

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26870656

研究課題名(和文) 遠隔重機オペレータの環境把握性を強化する視覚提示システムに関する基礎研究

研究課題名(英文) Research on Vision Systems to Enhance Teleoperator's Visibility

研究代表者

亀崎 允啓 (Kamezaki, Mitsuhiro)

早稲田大学・理工学術院・講師

研究者番号：30468863

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、遠隔重機オペレータの環境把握性を強化する視覚提示システムの開発を行った。まず、オペレータに提供すべき映像群を作業状況と関連付けてモデル化を行い、それらの映像を提示可能な環境カメラおよびモニタシステムの設定手法を開発した。次に、現場環境の制約条件を踏まえた適応的映像を提示するため、カメラに割り当てる撮像役割を複数個定義し、撮像役割を状況に応じてカメラに割り当てるロールアサインメントシステムを開発した。VRシミュレータにて評価を行った結果、環境把握性の向上により作業性能が向上することが確認された。理論的考察に基づく実際の運用手法の開発により視覚提示システムの基盤的設計論が導出された。

研究成果の概要(英文)：In this study, a vision system to enhance operator's visibility for teleoperated work machines, called a visibility enhancement system, was developed. First, images which should be provided to operators were modeled with relation to work situations, and a method of setting of environmental cameras and monitors that can provide defined images was developed. Second, camera roles which are assigned to cameras were defined, and a role assignment system that assigns camera roles to cameras depending on work situations was developed in order to provide adaptive images suitable for situations considering constraints in actual environments. Experiments using a virtual reality simulator were conducted. The results indicate that the proposed visibility enhancement system could improve visibility and lead to improving work performance. A fundamental design method of vision system for teleoperation was derived by developing practical management method based on theoretical consideration.

研究分野：知的ヒューマンインタフェース

キーワード：遠隔操作 視覚提示 災害対応 カメラ制御 カメラ映像 環境把握

1. 研究開始当初の背景

(1) 遠隔操作者の環境把握性

無線技術を利用して安全な場所から重機を遠隔操作する「無人化施工技術」は、二次災害の危険性の高い災害現場や人間が直接入り込めない特殊環境下での復旧作業に利用され始めている。災害対応の性質上、無人化施工には、作業現場によらず導入でき、安全性を確保した上で最大限の効率性を発揮することが求められるのだが、導入が優先されるべき緊急性の高い複雑な現場ほど導入されておらず、作業効率も搭乗操作時の 4-6 割程度となっているのが現状である。この主要因として当該現場の不十分な視覚把握性が指摘されており、これは、カメラ映像情報の不完全性、操作/映像情報の通信遅延、体感/触覚情報の欠落という 3 つの技術的課題に帰着する。このうち、カメラ映像情報は、オペレータの遠隔操縦の計画や判断を決定づける基本的な入力情報となることから、上記課題の解決に直結する最重要課題と位置付けられる。そこで、申請者は、カメラ映像情報の強化がまず必要という考えに至った。

(2) 現在のカメラ映像システムの課題

現在の視覚提示システムの課題を設計段階と運用段階に分けて分析した結果を示す。

- 設計段階(課題①)：設計には、環境カメラおよびモニタシステムにおける多くパラメータを設定する必要があるのだが、対症的に取り扱われていたためノウハウや経験によるものがほとんどで、地理条件や作業内容、オペレータの認知特性などを考慮した科学的アプローチによる設定はいままでに行われていない。いかなる現場でも等質で効果的な映像を提供するには、必要十分なシステムの設定方法を工学的に解明する必要がある。
- 運用段階(課題②)：大規模現場のごく一部では、モニタに提示するカメラ映像のスイッチングが行われているが、ほとんどの現場では、個数や設置位置だけでなくカメラの方向や画角も作業中に調整されていない。作業状況に応じて求められる映像の質は異なる(物体把持時には、手先と対象物の奥行き距離)ため、状況に応じた柔軟かつ適応的な映像提示が必要となる。しかしながら、このような自動調整技術に関する研究は国内外ともに行われていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、遠隔重機オペレータの環境把握性を強化する視覚提示システムを開発する。オペレータに提供すべき映像を分析した上で、環境カメラ/モニタシステム設定条件を工学的に解明し、作業状況に応じた適応的映像提示手法を開発する。申請者が今までに培ってきた知能化インタフェースの設計論を発展させて取り組む。見えないがゆえの無駄な動き

直しや過度に慎重な動き、疲労などの低減に寄与し、無人化施工の高度化を担う有力なツールの 1 つになると考えている。

3. 研究の方法

本研究では、オペレータの環境把握性の強化を図るための視覚提示システムの開発を行う。理論的考察と実用性検証を効果的に行い、システムの基盤技術を構築するため、以下の 3 課題に取り込んだ。

A. 「オペレータに提供すべき映像」の分析：オペレータの環境把握性を満足するカメラ映像を、作業環境や機体状況だけでなく、オペレータの認知・心理的側面から多角的に分析した。制約条件を含まない理想条件における分析を行うことで、視覚提示システムの基盤的な入出力モデルを導出する(対課題①・②)。

オペレータの環境把握性を満足するカメラ映像群を、作業環境や機体状況、オペレータの認知・心理的側面から多角的に分析し、作業状態/視点/視野角/動作モードの 4 パラメータを変数として映像のモデル化を行った。作業状態は、申請者が開発してきた状態識別技術を応用し、映像内容に違いが現れる単位を新たに定義した。視点/視野角/動作モードは、奥行き感認識の難しさや同一撮像対象に対する異なる 2 視点映像の必要性などを考慮して定義した。複数の地理条件を VR シミュレータに構築し、得られた映像群を再現することで、映像モデルの汎用性と視認性向上効果を確認した(0 次実験)。

B. 環境カメラ・モニタシステムの設定方法：A で設定した映像群を提供するのに必要十分なカメラ・モニタシステムを設定する。映像の視点/視野角からシステム設定パラメータを導出する逆モデリング手法を開発する。本設定手法により、システム構成の最小化と映像効果の最大化を図る(対課題①)。

A で設定した映像群を提供可能なカメラ・モニタシステムを導出する逆モデリング手法を開発した。まず、1 つの映像に対するカメラ設置可能範囲と最小設置個数を、撮像対象・障害物・動作モードをパラメータとした 3 次元幾何計算から導出した。これを映像群すべてで行い、映像とシステム設定範囲の関係性を明確化した。次に、カメラ数の最小化と環境把握性の最大化を図るため、線形最適化手法を用いてカメラの統廃合を行い、必要十分なシステム設定を導出する方法論を開発した。最後に、異なる 2 視点映像など、同時に提供すべき映像の分析から最小モニタ数を導出した。ここでは、ヨー/ピッチ/ズームとモニタへの出力映像を調整可能とする。

C. 実環境の制約条件下での映像提示手法の開発：現場地形や障害物などの制約条件下で所望の映像を提供するための適応的映像提示手法の開発を行う。カメラに割り当てる撮像

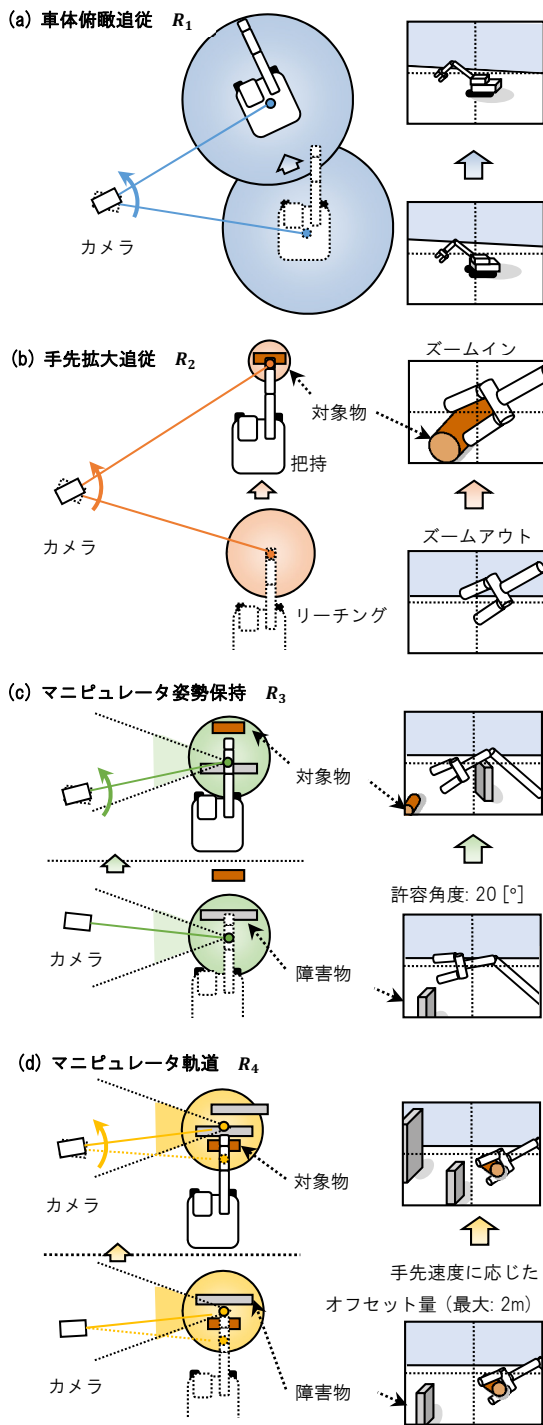


図1 カメラロール

モードとなるカメラロールを定義した上で、作業状況や作業機位置に応じたカメラロールを適切なカメラに割り当て、それを適切なモニタに提示するロールアサインメントシステムを開発する(対課題②)。

制約条件下で所望の映像を提供するために、複数のカメラロールを作業状況や作業機位置に応じてカメラ間で受け渡し、システム全体で最適化されるように割り当てを行う適応的映像提示手法を開発した。

- カメラロール：調整性・再利用性の高いカメラ制御を行うための撮像モジュールである(図1)。Aの分析結果をベースに撮像

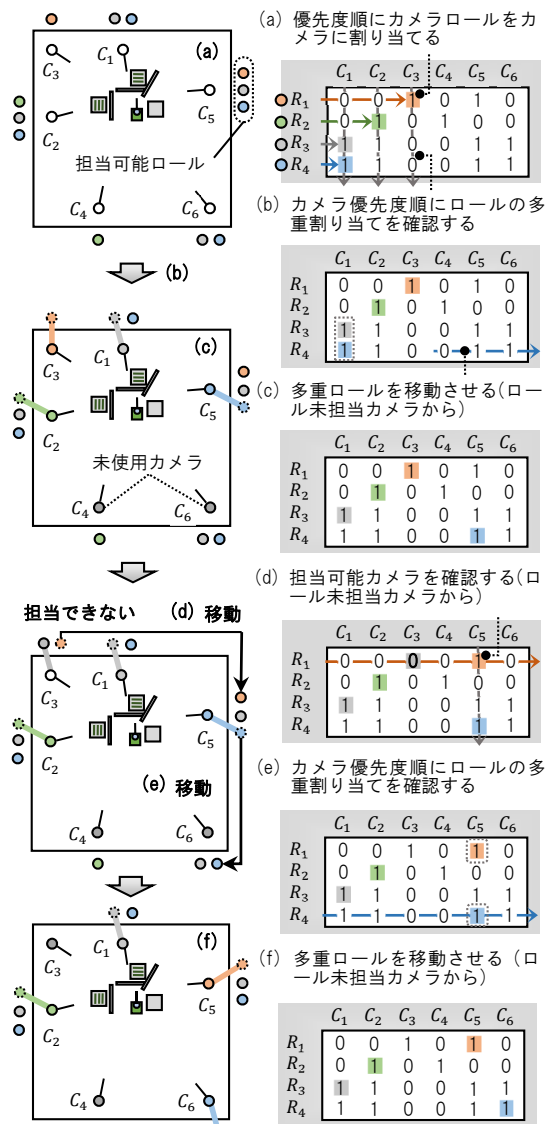


図2 カメラロールアサインメントルール

対象(機体全体・手先部など)と撮像モード(追従・拡大など)を組み合わせる複数個定義した。奥行き感補完や後方安全確認などのロールプロパティ(効率/品質/安全)を明確にし、状況に応じた担当優先度を設定した。

- ロールアサインメントシステム：カメラ・作業機・対象物・障害物との相対的な位置関係と当該作業状況で優先されるべき撮像対象を考慮して、カメラとカメラロールの関連付けを行い、システム全体での割り当ての最適化を図るロールアサインメントシステムを開発した(図2)。現場状況や機体位置は時々刻々と変化していくため、ロール担当可能性を実時間にチェックし、役割を満たせない場合のリアサインメントを動的に行うアルゴリズムを実装した。システムの簡易性と実時間処理を考慮して線形の最適化問題に落とし込んだ上で、機体の移動方向予測や映像のシームレス性などをパラメータとした最適解/準最適解の出力判断を行う評価関数を導入した。



図3 実験環境

D. VR シミュレータを用いた実証実験

開発・評価を効率的に行うために、本研究ではVRシミュレータを用いる(図3)。VRシミュレータの基本部分は開発済みであったが、映像提示/操作系に関する改良(特に、臨場感や物理挙動再現性)を行った。災害復旧作業を再現し、設定方法(手動/最適化)と運用方法(固定/適応的制御)の組み合わせ4パターンにおいて、作業効率や安全性、作業品質の違いを評価した。オペレータが見ているモニタや視線移動頻度などを定量化する視線計測装置やアンケートを利用して環境把握性の向上を確認する(1次実験)。このデータを作業状況やモニタ映像と関連付けることで、環境把握性を更に高めるカメラ制御パラメータやオペレータ特性に適應したモニタ配置などを導出し、諸条件への適合を図る簡便な学習手法を開発する。パラメータ調整後の視覚提示システムにて再度実験を行った(2次実験)。

4. 研究成果

現場環境や作業内容、オペレータの技能によって映像情報の性質が変わってくることを考慮し、適応的な映像を提供するために環境カメラの自動制御手法を開発した。共通的な作業シーケンスにおいて、オペレータに提供すべき映像を分析した結果、3つの撮像対象(作業機、マニピュレータ、手先)、4つの撮像モード(追従、ズーム、姿勢、軌道)を案出した。撮像対象と撮像モードの組み合わせにより定義される自動制御の基本モジュールとして4つのカメラロール(車体俯瞰追従、手先拡大追従、マニピュレータ姿勢保持、マニ

ピュレータ軌道)を定義した。次に、これらのカメラロールを適切にカメラに割り当てるため、ロールアサインメントシステムを開発した。障害物位置やカメラの制御限界などから当該カメラが役割を満たせない場合にも、線型計画法を用いたカメラロールの再割り当てを行うことで、さまざまな状況に対してロバストな映像提供を行うことができる。制御対象のカメラは車載カメラ1台と環境カメラ6台とし、VRシミュレータを用いた瓦礫撤去作業を模した評価実験を行った。1次実験として、固定(制御なし)、手動制御、自動制御、の3システムにおける作業効率、作業品質、および主観的な使いやすさを評価した結果、自動制御では、固定や手動制御で実現が難しかった作業効率と作業品質の両立が可能となること、オペレータの主観的な使いやすさが向上することが示唆された。また、2次実験として、視線分析に基づき映像数を削減し、作業状態に応じて映像を自動選択するシステムを提案した。実験の結果、所望の映像の注視頻度は増加したものの、提示する映像数およびその内容に関する考察は今後とも必要になることがわかった。例えば、把持時では手先拡大映像を注視するが、対象物に届くか否かがわかりにくいため、俯瞰映像を見て届くかどうかを確認することは有用である。

本実験はVRシミュレータを利用したが、実環境への実装時には、3次元マッピング技術、物体認識や画像のセグメント化技術の導入が必要となる。また、実環境・実映像での実証から、位置合わせのしやすさや動的切り替え時のカメラ映像の見やすさなどを評価するとともに、実験的に決定した各種パラメータの調整方法の検討を行う。

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20件)

- ① 亀崎允啓, 佐藤隆哉, 楊俊傑, 岩田浩康, 菅野重樹, 遠隔操作オペレータの環境把握性を高める非映像化情報の可視化と推奨注視映像への誘導, 第21回ロボティクスシンポジウム予稿集, 査読あり, 2016年3月, pp. 50-55.
- ② Kui Chen, Junjie Yang, Takahiro Katano, Mitsuhiro Kamezaki, and Shigeki Sugano, Analysis of Spatial Perception Ability Based on Human Eyesight for Teleoperators, Proc. 6th Int. Conf. Advanced Mechatronics 2015 (ICAM2015), 査読あり, Dec. 2015, pp. 351-352.
- ③ Ryuya Sato, Mitsuhiro Kamezaki, Junjie Yang, Shigeki Sugano, and Hiroyasu Iwata, Visual Attention to Appropriate Monitors and Parts Using Augmented Reality for Decreasing

- Cognitive Load in Unmanned Construction, Proc. 6th Int. Conf. Advanced Mechatronics 2015 (ICAM2015), 査読あり, Dec. 2015, page 45.
- ④ Junjie Yang, Mitsuhiro Kamezaki, Ryuya Sato, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, "Inducement of Visual Attention Using Augmented Reality for Multi-Display Systems in Advanced Tele-operation, Proc. 2015 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS2015), 査読あり, Sept. 2015, pp. 5364-5369.
- ⑤ Junjie Yang, Mitsuhiro Kamezaki, Ryuya Sato, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, Performance Analysis in Advanced Tele-operation System Based on Introduction of Danger-Avoidance View, Proc. Int. Conf. Intelligent Robotics and Applications (ICIRA2015), 査読あり, Aug. 2015, pp. 401-412.
- ⑥ Junjie Yang, Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, A 3D Sensing Model and Practical Sensor Placement Based on Coverage and Cost Evaluation, Proc. IEEE Int. Conf. CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (IEEE-CYBER2015), 査読あり, June, 2015, pp. 1-6.
- ⑦ Mitsuhiro Kamezaki, Junjie Yang, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, Visibility Enhancement using Autonomous Multicamera Controls with Situational Role Assignment for Teleoperated Work Machines, Journal of Field Robotics, 査読あり, Apr. 2015, pp. 1-23.
- ⑧ Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, Robust Object-Mass Measurement Using Condition-Based Less-Error Data Selection for Large-Scale Hydraulic Manipulators, Proc. 2014 IEEE Int. Conf. Robotics and Biomimetics (ROBIO2014), 査読あり, Dec. 2014, pp. 1679-1684.
- ⑨ Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, A Practical Operator Support Scheme and Its Application to Safety-Ensured Object Break Using Dual-Arm Machinery, Advanced Robotics, 査読あり, Vol. 28, No. 23, Dec. 2014, pp. 1599-1615.
- ⑩ Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, A Pragmatic Approach to Modeling Object Grasp Motion Using Operation and Pressure Signals for Demolition Machines, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration (JCMSI), 査読あり, Vol. 7, No. 6, Nov. 2014, pp. 356-363.
- ⑪ Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, Time-Series Primitive Static States for Detailing Work State and Flow of Human-Operated Work Machine, Advanced Robotics, 査読あり, Vol. 28, No. 20, Oct. 2014, pp. 1357-1374.
- ⑫ Mitsuhiro Kamezaki, Junjie Yang, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, A Basic Framework of Virtual Reality Simulator for Advancing Disaster Response Work Using Teleoperated Work Machines, Journal of Robotics and Mechatronics (JRM), 査読あり, Vol. 26, No. 4, Aug. 2014, pp. 486-495.
- ⑬ Junjie Yang, Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, Shigeki Sugano, Analysis of Effective Environmental-Camera Images Using Virtual Environment for Advanced Unmanned Construction, Proc. 2014 IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2014), 査読あり, July 2014, pp. 664-669.
- ⑭ Mitsuhiro Kamezaki, Junjie Yang, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, An Autonomous Multi-Camera Control System Using Situation-Based Role Assignment for Tele-Operated Work Machines, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA2014), 査読あり, May 2014, pp. 5971-5976.
- [学会発表] (計 13 件)
- ① 亀崎允啓, 佐藤隆哉, 楊俊傑, 岩田浩康, 菅野重樹, 複数画面を使った遠隔操作における注視映像と作業パフォーマンスの関連性分析, 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集(SI2015), pp. 2354-2355 (3G2-6), 名古屋, 2015 年 12 月.
- ② 佐藤隆哉, 亀崎允啓, 楊俊傑, 菅野重樹, 岩田浩康, 拡張現実感を利用した複数の視線誘導手法による遠隔操作者の認知負荷軽減に関する研究, 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集(SI2015), pp. 2320-2323 (3G1-2), 名古屋, 2015 年 12 月.
- ③ 亀崎允啓, 三矢隆史, 森島洋忠, 峰田健司, 岩田浩康, 菅野重樹, 識別性能の粒度を高める操作・運動・負荷情報を用いた拡張基底作業状態の提案, 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集(SI2015), pp. 1021-1022 (1N4-4), 名古屋, 2015 年 12 月.
- ④ 亀崎允啓, 佐藤隆哉, 楊俊傑, 岩田浩康,

菅野重樹, 無人化施工における視覚情報の強化に関する研究—作業状況に応じた環境カメラの自動制御と拡張現実技術を用いた注視支援—, 第15回建設ロボットシンポジウム論文集(SCR2015), paper no. 0-24, 大阪, 2015年9月. (査読有り)

- ⑤ 亀崎允啓, 楊俊傑, 岩田浩康, 菅野重樹, 被覆率とコスト評価に基づく3次元異方性センサ群の実用的配置手法の提案, 第33回日本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2015), paper no. 3H1-06, 東京, 2015年9月.
- ⑥ 亀崎允啓, 佐藤隆哉*, 楊俊傑, 岩田浩康, 菅野重樹, 遠隔重機作業の高度化に関する研究~拡張現実感を利用した映像の注視・解釈支援手法の開発~, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2015論文集(Robomec'15), paper no. 2P1-P04, 京都, 2015年5月.
- ⑦ 亀崎允啓, 三矢隆史, 岩田浩康, 菅野重樹, 測定条件に応じたデータ選定によるロバストな把持物体重量計測システムの開発, 第15回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集(SI2014), pp. 1139-1140 (2B2-3), 東京, 2014年12月.
- ⑧ 亀崎允啓, 楊俊傑, 岩田浩康, 菅野重樹, 遠隔重機作業の高度化に関する研究—作業状況に応じたロールアサインメントに基づく環境カメラの向き・画角調整—, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2014論文集(Robomec'14), paper no. 1A1-K02, 富山, 2014年5月.

〔図書〕(計4件)

- ① 亀崎允啓, 石井裕之, 石田健蔵, 関雅俊, 一柳健, “災害対応ロボット「オクトパス」”, 油空圧技術, vol. 55, no. 3, pp. 30-34, 2016年3月. (査読なし)
- ② Junjie Yang, Mitsuhiro Kamezaki, Ryuya Sato, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, “Performance Analysis in Advanced Tele-operation System Based on Introduction of Danger-Avoidance View”, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Intelligent Robotics and Applications, Proc. 8th Int. Conf. Intelligent Robotics and Applications (ICIRA2015) Part III, pp. 401-412. Aug. 2015. (Book chapter), 10.1007/978-3-319-22873-0_36
- ③ 亀崎允啓, 岩田浩康, 菅野重樹, “無人化施工の効率・安全性を高める映像の注視・解釈支援に関する調査研究”, 建設機械施工, vol. 67, no. 3, pp. 64-73, 2015年3月. (査読なし)
- ④ 亀崎允啓, 岩田浩康, 菅野重樹, “無人化施工における環境カメラのための半自動制御システムの基礎研究”, 建設機械施工,

vol. 67, no. 2, pp. 92-100, 2015年2月. (査読なし)

〔その他〕(計10件)

【ホームページ】(計3件)

- ① 早稲田大学 研究者データベース 教員氏名/亀崎允啓 https://www.wnp7.waseda.jp/Rdb/app/ipi0211.html?lang_kbn=0&kensaku_no=4978
- ② 早稲田大学理工学研究所 Web サイト http://www.wise.sci.waseda.ac.jp/research/node/17?profile_researchcategory=js
- ③ 早稲田大学理工学術院菅野研究室 Web サイト <http://www.sugano.mech.waseda.ac.jp/project.html>

【アウトリーチ活動情報】(計4件)

- ① Design of Intelligent Human-Machine Systems focusing on Human-Machine Interfaces, Invited Lecture in University of Moratuwa, Moratuwa, Sri Lanka, May, 2016.
- ② 次世代ロボットのための知的ヒューマンマシンインタフェース, 次世代ロボットとRT技術の未来~次世代ロボット開発の最前線~, 東京, 2016年3月.
- ③ 無人化施工の効率・安全を高める映像注視支援に関する調査研究, 平成24年度研究開発助成対象成果報告(平成26年度建設施工と建設機械シンポジウム), 東京, 2014年11月.
- ④ Design of Human-Robot Interface Systems-Toward Applications to Advanced Active Aging Research-, The 2nd Institute of Advanced Active Aging Research Symposium~Paradigm shifts in a super-aged society~, Oct. 2014.
- ⑤ 知的ヒューマンマシンインタフェースと事例紹介, 第3回サステナブル/ロボティクス・システムデザイン研究会, 宮城, 2014年8月.

【受賞】(計3件)

- ① ICAM2015 Honorable Mention in The 6th International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM2015), 2015年12月.
- ② 第30回日本ロボット学会学術奨励賞, 2015年9月.
- ③ Finalists of Best Paper Awards in IEEE-CYBER 2015, 2015年6月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

亀崎 允啓 (KAMEZAKI, Mitsuhiro)
早稲田大学・理工学術院・講師
研究者番号: 30468863