

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：55201

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13718

研究課題名（和文）人は「なぜ」安定に運動可能か：人工筋骨格ロボットの運動安定性に関する数理的解明

研究課題名（英文）"Why" Humans Can Move Stable?: Mathematical Elucidation of Motion Stability of Artificial Musculoskeletal Robots.

研究代表者

中西 大輔 (NAKANISHI, DAISUKE)

松江工業高等専門学校・電子制御工学科・助教

研究者番号：00806086

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では「筋骨格系を模したロボットはなぜダイナミックな運動を安定に生成可能であるか」を「数理的に解明する」ことを通じて、人に代表される筋骨格生物の運動メカニズムを明らかにすることを目的とした。

研究の結果、筋肉および筋配置からなる筋骨格の力学的特性自身が安定化のメカニズムを有することを明らかにした。さらに、より自由度の高い脚モデルにおいては、各筋肉が適切な緊張を保つことで安定性が保たれることを定量的に導いた。また各筋肉の発揮張力に基づいた自律協調制御を提案し、自律的な周期運動の生成およびそのメカニズムの一部を解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間やそれを模した筋骨格ロボットは比較的簡単に歩行や跳躍といったダイナミックな運動が可能である一方で、「なぜ」そのようなことが可能であるかという数理的な理解は未だに十分ではない。本研究の意義はそのギャップを埋めることにある。本研究結果は脚モデルが安定になるための条件を解析的に導いている。これは生物の筋骨格がなぜそのような設計になっているかを理解する上で重要であり、また筋骨格ロボットの設計や制御においても定量的な指標を与えるものである。また自律制御に関する結果は、筋骨格をどのように制御するかを考察する上で有益である。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to clarify the mechanism of locomotion of musculoskeletal organisms such as humans through mathematical elucidation of why a robot that mimics the musculoskeletal system can stably generate dynamic momentum.

The results of the study revealed that the mechanical properties of the musculoskeletal system, consisting of muscles and muscle arrangements, have their own stabilizing mechanisms. Furthermore, in the leg model with more degrees of freedom, it was quantitatively derived that stability is maintained by maintaining appropriate tension in each muscle.

We also proposed autonomous cooperative control based on the tension exerted by each muscle, and clarified the generation of autonomous periodic motion and some of its mechanisms.

研究分野：ロボティクス，ソフトロボティクス，筋骨格ロボット

キーワード：空気圧人工筋肉 筋骨格ロボット 安定性解析 自律分散協調制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究背景

人間は周りの環境や目的に合わせて歩く、走る、跳ぶなど多彩な振る舞いを見せる。これらの運動は足や腕など身体の一部だけでなく、それら全てを全身運動として見事に協調させる事によって実現されている。このメカニズムの解明、すなわち人間がどのように自身の身体を操り、運動を協調させ多彩な振る舞いを実現しているかという原理の解明は、リハビリ/ロボット/人間工学など幅広い分野への応用が期待できる重要な課題である。

この課題に対してロボティクスの分野では Honda の“ASIMO”に代表されるような「人を模したロボット」を作ることによって人間の運動メカニズムを考察する研究が行われている。しかし一般的なヒューマノイドは関節をギアードモータで駆動しているため、精密な制御が可能な反面関節が非常に硬い(図 1(A))。一方で人間は筋肉の拮抗駆動によって関節を駆動しているため、関節に柔軟性があり受動的な運動も可能である(図 1(B))。この身体ダイナミクスの違いは、人間の運動メカニズムを考える上では大きな問題である。

これに対して近年、ソフトロボティクスの分野では「筋肉のように柔軟なアクチュエータを用いて人間のような筋骨格系を持つロボットを作る」ことで人間の運動メカニズムを構成論的に解明しようというアプローチが試みられている。図 1(C)に示す「空気圧人工筋肉(空圧筋)」は代表的なソフトアクチュエータの一種であり、風船(シリコンゴムチューブ)の周りに組紐スリーブを被せて両端を縛ったような構造をしている。圧縮空気を印加することにより収縮・張力を発揮する、筋肉に近い出力特性を持つアクチュエータである。人間のように関節まわりに拮抗配置した空圧筋によって駆動することで、関節の柔軟性/受動性など人間に近い身体ダイナミクスのロボットを構築することができる(図 1(C))。

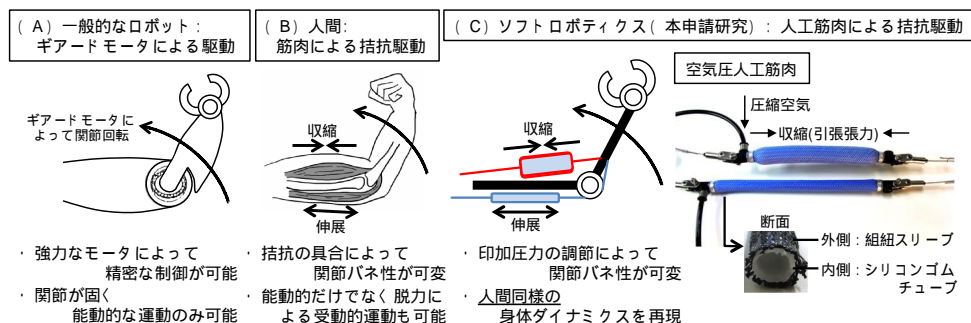


図 1: 一般的なロボット, 人間, ソフトロボティクスにおける駆動方式の違いと共通点。ソフトロボティクスでは柔軟な人工筋による拮抗駆動によって人間に近い身体ダイナミクスを実現している。

先行研究において、この空圧筋を用いた筋骨格ロボットは厳密な姿勢制御を用いずとも簡単な制御のみで歩行、走行、跳躍といったダイナミックな運動を実現可能であることが実験的に示されている【1,2,3】。これらの結果は人間の筋骨格系(筋特性や筋配置)が織りなす身体ダイナミクスこそが運動を生成・安定化する上で重要な役割を担っていることを示唆するものであると考えられている。

しかしながら、ソフトロボティクスの分野においても「人間の運動メカニズム解明」には至っていない。その大きな原因の一つとして当該分野における数理的・解析的なアプローチが不十分であることが挙げられる。空圧筋を用いた筋骨格系ロボットの設計や制御は試行錯誤や経験則によって決定している場合が多く、なぜその設計/制御で安定した運動が可能なのかは未だ明らかになっていない。

(2) 報告者の先行研究

当該分野における解析的アプローチが難しい理由の一つに、空圧筋が非線形な力学特性を持つことが挙げられる。その特性を詳細に表現したモデルも存在するが、「筋骨格系の力学解析」という目的に対しては複雑すぎるという問題があった。これに対して報告者は「筋骨格系の力学解析」を念頭に、力学特性に適した空圧筋の数値モデル構築や、動特性に関する測定実験を行うなど、解析的なアプローチに向けての準備を進めてきた。またこれらの結果に基づいて、シンプルな脚モデルの運動安定条件を制御工学の観点から導出し、それが筋骨格系の機構的特性および空圧筋の特性によって満たされることを解析的に示した。さらに姿勢と関節剛性を独立かつ定量的に制御する手法を提案してきた。

2. 研究の目的

本研究では報告者のこれまでの研究をさらに拡張し、より人間に近いモデルに対して力学解

析を行った。足先を有する2自由度モデル,さらに上体を付与した3自由度モデルについて基本的な安定性解析を行った。そして歩行・跳躍運動などのダイナミックな運動に着目し,これらの運動を生成・安定化する上で筋骨格系の特性がどのような働きをしているかを解析することで,「なぜ」人間は安定に運動することが可能かを数理的に明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

前述の目的に対して,以下の2つの観点から研究を行った。

(1) なぜ安定になるのか: 力学的な安定性解析

筋骨格を模した脚モデルについて,リンク長や筋配置に由来する幾何的な力学特性から,立位姿勢や周期運動が安定となるための条件を制御工学の観点から導出した。そしてその条件が空圧筋の特性によって満たされるかについて考察を行った。また筋付着位置や筋長,膝の構造といった筋骨格系の設計がどのように影響するかを解析や考察を行った。

(2) どのように運動を作っているのか: 制御方法の考案

3-(1)で行った力学解析や安定性解析の結果を応用し,歩行運動や跳躍運動などの実現に向けた制御方法(印加圧力の設計方法)を考案した。またその働きをシミュレーションや実機実験にて検証した。

4. 研究成果

(1) 力学的な安定性解析に関する主たる研究成果

2自由度脚モデルの安定性解析

図3に示すような3リンク2自由度の脚モデルの立位姿勢に対して安定性解析を行った。結果,満たすべき安定条件を導出し,そのうちの1つは空圧筋の動特性によって満たされることを示した。また他の3つについてもそれを満たすような印加圧力の領域が存在することを定量的に示した(図4)。またシミュレーションおよび実機実験にて解析結果の妥当性を確認した。これらの結果は従来試行錯誤や経験則に頼っていた筋骨格系の設計に対する定量的な指標となり得る。

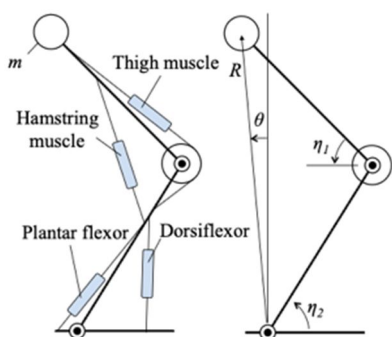


図3: 2自由度脚モデル

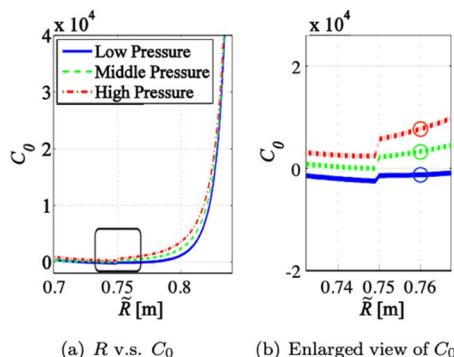


図4: 安定条件 C_0 の姿勢に対する変化. どの程度「力を入れれば」立位安定でいられるかを定量的に示した。

膝構造が安定性に与える影響についての解析と跳躍運動への応用

1自由度脚モデルにおいて,膝構造を一般的なブリー状ではなく,突き出した片持ち梁状(図5)として,膝構造が安定性に与える影響についての解析を行った。結果,片持ち梁状の膝構造においては膝が深く屈曲した姿勢では不安定化する(腰砕けて立ち上がれなくなる)ことがわかった。一方で,深く屈曲することができる(可動域が広い)という点を活かし,大屈伸からの跳躍運動を可能であることを確認した(図6)。このことは,あえて不安定化することでダイナミックな運動を実現するという,制御戦略を考える上で興味深い結果である。

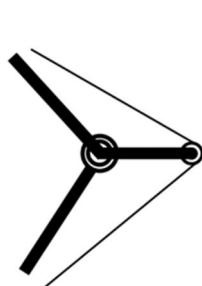


図5: 片持ち梁状の膝構造

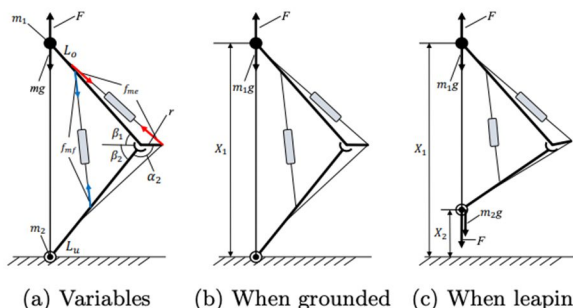


図6: 片持ち梁上の膝を有する脚モデル(立位/跳躍)

(2) 制御方法の考案に関する主たる研究成果

2 自由度脚モデルの軌道追従制御

力学解析の結果から、脚モデルの足先軌道を制御することを試みた。図7に示すような、4脚動物の後脚の1本を模した2関節4筋の脚モデルに対して目標軌道を与え、それを実現するような各空圧筋への印加圧力を計算する、軌道追従制御を提案した。結果空圧筋のモデル化誤差やワイヤの取り付け誤差の影響が顕著な低圧帯においては誤差が見られたものの、拮抗の程度の強い高圧帯においては目標軌道を追従することが可能であることをシミュレーションおよび実機実験にて確認した(図8)。これらの結果は、従来圧力印加のタイミングや大きさを試行錯誤することで決定していた運動軌跡を、定量的に設計できるということであり、多彩な運動を実現する上で有益である。

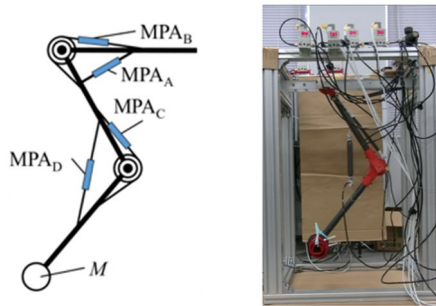


図7：2関節4筋脚モデルおよび実機実験用ロボット

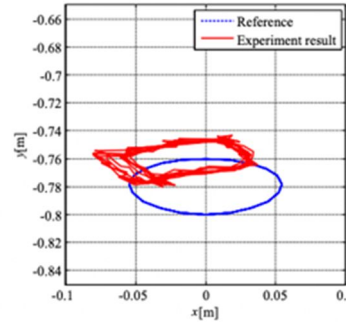


図8：軌道追従に関する実験結果。偏差は見られるものの概ね目標軌道を生成できている

張力フィードバック協調制御

目標軌道を陽に与えるのではなく、各筋が感じる刺激やそれに対する反射に基づいて自律分散的に運動を生成するという生物の仕組みに着想を得て、張力フィードバック協調制御という一種の自律分散制御を考案した(図9左)。これは各筋が感じる張力に応じて伸縮のリズムを自律的に変調することで、拮抗筋同士の協調や、それによる周期運動の生成を目的とした制御手法である。同制御則を1対の2関節筋を備えた2自由度脚モデル(図9右)に適用してシミュレーションを行った結果、フィードバック強度を適切に選ぶことで拮抗筋の自律的な協調が得られることを確認した。またフィードバック強度の選び方によって、足先がゆっくりと円を描くようなモードや、素早く上下するようなモードなど、動物に類似する興味深い複数の協調モード(運動モード)が発現することを確認した(図10)。これらの結果は、従来圧力印加のタイミングや大きさを試行錯誤することで生成していた周期運動を、入力も含めて自律的に生成することができる点、また複数の運動モードが生成できるという点で非常に興味深く、有力な制御方法と言える。

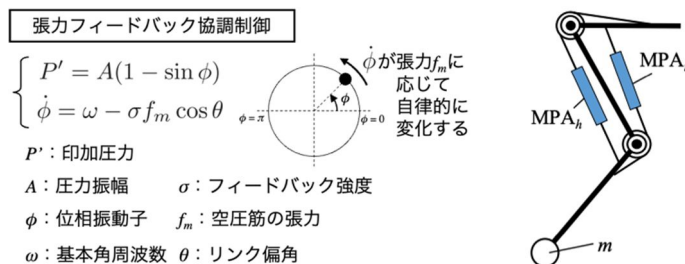


図9：1対の2関節筋を有する2自由度脚モデル、および張力フィードバック協調制御。空圧筋への印加圧力が、その筋自身に働く張力の大小によって自律的に変調する。

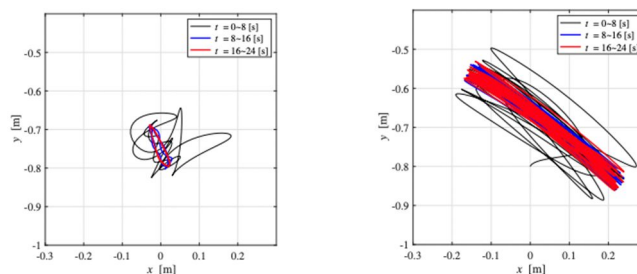


図10：フィードバック強度の選び方によってゆっくりとした円運動(左)や激しい往復運動(右)が自律的に生成される

< 引用文献 >

- 【1】 K. Hosoda, K. Narioka, 「 Synergistic 3D Limit Cycle Walking of an Anthropomorphic Biped Robot 」 , IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, TuB5.5, pp.470-475, (2007).
- 【2】 K. Hosoda, Y. Sakaguchi, H. Takayama, T. Takuma, 「 Pneumatic-driven jumping robot with anthropomorphic muscular skeleton structure 」 , Autonomous Robots, Vol. 28, issue 3, pp. 307-316, (2010).
- 【3】 R. Niiyama, S. Nishikawa, Y. Kuniyoshi, 「 Biomechanical Approach to Open-Loop Bipedal Running with a Musculoskeletal Athlete Robot 」 , Advanced Robotics, Vol. 26, No. 3-4, pp. 383-398, (2012).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4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 Takahiro Goto, Yasuhiro Sugimoto, Daisuke Nakanishi, Keisuke Naniwa, and Koichi Osuka	4. 巻 E12-N
2. 論文標題 Analysis of Autonomous Coordination between McKibben Pneumatic Actuators in the Antagonist Musculoskeletal Model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications	6. 最初と最後の頁 -
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 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 Takahiro Goto, Yasuhiro Sugimoto, Daisuke Nakanishi, Keisuke Naniwa, and Koichi Osuka	4. 巻 33
2. 論文標題 Analysis of Autonomous Coordination Between Actuators in the Antagonist Musculoskeletal Model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of robotics and mechatronics	6. 最初と最後の頁 410-420
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2021.p0410	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 YOSHIDA Shogo, NAKANISHI Daisuke, NANIWA Keisuke, SUGIMOTO Yasuhiro, OSUKA Koichi	4. 巻 85
2. 論文標題 Verification of linear approximation model of McKibben Pneumatic Actuator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 18-00498
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.18-00498	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 中西 大輔, 久保田 耀一郎, 浪花 啓右, 杉本 靖博	4. 巻 63
2. 論文標題 非対称な拮抗構造を有する空圧筋骨格脚モデルにおけるアクチュエータ間協調の解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 1223-1227
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 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 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 南井 渉, 中西大輔, 浪花啓右, 杉本靖博, 大須賀公一
2. 発表標題 ソフトマテリアルを用いた空圧筋測長センサの開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中西大輔, 加原竜太, 浪花啓右, 杉本 靖博
2. 発表標題 二関節四筋を有する空圧筋脚ロボットの脚先軌道制御法の提案
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩本怜海, 杉本 靖博, 中西大輔, 浪花啓右, 後藤貴滉, 大須賀公一
2. 発表標題 空圧筋駆動脚ロボットの跳躍運動における二関節筋の影響の検証
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤貴滉, 杉本靖博, 中西大輔, 浪花啓右, 大須賀公一
2. 発表標題 空圧筋骨格系における自律的なアクチュエータ間協調の数理解析
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤貴滉, 杉本靖博, 中西大輔, 浪花啓右, 大須賀 公一
2. 発表標題 空圧筋を用いた拮抗筋モデルにおける自律的協調の解析
3. 学会等名 第32回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中西大輔, 浪花 啓右, 杉本 靖博
2. 発表標題 拮抗筋を有する空圧筋骨格上体モデルにおけるアクチュエータ間協調の解析
3. 学会等名 第20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 (SI2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田輝之, 中西大輔, 杉本靖博
2. 発表標題 空圧人工筋骨格ロボットの跳躍運動における関節剛性の解析
3. 学会等名 第20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 (SI2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋琢馬, 中西大輔, 浪花啓右, 杉本 靖博
2. 発表標題 空圧筋骨格脚モデルの拮抗筋間協調制御に身体パラメータが与える影響の解析
3. 学会等名 第20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 (SI2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中西大輔, 久保田耀一朗, 浪花啓右, 杉本靖博
2. 発表標題 非対称な拮抗構造を有する空圧筋骨格脚モデルにおけるアクチュエータ間協調の解析
3. 学会等名 第63回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 南井涉, 中西大輔, 浪花啓右, 杉本靖博, 大須賀公一
2. 発表標題 空圧筋四脚ロボットの自律的な脚間協調による歩行実現
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤貴滉, 吉田匠吾, 中西大輔, 浪花啓右, 杉本靖博, 大須賀公一
2. 発表標題 空気圧人工筋を用いた拮抗筋モデルにおけるアクチュエータ間協調の解析
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田匠吾, 中西大輔, 浪花啓右, 杉本靖博, 大須賀公一
2. 発表標題 空気圧アクチュエータの粘弾性を線形和で表現した張力モデルの実機検証
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉本靖博、花岡慧、吉田匠吾、中西大輔、浪花啓右、大須賀公一
2. 発表標題 繰り返し負荷による McKibben型空気圧アクチュエータの特性変化に関する実験的解析
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡田輝之、中西大輔、杉本靖博
2. 発表標題 空気圧人工筋を有する脚ロボットの立位安定性に膝構造が与える影響に関する解析
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中西大輔、恩田和馬、杉本靖博
2. 発表標題 空圧筋を用いた二自由度脚ロボットの立位安定性に関する解析および実機検証
3. 学会等名 平成30年秋季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 後藤貴滉、吉田匠吾、中西大輔、浪花啓右、杉本靖博、大須賀公一
2. 発表標題 拮抗配置した空気圧人工筋における自律的なアクチュエータ間協調の実現
3. 学会等名 平成30年秋季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田匠吾、中西大輔、浪花啓右、杉本靖博、大須賀公一
2. 発表標題 空気圧人工筋を用いた脚ロボットの跳躍運動入力設計
3. 学会等名 平成30年秋季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2018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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------