

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 29 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420225

研究課題名(和文) 2関節拮抗駆動回転機で再現する脚歩行のための高速高精度位置力同時制御

研究課題名(英文) High Performance Force and Position Control for Walking Robot with Two-Joint Simultaneously Driven Mechanism

研究代表者

宮崎 敏昌 (Miyazaki, Toshimasa)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90321413

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：脚歩行機構は、人間の生活環境の中で動作する補助ロボットの移動手段としてその応用が期待されている。本研究では、新たに2関節拮抗駆動回転機を用いて脚機構モデルを作成し、その蹴り足動作、着地動作等の力・位置同時制御系をより高精度に構築し、動力学シミュレーション及び実験から提案手法の可能性を評価するとともに、有効性を確立する。蹴り足動作では、2関節拮抗駆動回転機の動作特性を活かして、スリップ抑制と蹴り足力制御の両立を行なった。また、着地動作時には、自重を支えつつ本体を自由にモーション制御するために必要な動力学を考慮した位置力同時制御手法を提案し、その有効性を実験により確認した。

研究成果の概要(英文)：The leg walking mechanism is expected to be applied as a moving means of an auxiliary robot which operates in the human living environment. In this study, we newly developed a leg mechanism model using a two-joint antagonistic driving rotary machine, constructed a force / position simultaneous control system such as kicking leg motion, landing motion and the like more precisely, and dynamics simulation and experiment To evaluate the possibility of the proposed method and to establish its effectiveness. In the kicking motion, both the slip suppression and the kicking leg force control were compatible with each other, taking advantage of the operating characteristics of the 2 joint antagonistic driving rotary machine. Moreover, at the time of landing motion, we propose a position force simultaneous control method considering the dynamics necessary for free motion control of the main body while supporting its own weight, and confirmed its effectiveness by experiment.

研究分野：工学

キーワード：2関節筋 遊星歯車機構 レッグロボット

1 研究開始当初の背景

脚歩行機構は、人間の生活環境の中で動作する補助ロボットの移動手段としてその応用が期待されている。これまでのロボットに使用されている脚歩行機構では、足首関節のアクチュエータを使用して脚を繰り出して移動を行っていた。しかしながら、人間などの生物の脚機構は、複数の冗長な筋肉の組み合わせで表現されており、生体の脚機構では主として股関節と膝関節から、これらの冗長な筋肉を用いた蹴り出し力によって歩行を行っていることが知られている。したがって、蹴り出し力を制御した歩行を行う脚機構の再現は、学術上大変意義の高いものであると考えられる。

従来の脚機構においては脚先端の力・位置の協調動作が大変難しく、受動的な制御と能動的な動作を常に切り替えながら制御する必要があることから、蹴り出し、着地、踏ん張り等の動作をシームレスに実現することは大変困難であった。2関節拮抗回転機は、冗長性を持つ3つのアクチュエータにより2関節を駆動する構成となっており、従来の関節回転機に比べてより広範囲な制御が可能となることから、一般的な冗長システムでは難しかった動作を、より容易に実現できるものと考えられる。

2 研究の目的

本研究では、新たに2関節拮抗駆動回転機を用いて脚機構モデルを作成し、その蹴り足動作、着地動作等の力・位置同時制御系をより高精度に構築し、動力学シミュレーション及び実験から提案手法の可能性を評価するとともに、有効性を確立する。

本研究課題で目的とする2関節拮抗駆動回転機を用いた蹴り出し力(方向・大きさ)制御手法は、力制御において、方向と大きさを個別に制御できるように設定した制御系である。基本的な制御系として、各アクチュエータのトルク制御を持ち、そのトルクを各関節角度、角速度、角加速度に基づいて決定される関節トルク指令から、冗長性演算を介したF/Tコンバータを介すことで、3つのアクチュエータに伝達させる仕組みとなっている。基礎的な力・位置制御については、これまでの研究成果を利用し、高性能な制御器を適用することで、高精度化を実現できるものと考えており、制御対象の数学モデルからより容易に設計できるようなシステムを開発する。一方、蹴り出し後の位置制御モードへの変換及び位置制御システムは、対象とする2関節拮抗駆動回転機を用いた脚ロボットの動作特性を考慮して設計する。以上の点をまとめ、

本研究課題における目標を以下の様に定める。

- 2関節拮抗駆動回転機を用いた脚機構モデルによる蹴り出し力制御の実現
- 同脚機構における、着地、踏ん張り等の力位置連携制御モデルの解析と実現

これらの目標が達成された場合、脚先端の力・位置を歩行過程に応じてシームレスに制御できるようになるため、この制御系の実現は、従来の手法及び機械構成では大変難しかったものである。本研究では、この特色を実現するために、2関節拮抗駆動回転機と脚先端力位置制御手法を用いている点が独創的である。上記2つの予備的なシステムの開発及び高精度位置制御法、力制御の新しい手法という基礎的な研究成果を得て、全く新しい分野への適応が可能となると予測される。本研究の成果によって、脚移動機構を持つロボットのなかでも、人間と協調して動作するシステムに対する新しい標準を提案できるものと考えられる。

3 研究の方法

平成26年度においては、2関節拮抗駆動回転機を応用した脚機構ロボットの実機製作と歩容に関する正確な数学モデルを確立し、力制御および位置制御双方に関する基本的な制御性能を検証する。研究課題では、遊星歯車構造をもつ2関節拮抗駆動回転機を脚機構の腰関節および膝関節に適用した、1脚分の2リンクロボットを制御対象として製作する。初年度に製作するロボットは、2関節拮抗駆動回転機の特性を確認するため、片足のみとし、ロボット先端が平面内を移動し、蹴り出し、着地等の基本動作を再現できるモデルとした。平成26年度においては、上記を踏まえ以下の2点の成果を得ることを目標とした。

- 2関節拮抗駆動回転機による脚機構の蹴り出し力・方向制御手法確立
- 2関節同時駆動回転機的设计及びモデルパラメータ取得方法確立

平成27年度には、平成26年度までの研究成果を踏まえ、2関節拮抗駆動回転機を持つ脚機構による蹴り出し力・方向制御を実現した上で、歩行に必要な2脚を備えた実験装置への拡張を行う。上記を踏まえ以下の2点の成果を得ることを目標とした。

- 2関節同時駆動回転機を持つ2脚歩行実験装置への拡張と高精度位置力時制御手法の確立
- 2関節同時駆動回転機にける高精度位置力同時制御手法の確立

また、平成 28 年度においては平成 27 年度までの研究成果から、本研究の目的である「2 関節拮抗駆動回転機を持つ脚機構に対する 3 次元内位置・力の同時制御による歩行の実現」を行った。

4 研究成果

4.1 2 関節拮抗駆動回転機を用いた脚機構モデルによる蹴り出し力制御の実現

4.1.1 蹴り出しにおける推進力の検証

蹴り出し動作は、歩行サイクルにおける両脚支持期の後半に該当する。一般的な健康者の歩行サイクルにおける重心上下動が Fig.1 の様に示される。ここで、推進力の定義を質量中心に作用する力 F_C とすると、蹴り出し動作によって得られる推進力の方向は、質量中心を持ち上げる方向かつ、進行方向が望ましいことがわかる。そこで、推進

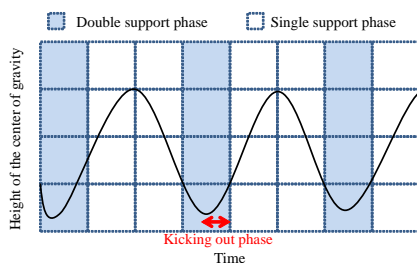


図 1: 歩行時の重心上下動

力としてどの筋トルクが適切か調査する。まず、人間の質量中心は臍下、すなわち股関節付近に存在している。本稿での 2 リンクレッグロボットも股関節上部にモータ・遊星ギア等が搭載されており、その重量はリンク部の 8 倍ほどであるため、質量中心は股関節付近と定義できる。静力学にて考えた場合、質量中心に作用する力は外乱を除けば以下の 2 つに分けられる。

1. 蹴り出しに対する床からの反力 F_f
2. 重力 F_g

Fig.2 にマニピュレータにおける各力要素を示す。床からの反力 F_r に対して足先と質量中心を結んだ直線と並行に作用する力要素を F_{rt} 、直角方向に作用する力要素を F_{rm} とする。足先と質量中心を結んだ基準ベクトルは (1) 式となる。

$$R_{ef} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ \sin(\theta_1 - \theta_2) \end{pmatrix} \quad (1)$$

反力が質量中心に作用する力は並進運動成分 F_{rt} であり、モーメント成分は $L \cdot F_{rm}$ となる。そこで、(1) 式より並進運動成分 F_{rt} は (2) 式にて導出

することができる。

$$F_{rt} = -R_{ef}^T \cdot F_r \cdot R_{ef} \quad (2)$$

従って、質量中心における推進力 F_C は、並進運動成分 F_{rt} と重力成分 F_g の合成で表現できる。

$$F_C = F_{rt} + F_g \quad (3)$$

二関節筋を駆動した場合、手先と股関節を結んだ

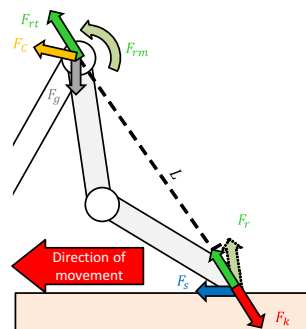
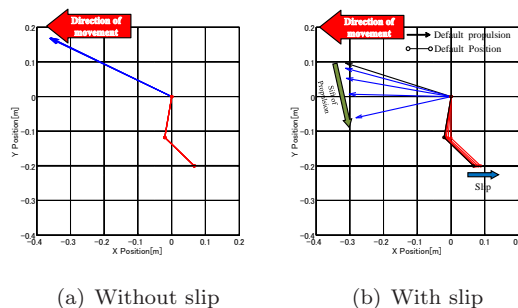


図 2: 推進力定義

方向に蹴り出し力が発生するため、重心が上昇する方向と進行方向への推進力を発生することがわかる。したがって、膝関節の単関節筋と二関節筋にて重心を持ち上げることができ、X 軸方向への推進力が反平行であることから、歩行速度の調整にも最適であることがわかる。



(a) Without slip

(b) With slip

図 3: 二関節筋を駆動させた場合の推進力

4.1.2 単関節筋によるスリップ抑制制御

各筋トルクが生成する推進力の調査から、膝関節の単関節筋と二関節筋により蹴り出した場合、効率よく推進力が得られることが確認できたため、蹴り出し指令値 F^{ref} に対する、筋トルク変換ではこの二つの筋トルクを用いる。二関節筋 τ_c と膝単関節筋 τ_s によって蹴り出す際の力は (4) 式となる。

$$\begin{pmatrix} \tau_c \\ \tau_s - \tau_c \end{pmatrix} = J^T F \quad (4)$$

$$= l \begin{pmatrix} -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_X \\ F_Y \end{pmatrix}$$

したがって、この式を各筋トルクについて整理した場合 (5) 式となる。

$$\begin{pmatrix} \tau_2 \\ \tau_3 \end{pmatrix} = l \begin{pmatrix} -(\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \\ -\sin \theta_1 \\ (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \\ \cos \theta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_X \\ F_Y \end{pmatrix} \quad (5)$$

これにより、蹴り出し力の指令値 F^{ref} に対する筋トルクを生成する。地面の垂直抗力を保った状態でスリップを抑制するため、(6) 式にて蹴り出し時にスリップ方向 (地面と平行方向) に発生する速度を検出する。

$$\dot{x} = -l(\sin \theta_1 \dot{\theta}_1 + \sin \theta_2 \dot{\theta}_2) \quad (6)$$

4.1.3 実験結果

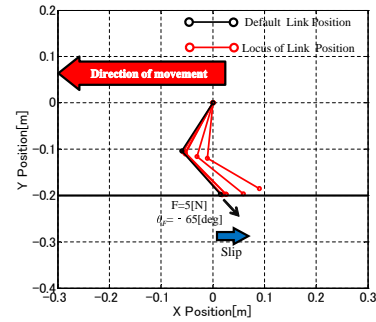
実機にて、スリップ抑制制御を用いた場合の実験を行った。その際のリンク軌跡と推進力と足底の位置と速度の結果が図 4 と図 5 となる。図 4 から、リンク軌跡においては、蹴り出し力制御のみの場合にて、0.4[sec] ~ 0.5[sec] の間で足底が地面から浮いている。これは、機械的な伝達損失によって、蹴り出し途中で足底が地面から離れてしまうわけである。また、スリップ抑制制御を用いた場合のリンク軌跡から、シミュレーション同様、抑制制御と比較してスリップ量を軽減できていることが確認できる。蹴り出し制御のみでは、足底が蹴り出し途中で地面より浮いてしまったため、0.4[sec] までのスリップ量を比較すると、蹴り出し力制御のみの場合が約 0.042[m]、スリップ抑制制御を用いた場合が約 0.008[m] であり、1/5 程に抑制できている。図 5 より、蹴り出し力制御のみに対して、スリップ抑制制御を用いた場合がより大きな Y 方向の推進力を確保できている。しかし、その一方で、モータからリンクにトルクを伝達する過程で、遊星歯車機構と減速機、ベルト等のトルク損失により、実験における推進力がシミュレーション値を大きく下回っている。

以上の結果より、2 関節拮抗駆動回転機を用いた脚機構モデルによる蹴り出し力制御を実現した。

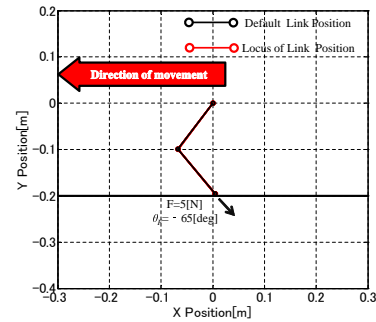
4.2 2 関節同時駆動回転機機構における、着地、踏ん張り等の力位置連携速度制御モデルの解析と実現

4.2.1 対象とする脚機構システム

力位置連携速度制御の有効性を確認するために、本研究で用いる四脚ロボットの脚部となる 2 リンクレッグロボットの構造を説明する。二関節同時駆動を実現するレッグロボットは筋 1 対をモータ 1 つで再現し、図 6 に示すように、合計 3 つのモータで 2 リンクのアームを構成する。3 つのモータはそれぞれ遊星歯車のサンギア、リングギア、遊星キャリアに接続されており、サンギアモータ軸

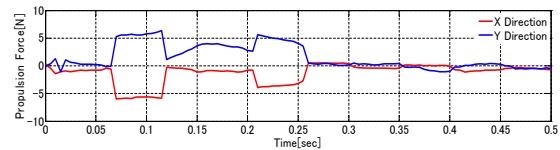


(a) スリップ抑制制御無

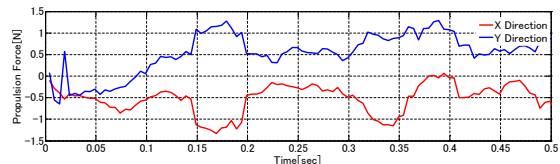


(b) スリップ抑制制御有

図 4: リンクの移動軌跡



(a) スリップ抑制制御無



(b) スリップ抑制制御有

図 5: 蹴り出しにおける推進力

とリングギアモータ軸より出力される。出力軸には減速機が接続され、リングギア側は第 1 リンクに、サンギア側はベルト機構を介して第 2 リンクに接続される。本機構の場合、第一リンクのみを動作させた場合でも第二リンクは絶対角度を保ったまま動作を行う。これより、二関節を同時駆動させるアクチュエータの力出力が足の付根と先端を結んだ方向に出力される。

先端力の損失を、モータのトルク部分で考えると、各モータトルクが他のモータに伝達される部分に存在すると考えられる。トルク伝達損失となる不感帯幅を測定するために、四脚ロボットの脚部となるレッグロボットのリンク先端に力センサ

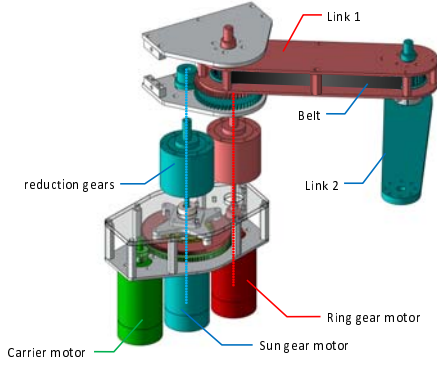


図 6: Mechanism of leg robot

を固定して、それぞれのモータに電流を入力し、力センサから伝達されるトルクを計測する。理論値と各モータに電流指令を $\pm 0.5A/7.5sec$ の傾きで各モータに与えて、計測した先端力の出力分布を図 7 に示す。測定したトルク不感帯幅を用いてシミュレーションを行った結果が、実機で測定した力出力の結果に近い力出力を発生させることを確認した。

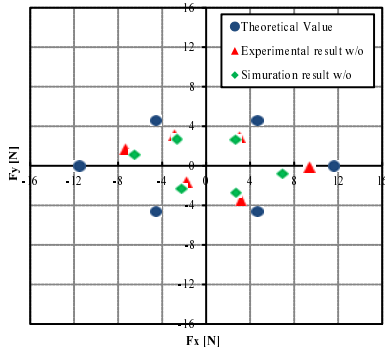


図 7: Output distribution of tip including torque transmission loss

4.2.2 動力学を考慮した重力補償のための伝達トルク補償法

2 リンクレッグロボットの動力学方程式に遊星歯車のブロック線図を組み合わせ、歯車等による伝達損失を考慮したモデルを、図 8 に示す。遊星歯車間でのトルク伝達損失の不感帯幅を DZ_r 、 DZ_s 、 DZ_c で表す。これらの式より、プラントに入力される理想的な伝達トルクからプラントにかかる実際のトルクの差分を取ると、式 (7)、式 (8) に示すオブザーバが推定するトルクとなり、不感帯で失われるトルクと動力学で失われるトルクが推定される。

$$\tau_{1comp} = \tau_1^* - \hat{\tau}_{OWL1} - \tau_{dyn1} = \tau_{dzr} \quad (7)$$

$$\tau_{2comp} = \tau_2^* - \hat{\tau}_{OWL2} - \tau_{dyn2} = \tau_{dzs} \quad (8)$$

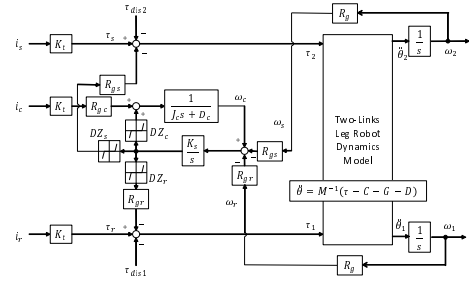


図 8: Model of leg robot

推定した伝達損失分の補償トルクを式 (9) 式 (10) に示すように電流へと換算し各関節モータにフィードバックすることにより、各関節トルク T_1, T_2 は式 (11)、式 (12) で表され、二関節同時駆動機構から伝達されるトルクが理想的なトルクのみとなる。

$$i_{1comp} = \tau_{1comp} / K_t \quad (9)$$

$$i_{2comp} = \tau_{2comp} / K_t \quad (10)$$

$$T_1 = \tau_r + \tau_c R_{gc} R_{gr} - \tau_{DZr} + \tau_{1comp} \quad (11)$$

$$T_2 = \tau_s + \tau_c R_{gc} R_{gs} - \tau_{DZs} + \tau_{2comp} \quad (12)$$

4.2.3 実験結果

本提案法の有効性を確認するために、以下の実験条件で実機による実験を行った。四脚ロボットを傾斜角 5° の斜面上に配置し、脚が地面と垂直になる角度の姿勢から、本体位置を 5cm 下降させ、再び元の位置に戻す動作を二回繰り返す。その時の各電流指令値を測定する。

四脚ロボットの脚先端に力センサを取り付け、実際に脚先にかかる力を測定し、電流指令値から計算される脚先端の力出力と比較を行った。各関節のモータで補償を行った場合の脚先端の力を図 9 に示す。トルク伝達損失補償を行った場合、各モータの電流指令値から求めた脚先端の力は実際に脚先端にかかる力とに近づくことが実機実験より確認された。トルク伝達損失補償を行うことにより、力覚センサレスで脚先端の力制御を行う際に、脚先端の力出力の誤差を減少させることができ、より正確な力制御が可能になると考えられる。

以上の結果より、歩行ロボットの着地、踏ん張り等の力位置連携速制御モデルについて、提案し、その解析と制御手法について実験により有効性を確認した。

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)

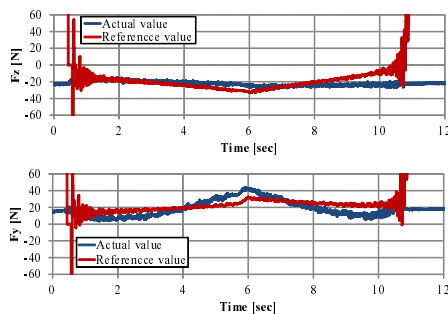


図 9: Tip force of the quadruped robot (with compensate)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1. Takashi Yoshioka, Akinori Yabuki, Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi, Toshimasa Miyazaki, Thao Tran Phuong, "Stable Force Control of Industrial Robot Based on Spring Ratio and Instantaneous State Observer", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.5(2016), pp.132-140(2016-7)

〔学会発表〕(計 19 件)

1. Ngo Minh Tan, Toshimasa Miyazaki, Kiyoshi Ohishi, "Balance Optimization Torque Distribution Control Method for considering Transmission Loss in Bi-articular Actuators Mechanism", Proc.of IEE Japan International Workshop on Sensing, Actation, Motion Control and OptimizationS, TT-8-5(2017-3)
2. Minh Tan Ngo, 宮崎敏昌, 大石潔 "二関節筋を用いたロボットアームの遊星歯車機構の自己分伝達損失トルク補償法" 第 34 回日本ロボット学会学術講演会 (2016-09)
3. 上田圭祐, 宮崎敏昌, 大石潔 :「二関節同時駆動型アクチュエータを備えた四脚歩行ロボットの歩行制御に関する研究」, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 in Kyoto, 2A2-P01(2015-05)
4. 上田圭祐, 宮崎敏昌, 大石潔 :「二関節同時駆動アクチュエータを備えた四脚ロボットの重力補償用二関節筋伝達トルク線形化」, 平成 27 年度電気学会産業応用部門大会, 2-8, pp.II 133-136(2015-09)
5. 宮崎敏昌, 上田圭祐, 佐藤情, 大石潔 :「遊星歯車機構を用いた二関節同時駆動型レグ

ロボットのトルク伝達損失補償」, 平成 27 年度電気学会産業応用部門大会, 2-S9-3, pp.II 13-18(2015-09)

6. Keisuke Ueda, Toshimasa Miyazaki, Kiyoshi Ohishi, "Transmission Torque Linearization of Quadruped Robot with a Two-joint Simultaneous Drive Mechanism for Gravity Compensation", IECON 2015 - 41th Annual Conference of the IEEE, pp.5156-5161, Nov. 9 2015-Nov. 12 2015
7. 上田圭祐, 宮崎敏昌, 大石潔 :「トルク伝達損失補償を用いた二関節同時駆動型ロボットアームの先端力制御法」, 電気学会研究会資料 メカトロニクス制御研究会 MEC-14-140(2014-07)
8. 上田圭祐, 宮崎敏昌, 大石潔 :「遊星歯車機構を用いた二関節同時駆動型ロボットアームのトルク伝達損失補償」, 平成 26 年度電気学会産業応用部門大会, 2-3, pp.II 83-86(2014-08)
9. 佐藤情, 宮崎敏昌, 大石潔 :「絶対座標系二関節筋ロボットの蹴り出し時のスリップ抑制制御」, 電気学会研究会資料, メカトロニクス制御研究会 MEC-14-166, pp.39-44(2014-10)

他 10 件

6 研究組織

(1) 研究代表者

宮崎 敏昌 (Miyazaki Toshimasa)
長岡技術科学大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 90321413

(2) 研究分担者

大石 潔 (Ohishi Kiyoshi)
長岡技術科学大学・工学研究科・教授
研究者番号: 40185187
横倉 勇希 (Yokokura Yuki)
長岡技術科学大学・工学研究科・助教
研究者番号: 70622364