

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年4月19日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21246042

研究課題名（和文）

受動歩行の力学的原理に基づくヒトに近い高速・高効率平地歩行ロボットの開発

研究課題名（英文）

Development of Anthropomorphic Robot Realizing High Speed and Efficient Level Ground Walking Based on Physical Principle of Passive Walking

研究代表者

佐野 明人（SANO AKIHITO）

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80196295

研究成果の概要（和文）：

受動歩行の力学的原理に基づき、13時間45分の連続歩行に成功し、ギネス世界記録に認定された。また、ヒトが必要最小限のアシストを加えることで、平地を含むヒトの生活空間での歩行が可能となった。さらに、ヒトに酷似した外装を施すと、ヒトの歩行と見間違えるほどであり気配さえ感じる。上体効果により歩行効率を高められることが実証され、腰関節トルクは脚および膝関節に有効に働くことが示され、膝折れやつまづきによる転倒を低減させた。また、高速移動として、時速10kmクラスの真にヒトのような走行を実現した。

研究成果の概要（英文）：

Based on the physical principle of a passive walking, the passive walker succeeded in the continuous walking for 13 hours and 45 minutes, and has been qualified as a Guinness world record so far. The field of activity was extended from the slope to our life space (level ground) because humans apply minimum assist. The biped anthropomorphic passive walker is a close resemblance between the gait of passive walker and that of human race, and we will feel even a sign of somebody. The effect of an upper body improved the efficiency of walking, and waist joint torque is fully effective in the movement of legs and knees, and reduced the fall. As high-speed locomotion, a run of a 10-km/h class has been realized.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
2010年度	9,900,000	2,970,000	12,870,000
2011年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
総計	22,900,000	6,870,000	29,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，知能機械学・機械システム

キーワード：受動歩行，歩行ロボット，力学的原理，ヒト，高速・高効率

1. 研究開始当初の背景

ヒューマノイドに代表される歩行ロボットは、高精度なセンサ，高性能なアクチュエータおよび高度な制御からなる最先端テクノロジーの結晶である。その要になっている

のが、ZMP（Zero Moment Point）である。しかし、ZMP 規範の歩行制御方法では、高効率を実現することは困難である。また、得られた歩容は自然さに欠け、ヒトの歩行とも異なる。その中で、近年注目されているのが「受

動歩行」である。受動歩行は、T. McGeer によって 1990 年に提唱され、歩行機のもつダイナミクスと環境（ここでは、スロープ）との相互作用のみによって、理想とする自然な歩容を形成する。

海外では、受動歩行に関する専門会議 Dynamic Walking が 2005・06 年（米国）、07 年（スウェーデン）、08 年（オランダ）と欧米をまわり、最新の研究発表から入門講座などが企画され、活発な活動がなされている。08 年は、ヒューマノイド研究者の参加もあり、ヒューマノイドの歩行の効率化に際し、今後受動歩行の研究成果が導入される可能性が高い。世界的研究拠点として、コーネル大学（米国）やデルフト大学（オランダ）が挙げられる。全身を有し 2 脚の 3 次元の受動的動歩行を達成している。しかし、受動歩行の力学的原理の解明が不十分であり、また高速歩行には至っていない。

我が国では、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において、2005 年～08 年の 4 ヶ年に渡って、受動的動歩行に関するオーガナイズドセッションを佐野（研究代表者）らが企画し、毎年 15 件前後の発表件数、数十名の参加者のもと、活発な議論を重ねてきている。また、07 年 1 月に藤本（研究分担者）を組織委員長として、International Symposium on Neo-Robotics が開催され、受動歩行研究の創始者である世界的に著名な T. McGeer 博士を招待講演の講師として招聘した。同氏が国内で講演するのは初めてであり、全国から専門家らが多数参加した。

我々は、8 年以上に亘り、受動歩行の安定化原理（歩ける原理）および脚の振り運動に関わる力学的メカニズム（転ばない原理）において主要な研究成果を挙げていた。これらの研究成果をさらに発展させることで、受動歩行に関わる他の力学的原理・メカニズムの解明、また原理原則に則した高速・高効率な平地歩行ロボットの開発ができるとの考えに至った。

2. 研究の目的

受動歩行は、本質的にエネルギー効率が非常に高いが、平地歩行において力学的原理に基づく設計論は未だ確立されていない。そこで、本研究では、受動歩行の力学的原理に基づき、ヒトに近い高速で高効率な平地歩行を実際のロボットで実現することを目的とする。

受動歩行は、ゆったりとした歩き方で、歩行速度は遅いと言われている。特に、平地歩行ではヨタヨタ感が否めない。また、重力場を巧みに利用したエネルギー効率の高い歩行を実現するために、フル関節・フルタイム駆動することなく、歩行ロボットの持つダイナミクスの特性を最大限に活かす必要があ

る。さらに、スピードを利用した身体の起こし回転運動の要素を導入することで、高速の歩行から一気に走行へと移動能力を高めることを検討する。

動力なしでスロープを下り歩くことができる受動歩行ロボットを実験者が適切にアシストすることで、2 脚での平地歩行を実現する。このとき、得られた歩容を実験者は的確に把握することができる。ここで、歩行の移動効率を高めることができれば、アシスト力を低減することが可能であり、将来的に小さな関節トルクによって理想的な自律平地歩行が実現できる。

3. 研究の方法

受動歩行の研究では、理論先行で工学的側面を考慮していない、逆に直感に基づいたロボット開発で理論的な側面が欠如しているなどの問題がある。本研究では、力学的原理を十分に踏まえた上で、しっかりと実機開発と実機実験を行っていく。

本研究では、機構的な受動性に重きを置き、研究を進める。その一つが、アシスト受動歩行である。ヒトがアシスト力を加えることで、スロープから我々の生活空間に活動範囲を広げる。大人サイズの歩行ロボットでは比較的高いロバスト性を有しており、しっかりと歩んでいる。本研究では、実験者による適切なアシストを加えると歩容が変化（加速等）し、かつその変化を実験者は的確に把握することができる。そこで、歩行ロボットの挙動を知覚しながらアシスト力をさまざまに変化（タイミングと量）させ、平地歩行への道筋を探る。触覚は現象の把握と理解に欠かせないものとなっている。

また、力技のパワード化は避け、ダイナミクスを最大限利用し、エネルギー効率を高めた上で、最後に残った部分のみをパワード化する。本研究では、上体に着目し、上体―大腿部間の腰トルクを受動要素で生成し、高効率歩行を実現する。

起こし回転運動とは、バーを斜めに地面に投げつけると、水平方向の速度が上昇方向の速度に変換されて、バーが回転しながら跳ね上がる現象のことである。走行の定義は、「両足が地面から離れる空中浮遊期の存在」であり、跳躍に目が向きがちである。本研究では、スピードを利用した起こし回転をヒントに、新たに「Bouncing Rod Dynamics」の枠組みを提案し、高速な脚運動の解析ならびに高速移動ロボットの開発を行う。

4. 研究成果

(1) 受動歩行の魅力は、環境との相互作用により自然でエネルギー効率の高い歩容を生成することである。モーションベース上にトレッドミルを配置した可変スロープ機

構上での環境適応性から、優れた直進安定性を実現するには、受動歩行ロボットに環境に順応し易い機構を導入することが重要であることがわかった。そこで、バネ付き外脚フレームを用いることで環境適応性を飛躍的に向上させ、狭隘な歩行路において 13 時間 45 分の連続歩行に成功した（「世界で最も長く歩いた受動歩行ロボット」として、ギネス世界記録に認定された。図 1 参照）。



図 1 ギネス世界記録認定

(2) ヒトに近い歩行ロボットを開発する場合、外観もヒトに近づける必要がある。シルエットを極力ヒトに近づけることから、各部の機構にはかなりの制約条件が課せられる。図 2 に膝有り 2 脚受動歩行の様子を示す。腰部の外側にある円盤状アシスト治具を軽く把持してアシストを行っている。先頭の実験者は普通のペースで歩行し、最後尾の実験者がそのペースに合わせるように、歩行ロボットをアシストしている。踵から着地し、膝折れをすることなく、極めてヒトに近い平地歩行を実現している。



図 2 ヒトに近い平地歩行(アシスト受動歩行)

本研究では、受動歩行ロボット特有の円弧足に代えて次のような機能を有するヒト足形状の受動足機構を開発した。

- ① 円弧足の役割 (Roll-over Shape との関係) を考慮し、カムとバネを組み合わせで非線形なトルク特性を実現した。
- ② 脚が床面から離れるとバネが戻り爪先が下がってしまい、遊脚の振り抜きが困難になる。そこで、ロック機構を導入し、足首角度を維持した。
- ③ 脚が接地した場合、ロックを解除する必要がある。踵から着地することから、踵にロ

ック解除機構を連結した。

④ ロック解除により急峻に足首が伸展するため、足裏全体が接地する直前でダンパーにより衝撃吸収を行った。

さらに、ヒトに近い外装を製作した。造形の基本コンセプトを以下にまとめる。

① リアルな生足を志向せず、かつロボットの造形にはない、新しいカテゴリーとして成立することを狙った。

② 外装を施しても、受動歩行ロボット本来の歩容を維持した。したがって、リアルさは追求せず、受動歩行ロボットに相応しい新しいデザインを取り入れた。

③ 足指一体の外装は、受動関節に対応して独立設置した。また、踝付近の造形処理も工夫した。

④ 骨盤の回旋機構を導入した。その結果、腰部は前後に分割され、さらに臀部は左右に 2 分割されている。

外装を施した歩行ロボットの脚の動きはヒト（生物）と見間違えるほどであり、存在感や気配さえ感じる。ヒトの脚（に見えるもの）が、自然な歩行をしている様子は、とても衝撃的で他に類がない。

(3) 上体付き受動歩行の研究の多くは数値シミュレーションだけで、実機実験はほとんど行われていない。本研究では、受動歩行ロボットにヒトの筋骨格系を模した受動的な上体機構を取り付けた。脚長は 0.9m、脚質量は 10kg である。また、上体は全長 0.6m、質量 2.8kg である。上体と大腿部は、前後から弾性帯（ウレタン）で連結されている。これらの弾性帯は、1 歩行周期前半では、遊脚の振り出し促進（前方弾性帯）、支持脚の前方移動の促進（後方）、後半では支持脚の前方移動の抑制（前方、上体は後傾）の効果がある。



図 3 上体を活用した高効率歩行

完全受動歩行（アシストを行っていない）の実験の様子を図 3 に示す。実験の結果、最低スロープ角度（連続歩行が可能な最低のスロープ角度）は、 $\gamma=2.3^\circ$ であった。ここで、

移動効率は $\varepsilon = \sin \gamma$ で計算できるので、 $\varepsilon = 0.04$ となる。ヒトの場合は一般的に $\varepsilon = 0.2$ と言われているので、受動歩行の効率の良さが際立っている。図3からわかるように、ほとんど平坦な歩行路であり、今後小さな関節トルクによる自律平地歩行が期待できる。

また、受動的なバネ-カムによる股関節バネ機構（腰トルク発生装置）を開発した。本機構は、バックドライブバリエーションを確保し、カム形状により任意のトルク特性が生成できる。なお、支持脚腰トルクや遊脚腰トルクが支持脚膝や遊脚膝の屈伸運動に及ぼす効果に注目し、膝折れやつまずきによる転倒の低減を図った。

さらに、本股関節バネ機構をユニットとして配置した歩行支援機を試作した。腰カフをヒトの骨盤に宛がい、テーパ状の脛カフをふくらはぎにフィットさせる。ここで、適切な腰トルクが作用すると、違和感なく遊脚膝の屈曲や脚の振り運動が促進することを実感できる。すなわち、親和性が高くヒトに近い歩容生成特性を有していることがわかった。

今後、上体のみならずフルボディにする場合や屋外移動の場合の知見を得るために実験を行った。実験では、運搬機能を持たせたアシスト受動歩行ロボットを用いた。実験の結果、500mm までの歩幅は確保できるため、この程度までの溝ならばまたぐことができる。また、100mm 程度の段差を乗り越えることができ、段差の間隔がある程度広ければ、連続して上り下りできる。さらに、草が生い茂る場所、砂利道、足がやや沈み込むような軟弱地面などでも歩行できることを確認した。また、20kg 程度の質量の付与が可能であり、上体を含めたフルボディ設計の知見が得られた。

(4) スピードを利用した身体の起こし回転運動の要素を導入することで、高速歩行を上回る高速走行を実現した。なお、高速での遊脚振り出し運動についても検討できた。

まず、理論的には、1脚受動歩行では、①着地姿勢が鉛直、②着地直前の足の水平速度はゼロ、という条件を満たすことで重心の水平速度を一定にすることができることを明らかにした。さらに、着地前後において、遊脚下腿部の角度が水平以下では遊脚大腿部の前方振り出しは減速、水平以上の状態では加速され、膝を曲げた状態では着地前後において遊脚下腿部の前方振り出しが加速されることを明らかにした。

実機実験では、独自開発した投射機によりロボットをトレッドミル上に投射し走行実験を行った。なお、走行運動を2次元平面に拘束するために、透明アクリルプレートを150mmの間隔で設置し、この間を走行ロボッ

トが走る。実験条件は、投射速度が約5km/h、トレッドミル速度が約6km/h、スロープ角度が10.6degである。図4に膝有り2脚走行の様子を示す。実験の結果、4歩の連続走行を達成した。時速10kmクラスの走行でインパクトがあり、ヒト走行に極めて近く世界にも類がない。

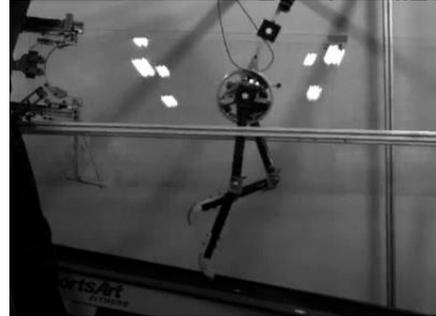


図4 高速移動(膝有り2脚走行)

開発ポイントを以下にまとめる。

① 腰部を外郭のみの構造とすることで軽量化を図り、着地による跳ね返りを大きくした。内部には、大腿部駆動用のサーボモータ、回路基板、バッテリーをコンパクトに納めた（パワード化）。

② 膝関節の伸展・屈曲側それぞれにダンパーを配置し、衝撃吸収・跳ね返りの抑制を行っている。さらに、摺動面に薄いゴムシート（受動抵抗）を使うことで角速度を抑えた。

③ 遊脚を鉛直に着地させるために、腰関節に一定トルクを与える簡単な運動制御を行った。

④ 上体は、軽量のアルミ支柱にウエイトを取り付けた簡易的なものである。走行中、約40degの前傾姿勢が維持された。

しかし、現状では歩数が数歩に留まっており、安定性・ロバスト性が低い。ただし、足付き起こし回転型1脚受動歩行ロボット（脚が回転するタイプ）では、最高45歩の連続受動歩行に成功している。したがって、足部において何らかの安定化原理が働いていると考えており、今後、さらに解析・実験を進めることで、安定性・ロバスト性の向上策が見出せると考えている。

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）

〔雑誌論文〕（計5件）

- ① K. Sajjapongse, A. Sano, Y. Ikemata, Y. Hayashi, S. Tamegai, and H. Fujimoto, Assist Level Walking of Passive Biped Walker with Upper Body and Ankle Spring Mechanisms, Proc. of the 13th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, 査

- 読有, 2010, pp.572-579.
- ② Y. Kato, Y. Ikemata, A. Sano, Y. Hayashi, and H. Fujimoto, A Basic Study for Passive Walking That Added Upper Body by Means of Spring Mechanism, Proc. of the 13th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, 査読有, 2010, pp.753-760.
 - ③ Y. Hiroma, Y. Ikemata, A. Sano, H. Miyamoto, and H. Fujimoto, An Experimental Study on Stabilization of Passive Running Based on Bouncing Rod Dynamics, Proc. of the 13th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, 査読有, 2010, pp.549-556.
 - ④ 佐野明人, 池俣吉人, 宮本裕貴, 丸山信太郎, 藤本英雄, 起こし回転型受動走行と平衡点解析, 日本機械学会論文集C編, 査読有, 76巻, 2010, pp.1763-1769
 - ⑤ H. Miyamoto, A. Sano, Y. Ikemata, S. Maruyama, and H. Fujimoto, A Study of Bouncing Rod Dynamics Aiming at Passive Running, Proc. of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 査読有, 2010, pp.3298-3303.

[学会発表] (計26件)

- ① 加藤良樹, 池俣吉人, 佐野明人, 上体付き受動歩行による高効率な歩行の実現, 第12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, 2011年12月23-25日, pp.1174-1175, 京都. 【優秀講演賞受賞】
- ② 佐野明人, 受動歩行ロボットと走行ロボットの開発, 第12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, 2011年12月23-25日, pp.1194-1195, 京都. 【基調講演】
- ③ 阿部晃大, 池俣吉人, 佐野明人, 坂口正道, 藤本英雄, ヒト歩行メカニズムに関する一仮説, 第12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, 2011年12月23-25日, pp.1789-1792, 京都.
- ④ 岩月和輝, 佐野明人, 受動歩行に基づく歩行支援機の開発, 第12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, 2011年12月23-25日, pp.509-510, 京都. 【優秀講演賞受賞】
- ⑤ 佐野明人, サッチャポングリッタナイ, 池俣吉人, 藤本英雄, 歩くアンドロイドの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2011年5月26-28日, 2A2-C10, 岡山. 【ベストプレゼンテーション表彰受賞】
- ⑥ 小島瑞貴, 佐野明人, 桑迫真広, 池俣吉人, 藤本英雄, 膝有り2脚走行機の運動制御に関する研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2011年5月26-28日, 2A2-Q06, 岡山.
- ⑦ 池俣吉人, 廣間靖典, 佐野明人, 宮本裕貴, 藤本英雄, 足を有する起こし回転型受動走行の実験的研究—内部粒子の流動と足の剛性に関する検討—, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2011年5月26-28日, 2A2-Q07, 岡山.
- ⑧ 宮本裕貴, 池俣吉人, 佐野明人, 桑迫真広, 藤本英雄, バウンシング・ロッド・ダイナミクスに基づく2脚受動走行の着地姿勢に関する解析, 第11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, 2010年12月23-25日, pp.719-720, 仙台.
- ⑨ 桑迫真広, 佐野明人, 宮本裕貴, 池俣吉人, 藤本英雄, バウンシング・ロッド・ダイナミクスに基づく2脚膝有り走行機の運動制御, 第11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, 2010年12月23-25日, pp.721-722, 仙台.
- ⑩ 恒川篤史, 佐野明人, 池俣吉人, 藤本英雄, 脚式運搬機による屋外および軟弱地面での2足歩行, 第28回日本ロボット学会学術講演会, 2010年9月22-24日, 2D1-1, 名古屋.
- ⑪ 宮本裕貴, 池俣吉人, 佐野明人, 廣間靖典, 藤本英雄, 起こし回転型受動走行の平衡点の局所安定化, 第28回日本ロボット学会学術講演会, 2010年9月22-24日, 3D1-4, 名古屋.
- ⑫ 佐野明人, 林祐史, サッチャポングリッタナイ, 松田諭, 池俣吉人, 藤本英雄, アシスト受動歩行によるマルチロール歩行機の開発(2)—上体および人間形外装—, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2010年6月13-16日, 1A2-A13, 旭川. 【ベストプレゼンテーション表彰受賞】
- ⑬ 廣間靖典, 池俣吉人, 佐野明人, 宮本裕貴, 藤本英雄, バウンシング・ロッド・ダイナミクスに基づく受動走行の安定化に関する実験的研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2010年6月13-16日, 2A2-E17, 旭川.
- ⑭ 加藤良樹, 池俣吉人, 佐野明人, 林祐史, 藤本英雄, バネ機構を用いて上体を付加した受動歩行, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2010年6月13-16日, 2A2-E25, 旭川.
- ⑮ 林祐史, 佐野明人, 池俣吉人, サッチャ

ポンクリッタナイ, 田部井聡, 藤本英雄, 上体を有する2脚受動歩行機のアシスト平地歩行, 第10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, 2009年12月24-26日, pp.1324-1326, 東京.

- ⑩ 高橋明宏, 佐野明人, 池俣吉人, 藤本英雄, 13時間の連続受動歩行の実現, 第10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, 2009年12月24-26日, pp.1327-1328, 東京.
- ⑪ 丸山信太郎, 佐野明人, 廣間靖典, 宮本裕貴, 池俣吉人, 藤本英雄, バウンディング・ロッド・ダイナミクスに基づく2脚受動歩行, 第10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, 2009年12月24-26日, pp.1329-1330, 東京.
- ⑫ A. Sano, New Paradigm and Deepening of Study on Robotics, International Conference on Mechatronics and Information Technology (ICMIT2009), 2009年12月3日, Gwangju, Korea. 【招待講演】

〔産業財産権〕

○出願状況 (計8件)

名称: 関節トルク発生装置

発明者: 佐野明人

権利者: 名古屋工業大学

種類: 特願

番号: 特願 2012-001104

出願年月日: 2012年1月6日

国内外の別: 国内

名称: 歩行支援機

発明者: 佐野明人, 池俣吉人, 藤本英雄

権利者: 名古屋工業大学

種類: 特願

番号: 特願 PCT/JP2011/061957

出願年月日: 2011年5月25日

国内外の別: 国内

名称: 足機構

発明者: 佐野明人, 池俣吉人, 藤本英雄

権利者: 名古屋工業大学

種類: 特願

番号: 特願 2011-064638

出願年月日: 2011年3月23日

国内外の別: 国内

名称: 2脚受動歩行機

発明者: 佐野明人, 池俣吉人, 藤本英雄

権利者: 名古屋工業大学

種類: 特願

番号: 特願 PCT/JP2010/072859

出願年月日: 2010年12月20日

国内外の別: 国内

〔その他〕

(1) 解説記事

- ① 佐野明人, 池俣吉人, 藤本英雄, 揺れるままに歩く, 日本機械学会誌 (メカライフ), 112巻, 2009, pp.730-731.

(2) ホームページ等

①

<http://drei.mech.nitech.ac.jp/~sano/>

②

http://drei.mech.nitech.ac.jp/~fujimoto/sano/walk_jpn.html

③

<http://www.youtube.com/user/BlueBiped/videos>

(3) 研究成果の発信等

JST 東海国立3大学新技術説明会 (東京), 第28回日本ロボット学会学術講演会一般公開イベント「陸・海・空 おもしろロボット大集合!」(名古屋), 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (神戸) などでロボットのデモンストレーション実績があり, 一般市民や企業研究者などから高い評価を得た. また, 日本経済新聞, 在京テレビ局 (NHK, 日本テレビ, TBS), 地方テレビ局 (中京テレビ) などで研究成果が紹介された. 海外では, 季刊誌「Wissenschaft & Forschung - Japan」に記事が掲載された. さらに, 公開中の動画の中には, 再生回数が42万回を超えるものもあり, Popular Science や WIRED の WEB サイトにリンクが張られ世界中で閲覧されている.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐野 明人 (SANO AKIHITO)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 80196295

(2) 研究分担者

藤本 英雄 (FUJIMOTO HIDEO)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・プロジェクト特任教授

研究者番号: 60024345

池俣 吉人 (IKEMATA YOSHITO)

帝京大学・機械・精密システム工学科・講師

研究者番号: 70467356

