎研究から進め、これまででは測定不可能であった1セルの内部三次元形状測定を可能にすることができた、まだ9セル測定のデータは取得できていないが、装置はほぼ完成しており、今後9セルの測定実験を行っていく。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計6件)

- ① 江並和宏, 久米達哉, 東保男, 上野健治: 管状構造物の内部三次元形状非接触測定装置の開発—第6報加速空洞の内部三次元形状測定実験—, 2009年精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp831-832, (2009)
- ② 江並和宏, 久米達哉, 東保男, 上野健治: 管状構造物の内部三次元形状非接触測定装置の開発—第5報内部三次元形状測定実験—, 2008年精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp293-294, (2008)
- ③ 江並和宏, 久米達哉, 東保男, 上野健治: 管状構造物の内部三次元形状非接触測定装置の開発—第4報内部測定用のキャリブレーション—, 2008年精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp1153-1154, (2008)
- ④ 江並和宏, 久米達哉, 東保男, 上野健治: 管状構造物の内部三次元形状非接触測定装置の開発—第3報複数カメラを用いた誤差の低減—, 2007年精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp475-476, (2007)
- ⑤ IMEKO world congress 2009 (accepted)
K.ENAMI,T.KUME,Y.HIGASHI,K.UENO:
3D MEASUREMENT OF INNER SHAPE OF A CAVITY (Lisbon,Sep,2009)
- ⑥ ASPEN 2009 (accepted)
K.ENAMI,T.KUME,Y.HIGASHI,K.UENO:
3D MEASUREMENT OF INTERNAL SHAPE OF ACCELERATOR CAVITIES(Kita-Kyusyu,Nov,2009)

[その他]

2008年, 2009年における高エネ研メカ・ワークショップにおいて研究発表

<http://www-mec.kek.jp/kousaku/open/report/default.htm>

2008年精密工学会知的ナノ計測専門委員会(12月, KEK)において研究発表.

<http://www.nanolab.t.u-tokyo.ac.jp/nano-measure/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

江並 和宏 (ENAMI KAZUHIRO)

高エネルギー加速器研究機構・機械工学センター・助教

研究者番号: 00370073