

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：32682

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H05466

研究課題名（和文）弾性連続体の動的ふるまいの解明とバイオメカニクス融合

研究課題名（英文）Understanding the Dynamic Behavior of Elastic Continuum and Biomechanical Integration

研究代表者

新山 龍馬（Niiyama, Ryuma）

明治大学・理工学部・専任講師

研究者番号：00734592

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 132,800,000円

研究成果の概要（和文）：動物の脊柱に見られるしなやかな弾性連続体の役割に注目し、ロボティクスの観点から人工的な脊柱の設計と制御の枠組みを構築することを目指した。脊柱の上部にあたる首のバイオメカニクスに着目し、とくにダチョウの首を規範としたマニピュレータであるRobOstrichアームを開発した。腱駆動によるロボットアームの頭部挙上運動パターンを明らかにし、また、強化学習によってリーチングや頭部安定化を実現する手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

哺乳類の腕や脚を規範とした動物型ロボットの研究は多いが、鳥類の首に関する工学的研究は未開拓の分野である。超冗長・多関節マニピュレータのメカニズムを検討するにあたって、鳥類の首が重要な学術研究の対象になり得ることを示した。しなやかなロボットアームは、人間と作業空間を共有しながら働く協働ロボットとしての応用が期待される。今回開発した車椅子搭載型のダチョウ首型アームはその検討になっている。

研究成果の概要（英文）：Focusing on the role of the flexible elastic continuum found in animal spinal columns, we aimed to develop a framework for designing and controlling artificial spinal columns from the perspective of robotics. In particular, we focused on the biomechanics of the neck, which is the upper part of the spinal column, and developed the RobOstrich arm, a manipulator based on the ostrich's neck. We clarified the head raising motion pattern of the tendon-driven robot arm and proposed a method to realize reaching and head stabilization by reinforcement learning.

研究分野：ソフトロボティクス

キーワード：ソフトロボティクス 連続アーム 超冗長マニピュレータ 生物規範型ロボット バイオメカニクス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

剛体リンク系からなる「かたい」ロボットにとって、人間との協働作業や、野外環境での探索行動など、未知の接触を伴うタスクの遂行は未だに困難な課題である。環境になじみ、接触を許容するロボットシステムを目指して、柔軟性をロボットに導入することが試みられてきた。その中で、自由に曲がる弾性体を用いたタコの腕やゾウの鼻に似た連続ロボットアームが研究されてきた。これらのしなやかな構造体は、生体の脊柱、尾、首、ひげ、触手などに見られる。柔軟な身体を巧みに使いこなしている動物のバイオメカニクスと生物規範型ロボットの融合を果たすことが、しなやかな身体的设计に役立つと考えられる。古典的な研究としては、リンクのたわみを考慮したフレキシブルマニピュレータの制御があるが、能動的な形状制御は扱われてこなかった。また、背骨を持ったロボットの研究が行われているが、動物の走行や跳躍のバイオメカニクスで指摘されているような背骨の粘弾性の積極的な利用に関しては踏み込んでいない。バイオメカニクス研究は連続弾性体の構造と機能を探索する上で重要な知見を提供している。ソフトロボット学の土台となるしなやかなハードウェアは、粘弾性を有する連続体を基盤としている。これは、剛体リンクを仮定した従来の運動学・動力学の単純な拡張では取り扱いが難しい。弾性連続体は、動物のしなやかな体軸（首・背骨・尻尾）に見られる。チーターの走行中の背骨のしなり、サルの長い尻尾を使ったぶら下がり移動、サギの長い首で魚を捕まえる狩り、などを一貫した原理で説明できることは学術的にも重要である。弾性連続体を脊椎動物の脊柱のモデルとして考え、動物行動の解析を行うことで、ロボティクスとバイオメカニクスの接続が実現できる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、動物の脊柱に見られるしなやかな弾性連続体の役割に注目し、ロボティクスの観点から、その設計と制御の枠組みを構築することである。とくに、これまで工学的な検討が不十分だった鳥類の首の解剖学的構造に着目し、これを規範としたロボットマニピュレータの開発と制御を目指す。

## 3. 研究の方法

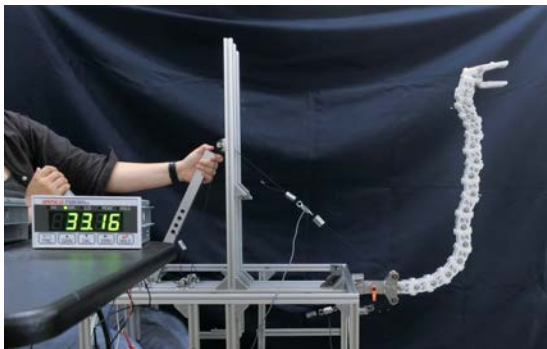
しなやかなハードウェアのモデル化と解析、機構の特性と制御による巧みさを分離するための実験系の構築、およびバイオメカニクス研究との協働による生物規範型ロボットシステムの実現を進める。動物のしなやかな動きに貢献している体幹の脊柱は、粘弾性を備えた連続体とみなすことができる。弾性ロッドの連続体力学を利用して、細長いしなやかな構造のモデル化を行う。超冗長マニピュレータを試作し、ワイヤ駆動による各種動作を行わせる。このとき、人間の巧みな操作スキルを利用して基礎実験を行う。モデルや試作機から得られた知見に基づき、ダチョウ首のバイオメカニクスにフォーカスして、それを実現するバイオニック弾性連続体として、超冗長・多関節マニピュレータを開発する。対象とする動作は、ダチョウの首に見られる頭部の滑らかな上下動作やつつき動作である。ダチョウ首の解剖を行うとともに、生きたダチョウの首形状の計測、つつき時に発生している力などを調べる。筋肉のような駆動を実現するために、電磁モータによる腱駆動（ワイヤ駆動）を用いる。機構の設計や、制御の検討のために、腱駆動される超冗長マニピュレータを模擬できるシミュレーション環境を整える。

#### 4. 研究成果

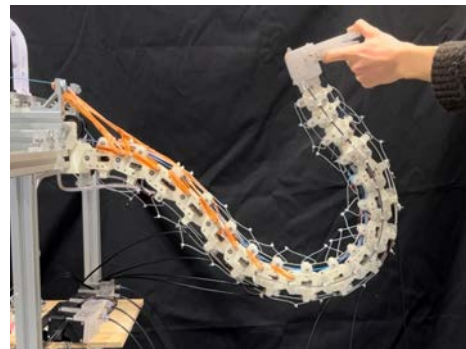
##### (1) ダチョウ首型マニピュレータの開発

ダチョウよりも小さい多関節メカニズムを試作し、背側と腹側の 2 本のワイヤで姿勢制御ができるか検討した。この劣駆動システムは、関節の摩擦を利用すれば手動によって挙上できるが、弾性や関節可動範囲の設定が重要であることがわかった。人間が操作した時のワイヤ張力を、モータ駆動によって再現できる実験系を構築し、頭部の持ち上げの成功に関わる張力の推移を分析した。

ダチョウ規範型 (ostrich-inspired) マニピュレータとして RobOstrich arm と名付けた超冗長ロボットアームについて複数のハードウェアを用いた実験を行った。ダチョウ首の解剖学的構造に基づく、より精緻な機構を備えたマニピュレータの開発を行った。このマニピュレータにおいて首の上下運動が実現できた。また、重力のみで起こる受動的な動作についても計測を行った。関節可動域が局所的な屈曲を防ぐ役割があることを示した。



図：2 ワイヤ式ダチョウマニピュレータ



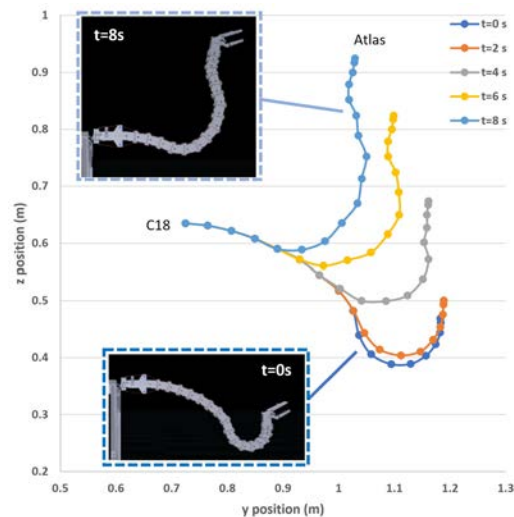
図：腱駆動ダチョウマニピュレータ

##### (2) ダチョウの解剖および生体計測

ダチョウの筋配置についてはまず文献調査を行い、詳細な筋肉の付着位置や重量比等の知見を収集した。背側・腹側の主要な筋肉に注目した。背側では並列した腱様構造が見られ、腹側では複数関節をまたぐ繰り返し構造が見られた。この構造をワイヤ駆動機構として解釈することで、頭部のなめらかな上下動作（ローリング）では、背側の腱の長さを一定に保ち、腹側の筋で屈曲部を順番に移動させるような運動指令が使われているという仮説が支持された。

##### (3) シミュレーション

試作したダチョウ首マニピュレータの動力学を取り扱うためのモデルをシミュレータ上で作成した。シミュレータには MuJoCo を利用した。制御の観点から、さまざまな位置に頭部を動かすことを目標に強化学習実験を行い、冗長マニピュレータにおいてもリーチング動作が獲得できることを示した。また、胴体部が前後に動いた場合に頭部が動かないように安定かさせるタスクも学習できた。



図：シミュレーションによる挙上動作

#### (4) 弾性ロッドのモデル

ダチョウの首の各部の曲げに対する粘弾性を推定するための計測を行った。生体資料としてダチョウ首の両端をロボットアームで保持して様々な姿勢を取らせたときの形状と端部に加わる力を測定することで弾性ロッドとしてのパラメータ推定を試みたが、誤差が大きいことがわかった。この研究の派生として、ブリッジ状のリボン型ばね鋼の両端にかかる力を計測することで、ばねのどこにどのような力が加わっているか推定できる触力覚システムが実現できた。

#### (5) その他

ダチョウ首ばかりでなく、キリンの首についても領域内の計画研究班（鈴木）と共同研究を行った。重力補償に役立っていると考えられるキリン発達した靱帯をエラストマーで模擬し、細径空気圧人工筋の束で拮抗駆動によって姿勢を保持し、屈曲動作を実行した。

生物規範ロボットの一種であるダチョウマニピュレータの特徴を活かした応用例として、ダチョウマニピュレータを電動車椅子のアームレストに取り付けて物体の把持やピックアップを行うことができるシステムを試作した。

編著でソフトロボット学の書籍を出版し、研究成果の一部が掲載された。ひとつは『ソフトロボット学入門 基本構成と柔軟物体の数理』（オーム社、2023年）である。もうひとつはより広範な分野をカバーした英語版で“The Science of Soft Robots”（Springer, 2023）である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kazutoshi Tanaka, Satoshi Nishikawa, Ryuma Niiyama, Yasuo Kuniyoshi	4. 巻 6 (3)
2. 論文標題 Immediate generation of jump-and-hit motions by a pneumatic humanoid robot using a lookup table of learned dynamics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 5557-5564
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2021.3076959	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 郡司芽久	4. 巻 0
2. 論文標題 古典的比較解剖学の現在地 : 異種の身体構造を知るとは?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 といとうとい	6. 最初と最後の頁 10-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14989/toitoutoi_00_1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Shota Hamaguchi, Takumi Kawasetsu, Takato Horii, Hisashi Ishihara, Ryuma Niiyama, Koh Hosoda, and Minoru Asada	4. 巻 5(3)
2. 論文標題 Soft Inductive Tactile Sensor Using Flow-Channel Enclosing Liquid Metal	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 4028-4034
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2020.2985573	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Shotaro Mori, Kazutoshi Tanaka, Satoshi Nishikawa, Ryuma Niiyama, Yasuo Kuniyoshi	4. 巻 4(4)
2. 論文標題 High-Speed Humanoid Robot Arm for Badminton Using Pneumatic-Electric Hybrid Actuators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 3601-3608
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2019.2931273	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 望山 洋	4. 巻 58 (10)
2. 論文標題 Closed Elastica : 飛び移り座屈を利用した瞬発力発生機構	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計測と制御 特集「ソフトロボット機構の発祥と展開」	6. 最初と最後の頁 781-785
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11499/sicejl.58.781	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 望山洋, 郡司芽久, 新山龍馬	4. 巻 122(1205)
2. 論文標題 体幹の“しなやかさ”をつくる	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会誌	6. 最初と最後の頁 12-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 新山龍馬	4. 巻 37(1)
2. 論文標題 ソフトロボティクスはどこから来てどこへ行くのか	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 16-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.37.16	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計28件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Ryota Morimoto, Satoshi Nishikawa, Ryuma Niiyama, Yasuo Kuniyoshi
2. 発表標題 Model-Free Reinforcement Learning with Ensemble for a Soft Continuum Robot Arm
3. 学会等名 EEE International Conference on Soft Robotics (Robosoft) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuta Horii, Katsuma Inoue, Satoshi Nishikawa, Kohei Nakajima, Ryuma Niiyama, Yasuo Kuniyoshi
2. 発表標題 Physical reservoir computing in a soft swimming robot
3. 学会等名 International Conference on Artificial Life (ALIFE) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fumiya Nakano, Yuma Niiyama, Shunji Yamanaka
2. 発表標題 Flexible Sliding-teeth-array Mechanism for Hollow Joint Module with Smooth Outline
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuma Matsushita, Masahiro Ikeda, Keung Or, Ryuma Niiyama, Yasuo Kuniyoshi
2. 発表標題 An Actuation System Using a Hydrostatic Skeleton and a Shape Memory Alloy for Earthworm-like Soft Robots
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀井雄太, 井上克馬, 西川鋭, 中嶋浩平, 新山龍馬, 國吉康夫
2. 発表標題 Physical Reservoir Computing を用いたやわらかいシート状遊泳ロボットの動作生成
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomech)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 新倉敦彦, 難波江裕之, 遠藤玄, 郡司芽久, 森健人, 新山龍馬, 鈴森康一
2. 発表標題 キリン首型筋骨格ロボットの項靱帯と弾性関節の改良,
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomech)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ricky Kurniawan, Tamaki Fukudome, Hao Qiu, Makoto Takamiya, Yoshihiro Kawahara, Jinkyu Yang, Ryuma Niiyama
2. 発表標題 An Untethered 216-mg Insect-Sized Jumping Robot with Wireless Power Transmission
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新倉敦彦, 難波江裕之, 遠藤玄, 郡司芽久, 森健人, 新山 龍馬, 鈴森 康一
2. 発表標題 キリンの首の解剖学知見に基づく筋骨格ロボットの試作と頸長筋の静力学解析
3. 学会等名 第21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 (SI)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松野孝博, 新山龍馬, 平井慎一
2. 発表標題 拮抗駆動式2リンク跳躍ロボットの跳躍シミュレーション
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 翠健仁, 遠藤勇輔, 安藤潤人, 郡司芽久, 池田昌弘, 柯強, 新山龍馬, 望山洋
2. 発表標題 ダチョウ首のしなやかさを解明するプラットフォームの開発
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森本亮太, 西川鋭, 新山龍馬, 國吉康夫
2. 発表標題 運動プリミティブを用いた強化学習による空気圧連続アームの投擲運動
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomech)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新倉敦彦, 難波江裕之, 遠藤玄, 郡司芽久, 森健人, 新山龍馬, 鈴森康一
2. 発表標題 キリンの首の解剖学知見に基づく筋骨格ロボットの試作と動作試験
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomech)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mitsuru Takeda, Satoshi Nishikawa, Ryuma Niiyama, Yasuo Kuniyoshi
2. 発表標題 High-speed flexible arm to reduce the effect of spinning ball in table tennis
3. 学会等名 30th International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiromi Mochiyama
2. 発表標題 A Basic Idea of Identifying the Stiffness of an Elastic Rod along Its Backbone
3. 学会等名 30th International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiromi Mochiyama, Mitsuhiro Ando, Kenji Misu and Teppei Kuroyanagi
2. 発表標題 A Study of Potential Social Impacts of Soft Robots with Organic and Edible Bodies by Observation of an Artwork
3. 学会等名 2019 IEEE International Conference on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takumi Kawasetsu, Ryuma Niiyama, and Yasuo Kuniyoshi
2. 発表標題 Flexible and Soft Inductive Tri-axis Tactile Sensor Using Liquid Metal as Sensing Target
3. 学会等名 IEEE Sensors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Nakamura, Izumi Karino, Shotaro Mori, Kazutoshi Tanaka, Satoshi Nishikawa, Ryuma Niiyama, and Yasuo Kuniyoshi
2. 発表標題 Control of Pneumatic Cylinders Using Iterative Linear Quadratic Regulator with Deep Local Linear Dynamics for Explosive Motions
3. 学会等名 International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Haruki Cho, Satoshi Nishikawa, Ryuma Niiyama, and Yasuo Kuniyoshi
2. 発表標題 Dynamic Locomotion of Quadruped with Laterally Parallel Leaf Spring Spine
3. 学会等名 International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiromi Mochiyama
2. 発表標題 A Perspective of System Theory for Soft Robotics
3. 学会等名 IFAC World Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Megu Gunji
2. 発表標題 ANATOMY shows ANIMAL MECHANISM: How giraffe support and move their big body?
3. 学会等名 Living Machine 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 郡司芽久, 望山洋, 安藤潤人, 翠健仁, 中川尚大, 遠藤勇輔, 新山龍馬.
2. 発表標題 弾性ロッドモデルを利用したダチョウの首のしなやかさの推定
3. 学会等名 日本鳥学会2019年度大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤勇輔, 中川尚大, 郡司芽久, 望山洋
2. 発表標題 弾性ロッドの丸ごと弾性同定
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomech)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹田恭, 西川鋭, 新山龍馬, 國吉康夫
2. 発表標題 しなりを活用した高速な卓球スイングアームによるボールの回転の影響の低減
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomech)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤龍一郎, 金井嵩幸, 大村吉幸, 新山龍馬, 國吉康夫
2. 発表標題 LSTMによる物体操作時の柔軟物変形予測
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomech)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 望山洋, 翠健仁, 安藤潤人, くらやなぎてっぺい
2. 発表標題 アート作品の観察を通じた有機的体をもつロボットに関する考察
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 望山洋
2. 発表標題 ソフトロボティクスのシステム理論への展望
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 望山洋
2. 発表標題 ソフトロボット学のための弾性ロッドの高速形状計算
3. 学会等名 第24 回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 郡司芽久, 遠藤秀紀
2. 発表標題 肉眼解剖学的手法を用いたキリンの首の運動メカニズムの解明
3. 学会等名 第31回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	望山 洋  (Mochiyama Hiromi)  (40303333)	筑波大学・システム情報系・教授    (12102)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	郡司 芽久  (Gunji Megu)  (80833839)	東洋大学・生命科学部・助教    (32663)	
研究分担者	安藤 潤人  (Ando Mitsuhiro)  (50899797)	立命館大学・情報理工学部・助教    (34315)	
研究分担者	國吉 康夫  (Kuniyoshi Yasuo)  (10333444)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授    (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関