

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：13302

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560542

研究課題名(和文)可変力学拘束を持つ周期運動系としての次世代歩行制御理論の基盤構築

研究課題名(英文)Next Generation of Control Method for Legged Locomotion as Periodic Motion with Variable Mechanical Constraints

研究代表者

浅野 文彦 (Asano, Fumihiko)

北陸先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：70415066

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：脚式ロボットのリミットサイクルを規範とした歩行運動の解析法に関して、主に以下の理論的研究成果を得た。運動の線形近似と力学的エネルギーの2次近似を用いることで、衝突姿勢拘束を達成するリミットサイクル型歩行における状態誤差遷移関数の完全解析解の導出法を考案した。また、この解に基づく動的歩容の安定性と収束性の解析理論を構築し、数値積分を行うことなく生成される歩行運動のハイブリッド・ゼロダイナミクス振舞いを瞬時に知ることを可能にした。更に理論に基づく歩行解析を通して、システムパラメータに伴う収束特性の変化傾向や立脚相と衝突相の安定性の関係などを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We achieved the following results through theoretical investigations of motion analysis method for limit cycle walking of legged locomotion robots. We devised a method for deriving fully-analytical solutions of the state error in limit cycle walking that achieves constraint on impact posture by using linearization of motion and quadratic approximation of mechanical energy. We then developed an analysis method for the stability and convergence property in limit cycle walking, and the result obtained made it possible to determine the behavior of hybrid zero dynamics in no time without conducting numerical simulations. Furthermore, we clarified the change tendency of convergence property with system parameters and the relationship between the stabilities of the stance and collision phases through gait analysis based on the proposed method.

研究分野：ロボティクス、制御工学

キーワード：歩行ロボット 安定性 歩容生成 動的システム理論 機械力学 運動制御 ゼロダイナミクス 劣駆動システム

## 1. 研究開始当初の背景

脚式ロボットの自然で高効率な歩行運動を実現する有力な手法として、リミットサイクルを規範とした歩容生成法が注目されている。先行研究において、単脚支持期（立脚相）に一定の出力追従制御を繰り返すことで、状態のジャンプを含む閉軌道として定式化される漸近安定歩容を生成できることが知られていた。しかしながら、非線形ハイブリッドダイナミカルシステムとしての複雑さから、生成される歩容に内在する安定原理については十分な理解がなされておらず、安定歩容生成法の確立へ向けた理論研究の進捗は停滞していた。

ポアンカレ写像に基づく歩容の安定性解析法については幾つかの提案がなされていたが、いずれも数値シミュレーションによる定常歩容パラメータの計算を必要とするものであったため、安定性判別には膨大な時間を有していた。この困難を克服することができれば、リミットサイクル規範の歩容生成理論構築が大きく前進するものと期待されていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、リミットサイクルを規範とした脚式ロボットの歩容生成と運動制御に関連する解析理論の構築を目的として、主に以下の問題に取り組む。

厳密な出力追従制御により駆動され衝突姿勢拘束を達成する脚式ロボットの劣駆動歩行運動の安定性は、ハイブリッド・ゼロダイナミクスに等しいことが示されている。本研究では、運動方程式の線形近似を中心とした数学的手法を組み合わせることで、立脚相における状態誤差遷移関数の完全解析解の導出法を考案し、数値シミュレーションを行う（定常歩容パラメータを数値的に求める）ことなく瞬時に歩容の安定性判別を行うための理論の構築を第一の目的とする。また、1回の支持脚交換の衝突で定常歩容に復帰可能な有限整定歩容の生成条件を導出し、その力学的意味を理解することで高収束歩容の設計論の構築も目指す。更には、運動方程式の線形近似が困難な直動関節をもつ脚式ロボットの劣駆動歩行運動、瞬間的でない両脚支持状態を含む歩行運動、床面との滑り接触（接地点の並進運動）を伴う歩行運動についても、構築された解析理論に部分的に数値積分を併用することで、その安定性に関する基礎的考察を行う。以上の理論研究に平行して、理論検証用実験システムの設計開発にも取り組む。

## 3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、主に以下の三つの課題を中心に推進する。

(1) 数値積分に依存しない劣駆動歩行系の安定性解析に関する理論研究  
衝突姿勢拘束を達成する劣駆動歩行運動で

は、衝突相の状態誤差遷移関数の値は一定であるため、歩容の収束特性は立脚相における出力追従制御のみに応じて変化する。このため、歩容の特性解析には立脚相における状態誤差遷移関数の解析解が必須となる。本研究では次の方法を用いてその導出を試みる。まず線形近似されたロボットのダイナミクス（線形化モデル）に対して出力追従制御系を設計し、制御入力を含むゼロダイナミクス（支持脚の運動）の状態空間表現を求める。これを用いて状態誤差遷移関数行列を導出し低次元化することで、立脚相の状態誤差遷移関数（衝突直後の支持脚の角速度誤差から次の衝突直前のそれへの遷移関数）の半解析解を導出する。次に、線形化モデルに対応した力学的エネルギーを導入することで、導出された解の力学的意味を考察する。得られた知見を踏まえ更に検討を進め、最終的に完全解析解として定式化を行う。

## (2) 高収束な歩行制御系設計論の構築

衝突姿勢拘束を達成する安定な劣駆動歩行系の離散的振舞いは、振動的でなく漸近安定、有限整定、振動的で漸近安定の三通りの収束特性を示す。このうち有限整定は収束速度の意味で最適解であると同時に、歩行制御系設計を行う上で指標となる重要な条件でもある。本研究では有限整定を達成する数学的条件を明らかにするために、リムレスホイールを中心とした比較的low自由度な歩行系を解析の対象として、制御入力の大さや印加期間が収束速度に如何なる影響を与えるかについて、理論と数値シミュレーションの両面から考察を行う。有限整定条件は数学的には3.(1)において述べた立脚相の状態誤差遷移関数がゼロに等しい条件として定式化される。まず **Mathematica** を用いてこの条件式と制御パラメータによるその導関数を導出する。次に得られた関数の力学的意味を考察し、設計指針の基盤を構築する。

## (3) 理論検証用実験システムの設計開発

上記(1)(2)の理論的研究成果の実験的検証を目的として、リムレスホイールを用いた比較的low自由度な実験システムの設計開発を行う。研究代表者が中心となって基礎設計を行い、必要に応じて改良を加える。

## 4. 研究成果

## (1) 数値積分に依存しない劣駆動歩行系の安定性解析理論の基盤構築

リミットサイクルを規範とし衝突姿勢拘束を達成する劣駆動歩行系を解析の対象として理論研究を推進し、3.(1)で述べた方法を更に拡張させ、最終的に以下の結果を得た。一定の出力追従制御に基づき常に同じ姿勢で1自由度の剛体として倒れ込む劣駆動歩行系の離散的振舞いは、衝突直前の運動エネルギーの漸化式として定式化することができる。この式に含まれる回復エネルギーが立脚相の制御に応じた変数として残るため、歩容の特性解析が困難なものとなっていた。本

研究ではこの問題を次の方法で解決した。まず運動の線形近似と力学的エネルギーの2次近似を併用することで、回復エネルギーの近似解析解を導出する手法を新たに考案した。次に衝突直前の運動エネルギーの漸化式を整理することで、立脚相と衝突相の状態誤差遷移関数の完全解析解が導出可能であること、両者の間には数学的に明快な関係が成り立つことを示した。以上の結果より、数値シミュレーションを行うことなくハイブリッド・ゼロダイナミクス、すなわち歩行運動全体の安定性を判別する理論的手法の確立に成功した。また、この結果を応用することで、定常歩行周期の導出法、目標歩行速度制御系設計法、整地でない路面を歩行する際の状態誤差遷移関数の導出法の構築にも成功した。

定常歩容への収束速度を性能指標として、その最適条件（1回の支持脚交換の衝突で状態誤差がゼロに整定する条件）を達成する有限整定歩容に関する考察も行った。定性的性質として、目標整定時間の増大に対して歩容の収束特性が、振動的でなく漸近安定→有限整定→振動的で漸近安定と移行することを確認した。また、有限整定歩容の生成条件は力学的には立脚中期に現れるポテンシャル・バリアを辛うじて突破する条件と等価であること、支持脚接地点回りの加速効果が収束速度を悪化させ減速効果はその逆の効果をもつことなどの数学的事実を明らかにした。

### (2) 数値積分を併用した直動関節をもつ歩行系の安定性解析理論の構築

上記(1)の研究に平行して、解析的取り扱いが困難な歩行系、特に直動関節をもつ歩行系についても理論的研究を推進し、主に以下の結果を得た。

直動脚をもつ歩行系の線形化運動方程式は線形時変システムとなるため、近似的に求めた遷移行列を用いて状態誤差の遷移を計算することで直動関節をもつ歩行系に対する歩容の安定性を判別する理論的方法を確立した。また、直動脚をもつリムレスホイールの歩行運動においても、(1)と同様に目標整定時間の増大に対して歩容の収束特性が振動的でなく漸近安定→有限整定→振動的で漸近安定と移行することを確認した。更に同じ歩行モデルを対象として、脚の伸張制御による回復エネルギーと着地時の衝撃による損失エネルギーとの平衡関係に基づく数値積分に依存しない近似安定性解析方法を確立した。

### (3) 基礎実験結果に基づく歩行安定性の考察と新しい実験システムの設計開発

上記(1)(2)の理論的成果の実験的検証を進める過程で、数値シミュレーション結果と実験データとの間に現れる無視できないレベルのギャップが観測されたことを受け、身体フレームが生成する微振動の影響がその要因であるという仮説の下に新たな検証を開始した。まず揺動質量をもつ連結型リムレスホ

イールの数学モデルを用いて、胴体フレームが生成する支配的な微振動のダイナミクスを再現し、数値シミュレーションを通してこれが歩容に与える影響を考察し、周期倍分岐やヒステリシスなどの非線形現象が現れることを確認した。また、ロボットと環境のダイナミクスの支配関係を明確化した実験を行うために、高剛性なりムレスホイールを用いた歩行データ計測システム（図1参照）および劣駆動リムレスホイール（図2参照）の設計開発を行った。

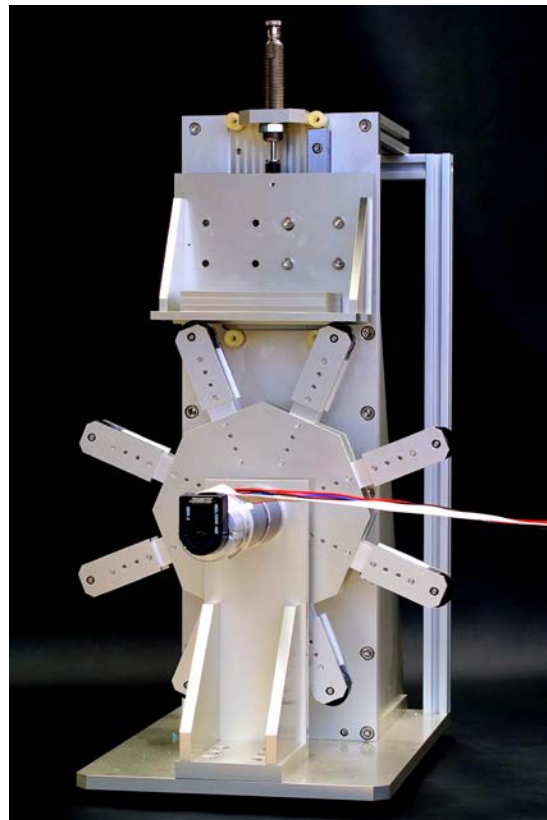


図1：歩行データ計測システム

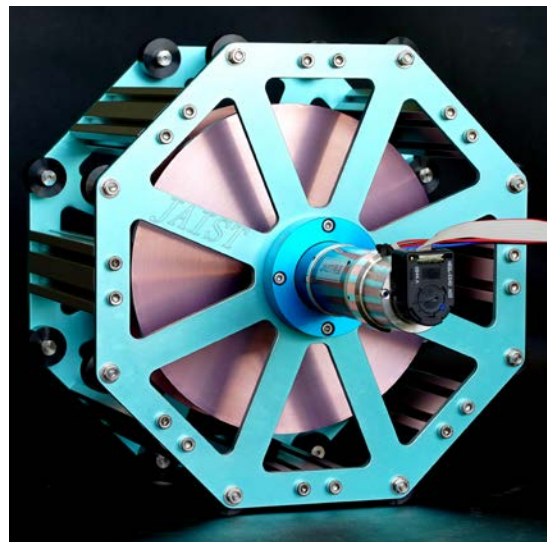


図2：劣駆動リムレスホイール

#### (4) 滑り接触を伴う受動・劣駆動歩行系に関する基礎的考察

上記(3)の考察を進める過程で、微振動を生む要因として遊脚の床面との衝突時に発生する接地点の滑り現象にも着目し、その基礎的検討を行った。リムレスホイールおよびコンパス型 2 脚ロボットを解析の対象として、接地点の滑り接触を考慮したこれらの数学モデルを導出し、数値シミュレーションを通して路面が凍結した下り斜面上においても安定な受動歩行運動が生成されることを確認した。この結果は、受動歩行には脚の振り運動だけでなく支持脚接地点に関する自己安定化機能(グリップ効果)も内在すること、より高自由度な(少ない力学拘束条件下で発現する)受動歩行運動が存在することなどを示唆するものである。現在、接地点の滑り接触を伴う受動歩行運動を中心として、成立条件を緩和した新しいリミットサイクル型動歩行(安定な歩行運動を実現する最低条件)に関する研究を展開している。

#### (5) ゼロダイナミクスの特徴を利用した劣駆動歩容生成法の提案

上記(1)(2)の理論研究成果は、次の支持脚交換までに衝突姿勢拘束を確実に達成すること、すなわち一步ごとに变化する歩行周期よりも目標整定時間が常に短いこと(整定条件の達成)を前提とするものであった。このため、試行錯誤に基づく目標整定時間の調節が歩行制御系設計における主要な作業負荷となっていた。以上の理由から、確実に整定条件を達成する歩容生成法の要求が生じ、次の手法の提案に至った。

一般にリミットサイクルを規範とした足首関節トルクを用いない劣駆動歩行運動において、ゼロダイナミクスである支持脚の運動は単調な変化を示すことが知られている。具体的には、支持脚の角速度は常に正であり、角度は時間軸に対して単調に増大するという特性である。これに着目し本研究では、支持脚の絶対角度を仮想時間変数として入出力線形化を行い状態空間表現を求めることで、支持脚角度が任意の値に到達する瞬間に衝突姿勢拘束を達成する手法を構築した。理論的検証を通して、配位空間上で原点对称となる軌道に沿って歩容を生成する場合には身体形状の前後非対称性が必要となること、劣駆動リムレスホイールのように慣性行列が定数となる歩行モデルでは回復エネルギーが一定となり歩容の漸近安定性が保証されることなどの結果を得た。また、これらの理論的結果の妥当性を数値シミュレーションにより確認した。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① Fumihiko Asano, Fully analytical solution to discrete behavior of hybrid zero dynamics in limit cycle walking

with constraint on impact posture, *Multibody System Dynamics*, reviewed, published as an online first view article, 2015  
doi:10.1007/s11044-014-9445-4

- ② Fumihiko Asano, Stability analysis of underactuated compass gait based on linearization of motion, *Multibody System Dynamics*, reviewed, Vol. 33, Iss. 1, 2015, pp. 93-111
- ③ Fumihiko Asano, Yasunori Kikuchi and Masahiro Shibata, Modeling, control and analysis of limit cycle walking on slippery road surface, *International Journal of Dynamics and Control*, reviewed, Vol. 2, Iss. 4, 2014, pp. 463-473
- ④ Yuji Harata, Koji Iwano, Fumihiko Asano and Takashi Ikeda, Efficiency analysis of two-period asymmetric gaits, *International Journal of Dynamics and Control*, reviewed, Vol. 2, Iss. 3, 2014, pp. 304-313
- ⑤ 浅野文彦, 衝突姿勢拘束をもつリミットサイクル型動歩行の安定性解析、計測自動制御学会論文集、査読有、50 巻、7 号、2014、pp. 509-517
- ⑥ Fumihiko Asano and Junji Kawamoto, Modeling and analysis of passive viscoelastic-legged rimless wheel that generates measurable period of double-limb support, *Multibody System Dynamics*, reviewed, Vol. 31, Iss. 2, 2014, pp. 111-126
- ⑦ 浅野文彦, 受動・能動 Rimless Wheel の動的歩容に内在する安定原理とその有限整定歩容生成への応用、日本ロボット学会誌、査読有、31 巻、4 号、2013、pp. 435-445

[学会発表] (計 35 件)

- ① Fumihiko Asano, A novel generation method for underactuated bipedal gait with landing position control of swing leg based on property of zero dynamics, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 9, 2015, Busan, Korea (発表確定)
- ② Fumihiko Asano, Stability analysis of limit cycle walking in traversing steps based on semianalytical solution of transition function of state error, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 9, 2015, Busan, Korea (発表確定)
- ③ Xuan Xiao and Fumihiko Asano, Analytical solution of target steady walking speed in 1-DOF limit cycle walking, IEEE International Conference of Robotics and Automation, May 29, 2015, Seattle, USA

- ④ 浅野文彦、坂利昭、藤本哲朗、床面との滑り接触を考慮した 2 脚ロボットの受動歩行解析、ロボティクス・メカトロニクス講演会、2015 年 5 月 19 日、京都市歓業館(京都市)
- ⑤ 原田祐志、加藤洋太朗、浅野文彦、池田隆、脚式歩行における線形時変系に対する安定解析、ロボティクス・メカトロニクス講演会、2015 年 5 月 19 日、京都市歓業館(京都市)
- ⑥ 浅野文彦、肖軒、板本拓也、徳田功、平面正八角形構造をした劣駆動歩行ロボットの開発と基礎実験、ロボティクス・メカトロニクス講演会、2015 年 5 月 19 日、京都市歓業館(京都市)
- ⑦ 浅野文彦、肖軒、福田豪、徳田功、リミットサイクル型動歩行のデータ計測システムの開発と基礎実験、ロボティクス・メカトロニクス講演会、2015 年 5 月 19 日、京都市歓業館(京都市)
- ⑧ 浅野文彦、目標整定時間の調節に依存しない劣駆動リムレスホイールの漸近安定歩容生成、ロボティクス・メカトロニクス講演会、2015 年 5 月 19 日、京都市歓業館(京都市)
- ⑨ 加藤洋太朗、原田祐志、浅野文彦、池田隆、直動脚をもつコンパス型 2 脚歩行ロボットの安定解析、第 15 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、2014 年 12 月 17 日、東京ビッグサイト(東京都江東区)
- ⑩ 浅野文彦、菊地保公、リミットサイクル型動歩行における段差踏破時の運動特性解析、第 15 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、2014 年 12 月 16 日、東京ビッグサイト(東京都江東区)
- ⑪ 浅野文彦、随意運動としての劣駆動 2 脚歩容生成について、第 15 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、2014 年 12 月 16 日、東京ビッグサイト(東京都江東区)
- ⑫ 浅野文彦、劣駆動 2 脚動歩行における対称軌道生成と脚フレームの形状変化に基づく軌道追従速度の調節、第 32 回日本ロボット学会学術講演会、2014 年 9 月 4 日、九州産業大学(福岡県福岡市)
- ⑬ Xuan Xiao, Yasunori Kikuchi, Fumihiko Asano and Tetsuro Fujimoto, Limit cycle walking of underactuated bipedal humanoid on slippery road surface, the 14th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Nov. 20, 2014, Madrid, Spain
- ⑭ Xuan Xiao and Fumihiko Asano, Approximate solution of steady step period in one-period limit cycle walking based on discretization of control input, the 11th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, Nov. 14, 2014, Kuala Lumpur, Malaysia
- ⑮ Fumihiko Asano, Isao Tokuda and Yukihiro Akutsu, Analysis of wobbling mass as shock-absorber in limit cycle walking and its application to micro vibration modeling, the 11th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, Nov. 13, 2014, Kuala Lumpur, Malaysia
- ⑯ Xuan Xiao and Fumihiko Asano, Analytical solution of steady step period in 1-dof limit cycle walking driven by stepwise control inputs, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Aug. 4, 2014, Tianjin, China
- ⑰ Fumihiko Asano, Stability analysis method independent of numerical integration for limit cycle walking with constraint on impact posture, IEEE International Conference on Robotics and Automation, June 4, 2014, Hong Kong, China
- ⑱ 浅野文彦、米谷尚洋、寺田夕貴、上島駿平、中村勇貴、滑り接触を考慮した劣駆動リムレスホイールのスキップ歩容生成、ロボティクス・メカトロニクス講演会、2014 年 5 月 27 日、富山市総合体育館(富山県富山市)
- ⑲ 浅野文彦、菊地保公、膝関節を有する劣駆動 2 脚歩容の収束特性解析、ロボティクス・メカトロニクス講演会、2014 年 5 月 27 日、富山市総合体育館(富山県富山市)
- ⑳ 原田祐志、浅野文彦、池田隆、直動脚をもつリムレスホイールの安定解析、第 14 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、2013 年 12 月 20 日、神戸国際会議場(兵庫県神戸市)
- ㉑ 浅野文彦、数値積分に依存しないリミットサイクル型動歩行の安定性解析法、第 14 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、2013 年 12 月 18 日、神戸国際会議場(兵庫県神戸市)
- ㉒ Fumihiko Asano, Yasunori Kikuchi and Masahiro Shibata, Limit cycle walking on ice, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nov. 5, 2013, Tokyo Big Sight, Tokyo, Japan
- ㉓ Fumihiko Asano, Analytical solution to transition function of state error in 1-dof semi-passive dynamic walking, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nov. 5, 2013, Tokyo Big Sight, Tokyo, Japan
- ㉔ 浅野文彦、阿久津行裕、徳田功、リミットサイクル型動歩行における揺動質量の衝撃緩和効果、第 31 回日本ロボット学会学術講演会、2013 年 9 月 5 日、首都大学東

- 京（東京都八王子市）
- 25 浅野文彦、衝突姿勢拘束を持つリミットサイクル型動歩行の安定性解析、第31回日本ロボット学会学術講演会、2013年9月5日、首都大学東京（東京都八王子市）
  - 26 Fumihiko Asano and Xuan Xiao, Role of deceleration effect in efficient and fast convergent gait generation, IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 9, 2013, Karlsruhe, Germany
  - 27 Masataka Ohshima and Fumihiko Asano, Underactuated bipedal walking with knees that generates measurable period of double-limb support, IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 9, 2013, Karlsruhe, Germany
  - 28 原田祐志、岩野宏治、浅野文彦、池田隆、周期段差を用いた受動歩行における分岐現象、ロボティクス・メカトロニクス講演会、2013年5月24日、つくば国際会議場（茨城県つくば市）
  - 29 大島正嵩、浅野文彦、膝関節を持つ劣駆動2脚歩容における両脚支持状態の発現と転倒メカニズムに関する考察、第13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、2012年12月18日、福岡国際会議場（福岡県福岡市）
  - 30 浅野文彦、高速、高効率、かつ高収束な動的歩容生成の実現可能性について、第13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、2012年12月18日、福岡国際会議場（福岡県福岡市）
  - 31 Fumihiko Asano and Xuan Xiao, Output deadbeat control approaches to fast convergent gait generation of underactuated spoked walker, IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Dec. 16, 2012, Kyushu University, Fukuoka, Japan
  - 32 Yuji Harata and Fumihiko Asano, Asymptotically stable and deadbeat gait generation of four-linked bipedal walker by adjustment control of heel strike posture, the 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Nov. 30, 2012, Business Innovation Center Osaka, Osaka, Japan
  - 33 Fumihiko Asano, Fast convergent gait generation for underactuated biped based on output deadbeat control, the 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Nov. 30, 2012, Business Innovation Center Osaka, Osaka, Japan
  - 34 大島正嵩、浅野文彦、膝関節を持つ劣駆動2脚ロボットの瞬間的でない両脚支持状態を含む平地動歩行、日本ロボット学会第30回記念学術講演会、2012年9月19日、

- 札幌コンベンションセンター（北海道札幌市）
- 35 浅野文彦、出力有限整定制御に基づく高収束な劣駆動2脚歩容生成、日本ロボット学会第30回記念学術講演会、2012年9月19日、札幌コンベンションセンター（北海道札幌市）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

浅野 文彦 (ASANO FUMIHIKO)

北陸先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：70415066

### (2) 研究分担者

原田 祐志 (HARATA YUJI)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：00456691