

科学研究費補助金研究成果報告書

平成21年4月2日現在

研究種目：基盤研究（B）
研究期間：2007～2008
課題番号：19360066
研究課題名（和文） FOW援用型PDI形状計測装置の開発：大口径非球面の高い再現性での絶対形状計測
研究課題名（英文） Development of Phase-Shifting Point Diffraction Interferometer Assisted by Fiber Optic Window: Highly-Reproducible Absolute Surface Figure Measurement of Large Aperture Aspherical Mirrors
研究代表者
片岡 俊彦 (KATAOKA TOSHIHIKO)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：50029328

研究成果の概要：光ファイバが発する回折球面波を計測基準とする位相シフト点光源回折干渉計を開発し、計測精度の向上に関する研究の結果、直径200mm、曲率半径1500mmの凹面ミラーの形状計測の連続実施における再現性としてrms0.11nmを達成した。同ミラーの約90度の回転前後の計測結果もrms0.85nmで一致した。回転放物面ミラーの焦点から回折球面波を出射させて、ミラー形状の不完全性によって生じた非平面度を計測し、非球面ミラーの絶対形状計測が本装置によって可能であることを実証した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	12,000,000	3,600,000	15,600,000
2008年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
総計	15,700,000	4,710,000	20,410,000

研究分野：光応用計測

科研費の分科：機械工学，細目：生産工学・加工学

キーワード：点光源回折干渉計， point diffraction interferometer， 位相シフト干渉計， phase-shifting interferometer， デジタルホログラフィー， Helmholtz-Kirchhoffの積分定理， シングルモード光ファイバ， 表面形状計測

1. 研究開始当初の背景

点光源から出射される回折光波は、光源から十分な遠方まで伝搬すると、非常に真球度の高い球面波に成長する。このことは、微小なピンホールからの回折波面、あるいはシングルモード光ファイバ端面から出射された光波の伝搬については、キルヒホッフの回折理論 (Kirchhoff's Diffraction Theory) に基づくフレネル-キルヒホッフの回折積分によって詳細に既述される。

この理論による回折波面の球面度の評価例を図1に示す。この例では、光ファイバコア直径は4 μ m、伝搬光の波長は633nmである。この場合、ファイバ光軸から $\pm 15^\circ$ の出射方向においては、光波長の $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 程度とい

う、実体基準面では考えられないような、非常に高精度な球面波の生成が説明される。この球面波の生成が容易であり且つ生成された

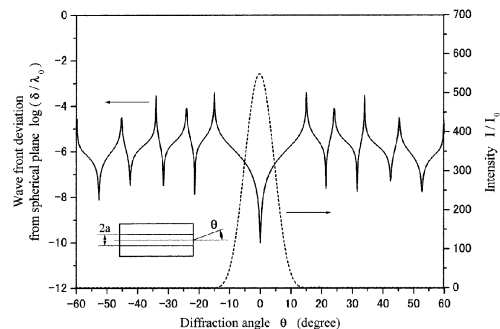


図1：光ファイバ先端から出射される回折球面波の波面精度と強度分布

波面は点光源から離れるほどにその大きさ(面積)を増すという特長は、大型で非常に精度の高い計測用の絶対基準面が容易に手に入ることを示している。この利点を生かして、計測される波面に余計な情報が重畳しにくい高精度な光干渉計測装置として、我々は2つの光ファイバを点光源として用いる位相シフト点回折干渉計(Phase-Shifting Point Diffraction Interferometer: PS-PDI)の開発を行なうこととした。

サブnmオーダーの計測精度により、直径が数十cm以上の大口徑の面形状を評価する必要があるような被計測物として、極端紫外光リソグラフィ(Extreme Ultraviolet Lithography: EUVL)装置や重力波検出用の大型干渉計などに用いられる形状精度 $\sim \lambda/1000$ (λ =可視光波長)程度の大型ミラーを想定した。

我々のPS-PDI装置では、図2(a)に示すような計測原理で、ほぼ共通パス(Common Path)である光干渉計を組み上げ、1つ目のファイバ光源から被計測面へ照射するための診断用波面としての球面波を発生させる。そ

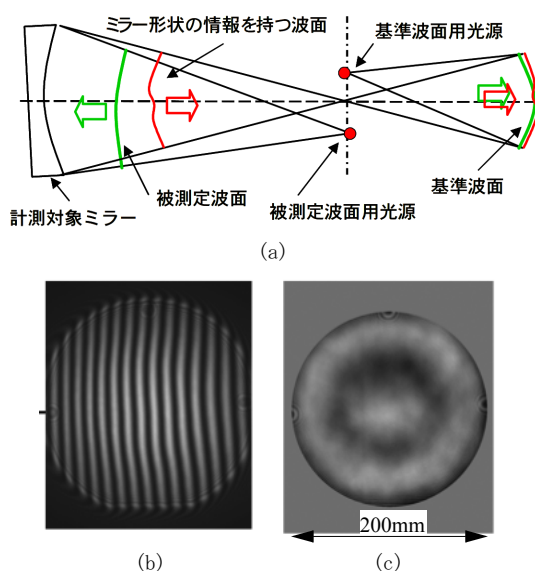


図2: (a)PS-PDI装置の原理図と(b)直径200mm, 曲率半径1500mmも凹面ミラーについてCCDカメラで記録される干渉縞, (c)位相差分布

して、被計測ミラーの形状情報を含んだ診断用波面の絶対形状を、2つ目のファイバ光源から発生する球面波を計測基準面として、図2(b)のような干渉縞の位相シフト干渉法により、真球面からの形状誤差の2次元分布として深さ方向にサブnmの精度で計測する(図2(c))。本装置では、光ファイバから出射させる球面波のうち、位相反転が起こらない(=図1で $\pm 15^\circ$ 付近にある位相の飛びまで)範囲の球面波全てを計測に利用できるため、大型光学素子の計測に非常に適しているといえる。図2において、診断波面に形状情

報が重畳されて伝搬するという基本原理を、国内外のほとんどのPDI研究者らはおそらく疑っていないと思われるが、この点をよく考えてみると、被計測ミラー表面上の各点での形状誤差によって、照射された球面波を色々な方向に反射されるはずである。つまり正確には、図2の右側で生成される干渉縞は、形状誤差の影響で、被計測ミラー表面上の色々な点からやってくる球面波の大なり小なりの寄与を総じた複合生成物として考えるべきであろう。その結果として、図2で生成される干渉縞を生じた被計測ミラー表面がどんな形状なのかは、干渉縞解析からだけでは求められないことが分かってくる。そこで我々は、逆問題(Inverse Problem)の考え方を利用することとした。

入力(原因)から出力(結果、観測)が求められる問題を順問題といい、その逆に出力から入力を推定する問題を逆問題という。順問題と逆問題とは、どちらが順でどちらが逆かという点については相対的な関係であり、一般に、古くから問題として認識され研究が行われている方を順問題とし、その逆のプロセスを解くことで何らかの工学的・その他の利用ができる解法を逆問題と呼ぶ。逆問題を解く際には、次の3つの条件が満たされる必要がある。すなわち、①解が存在すること、②解がただ一つであること、③入力に微小な変動を与えたときに出力の変動も微小であること、である。逆問題の応用例としては、超音波探査、CTスキャン、非鮮明な画像の復元・補完、温度分布や熱伝導係数の推定、地震学における震源断層すべり分布履歴の推定、などがあげられる。

2. 研究の目的

前述の逆問題解析に際して、「出力」である図2で発生する干渉縞のより正確な診断が、「入力」である被計測ミラーの面形状をより高精度で復元できることに繋がるため、これまで申請者らが進めてきたPS-PDI開発において、さらに大きな進展がなければならぬ。具体的には、干渉計につきまとう機械的な振動問題、レーザーというコヒーレントな光源を使うことによる不要な干渉縞ノイズの発生、といった基本的でありながら難しい問題を解決しなければならない。

そして逆問題を扱えるようにする。我々はこの数年、別の研究課題の進展に合わせて、三次元境界要素法(Boundary Element Method: BEM)に基づく電磁場解析プログラムを開発してきた。そこで、本研究では、この三次元BEM電磁場解析プログラムによってPS-PDI光学系を模擬し、干渉系の光波伝搬をシミュレーションすることで、被計測面の微小形状誤差分布を順問題における「入力」、実際の実験で観測された干渉縞を順問題の

「出力」とした場合の逆問題を解き、被計測面の形状の影響を大きく受けた干渉縞の場合でもPS-PDI計測を可能とし、高精度形状計測法の対象範囲を拡張し、応用範囲を格段に広げる。

BEMでは解析領域を境界で区切り、その境界上の各点の値を求めるが、図2のようなPS-PDIの光学系の構成上、干渉縞の投影（生成）面と被計測面とがBEM解析における境界となる。逆問題解析の初期条件として、干渉縞投影面上の各点の強度は、実験で得られたCCDカメラのカウント値から設定する。また、2つの光ファイバ端面からの球面波生成には、フレネル-キルヒホッフ (Fresnel-Kirchhoff) の回折積分の理論解を用いるが、それら2つの球面波生成源の座標は、PS-PDI装置における実際のファイバ先端の設置位置より定める。逆問題の解となる「被計測面上の各点の形状値に対応する未知数群」と、干渉縞投影面上の各点の、PS-PDI計測結果としての位相値群とをヘルムホルツ-キルヒホッフの積分定理に基づく積分方程式の連立方程式としてまとめあげることによって、三次元BEM電磁場解析が実現でき、逆問題の解としての被計測面形状が求められる。

本研究は、こうしたPS-PDI計測法の新しい展開を検討し、その検討結果を、計測対象サンプルとして、①重力波干渉計の光学素子を想定した大口径凹面ミラー、②非球面度の高い光学素子として回転放物面ミラーの絶対形状計測を行なう。

その結果として、実体面ではない「光波による真球面の参照面」+本研究の成果とにより、非球面度の高い被計測面のサブnmオーダーでの計測を実現する。

3. 研究の方法

PS-PDI装置に関しては、機械的な振動対策としてのパッシブ除振台上に構成することと、反射防止膜を施したFOWを、干渉縞生成の投影面としてセットする点に主眼を置いて装置開発を行なった。

機械的な振動問題に関しては、現状の研究環境においては、干渉計全体を乗せるような大型のアクティブ除振台は本研究費によっては準備できないことから、高速多数回の繰り返し計測の平均値として形状を評価した。

計測値の平均化によって振動の影響を抑制できたとしても不要な干渉縞ノイズは結局、サブnmの計測精度を妨害する。そこで、我々はPS-PDI計測ではおそらく例がない、干渉縞投影面へのFiber Optic Window (FOW)の採用を試した。FOWは、光ファイバの束を圧縮成型し切り出した板である。この板の両面には、光ファイバ端面（コア）が稠密に並んでいるため、片方の面に光学像を投影すると、裏面にその像が転送される。マルチモードフ

ァイバを束ねてあるため、像の強度分布は正確に伝送されるが、レーザー光としての可干渉性が低減され、CCDカメラで干渉縞を撮影する際に、不要な干渉縞ノイズの発生が抑制される可能性がある。ただし、FOWの両面は光の透過率（像転送の効率）を良くするために光学研磨されており、板厚も10mm程度であることから、板の両面（実際には板を形成しているファイバ1本1本の両端）による干渉の影響が現われる可能性がある。そこで、FOWの表裏面には反射防止膜を施した。

このFOWを用いたPS-PDI計測セットアップでは、FOWの裏面に現われる干渉縞を、収差の少ないカメラレンズを使ってCCDカメラ素子上へ縮小投影した。FOWを使うことで、干渉縞像の各点からはランダム位相の発散光が干渉縞の強度情報を運びながら伝搬するので、カメラレンズ内のレンズ群における多重反射干渉や、CCDカメラ素子の保護ガラスの表裏面による干渉で生じる、計測とは関係のない干渉縞パターンの発生を抑制しようとした。

また本装置では、いわゆる光源側で、ピエゾステージ上の位相シフト用ミラーを移動させ、相対的に光路長を変えることで7フレームの位相シフト計測を実施するので、計測とは関係のない干渉縞パターンが存在すると、これらも位相シフト計測されてしまい、ゴースト形状を創出する可能性があり、FOWによってこれらを抑制しようとした。

ピエゾステージ上の位相シフト用ミラーをステップ状に移動させ、光路長をステップ状に変えることで位相シフト計測を行なうわけだが、この際、階段状の移動量制御では位相シフト用ミラーに大きな加減速が加わり、移動の終了時に振動する可能性がある。本装置では、この位相シフトのためのミラー移動についても、振動など誤差が発生しにくい方法を模索し実施した。

干渉計を構成する光学部品のマウントに関しては、高剛性な製品を導入し、安定性を高めた。中でも、被計測ミラーの保持具は、保持応力による変形が少なく、しかも保持後の安定性・剛性が優れたモノを自家製作した。

以上の装置開発と共に、直径200mm、曲率半径1500mmの凹面ミラーを用いた計測を繰り返しながら、保持具設計のためのデータ収集・テストなどを兼ねた。FOWやパッシブ除振台の効果を、計測結果の再現性をチェックすることにより評価した。すなわち、同じ計測を繰り返した場合の計測結果の再現性、被計測ミラーの取付を光軸周りに回転させた場合の計測結果の再現性、をチェックし、これらからPS-PDI装置のシステム誤差（装置特有の再現性のある誤差）の評価を行なった。

この誤差評価の結果を踏まえて、凹面ミラーの計測精度の達成値を評価し、非球面ミラ

一として回転放物面ミラーの計測テストを行なった。PS-PDI計測では、計測基準面が球面波であることから球面以外の計測は原理的に非常に困難なように思われており、本研究による打開策の創出が望まれる。そこで、図3(a)(b)の干渉光学系を考案し、放物面については図3(a)において、被計測放物面によって球面波が平面波に変換された状態を計測することで、回転放物面ミラーの計測テストを実施した。

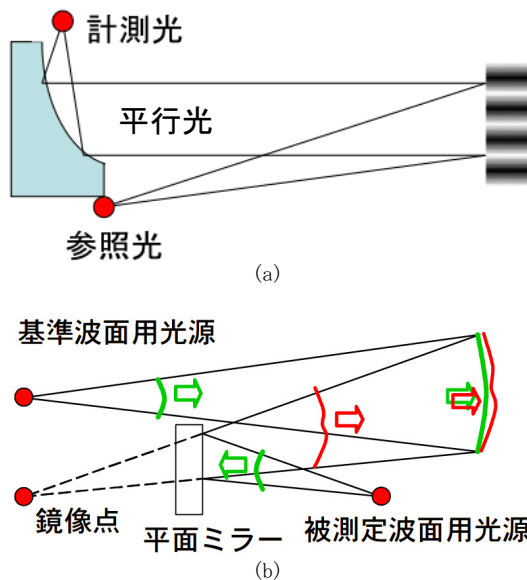


図3 : (a)放物面ミラーのPS-PDI計測, (b)平面ミラーのPS-PDI計測

一方、PS-PDI計測結果による逆問題解析の着手・展開（プログラムの開発とテスト）については、以下の考え方に従って進めた。すなわち、数値解析手法の一つである、境界要素法（Boundary Element Method; BEM）に注目した。この計算手法は、グリーンの定理（Green's Theorem）を用いて、解くべき物理現象を表現する偏微分方程式を、解析対象領域の境界上の積分方程式の問題に置き換えて解く手法である。この時、「解くべき問題の次元が一つ下がる」ため、その分、計算量が減り、誤差も低減できる。本研究の場合、3次元形状計測であるが2次元問題として取り扱い、計算することができる。BEMで解くべき積分方程式は、有限要素法と同様、要素分割（離散化）を行い、代数的な手法で近似解を求めることができる。また、BEMは音場、電磁場解析などに有効であるが、非線形解析にはあまり向かず、熱伝導解析では有限要素法が主に用いられる。PS-PDI計測では、計測結果における干渉縞の各点の情報は、被計測面上の全ての点の寄与を多かれ少なかれ受けていると考えられる。こうした考え方は、被計測面の形状が非球面になった場合を考えれば明かであり且つ、PS-PDI計測の限界

を容易に露呈してしまうかに見える。しかしここで、既述の逆問題を解くことができれば、干渉縞情報（正確にはPS-PDI計測の結果として得られる、干渉縞上の各点での位相情報）への被計測面上の各点からの寄与が分かり、その結果、被計測面の形状がわかることになる。この考えに基づき、三次元BEM電磁場解析プログラムのベース部の開発を行なった。

4. 研究成果

ファイバ型PS-PDI装置については、2つの光ファイバからの回折球面波同士のPS-PDI計測を通じて、FOWを用いる際の計測誤差の考察を行い、改良を行った。また、上記ミラーでの連続計測における計測値の再現性の向上を図った。主な改良点は、(1)光学部品の安定性向上による計測光量の安定化、(2)空気の揺らぎなどの長時間でゆるやかに変化するランダムノイズの低減を目的とした、計測レート=1000回/20分の実現、である。この結果、上記ミラーの20分間における連続計測の計測値の再現性はPV値で2nm、RMS値で0.49nmという結果が得られた（図5）。

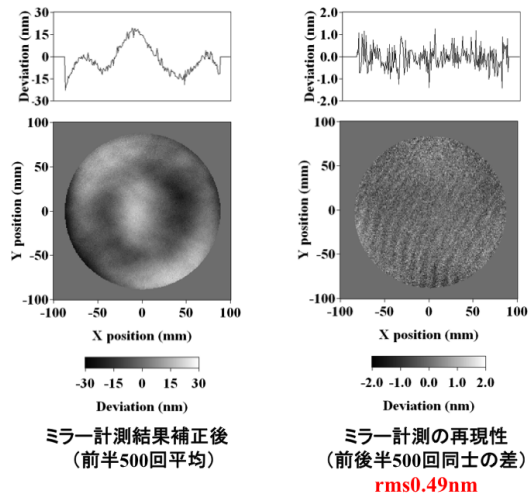


図5 : FOWを用いた凹面ミラーの計測結果

不要な干渉縞の抑制のために導入を検討したFOWであったが、種々の実験結果の結果、FOW起因のシステムティック誤差が現れることが問題となった。この誤差はFOWの構造に起因すると思われ、再現性が高いために、ミラー計測の際は補正することも可能であることが分かったが、完全に補正できる結果が得られなかった。つまり、0.1nm rmsの計測精度を達成するためには、FOW起因の誤差が問題となることが分かり、FOWを投影面として用いず、図2の干渉結果をCCD素子上に直接、発生させて撮影することとした。CCD素子には、冷却による結露を防ぐための真空封じ用保護ガラスが存在するので、この保護ガラスを除去したCCD素子を用いることにより

解決した。こうした、誤差要因となる光学部品を排することによって、被計測ミラーの情報を含んだ干渉縞を、その他の光学部品による波面歪み無しにCCDカメラで記録することができ、連続実施した形状計測の再現性として0.11nm rmsを達成できた(図6)。計測精度についての異なる検証法として、被計測ミラーの約90度の回転前後において計測を行ない、回転を考慮した計測値の比較を行った。その結果、回転前後の計測結果は0.85nm rmsで一一致した(図7)。

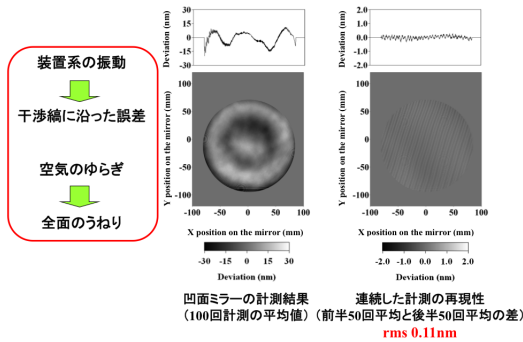


図6：ガラスレスCCDカメラを用いた凹面ミラーの計測結果と再現性

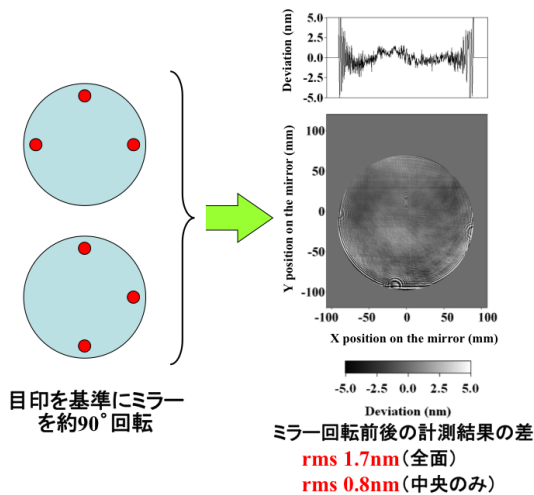


図7：凹面ミラーの回転計測の再現性

ファイバ型PS-PDI装置の開発において、計測対象となるミラーの表面形状を反映した計測波面の解析は重要である。ミラーで反射した直後の波面はミラー形状そのものであるが、CCDカメラで計測される波面は空間伝播の過程において変化してしまっていることがわかり、逆問題解析のためのHelmholtz-Kirchhoffの積分定理を用いたデジタルホログラフィ位相解析法を開発した。この手法を用いて、既存の直径=200mm、曲率半径=1500mmの凹面ミラーのPS-PDI計測を模擬したシミュレーションを行った。その結果、特に(1)ミラーに局所的な形状誤差がある場合、(2)計測光に強度分布がある場合、(3)計

測光源がミラーの曲率中心からずれた位置にある場合、において計測される波面とミラー形状とは一致しえないことが分かった。しかし、同解析法を用いることにより、計測された波面データから真のミラー形状を再現できるようになった。これは実際の形状計測において非常に有効な解析手法であると考えられる。

ファイバ型PS-PDI装置による非球面ミラーの絶対形状計測の実証として、高エネルギー加速器研究機構の協力を得て、同機構から回転放物面ミラーを借用し、計測を行なった。このミラーは平行光を集光する際に用いられるリング状の回転放物線ミラーであり、断面形状が $y=x^2/(4f)$ ($f=75\text{mm}$, $129 \leq x \leq 180\text{mm}$)の放物面を回転させてできる回転放物面ミラーである。放物面の焦点から出射された球面波は、同ミラーで反射されたのち理想的には完全な平面波となるはずであるが、ミラー形状の加工の不完全性によって、ほぼ平行光ではあるが微小に歪んだ波面で伝搬する。この平行光の完全平面からのずれを、図8のセットアップによって、図9に示すようにミラー面上の7.74mm×6.45mmの領域において計測することに成功した。図9(a)はCCDカメラで記録された干渉縞であり、図9(b)はこの干渉縞より求められた位相差分布である。図9(b)の細かな縦筋はミラー面の加工痕と考えられ、同心円状の縞は振動による誤差と考えら

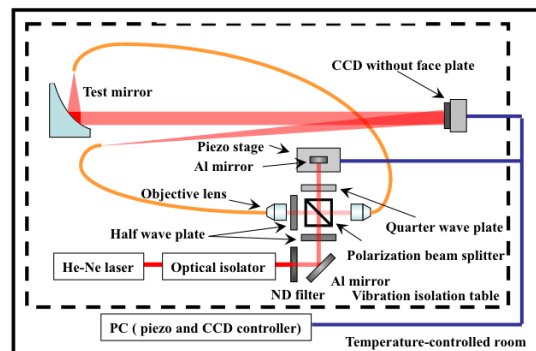


図8：回転放物面のPS-PDI計測セットアップ

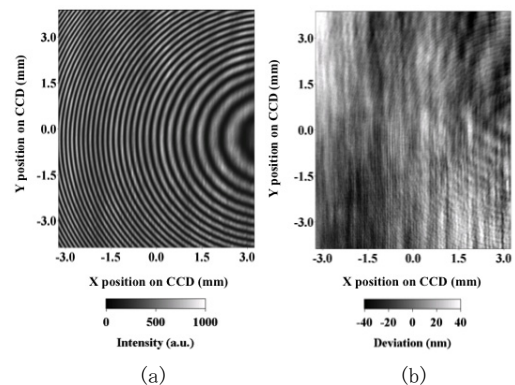


図9：(a)回転放物面からの平行光によって生じた干渉縞と(b)PS-PDI計測による位相差分布

れる。この計測された平面波の歪み形状から放物面ミラーの形状を算出することが可能であり、今まで不可能であった非球面ミラーの絶対形状計測が、ファイバ型PS-PDIによって可能であることを実証した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計2件）

- ①Toshiaki Matsuura, Satoru Okagaki, Yasushi Oshikane, Haruyuki Inoue, Motohiro Nakano, Toshihiko Kataoka, Numerical Reconstruction of Wavefront in Phase-Shifting Point Diffraction Interferometer by Digital Holography, Surface and Inter face Analysis, 査読有, Vol. 40 (2008), pp. 1028-1032.
- ②Toshiaki MATSUURA, Satoru OKAGAKI, Takaaki NAKAMURA, Yasushi OSHIKANE, Haruyuki INOUE, Motohiro NAKANO, and Toshihiko KATAOKA, Measurement Accuracy in Phase-Shifting Point Diffraction Interferometer with Two Optical Fibers, Optical Review, 査読有, Vol. 14 (2007), pp. 401-405.

〔学会発表〕（計10件）

- ①松浦敏晋, ファイバ型PS/PDIによる大口径ミラーの計測精度, 2009年春季第56回応用物理学関係連合講演会, 2009年4月1日, 筑波大学
- ②松浦敏晋, ファイバ型PS/PDIの非球面形状計測への応用 - 放物面ミラーの形状計測 -, 2009年度精密工学会春季大会学術講演会, 2009年3月12日, 中央大学
- ③Toshiaki MATSUURA, Absolute Surface Figure Measurement by Phase-Shifting Point Diffraction Interferometer with Two Optical Fibers, First International Symposium on Atomically Controlled Fabrication Technology - Surface and Thin Film Processing -, February 16-17, 2009, Osaka University
- ④松浦敏晋, 大口径光学素子の絶対形状計測を目的としたファイバ型PS/PDIの開発 - 干渉結果の撮影におけるCCD撮像素子の保護ガラスの影響 -, 2008年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2008年9月18日, 東北大学
- ⑤松浦敏晋, ガラスレスCCDを用いたファイバ型PS/PDIによる大口径ミラーの計測, 2008年秋季第69回応用物理学会学術講演会, 2008年9月2日, 中部大学
- ⑥松浦敏晋, ガラスレスCCDを用いたファイバ型PS/PDIの開発, 2008年度精密工学会関西地方定期学術講演会, 2008年7月30日, 堺市産業振興センター

- ⑦松浦敏晋, ファイバ型PS/PDIにおけるFOV投影面を用いることによる系統誤差, 2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会, 2008年3月29日, 日本大学
- ⑧松浦敏晋, ファイバ型PS/PDI装置における系統誤差 - 2光源を用いることによる計測波面の湾曲 -, 2008年度精密工学会春季大会学術講演会, 2008年3月18日, 明治大学
- ⑨松浦敏晋, ファイバ型PS/PDI装置におけるデジタルホログラフィを用いた位相解析手法の開発, 2007年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2007年9月14日, 旭川ときわ市民ホール
- ⑩松浦敏晋, ファイバ型PS/PDI装置のためのHelmholtz-Kirchhoff積分を用いたデジタルホログラフィ解析シミュレーション, 2007年度精密工学会関西地方定期学術講演会, 2007年8月10日, 大阪産業大学

〔その他〕（計1件）

ホームページ

<http://www.prec.eng.osaka-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

片岡 俊彦 (KATAOKA TOSHIHIKO)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 50029328

(2) 研究分担者

中野 元博 (NAKANO MOTOHIRO)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 40164256
井上 晴行 (INOUE HARUYUKI)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 30304009
押鐘 寧 (OSHIKANE YASUSHI)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 40263206

(3) 連携研究者

松浦 敏晋 (MATSUURA TOSHIAKI)
大阪大学・大学院工学研究科・リサーチ
アシスタント
研究者番号: 60525145