

機関番号：12501  
 研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2009～2010  
 課題番号：21760308  
 研究課題名(和文)  
 任意視点・任意分解能で観察可能な3次元デジタルホログラフィック顕微鏡の開発  
 研究課題名(英文)  
 Real-time digital holographic microscopy observable in multi-view and multi-resolution  
 研究代表者  
 下馬場 朋禄 (SHIMOBABA TOMOYOSHI)  
 千葉大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号：20360563

## 研究成果の概要(和文)：

ホログラフィの原理を応用したデジタルホログラフィック顕微鏡(DHM)は、試料の光強度や奥行き情報などをホログラム画像上に同時記録できるという他の顕微鏡にはない特徴を持つ。本研究では、従来の顕微鏡では困難な、試料を任意の奥行き距離と広視野・高分解能で複数同時にリアルタイム観察できる DHM システムの試作を行った。

## 研究成果の概要(英文)：

In this study, we propose a DHM observable in multi-view and multi-resolution. The DHM can obtain multiple reconstructed images with arbitrary resolution, depths and positions, using shifted-Fresnel diffraction, instead of Fresnel diffraction. Shifted-Fresnel diffraction based on Fresnel diffraction can calculate a reconstructed image with different sampling spacings between the hologram and the reconstructed image, as well as a shift away from the propagation axis. In addition, we used four graphics processing unit (GPU) chips in order to observe four reconstructed images in real-time from one hologram.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
21年度	2,200,000	660,000	2,860,000
22年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：デジタルホログラフィック顕微鏡，デジタルホログラフィ

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：顕微鏡，デジタルホログラフィック顕微鏡，ホログラフィ，デジタルホログラフィ，GPU，DHM，3次元顕微鏡

## 1. 研究開始当初の背景

バイオイメーjing(細胞などの生体を生きたまま観測する技術)や MEMS (Micro Electro Mechanical Systems: 微小機械やその制御回路をシリコン基板上に一体化したシステム)などの分野の発展により、顕微鏡は重要な要素技術となっている。これらの分野で求められる顕微鏡の能力として、次の3

点が挙げられる。

- (A)試料を高分解能で観察
- (B)試料を広い観察領域(広視野)で観察
- (C)試料を3次元的に観察

このような顕微鏡が実現できれば、バイオイメーjingでは、広範囲に存在する複数の

生体を高分解能かつ立体的に観察ができ、また、大規模化・微細化が進む MEMS の動作検証にも役に立つ。しかし、これまでの顕微鏡では (A) ~ (C) は互いにトレードオフの関係にあり全てを同時に満たすことは難しい。

## 2. 研究の目的

ホログラフィの原理を応用したデジタルホログラフィック顕微鏡 (Digital Holographic Microscope : DHM) は、試料の光強度や奥行き情報などをホログラム画像上に同時記録できるという他の顕微鏡にはない特徴を持つ。

ホログラム画像上には試料に関する光情報が記録されるため、このホログラム画像からの光伝播をコンピュータで計算することにより、原理的には自由自在に試料の再生像を得ることができる。

しかし、これまでの研究では、ホログラム画像から再生像を得る計算時間が膨大であり、リアルタイム計測が困難な問題点が残されたままである。この問題を解決するために、我々は GPU(Graphics Processing Unit)を用いた DHM システムの試作し、再生像のリアルタイム再生を行った。

また、ホログラム画像には試料の光情報が全て記録されているため、従来の顕微鏡では困難な広視野で試料を観測しながらある領域を高分解能で同時観察できる顕微鏡の実現が期待できる。我々は、前述の(A)~(C)を同時に満たすことを目的とした、試料を任意の奥行き距離と広視野・高分解能で複数同時にリアルタイム観察できる DHM システムの開発を試みた。

この DHM システムの再生像計算には、一般に用いられる Fresnel 回折ではなく Shifted-Fresnel 回折を用いている。Shifted-Fresnel 回折の詳細は後述するが、この手法は再生像面サンプリング間隔を自由に変更できるため、再生像を広視野で観察し、高分解能で観察を行うことができる。

この Shifted-Fresnel 回折を 1 個の GPU 上に実装することで再生像計算の高速化を図った。しかし、本 DHM システムでは、様々な分解能や異なる奥行き距離の再生像を複数同時に計算する。そのため、再生像枚数に応じて計算量が増加し、滑らかに再生像を動画再生することが困難である。

本報告では 2 枚の GPU を用いることで複数枚の再生像を動画再生した。

また上記の光学系は、ホログラムを撮影するカメラ、参照光源 (一般的にレーザを用いる) とビームスプリッタや対物レンズなどの光学部品から構成される。このような光学系を組み上げるのにコストがかかり、光学系も撮影距離が 30~40cm に設定されているため

小型とは言えない。

本研究では Web カメラの CCD 素子を流用し、参照光源に安価な点光源 LED と Gabor 型ホログラムを撮影する光学系を採用することでコストを削減するとともにポータブルな DHM システムの構築も行った。

## 3. 研究の方法

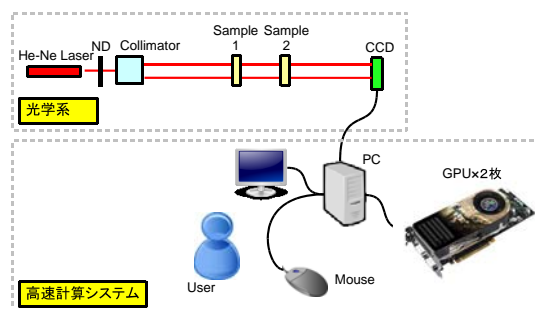


図 1 DHM システム

図 1 に、(A)~(C)の問題を解決する新 DHM システムの概略図を示す。提案する手法では、ホログラムを撮影する記録光学系は、インライン記録光学系を使用する。撮影する試料はテストパターン (USAF1951) と蚊の頭部で、これらを異なる奥行き距離に配置した。

本光学系は一般的な DHM とほぼ同じ構成であるが、対物レンズを使用していない点異なる。一般的な DHM では、試料と CCD カメラ間に対物レンズを配置し、分解能の向上を図るが、これは広視野での観察を犠牲にする。そこで本 DHM では、対物レンズを取り除くことで広視野を確保する。これにより分解能が犠牲になるが、後述する Shifted-Fresnel 回折計算を併用することで広視野と高分解能という、相反する要求の両立を図る。

この光学系により撮影されたホログラムを随時 USB 経由でコンピュータに転送する。ホログラムからの光伝播 (回折計算) を 2 枚の GPU 上で計算することにより再生像を得ることができる。

GPU には NVIDIA 社 GeforceGTX260 を使用した。この GPU はストリームプロセッサ (SP) を 192 個搭載し、SP のクロック周波数は 1.242GHz となっている。

本 DHM のユーザはマウスなどを操作することでディスプレイ上の再生像の分解能や観察距離を自由に操作できる仕組みになっている。

ホログラムから再生像を得るには、回折計算を行う必要がある。回折計算にはフレネル回折が一般的に用いられる。まず、開口面に撮影したホログラムを置き、ある距離  $z$  だけ離れた観察面での回折計算を行えば再生像を得ることができる。フレネル回折は FFT を用いることで高速計算ができるが、FFT を用

いたフレネル回折は開口面と観察面のサンプリング間隔を自由に設定することはできない。

フレネル回折には2つの表現方法（フーリエ変換表現と畳み込み表現）があるが、開口面と観察面のサンプリング間隔は同一か、もしくは、観察面のサンプリング間隔が波長 $\lambda$ と $z$ に依存してしまう制約がある。

これらの理由から、これまで DHM で広く用いられてきたフレネル回折計算手法を本研究にそのまま使用することはできない。

近年、この制約に縛られない Shifted-Fresnel 回折と呼ばれる新しい回折計算手法が提案された。この手法は、Fresnel 回折から導出されているため、距離計算に近軸近似を用いるが、開口面と観察面のサンプリング間隔を自由に設定できる特徴を持つ。

#### 4. 研究成果

DHM の特徴の一つに、観察距離の違う物体でもワンショットのホログラム撮影で物体の3次元情報を1枚のホログラムに記録できることが挙げられる。ここでは、本 DHM システムを使用して、前述の Shifted-Fresnel 回折と GPU を使用することで、試料を3次元的に広視野・高分解能で観察できることを確かめる。

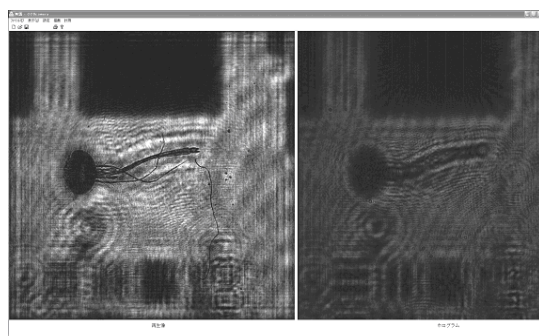


図2 再生像 (左) とホログラム (右)

図2は、実行中のプログラムの様子であり、ホログラム(右)と再生像(左)を示している。再生像の観察距離は0.05mとなっており、これは USAF テストパターンが置いてある距離である。再生像は USAF にピントが合っており、数字の2又は3が鮮明に見て取れる。蚊の頭部は、観察距離が異なるためピントが合っておらず、ぼけた状態で再生されている。

図3は、図2の撮影距離を0.044mへ変更したときの再生像の様子である。これは中央にある蚊の頭部が置いてある距離である。再生像は蚊の頭にピントが合っており、触覚や吸口が見て取れる。さらに、図2と図3の再生像の計算は、2枚のGPUで高速計算を行っている。

CCD カメラから、ホログラムがコンピュータへ逐次転送されており、その都度、演算・

描画が行われている。画面では静止画ではなく動画として再生像を確認することができる。

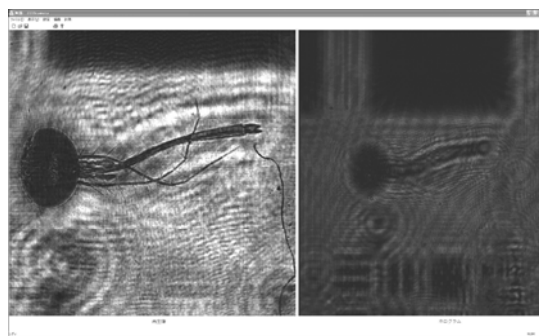


図3 再生像 (左) とホログラム (右)

このプログラムには Shifted-Fresnel 回折を導入しているため、動画で撮影をしながら高分解能な再生像を観察することができる。図3は図2の蚊の頭部を2倍の分解能で観察した時のスクリーンショットとなっている。分解能の変更はマウスのホイールと連動しているため、ユーザは自由に再生像の拡大・縮小を行うことができる。

また本研究では、Web カメラの CCD 素子を流用し、参照光源に安価な点光源 LED と Gabor 型ホログラムを撮影する光学系を採用することでコストを削減するとともにポータブルな DHM システムを開発した。

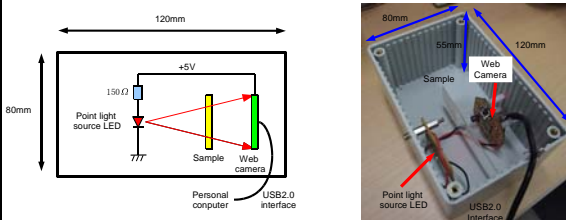


図4 Web カメラと点光源 LED を利用した安価な DHM

図4に今回開発した DHM システムの概略図(左)と概観(右)を示す。この DHM は左図のように、点光源 LED から発した光を参照光源として試料に照射し、試料から拡散された物体光と、試料をそのまま透過した参照光を CCD カメラ上で干渉させる Gabor 型ホログラムを撮影する。右図を見てわかるように、装置全体のサイズが 120 mm × 80 mm × 55 mm と小型であり、片手で持ち運び可能なポータブルな設計となっている。

Web カメラには、サンワサプライ社製 CMS-V27SETBK を用いた。Web カメラには像を CCD 素子上に結像させるレンズが付いているが DHM では不要なため、分解して取り外し CCD 素子をむき出しの状態で使用する。この CCD 素子の画素数は 640 × 480 画素で、最大フレームレートは 30fps となっている。この CCD

を制御するために Intel 社が開発を行っているオープンソースライブラリ OpenCV を用いた。また、この CCD はカラー-CCD のため、再生像を計算する前にグレースケールへ変換した。変換式には  $c=0.2999*r + 0.587*g + 0.114*b$  ( $c$ :グレースケール値,  $r$ :赤の画素値,  $g$ :緑の画素値,  $b$ :青の画素値)を用いた。点光源 LED には、コーデンシ社製の BL05-1211 (発光部  $50\mu\text{m}$ , 波長  $650\text{nm}$ , スペクトル半値幅  $30\text{nm}$ ) を使用した。この LED の規格からコヒーレンス長は約  $14\mu\text{m}$  であると予想される。点光源 LED の電源は CCD カメラから供給されている  $5\text{V}$  の電圧を使用し  $150\Omega$  の抵抗で電流制限を行っている。

Web カメラは購入時の価格が  $3,980$  円, RS コンポーネンツ社経由で購入した点光源 LED とケースの価格がそれぞれ  $2,800$  円と  $700$  円であり, 総コストは約  $7,500$  円となっている。ただし, スペーサやネジ, 抵抗の価格は無視した。

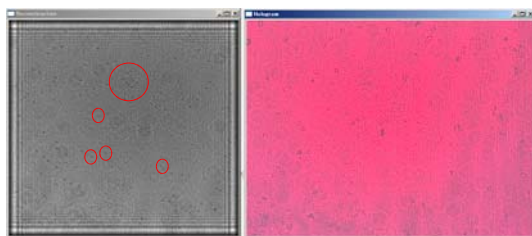


図 5 Web カメラと点光源 LED を利用した安価な DHM による再生像

撮影されたホログラムは USB2.0 インターフェイス経由で  $30\text{fps}$  の速度でコンピュータへ送信される。コンピュータはホログラムの再生像計算を行う。今回は試料と CCD カメラ間の距離を数  $\text{cm}$  に設定しているため, 再生像計算に角スペクトル法を用いている。

図 5 に本 DHM からの再生像を示す。試料には, ポリスチレン製ビーズ (平均サイズ  $20\mu\text{m}$ ) を使用した。左は再生像を, 右はホログラムとなっている。再生像 (左) 中にビーズを確認することができる。

## 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 10 件)

- [1] Tomoyoshi Shimobaba, Tomoyoshi Ito, Nobuyuki Masuda, Yasuyuki Ichihashi, and Naoki Takada, Fast calculation of computer-generated-hologram using AMD GPU and OpenCL, 3DSA2010, P1-10 (2010)
- [2] Tomoyoshi Shimobaba, Naoki Takada, Yasuyuki Ichihashi, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito, Fast numerical wave-optics library using graphic processing unit: GWO library

and its applications to holography, Digital Holography and Three-Dimensional Imaging(DH) DH2010, JMA15 (2010)

[3] Tomoyoshi Shimobaba, Taro Toyota, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito, Portable and low-cost digital holographic microscopy, International Workshop On Holographic Memories & Display 2010 (IWHM&D2010), 16E-4 (2010)

[4] Tomoyoshi Shimobaba, Tomoyoshi Ito, Nobuyuki Masuda, Yasuyuki Ichihashi, Naoki Takada, Fast calculation of computer-generated-hologram on AMD HD5000 series GPU and OpenCL, Optics Express, 18, 9955-9960 (2010)

[5] Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda, Yasuyuki Ichihashi and Tomoyoshi Ito, Real-time digital holographic microscopy observable in multi-view and multi-resolution, Journal of Optics, 12, 065402 (4pp) (2010)

[6] Tomoyoshi Shimobaba, Junya Miura and Tomoyoshi Ito, A computer aided design tool for developing an electroholographic display, Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 11, 085408 (5pp) (2009)

[7] Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito, Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito, Optics Letters, 34, 3133-3135 (2009)

[8] Kyoji Matsushima, Tomoyoshi Shimobaba, Band-limited angular spectrum method for numerical simulation of free-space propagation in far and near fields, Optics Express, 17, 19662-19673 (2009)

[9] Gong Zhaozhe, Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito, Prototype System of Digital Holographic Microscopy Observable in Multi-view and Multi-resolution, The 15th MICROOPTICS CONFERENCE (MOC'09), J-97 (2009)

[10] Tomoyoshi Ito, Tomoyoshi Shimobaba, Real-Time Computation for Electro-Holography, Digital Holography and Three-Dimensional Imaging(DH) DH2009, DWD1 (2009)

[学会発表] (計 27 件)

[1] Tomoyoshi Shimobaba, Naoki Takada, Yasuyuki Ichihashi, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito, Fast numerical wave-optics library using graphic processing unit: GWO library, and its applications to holography, Digital Holography and Three-Dimensional Imaging(DH) DH2010, Miami USA (2010)

[2] Tomoyoshi Shimobaba, Tomoyoshi Ito, Nobuyuki Masuda, Yasuyuki Ichihashi, and Naoki Takada, Fast calculation of computer-generated-hologram using AMD GPU and OpenCL, 3DSA2010, P1-10 (2010)

nerated-hologram using AMD GPU and OpenCL, 3DSA2010, 東京 (2009)

[3] Tomoyoshi Ito and Tomoyoshi Shimobaba, Hardware-based fast hologram calculation for three-dimensional television, 2010 International Workshop on 3D Information Technology (3DIT 2010), Soul, Korea (2010)

[4] 伊藤智義, 下馬場朋祿, 増田信之, CUDAを利用した3次元映像技術の高速化—ホログラフィによる3次元テレビ及び3次元顕微鏡への応用—, GPUコンピューティングセミナー2010 (ELSA ジャパン主催), 東京・東京大学武田ホール (2010)

[5] 下馬場朋祿, 伊藤智義, 電子ホログラフィと3次元テレビへの応用, 日本テクノセンター社企画セミナー, 新宿・小田急第一生命ビル22F (2010)

[6] 櫻井貴悠, 下馬場朋祿, 増田信之, 伊藤智義, マルチディスプレイを用いたデジタルホログラフィック顕微鏡の開発, The 12th IEEE Hiroshima Student Symposium, 島根・島根大学 (2010)

[7] 茅原博信, 下馬場朋祿, 増田信之, 伊藤智義, デジタルホログラフィを用いた全焦点画像の生成, The 12th IEEE Hiroshima Student Symposium, 島根・島根大学 (2010)

[8] 志田耕太郎, 下馬場朋祿, 増田信之, 伊藤智義, デジタル・ホログラフィにおける位相アンラッピングの検討, The 12th IEEE Hiroshima Student Symposium, 島根・島根大学 (2010)

[9] 下馬場朋祿, 増田信之, 伊藤智義, ホログラフィ計算におけるGPUコンピューティングの適用事例, Optics and Photonics Japan 2010 (OPJ 2010), 中央大学駿河台記念館・東京 (2010)

[10] 下馬場朋祿, 増田信之, 伊藤智義, 低コストなポータブル・デジタルホログラフィック顕微鏡の開発, Optics and Photonics Japan 2010 (OPJ2010), 中央大学駿河台記念館・東京 (2010)

[11] Tomoyoshi Shimobaba, Taro Toyota, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito, Portable and low-cost digital holographic microscopy Portable and low-cost digital holographic microscopy, International Workshop On Holographic Memories & Display 2010 (IWHM&D2010), 東京 (2009)

[12] 下馬場朋祿, 増田信之, 伊藤智義, 3次元観察可能な広視野・高分解能デジタルホログラフィック顕微鏡の開発, 東京 (2009)

[13] 下馬場朋祿, 茅原博信, 増田信之, 伊藤智義, マルチGPUによるリアルタイム複数視点・任意分解能デジタルホログラフィック顕微鏡, 東京 (2009)

[14] 三瓶卓方, 下馬場朋祿, 市橋保之, 白木厚司, 中山弘敬, 杉江崇繁, 高田直樹, 増田信之, 伊藤智義, GPUクラスタを用いた1800万画素電子ホログラフィシステム, 3次元画像コンファレン

ス, 東京 (2009)

[15] 下馬場朋祿, 増田信之, 伊藤智義, GPUを用いた波動光学・ホログラフィ計算の高速化事例—3次元テレビ・3次元顕微鏡への応用, 新潟 (2009)

[16] 下馬場朋祿, CUDAを利用したFFTアプリケーションの高速化—リアルタイム・デジタルホログラフィック顕微鏡の開発, GPUコンピューティングセミナー2009 (ELSA ジャパン主催), 千葉 (2009)

[17] 下馬場朋祿, 増田信之, 伊藤智義, 点光源モデルに基づく計算機合成ホログラムの高速生成とホログラム用CADツールの開発, ホログラフィックディスプレイ研究会会報 (HODIC), 札幌 (2009)

[18] 下馬場朋祿, 増田信之, 伊藤智義, GPUコンピューティングによるホログラフィ計算の高速化, 第1回GPUフォトンクス研究会 (応用物理学会・日本光学会・情報フォトンクス研究グループ, 宇都宮 (2009)

[19] 増田信之, 下馬場朋祿, 伊藤智義, CUDAを用いたホログラフィによる3次元映像技術の研究例—開発環境の基礎および高速化の試み—, CUDAファンダメンタルセミナー, 東京 (2009)

[20] 下馬場朋祿, 伊藤智義, 増田信之, 市橋保之, 高田直樹, AMD GPUとOpenCLを用いた計算機合成ホログラムの高速計算, 立体映像技術研究会, 東京 (2009)

[21] 増田信之, 下馬場朋祿, 伊藤智義, マルチコア・プロセッサによるホログラフィ計算—FPGA及びGPUによる高速化例, 日本機械学会流体工学部門研究会デジタルホログラフィック応用計測研究会, 東京 (2009)

[22] Tomoyoshi Ito and Tomoyoshi Shimobaba, Tomoyoshi Ito and Tomoyoshi Shimobaba, Digital Holography and Three-Dimensional Imaging(DH) DH2009, カナダ・バンクーバー (2009)

[23] Gong Zhaozhe, Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito, Prototype System of Digital Holographic Microscopy Observable in Multi-view and Multi-resolution, The 15th MICROOPTICS CONFERENCE (MOC'09), 東京 (2009)

[24] Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito, A large-scale hologram simulation using a computer-aided design tool for electroholography, The 15th MICROOPTICS CONFERENCE (MOC'09), 東京 (2009)

[25] Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito, Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito, International Workshop On Holographic Memories & Display 2009 (IWHM&D2009), 東京 (2009)

[26] Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda

a and Tomoyoshi Ito, Fundamentals of GPU computation, Tutorial in National Taiwan Normal University, 台湾・台北 (2009)

[27] Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito, Applications of GPU computing in digital hologram, Optics and Photonics TAIWAN (OPT2009), 台湾・台北 (2009)

〔図書〕 (計 1 件)

[1] Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito, Multi-view and multi-resolution real-time digital holographic microscopy, MICROSCOPY: SCIENCE, TECHNOLOGY, APPLICATIONS AND EDUCATION MICROSCOPY BOOK SERIES - Volume 2, 1419-1425 (2010)

〔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://brains.te.chiba-u.jp/~shimo/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

下馬場 朋禄 (SHIMOBABA TOMOYOSHI)

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20360563

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：