

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 8 月 1 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700214

研究課題名(和文) 触覚受容器の動特性に着目した能動触センシングの力学的解釈

研究課題名(英文) Mechanical analysis of the active tactile sensing based on the dynamics of the tactile receptors

研究代表者

石橋 良太 (Ishibashi, Ryota)

首都大学東京・システムデザイン学部・助教

研究者番号：20535835

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ヒトの能動的触覚センシングの基本原則を明らかにする。特に、機械受容器とその周辺構造からなるセンサ系の力学特性が動的条件下においていかに機能するのかを明らかにする。機械受容器と皮下構造については、皮膚の材質と幾何学構造に基づくモデルにより表皮変形から受容器伸展までを数学的に表した。同モデルは筋紡錘へと拡張し、閾値以下の外乱による感覚運動制御機能向上法へ展開した。さらに、知覚と指先動作との関係を調べ、センサの動特性を考慮した触覚フィードバック系として作業座標系のP-SD制御則を得た。また、人体パラメータ推定法とあわせ、ヤコビ行列を用いたSMA拮抗駆動系制御および予測制御へと展開した。

研究成果の概要(英文)：This research analyzes the active sensing ability of the human. Key point of the research is to investigate how the mechanosensitive receptors and the skin structure affect the dynamic sensing ability. At first, a mathematical model of the mechanosensitive receptors and the skin structure was developed. Then, the proposed model was applied to the muscle spindle mechanism and a new method to enhance the sensory-motor skill by using a kind of stochastic-resonance was obtained. Next, the relation between the finger-tip motion and the perception was examined. Then, tactile feedback method of the human motion was obtained which formed a task space P-SD servo controller. Consider about the skin and the mechanosensitive receptors dynamics, the proposed controller can feedback the task-space velocity nonlinearly. In addition, parameter identification method of the human motion was examined and a Jacobian based controller for the SMA actuator system and the predictive controller was obtained.

研究分野：知覚情報処理

科研費の分科・細目：知能ロボティクス

キーワード：触覚受容器 力触覚 適応・学習制御 ロボティクス・ハプティクス システム制御 生体力学・運動神経生理学 スポーツ科学 国際研究者交流

1. 研究開始当初の背景

ヒトの触覚センシングは能動的であり、対象に対して指先を能動的に動かす事で、静的には得られない様々な情報を得る。このとき、一般に、指先の動かし方(押しつけ方、速度など)を変えると知覚される情報が変化することが知られている。例えば、面上の微小な凹凸を指先でなぞりながら検出する際、押し付け力やなぞり速度を変えると知覚量も変わる。この要因には、中枢系での情報処理過程に加え、指先の皮膚と皮下の触覚受容器とから成る力学系が、何らかの情報処理作用を果たしている可能性が示唆される。この様なヒトの能動的触覚センシングの原理を分析し、一定の解釈が得られれば、生理学的に興味深いばかりでなく、保健医療や工学分野においてもヒトの感覚器機能を評価するための基礎データを提供できる可能性を持つ。このため、ヒトの能動的触覚センシングは、今日に至るまで多様に分析されてきた。ただし、触覚受容器と皮膚からなる系の動特性については、あまり焦点とされてこなかった。

本研究では、触覚受容器と皮膚とからなる力学系の動特性に着目し、これらが能動的触覚センシングにおいていかに機能するのかを明らかにする。能動触覚センシングは、ヒト固有の巧みな触覚センシング能力の一つと考えられている。本研究が達成されれば、ヒトと親和性の高い触覚提示装置や高度な能動的触覚センシング能を有するロボットハンドを構築できる可能性があり、その原理の詳細を力学的に解明することが待たれる。

近年、加齢による身体機能低下の要因解明や対策が望まれている。筋制御系と感覚器系は加齢により変化することが知られており、その機能が力学的に明らかになれば、福祉分野において重要な知見をもたらすと期待される。さらに、得られた知見により発現するセンサ機能は、能動触覚センシングのみならずヒトの外界認知能力を知る上で重要な意味を持つ。以上より、本研究では触覚受容器と皮膚からなる系の動特性に着目する。このとき、触覚受容器として皮下最浅部に位置する機械受容器へ着目する。動特性と最浅部の機械受容

器へ着目する理由は以下による。

1) 最浅部の機械受容器は“つるつる感”や“ざらざら感”などの触感を司り、ヒトの巧みな触覚センシング能力の一端を担う極めて重要な触覚受容器である。皮下の最浅部に位置し、選択的に刺激する事ができるため、心理物理実験などにより実験的検証が容易に行える。

2) なぞり動作では入力が増動的になるため動特性モデルとならざるを得ない。動特性を考慮すると、同じ入力に対する出力が触動作により可変となり触覚センシングに最適な動作を議論できる。特に、固有モードを分析し動的入力との関係を調べれば、センシング達成のための制御機構についても一定の解釈が得られる可能性を持つ。

これまでの成果では、マイスナー小体が有する情報伝達特性を調べ、非線形な入出力特性を静力学モデルにより示した。動特性モデルを用いた触動作との関係性の調査、生理学、心理学的な検証が次の課題となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ヒトの能動触覚センシングについて、その原理を力学的に明らかにすることである。具体的には、皮膚と触覚受容器からなるセンサ系の力学特性に着目し、これらが動的条件下においていかに機能するのかを力学的に明らかにする。さらに、能動触覚センシングにおける指先の制御系について、皮膚と触覚受容器からなるセンサ系の動特性を考慮した制御原理を明らかにする。これらの達成により、ヒトの能動触覚センシング原理の力学的解釈を得る。得られた成果は、保健医療分野においてヒトの感覚器機能を評価する基礎データとして利用出来るだけでなく、高機能な触覚提示系の構築へも寄与すると想定される。

3. 研究の方法

(1) 皮膚と受容器の力学モデル

皮下構造等の柔軟体のモデリングでは、モデルの複雑化とそのパラメータ推定が問題となる場合がある。研究準備段階では、これまでの成果から、

機械受容器の非線形ばねモデル、およびその周辺構造の簡略モデルが得られており、これら知見を用いた触覚提示法の考察をおこなう段階にあった。そこで、次の段階では、皮下構造と機械受容器とからなるモデルの構築、入出力メカニズムの考察と解明、モデルの実験的検証、および工学的応用を進める。

本研究では、はじめに皮下構造等を簡便な力学モデルで記述しその作用を数学的および実験的手法により示した。ここでは、外力による皮膚変形に際して、機械受容器の周辺構造（真皮乳頭とコラーゲン繊維）が触覚受容器への情報伝達に大きく寄与しており、ヒト固有の非線形な知覚特性の一因となり得る可能性を力学モデルと実験により示した。本成果は、ヒトに近い特性の人工皮膚や点字デバイス等の各種触覚提示法の構築に際して有効に活用できる可能性があると思定される。

(2) 身体の力学特性と制御

筋空間での知覚と運動に関し、人工筋（SMA）を利用した腱駆動系により検証を進めた。ここでは、目標位置での内力を用いた制御法に関し、むだ時間を有する強い非線形系である SMA での有効性を示した。さらに、腱収縮により生じる力学特性は腱配置により可変であることを示した。本原理は、知覚制御原理の解析に用いるとともに、腱の端点の配置を可変する機構の導入により剛性制御法へと拡張し、SMA 拮抗駆動系におけるヤコビ行列を用いた位置と剛性制御法へと展開した。

(3) 知覚と制御系

知覚と制御系については、皮膚構造における知覚原理を筋紡錘へと拡張し、片足立ち姿勢制御を例にその機能を調べた。研究準備段階では、これまでの成果から、足裏へ与えた閾値以下の機械的振動により姿勢制御機能が向上するとの知見を得ている。次の段階では、1) 受容器の変形を起こさずに直接的に電気信号を与えた場合の有効性、2) 身体の他の部位における有効性、3) 同じ機械受容器である筋紡錘における有用性、4) 原理が有効に機能するための運動と環境条件等について調べる必要がある。

ここでは、片足立ち姿勢制御に際して、無意識下で筋が受ける電気的外乱の作用を様々な運動条件下で調べた。実験では、特に運動強度や習熟度等の条件に関して仮説を立て実証を進め、筋のセンサ系が能動/受動運動に際していかに機能し、外乱はいかに作用するのかについての知見を得た。

4. 研究成果

本研究では、機械受容器とその周辺構造からなるセンサ系の力学特性が動的条件下においていかに機能するのかを明らかにし、ヒトの能動的触覚センシング原理を調べた。研究当初は、皮膚構造と触覚受容器からなるセンサ系の動特性を考慮した指先の制御原理を解析した。次の段階では、対象を筋空間でのセンサ系全体へと展開し、上腕や下肢の運動をタスクとした感覚器特性と運動制御特性を数学的と実験的手法により調べた。

(1) 基礎的知見

研究の当初は、皮下の機械受容器と周辺構造のモデルを導出し特性を調べた (Fig. 1)。

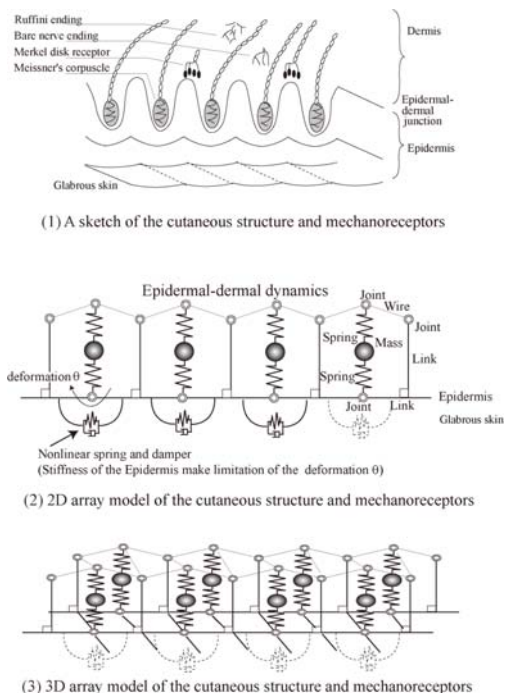


Fig.1 皮下構造と最浅部受容器（乳頭をリンク、コラーゲン繊維をワイヤとし、これらに挟まれた機械受容器をバネ質点系とした場合、いかなる方向の表面変形に対しても機械受容器であるバネ質点系は伸縮し、感度と固有モードは押付状態で可変）

次に、研究対象を筋空間でのセンサ系へと展開し、人体の骨格筋構造のモデル化を進めた。骨格筋系モデルのパラメータ値は、繰り返し学習制御と時間軸変換に基づくパラメータ推定法による同定値を用い、得られたパラメータ帯域を参考値として骨格筋系の制御原理を数学的と実験的手法により調べた。これらのモデル化ならびに数値解析と実験結果より、制御則の候補として以下を導出した。

- ① 目標位置での拮抗筋の内力を利用した位置と剛性調節
- ② 幾何学構造を考慮した学習と予測
- ③ 触覚情報を用いた押し付け習い動作での作業座標系速度の非線形フィードバック
- ④ 押し付け習い動作における触覚情報を用いた繰り返し学習

特に、骨格筋構造に関する制御原理は、拮抗筋の内力を利用した筋張力の制御法として人工筋(SMAアクチュエータ)を利用した腱駆動ロボットを用い、位置制御、インピーダンス制御等に関してむだ時間を有する強い非線形系における制御原理の機能的検証をおこない、目標位置での内力を利用した位置制御が可能であること(Fig. 2,3)、腱配置を変えることで剛性場を幾何学的に可変できることを理論と実験により示した(Fig. 4)。

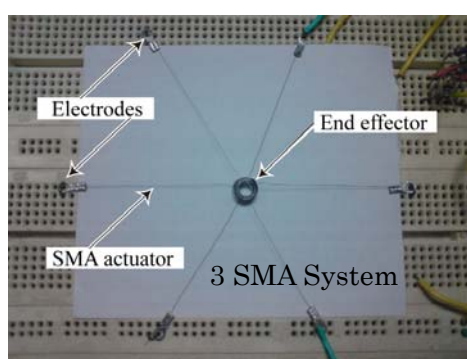


Fig. 2 3本のSMA線からなるシステム例

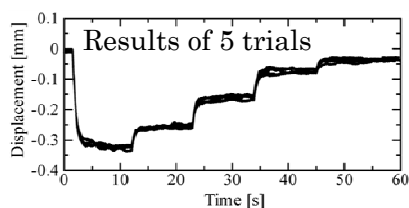
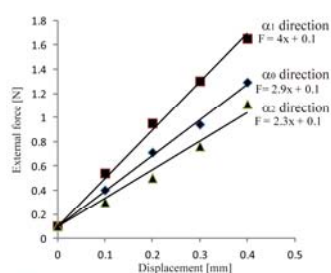
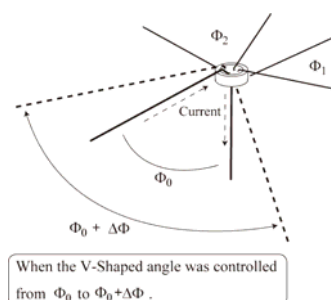


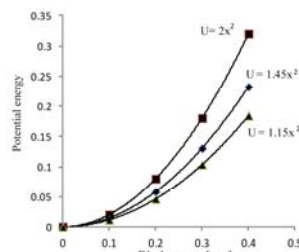
Fig. 3 位置制御結果と再現性

また、目標軌道追従時の予測機能について、骨格筋等の身体特性を考慮したモデル予測制御系を構築し、数値シミュレーションにより検証した。以上の結果より、触覚情報を用いた押し付け習い動作における作業座標系速度の非線形フィードバック、および繰り返し学習制御系を構築し、数学的解析と実験的検証を進め、原理を工学的に展開した。さらに、発展課題として、ヒトのセンサ系の非線形伝達作用が運動へ及ぼす影響の調査を進めた。

ここでは、上腕や下肢運動での知覚/運動特性を調べ、特に片足立ち姿勢制御を例に基礎実験と解析を進めた。研究準備段階では、足裏の機械受容器に無意識下で機械外乱を印加すると、確率共鳴に似た効果による姿勢制御機能向上が確認されている。これは前述の皮膚と受容器とならなる力学モデルの非線形な情報伝達特性からも考察できる。この原理が有効に機能するとするのであれば、



(a) Relation between the displacement and the external force



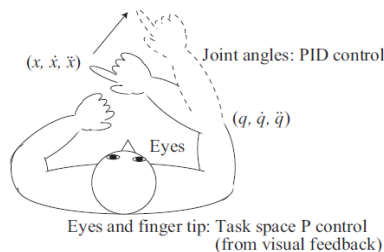
(b) Relation between the displacement and the potential energy

Fig. 4 3本のSMA線を手先で折り返す構造の装置において、折り返し角を調整することで、手先の剛性を方向を異方的に可変可能

機械受容器を変形させずにノイズを印可した場合でも、運動機能が向上するのかを確認する必要がある。そこで、次の段階では、無意識下で筋のセンサ系（筋紡錘）が受ける閾値以下の電気的外乱の作用を調べることににより、筋のセンサ系が能動/受動運動に際していかに機能するのかを調べた。その結果、片足立ち姿勢制御課題において、筋へ与えた閾値以下の電気的外乱により姿勢制御機能は向上し、その効果は剛体の床面よりも柔軟体の方が顕著に発現する(Fig.6)。また、電気的外乱を閾値以下の強度で与えた場合、機能向上作用は運動強度に依存して発現するとの結果を得た。

(2) 工学的応用

皮膚と機械受容器からなる感覚器系と運動制御系を調べた結果、作業座標系速度の非線形フィー



$$\begin{aligned} \tau &= K_p \Delta q + K_d \Delta \dot{q} + K_I \int \Delta q \, dt \\ &+ J^T \{ \bar{K}_p \Delta x + \bar{K}_d s(\Delta \dot{x}) \} \\ \Delta q &= q_d - q \\ \Delta x &= x_d - x \\ s(\Delta \dot{x}) &= \text{Saturate Function} \end{aligned}$$

Fig. 5 式中右辺第4項は、触覚情報を用いた押付け習い動作での作業座標系速度の非線形フィードバック（q は関節角，Kp, Kd, Ki は関節角 PID 制御ゲイン，x は作業座標系位置，Kp, Kd は作業座標系 PD 制御ゲイン）

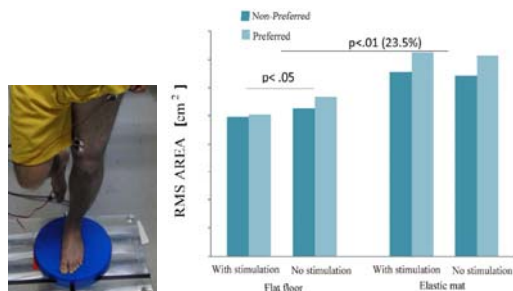


Fig. 6 片足立ち時に閾値以下の電気的外乱を筋へ与えた際の身体動揺（床面が不安定な場合には電気的外乱により姿勢安定化が可能）

ドバック系，すなわち触覚情報を用いた作業座標系の P-SD サーボ系を得た(Fig. 5)。さらに、繰り返し学習制御と統合し機能を調べた。これらは、タッチパネルをはじめ人間機械系の装置を適切に構築する際に有用と想定される。特に、情報呈示に際して静力学的設計であったものを、動的作用を考慮した設計とする基礎技術へ拡張した。即ち、対象の質量（質感）と動的な摩擦を考慮した。これら知見は、面式提示装置の設計へと展開した。

皮膚モデルの非線形性の解析より、確率共鳴に似た作用が生じる可能性が数学的に示された。実験的には、入力信号として機械的と電気的刺激のいずれにおいても、前述の作用により運動機能を向上できることを確認した。特に、動作に付随して他動的に伸展される筋へ外乱を与えても、作用が生じる可能性を考察した。これらの知見は、医療福祉分野における様々な応用が想定される。

5. 主な発表論文等

- [雑誌論文] (計6件) (Journals and Proceedings)
- [1] Ryota Ishibashi and Hiroe Hashiguchi, "Proposal of a tactile feedback model with reaching motion based on nonlinear dynamics of the mechanoreceptors and finger-tip -Consideration of a task space P-SD Servo controller-", Proc. 4th Annual IEEE International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems, 2014 (accepted).
- [2] Ryota Ishibashi, Muhammad Aliff Bin Rosly, Akihito Sano, Hideo Fujimoto, "A proposal of softness display using honeycomb", Communications in Information Engineering, Vol. 1, Taylor and Francis, 2014.
- [3] Ryota Ishibashi, Takahiko Oda, Kenji Tahara, Hitoshi Kino, Akira Kojima, "Parallel system using V-Shaped shape memory alloy actuator", Proceedings of SICE Annual Conference 2012, pp. 1745-1750, 2012
- [4] Ishibashi, Ryota, Zou, ShiSheng, Kawaguchi, Kazuya, Takesue, Naoyuki, Kojima, Akira, "A Proposal of Manipulability Based Model Predictive Control for the Parallelogram Linkage", Proceedings of 10th IFAC Symposium on Robot Control, pp. 423-428, 2012
- [5] Ryota Ishibashi, Hiroe Hashiguchi, Tadao Isaka, Sadao Kawamura, "Modeling of the Synchronization of the Cutaneous Mechanoreceptors with Epidermal-Dermal Dynamics", Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and

Cybernetics, pp.2109-2114, 2012

[6] Shouhei Taniguchi, Hitoshi Kino, Ryuta Ozawa, Ryota Ishibashi, Mitsunori Uemura, Katsuya Kanaoka, Sadao Kawamura, "Inverse dynamics of human passive motion based on iterative learning control", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics Part.A, 2012

〔学会発表〕(計 14 件)

[1] Ishibashi, Ryota, Ishihara, Masami, Imanaka, Kuniyasu, Shinohara, Minoru "Posture control during one-leg quiet standing is improved with sub-sensory electrical stimulation to muscles on rigid but not viscoelastic surface", Neuroscience2012, New Orleans, LA, USA 2012

[2] 石橋良太, 東京都立産業技術研究センター平成 25 年度 研究成果発表会, SMA 拮抗駆動系におけるヤコビ行列を用いた位置と剛性制御, 2013

[3] 石橋良太, 小田隆彦, 田原健二, 木野仁, 児島晃, “ヤコビ行列を用いた剛性調節機構を有する SMA 駆動ロボットアーム”, SI2013, 2013

[4] 石橋良太, 橋口宏衛, 篠原稔, “タッチパネルを用いた指先によるなぞり動作の計測”, SI2013, 2013

[5] 石橋良太, 越智裕章, 田原健二, 木野仁, “V 字型 SMA 拮抗駆動系における位置と剛性呈示”, SSI2013, 2013

[6] 石橋良太, 小田隆彦, ZOU ShiSheng, 川口和也, 堀田博司, 増田卓三, 武居直行, 児島晃, “予測情報を用いたロボットマニピュレータのためのスーパーバイザリ(監督型)制御”, 第 56 回自動制御連合講演会, 2013

[7] 石橋良太, 小田隆彦, 田原健二, 木野仁, 児島晃, “パラレル SMA 機構を用いた力覚提示法に関する検討”, 第 56 回自動制御連合講演会, 2013.

[8] 石橋良太, 奥田竜次, 小田隆彦, 梅田勝也, 田原健二, 木野仁, 児島晃, “SMA を用いたヒレ機構による姿勢安定化制御”, 第 56 回自動制御連合講演会, 2013

[9] 石橋良太, 小田隆彦, 田原健二, 木野仁, 児島晃, “V 字型 SMA 拮抗駆動系の機構と制御法”, RSJ2013, 2013

[10] 石橋良太, 小田隆彦, 田原健二, 木野仁, 児島晃, “V 字開閉型可変剛性を利用した SMA アクチュエータの剛性制御”, RSJ2012, 2012

[11] 石橋良太, 小田隆彦, 田原健二, 木野仁, 児島晃, “形状記憶合金線を用いた腱駆動機構における剛性調節法の検討—異方的な剛性提示に関する基礎的検討—”, 第 55 回自動制御連合講演会, 2012

[12] 石橋良太, 小田隆彦, 田原健二, 木野仁, 児島晃, “形状記憶合金線を用いたパラレルワイヤ機構による剛性提示”, SI2012, 2012

[13] 石橋良太, 小田隆彦, 田原健二, 木野仁, 児島晃 “V 字型 SMA を利用したパラレルシステムの基礎的検討”: SI2011, 2011

[14] 石橋良太, 小田隆彦, 田原健二, 木野仁, 児島晃 “釣り合い内力を考慮した SMA アクチュエータ制御法の検討”: RSJ2011, 2011

〔産業財産権〕

○取得状況(計 1 件)

名称: 触覚呈示装置および触覚呈示ディスプレイ

発明者: 石橋良太, 佐野明人, 藤本英雄

権利者: 名古屋工業大学

種類: 特許

番号: 5388119

取得年月日: 2013-10-18

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石橋 良太 (Ishibashi Ryota)

首都大学東京 システムデザイン学部・助教

研究者番号: 20535835

(2) 研究協力者

篠原 稔 (Minoru Shinohara)

ジョージア工科大学 応用生理学部・准教授

研究者番号: 70241213

橋口 宏衛 (Hiroe Hashiguchi)

大同大学 ロボティクス学科・講師

研究者番号: 20434558

伊坂 忠夫 (Tadao Isaka)

立命館大学 スポーツ健康学部・教授

研究者番号: 30247811

川村 貞夫 (Sadao Kawamura)

立命館大学 理工学部・教授

研究者番号: 20186141

今中 國泰 (Kuniyasu Imanaka)

首都大学東京 健康福祉学部・教授

研究者番号: 90100891

石原 正規 (Masami Ishihara)

首都大学東京 人文科学研究科・准教授

研究者番号: 60611522

佐野 明人 (Akihito Sano)

名古屋工業大学 機械工学科・教授

研究者番号: 80196295

藤本 英雄 (Hideo Fujimoto)

名古屋工業大学 機械工学科・教授

研究者番号: 60024345

木野 仁 (Hitoshi Kino)

福岡工業大学 工学部・教授

研究者番号: 50293816

田原 健二 (Kenji Tahara)

九州大学 工学研究科・准教授

研究者番号: 80392033

遠山 茂樹 (Shigeki Toyama)

東京農工大学 工学研究科・教授

研究者番号: 20143381

児島 晃 (Akira Kojima)

首都大学東京 システムデザイン学部・教授

研究者番号: 80234756

武居 直行 (Naoyuki Takesue)

首都大学東京 システムデザイン学部・准教授

研究者番号: 70324803

谷口 祥平 (Syouchi Taniguchi)

パナソニック株式会社

研究者番号: -