

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23240016

研究課題名(和文) 高リスク作業の支援に対応可能な高信頼拡張現実感技術の開発

研究課題名(英文) Development of a reliable and accurate augmented reality technology for high-risk task support

研究代表者

加藤 博一 (Kato, Hirokazu)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：70221182

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,200,000円

研究成果の概要(和文)：原子力プラントの保守点検・解体作業、および、脊椎疾患の診断・手術を対象領域として、これまで対応が不可能であった高リスク作業を実際に支援可能な高信頼拡張現実感技術を開発した。特に、拡張現実感の最も重要な要素技術である現実物体と仮想物体のレジストレーションに関して、いくつかの種類の高精度な技術を開発した。また、それら技術の有効性に関する評価も行った。

研究成果の概要(英文)：This research project aimed to develop some reliable and accurate methods for augmented reality systems. Especially we focused on two application area: Nuclear Power Plant Maintenance and Dismantling and diagnoses of vertebral disease. Through this project, we are able to develop some new novel technologies for reliable and accurate augmented reality.

研究分野：拡張現実感

キーワード：バーチャルリアリティ 可視化 拡張現実感 作業支援

1. 研究開始当初の背景

本研究の学術研究分野を拡張現実感 (AR: Augmented Reality) と呼ぶ。拡張現実感とは、現実世界の中にコンピュータが生成した3次元CG映像や情報を、立体的にあたかもそれが実際に存在するように表示する技術である。このような研究は約20年の歴史があり[1,2]、その本来の目的は、人間の現実世界での活動支援であった。これは、航空機産業や医療現場などの間違いの絶対に許されない、かつ、非常に複雑な作業を必要とする分野において重要な課題である。人間が難しい作業を実行したり覚えたりするにあたっては、マニュアルを見るより、熟練者に手取り足取り教えてもらったり、同じ作業を真似る方が、分かりやすいし間違いも少ない。しかし、熟練者の減少や多品種少量生産へのシフトの影響で、人が人に直接指導するのは間に合わず、技術指導や技術継承は製造業分野において深刻な問題となっている。拡張現実感とは、そのような熟練者の代わりになるもので、実際の作業環境において、あたかも実物の手本があるかのように、次の作業動作を熟練者が手をとって教えてくれているかのように、さらには実際には視認できないような隠された部分にある情報も現実の遮蔽物が透明になって見えてしまうように、具体的な作業手順や注意点などを視覚的に非常に明瞭に提示する技術である。

近年、拡張現実感技術を用いたサービスが登場するようになった。しかし、注意すべきは、現在、実用されているものは、エンタテインメントやマーケティング応用であったり、一般情報サービスであり、拡張現実感研究者がもともと目指してきた応用とは異なっており、技術に対して厳密な精度や信頼性が特に要求されないサービスである。本研究を開始した時点において、20年前に想定された拡張現実感応用は残念ながらほとんど実現できていなかった。

2. 研究の目的

原子力プラントの保守点検・解体作業、および、脊椎疾患の診断・手術を対象領域として、これまで対応が不可能であった高リスク作業を実際に支援可能な高信頼拡張現実感技術を開発する。特に、拡張現実感の最も重要な要素技術である現実物体と仮想物体のレジストレーションに関して、これまで取り扱われてこなかった次のような条件下においても高精度高信頼性を維持して動作する技術を開発する。

1) 画像センシングにおいて取り扱いが非常に困難とされてきた、不均質な照明環境の下、強い鏡面反射の金属面を持つ円筒形パイプが複雑に行き交う作業環境において、他の作業者の存在による視野の部分隠蔽や保守作業や解体作業に伴う環境変化といった悪条件下における3次元レジストレーション。

2) 複雑で柔軟性があり作業中に形状変化や

組成変化のある人体内部組織に対する、レントゲン映像のような不明瞭な情報しか得ることの出来ない画像に基づく3次元レジストレーション。

また、表示系に関しても、ユーザビリティを考慮し、作業者の負担にならない新たな拡張現実型立体映像提示技術の確立を目指す。さらに、このような要素技術を使用し、実際の作業支援システムを構築し、実証実験を通じて、その有用性を明らかにする。

3. 研究の方法

原子力プラントの保守作業や解体作業の支援に拡張現実感技術の適用を検討してきた京都大学の石井裕剛助教、脊椎手術の専門家であり、そこへの拡張現実感技術応用を検討している産業医科大学の中村英一郎准教授と共同し、さらに研究代表者の所属する奈良先端大の関連技術研究者を加えて、研究チームを構成した。奈良先端大のグループが、基盤要素技術の開発を担当する。京都大学では、その技術を応用し、原子力プラントにおける保守作業や解体作業の支援システムを構築し、有効性を実証実験によって確認する。奈良先端大と京都大の間では、特に、画像センシングにおいて環境中から安定した特徴が獲得できない状況において、如何に安定したレジストレーションを実現するかといった問題の解決策を共同で探る。産業医科大学では、脊椎手術を対象に、その支援システムを構築し、生ブタを使用した実験などによって有効性を確認する。奈良先端大と産業医科大学の間では、特に、脊椎周辺領域において、体位の変化に起因する骨格形状の変化、および、椎間板や脂肪、筋肉組織などの柔軟組織の変形を前提として、不鮮明なX線画像から如何に高精度なレジストレーションを実現するかといった問題に共同で対応する。また、術者への拡張現実感情報提示手法として、作業者の負担にならない新たな技術の確立を目指す。

4. 研究成果

(1) 基盤要素技術

テクスチャーのない曲面物体の位置姿勢推定

物体の位置姿勢推定においては、通常、物体表面のテクスチャー情報が用いられる。つまり、物体表面にテクスチャーがない場合の処理には、異なる方式を考えなければならない。基本的には物体の輪郭線情報を用いた方式がとられるが、本研究においては、その精度や安定性の向上に向けて、2種類の提案を行った。

1つは、画像から得られた情報だけでは求めるべきカメラの位置姿勢情報のすべてのパラメータが確定できない場合がある。通常の処理では、このような状況は処理の失敗として取り扱われるが、提案手法では確定できるパラメータとそうでないパラメータを分

類し、確定できるパラメータのみを求めて処理を継続させることに成功した。

2つめは、輪郭線を用いた方法において、従来手法では輪郭線を折れ線近似で表現していたところを、二次曲線近似に変更することで、より高精度は位置姿勢推定を実現した。

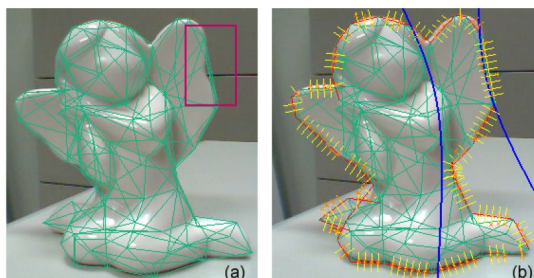


図1．輪郭線の二次曲線近似の効果

カメラ内部パラメータの変化するズームレンズカメラによるカメラの位置姿勢推定

カメラの位置姿勢推定に関する従来手法では、カメラの内部パラメータが既知という前提を用いているものがほとんどであった。本研究では、ズームレンズのような内部パラメータが変化し、また、その値を取得できない状況においても、内部パラメータを推定しつつ、高精度にカメラの位置姿勢を求める方法を提案した。具体的には、事前にズームの変化による内部パラメータの変化を計測しておき、内部パラメータの変化を一変数で表現する。そして、カメラの位置姿勢計算時にそのパラメータも未知数として最適化計算において求めることとした。また、ズーム変化のヒューリスティクスをコスト関数に導入することで、高精度化を図った。

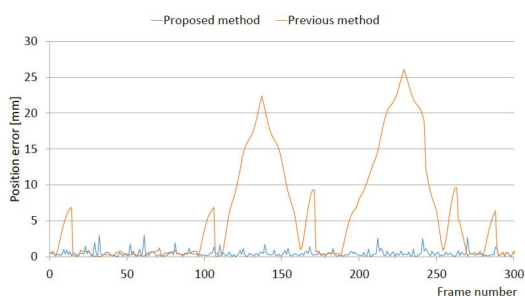


図2．カメラの位置計測誤差
(青：提案手法，赤：従来手法)

形状の変化する物体に対するプロジェクションARのためのレジストレーション

拡張現実感の一形態であるプロジェクション型拡張現実感においては、従来、対象とする物体の変形には対応できていなかった。そこで、赤外光に対して再帰性反射をする素材を用いて対象にドットマーカを貼り付け、リアルタイム3次元計測と赤外光によるマーカ認識を併用することで、物体の変形にも対応できるプロジェクション型拡張現実感を実現した。



図3．歪んだ面への投影結果

(2) 原子力プラントへの応用

原子力発電プラント内でのマーカストラッキングの安定性を向上させるために、RGB-D カメラを用いたリローカリゼーション手法の安定性を向上させた。また、原子力発電プラント内で利用可能な拡張現実感を用いた協調型解体作業計画立案支援システムを開発した。

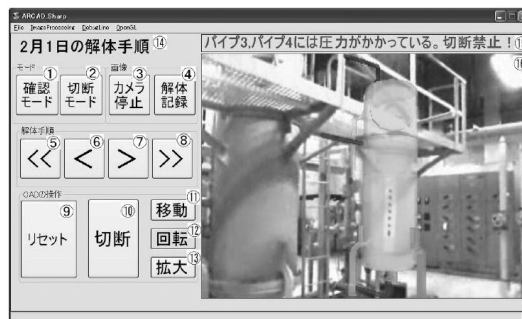


図4．解体作業計画立案支援システムのユーザインタフェース

(3) 脊椎診断への応用

CT ボリュームデータを変形させながら DRR (Digitally Reconstructed Radiograph) 画像を生成し、X 線画像と類似度を計算することで、人間の姿勢変化に伴う2つの脊椎の間の位置関係の変化を高精度に計測する方法を考案した。X 線画像の撮影位置や枚数が精度に及ぼす影響を調査すると同時に、本手法が従来手法より高精度であることを確認した。

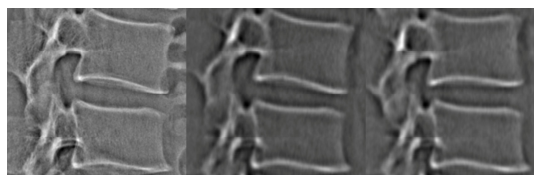


図5．(左) X 線画像，(中) 変形操作を施した後の DRR 画像，(右) 変形操作なしの DRR 画像

(4) 拡張現実感技術の評価に関連した成果

拡張現実感による情報提示と記憶効率の関係

拡張現実感による作業支援を受けた作業者が、支援を受けることで作業を記憶できなくなるのではという懸念があった。同時に、

拡張現実感は、空間に関連づけて情報を提示するために、記憶には良い方向に働く可能性も考えられた。そこで、実際に評価実験を行い、その結果、拡張現実感による情報提示が記憶に対してよい影響を与えることがわかった。

ハンドヘルド拡張現実感システム用ユーザビリティスケールの開発

拡張現実感システムのユーザビリティ評価を行い、その有用性などを比較するためには、統一的な評価尺度が必要になる。従来、マルチメディアシステムの評価のためのユーザビリティスケールは存在したが、ハンドヘルド拡張現実感システム特有の機能に対して評価できるものではなかった。そこで、ハンドヘルド拡張現実感システムのユーザビリティを評価するためのユーザビリティスケールを新規に開発した。

<引用文献>

- 1) R. Azuma, Y. Baillet, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, B. MacIntyre, "Recent Advances in Augmented Reality," IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.21, No.6, pp.34-47, 2001.
 - 2) F. Zhou, H. Duh, M. Billingham, "Trends in Augmented Reality Tracking, Interaction and Display: A Review of Ten Years of ISMAR," Proc. of IEEE/ACM Int. Sympo. on Mixed and Augmented Reality, pp.193-202, 2008.
- #### 5. 主な発表論文等
- [雑誌論文](計14件)
- 1) 天野敏之, 加藤博一, モデル予測制御を用いたプロジェクタカメラ系による見かけの制御, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J94-D, No.8, pp.1368-1375, 2011, 査読有
 - 2) 藤本雄一郎, 山本豪志朗, 武富貴史, 宮崎純, 加藤博一, 拡張現実感における情報提示の特性とユーザの記憶効率の関連性, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.18, No.1, pp.81-91, 2013, 査読有
 - 3) Marina Okawa, Takafumi Taketomi, Goshiro Yamamoto, Makoto Fujisawa, Toshiyuki Amano, Jun Miyazaki, Hirokazu Kato, A Model-based Tracking Framework for Textureless 3D Rigid Curved Objects, SBC Journal on 3D Interactive Systems, Vol.3, No.2, pp.2-15, 2012, 査読有 <http://seer.ufrgs.br/jis/article/view/36736>
 - 4) Marc Ericson C. Santos, Angie Chen, Takafumi Taketomi, Goshiro Yamamoto, Jun Miyazaki, Hirokazu Kato, Augmented Reality Learning Experiences: Survey of Prototype Design and Evaluation, IEEE Transactions on Learning Technologies, Vol.7, Issue 1, pp.38-56, 2014, 査読有 10.1109/TLT.2013.37
 - 5) Yuichiro Fujimoto, Ross T. Smith, Takafumi Taketomi, Goshiro Yamamoto, Jun Miyazaki, Hirokazu Kato, Bruce H. Thomas, Geometrically-Correct Projection-Based Texture Mapping onto a Deformable Object, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.20, No.4, pp.540-549, 2014, 査読有 10.1109/TVCG.2014.25
 - 6) Makoto Fujisawa, Yojiro Mandachi, Kenjiro T. Miura, Calculation of Velocity on an Implicit Surface by Curvature Invariance, Journal of Information Processing, Vol.24, No.4, pp.674-680, 2013, 査読有 <http://id.nii.ac.jp/1001/00094791/>
 - 7) Hirotake Ishii, Plant Maintenance and Dismantling Work Support based on Three-dimensional Scanning Technology, International Journal of Nuclear Safety and Simulation, Vol.4, No.2, pp.97-104, 2013, 査読有 <http://www.ijnsweb.com/?type=subscriber&action=articleinfo&id=163>
 - 8) Takafumi Taketomi, Kazuya Okada, Goshiro Yamamoto, Jun Miyazaki, Hirokazu Kato, Camera Pose Estimation under Dynamic Intrinsic Parameter Change for Augmented Reality, Computers and Graphics, Vol.44, pp.11-19, 2014, 査読有 10.1016/j.cag.2014.07.003
 - 9) 藤澤誠, 今井辰弥, 三河正彦, 粒子間ポテンシャル力を用いた流体-固体間相互作用のシミュレーション, 画像電子学会誌, Vol.44, No.1, pp.85-92, 2015, 査読有
 - 10) Weida Yan, Hirotake Ishii, Hiroshi Shimoda, Masanori Izumi, A Line Feature-based Camera Tracking Method Applicable to Nuclear Power Plant Environment, International Journal of Nuclear Safety and Simulation, Vol.5, No.1, pp.46-58, 2014, 査読有 <http://www.ijnsweb.com/?type=subscriber&action=articleinfo&id=194>
 - 11) 天野敏之, プロジェクタカメラ系を用いた光沢感と透明感の実時間操作, 映像メディア学会誌, Vol.68, No.12, pp.J528-J533, 2014, 査読有 10.3169/itej.68.J528
- [学会発表](計45件)
- 1) Hirokazu Kato, Tracking and Registration Technologies for Augmented Reality, The 18th International Display Workshops (IDW'11), 2011年12月9日, 名

- 古屋国際会議場（愛知県・名古屋市）
- 2) Yuichiro Fujimoto, Goshiro Yamamoto, Jun Miyazaki, Hirokazu Kato, Relation between Location of Information Displayed by Augmented Reality and User's Memorization, 3rd Augmented Human International Conference, 2012年3月9日, メジェーブ(フランス)
 - 3) Marina Atsumi Oikawa, Goshiro Yamamoto, Makoto Fujisawa, Toshiyuki Amano, Jun Miyazaki, Hirokazu Kato, Model Based Tracking of Rigid Curved Objects using Sparse Polygonal Meshes, The 21st International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT2011), 2011年11月29日, 大阪大学(大阪府・豊中市)
 - 4) Goshiro Yamamoto, Ichiroh Kanaya, Keiko Yamamoto, Yuki Uranishi, Hirokazu Kato, Visualization of Geometric Properties of Flexible Objects for Form Designing, The 10th International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2011), 2011年10月28日, バーゼル(スイス)
 - 5) Marina Atsumi Oikawa, Goshiro Yamamoto, Makoto Fujisawa, Toshiyuki Amano, Jun Miyazaki, Hirokazu Kato, Quantitative Evaluation Method for Model-based Tracking of 3D Rigid Curved Objects, The 2nd International Workshop on AR/MR Registration, Tracking and Benchmarking (TrakMark2011) 2011年10月26日, バーゼル(スイス)
 - 6) Makoto Fujisawa, Go Mimura, Toshiyuki Amano, Jun Miyazaki, Hirokazu Kato, A Fast Simulation Method Using SPH and Wavelet for Sub-Particle-Scale Turbulent Flow, Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, 2011年9月22日, 高雄(台湾)
 - 7) Toshiyuki Amano, Kazuki Osamura, Makoto Fujisawa, Jun Miyazaki, Hirokazu Kato, Controlled Illumination for the Object Recognition with Projector Camera Feedback, IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA2011), 2011年6月13日, なら100年会館(奈良県・奈良市)
 - 8) Kenzo Kumagai, Marina Atsumi Oikawa, Takafumi Taketomi, Goshiro Yamamoto, Jun Miyazaki, Hirokazu Kato, Robust Model-based Tracking Considering Changes in the Measurable DoF of the Target Object, The 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2012), 2012年11月14日, つくば国際会議場(茨城県・つくば市)
 - 9) Yuichiro Fujimoto, Goshiro Yamamoto, Takafumi Taketomi, Jun Miyazaki, Hirokazu Kato, Relationship between

- Features of Augmented Reality and User Memorization, IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2012 (ISMAR2012), 2012年11月06日~2012年11月07日, アトランタ(米国)
- 10) Marina Atsumi Oikawa, Igor de Souza Almeida, Takafumi Taketomi, Goshiro Yamamoto, Jun Miyazaki, Hirokazu Kato, Augmented Prototyping of 3D Rigid Curved Surfaces, IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2012 (ISMAR2012), 2012年11月06日~2012年11月07日, アトランタ(米国)
 - 11) Takafumi Taketomi, Kazuya Okada, Goshiro Yamamoto, Jun Miyazaki, Hirokazu Kato, Geometric Registration for Zoomable Camera Using Epipolar Constraint and Pre-calibrated Intrinsic Camera Parameter Change, Int. Sympo. on Mixed Augmented Reality (ISMAR2013), 2013年10月01日~2013年10月04日, アデレード(オーストラリア)
 - 12) Hirokazu Kato, Enhancing QoE of Daily Life with Augmented Reality, 8th International Workshop on Video Processing and Quality Metrics for Consumer Electronics (VPQM2014) (招待講演), 2014年01月30日~2014年01月31日, チャンドラー(米国)
 - 13) Daiki Handa, Hirotake Ishii, Hiroshi Shimoda, Enhancing Metric Perception with RGB-D Camera, 15th International Conference on Human-Computer Interaction, 2013年07月21日~2013年07月26日, ラスベガス(米国)
 - 14) Toshiyuki Amano, Projection Based Real-time Material Appearance Manipulation, 2nd IEEE International Workshop on Computational Camera and Displays in conjunction on CVPR2013, 2013年06月28日, ポートランド(米国)
 - 15) Jarkko Polvi, Takafumi Taketomi, Goshiro Yamamoto, Mark Billinghurst, Christian Sandor, Hirokazu Kato, Evaluating a SLAM-based Handheld Augmented Reality Guidance System, 2nd ACM Symposium on Spatial User Interaction, 2014年10月04日~2014年10月05日, ホノルル(米国)
 - 16) Marc Ericson Chavez Santos, Jarkko Polvi, Takafumi Taketomi, Goshiro Yamamoto, Christian Sandor, Hirokazu Kato, A Usability Scale for Handheld Augmented Reality, ACM 20th Symposium on Virtual Reality Software and Technology, 2014年11月11日~2014年11月13日, エディンバラ(英国)
 - 17) Max Krichenbauer, Goshiro Yamamoto, Takafumi Taketomi, Christian Sandor, Hirokazu Kato, Towards Augmented

Reality User Interfaces in 3D Media Production, 13th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2014年09月10日~2014年09月12日, ミュンヘン(ドイツ)

- 18) Ken Taketani, Makoto Fujisawa, Masahiko Mikawa, Surface Extraction Method for Particle-based Simulation Using Implicit Function Fitting, 4th International Workshop on Image Electronics and Visual Computing (IEVC2014), 2014年10月07日~2014年10月10日, サムイ(タイ)
- 19) Hirotake Ishii, Zhiyuan Man, Weida Yan, Hiroshi Shimoda, Masanori Izumi, Development of an Augmented Reality Based Simulation System for Cooperative Plant Dismantling Work, 2nd International Conference on Maintenance Science and Technology, 2014年11月02日~2014年11月05日, 神戸大学(兵庫県・神戸市)
- 20) Hirotake Ishii, A Feasibility Study of Decommissioning Support Method by Augmented Reality, 2015 Workshop on Nuclear Power Plant Decommissioning(招待講演), 2015年03月18日~2015年03月20日, 新北市(台湾)
- 21) Taro Kimura, Hironori Tokumaru, Hirotake Ishii, Hiroshi Shimoda, Y. Kouda, Development of a Relocalization Method for Tracking in Nuclear Power Plant, International Symposium on Socially and Technically Symbiotic Systems 2015, 2015年08月25日~2015年08月28日, 京都大学(京都府・京都市)
- 22) Toshiyuki Amano, Isao Shimana, Shun Ushida, Kunioki Kono, Successive Wide Viewing Angle Appearance Manipulation with Dual Projector Camera Systems, International Conference on Artificial Reality and Telexistence - Eurographics Symposium on Virtual Environments, 2014年12月08日~2014年12月10日, ベルリン(ドイツ)
- 23) Toshiyuki Amano, Projection Center Calibration for a Co-located Projector Camera System, 3rd IEEE International Workshop on Computational Camera and Displays in conjunction on CVPR2014, 2014年06月28日~2014年06月28日, コロンバス(米国)

〔図書〕(計2件)

- 1) 藤澤誠, マイナビ, CGのための物理シミュレーションの基礎, 2013, 240ページ
- 2) 蔵田武志, 清川清 編, 天野敏之ほか分筆, 科学技術出版, AR(拡張現実)技術の基礎・発展・実践, 2015(印刷中)

〔その他〕
ホームページ等
<http://imd.naist.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 博一(KATO, Hirokazu)
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授
研究者番号: 70221182

(2) 研究分担者

石井 裕剛(ISHII, Hirotake)
京都大学・エネルギー科学研究科・助教
研究者番号: 00324674

中村 英一郎(NAKAMURA, Eiichiro)
産業医科大学・医学部・准教授
研究者番号: 10412644

天野 敏之(AMANO, Toshiyuki)
和歌山大学・システム工学部・准教授
研究者番号: 60324472

藤澤 誠(FUJISAWA, Makoto)
筑波大学・図書館情報メディア系・助教
研究者番号: 90508409

(3) 連携研究者

宮崎 純(MIYAZAKI, Jun)
東京工業大学・情報理工学研究科・教授
研究者番号: 40293394

横矢 直和(YOKOYA, Naokazu)
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授
研究者番号: 10252834

神原 誠之(KANBARA, Masayuki)
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授
研究者番号: 10346306

(4) 研究協力者

サンドア クリスチャン(SANDOR, Christian)
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授
研究者番号: 80733196

山本 豪志朗(YAMAMOTO, Goshiro)
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教
研究者番号: 70571446

武富 貴史(TAKETOMI, Takafumi)
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教
研究者番号: 50610664