

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560521

研究課題名(和文) 波長多重ホログラフィック内視鏡による細管内形状・分光計測システムの開発

研究課題名(英文) Development of multiwavelength digital holographic endoprobe system for small pipe inspection using profilometry and spectroscopy

研究代表者

横田 正幸 (Yokota, Masayuki)

島根大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：80323335

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：多波長デジタルホログラフィを用いて銅パイプ等直管内の表面形状計測を行った。照明光を赤、青、緑の三原色とした。この三原色を用いることでカラー画像を得て、パイプ内の腐食や穴などの識別を行った。また、赤の半導体レーザーの注入電流変調により近接した二つの発振波長を得ることでこれを形状計測に用いた。0.1mm程度の厚みの異物が検出できた。パイプ内に挿入する円錐鏡の位置ずれ及び傾きにより生じる計測誤差について解析し、補正方法を考案した。

研究成果の概要(英文)：Multiwavelength digital holography for the investigation of a straight pipe inner surface has been proposed. To classify defects on a pipe inner surface, the intensity image reconstructed by three wavelengths (Red, Green and Blue) are used and that enables us to visualize color image of the pipe inner surface. By using the spectral reflectance obtained by each intensity image, it is possible to classify crack and verdigris in the pipe inner surface.

In addition, the height profile of the pipe inner surface could be obtained by two-wavelength holographic contouring technique. Object having a thickness of 0.1mm could be detected using the technique. For the measurement using a cone-shaped mirror, the inclination and positional error of the mirror becomes problem. The algorithm for correcting the effect brought by such error has been proposed and has been shown that the error can be effectively reduced using the correction process using the proposed algorithm.

研究分野：光応用計測

キーワード：デジタルホログラフィ 波長多重

1. 研究開始当初の背景

現在、原子力発電所や各種化学プラント、半導体製造用ガスに配管(内径30mm以下)が数多く使用され、地中埋設配管を含めるとその数は膨大になる。これら配管は経年劣化で腐食、減肉、傷、割れが生じ、機器破損やガス・放射能漏れ等の重大事故を招く恐れがある^{文献(1)}。例として、液化石油ガス配管では管内の水分と塩化物の反応で生じる塩酸による管壁の腐食でガス漏れ事故が頻発し^{文献(2)}、原子力発電所でも配管における水蒸気漏れが多発している。事故による災害を未然に防ぐには定期的な保守点検が必須であり、配管内計測や検査に対する要求が高まっている^{文献(1),(2)}。従来から内視鏡や磁気・超音波探傷法が管内検査に用いられているが、計測精度や検出感度は十分ではない。現在、より定量的・高精度な管内検査・測定手法として、リング状の光を管内壁に投影する光切断法や光点を投影して走査する三角測量法が提案されている^{文献(1)}。しかし、これらの手法も投影装置に加え CCD 又は位置センサを管内に挿入する必要があるため内径 10 mm 以下の細管には不向きで、リングや点の走査により管内のワイヤフレーム形状は得られるものの画像情報が無いため錆、異物、凹凸の判別は困難であり、現状では形状計測と分光及び画像情報を同時に得られる有効な細管検査法は存在しないと言える。

この様な状況を鑑み、我々は管内の可視化(分光計測)と表面形状計測を同時に行う検査法を目指して、多波長位相シフトデジタルホログラフィを管内計測へ適用する独自の手法を開発した^{文献(3),(4)}。この方法では、内径 14 mm の管内に円錐鏡を入れて走査し、これに向けて開口部からレーザ光を照射し、管内壁を帯状に照明して得られる反射光と別に設ける参照光で作る干渉縞(ホログラム)を CCD で記録する。ホログラムをパソコンで数値計算して得られる再生画像から壁面を可視化し、同時に多波長の再生像の位相の差を用いて壁面に付着した異物の 3 次元形状計測や穴、錆、傷の検出が行える^{文献(4)}。この研究を進展させ、単一モード光ファイバ(SMF)と画像伝送用ファイバ(イメージファイバ)によりレーザ光とホログラムを伝送する遠隔小型センサヘッドを開発し、直管・曲管内を走査するデジタルホログラフィック内視鏡の開発を行う。これは、形状計測に加えて 3 原色と近赤外を含む波長多重化により管内壁のカラー再生像や赤外分光情報を同時に取得し、ヘッド走査に伴い実時間の結果表示を実現するものである。

2. 研究の目的

内径 10 mm 以下の曲・直管に対して管内表面 3 次元形状計測と管壁面のカラー及び赤外分光画像を実時間表示する新しいデジタルホログラフィック内視鏡を開発することを目的とする。パソコン・光源を含む基地局と

光ファイバで接続したセンサヘッドにより管内を遠隔走査する。3 原色と赤外を含む多波長に対しホログラムを時間分割多重記録し、計測結果は GPU(画像処理用演算器)を導入して実時間表示する。イメージファイバなど新しい光ファイバ技術をデジタルホログラフィに積極的に導入し、ホログラフィの新たな測定分野開拓を目指す。

3. 研究の方法

(1) 多波長デジタルホログラフィによるパイプ内計測

多波長による測定を行うために、光源を半導体レーザ(LD:赤), DPSS レーザ(緑,青)の3つとし、三原色によりカラー画像を得る。また、半導体レーザの注入電流変調により近接する二波長を得ることにより、二波長法を実施し、形状計測を行う。Fig. 1 に光学系を示す。LD の発振波長は LD への注入電流値を PC 内の D/A ボードからの電圧信号により変化させる。実験では発振波長 $\lambda_1=639.13$ (nm), $\lambda_2=639.19$ (nm) を使用し合成波長 $\Lambda=6.81$ (nm)を得た。

カラー画像作成と分光情報の取得のために発振波長 $\lambda_3=532.59$ nm, $\lambda_4=473.17$ nm, の DPSS レーザを使用した。これによる照明は電磁シャッタを使用し切り替えた。各レーザ光はシングルモードファイバ(SMF)を導波してマイケルソン干渉計へと導かれる。SMF からの出射光はレンズでコリメート後に偏光ビームスプリッタ(PBS)により 2 分割し、一方は管内照明用の直径 10.0 mm の円錐鏡に、もう一方はピエゾ鏡へと入射される。ピエゾ鏡で位相シフトされた参照光と管壁面からの反射光が CCD 面上で干渉し、位相シフトホログラムが記録される。

円錐鏡は支持部に取り付けられた糸をステッピングモータに装着したプーリーによって巻き取り、管長手方向に 3.0 mm ステップで計 90.0 mm 走査された。以上のように波長シフト、ホログラム記録そして、円錐鏡走査を PC により制御することで測定を自動化した。

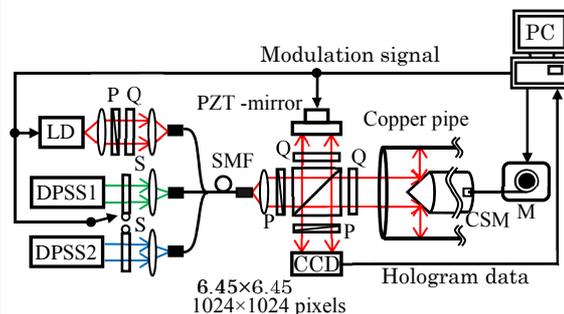


Fig. 1 実験光学系：S, shutter, P; polarizer, Q; quarter wave plate, M; stepping motor, CCD; charge coupled device.

実験では内径 14.0 mm の銅管を用いた。管内には疑似的な異物として 1: 減肉, 2: 亀裂, 3: 突起, 4: アルミ箔 ($3.1 \times 2.9 \times 0.28 \text{ mm}^3$), 5: 銅箔 ($2.9 \times 3.0 \times 0.23 \text{ mm}^3$), 6: 緑青 (錆) を作成した。また, 円錐鏡支持部にはアクリル製のスペーサを設置し, 円錐鏡の中心位置ずれ量と傾き角をそれぞれ 0.14 mm, 0.5° 以下に抑制した。

(2) 円錐鏡内の傾き, 位置ずれにより生じる誤差補正法

提案法は円錐鏡の位置ずれと傾きを同時に考慮したもので, 補正は光路長分布を計算し表面形状から差し引くことで行う。円錐鏡の中心位置がずれて傾いた場合についての光路長分布の計算式を導出する。Fig. 1 のように直管内に挿入した円錐鏡の中心位置が d だけずれ, 円錐鏡の中心軸が x 軸方向に角度 ρ だけ傾いた場合について考える

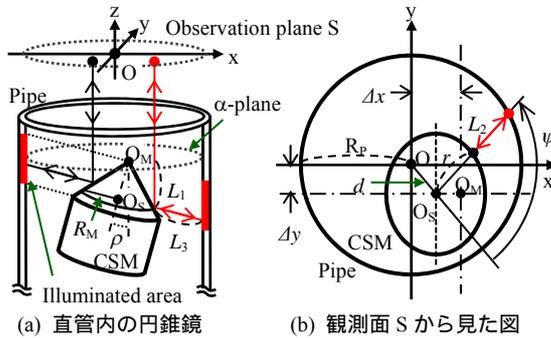


Fig. 2 直管内の円錐鏡の位置の位置関係

Fig. 1(a) は直管内の円錐鏡を横方向からみたときの図, Fig. 1(b) は観測面 S からみたときの円錐鏡と直管の図である。α 面は観測面 S と平行で円錐鏡頂点 O_M を通る平面である。α 面から入射した光が円錐鏡で反射され管内壁面に到達するまでの距離を L とする。測定対象の壁面は粗面と仮定する。この場合, 壁面の照明光は壁面で散乱される。また, 実験の条件等から円錐鏡の傾き角度は 1° 未満であると想定した。そのため, 散乱光のうち入射方向に反射する光路のみを考える。また, 光路長 L は次式で表される

$$L = L_1 + L_3 \quad (1)$$

L_1 と L_3 及び L_2 は Fig. 2 より以下のようなになる

$$L_1 = \sqrt{2}R_M \sin(\phi + \pi/4) \quad (2)$$

$$L_2 = -d \cos \psi - r + (R_p^2 - d^2 \sin^2 \psi)^{1/2} \quad (3)$$

$$L_3 = L_2 / \cos \phi \quad (4)$$

R_M は円錐鏡断面の半径, ϕ は円錐鏡の傾き角 ρ の変数 ($-\rho \leq \phi \leq \rho$), d は円錐鏡頂点の位置ずれ量, 点 O_S は観測面 S から円錐鏡をみたときの円錐鏡断面の中心位置, ψ ($0 \leq \psi \leq 2\pi$) は観測面 S から円錐鏡をみたときの直線 $O O_S$ と点 O と壁面とを結ぶ線分とがなす角, r は観測面 S からみたときの点 O_S から円錐鏡の断面円までの長さである。従って光路長 L は式 (1), (2), (4) より次式となる

$$L = \sqrt{2}R_M \sin(\phi + \pi/4)$$

$$+ \frac{-d \cos \psi - r + (R_p^2 - d^2 \sin^2 \psi)^{1/2}}{\cos \phi} \quad (5)$$

以上より円錐鏡の位置ずれと傾きを考慮した光路長分布計算式を用いて補正を行った。

4. 研究成果

(1) 多波長デジタルホログラフィによるパイプ内計測

ホログラムの再生計算後に複素振幅積および強度画像に対して, スペックルノイズ低減のためにそれぞれ 3×3 の移動平均フィルタ処理を施した。また表面形状においては円錐鏡の中心位置ずれによって生じる形状誤差の補正処理を一回行った。

本手法では壁面が円錐鏡に映されるため得られる物体光は円に写像される。そのため本来の照明範囲の形状を得るために, 再生像は座標変換処理によって長方形に展開される。これらを連結し管内壁面の展開図に相当する画像を得る。このとき同位置の画像が重複するため, 圧縮率の大きい円錐鏡先端部の再生像を除去した。Fig. 3 に示すように, 本手法では管内壁面の形状と画像情報を同時に取得できる。

Fig. 3 をみると, 光の反射率の低い亀裂, 突起, そして緑青部分の強度値は低下しており, この状態では識別は困難である。そこで強度画像から異物部と銅壁部分との強度比を計算し分光反射率に基づく異物の識別を試みる。それぞれ異物部分の強度平均値に対する銅壁部分の強度平均値の比を計算した。計算結果を Fig. 4 に示す。この計算結果は銅壁面に対する異物部分の反射率の高さを表している。

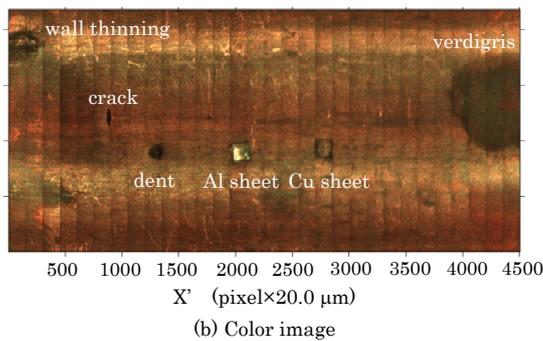
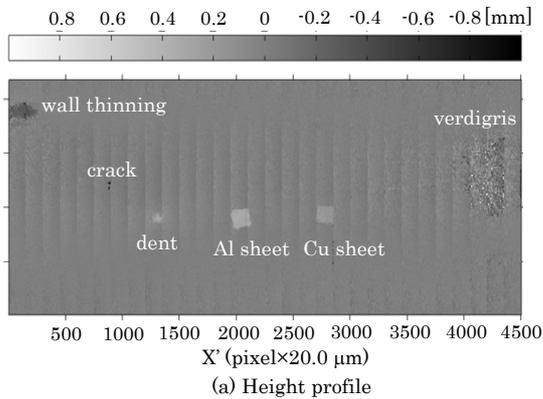


Fig. 3 管内壁面の展開図

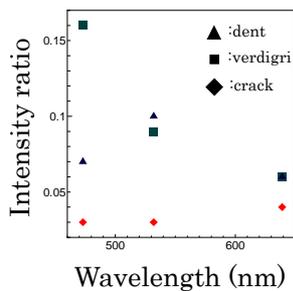


Fig. 4 測定対象と銅壁部に対する強度比

亀裂部は反射光が生じないのでどの波長においても強度平均値はほぼ0となるため強度比を計算しても差が生じない。一方、緑青の場合、反射率が比較的高い緑や青の波長の強度比が高くなるのでこれらの識別は可能である。

次に同じ銅パイプを対象として、円錐鏡走査ステップを1.0 mmとして実験を行った。再生像を1.0 mm, 3.0 mm 間隔でそれぞれ連結して得られた表面形状の連結画像から銅箔部分 300 × 300 pixels を抽出したものをFig. 5 に示す。

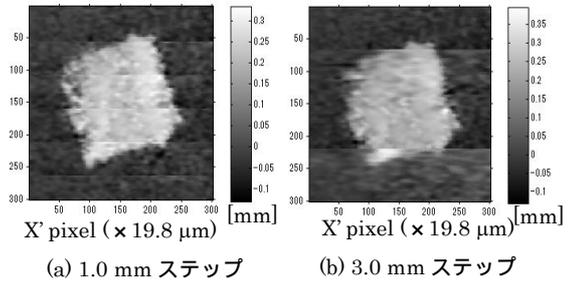


Fig. 5 走査ステップ 1.0 mm と 3.0 mm の場合での再生像連結画像の比較

1.0 mm ステップと 3.0 mm ステップでの連結画像における銅箔部のエッジの変化量を求め、表面形状の鮮鋭度を測定した。Fig. 5 の表面形状に X' 方向に対する微分フィルタ処理を施し 3 か所からエッジの変化量の平均値を求めた。その結果 1.0 mm ステップでは 0.07, 3.0 mm ステップでは 0.05 となり 1.0 mm ステップによる表面形状の方鮮鋭度がわずかに高いことが確認できた。

多波長デジタルホログラフィによる自動計測システムを構築し銅管内の計測を行った。各波長毎の強度画像を用いて異物周辺と銅壁部分との強度比を計算することで、分光反射率に基づく異物の識別を行った。さらに円錐鏡走査ステップを従来の 3.0 mm から 1.0 mm 間隔へ変更し、管内壁面の展開図を得た。その結果、情報量の多い円錐鏡外周部の情報をより多く使用することで再生像の鮮鋭度が 1.4 倍になることが確認できた。

(2) 円錐鏡内の傾き、位置ずれにより生じる誤差補正法

形状計測には発振波長 $\lambda_1 = 639.2 \text{ nm}$ と $\lambda_2 = 639.6 \text{ nm}$ の二波長を使用した。このときの等高線感度 h_2 は 0.51 mm である。測定対象は内径 14.0 mm の銅管とし、直管内には異物としてアルミ箔 ($3.1 \times 2.9 \times 0.28 \text{ mm}^3$), 銅箔 ($2.9 \times 3.0 \times 0.23 \text{ mm}^3$) を貼り付け、減肉を作成した。直管内に挿入した円錐鏡を長手方向に 3.0 mm ずつ走査し、78.0 mm の範囲を計測した。CCD カメラにより取得されたホログラムデータを 1-FFT 法により再生計算後、スペクルノイズ低減のために複素振幅積に移動平均処理を 5 回施し、表面形状を得た。Fig. 6(a) に実験より得られた表面形状を従来法で補正した結果を示し、6(b) に式(5)を用いた提案法により補正した結果を示す。また、Fig. 6(a) と 6(b) の面外方向の変位の平均値を X 方向にプロットしたグラフを 6(c) に示す。Fig. 6(c) より、最大値と最小値の差をそれぞれ求めると、従来法では $H_{before} = 0.13 \text{ mm}$ で、本法では $H_{after} = 0.02 \text{ mm}$ で

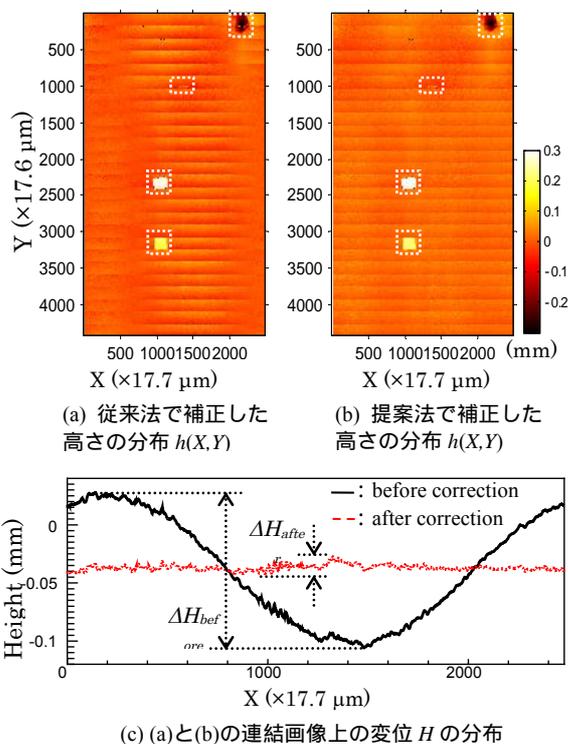


Fig. 6 銅管の表面形状連結画像と変位 H の分布:
 (a) and (b): 減肉; 亀裂; アルミ箔
 ($3.1 \times 2.9 \times 0.28 \text{ mm}^3$); 銅箔($2.9 \times 3.0 \times 0.23 \text{ mm}^3$).

あり、表面形状に重畳されている円錐鏡の傾きによる影響が減少したことが推察される。しかし、高さ -0.04 mm 程度の補正残差が生じた。補正残差の要因を検討するために平坦な物体(平坦度 0.02 mm 以下)を計測した。その結果、球面形状のバイアス成分(高さ 0.04 mm 程度)が表面形状に重畳していると分かった。このバイアスを直管内計測時にあらかじめ測定しておくことで、さらなる表面形状の補正が可能であると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

M. Yokota, T. Kawakami, and T. Koyama, Digital holographic inspection for the inner surface of a straight pipe using current-induced multiwavelength from two laser diodes, *Opt. Eng.*, Vol. 53, 2014, 104103-1-104103-7

[学会発表](計 18 件)

M. Yokota, K. Nomura, and M. Konishi, Analysis of the reconstructed images in phase-shifting digital holography using a plastic optical fiber guide for the hologram transmission, 1st International Symposium of Gunma University Medical

Innovation and 6th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering (GUMI&AMDE2014), 5 Dec., 2014 (Kiryu, Gunma), 2014.

T. Koyama and M. Yokota, Inspection system for a straight pipe inner surface by using multiwavelength digital holography, 1st International Symposium of Gunma University Medical Innovation and 6th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering (GUMI&AMDE2014), 5 Dec., 2014 (Kiryu, Gunma), 2014.

小西将貴, 横田正幸, POF イメージガイドのホログラム伝送におけるマルチモード伝搬によるホログラムの劣化の検討, 第 16 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム(HISS16)(広島市立大学, 広島県), A-11, 11 月 15 日, 16 日, (2014).

T. Koyama and M. Yokota, Measurement of the straight pipe inner surface by using multiwavelength color digital holography, 2014 SICE annual conference, 9-12 Sep., FrCT5.3 (Hokkaido University, Sapporo), pp. 1932-1935, 2014.

小山徹平, 横田正幸, 多波長デジタルホログラフィによる円筒内計測システムの開発, 2014 年度応用物理・物理系学会中国四国支部合同学術講演会(島根大学松江キャンパス, 島根県), 7 月 26 日, Fp-8, (2014).

M. Yokota, Digital holographic inspection for a straight pipe inner surface using multiwavelength illuminations, International Conference on Optoelectronic Technology and Application 2014 (IPTA2014), 13-15, May 2014, (Beijing, China), p.103-104, 2014. (Invited)

K. Nomura and M. Yokota, Study of hologram transmission by a high core-number plastic optical fiber (POF) image guide in phase-shifting digital holography, 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2013)(Kobe, Japan), 15-17 Dec., 2013.

小山徹平, 横田正幸, デジタルホログラフィによる実時間管内計測のための円錐鏡位置ずれによる表面形状誤差の自動補正法の検討, 第 15 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム(HISS)(鳥取大, 鳥取県), A-88, 11 月 16 日(2013).

野村佳祐, 横田正幸, 高画素のプラスチックファイバーイメージガイドによるホログラム伝送とシミュレーションを用いた再生像の評価, 第 15 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム(HISS)(鳥取大, 鳥取県), A-89, 11 月 16 日(2013).

小山徹平, 横田正幸, レーザーダイオードを用いた多波長デジタルホログラフィによる細管内検査, 2013 年度第 22 回日本光学会学術講演会(OPJ2013), 12aB4, (奈良県

新公会堂、奈良県), 11月12日(2013)。

野村佳祐, 横田正幸, 高画素タイプのPOFイメージガイドによるホログラム伝送と再生像の評価, 第74回応用物理学会学術講演会, 予稿集DVD, (同志社大学, 京都府), 17p-C13-12, 9月17日(2013)。

横田正幸, 小山徹平, 多波長デジタルホログラフィーによる直管内計測, 第74回応用物理学会学術講演会, 予稿集DVD, (同志社大学, 京都府), 17p-C13-2, 9月17日(2013)。

T. Koyama, T. Kawakami and M. Yokota, Development of a measurement system for pipe inner surface using multi-wavelength digital holography, Technical digest of 10th Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering (OIE'13) (Utsunomiya, Japan), 2-5 Sep., pp. 87-88, 2013.

M. Yokota, T. Koyama, and T. Kawakami, Digital holographic inspection for the straight pipe inner surface using multiwavelength from laser diodes, 2013 Optical Metrology (Munich, Germany), 13-16 May, 8788-18, 2013.

野村啓祐, 横田正幸, デジタルホログラフィーによるPOFを用いたホログラム伝送, レーザー学会学術講演会第33回年次大会(姫路商工会議所, 兵庫県), 1月30日 2月1日(2013)。

K. Nomura and M. Yokota, Transmission of hologram using a plastic optical fiber (POF) image guide in phase-shifting digital holography, The 2nd Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics (Tokushima, Japan), 19-21 Nov., C016, 2012.

小山徹平, 河上朋章, 横田正幸, デジタルホログラフィーによるパイプ内検査法における鏡位置ずれ量推定法, 第14回IEEE広島支部学生シンポジウム(HISS)(岡山県立大, 岡山県), A-25, 11月17-18日(2012)。

河上朋章, 横田正幸, 多波長デジタルホログラフィーによるパイプ内壁面計測の研究, 第73回応用物理学会学術講演会, 予稿集DVD, 12p-F8-5(愛媛大学城北地区, 松山大学文京キャンパス, 愛媛県), 9月12日(2012)。

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ecs.shimane-u.ac.jp/~yokota/shape.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横田正幸 (YOKOTA, Masayuki)

島根大学・総合理工学研究科・教授

研究者番号: 80323335