

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03952

研究課題名(和文) 空気圧駆動インフレータブルロボットアーム実現のための基礎研究

研究課題名(英文) Fundamental research for implementation of pneumatic drive inflatable robotic arms

研究代表者

川村 貞夫 (KAWAMURA, SADAO)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：20186141

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)： ロボットの利用拡大のために、軽量/柔軟ロボットアームが必要とされる。本研究では、プラスチックシートの袋を形成し、リンクやアクチュエータを構成するインフレータブル構造ロボットアームを実現する。まず、インフレータブル構造ロボットアームの設計のための膨張シミュレーション法を開発した。次に、耐久性の高いリンクおよびアクチュエータの設計/製作法を明らかにした。また、本ロボットの軽量/柔軟の特性を失わないために、軽量/柔軟の変位/力センサを高分子材料によって実現した。各研究成果を統合することにより、5自由度インフレータブルロボットアームを実現し、種々のセンサフィードバック制御によって性能を示した。

研究成果の概要(英文)： To expand use of robots, lightweight / flexible robot arms are needed. In this research, we realized inflatable structure robot arms constituting links and actuators made by plastic sheets. First, we developed an inflation simulation method for designing inflatable structure robot arm. Next, the design and fabrication method of durable links and actuators were clarified. In addition, in order not to lose the lightweight / flexible properties of this robot, a lightweight / flexible displacement / force sensor was realized by polymer materials. By integrating each research result, we realized a 5 degrees of freedom inflatable robot arm and showed good performance by various sensor feedback control methods.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ロボットアーム インフレータブル 光弾性 柔軟軽量

1. 研究開始当初の背景

ロボティクスは、それまでの力学、機構学、電気工学等に加えて、20世紀の後半からコンピュータの発達に加速されて進歩してきた。剛体の多リンク機構から構成されるロボットの力学モデルは、20世紀中ほどから研究が開始され、ロボットの制御原理も現在までに多くが明らかにされてきた。そのような学術的な成果を基礎に産業用ロボットは、自動車や電子機器の製造には不可欠の生産機器となっている。しかし、一方で従来のロボティクスに、根本的な課題も浮かび上がりつつある。その大きな課題の一つは、金属材料利用の剛体を基盤とするモデリング/計測/制御である。金属材料を構造材、センサ、アクチュエータ等に利用するため、ロボットは固く、重く、大きくなり、様々な分野での利用の障壁となっている。この課題解決に、高分子材料などを利用する軽量化/柔軟化がある。本研究では、特に、高分子材料をロボットの機構、アクチュエータ、センサに利用するための基礎研究を行う。

2. 研究の目的

人間と作業空間を共有可能な軽量柔軟な新しいロボットアーム創造のために、空気圧インフレーターロボットの基礎技術を確立する。インフレーターロボットでは、ポリエチレン (PE) やポリプロピレン (PP) などのプラスチック製シートの袋内空気を加圧状態として、リンクやアクチュエータに利用する。本研究では、このロボットに適した柔軟で形状や分布力が計測可能なポリウレタン (PU) の光弾性特性利用センサおよび圧電ポリ乳酸の触覚センサを利用し、ロボットセンサとして特性を明らかにする。さらに、このセンサ信号、カメラ等の複合センシングによるロボットアーム制御則を確立する。次に、PE, PP, PU 等の多様なプラスチック材料の複合体としてのインフレーター構造設計のために、高速で簡便な膨張シミュレーション手法を提案し、3次元袋状の形状設計の困難を解決する。

3. 研究の方法

(1) 膨張シミュレーション法

本研究対象のインフレーターロボットでは、構造体とアクチュエータにプラスチック製シートの袋を利用する。伸縮性の少ないシート材料から3次元の袋形状の形成を理論的に解析することは一般に困難である。次に、通常の有限要素法解析では、実際に利用するシート厚みでは計算が収束しないなどの問題がある。そこで、本研究では質点の点群をバネで連結したモデルでシートを形成し、多様なインフレーター構造の計算機シミュレーション法を確立する。

(2) リンクおよびアクチュエータ

インフレーター構造のリンクとアクチュエータを、PE, PP など形成し、多自由度のロボットアームを実現する。このためにインフレーター構造の特徴を考慮した設計法を提案する。このアームの可搬重量を高めるためなどに、高分子材料製袋の耐圧を大きく増加させることが重要となるので、耐圧増加法を開発する。

(3) ポリマーセンサ

軽量/柔軟なインフレーター構造ロボットアームには、軽量/柔軟なセンサを利用しなければ、センサの重量と剛性によって、インフレーター構造ロボットの長所を阻害する。そこで、本研究では軽量/柔軟な高分子材料による変位と応力の計測を行う。具体的には、複屈折率の高いポリウレタン材料および圧電ポリ乳酸材料を利用する。また、インフレーター構造の内圧を計測することから外力を測定する方法も研究する。

(4) システム統合

高分子材料の知識と計算機シミュレーション法を基礎に、リンクとアクチュエータの設計を行う。センサは複屈折率の高いポリウレタン材料を曲げセンサと応力センサとして、インフレーター構造ロボットアームに搭載する。さらに、カメラを用いたビジュアルフィードバック制御により、高精度な手先位置決めを実現する。

(5) 海外協力体制

海外の研究機関との共同研究を積極的に行う。英国のReading大学Hayashi研究室では、脳卒中の後のリハビリにインフレーターロボットアームの利用可能性を検討する。ニュージーランドのオークランド大学MacDonald研究室では、インフレーターロボットアームの運動制御法の開発を行う。両大学には、大学院生のインターンシップとして、短期滞在して研究を遂行する。

4. 研究成果

(1) 膨張シミュレーション法

インフレーター構造膨張数値シミュレータによって、アクチュエータだけではなく、リンクも含めたインフレーターロボットアーム全体

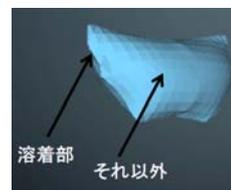


図1 袋計算結果

のシミュレーションを行った。一つの空気袋の計算結果を図1に示す。伸縮性の少ないシート材料から3次元の袋を形成するためには、溶着部のしわが必要となる。本シミュレーションでは、このしわ部分も再現している。また、本シミュレーションでは、アクチュエータ部とリンク部に異なる剛性を与え、実機に近い構造を実現した。また、1自由度及び

2自由度(図2)の数値シミュレータを開発し、それぞれにおいて、アクチュエータに差圧を与えることで屈曲運動を行うことが確認できた。本シミュレータでは、複数のバグをつなぎ合わせたアクチュエータとリンクを組み合わせることで、多くの質点数を持つ超冗長系となっている。一般に、このような質点数が多い場合には計算時間が問題となる。ここでは、CUDAを用いた並列計算処理によって大幅に計算時間を削減することに成功した。これらの結果を国内外の学会で発表している。



図2 2自由度
ロボットアーム

(2) リンクおよびアクチュエータ

・ 耐圧性能向上

シート材料として、本研究以前はPEを基本にインフレータブル構造を製作してきた。しかし、耐圧、耐久性などの観点からポリラミ製シートに変更し、熱溶着の温度、圧力、時間の3つのパラメータの変化の中で、最も耐圧の高い組み合わせを決定した。その結果、従来のPEに比して、約5倍の耐圧を達成した。

・ アクチュエータ構造提案

1自由度(図3)、2自由度、屈曲型(図4)の構造を提案した。これらのアクチュエータを利用して、インフレータブルロボットを構成した。



図3 アクチュエータ



図4 屈曲型

・ リンク構造提案

溶着部のしわによって、2枚のシートを溶着した場合は、膨張時にリンクは円筒形状と



図5 円筒形状形成

ならない。そこで、2枚のシートにプリーツ折りを入れて、溶着することによって、円筒形状で、直径の異なるリンク(図5)などを実現した。

また、図6に示すようなリンクとアクチュエー



図6 リンクアクチュエータ一体型

ター一体型の構造も提案した。

(3) ポリマーセンサ

・ ポリウレタン曲げセンサ

複屈折率の高いポリウレタン材料を利用して、曲げセンサを開発した。図7のように、レーザー光を入射して、曲げによって

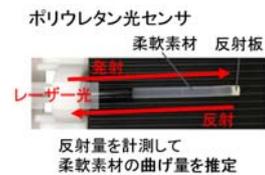


図7 曲げセンサ

減少する光量を計測する。本センサは、柔軟なポリウレタン材料を利用しているので、軸方向にも伸縮可能であり、変形の大きいインフレータブルロボットの間節などにも装着可能である。

・ ポリウレタン応力センサ

複屈折率の高いポリウレタン材料を応力センサとして利用する。図8のように、材料の両面に直交する偏光板を装着して、光を入射し、透過量をフォトトランジスタで計測する。外力が作用しないときは、偏光板が直交しているために、光量はゼロとなる。一方、外力作用時は、複屈折により光量が計測される。

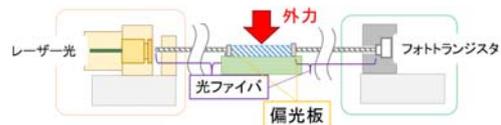


図8 複屈折計測システム

この材料に5チャンネルのフォトトランジスタをつなぎ、分布圧力を計測した結果を図9に示す。

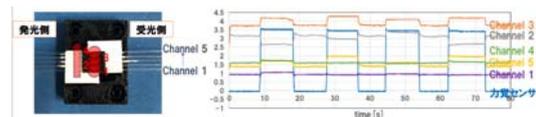


図9 多チャンネル利用の分布力計測

このような技術を2次元に拡張して、接触部の認識が可能な面センサを開発した。

・ 圧電性ポリ乳酸

物体の把持には様々な方向の力を考慮する必要がある。光弾性ウレタンを用いた場合物体のすべりなど面内方向の検出は難しい。そこで、圧電ポリ乳酸材料を把持センサとして導入した。この高分子圧電センサは同軸ケーブルと同じ構造をとるため、外側銅線がシールドの役割を果たし、電磁ノイズのある環境下でも計測できる。ロボットの様々な把持動作について実験を行った結果、高分子圧電センサを導入することで物体把持の失敗や物体把持時の落下の前兆を早い段階で検知できることを見出した。

・ 袋内圧計測からの外力推定

力センサとして図 10 に示されるように、袋内圧を MEMS の圧力センサによって計測して外力を推定する方法を提案した。特に、分布圧力計測や気体の状態方程式から、微小作用力の推定も可能な新しい推定モデルを導出し、その有効性を実験によって確認した。



図 10 袋内圧利用の力センサ

(4) システム統合

・インフレータブル構造ロボットアーム

図 11 に 3 自由度インフレータブル構造ロボットを示す。また、図 12 に 5 自由度ロボットアームを示す。

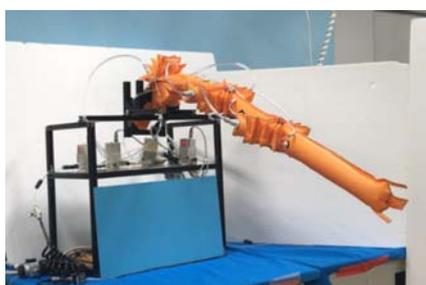


図 11 インフレータブル構造ロボット

・ポリウレタンセンサ搭載型ロボット

図 12 の 5 自由度ロボットでは、図 4 に示す屈曲型アクチュエータをハンドとして利用している。図 7 に示されるポリウレタンの曲げセンサを取り付けて、関節角度を計測している。

・ビジュアルフィードバック制御

ハンドにマーカーを取り付けた環境での、ビジュアルフィードバック制御を実現している。このときの制御則では、剛体リンクと見なしたロボットアームのヤコビ行列を近似ヤコビ行列として高い手先位置決めが達成されている。

・ポリウレタン応力センサ搭載型ロボット

図 9 に示されるポリウレタン応力センサと図 7 の曲げセンサを搭載したインフレータブル構造ロボットを図 13 に示す。

ポリウレタン応力センサ信号を、力信号と見なし、アクチュエータの圧力を入力としてフィードバック PID 制御を行った。結果として、目標とするセンサ信号値に収束することが

確認された。

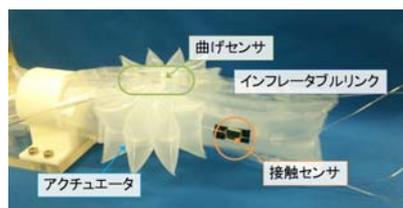


図 13 応力センサ搭載型ロボット

(5) 海外協力体制

英国の Reading 大学 Hayashi 研究室に、平成 28 年、29 年に大学院生がインターンシップとして滞在して、脳卒中のリハビリロボットの研究を行った。その結果、人が装着可能な軽量柔軟な空気圧駆動ロボットアームを開発し、ビジュアルフィードバック制御によって手先位置を制御した。この結果は後日国際誌（文献）で発表している。また、ニュージーランドのオークランド大学 MacDonald 研究室では、インフレータブル構造の不確実性を、ファジー制御によって、対応する方法を開発した。本研究に関連して、平成 27 年にオークランド大学から立命館大学に、平成 29 年は立命館大学からオークランド大学に、院生がインターンシップとして滞在した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 10 件）

- ① Hye-Jong Kim, Akihiro Kawamura, Yasutaka Nishioka, Sadao Kawamura, “Mechanical design and control of inflatable robotic arms for high positioning accuracy”, *Advanced Robotics*, 査読有, Vol. 32, No. 2, pp. 89-104, 2018
- ② Y. Tajitsu, “Poly(lactic acid) for Sensing Applications” *Advances in Polymer Science*, 査読有, 10 巻, 1-18, 2017
- ③ Y. Tajitsu, “「君の名は。」の組紐が圧電センサに” *応用物理*, 査読有, 86 巻, 996-998, 2017
- ④ Y. Tajitsu, “圧電性キラル高分子 film, fabric, decorated barided code” *高分子*, 査読有, 66 巻, 358-359, 2017
- ⑤ 倉爪亮, ピョコンソク, 辻徳生, 河村晃宏, “情報構造化環境プラットフォーム ROS-TMS と Big Sensor Box の提案”, *日本ロボット学会誌*, 査読有, Vol. 35, No. 4, pp. 346-357, 2017
- ⑥ Victoria W Oguntosin, Yoshiki Mori, Hyejong Kim, Slawomir J Nasuto, Sadao Kawamura, Yoshikatsu Hayashi, “Design and Validation of Exoskeleton Actuated by Soft Modules toward Neurorehabilitation-Vision-Based Control for Precise Reaching Motion of Upper Limb” *Frontiers in neuroscience*, 査読有,

Vol.11, Article 352, 1-19, June 2017,
PMCID:PMC5500652,
<https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00352>

⑦川村貞夫、プラスチックで実現する軽く柔らかいインフレータブルロボットアーム、日本工業出版プラスチック、査読無、4巻、2016、53-57

⑧吉田光伸、田實佳郎、“ポリ乳酸を用いた固相延伸フィルムの高圧電性発現機構の検討”、静電気学会誌、査読有、40、38-43、2016

⑨K. Tanimoto, Shota Saihara, Yu Adachi, Y. Harada, Yuki Shiomi and Y. Tajitsu, “Shear Piezoelectricity of Optically Active Polysuccinimides”, Jpn. J. Appl. Phys. 査読有、54、10NF02-1-6、2015.

DOI 10.7567/JJAP.54.10NF02

⑩Y. Tajitsu, “Piezoelectret Sensor Made From an Electro-spun Fluoropolymer and Its Use in a Wristband for Detecting Heart-beat Signals”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 査読有、22、1355-1359 (2015) DOI 10.1109./TDEI.2014.004851

[学会発表] (計 38 件)

①大音 雄輝、中嶋 一斗、南 承佑、河村 晃宏、Oscar Martinez Mozos、倉爪 亮、「全周レーザスキャナを用いた屋外環境の種別推定 -幾何・画像特徴量と Deep Neural Network を用いた識別-」第 22 回ロボティクスシンポジウム講演会、2017

②Ryo Kurazume, Yoonseok Pyo, Kazuto Nakashima, Tokuo Tsuji, A. Kawamura, “Feasibility study of IoRT platform “Big Sensor Box”, ICRA2017, 2017

③Akihiro Kawamura, Naoki Nomaguchi, Asuka Egashira, Sadao Kawamura, Ryo Kurazume, “Simulation Development for Inflatable Pneumatic Actuators” Proc. of the 13th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR17), 2017

④野間口直樹、河村晃宏、江頭飛鳥、倉爪 亮、川村貞夫, “空気圧駆動インフレータブルアクチュエータの特性解析と数値シミュレーション”, SI2017, 2017

⑤三塚雅彦、山崎聡、中辻貴大、刀根孝晃、杉野耀、田實佳郎, 「光弾性ポリウレタンセンサ」第 66 回高分子討論会、2017

⑥高市翔太、田尻聡之介、金 慧鍾、荒川広大、菅野勇希、川村貞夫, 「インフレータブルリンクの剛性変化による高機能化」ROBOMECH2017, 2017

⑦菅野勇希、金 慧鍾、川村貞夫, 「インフレータブル構造を用いた多軸力センサの性能向上」ROBOMECH2017, 2017

⑧Oguntosin, V., Nasuto, S. and Hayashi, Y. (2017) Embedded fuzzy logic controller for positive and negative pressure control in pneumatic soft robots. In: 2017 UKSim-AMSS 19th International Conference on Modelling & Simulation, 2017

⑨Akihiro Kawamura, Yoshiki Mori, Soichiro Yamate and Sadao Kawamura, “Precise Motion Control of SCARA Robot using Combination of PWM Signals and Visual Information” AIM2016, 2016

⑩Ho Seok Ahn, Forest Fraser, Jonathan Lee, Kazuki Nomura, Hye-Jong Kim, Sadao Kawamura, Bruce A. MacDonald,

“Vision-based Control of an Encoderless Lightweight Robot Arm”, ACRA2016, 2016

⑪杉野耀、田實佳郎、ウレタン高光弾性の応用、第 62 回高分子研究発表会、2016

⑫三塚雅彦、山崎聡、杉野耀、今田雄也、近藤貴志、田實佳郎、光弾性ウレタンセンサ、第 65 回高分子討論会、2016

⑬金 慧鍾、高市翔太、菅野勇希、堀池幸祐、西岡靖貴、河村晃宏、川村貞夫, 「軽量柔軟インフレータブルロボットアームの高出力化のための構造の改良」 ROBOMECH2016, 2016

⑭大音雄輝、鄭好政、河村晃宏、岩下友美、倉爪亮, 「リアルタイム全方向レーザスキャナを用いた屋外環境の種別推定」 ROBOMECH2016, 2016

⑮堀川雄太、河村晃宏、倉爪亮, 「Previewed Reality 情報構造化空間における近未来可視化システム」 RSJ2016, 2016

⑯渡邊裕太、重兼聡夫、河村晃宏、倉爪 亮, 「情報構造化空間を拡張する群ロボットシステムの開発」 RSJ2016, 2016

⑰南 承佑、河村晃宏、倉爪 亮, 「広域環境における人流データのリアルタイム没入感可視化システム」 RSJ2016, 2016

⑱植村充典、水口大喜、河村晃宏、川村貞夫, 「柔軟関節と高制御性能を両立する反力利用弾性アクチュエータ」 RSJ2016, 2016

⑲高市翔太、堀池幸祐、金 慧鍾、河村晃宏、川村貞夫、田實佳郎、三塚雅彦, 「ポリウレタンの光弾性によるインフレータブルロボットの接触力センサの開発」 RSJ2016, 2016

⑳菅野勇希、金 慧鍾、河村晃宏、川村貞夫, 「MEMS 圧力センサを用いたインフレータブルロボットの 2 軸力センサシステムの開発」 RSJ2016, 2016

㉑稲田大亮、辻 徳生、諸岡健一、Kenji Tahara、河村晃宏、Kurazume Ryo、原田研介, 「複数の遠赤外線画像を用いた全周の接触領域検出と把持形態推定への応用」 RSJ2016, 2016

㉒坂本潤弥、渡邊裕太、河村晃宏、Kurazume Ryo, 「環境情報構造化アーキテクチャ

ROS-TMS4.0を用いたロボットサービスの実現」2016年度日本機械学会年次大会, 2016

②③Seungwoo Nham, Akihiro Kawamura, Ryo Kurazume, 'Real-time immersive VR system of pedestrian flow for large-scale environment' The ninth Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR16), 2016

②④江頭飛鳥, 河村晃宏, 金 度演, 金 慧鍾, 川村貞夫, 倉爪 亮, 「空気圧駆動ロボットのためのインフレータブル構造膨張数値シミュレーション開発」SI2016, 2016

②⑤重兼聡夫, 渡邊裕太, 河村晃宏, 倉爪 亮, 「構造化/非構造化環境を移動可能なパーソナルモビリティの開発」SI2016, 2016

②⑥清山昂平, 河村晃宏, 倉爪 亮, 「要介護者の見守りセンサターミナルの開発」SI2016, 2016

②⑦大藤康平, 河村晃宏, 辻 徳生, Kenji Tahara, 「外界センサ情報と仮想物体情報の組合せによる未知物体の把持・操作手法の実験的検証」SI2016, 2016

②⑧Hye-Jong KIM, Yuto Tanaka, Akihiro Kawamura, Sadao Kawamura and Yasutaka Nishioka, "Improvement of Position Accuracy for Inflatable Robotic Arm using Visual Feedback Control Method" AIM2015, 2015

②⑨Hye-Jong KIM, Yuto Tanaka, Akihiro Kawamura, Sadao Kawamura and Yasutaka Nishioka, "Development of an Inflatable Robotic Arm System Controlled by a Joystick" RO-MAN2015, 2015

③⑩金 慧鍾, 田中悠登, 河村晃宏, 川村貞夫, 西岡靖貴, 「操作型4自由度インフレータブルロボットアームの開発」ROBOMECH2015, 2015

③⑪金 慧鍾, 西岡靖貴, 河村晃宏, 川村貞夫, 「IR アームのための拮抗型アクチュエータの差圧を利用した位置制御」RSJ2015, 2015

③⑫三塚雅彦, 山崎 聡, 高井恭平, 森田哲也, 今田雄也, 近藤貴志, 田實佳郎, 「光弾性・圧電を利用したウレタンセンサ」, 第64回高分子討論会, 2015

③⑬Y. Tajitsu, "Development of environmentally friendly piezoelectric polymer film actuator having multilayer structure", SSDM 2015, 2015, 招待講演

③⑭田實佳郎, 「圧電性高分子のセンサ・アクチュエータデバイス化の可能性」, 15-1有機エレクトロニクス研究会, 2015

③⑮田實佳郎, 「圧電性高分子繊維をwearableデバイスへ」, 次世代プリンテッドエレクトロニクスコンソーシアム(JAPTEC), 2015

③⑯田實佳郎, 「キラル圧電性高分子のアクチュエータへの応用の可能性」, 第25回日本MRS

年次大会, 2015

③⑰田實佳郎, 「圧電ポリマーセンサ」, 第1回ソフトアクチュエータ産業化研究会, 2015

③⑱Victoria Oguntosin, William S. Harwin, Sadao Kawamura, Slawomir J. Nasuto and Yoshikatsu Hayashi, "Development of a Wearable Assistive Soft Robotic Device for Elbow Rehabilitation", ICORR2015, 2015

〔図書〕(計3件)

①田實佳郎, ほか, CMC出版, 実用化に向けたソフトアクチュエータの開発と応用・制御技術, 2017, 238

②田實佳郎, ほか, S & T出版, ソフトアクチュエータの材料・構成・応用技術, 2016, 375 (205-212)

③川村貞夫, ほか, S & T出版, IoT/CPS/M2M 応用市場とデバイス・材料技術, 2015, 319 (207-216)

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: ロボットアーム及びロボットアームの製造方法
発明者: 川村貞夫
権利者: 学校法人立命館
種類: 特許
番号: 特願第2016-032387号
出願年月日: 2016/2/23
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川村 貞夫 (KAWAMURA, Sadao)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号: 20186141

(2) 研究分担者

田實 佳郎 (TAJITSU, Yoshiro)
関西大学・システム理工学部・教授
研究者番号: 00282236

河村 晃宏 (KAWAMURA, Akihiro)
九州大学・システム情報科学研究院・助教
研究者番号: 60706555

(4) 研究協力者

Yoshikatsu Hayashi, Lecturer
System Engineering Cybernetics
intelligence Research Group
Reading university, UK

Bruce A. MacDonald, Associate Professor
Electrical and Computer Engineering
Auckland University, NZ