

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560109

研究課題名（和文）

光ファイバ出射の点回折球面波を基準面とする平面原器絶対形状の位相シフト干渉計測

研究課題名（英文） Profile Measurement System of Phase-Shifting Point Diffraction Interferometer with Spherical Reference Wavefronts Generated by Two Optical Fibers

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：

2本のシングルモード光ファイバを点光源としたPS/PDI (Phase-Shifting Point Diffraction Interferometer) は、光源位置の自由度が高いため、非球面量の大きいミラーであっても、結像光学系を用いずに計測対象の情報のみを含んだ干渉縞を生成できる。さらに、デジタルホログラフィによる波面解析を行うことによってミラー形状をより高精度に得ることができる。本報では、PS/PDI による非球面形状計測への応用として、平面ミラーを計測し、その精度について検討した。

研究成果の概要（英文）：

A phase-shifting point diffraction interferometer (PS/PDI) with two optical fibers has been developed for absolute surface profile measurement of large aperture optics. Since the PS/PDI has flexibility of the positions for two point light sources, it can generate the fringes included information for surface profile without use of imaging optics. Surface profile of a mirror can be reconstructed precisely conducting wavefront analyses by digital holography. As the application to aspheric mirror, profile measurement of a flat mirror has been studied.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

 キーワード：精密位置決め、加工計測、PDI (Point Diffraction Interferometer)、
位相シフト干渉計、光ファイバ

1. 研究開始当初の背景

現在の先端的な科学技術において、例えば極端紫外光リソグラフィーや、X線顕微鏡、重力波検出装置など、大面積にわたってサブナノメートルオーダーの形状誤差しか許されない超高精度ミラーを必要とする領域が拡大しつつある。超高精度ミラーを実現する

には、原子単位での加工法の開発とともに、原子オーダーで大面積の表面形状を計測する技術が必要となる。しかし、一般に普及しているフィゾー干渉計に代表されるような実体基準面との比較による干渉計測では、基準面の加工形状精度により制限され、絶対精度は可視光波長 λ の $1/50$ ($\approx 10\text{nm}$)に留まる。

我々は点光源回折干渉計 (Point Diffraction Interferometer: PDI)、すなわち、微小開口からの回折波面が真球面に近いことを利用して、この球面波を計測の絶対基準とする光干渉計に注目した。回折球面波の真球面度は、実体基準面より遥かに高い精度を有し、PDIは原理的にフィゾー干渉計などの従来法を凌駕する計測法に成り得る。さらに、位相シフト (Phase-Shifting: PS) 法を併用することで、ミラーの各計測点の位相差を高精度に求められ、これらを組み合わせた位相シフト型点光源回折干渉計 (PS/PDI) は、ミラーの法線方向に対してサブナノメートルオーダーの分解能を実現できる。これまでに開発された PS/PDI 装置は、微小開口としてピンホールを用いるタイプと、シングルモード光ファイバ1本を用いるタイプに分けられる。ピンホールタイプでは (株) ニコンにおいて可視光を用いた球面、非球面ミラーの計測が報告されている。一方、光ファイバ1本タイプは Lawrence Livermore National Laboratory における計測結果が報告されている。しかし、これらの PS/PDI では1つの微小開口で発生した回折球面波が、被検波面と参照波面を兼ねているため、回折球面波の半分の面積に相当するミラーまでしか計測できない。

我々は、より大面積での計測を行うため、シングルモード光ファイバ2本を用いる PS/PDI を提案して、2つの光ファイバ出射球面波で被検波面と参照波面を分離した位相シフト干渉計を構築し、サブナノメートルオーダーの分解能と絶対形状の計測精度を実現した。光ファイバコアからの回折球面波の理想球面からのずれ量は数値シミュレーションにより $10^{-5}\lambda$ 以下と見積もられている。さらに、計測波面、参照波面の光源として2つの光ファイバコアを用いることで、計測対象ミラーの形状情報のみを持った干渉縞を得ることができ、この干渉縞を解析することで計測対象ミラーの絶対形状を得ることができる。干渉縞は CCD カメラにより強度パターンとして取得され、位相シフト法による解析によって計測波面と参照波面の CCD 上での位相差分布を算出することができる。しかし、計測対象ミラーで反射された計測波面はその形状を変えながら伝播するため、CCD 上での計測波面は厳密には計測対象ミラーの表面形状と一致しない。そこで、CCD 上で得られた計測波面の位相分布と強度分布を元に計測対象ミラー上での波面を復元する方法として、Helmholtz-Kirchhoff 積分を用いたデジタルホログラフィ解析法を開発し、計測対象ミラーの絶対形状を得る手法を確立した。

PS/PDI で用いる基準波面は球面であるため、計測対象が凹面形状であれば干渉縞が容易に作れ、都合が良い。これまで直径200mm、

曲率半径1500mmの凹面ミラーを計測対象として装置の改良を行ってきた。その結果、凹面ミラーの連続計測の再現性として、RMS 0.11nmまで達成された。凹面ミラーを光軸回りに90度回転させ、その回転前後の計測結果の差はPV 2.0nm, RMS 0.85nmまで達成された。

高精度の計測が要求されるのは球面形状に限らず、放物面や楕円、平面など様々な形状にわたっている。しかし、従来のPS/PDI装置でこれらの形状を計測するのは容易ではない。拡散光である回折球面波を平面ミラーに照射すると、反射光も拡散光として広がるのでCCD上で参照光との干渉縞を得ることが困難である。そこで、回折球面波を対物レンズを用いて平行光に変換した計測波面を、CCDから遠方に配置した光ファイバからの点回折球面波の参照波面とで作られる干渉縞から評価し、平面ミラーの表面形状を高精度に計測する方法の開発を目指した。

2. 研究の目的

点回折球面波を基準面とするPDIは、十分に微小な開口から出射した点回折光が真球面に非常に近い波面となる特性を利用する。この波面精度を最大限に生かすため、位相シフト法と組み合わせることによって光軸方向にサブナノメートル以下の高分解能を実現できる。本研究の目的は、微小な光ファイバコアの開口から出射した点回折球面波を絶対基準面とした位相シフト干渉計により、フィゾー干渉計などの実体基準として用いられている平面原器 (オプティカルフラット) の絶対形状をサブナノメートルオーダーで計測できる装置の開発である。

光ファイバ型PS/PDI装置により精度の検証できた波面を用いて、他の干渉計で実体基準として用いられる平面ミラーを計測し、サブナノメートルオーダーの精度で評価できるかを検証するとともに、硬X線集光用全反射ミラーの超精密加工のために必要な絶対形状の高精度計測への応用を目指す。

当初、提案した対物レンズを用いて点回折球面波から平面波に変換する方法について、その絶対波面形状を評価した結果、サブナノメートルオーダーで波面形状を絶対計測するにはノイズが大きいことが明らかになった。そこで、対物レンズを用いない新たな計測法の開発に着手し、2本の光ファイバのコアから出射される点回折球面波の干渉計測で絶対基準面精度の確認を行った。

3. 研究の方法

PS/PDI を用いて大面積平面ミラーを計測する場合、拡散光である回折球面波を照射すると、反射光も拡散光として広がり続けるため干渉縞を測ることが困難である。これに対し、平面波に変換できれば拡散せず、ミラー

と対応する位置の CCD 画素に照射されるため、平面ミラーの表面形状解析が容易となる。

ここでは、PS/PDI による高精度な平面ミラーの計測を実現すべく、回折球面波を平面波に変換し、それを用いて平面ミラーの計測を行うために、対物レンズと放物面ミラーを用いて変換される平面波の精度を試す実験を行った。さらに、新たな平面ミラーの計測法を考案し、その精度について検討した。

最初に、対物レンズを図 1 のように配置することにより、レンズで変換された平面波と十分遠方から出射した回折球面波の干渉で、平面波面の誤差を計測することを考えた。ここでは、Nikon の Plan Fluor シリーズの 2 倍の大口徑対物レンズを用いて平面波への変換精度を検討する実験を行った。

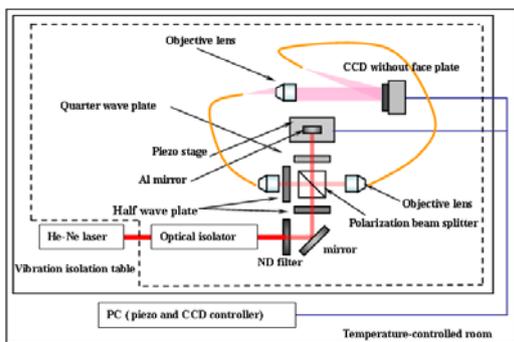


図 1 対物レンズによる回折球面波の平面波変換精度測定のための光学系

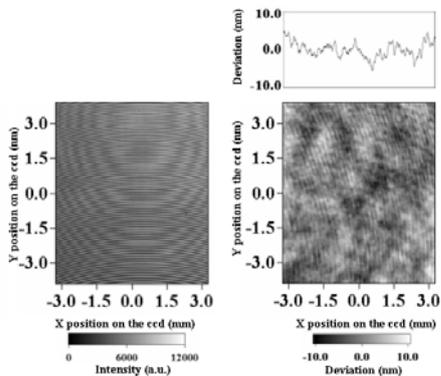


図 2 対物レンズで変換した平面波の PDI 干渉縞と解析結果

対物レンズを用いて得た平面波と光ファイバ出射の点回折球面波を干渉させて、平面からの誤差を検討した。対物レンズ等の光学素子と測定環境が安定するように、レンズを配置してから 3 時間後に計測を開始した。得られた PDI 干渉縞とその解析結果を図 2 に示す。この計測結果から PV 18.52nm、RMS 2.54nm が得られた。対物レンズを通ることで波面にレンズ表面形状の誤差やレンズ内部の密度勾配による屈折率の偏り等で系統誤差が生

じていると考えられ、平面原器をサブナノメートルの精度で計測するには不十分である。

一方、放物面ミラーによる平面波への変換は、焦点距離 $f=25.4\text{mm}$ の場合、光ファイバ出射端点が焦点から光軸方向に $1\mu\text{m}$ ずれても 50nm、直交方向に $1\mu\text{m}$ ずれると 400nm の波面誤差が生じる。従って、放物面ミラーによる点回折球面波の平面波への変換は、サブマイクロメートルオーダーでのセッティングが必要であり、平面原器の精密計測に用いる光学系配置の実現が困難である。

次に、平面波に変換せず、直接 2 つの球面波を平面ミラーで反射させて計測する PS/PDI を考案した。この光学系を図 3 に示す。従来の PS/PDI では二つの回折球面波の内、一つを理想的な球面波であるとして参照波面に用いた。図 3 の光学系では参照波面も測定対象である平面ミラーに照射して得られる干渉縞から、平面ミラー表面の傾き測定を試みている。

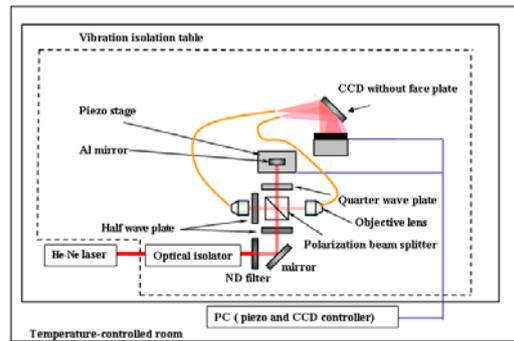


図 3 二つの点回折球面波の反射による平面ミラーの傾き計測光学系

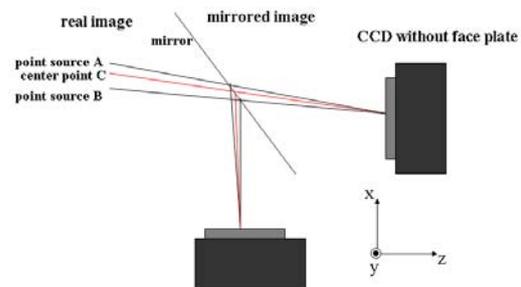


図 4 平面ミラーと点光源・CCD の位置関係

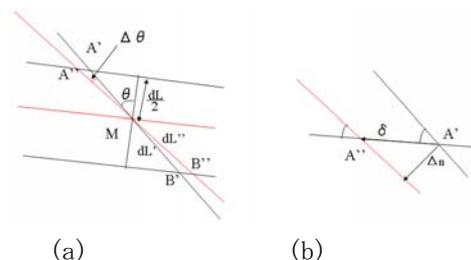


図 5 平面ミラーとの交点 M 周辺 (a)、および、実際と理想平面ミラーの位置関係 (b)

まず、平面ミラーを用いずに2本の光ファイバ出射球面波の精度確認と同じ実験で予備計測を行う。ここで、図4のような座標を用いて本実験の位置関係を記述する。予備計測で得られる干渉縞の解析で、最小自乗法によるフィッティングを行って、二つの点光源A、Bの位置と、二つの光源間の距離 dL が高精度に導出される。さらに、この測定結果から平面ミラーで反射する前の2つの点回折球面波の波面誤差に関する情報が得られる。

続いて2本の光ファイバとCCDとの間に平面ミラーを配置し、ミラー配置前のCCDの位置と鏡像関係になる図4の位置にCCDを移す。この配置で同様に干渉縞を計測するとミラーの表面形状の情報が反映された解析結果が得られる。すなわち、平面ミラーの有無による差から生じる干渉縞の違いを精密に解析して反射面のスロープ形状を測定する。

図4に示す2つの点光源A、Bの中点Cと、鏡像位置のCCD上の一点がミラーを通して一直線となるように光学系を設定すると、計測結果から得られる情報は、中点CとCCDのある画素の中心点Dを結んだ直線のミラーとの交点Mの左右に、2点A、Bと点Dを結んだ2点A'、B'が幾何光学上の反射点として図5(a)のように表れ、PDI干渉縞の解析結果から2点A'B'間のミラー法線方向の高さの差が求まる。2点A'B'間の距離を同時に解析することにより、点Mでの $y=0$ 平面のミラーの傾きが導出できることになる。ミラー全体の傾きデータが得られれば、これを積分することにより $y=0$ 平面の直線上の2次元ミラー形状を復元でき、さらに y 方向に変化させて干渉縞データを解析し、その結果を重ね合わせることによって3次元の形状が復元可能になる。第1近似として、鏡像のCCDの中心を原点として、2つのファイバ端が $y=0$ の平面上にあるように座標系を定め、幾何光学により、ミラーのスロープ導出について説明する。

図5に示すようにCCD中心を原点とする座標系で、光路長に対して十分近接して設置した2つの点光源A、Bからの光は平行な直線で近似できる。計算上、平面ミラーに入射する点をA'、B'と表し、その間の距離を dL' とする。さらに、実際のミラーに当たる点をA''、B''と表し、その間の距離を dL'' とする。 dL'' は、 θ が十分小さいとすると、A、B間の距離 dL と平面ミラーの傾斜角 θ より、

$$dL'' = \frac{dL}{\cos(\theta + \Delta\theta)} \approx \frac{dL}{\cos\theta} \quad (1)$$

と与えられる。

図5(b)より、各画素に対する2点間の位相差は、A、Bからの光に沿った方向のものであるため、干渉縞から得られた光路長の差 δ をミラーに垂直な方向に直すと、A'、B'からの理想平面ミラーまでの距離 Δn は、

$$\Delta n = \delta \sin(90^\circ - \theta - \Delta\theta) \approx \delta \cos\theta \quad (2)$$

として表される。この2式より、点Mでのミラー表面の $y=0$ (x,z)平面内での傾きは

$$\frac{df}{dx} = \frac{\Delta n}{dL'} \quad (3)$$

となる。本研究では、このようにミラー平面が交わってできる直線の傾きの変化を導出して、計測の精度を評価した。

4. 研究成果

PS/PDIを用いた平面ミラーのスロープ計測法により、傾きが導出できることを実験により確認した。実験に用いた平面ミラーは、直径30mmで、アルミの反射コートがなされ、 $\theta=45^\circ$ 傾けて計測された。図4のファイバ端から平面ミラーまでの距離 $R_1=100$ mmとし、ミラーからCCDの距離 $R_2=100$ mmと設定した。

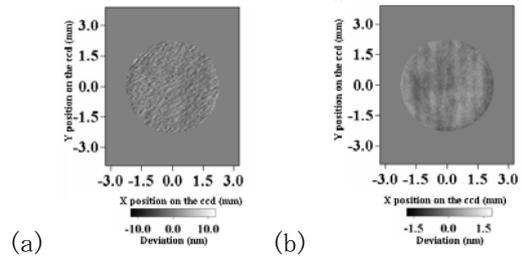


図6 平面ミラー反射PDI解析結果(a)と等距離で無反射の解析結果(b)

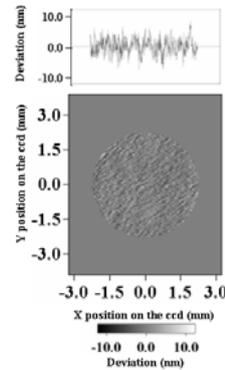


図7 平面ミラー反射PDI計測の誤差補正結果

図6(a)が平面ミラーの反射で生じるPDI干渉縞の位相シフト解析結果であり、図6(b)は(a)の光学系を、平面ミラーに対するCCDの鏡像位置にCCDを移動させた後、ミラーを取り外して得られたPDI干渉縞の解析結果である。図(a)はPV 24.32nm、RMS 2.479nmであり、ミラーによる影響が結果に表れている。図(b)ではPV 3.63nm、RMS 0.237nmとなり、これまでの波面計測に比べると精度が低い。この原因は、平面ミラーを挟んだ状態と同じ

距離に設定したので、ファイバから CCD までの距離が約 200mm とこれまでの 50mm 程度に対して長くなり、さらに光路カバーが使えないため、空気のゆらぎ等による誤差が影響したと考えられる。図 6(a)から図 6(b)を差し引くことにより、CCD 位置による誤差を低減できると考えて補正した結果を図 7 に示す。

図 7 の中心を通る 1 ラインの解析について次に考察する。測定範囲は、主に平面ミラーと CCD の相対距離によって決まる。本研究では、ミラー直径が 30mm、CCD の一つの画素は縦横 $6.45 \mu\text{m}$ であり、CCD の画素数が横 1000 画素、縦 1200 画素であるが、解析に用いる CCD の測定範囲は、画素 350 個を半径とする円状である。平面ミラーがファイバと CCD の中心に設置され、ミラーの傾き $\theta=45^\circ$ を考慮すると、1 ラインの測定結果は 3.193mm の直線上での測定結果となる。

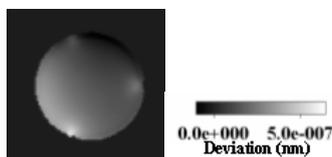


図 8 Zygo GPI による平面ミラーの計測結果

形状を比較するため、Zygo のレーザー干渉計 GPI によって計測した結果を図 8 に示す。図 8 には 3 箇所形状が大きく変化する点が見られる。これは平面ミラーのジグによる締め付け箇所に対応している。ジグへの取り付けにより、平面ミラーが変形した結果が表れている。PDI 計測と比較するために、Zygo GPI の測定結果に対して各隣接データ点間の高さの差を画素間隔で割り、ミラー上の各点の傾きとした計算結果を図 9 に示す。

Zygo GPI で測定した図 9 の結果と PDI で式 (3) から計算した結果を直接対応させて比較することは、測定範囲を特定できないために難しい。図 10 に両測定結果を並べて示す。

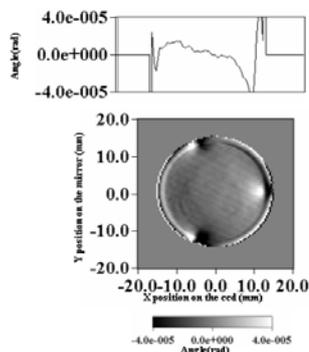


図 9 Zygo GPI による測定結果から算出したスロープ分布

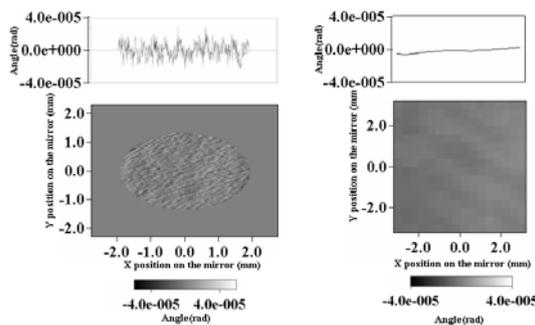


図 10 PDI と Zygo GPI による平面ミラー測定結果の比較

PDI 計測の結果は、斜めに傾けたミラーを計測するため、横方向に引き伸ばされた形になる。PDI の全測定範囲は横方向に 3.193mm で、GPI の方はミラー全面を計測している。従って、1 画素の大きさが PDI では $4.515 \mu\text{m}$ であるのに対し、GPI では $400 \mu\text{m}$ と約 100 倍の違いがあり、角度計測の分解能の差が大きい。従って、図 10 から PDI 計測と GPI 計測の比較による精度の確認はできないが、傾きの測定値のオーダーは同じであり、位置を正確に定めて測定すれば、同程度以上の高精度で形状を得ることができると考えられる。

以上、研究成果をまとめると、次のようになる。

(1) 対物レンズによる平面波への変換ではセッティングによる誤差が PV 値で 18.52nm であった。この誤差はミラーの表面形状や、内部の密度勾配等による屈折率の偏りであると考えられる。さらに、対物レンズと放物面ミラーは、共に、参照光のファイバ端から CCD までの距離を長くする必要はある。従って、光強度の不足による精度の低下や外乱による誤差が重畳する等、精度の高い計測は期待できない。

(2) PDI の 2 つの回折球面波を同時に平面ミラーで反射させる方法でミラー反射面のスロープを高精度に計測する方法の開発を試みた。しかし、測定範囲が不明瞭で Zygo GPI との直接比較はできなかった。今後の計測においては測定位置の特定が重要であり、その方法を追加開発していく必要がある。

(3) PDI での計測と Zygo GPI の計測結果は、傾きのオーダーが同じであり、測定位置を正確に定められれば、同等以上の精度で形状を得ることが可能と考えられる。

なお、PDI 計測における精度悪化の一因として、CCD 素子表面で反射した光がジグ等で 2 次反射して生じる迷光により発生する干渉縞ノイズの影響があることを本研究で突き止めた。この改善のため、He-Ne レーザから低コヒーレンスの SLD (Super Luminescent Diode) 光源に変更した。その結果、PDI 絶対基準面精度が PV 値で 3.0nm から 0.98nm へ、RMS 値では 0.31nm から 0.13nm に向上した。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計3件)

① N. Ogawa, T. Nishioka, M. Nakano, Y. Oshikane, H. Inoue, Phase-Shifting Point Diffraction Interferometer with Two Point Light Sources of Single-Mode Optical Fibers, Fourth international symposium on Atomically Controlled Fabrication Technology、査読無、pp.78-79(P-10)、2011.11.24、Osaka University

② 小川尚利, 西岡孝純, 中野元博, 押鐘寧, 井上晴行, 2本の光ファイバからの点光源回折球面波を基準とする位相シフト干渉計—ファイバ保持方法の改良とノイズの低減—、2011年度精密工学会秋季大会学術講演会、査読無、pp.871-872(L03)、2011.9.20、金沢大学

③ 小川尚利, 中野元博, 押鐘寧, 井上晴行, 山内和人, 2本の光ファイバからの点光源回折球面波を基準とする位相シフト干渉計—非球面凹面ミラーの表面形状計測精度—、2010年度精密工学会秋季大会学術講演会、査読無、pp.822-823(M76)、2010.9.27、名古屋大学

[図書] (計1件)

① Oshikane Yasushi, Nakano Motohiro and Inoue Haruyuki, Phase-Shifting Point Diffraction Interferometer Having Two Point Light Sources of Single-Mode Optical Fibers, Selected Topics on Optical Fiber Technology, Part 2, Chapter 14 (Moh. Yasin, Sulaiman W. Harun and Hamzah Arof, eds.), InTech, Croatia, 査読有、(2012), 67 (pp. 355-422) [ISBN 978-953-51-0091-1]

[その他]

ホームページ等

URL

<http://www-qm.prec.eng.osaka-u.ac.jp/>
量子計測領域ホームページ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

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