

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23300032

研究課題名(和文) 3DホロTVを用いた三次元光空間再生の視覚機能による評価

研究課題名(英文) Evaluation of 3D light field reconstruction in terms of visual function using 3D Holo-TV

研究代表者

坂本 雄児 (Sakamoto, Yuji)

北海道大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：40225826

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：ホログラフィの原理を用いた3DホロTVは理想の立体表示技術と考えられ、次世代の立体映像システムとして実用化が期待されてきた。本研究では、3DホロTVの作り出す三次元光空間を視覚機能より評価を行うために、輻輳と調節の視覚機能を測定可能な専用の3DホロTVを開発し、実験を行った。この結果、静止立体画像においてはシステムによって表示された立体映像と、同じ奥行きにある実物体の指標とでは、視覚生理的な反応に統計的に差がないことが明らかになった。また、動的立体映像を用いた実験でも、同様な傾向が見られ、実機においても3DホロTVは視覚面からは理想的な表示装置であることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：A three-dimensional holographic television (3D Holo-TV) based on holography technique is seen as an ultimate 3D TV system. To evaluate the light space field generated by a 3D Holo-TV system in terms of the visual performance, we developed the special designed a 3D Holo-TV system that is able to measure the responses of accommodations and vergence. In the experiments, the responses are measured when observers watched the motionless and moving targets displayed by the 3D Holo-TV. The experimental results strongly indicate that 3D Holo-TV is a superior 3D display because there is no difference between the responses by the real object and ones by the 3D Holo-TV.

研究分野：情報メディア学

キーワード：可視化 三次元表示システム 電子ホログラフィ 視覚生理

1. 研究開始当初の背景

近年、様々な立体映像システムが開発され、3D映画、3Dビデオ、3Dゲームなどで急速に一般に普及している。しかし、これら現在市販されている立体映像システムは、ステレオ方式に基づいており、視覚生理的な疲労や実在感の欠如などの問題が知られている。疲労の主な原因は、これらの立体映像システムが形成する三次元光空間は、実物体が形成する三次元光空間と異なることである。特に、視覚機能では大切な輻輳刺激（物体の奥行きによって「より目」になる眼球の回転運動を引き起こす刺激）と、焦点調節刺激（物体の奥行きに対して水晶体が焦点距離を調節するための刺激）との間に、原理的に矛盾をきたすためであるとされ、分担者である奥山によって研究され現在は定説となっている。このことは、実用化されているステレオ視方式の立体映像システムでは原理的に問題を解決できないことを意味している。

一方、ホログラフィはレーザー光によって写真乾板上に物体の三次元情報を記録する技術で、小さな芸術品からポートレートに至るまで様々な立体写真が作られてきた。原理的には物体が実在する場合と同じ三次元の光波面を再生するため、良く作られたホログラム（ホログラフィ技術で作られた立体写真）は物体がそこには無いとは信じられない程の実在感のある立体像を表示することができる。この立体像を電気通信することが可能となれば、現在の立体映像システムが持つ問題点を解決することができる。このため、ホログラフィによる3Dテレビジョンシステム（3DホロTV）は将来の理想の立体映像システムであると考えられ、実用化への期待が高まっている。

しかし、その一方で3DホロTVは、実際に様々な技術的な問題があった。このため、理想の立体映像システムの原理であると言われ続けながら実現されてこなかった。今日、液晶パネル技術の発展や計算機技術の発展、および3DホロTVに関する様々な研究により、問題は解決に向かいつつあり、この数年で3Dの撮影から表示まで3DホロTVシステムの実現の可能性がでてきた。

2. 研究の目的

3DホロTVは、理論的には物体が作り出す波面をそのまま再生するため、実際に物体がある場合と区別することのできない三次元光空間を形成する。しかし、技術的な問題があったため、3DホロTVの試作機自体は世界的にも少なく、さらに、三次元光空間の特性を視覚機能の面から評価するに適した装置は無かった。そのため、3DホロTVが理想的な立体映像システムの特長を持つかは、これまで、実機で確認されたことは無かった。

そこで、本研究では人間の視覚系から見た3DホロTVの能力を明らかにすることを目的として行われた。特に、現在のステレオグラム方式の立体視がかかえる輻輳刺激と焦点調節刺激の矛盾が、3DホロTVにおいて発生しないことの確認が第一の目的となる。第二の目的は、輻輳刺激と焦点調節刺激に対して、視覚がそれぞれに起す輻輳反応と調節反応の確認である。3DホロTVが表示する立体映像によって誘発されるこれらの反応が実物体に対するものと同じであれば、視覚系は実物体と同等であるとみなしていることになる。

3DホロTVがこれら2つを満たしている場合は、視覚生理的な疲労や実在感の欠如などの問題点を持たない優れた立体表示システムであること示していることになる。ただし、実際に疲労をしないかは、長時間の視聴による実験が必要であり、本研究では行わない。

3. 研究の方法

(1) 研究方法の概略

この研究では、視覚機能評価が可能な3DホロTV装置の製作が必須である。この研究で必要とされる性能を持つ3DホロTVシステムが実現されていないことから、装置の開発から開始した。平成23年度～平成24年度に表示装置である電子ホログラフィ装置を開発、これに視覚機能測定装置(オートレフケラトメータ)を組み込んだ。また、これに平行して3D撮影装置の開発を行った。

これらの装置の完成により、立体映像に対する人間の生理的反応の測定が可能となり、続く平成25年度は開発された3DホロTVシステムを用い、表示された静止立体映像に対する人間の眼の視覚生理的反応(輻輳、調節の反応)を測定した。さらに、平成26年度は、動的立体映像に対する生理的反応の測定実験を行った。この結果の統計的な解析と表示された三次元光空間の特性との比較を行った。

(2) 3DホロTV装置の構成

図1に開発した3DホロTVシステムの概略を示す。このシステムは、3D撮影装置、高速データの処理装置、立体表示装置である電子ホログラフィ装置からなる。電子ホログラフィ装置には視覚機能測定装置が組み込まれており、被験者の視覚生理的反応が測定できる。

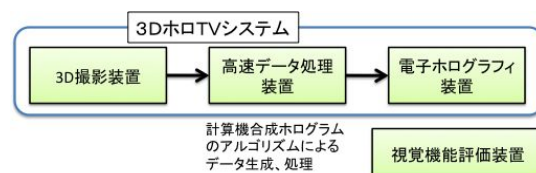


図1 システムの概要

このシステムでは3D撮影された物体情報から電子ホログラフィ用データまで、全てデジタル処理がなされ、計算機合成ホログラムで使われるアルゴリズムを元に開発されている。この計算機合成ホログラムは、仮想的な物体から電子ホログラフィに用いられるデータを生成する手法である。本研究では仮想的な物体の映像生成に用いられる他、3D撮影装置において、電子ホログラフィのデータの生成に用いられている。

4. 研究成果

(1) 電子ホログラフィ装置の開発

視覚機能面から評価が可能な電子ホログラフィ装置は、フルパララクス(上下方向ともの視差)で、近距離から遠距離までの立体映像の表示が可能であること、その表示する像の光学的特性が与える視覚への刺激が、輻輳、調節とも実際の物体と同様であることが重要である。また、両眼による立体視と、これらを可能とする広い視野が必要とされる。現在、これらの装置は存在せず、上記の機能を持つ電子ホログラフィ装置を開発した。その概略図を図2に示す。開発された電子ホログラフィ装置は左右の目に独立に立体像を表示する構成を用いている。この方式では左右の目用にそれぞれに空間光変調器として高分解能の液晶パネル(LCD)を使用し、ホログラムデータを表示する。これに、光源(発光ダイオード:LED)と光学系を付加し構成された装置となる。ヘッドマウンティング型のディスプレイ(HMD)と同様の構成であると考えれば良いが、本システムではホログラフィの原理を用いているため視覚の調節も含めた光空間の再生が可能となる。

開発された電子ホログラフィ装置は、水平視野15度であり、世界トップクラスの視野となる。これにより、本実験に必要とされる奥行きが深い立体像を表示可能となった。また、表示される三次元光空間の輻輳と調節刺激を光学的に測定した結果を図3に示す。実物体が奥行きにより示す刺激の理想直線(波線)にほぼ一致しており、この装置が実物体同様の刺激を生成していることが分かる。

さらに、この電子ホログラフィ装置には視覚機能を測定のためのオートレフラクトメータ(PowerRef3)を組み込まれている。この装置は輻輳と調節を測定することができ、観察時の視覚生理的な両反応を同時に測定することができる。また、実験は実物体の観察時と、表示された立体映像の観察時の両方で行われるため、両者において測定可能な光学系となっている。開発した視覚機能評価装置付きの電子ホログラフィ装置を図4に示す。

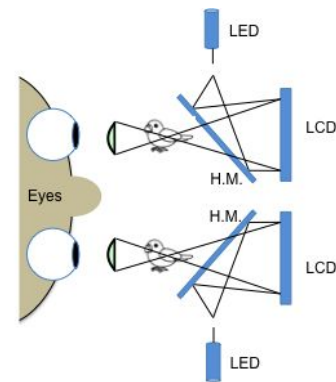


図2 電子ホログラフィ装置の概略

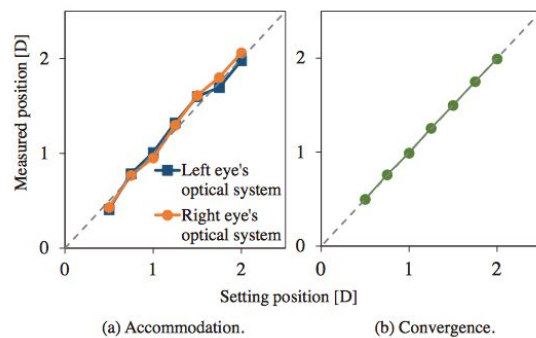


図3 電子ホログラフィ装置の三次元光空間における刺激の光学的測定結果 (a) 調節刺激、(b) 輻輳刺激

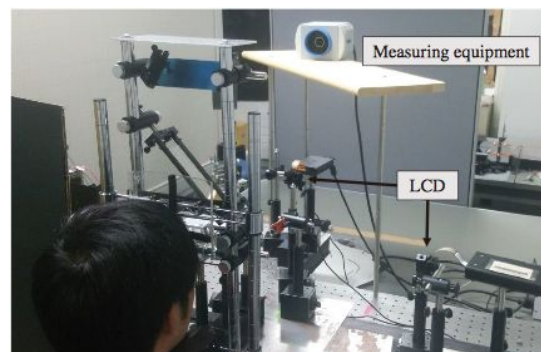


図4 視覚機能測定装置を組み込んだ電子ホログラフィ装置

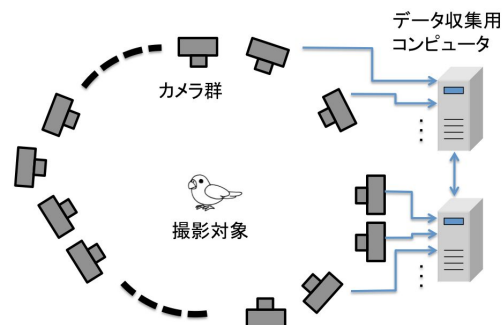


図5 多視点およびレンジセンサによる3D撮影装置の概略

(2) 3D撮影システム

図5に3D撮影システムの概略を示す。撮影対象となる物体を取り囲む形で配置した8台のウェブカメラと4台のレンジセンサにより撮影した多視点映像と奥行き情報から物体の立体情報を入手する多視点3D撮影方式を用いる。得られたデータより対象の物体の三次元構造を推定し、電子ホログラフィ装置用のデータを計算機合成ホログラムのアルゴリズムを用いた計算により求めている。図6に組み立てられた3D撮影システムを示す。これには、カメラ・レンジセンサ群とこれらを支える構造材が写っている。大きさは、5m×2.5mの大きさがあり、二人の3D撮影を行うことができる。図7に撮影した対象と電子ホログラフィ装置で表示した立体像を示す。低解像度、計算時間が長いことなどの問題があるが、3D撮影とこれよりの電子ホログラフィ装置による表示が可能であることが示された。

(3) 計算機合成ホログラムの計算アルゴリズムの研究

高画質な立体映像の計算法

従来の電子ホログラフィに表示される計算機合成ホログラムの画像は、画質が悪く、また、レンダリング技術において充分ではなくリアリティに欠ける問題点があった。そこで、高画質化の研究を行った。この研究成果の一つとして、光線追跡法を用いたアルゴリズムが開発された。図8に表示された立体像を示すが、カラーで、物体の質感(磨かれた金属やプラスチックなど)、多重反射、隠面消去、屈折なども表現できるようになった。これらは、高画質化に関して、従来のアルゴリズムからの大きなブレイクスルーとなった。

高速計算法

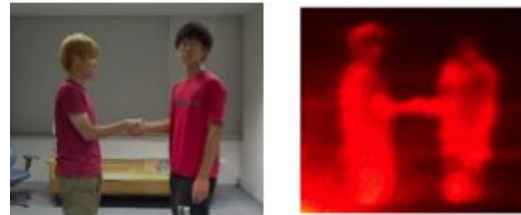
計算機合成ホログラムのもう一つの問題として、計算量が膨大であり、計算時間がかかることがあげられる。そこで、GPGPU (General-purpose computing on graphics processing unit)を用いたハードウェアアクセラレーションとこれに適した計算アルゴリズムの研究を行った。この成果の一つとして、ポリゴンモデルを従来法より1桁以上高速で計算できるアルゴリズムが見いだされた。図9に、従来法との計算時間の比較を示すが、実用的な範囲での使用では、他の手法に比べて高速である。

(4) 被験者による評価実験

上述の開発した3DホロTVシステムを用いて、ホログラフィの表示する立体映像が人間に実物体と同様な反応を示させることができるかを確認した。このために、被験者に実物体とホログラフィによって表示される立体映像を提示し、被験者の目の調節機能と輻輳機能の反応を調べた。



図6 3D撮影装置のカメラ・レンジセンサ群



(a) Target objects (b) Reconstructed image

図7 3D撮影による立体表示像：(a) 対象物体 (b) 電子ホログラフィ装置による立体表示像



図8 光線追跡法を用いた計算機合成ホログラムアルゴリズムによる立体表示

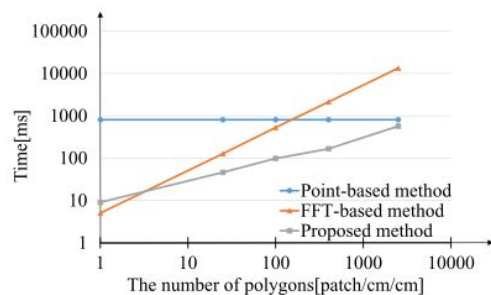


図9 GPGPUを用いた高速計算アルゴリズムの計算時間

静止画像

被験者にある一定の奥行きに実物体と立体像を配置し、奥行き距離を変化させながら、

輻輳と調節の反応を測定した（測定中は奥行きを変化させない）。この測定結果の1例を図10に示す。横軸は配置した奥行き（単位D(1/m)）、縦軸は眼の反応を示す。実物体と立体像に対する反応は、ほぼ一致しており、視覚の反応はほぼ同じであることが分かる。

さらに、被験者の人数を増やし、統計的な検定としてt-検定と同等性の検定を行った。実物体と表示像への反応に対するt-検定、同等性の検定結果とも、両反応は異なるとは言えない、または同等であることが示された。

これを纏めると、静止画像の奥行きに対する人間の反応は、調節、輻輳において立体像が実物体と同等の反応を引き起こすことを示している。

動画像に対する反応

動的立体映像の実験では、次の二つの移動形式において同一指標を実物体、3DホロTV再生像で被験者に提示し、輻輳、調節の反応の測定を行った。

一定速度での指標の往復運動:図に反応の一例を示すが、調節、輻輳とも3DホロTVと実物体の指標に対する反応は良い一致を示している。被験者16人中、9人で動的な反応においても実物体と近い反応を示しており、立体像が等しい反応を引き起こす可能性を強く示唆した。

指標のステップ移動:二つの奥行きに置かれた指標を交互に表示し、反応を見るものであったが、3DホロTVの立体表示映像だけではなく、実物体においても個人差が大きく、かつ再現性に乏しい結果であった。日常ではあり得ない移動（瞬時に物体が移動する）のため、反応自体に不安定性がある可能性があり、この点は今後の課題となった。

(5) まとめ

視覚機能評価を行うことのできる3DホロTVシステムを開発し、表示される立体映像による輻輳、調節の反応を測定した。静的立体画像においては実物体と同等な生理的反応を得ることができ、理想的な立体表示システムであることが示された。一方、動的映像においては結論を出すことができなかったが、実物体での反応と近い結果が得られた。これらの結果から、3DホロTVは実験的に輻輳と調節の矛盾の少ない、視覚系に実物体と同様の生理的反応を誘起する立体表示手法であることが強く示唆される結果を得た。

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11件)

(1) 田井啓悟, 坂本雄児, "任意に配置した複数のレンジセンサとデジタルカメラを用いた実物体の計算機合成ホログラム,"

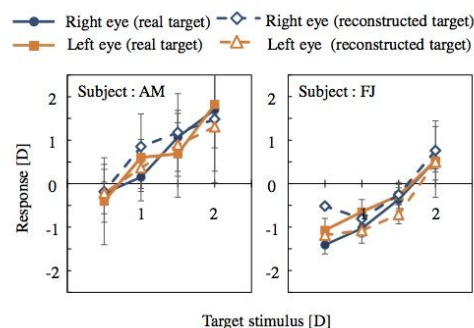


図10 静止立体画像に対する物体奥行きに対する調節反応

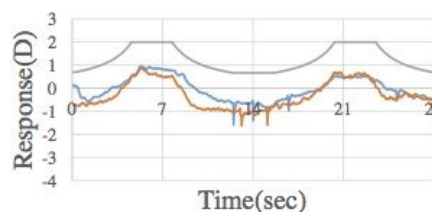


図11 動的立体画像に対する調節反応: 上から指標の奥行き、3DホロTVに対する反応、実物体に対する反応

- 映像情報メディア学会誌, 69, J140-J147, 2015, DOI # 10.3169/itej.69.J140, 査読有
- (2) Y. Ogihara, Y. Sakamoto, "Fast calculation of a CGH for a patch model using a point-based method," Appl. Opt. 54, A76-A83, 2015, DOI # 10.1364/AO.54.000A76, 査読有
- (3) R. Ohara, T. Yoneyama, M. Kurita, Y. Sakamoto and F. Okuyama, "Response of accommodation and vergence to electroholographic images," Appl. Opt. 54, 615-621, 2015, DOI # 10.1364/AO.54.000615, 査読有
- (4) 大原、米山、栗田、坂本、奥山 "電子ホログラフィの再生像の奥行きに対する静的輻輳・調節応答の測定," 映像情報メディア学会誌Vol.68, No.4, pp.J144-J151, 2014, DOI # 10.3169/itej.68.J144, 査読有
- (5) Tomoki Shiomi, Keita Uemoto, Takehito Kojima, Shunta Sano, Hiromu Ishio, Hiroki Takada, Masako Omori, Tomoyuki Watanabe, Masaru Miyao "Simultaneous measurement of lens accommodation and convergence in natural and artificial 3D vision" Journal of the SID, Vol.21, No.3, pp.1-9, 2013, DOI # 10.1002/jsid.156, 査読有
- (6) Tsubasa Ichikawa, Kazuhiro Yamaguchi, Yuji Sakamoto, "Realistic expression for full-parallax computer-generated holograms with the ray-tracing method," Appl. Opt. 52, A201-A209, 2013, DOI # 10.1364/AO.52.00A201, 査読有
- (7) Yusuke Ohsawa, Yuji Sakamoto, "Computer-generated holograms using multiview images captured by a small number of sparsely arranged cameras," Appl. Opt. 52,

- 1, pp. A167-A176, 2013, DOI # 10.1364/AO.52.00A167, 査読有
- (8) Kohei Hosoyachi, Kazuhiro Yamaguchi, Tsubasa Ichikawa, Yuji Sakamoto, "Precalculation method using spherical basic object light for computer-generated hologram," Appl. Opt. 52, A33-A44, 2013, DOI # 10.1364/AO.52.00A33, 査読有
- (9) K. Yamaguchi, T. Ichikawa, Y. Sakamoto, "Calculation method for computer-generated holograms considering various reflectance distributions based on microfacets with various surface roughnesses," Applied Optics, Vol.50, No.34, pp.H195-H202, 2011, DOI # 10.1364/AO.50.00H195, 査読有
- (10) Tsubasa Ichikawa, Yuji Sakamoto, Agus Subagyo, and Kazuhisa Sueoka, "Calculation method of reflectance distributions for computer-generated holograms using the finite-difference time-domain method," Applied Optics, Vol.50, No.34, pp.H211-H219, 2011, DOI # 10.1364/AO.50.00H211, 査読有
- (11) Hironobu Sakata, Kouhei Hosoyachi, Chan-Young Yang, and Yuji Sakamoto, "Calculation method for computer-generated holograms with cylindrical basic object light by using a graphics processing unit," Applied Optics, No.50, H306-H314, 2011, DOI # 10.1364/AO.50.00H306, 査読有

〔学会発表〕(計 1 1 件)

- (1) R. Ohara, Y. Sakamoto and F. Okuyama, "Dynamic Responses of Accommodation and Vergence to Electro-holographic Images," 2015 Joint Conference of IWAIT and IFMIA, Jan. 2015, Tainan (Taiwan)
- (2) Ryosuke Watanabe, Yuji Sakamoto, "Fast Generation Method for Computer-Generated Hologram Animation with Hidden Surface Removal Using Ray Tracing Method," SAP-OSA Joint Symposia (The 75th JSAP Autumn Meeting 2014), Sept. 2014, Sapporo
- (3) Yuki Ogihara, Yuji Sakamoto, "Fast Calculation Algorithm Based on Point-Based Method for CGHs Using Polygon Model," International Display Workshop 2014, Dec. 2014, Niigata
- (4) K. Tai, Y. Sakamoto, "Computer-Generated Hologram Using Range Sensors and Digital Cameras at Arbitrary Locations," International Display Workshop 2014, Dec. 2014, Niigata
- (5) Y. Sakamoto, "Holographic HMD with Wide Visual Field," International Display Workshop 2014, Dec. 2014, Niigata
- (6) Tsubasa Ichikawa, Kazuhiro Yamaguchi, Yuji Sakamoto, "Realistic 3D image reconstruction in CGH with Fourier transform optical system," Proc. SPIE, 86440D, Feb. 2013, San Francisco (USA)

- (7) Takuo Yoneyama, Tsubasa Ichikawa, Yuji Sakamoto, "Semi-portable full-color electro-holographic display with small size," Photonics West 2014, Proc. SPIE 9006, 17, Feb. 2014, San Francisco (USA)
- (8) T. Yoneyama, T. Ichikawa, Y. Sakamoto, "Semi-Portable Full-Color Electro-Holographic Display with See-Through Vision," IDW '13 THE 20TH INTERNATIONAL DISPLAY WORKSHOPS, 3Dp - 17L, 2013, Dec. Sapporo
- (9) Tsubasa Ichikawa, Takuo Yoneyama, Yuji Sakamoto, "Full color realistic 3D image reconstruction in CGH with binocular vision," Three Dimensional Systems and Applications (3DSA2013), S6-3, Jun. 2013, Osaka
- (10) Takuo Yoneyama, Chanyoung Yang, Yuji Sakamoto, Fumio Okuyama, "Eyepiece-type full-color electro-holographic display for binocular vision," Photonics WEST 2013, Proc. SPIE 8644, 13, Jan. 2013, San Francisco (USA)
- (11) Tsubasa Ichikawa, Kazuhiro Yamaguchi, Yuji Sakamoto, "Realistic 3D image reconstruction in CGH with Fourier transform optical system," Photonics WEST 2012, Proc. SPIE 8644, 0D, Jan. 2013, San Francisco (USA)

〔図書〕

なし

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂本 雄児 (SAKAMOTO YUJI)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
(申請時：准教授)

研究者番号：40225826

(2) 研究分担者

奥山 文雄 (OKUYAMA FUMIO)

鈴鹿医療科学大学・医用工学部・教授

研究者番号：70134690

(3) 研究分担者

宮永 喜一 (MIYANAGA YOSHIKAZU)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号：20166185

(4) 研究分担者

宮尾 克 (MIYAO MASARU)

名古屋大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号：70157593