

Title	摺動効果と身体形状の最適融合に基づく移動ロボットの 新機能創出
Author(s)	浅野, 文彦
Citation	科学研究費助成事業研究成果報告書: 1-6
Issue Date	2019-05-31
Type	Research Paper
Text version	publ isher
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/16037">http://hdl.handle.net/10119/16037</a>
Rights	
Description	基盤研究(C) (一般), 研究期間: 2016 ~ 2018, 課題番号: 16K06154, 研究者番号: 70415066, 研究分野: □ ロボティクス、制御工学

令和元年5月31日現在

機関番号：13302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06154

研究課題名(和文) 摺動効果と身体形状の最適融合に基づく移動ロボットの新機能創出

研究課題名(英文) Creation of Novel Functions for Locomotion Robots Based on Optimal Fusion of Sliding Effect and Body Shape

研究代表者

浅野 文彦 (Asano, Fumihiko)

北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・准教授

研究者番号：70415066

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：接地点の摺動と身体内部の揺動が生む間接励起の効果を利用した新しい匍匐型移動ロボット、および関連する劣駆動移動ロボットシステムの運動生成と制御に関して、主に以下の理論的研究成果を得た。ロボットの円弧状の本体フレーム内部に取り付けた揺動質量を高周波振動させることで、低摩擦な下り緩斜面あるいは水平面において安定な匍匐型前進運動を生成可能であることを数値シミュレーションと実機実験を通して示し、その基本的運動特性を明らかにした。また、身体形状の工夫や複数台の連結を通して、高速運動生成等の機能拡張が可能であることを示した。更には、匍匐型移動ロボットを駆動源とした新しい産業機械に関する基礎研究も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、劣駆動ロボットの身体表面と低摩擦路面との接点における摺動と身体内部の揺動が生む間接励起の効果を融合することで、悪路に屈しない安定で効率的な新しい移動形態を創出することを主な目的としたものである。運動解析に基づく身体形状や制御の改良を通して、高速で順応性に富む匍匐型前進運動生成が可能となることを理論と実機実験の両面から示し、粘弾性要素の追加や複数台の連結による機能拡張の考察も行った。並行して、低摩擦路面への適応を目指した脚移動ロボットの身体形状や制御方策に関する理論的研究も推進した。更には、匍匐型移動ロボットを駆動源とした新しい自動搬送装置の実現可能性に関する模索も行った。

研究成果の概要(英文)：We addressed the issues on motion generation and control design for crawling-like locomotion robots that utilize the effects of sliding at the ground-contact point and indirect excitation created by internal wobbling and some related underactuated robotic systems, and mainly obtained the following theoretical results. We showed that underactuated robots composed of a circular body frame and its internal wobbling mass can generate stable crawling-like forward motions on low-friction downhill or level surface through numerical simulations and experimental studies, and clarified the fundamental characteristics of the generated motions through motion analysis. In addition, we showed the possibility of functional expansion such as high-speed motion generation through devising the body shape and combining multiple robots. Furthermore, we conducted fundamental studies on industrial machines that utilizes the crawling-like locomotion robot as an actuator.

研究分野：ロボティクス、制御工学

キーワード：移動ロボット 運動生成 機械力学 ゼロダイナミクス 劣駆動システム 摺動 揺動

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

ロボットが滑り易い路面上で安定な移動を実現することは一般に困難であり、従来手法とは本質的に異なる新しい運動生成・制御方法の必要性が指摘されていた。先行研究において、円弧形状をした本体フレームに1自由度の揺動質量を付加し、その高周波振動が生む間接励起の効果を利用することで、安定な匍匐型前進運動生成が可能であることが示されていた。これは路面に対して駆動力を印加できない劣駆動移動ロボットの新しい移動形態の基礎となるものであると同時に、様々な機能の拡張性を秘めたものでもあった。重力下で揺動・摺動・回転・並進という運動が複雑に干渉し合うことで生み出される匍匐型前進運動の原理を数理的に解明し、最適化を行うことで、悪路に屈しないロボットシステムの移動制御技術が構築されるものと期待されていた。

また一方で、受動的摺動は自然な歩行運動を実現する上で本質的問題とならないこと、凸曲面状をした足部が生む力学効果が高摩擦路面上のリミットサイクル歩行の安定性向上に貢献し得ることが経験的に知られていた。上記の匍匐型運動生成原理の理解が深まることで、凍結路面に屈しない歩行制御技術や摺動のプラス1自由度が生む自然な歩行の新機能創出に関する理論研究も並行して推進できるものと期待されていた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、劣駆動移動ロボットの身体表面と床面等の環境との接触点における摺動現象の存在を認め、これを明確に定式化し、システム全体の運動へ及ぼす影響を理論的に解明すること、および摺動を認めることで生じるプラス1自由度を有効に利用した新しい移動機能を実現するための身体の形状や構造を創造することである。

以下、接触点に摺動は生じるが、これが収束するレベルの摩擦係数をもつ条件を「高摩擦」、収束せずに発散するレベルの摩擦係数をもつ条件を「低摩擦」と呼ぶ。まず円弧形状をした本体フレームを土いう複雑な運動生成機序の理解を深める。次に身体内部に高周波振動をする揺動質量を取り付け、その間接励起の効果を利用した匍匐型運動生成のための基礎理論を構築し、移動速度とエネルギー効率の観点からシステムの最適化を行う。初期段階では重力作用を利用して高摩擦な下り斜面を滑り降りるロボットを解析の対象とするが、最終的には高摩擦あるいは低摩擦な水平面上を高速かつ効率的に前進するロボットの実現を目指す。

上記に並行して、高摩擦路面上の脚移動ロボットの運動生成機序に関する以下の研究も推進する。受動歩行運動は制御入力が必要としない究極的に自然でリラックスした歩行形態であると捉えることができる。しかし近年の研究の進展により、高摩擦な下り斜面上では支持脚接地点における接線方向の拘束（滑らないという仮定）は必ずしも必要でなく、よりリラックスした滑りながらの受動歩行運動も実現可能であることが明らかにされた。上記の匍匐型運動生成機序の研究から得た知見を基に、半円形状をした足部（半円足）をもつ2脚歩行モデルを構築し、その足裏半径や摩擦係数等が歩行性能へ与える影響を数値シミュレーションにより詳細に解析する。これに対し、滑りながらの受動歩行が実現不可能なレベルの低摩擦路面上においては、支持脚接地点の摺動を回避するよう慎重に歩容生成を行う必要がある。この受動歩行の対極に位置付けられる慎重な歩行形態を「ステルス歩行」と呼ぶ。この歩容は前脚着地時の運動エネルギー損失をゼロにするよう脚リンクを優先して制御することで実現されるが、結果として上体リンクがゼロダイナミクスとして振舞うこととなり、システム全体の安定性を保証することが難しいという問題も発生する。特に摩擦係数がゼロである路面上では、床反力の水平方向成分をゼロに拘束する必要も生じるため、条件は更に厳しいものとなる。これらの困難を解消すべく、低自由度モデルを対象とした解析に取り組み、ステルス歩容生成理論の基盤構築を目指す。

上記の二つの課題を中心として、悪路に屈しない革新的な劣駆動ロボットの移動制御技術の基盤構築を行うとともに、その成果の産業応用を目指した研究も推進する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 低自由度モデルを用いた匍匐型前進運動の数値解析と実機検証

図1に示す円弧形状をした本体フレームとその内部に取り付けた揺動質量から構成される劣駆動ロボットの数学モデルを構築し、MaTX や MATLAB を用いた数値シミュレーションによる運動解析を通して、並進運動から回転運動へのエネルギー伝達等の基本的な推進機序やシステムパラメータに対する移動性能の変化傾向を明らかにする。揺動質量に関しては正弦波振動をする1リンクの振子状のものと、早戻りリンク機構により前後非対称な振動をするものを考え、主に前者は高摩擦な下り斜面上の、後者は高摩擦あるいは低摩擦な水平面上の運動生成を目的とする。力学特性が複雑で理解が進まない場合には、必要機能だけを備えた最小自由度をもつ単純化モデルの導入も行う。運動解析を通して得られた知見を基に試作実験機を開発し、理論的結果の妥当性を検証する。また、粘弾性要素の追加や複数台の連結等を通して得られる高効率化や移動機能拡張についても検討を行う。

#### (2) 高摩擦な下り斜面と低摩擦な水平面への適応を目指した脚移動ロボットの運動生成と制御

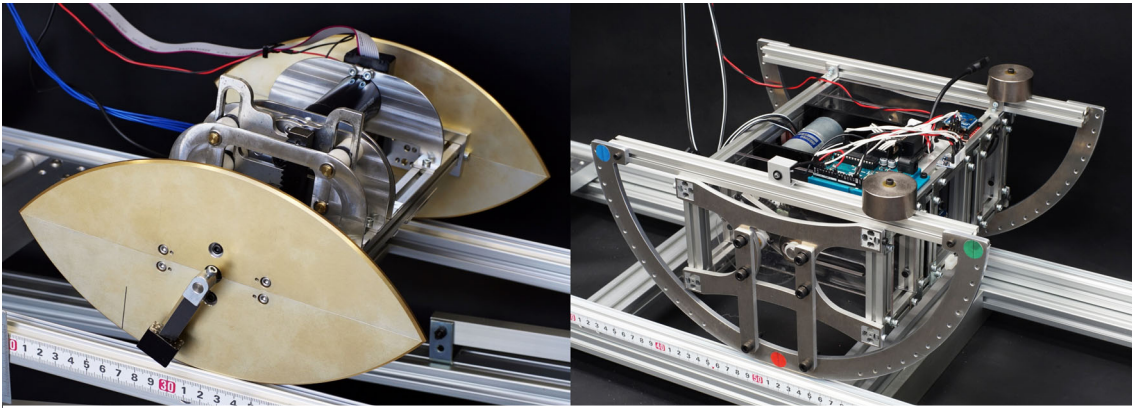


図 1：揺動と摺動を利用した匍匐型移動ロボット

(1)と同様の環境下における脚移動の安定性と高性能化について、以下に述べる方法で理論研究を推進する。まず滑り動摩擦力が衝突時にもインパルス的に作用する数学モデルを新たに構築し、これを反映したコンパス型 2 脚受動歩行の運動解析用シミュレータを開発する。ただし路面は、遊脚の着地直後にその接地点にグリップ効果が十分に作用する高摩擦なものとする。次に(1)の解析から得られた知見を基に円弧形状をした足部をもつ 2 脚モデルを構築し、足裏半径等の物理パラメータの変化に対する安定歩容生成可能領域の拡大傾向を解析する。また、揺動が生む引き込み効果が歩行の安定性に与える影響を検証すべく、脚リンクに高周波振動をする揺動質量を取り付けた 2 脚モデルを構築し、質量比や周波数に対する安定歩容生成可能領域の変化傾向を解析する。

上記に並行して、グリップ効果が期待できない低摩擦路面上における安定歩容生成に関する理論研究も推進する。まず足首関節に制御トルクを印加できない低自由度な歩行モデルを導入し、その脚リンクを優先的かつ厳密に制御することで前脚着地時の運動エネルギー損失をゼロにするステルス歩容を生成する。次に摩擦係数がゼロである路面上をも安定かつ高速に歩行するための厳密なステルス歩容生成法への拡張を目指して、必要な数学的条件を達成する制御系設計法を確立し、その有効性を数値シミュレーションを通して確認する。

#### (3) 匍匐型移動ロボットを駆動源とした平板物体の送り操作システム

匍匐型移動ロボットの身体を構成するフレームを受動回転関節を介して天井に固定することで、その前進運動生成を通して得られる推進力を本体フレームと床面の間に挟まれた平板物体の送り操作力へと変換することができる。(1)の研究を通して開発に成功した高速匍匐型移動ロボットに拘束を加えることでシステムを構成し、その基本的挙動を MaTX や MATLAB を用いた数値シミュレーションを通して解析する。

### 4. 研究成果

#### (1) 揺動と摺動を利用した匍匐型移動ロボットおよびその機能拡張

半円形状をした本体フレームに 1 自由度の揺動質量を取り付けたシンプルな匍匐型移動ロボットの数学モデルを考え、揺動の正弦波振動が生む間接励起と接地点における摺動の効果を利用することで、表面が高摩擦である下り斜面上で安定した前進運動生成が可能であることを数値シミュレーションにより確認した。このモデルを参考に図 1 左に示す実験機を設計開発し、その実機実験を通して数値解析結果の妥当性を確認した。次に水平面上の匍匐型前進運動生成を目指して、前後非対称な往復運動や楕円型軌道に追従する揺動質量を搭載した新しい匍匐型移動ロボットの数学モデルを導入し、数値シミュレーションにより低摩擦な水平面上で前進運動生成が可能であることを確認した。更に前後非対称な揺動を実現する早戻りリンク機構を本体内部に搭載した図 1 右に示す実験機を設計開発し、その実機実験を通して数値解析結果の妥当性を確認した。

上記の運動は、重力下で揺動・摺動・回転・並進の各運動が複雑に融合することで実現されるものであるため、前進における支配的ダイナミクスが何であるかを説明することが難しい。そこで本体の回転と摺動との直接的な関係を明らかにすることを目的として、半円形状をした本体フレーム内にリアクションホイールを取り付けた前後対称な 4 自由度モデルを新たに導入し、本体の絶対角度を正弦波の時間軌道に追従させることで得られる匍匐型運動の特性解析を行った。主に正弦波軌道の周波数とロボット全体の重心位置(本体フレーム最下点からの距離)を変数として設定し、これらを最適化することで移動速度が最大化すること、またこれらが増大することでほぼ単調に移動効率が上昇すること等を明らかにした。

前後非対称性を引き出す方策として、同じ形状と機構をもつロボット 2 台を連結させ、互いの揺動の方向と位相を差分が生じるよう適切に調整することで前進運動を生成する手法を提案した。その一方で、間接励起の効果を最大限に引き出すための揺動質量の取り付け位置について詳細な検討を行うとともに、身体を構成する基本フレームへの粘弾性要素の追加が更に効果を高めることを見出した。このロボットモデルは後述する(3)においても使用することとなった。

#### (2) 低摩擦路面上を安定に歩行する脚移動ロボットの運動生成と制御



匍匐型移動ロボットの運動生成と解析を通して得られた知見を基に、以下に述べる脚移動ロボットの研究を並行して推進した。第一に、半円足をもつ受動2脚歩行の安定性解析を行い、凸曲面状をした足部の滑りながら転がる運動が高摩擦路面上の歩行運動に優位な力学効果を与えることを示した。また衝突時にも摩擦力が作用する数学モデルを新たに構築し、従来のモデルの歩容との比較も行った。いずれの衝突モデルにおいても、衝突直後からの短時間にグリップ効果が作用することで残りの単脚支持期は滑らない受動歩行とほぼ等価な運動となり、結果的に安定歩容が生成されることを確認した。第二に、コンパス型ロボットの脚リンクに往復運動をする揺動質量を取り付け、これを高周波振動させることで、不安定化し易い高摩擦な下り斜面上の受動歩行運動を揺動の周波数へと引き込み、一定の歩行速度へ安定化できることを示した。第三に、連結型リムレスホイールの実験機を新規に設計開発し、その本体内部に取り付けた揺動質量を上下方向に高周波で振動させることで、引き込み効果による1周期の安定歩容生成が滑らない下り斜面上で可能となることを確認した。また、引き込み可能な領域を最大化する最適制御入力生成法に関して、位相応答曲線に基づく方策を提案し、数値シミュレーションを通してその有効性を確認した。現在、高摩擦路面への拡張について検討を進めている。

上記の研究を推進する一方で、低摩擦路面上の安定歩容生成に関する理論的研究も大きく進展した。動摩擦係数が極めて小さくグリップ効果が期待できない路面上では、支持脚接地点の摺動が歩容の安定化において大きな障害となるため、これを回避するよう運動生成を行う必要がある。その基礎研究として、支持脚と上体から構成される2自由度の劣駆動リムレスホイールのモデルの解析に取り組み、主に以下の結果を得た。支持脚角度を5次の時間関数へと追従させ、両脚支持期を含まないよう上体の初期状態を適切に設定することで、全体の重心速度の変化が十分に小さい、すなわち低摩擦路面上を安定に歩行できるステルス歩容が生成されることを明らかにした。より厳密に、摩擦係数がゼロである路面上をも安定に歩行するための条件は、床反力の水平方向成分をゼロに保つことであり、これは単脚・両脚支持期ともに支持脚接地点まわりの全角運動量の時間による3階微分をゼロに拘束する（全体の重心速度を一定値に拘束する）ことと等価である。この条件を満たす制御入力は数学的に定式化できるが、適切な初期状態を解析的に求めることは不可能であり、二分法等の数値探索が必要となる。まず基礎的な二分探索により目標初期状態を数値的に求め、角運動量拘束制御を適用することで厳密なステルス歩容生成が可能となることを確認した。次に運動の近似線形化を通して、支持脚運動の近似解析解が3次の時間関数となることを示し、この軌道への追従制御を行うことで最大静止摩擦係数が0.06程度の低摩擦路面であれば安定な歩行運動を実現できることを示した。また、遊脚や半円足をもつモデルへの拡張に関する基礎的検討も行った。

### (3) 匍匐型運動生成原理を応用した産業機械に関する基礎研究

匍匐型移動ロボットの徹底した運動解析を推進する過程で、製造業者から自動搬送装置に関する技術相談を受ける機会に恵まれた。議論を通して、匍匐型移動ロボットを駆動源として利用することで、革新的な物体搬送システムを実現できるのではという着想を得た。具体的には、ロボットの身体フレームを受動回転関節を通して天井へ固定させ揺動質量を高周波振動させることで本体の往復運動を生成し、接触点の摺動を利用して床面に敷かれた板状の搬送物体を移動させるというものである。基礎的な数学モデルを用いた数値シミュレーションを通して有効性を確認した。現在、理論検証用の実験システム(図2)の設計開発段階へと進んでいる。

## 5. 主な発表論文等

学会発表論文については主要な査読付き国際会議論文を中心に列挙した。査読のない国内会議論文については、本研究計画の内容に関連性が深く、国際会議において未発表のものを列挙した。

[雑誌論文] (計5件)

- [1] Longchuan Li, Isao Tokuda and Fumihiko Asano, “Nonlinear analysis of an indirectly controlled limit cycle walker,” *Artificial Life and Robotics*, Vol. 23, Iss. 4, pp. 508-514, 2018. (査読あり)
- [2] Fumihiko Asano and Yanqiu Zheng, “High-speed and energy-efficient collisionless

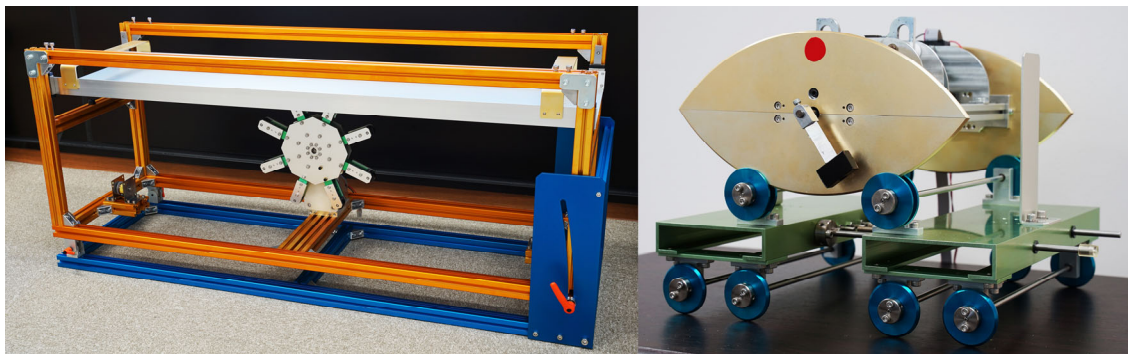


図2：移動ロボットを駆動源とした物体搬送システムを構成する各種装置

- walking of underactuated rimless wheel,” *Artificial Life and Robotics*, Vol. 23, Iss. 4, pp. 523-531, 2018. (査読あり)
- [3] Fumihiko Asano, “Stealth walking with reduced double-limb support phase and its extension to careful legged locomotion,” *Multibody System Dynamics*, Vol. 44, Iss. 4, pp. 421-447, 2018. (査読あり)
- [4] Fumihiko Asano, Yanqiu Zheng and Xuan Xiao, “Time-scale control approaches to collisionless walking of an underactuated rimless wheel,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 29, No. 3, pp. 471-479, 2017. (査読あり)
- [5] Fumihiko Asano and Yuji Harata, “Sliding passive dynamic walking of compass-like biped robot: Collision modeling, necessary conditions, and complexity,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 29, No. 3, pp. 509-519, 2017. (査読あり)

[学会発表] (計 57 件)

- [1] Fumihiko Asano and Longchuan Li, “An application of crawling-like locomotion robot to paper feeding,” accepted as MECHATRONICS Short Paper for presentation at Joint Mechatronics 2019 & NolCoS 2019. (査読あり)
- [2] Fumihiko Asano and Seiya Kobayashi, “Generation of strict stealth walking gait using upper body and reaction wheel,” accepted as NOLCOS Full Paper for presentation at Joint Mechatronics 2019 & NolCoS 2019. (査読あり)
- [3] 李龍川, 郭琳, 浅野文彦, “匍匐型高速移動ロボットとその給紙操作システムへの応用”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019 にて発表予定. (査読なし)
- [4] Fumihiko Asano, “Generation of stealth walking gait on low-friction road surface,” *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 8464-8469, 2019. (査読あり)
- [5] Masatsugu Nishihara and Fumihiko Asano, “Experimental verification of underactuated sliding locomotion robot with quick return linkage,” *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 1359-1364, 2018. (査読あり)
- [6] 李龍川, 浅野文彦, 徳田功, 顔聡, “支持脚接地点の滑り接触を考慮した 2 脚受動歩行の脚部揺動による安定化”, 第 19 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論文集, 1A4-04, pp. 157-161, 2018. (査読なし)
- [7] 李龍川, 顔聡, 徳田功, 浅野文彦, “引き込み現象を利用した準受動歩行の安定化に関する実験的検証”, 第 19 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論文集, 1A4-05, pp. 162-165, 2018. (査読なし)
- [8] Fumihiko Asano, “High-speed stealth walking of underactuated biped utilizing effects of upper-body control and semicircular feet,” *Proceedings of the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4375-4380, 2018. (査読あり)
- [9] Longchuan Li, Isao Tokuda and Fumihiko Asano, “Optimal input waveform for an indirectly controlled limit cycle walker,” *Proceedings of the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 7454-7459, 2018. (査読あり)
- [10] Longchuan Li, Fumihiko Asano and Isao Tokuda, “Nonlinear analysis of an indirectly controlled sliding locomotion robot,” *Proceedings of the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 8221-8226, 2018. (査読あり)
- [11] Longchuan Li and Fumihiko Asano, “Motion generation of a worm-like robot via asymmetric wobbling effect”, 平成 30 年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集, H-1, 2018. (査読なし)
- [12] 西原正継, 浅野文彦, “低摩擦路面における摺動を利用した劣駆動移動ロボットの推進力と重心位置の関係に関する基礎的考察”, 平成 30 年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集, H-2, 2018. (査読なし)
- [13] Fumihiko Asano, “Non-powered stealth walking approach to generation of passive dynamic gait on horizontal plane,” *Proceedings of the 12th IFAC Symposium on Robot Control*, 002, 2018. (査読あり)
- [14] Fumihiko Asano, Kota Matsuura, Seiya Kobayashi and Yasunori Kikuchi, “Motion generation and analysis of high-speed stealth walking on stairs,” *Proceedings of the 12th IFAC Symposium on Robot Control*, 046, 2018. (査読あり)
- [15] Seiya Kobayashi, Masatsugu Nishihara and Fumihiko Asano, “Effect of body rotation on sliding motion of an underactuated locomotion robot utilizing reaction wheel,” *Proceedings of the 12th IFAC Symposium on Robot Control*, 111, 2018. (査読あり)
- [16] Longchuan Li, Fumihiko Asano and Isao Tokuda, “High-speed and energy-efficient locomotion of a seed-like underactuated robot on level surface by utilizing

- asymmetric wobbling effects,” Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1014-1019, 2017. (査読あり)
- [17] Taiki Seino, Masatsugu Nishihara, Fumihiko Asano and Isao Tokuda, “Development and experimental verification of underactuated locomotion robot utilizing effects of sliding and wobbling,” Proceedings of the SWARM2017: The 2nd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-inspired Robotics, pp. 25-28, Oct. 30, 2017.
- [18] Yanqiu Zheng and Fumihiko Asano, “Toward collisionless walking without including period of double-limb support,” Proceedings of the SWARM2017: The 2nd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-inspired Robotics, pp. 29-32, 2017. (査読あり)
- [19] Longchuan Li, Isao Tokuda and Fumihiko Asano, “Nonlinear analysis of combined rimless wheel entrained to active wobbling motion,” Proceedings of the SWARM2017: The 2nd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-inspired Robotics, pp. 33-36, 2017. (査読あり)
- [20] Fumihiko Asano, “High-speed collisionless walking of underactuated rimless wheel,” Proceedings of the SWARM2017: The 2nd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-inspired Robotics, pp. 49-52, 2017. (査読あり)
- [21] Fumihiko Asano, Yasunori Kikuchi and Xuan Xiao, “Control of underactuated rimless wheel that walks on steep slope,” Proceedings of the 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 335-340, 2017. (査読あり)
- [22] Fumihiko Asano, “Stealth walking of 3-link planar underactuated biped,” Proceedings of the 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4118-4124, 2017. (査読あり)
- [23] Fumihiko Asano and Yuji Harata, “Modeling and analysis of sliding passive dynamic walking with semicircular feet considering impulsive frictional effect,” Proceedings of the 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 5270-5276, 2017. (査読あり)
- [24] Masatsugu Nishihara, Longchuan Li, Omran Hindawi, Zhen Yang and Fumihiko Asano, “Motion analysis of crawling-like gait for underactuated locomotion robot utilizing 2-DOF wobbling effect on slippery level surface,” Proceedings of the SICE Annual Conference 2017, pp. 837-842, 2017. (査読あり)
- [25] 西原正継, 李龍川, ヒンダーウィオムラン, 浅野文彦, “2自由度の揺動効果を利用した劣駆動移動ロボットの水平面上の前進運動生成”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 講演論文集, pp. 2P2-H01(1)-2P2-H01(4), 2017. (査読なし)
- [26] Masatsugu Nishihara, Taiki Seino and Fumihiko Asano, “Motion analysis of underactuated locomotion robot with quick return linkages on slippery level surface,” Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 1663-1668, 2017. (査読あり)
- [27] Yasunori Kikuchi and Fumihiko Asano, “Underactuated bipedal walker traveling steep downhill with bending stance knee,” Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1820-1825, 2016. (査読あり)
- [28] Fumihiko Asano, Ryosuke Nakamura, Mingyang Wu, Taiki Seino and Yanqiu Zheng, “Modeling and control of underactuated rimless wheel for walking over quagmire,” Proceedings of the 2016 Australian Control Conference, pp. 364-369, 2016. (査読あり)

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：徳田 功  
 ローマ字氏名：Isao Tokuda  
 所属研究機関名：立命館大学  
 部局名：理工学部機械工学科  
 職名：教授  
 研究者番号（8桁）：00261389

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。