

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K00371

研究課題名(和文) 反動零空間に基づくヒューマノイドロボットのモーション・フォース複合制御

研究課題名(英文) Motion/Force Control of Humanoid Robot Based on Reaction Null Space

研究代表者

佐藤 大祐 (Sato, Daisuke)

東京都市大学・理工学部・准教授

研究者番号：40344692

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：反動零空間に基づく冗長解法を利用した全身運動と四肢の接触レンチ制御によるヒューマノイドロボットの制御コントローラの有用性をダイナミクスシミュレーションによって検証した。具体的には、(1)片腕・両腕・道具を用いた床面や壁面の清掃作業に対するモーション・フォース複合制御および反動制御、(2)接触摩擦を考慮可能な接触レンチ分配手法のGIWC-GIによるモーション・フォース複合制御と内力制御とRNSに基づく冗長解法を利用した全身運動制御、(3)ステップや歩行を伴う片腕・両腕を用いた力作業に対する全身運動制御、の三つの課題についてのシミュレーションによる検証結果から、提案制御手法の有用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒューマノイドロボットには人間との共存環境下での活躍が期待されている。潜在的に実現可能な実用的な作業は数多く存在しているが、そのほとんどがまだヒューマノイドロボットによって実現されておらず、ヒューマノイドロボットを実社会で利用するために備えなければならない能力となる力作業を実現する全身運動制御法の開発が急務であった。本研究課題において開発してきた反動零空間に基づく冗長解法を利用した全身運動と四肢の接触レンチ制御によるヒューマノイドロボットの制御コントローラは、課題を解決する一助となるものであり、本研究成果は学術的にも社会的にも大きな意義を持つ。

研究成果の概要(英文)：The usefulness of a control controller for humanoid robots with whole-body motion and limb contact wrench control using a redundant solution based on reaction null space was verified through dynamics simulations. Specifically, the usefulness of the proposed control method is demonstrated by the simulation results for the following three tasks. (1) Motion-force combined control and reaction control for cleaning floor and wall surfaces using one arm, both arms, and tools; (2) Motion-force combined control by GIWC-GI, a contact wrench distribution method that can consider contact friction, and whole-body motion control using internal force control and a redundant solution method based on RNS; (3) Whole-body motion control for force tasks using one or both arms with stepping and walking.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ヒューマノイドロボット モーション・フォース制御 全身運動制御 接触レンチ分配 角運動量分配
モーションプランニング

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初の時点においても、現時点においても、ヒューマノイドロボットには人間との共存環境下での活躍が期待されている。研究開発当初の時点において、潜在的に実現可能な実用的な作業は数多く存在していたが、そのほとんどがいまだヒューマノイドロボットによって実現されていなかった。2015年開催された DARPA Robotics Challenge を契機に、ヒューマノイドロボットの研究が飛躍的に加速したことは間違いない事実であるが、その結果からもヒューマノイドロボットが社会に役立つ実用性を持つまでには、さらに多くの理論や技術に関する研究課題を解決する必要性が明らかになっていた。そこで、私たちは、このヒューマノイドロボットを実社会で利用するために備えなければならない能力の中でも基幹となる、力作業を実現するための全身運動制御法を開発し、実作業での実機検証を進めることが急務と考えた。

私たちはこれまで、さまざまな条件下で撃力や持続的な外力を受けるヒューマノイドロボットのバランス制御問題を、宇宙ロボットの無反動制御に利用してきた反動零空間 (Reaction Null Space: RNS) を応用して開発した制御法で解決していた。また、ドイツ航空宇宙センター (DLR) で開発されたヒューマノイドロボット JUSTIN に対する無反動動作生成手法の開発も実現していた。それらの従来研究の成果から、本研究の基礎理論となる End-link Dynamics (手先動力学) の非干渉化や開発予定の新しい全身運動制御手法の基礎部分の提案を終え、シミュレータの開発や小型ヒューマノイドによるホワイトボードの清掃作業 (図1) を実現していた。よって、これらを実用性の高い制御手法へと発展させ、ヒューマノイドロボット実験検証までを研究目標とし、研究開発を実施した。

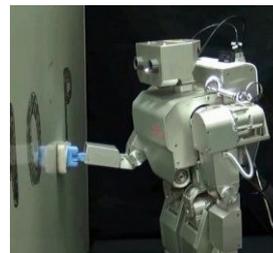


図1: 小型ヒューマノイドロボットによる基礎的な

2. 研究の目的

本研究の目的は、ヒューマノイドロボットが実用的な力作業を実現する上で必要とする、全身の姿勢維持しながら、作業対象、環境、利用する道具、そのほかの作業条件に適した全身運動を積極的かつ力動的に実現できるモーション・フォース複合制御法の開発である。ヒューマノイドロボットによる力作業では、作業のために接触部における力と運動の同時制御を実現するとともに、転倒回避のための全身の姿勢維持と作業に適した全身姿勢を取って積極的に活用することが重要である。そこで本研究では、幾何学的冗長性を有するヒューマノイドロボットの四肢に対して、反動零空間 (Reaction Null Space: RNS) に基づくモーション・フォース複合手先動力学制御手法 (RNS 手先動力学制御手法) を開発する。そして、この制御手法を、ダイナミクスシミュレータ Choreonoid 上での全身運動制御シミュレーションと、実際のヒューマノイドロボットによる作業実験に適用し、その有効性を検証する。

3. 研究の方法

本研究課題の研究計画では、まず、RNS 手先動力学制御の理論構築、制御設計の理論統合、制御理論の動力学シミュレーションによる検証から研究を開始し、現有の小型ヒューマノイドロボット HOAP-2 の両手足先端に力覚センサを追加して本制御を実際のヒューマノイドロボットに適用して作業実験を行い、有効性を評価することとし、具体的には以下のように研究を進めた。

- (1) これまでの研究成果から RNS 手先動力学制御手法の理論を構築し、独自に開発してきた多体系動力学シミュレータに対して、多リンクの接触状態表現を定式化し組み込んだ。また構築された本制御法もコーディングして適用した。そして、上記が正しく適用されたかを検証するため、平面上冗長 3 自由度マニピュレータなどの低自由度モデルの動力学シミュレーションにより、有効性を検証した。
- (2) 小型ヒューマノイドロボットの HOAP-2 モデルによる本制御法を用いた動力学シミュレーションを行い、実機での実験を前にその有効性を検証した。本制御に基づく作業動作実験を行うため、現有設備である小型ヒューマノイドロボット HOAP-2 を改造し、両足先の 2

力所に新規購入する小型力覚センサを装備させ、作業時に加わる力・モーメントを計測可能にした実験システムを構築し、HOAP-2 の片腕を用いた壁面の清掃作業に対するモーション・フォース複合制御および反動制御実験を行い、実作業における有用性を検討した。

詳細な設計を進めた時点で、計画時に購入を検討した力覚センサでは求める制御に対する性能が不十分であることが判明した。よって、センサの再選定が必要となり、HOAP-2 に対する設計案を見直すこととなった。また、選定結果により性能が保証された力覚センサは当初購入予定の製品よりも高額であったことから、研究計画における予算計画および備品利用計画の見直しが必要となった。(この見直しの際にコロナ渦の影響を受け、研究体制が整わなくなってしまったことから、最終的には、期間内での実験機による検証は断念せざるを得なくなった。)

加えて、研究代表者が所属機関における研修制度を利用することとなったため、双腕による作業を考慮して RNS に基づく内力制御の理論構築、これに基づく制御理論の動力学シミュレーションを実施することを優先とした研究計画へと変更をし、具体的には研究分担者の協力を得ながら、以下の内容を重点的に進めることで研究活動を継続した。

- (1) 双腕による力作業を考え、RNS に基づく内力制御手法の理論を構築する。HOAP-2 をモデルとした動力学シミュレータに内力制御手法を組み込み、シミュレーションからその有用性を検証する。
- (2) 本年度までの成果に基づいて、Choreonoid シミュレータ上に本制御手法の機能を持つモジュールを作成する。

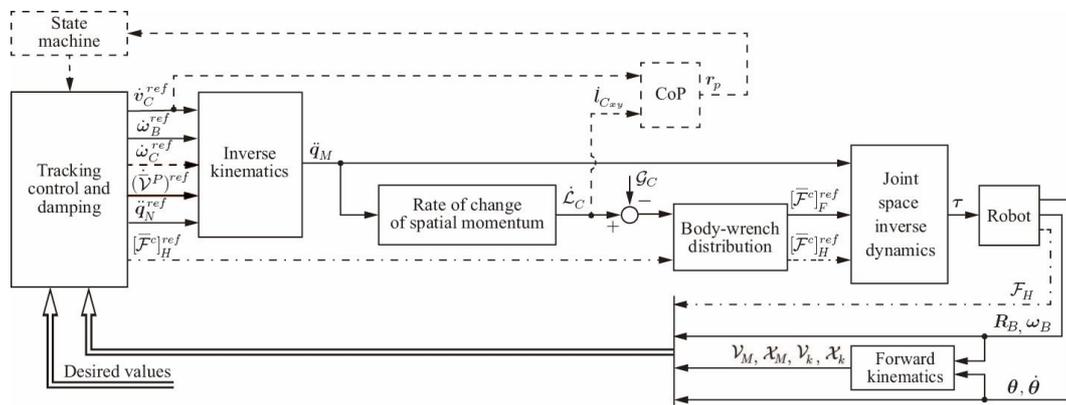


図 2： 独自開発・提案した反動零空間と空間運動量に基づく全身運動制御コントローラのブロック図

研究計画の変更はあったが、上記の研究活動による成果として、図 2 に示す RNS に基づく冗長解法を利用した空間運動量規範の全身運動制御の理論とその制御コントローラを構築することができた。

研修制度からの帰国後、研究計画を延長しながら当初の研究課題を達成することを目標としたが、コロナ渦による緊急事態宣言下において、所属機関での活動制限による研究力者や実験機器の開発上での関係業者との連携悪化は著しく、実際のヒューマノイドロボットによるすべての実験実施を断念した。その代わりに、上記の(1)と(2)のシミュレーションに関する課題内容をより向上させることに計画を変更し、以下の五つの全身運動制御の理論検証をシミュレーションにより実施し、本制御手法の有用性を確認した。図 3 に(1)の研究結果、図 4 に(3)の研究結果のシミュレーション結果を示す。

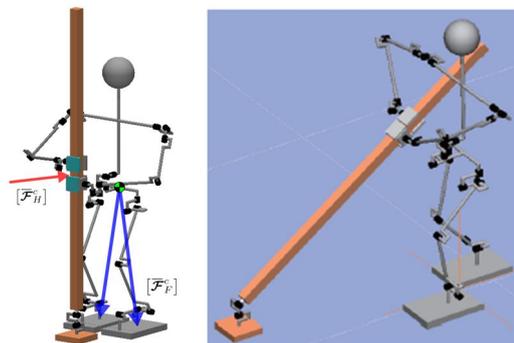


図 3： 用具を用いた床面や壁面の清掃作業に対するモーション・フォース複合制御および反動制御のシミュレーション

- (1) 用具を用いた床面や壁面の清掃作業に対するモーション・フォース複合制御および反動制御
- (2) 接触摩擦を考慮した接触レンチ分配手法 GIWC-GI によるモーション・フォース複合制御と内力制御
- (3) 空間運動量平衡原理と角運動量の分配

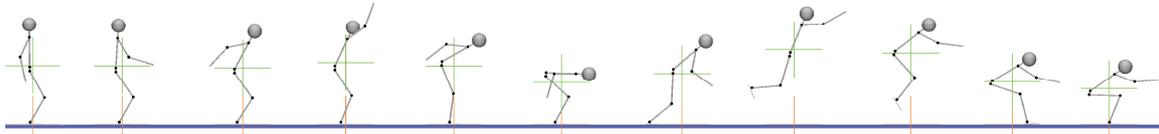


図 4： 空間運動量平衡原理と角運動量の分配に基づくヒューマノイドロボットのダイナミックな全身運動の生成と制御による前方跳躍動作シミュレーション

に基づくヒューマノイドロボットのダイナミックな全身運動の生成と制御

- (4) 作業時の特異姿勢を回避可能なつま先を有するヒューマノイドロボットによる動作生成
- (5) ステップや歩行を伴って片腕・両腕によって用具を用いた壁面や床面の清掃作業シミュレーションの実現

4. 研究成果

本研究課題では、反動零空間に基づく冗長解法を利用した全身運動と四肢の接触レンヂ制御によるヒューマノイドロボットの制御コントローラの有用性をダイナミクスシミュレーションによって検証した。具体的には、(1)片腕・両腕・道具を用いた床面や壁面の清掃作業に対するモーション・フォース複合制御および反動制御、(2)接触摩擦を考慮可能な接触レンヂ分配手法 GIWC-GI によるモーション・フォース複合制御と内力制御と RNS に基づく冗長解法を利用した全身運動制御、(3)ステップや歩行を伴う片腕・両腕を用いた力作業に対する全身運動制御、の三つについてダイナミクスシミュレーションによる検証を実施し、提案制御手法の有用性を示すことができた。

コロナ渦の影響を受けたことから実機実験に関連した当初の研究計画は変更せざるを得なかったが、研究期間内での目標達成のためにさまざまな取り組みを実施した中で、連携研究協力者との共同作業において等身大ヒューマノイドロボットによる実機実験検証のための基礎実験を達成することができており、これを提案してきた全身運動制御手法の今後の研究の進展につなげたいと考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hidaka Yuki, Nishizawa Kajun, Nenchev Dragomir N.	4. 巻 -
2. 論文標題 Dynamic Stepping on Unknown Obstacles With Upper-Body Compliance and Angular Momentum Damping From the Reaction Null-Space	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)	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) 10.1109/ICRA.2019.8793832	査読の有無 有
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 Iizuka Ryo, Miyahara Sho, Nenchev Dragomir N.	4. 巻 5
2. 論文標題 Walking With Hand Motion/Force Control and CoM/VRP and Trunk Compliance for Disturbance Accommodation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 203 ~ 210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2019.2952323	査読の有無 有
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 Miyata Akinori, Miyahara Sho, Nenchev Dragomir N.	4. 巻 5
2. 論文標題 Walking With Arm Swinging and Pelvis Rotation Generated With the Relative Angular Acceleration	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 151 ~ 158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2019.2948529	査読の有無 有
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 Nenchev Dragomir N., Miyata Akinori, Miyahara Sho, Hamano Takehide	4. 巻 4
2. 論文標題 The VRP Generalized Inverse and Its Application in DCM/VRP-Based Walking Control	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 4595 ~ 4602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2019.2931245	査読の有無 有
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 Hosokawa Masahiro, Dragomir N. Nenchev, Hamano Takahide	4. 巻 32
2. 論文標題 The DCM generalized inverse: efficient body-wrench distribution in multi-contact balance control	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 778 ~ 792
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2018.1503095	査読の有無 有
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25件(うち招待講演 0件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Ryo Iizuka, Dragomir N. Nenchev, Daisuke Sato
2. 発表標題 Motion Generation and Control of Acrobatic Motion Synergies Emerging From the Momentum Equilibrium Principle
3. 学会等名 2020 IEEE-RAS 20th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯塚 諒, 坂口 慎悟, 佐藤 大祐, 金宮 好和
2. 発表標題 角運動量の分配に基づいた運動生成と制御による後方宙返りの解析
3. 学会等名 スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2020 (SHD2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂口 慎悟, 飯塚 諒, 佐藤 大祐, 金宮 好和
2. 発表標題 角運動量の分配に基づいた運動生成と制御による垂直跳躍および宙返りの解析
3. 学会等名 第41回バイオメカニズム学術講演会 (SOBIM2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 遠藤 之弥, 飯塚 諒, 佐藤 大祐, 金宮 好和
2. 発表標題 角運動量の分配に基づいた運動生成と制御による立ち幅跳びの解析
3. 学会等名 第41回バイオメカニズム学術講演会 (SOBIM2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松宮 正太, 佐藤 大祐
2. 発表標題 VRP-G1に基づくレンチ分配を用いた人型ロボットによる広範囲清掃作業シミュレーション
3. 学会等名 第21回システムインテグレーション部門講演会 (SI2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 遠藤 之弥, 坂口 慎悟, 飯塚 諒, 佐藤 大祐, 金宮 好和
2. 発表標題 相対角加速度に基づいた人型ロボットの立ち幅跳びおよび宙返り運動の生成と制御
3. 学会等名 第26回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯塚 諒, 佐藤 大祐, 金宮 好和
2. 発表標題 運動量平衡原理と角運動量の分配に基づく人型ロボットのダイナミックな全身運動の生成と制御
3. 学会等名 第26回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梅景正光, 金宮好和, 佐藤大祐
2. 発表標題 人型ロボットのバランス制御のためのCRBレンチコーンを考慮した擬似逆行列によるCRBレンチの分配
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西澤佳隼, 金宮好和, 佐藤大祐
2. 発表標題 相対角加速度を用いた角運動量ダンパによる人型ロボットの連続前方跳躍
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akinori Miyata, Sho Miyahara, Dragomir N. Nenchev
2. 発表標題 Biped Locomotion With Arm Swinging and Pelvis Rotation Generated With the Relative Angular Acceleration
3. 学会等名 International Conference on Humanoid Robots (HUMANOIDS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Iizuka, Sho Miyahara, Dragomir N. Nenchev
2. 発表標題 Multicontact Biped Walking With Hand Motion/Force Control and CoM/VRP and Trunk Compliance for Disturbance Accommodation
3. 学会等名 International Conference on Humanoid Robots (HUMANOIDS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Dragonir N. Nenchev
2. 発表標題 The Momentum Equilibrium Principle: Foot Contact Stabilization with Relative Angular Momentum/Velocity
3. 学会等名 2018 IEEE-RAS 18th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hinata Ryotaro, Dragonir N. Nenchev
2. 発表標題 Balance Stabilization with Angular Momentum Damping Derived from the Reaction Null-Space
3. 学会等名 2018 IEEE-RAS 18th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 濱野 峻秀, 宮原 笙, 金宮 好和
2. 発表標題 VRP擬似逆行列の提案とDCM擬似逆行列とのレンヂ分配手法の比較
3. 学会等名 第19回システムインテグレーション部門講演会 (SI2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯塚 諒, 稲村 知章, 濱野 峻秀, 中村 拓真, 金宮 好和
2. 発表標題 人間の姿勢制御戦略に基づく人型ロボットの全身制御
3. 学会等名 第19回システムインテグレーション部門講演会 (SI2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 日高 優紀, 西澤 佳準, 金宮 好和
2. 発表標題 人型ロボットの未知の不整地への踏み出し動作における角運動量ダンパに基づくバランス制御
3. 学会等名 第19回システムインテグレーション部門講演会 (SI2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kanamiya Yoshikazu
2. 発表標題 Balance Control With Relative Angular Momentum/Velocity
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮原 笙, 金宮 好和
2. 発表標題 CRB角運動量およびVRP擬似逆行列に基づく全身制御による動的二足歩行
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渋谷 駿志, 金宮 好和
2. 発表標題 閉ループ連鎖拘束に基づく人型ロボットの全身モーション・フォース制御
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村 拓真, 金宮 好和
2. 発表標題 反動零空間法を用いた回転台上での人型ロボットの全身モデルを用いた外乱に対するバランス制御
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 日向 遼太郎, 金宮 好和
2. 発表標題 反動零空間法に基づいた角運動量ダンパによる人型ロボットのバランス維持
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮田 明典, 金宮 好和
2. 発表標題 人型ロボットの被衝撃時の角運動量変化率によるICP移動量を最小化したステップ動作
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 細川雅弘, 白井智史, 佐藤大祐, 金宮好和
2. 発表標題 DCM擬似逆行列によるレンチの分配法 - 未知の外乱に対するLift-Leg Strategyの実現 -
3. 学会等名 第35回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 細川雅弘, 濱野峻秀, 佐藤大祐, 金宮好和
2. 発表標題 人型ロボットにおけるDCM擬似逆行列に基づく未知の外乱に対するバランス制御
3. 学会等名 第18回システムインテグレーション部門講演会 (SI2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 白井智史, 佐藤大祐, 金宮好和
2. 発表標題 人型ロボットのための二次計画問題における計算コストの評価
3. 学会等名 第18回システムインテグレーション部門講演会 (SI2017)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Dragomir N. Nenchev, Atsushi Konno, Teppei Tsujita	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 508
3. 書名 Humanoid Robots Modeling and Control	

1. 著者名 Dragomir Nenchev	4. 発行年 2017年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 47
3. 書名 Differential Kinematics, Humanoid Robotics: A Reference	

〔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	Dragomir Nenchev (Dragomir Nenchev) (80270809)	東京都市大学・理工学部・名誉教授 (32678)	

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