

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760215

研究課題名(和文) 準自律型操作支援による双腕建機作業の効率性・安全性向上に関する基礎的研究

研究課題名(英文) Efficiency and Safety Improvement Based on Semi-Autonomous Operation Support for Dual-Arm Construction Work

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) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：この度の大震災を機に、建設作業機を用いた災害救助・復旧作業、瓦礫撤去・分別作業などをはじめとする複雑・高度な重作業が社会的に強く求められるようになった。本研究では、グラップル(把持機構)を備えた双腕タイプの建設作業機をメインのターゲットとした操作者支援システムの基礎開発を行った。本支援システムは、オペレータが主体的に機械操作を行う中で、機械側の自律的な状態認識により判断された効率や安全性が低下する場合にのみ、オペレータの操作を支援するものである。実機を用いた評価実験の結果、本システムを利用することで、経験の浅いオペレータであっても、効率的かつ安全な作業を実現できるようになることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：In this study, an operator support system, which provides an operator with cognitive and operational support for achieving more complex tasks such as disaster rescue and recovery work using construction machinery, was developed. In particular, this study focuses on cooperative transport and object removal task using two manipulators with a grapple. This study aims at enabling any operators to work more safely and efficiently. The proposed operator support system provides suitable support (gain switching, in this study) to an operator, according to the needs of support, which are determined by using the task phase and specific condition identification methods. The results of experiments conducted using an instrumented actual machine system indicate that the number of error contacts, internal force applied, and mental workload decreased without increasing time consumption. This result confirmed that the proposed framework greatly improves the work performance of individual operators.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、知能機械学・機械システム

キーワード：知能化インタフェース 操作支援 状態識別 負荷計測 建設機械

1. 研究開始当初の背景

(1) 重機の複雑作業適用への期待

未曾有の大災害を機に、災害救助・復旧作業、瓦礫撤去・分別作業などの災害対応における重作業の効率化が社会的に一層強く望まれるようになった。これらの作業実現には高出力と巧みさを兼備した作業機が求められるが、高い力密度・応答性・頑強性を特長とする建設作業機(油圧ショベルなど)はベースマシンとして十分な素質を備えているといえる。最近では、複雑作業への適用を目的とした把持機構を有する双腕タイプの作業機が開発されており、この度の震災においては2つの腕を巧みに利用して瓦礫撤去・分別作業を行った。

ここで注意しなければならないのは、このような作業機は、極めて卓越した技術をもつ熟練オペレータによって操縦されていたということである。従来機が2本の操作レバーで1つのマニピュレータを操作していたのに対し、双腕作業機は2本のレバーで2つのマニピュレータを操作することから、複雑作業への適応性は上がる一方で、オペレータには極めて高度な操作技能を要求することになってしまう。また、適用作業の複雑化が進むと、状況認識や行動計画などに対してもオペレータの負担は増大してしまう。機械操作に手間取ることで作業の効率や品質の低下など負の影響を生み出すことに加え、2次的な問題として、困難な機械操作への傾注によって危険状態(外部の現場作業員の存在に気付かない)を看過してしまうという可能性も引き起こしてしまう。

これらの問題を解決するには、オペレータの操縦を多角的に支援する知能化技術が有効になると考えられる。

(2) 従来研究

これまでに、クレーンの制振制御、掘削・積込操作の技能分析、遠隔操作システムなど、重機操作の高度化に対する個々の技術開発が行われているが、操作者支援に関する体系的な議論は国内外・産学官に問わず十分に行われていないのが現状であった。

実用的な支援システムの構築には、適用作業分野の特徴(ここでは、オペレータ、作業機、作業環境)を総合的に捉えたシステム統合技術が不可欠になるが、従来研究では条件を限定した単一モジュール内の理論・解析的研究が多く、これらの技術は定着には至っていなかった。また、国土交通省を中心とした産官連携によるICT(情報通信技術)を利用した情報化施工、ゼネコンや大学機関によるRT(ロボット技術)を応用した無人化・自動化施工に関する研究が活発化しているものの、これらの技術は環境既知の単純作業への利用に留まっているのが現状である。これは、現状の技術レベルと自律化に必要な技術水準とにおける極めて大きな乖離が原因と言わざるを得ない。

(3) 知能化技術の整備

以上の背景を踏まえると、情報化技術の流れを踏襲しつつ、自律化施工の前段階に位置付けられる操作者支援技術の開発・整備が重要になると考えられる。知能化は、情報化と自動化を結ぶ技術的インタフェースとも捉えられ、情報化で不足している負荷計測技術や自動化で未整備の状況認識技術の開発により、情報化施工の強化・自動化施工の促進にも寄与すると考える。

2. 研究の目的

本申請課題では、オペレータに精神的負荷がかかる緻密な作業での動作パラメータの自動切り替え支援や、機械操作への傾注により看過された危険状態の提示など、オペレータが主体的に機械操作をする中で、機械側の自律的な状態識別(作業状態や危険状態)により必要に応じて情動的・物理的支援を提供する「準自律型操作者支援システム」の開発を行う。オペレータの技能レベルや作業内容に依存しない操作者支援システムを提供することで、誰が操縦しても複雑な作業を安全かつ効率的に遂行できるようになることが目的である。現状の機械知能と比べ人間の適応能力は極めて優位だが、奥行き感の認識や状態の定量的理解は難しく、ミス・勘違い・疲労といった欠点も存在する。人間の適応能力を最大限利用できるオペレータ操作を主体とした上で、計測や可視化を得意とする機械知能による補助を行うシステム構成とすることで、短所の相互補完だけでなく相乗効果を生み出すことが可能になると考える。

3. 研究の方法

操作者支援システムのキーモジュールとなるのが「状況認識技術」である。建機作業の分野においては、オペレータの技能レベルや作業環境の多様性に起因する未知情報の多さやその時変性により、汎用的かつロバストな状況認識が難しいという根源的問題がある(ここが自動車の運転支援などの分野と大きく異なる)。また、状況認識に不可欠な位置や負荷などを取得する情報検出技術では、劣悪な外部環境下での重作業という性質上マニピュレータへのセンサ搭載が難しく、負荷計測に関する実用化技術開発はほとんど進んでいないのが現状である。オペレータへの準自律支援に関しては、油圧システム特有の非線形性・個体差による厳密なモデリングの難しさを踏まえた上で、認知・判断・操作それぞれに対する多元的な支援が必要となるが、これらを体系的に扱った研究例は見当たらない。

本研究期間では、上述の建機分野特有の問題点を踏まえた負荷計測・状況認識・操作支援技術の開発を行い準自律型操作者支援システムの試作を行った。実機を用いた実証実験を行い、オペレータの技能レベルによらず次世代作業(双腕での分別解体など)が実現

できること確認する。さらに、時間効率や、誤操作・誤接触回数、手先の過負荷頻度などから支援システムの定量的評価を行う。実システムへの搭載を強く意識した開発が求められるため、システムの簡易化、設備コストの低減、高い汎用性については特に注意して取り組む。以下に、各モジュールの設計手法について述べる。

(1) 負荷計測

これまでに、油圧センサを用いた油圧シリンダの外力計測手法を開発している。この基礎開発を基に外力計測技術の性能向上を行う。1つは計測可能な負荷情報の自由度向上（シリンダ単体 手先外力負荷ベクトル）、もう1つは負荷情報の質の改善（精度、安定性）である。大きな非線形性を有する建機マニピュレータは正確なモデリングが原理的に難しい。モデルの厳密化はコストに対する実効性が低いため、モデル化誤差に起因する計測誤差を直接扱わず、簡易化モデルで最大限の計測性能を発揮する方法論を模索する。

(2) 状況認識

統計的最適化手法が広く用いられているが、適用分野特有の多様性（オペレータの操作技能や作業環境）から、発散もしくは局所解に陥る可能性が極めて高い。そこで、上述の多様性に依存しない状態識別手法として、操作情報と負荷情報の有無情報を用いて実時間に16通りの状態分類を行う基底作業状態（Primitive Static States: PSS）を開発している。ここでは、PSSを用いた確定的状態分類を基軸とし、時系列特徴量を用いた動的状態識別手法により操作支援と直結するPSS内部の詳細識別を行う。

(3) 操作者支援システム

オペレータにとって、「あってよかった」と思わせる支援が必要であり、「お節介や邪魔だ」と思われる支援であってはならない。例えば、物体運搬時の把持力低下に関しては情報提示までに留めることが妥当と考えられるが、物体落下が作業安全に大きく関わる運搬時などには機械操作に積極的に介入する必要がある。本研究では、双腕建機作業の効率性および安全性の向上を効果的に行うこと、さらに、より多くの作業環境やオペレータに共通して適用できること、を目的とした操作支援フレームワークを設計する。

4. 研究成果

(1) 負荷計測システム

計測値には除去しきれない誤差成分が必ず含まれるため、シリンダに発生していると思われる誤差の程度を定量化する手法を開発した。内在誤差の大きさを推定することは本質的に難しいため、当該システムにおいて一意に定義しやすい誤差の最大値を利用した。また、定量化する物理量には、再現性が

乏しく誤差の主要因となっている摩擦力を用いた。各シリンダに発生していると推定される誤差の最大値を内在誤差範囲（Internal Error Range: IER）と呼ぶ。矢状面のベクトル計測には2関節のトルクが必要だが、建機マニピュレータには3つのピッチ関節があることから、実時間で計算されるIERが小さい2つを計測シリンダ（センサ）として利用することで相対的な精度向上を図ることが可能になる。実機を用いた実験の結果、マニピュレータの状態に応じて計測に利用するセンサを切り替えることで、手先負荷ベクトル計測の精度が、利用するセンサを固定する場合に比べて、相対的に向上することが分かった（図1）。

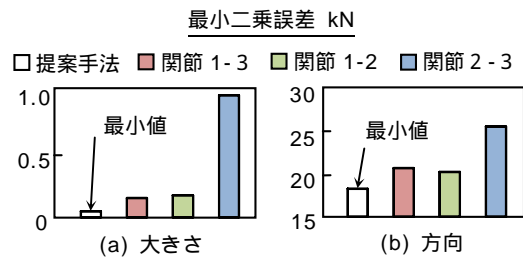


図1 運搬作業時の手先負荷ベクトル計測結果

(2) 状態識別システム

効果的な操作支援は、機械操作や状況判断能力などの作業遂行に関する操作者のスキルレベルと迅速性や正確性などの作業タスクに関する性質やその要求レベルを総合的に判断した上で提供されるべきであると考えられる。しかし、前者のスキルレベルの定量化は非常に困難であり、作業が多様化している上、操作手順が厳密化されていない建機作業においては特に難しいと考えられる。そこで、作業特性の把握に基づく操作支援を提供する枠組みを構築する。作業特性の変化する根本的要因をマニピュレータと対象物の相対的拘束関係と考え、分類を行った（図2）。

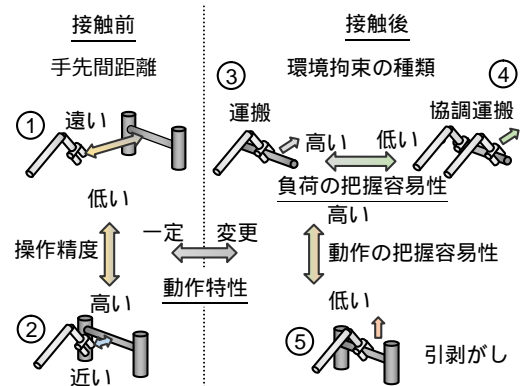


図2 作業特性の分類

一般的な建機作業は、対象物へアプローチし対象物を把持したのち、変位動作（運搬）または破壊動作（引剥がしなど）をすること

から、リーチング、運搬、破壊の3つのタスクフェーズに分けられる。タスクフェーズは、負荷の有無を用いて識別を行った。さらに、各タスクフェーズの内部状態として、支援効果の必要性に応じて、最適、良、通常、注意、危険の5段階のレベルを有する特定条件を定義した。特定条件は、識別したい内容に応じた時系列特徴量を用いて識別することとした。このように、作業の特性を捕らえるタスクフェーズ識別と支援に直結する状況把握のための特定条件に認識モジュールを有する識別手法を開発した(図3)。

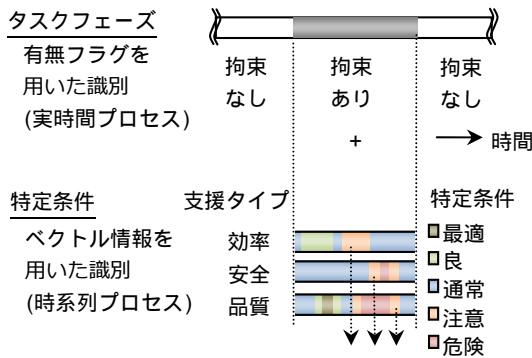


図3 支援フレームワーク

(3) 支援システム

操作支援の形態は、通常状態を最適へ飛躍させる最適化支援と危険状態を通常に回復させる回復支援に大別される。前者は、前述の諸条件(作業環境や操作技能など)に大きく左右されるため、本研究では後者の支援方針を取ることにする。前節で既述のように、多様な操作技能やタスクに対応するため、物理情報のみに着目した単純なフラグの組み合わせによる、リーチング、運搬、引き剥がし時における3つの注意状態識別手法を定義した(図4)。

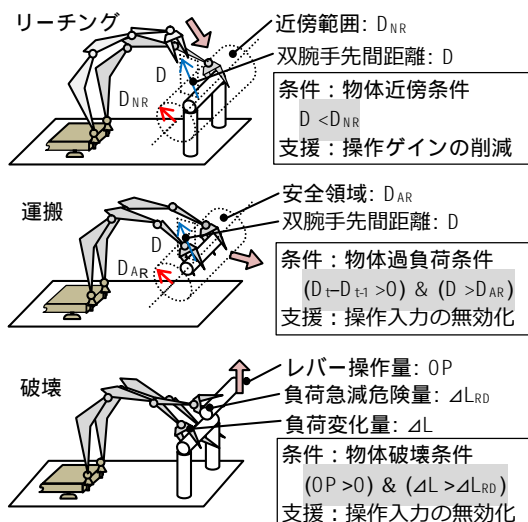


図4 フラグベースド操作支援

オペレータへの支援提供を行う場合、作業機の入力である操作レバーのゲイン調整を

行うことが最も直感的かつ効果的であることから、ゲインの調整を行った(図4)。作業機の自律的なゲイン調整により、今が注意すべき状態であることをオペレータに間接的に気付かせる効果もある。以下に概説する。

物体近傍条件

物体近傍では正確な操作が必要となるため、近傍領域に侵入した場合には、操作ゲインの低減による微操作の簡素化が有用と考えられる。長尺物を左腕で把持している場合、左腕の位置を対象物位置とみなすことで、近傍の認識が可能となる(梁や柱などの長尺物を扱う解体作業において特に有用)。誤接触による対象物破損だけでなく、作業腕にも大きな負荷が生じるため、有用な支援となる。

物体過負荷条件

双腕協調運搬など、マニピュレータと対象物の位置が相対的に拘束された条件下での作業では、双腕手先間のずれに応じて作業対象物に内力が生じる。そこで、当該作業において許容される双腕手先間距離より大きくなる場合、操作レバー入力を無効化することで、認知が難しい前後方向の双腕手先位置ずれなどにより生じる作業品質の低下を操作者に気付かせることが可能になる。

物体破壊条件

引剥がし作業などの破壊作業においては、物体の破壊後に関節負荷が急激に減少する。しかし、破壊を視認してレバー操作するまでには不可避な反応時間が必要となるため、破壊後も大きな操作量が入ってしまう。大きな慣性力は機体を傷めるばかりか、狭小な作業現場では他の対象物や建機に衝突する危険性を高めることとなる。そこで、関節負荷の時系列変化から負荷急減が確認された場合、レバー操作を自動的に無効化する。

(4) 評価実験

実験の準備として、作業に要求される時間効率・作業品質・安全性などの評価軸を定量化するために、データ計測手法および処理方法の整備(共通化)を行った。実証実験は、油圧・油温・レバーセンサを備えた双腕実験機を利用した。作業現場を模擬した実験場において、操作経験の異なるオペレータ(10人の未熟練オペレータと1人の熟練オペレータ)の協力を得て、複雑性の異なるタスク(廃材双腕運搬と引き剥がし解体作業)を行った。支援システムがある場合とない場合、それぞれ3回ずつ行った。本実験を通じて、支援システムにより、オペレータの熟練度や作業内容の複雑性、さらには作業時間によらず作業性能の向上が図れることを確認する。

支援有無での比較(双腕協調運搬)

支援結果を図5に示す。支援提供を行うことによって、誤操作回数や誤接触回数が削減

されることが分かった。また、運搬時の手先負荷や NASA-TLX を使った精神的作業負荷も大きく減少することが分かった。このように安全や作業品質、使いやすさに関わる評価指標が改善されつつ、作業時間はほぼ同じであった（増加しなかった）ことから、操作支援システムが有効にはたらいことが確認された。

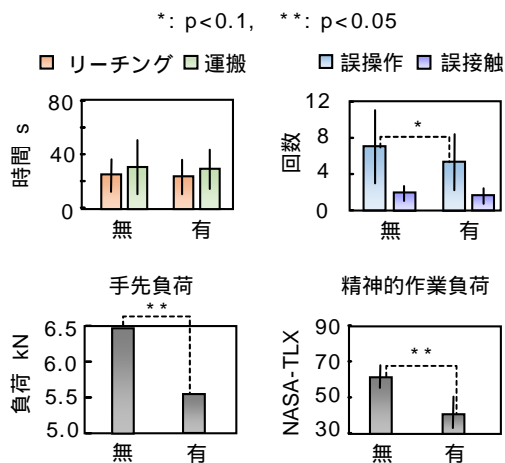


図5 支援効果度の比較（双腕協調運搬）

支援効果度の分析（双腕協調運搬）

代表的な4人の被験者における支援効果の正負を図6に示す。縦軸の支援効果度は、正の値では、支援によって効果があった指標、負の値では、支援によって逆効果となった指標を示す。経験の異なる被験者において、ほとんどの場合で、支援効果度が正であることから、被験者によらず、共通して支援の効果があったことが確認された。

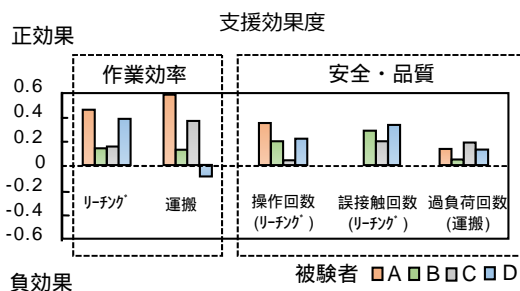


図6 支援効果度の比較

引剥がし後の手先移動距離

物体引剥がし後の手先移動距離を図7に示す。図からわかるように、手先移動距離が大きく抑えられ、作業の安全性が向上したことが確認された。

以上、実機を用いた実験の結果から、本申請課題で開発した操作支援技術を実装することで、技能レベルの異なる被験者によらず、作業効率や安全性を向上させられることが示された。

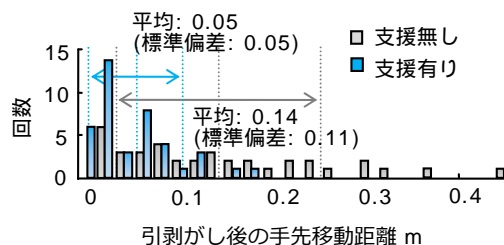


図7 引剥がし後の手先移動距離

(5) 知能化フレームワークの設計

情報・自律化開発が支配的な当該分野においては、準自律型操作者支援の考え方やシステム構築の方法論に関する学術研究に至っては、これまで皆無と言わざるを得なかった。本課題は、未知パラメータの多い条件下でのロバスト性・安全性の確保が要求される実システムにおける知的インタフェース技術開発に着目した研究であり、複数の学問分野にまたがる学際的研究としても意義は高いと考えられる。熟練者不足や少子化の影響からオペレータ不足が表面化しつつある当該分野では、支援システムを用いた技能補助による作業品質の確保（向上）は社会的意義も高い。操作者支援による機械操作の合理化によって次世代作業（従来作業も含む）の安全・高効率・高品質化への貢献が期待できる。

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7件)

Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, Practical Object-Grasp Estimation without Visual or Tactile Information for Heavy-Duty Work Machines, Proceedings of 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2013), 査読あり, Nov. 2013, pp. 3210-3215.

Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, An Object Grasp Motion Model using Control Signal and Cylinder Pressure in Demolition Machines for Disaster Response Work, Proceedings of SICE Annual Conference 2013 (SICE2013), 査読あり, Aug. 2013, pp. 307-312.

Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, Visualization of Comprehensive Work Tendency Using End-Point Frequency Map for Human-Operated Work Machines, Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2013), 査読あり, May 2013, pp. 752-757.

Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, A Symbolic Construction Work Flow Based on State Transition Analysis Using Simplified Primitive Static States, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読あり, Vol. 24, No. 6, Dec. 2012, pp. 939-948.

Mitsuhiro Kamezaki, Yosuke Shimada, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, Operational Support for Ensuring Safety Object-Removal Using Dual-Arm Construction Machinery, Proceedings of 2012 First International Conference on Innovative Engineering Systems (ICIES 2012), 査読あり, Dec. 2012, pp. 257-262.

Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, A Pragmatic Load Detecting System Based on Uncertainty Evaluation for Construction Manipulator, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration (JCMSI), 査読あり, Vol. 5, No. 6, Nov. 2012, pp. 366-373.

Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano, Quantification of Comprehensive Work Flow Using Time-Series Primitive Static States for Human-Operated Work Machine, Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2012), 査読あり, May 2012, pp. 4487-4492.

〔学会発表〕(計5件)

亀崎允啓,橋本諭,岩田浩康,菅野重樹, 負荷変化率を用いた操作入力の無効化による双腕引き剥がし作業の安全性向上,第31回日本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2013), paper no. 1H3-7, 南大沢(東京), 2013年9月.

亀崎允啓,石井孝洋,岩田浩康,菅野重樹, 操作型作業機械の知能化に関する研究~第10報:手先の外力・移動方向を用いた物体把持推定の高精度化~,日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2013論文集(Robomec '13), paper no. 1A1-Q10,筑波(茨城),2013年5月.

亀崎允啓,石井孝洋,岩田浩康,菅野重樹, 操作型作業機械の知能化に関する研究~第9報:操作・負荷フラグの時系列遷移を利用した物体把持・非把持推定~,第13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(SI2012), pp. 1-4 (1A1-1),福岡,2012年12月

亀崎允啓,橋本諭,岩田浩康,菅野重樹, 操作型作業機械の知能化に関する研究~第8報:手先位置頻度マップを用いた大局的作業傾向の可視化~,第30回日

本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2012), paper no. 3L2-2,札幌(北海道),2012年9月.

亀崎允啓,岩田浩康,菅野重樹, 操作型作業機械の知能化に関する研究~第7報:時系列遷移情報の利用による基底作業状態の識別性能向上~,日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2012論文集(Robomec '12), paper no. 1A2-F02,浜松(静岡),2012年5月.

〔図書〕(計1件)

亀崎允啓ほか,朝日新聞出版,早稲田理工 PLUS 2014 Break the impossible! 前人未到の“その先へ”,2014年4月,95ページ.

〔その他〕(計6件)

【ホームページ】(計3件)

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/ip/ipi0211.html?lang_kbn=0&kensaku_no=4978
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
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/jp/project.html>

【アウトリーチ活動情報】(計1件)

Lecture, Mitsuhiro Kamezaki, Intelligent Human-Machine Interface, Research Seminar in Department of Mechatronics and Robotics, School of Innovation Design, Egypt-Japan University of Science and Engineering (E-Just), Alexandria, Egypt, Dec. 2012.

【報道関連情報】

Web サイト,「菅野先生、亀崎先生、坂本先生(早稲田大学)のE-JUST訪問」,独立行政法人 国際協力機構(JICA),2012年12月7日.

【受賞】(計1件)

The SICE Annual Conference Young Author's Award Finalists in SICE Annual Conference 2013, Sept. 2013.

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