

令和元年6月16日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H06073

研究課題名(和文)高応答特性を有する二足走行システムの開発

研究課題名(英文)Development of a Biped Running Robot System with Highly Responsive Characteristics

研究代表者

妹尾 拓 (Senoo, Taku)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師

研究者番号：10512113

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,300,000円

研究成果の概要(和文)：高速ビジョンと高速アクチュエータを統合することで、瞬間的な反応特性を有する二足走行システムを実現した。システム開発として、二足移動に適したトルク重量比の高いアクチュエータを開発し、頭部へ1000fpsの小型軽量ビジョンを搭載した高速走行機構を設計した。姿勢安定化に関して、従来のフィードフォワードベースによる事前の転倒回避とは異なり、転倒し始めを瞬時に検知して姿勢の回復動作を高速に繰り返すフィードバック主体の制御方法を確立した。これにより、予測不能な外力や凹凸路面に対するロバスタな走破、加速しながら前方へ跳躍して1回転する空中転回、走行中に急接近してくる障害物を回避する緊急停止動作を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ハードウェア/制御という両面から二足ロボットの技術的・理論的基盤を刷新し、従来とは異なるコンセプトに基づいてロバスタかつアクロバティックな脚運動を実現したことに学術的意義がある。本研究成果によって二足運動の高性能化・多様化が実現し、直感的な方法により極限的な性能を追求した運動が効率的に生成可能となる。性能限界の追求に基づく本研究は、自律性を追求したAI型のロボットと対極的・相補的な関係にあるため、次世代ロボットの基盤技術として期待できる。また、高応答特性を有するロボットの実現は、運動能力の重要性を再認識させるインパクトを与え、ロボット要素技術の開発を促進する波及効果があり、本研究の意義は高い。

研究成果の概要(英文)：By integrating high-speed vision and high-speed actuator, a bipedal running system with instantaneous response characteristics was realized. As for system development, the high torque-weight-ratio actuators suitable for bipedal movement were developed and high-speed bipedal running mechanism equipped with 1000 fps compact lightweight vision at the head part was designed. With respect to posture stabilization, a new feedback-based control method in that posture recovery motion is repeatedly executed in response to instantaneous detection of the beginning of falling was established, instead of the commonly-used previously-determined feedforward type falling avoidance. These technologies have made it possible to achieve acrobatic tasks: robust running in unpredicted external force and on rough terrain, somersault by accelerating and jumping forward to make one rotation, and emergency stop action for rapidly incoming obstacles during running.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：知能ロボティクス 機械力学・制御 センサフィードバック 高速画像処理

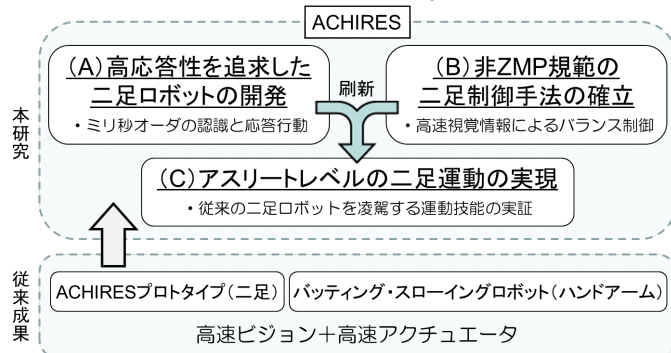
## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

DARPA ロボティクスチャレンジに象徴されるように、次世代ロボットとしてヒューマノイドへの期待が再び高まっている。ディープラーニングなどの人工知能をヒューマノイドへ統合するアプローチは、労力の高い枝葉末節のプログラミングが大幅に不要になり、繰り返しの訓練による自律的な運動生成が可能になる反面、機械学習における汎化性と厳密性は原理的に相反するため、開発者や操作者にとって途中プロセスの理解や介入は困難であると同時に、従来の機械システムが得意としていた高速性・精緻性・再現性を追求するタスクには適していない。一方、ハードウェアの観点では、現状の二足ロボットは人間と同等の運動をするのに十分な性能を有していないため、安定性を確保することを主目的とした複雑かつ計算コストの高い制御手法が主流となっている。アスリートのように限界を追求する高速な運動を実現するには、ハードウェアとその能力を最大限に引き出すソフトウェアの両者を一体化した開発が必要となっている。

### 2. 研究の目的

研究代表者はこれまでに、高速ビジュアルフィードバックを用いた二足走行ロボットシステム“ACHIRES”(Actively Coordinated High-speed Image-processing Running Experiment System)のプロトタイプを開発してきた。このシステムは、軽量かつ高出力なモータを用いて高速運動を実現する二足走行機構と、走行姿勢を安定に保つためにロボットの状態をリアルタイムに認識する高速ビジョンを統合したシステムである。感覚系と運動系を共に高速化することで、転倒を回避するための瞬間的な反応動作が可能となり、検証実験の第一ステップとして、ZMP 規範とは異なる独自の制御手法を実装し、世界トップクラスのスピード(脚長を考慮したフルード数換算)で高速走行することを実現している。本研究では、これまでの研究代表者の研究成果を発展させ、運動性能をハードウェアレベルで向上して制御手法の平易化を促進することで、高速センサフィードバックに基づく高応答特性を有した二足走行システムの実現を目的とする。ACHIRES プロトタイプよりもさらなる性能向上を目指して、要素技術レベルからシステム全体を一新し、突出した高応答特性に依拠するセンサフィードバックベースの制御手法を実装することにより、ダイナミックで多様な運動技能を実証していく。よって本研究では以下の3つの課題、(A) 高応答性を追求した二足ロボットの開発、(B) 非 ZMP 規範の二足制御手法の確立、(C) アスリートレベルの二足運動の実現を設定する。



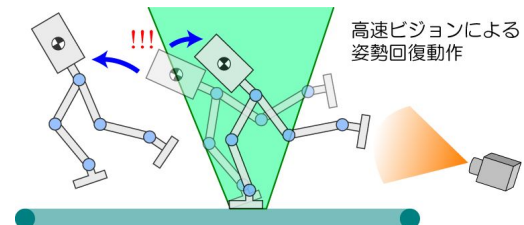
### 3. 研究の方法

#### (A) 高応答性を追求した二足ロボットの開発

ACHIRES プロトタイプは、高速ロボットハンド用に開発されたアクチュエータをベースに設計した小型サイズの走行機構であり、環境側に設置した高速ビジョンで認識することで高速走行している。本課題では、自重支持と蹴り力が両方必要とされる二足運動に適したトルク重量比の高いアクチュエータを開発し、小型・軽量の高速ビジョンを搭載した走行機構を設計するため、システム全体を一新する方向で研究を進める。

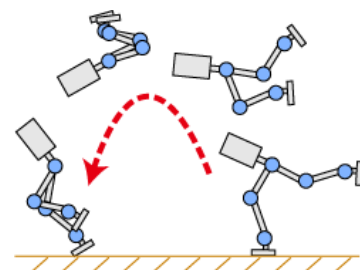
#### (B) 非 ZMP 規範の二足制御手法の確立

高速ビジュアルフィードバックによるバランス制御を実現するために、ロボット搭載ビジョンと環境設置ビジョンの異なる視点の画像特徴を利用した手法を提案する。特に、両者の視点で大きく異なるロボット状態検出および環境認識の情報精度の観点から検討する。両視点の画像比較に基づく性能解析や、接地相と空中相における姿勢回復のためのフィードバック構成法など、転倒を回避する包括的な二足制御手法を構築する。



#### (C) アスリートレベルの二足運動の実現

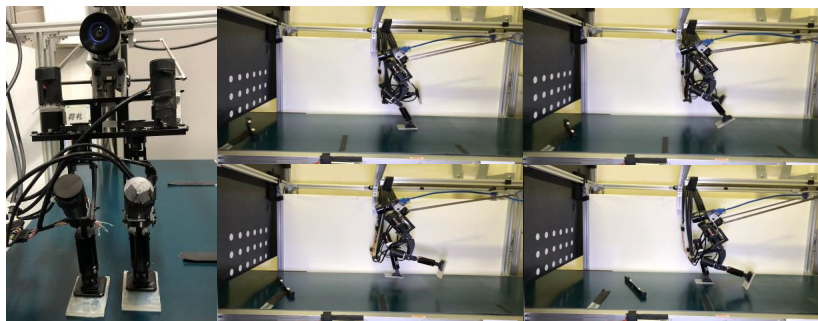
従来の二足ロボットを凌駕するアスリートレベルの脚運動を実現するために、課題(B)で提案する基本的なバランス制御を活用すると同時に、各タスクに応じた、課題(A)で開発したシステムの性能を最大限に引き出す動作アルゴリズムを開発する。特に、接地期と滞空期におけるモータ負荷特性の違い、回転運動における慣性モーメント変化、高速ビジョンで追従する対象ダイナミクスなど、力学的制約の観点から軌道生成の最適化をおこなう。



#### 4. 研究成果

##### (A) 高応答性を追求した二足ロボットの開発

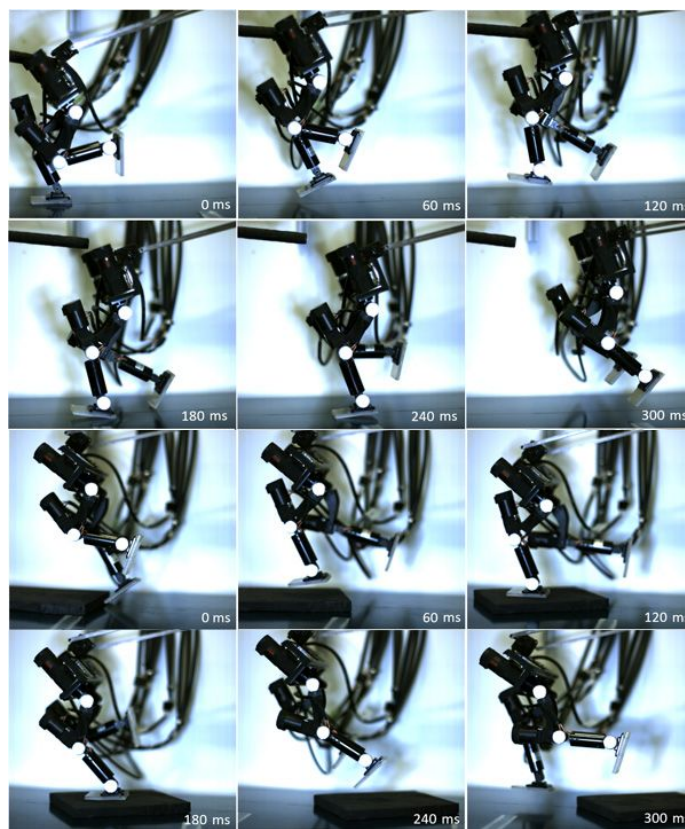
アクチュエータ開発に関して、巻線密度の増加に伴う熱放出の問題を解決するために、アクチュエータの寸法を軸方向に多少長くし、巻線密度は従来のまま巻線部を長めに設定することでターン数を増加した。モータド



ライバも電流ループ制御の設定、サーマルエラー動作設定など下位レベルから最適化をおこない、アクチュエータの性能を最大限に引き出せるようにすることで、従来以上の高トルクを実現した。プロトタイプでは環境設置型の高速ビジョンシステムが600fpsで動作していたが、本研究では二足ロボット本体に小型高速ビジョンを搭載した走行機構を開発し、1000fpsの画像処理システムを実現した。これにより、走行中の動的なロボット視点および環境に固定された視点の両方において、ロボットの絶対姿勢および路面状況や障害物などの周辺環境をミリ秒オーダーで認識しながら、瞬時加速の応答行動が可能な二足走行システムを開発した。

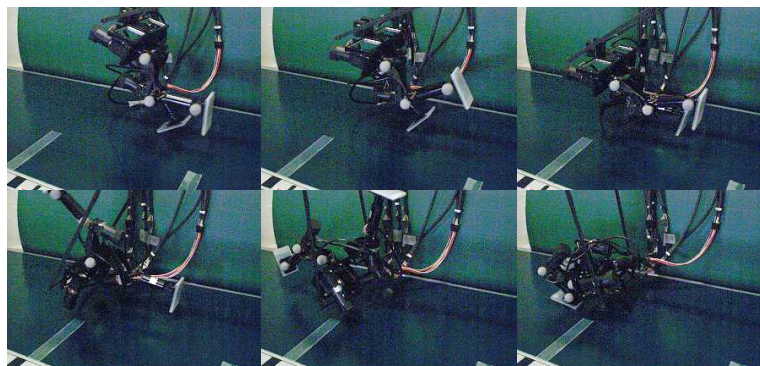
##### (B) 非ZMP規範の二足制御手法の確立

二足ロボットにおいて根幹的な技術である姿勢安定化に関して、転倒しそうになったら走行軌道を修正して安定範囲への回復動作を繰り返す簡易で直観的なフィードバック主体の制御方法を確立した。特に、高速ビジュアルフィードバックを利用したバランス制御を実現することで、従来のような体幹の直立姿勢と足裏の全面接触を保持した走り方とは異なり、大きく前傾/後傾した姿勢や、つま先/踵のみの接地状態を許容する広範囲の姿勢で有効な二足制御の理論的構築をおこなった。実験では、体幹に外力を加えた場合や凹凸路面の場合など予測不能な状態において、リアルタイムの高速フィードバックにより姿勢を回復しながら走り続けるロボスタな走破を実現した。また、ビジュアルオドメトリを実装することで、二足ロボット視点の映像から自身の姿勢計測を実現し、2msの計算時間で誤差5%以内の姿勢計測が可能であることを示した。



##### (C) アスリートレベルの二足運動の実現

アクロバティックな脚運動として、助走しながら前方へ跳躍して1回転する空中転回を実現した。空中では重心回りの角運動量が保存することを利用し、脚の屈伸運動による慣性モーメント変化を利用した空中姿勢制御戦略を提案した。さらに、外界認識への応用例として、走行中に急接近してくる障害



物を回避する緊急停止動作を実現した。高速ビジュアルフィードバックをロボット自身のバランス制御だけでなく環境に対する適応動作へも並列的に遂行できることを実証した。高速画

像処理に基づく高度な認識・判断により、低次のサーボ制御から高次の軌道計画までをリアルタイムに補正可能にすることで、アスリートレベルの運動技能を実現した。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計3件)

Taku Senoo, Yuji Yamakawa, Shouren Huang, Keisuke Koyama, Makoto Shimojo, Yoshihiro Watanabe, Leo Miyashita, Masahiro Hirano, Tomohiro Sueishi, and Masatoshi Ishikawa: Dynamic Intelligent Systems Based on High-Speed Vision, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 31 No. 1, pp. 45-56, 2019, DOI: 10.20965/jrm.2019.p0045

Taku Senoo and Masatoshi Ishikawa: Analysis of Sliding Behavior of a Biped Robot in Centroid Acceleration Space, Robotica, Vol. 35, Issue 3, pp. 636-653, 2017, DOI: 10.1017/S0263574715000740

Taku Senoo, Masanori Koike, Kenichi Murakami and Masatoshi Ishikawa: Impedance Control Design Based on Plastic Deformation for a Robotic Arm, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 2, No. 1, pp. 209-216, 2017, DOI: 10.1109/LRA.2016.2587806

### 〔学会発表〕(計12件)

田中敬, 妹尾拓, 石川正俊: 高速アクティブビジョンを用いたマルチカメラトラッキングシステム, 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, 2018.12.15

Taku Senoo, Kenichi Murakami, and Masatoshi Ishikawa: Robotic Physical Interaction Using Deformation Control Based on the Zener Model, 2018 IEEE/RSJ International Conference on Cyborg and Bionic Systems, 2018.10.27

妹尾拓, 村上健一, 石川正俊: Zenerモデルに基づくロボットアームの形状変形制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会2018, 2018.6.5

佐藤宏, 山川雄司, 妹尾拓, 石川正俊: 二足走行における高速ビジュアルフィードバックを用いた姿勢安定化制御, 第18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, 2017.12.22

妹尾拓, 田丸浩気, 村上健一, 石川正俊: 高速多指ハンドによるボール転がりを用いたピッチング戦略, 第35回日本ロボット学会学術講演会, 2017.9.12

Taku Senoo, Kenichi Murakami and Masatoshi Ishikawa: Deformable Robot Behavior based on the Standard Linear Solid Model, 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications, 2017.8.28

妹尾拓, 村上健一, 石川正俊: 標準線形固体モデルを用いたマニピュレータの変形挙動生成, ロボティクス・メカトロニクス講演会2017, 2017.5.11

Masanori Koike, Taku Senoo, Kenichi Murakami and Masatoshi Ishikawa: Plastic Deformation Control Based on Time-varying Impedance Adjustment, 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2016.12.4

Taku Senoo, Yuuki Horiuchi, Yoshinobu Nakanishi, Kenichi Murakami and Masatoshi Ishikawa: Robotic Pitching by Rolling Ball on Fingers for a Randomly Located Target, 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2016.12.4

Taku Senoo, Gaku Jinnai, Kenichi Murakami and Masatoshi Ishikawa: Deformation Control of a Multijoint Manipulator Based on Maxwell and Voigt Models, 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2016.10.12

妹尾拓, 小池正憲, 村上健一, 石川正俊: 受動的緩衝動作における直列表現ベースの塑性変形制御, 第34回日本ロボット学会学術講演会, 2016.9.9

妹尾拓, 陣内岳, 村上健一, 石川正俊: 多関節ロボットアームの弾塑性変形制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会2016, 2016.6.10

### 〔図書〕(計1件)

妹尾拓, 石川正俊: 野球ロボットとジャグリングロボット, ロボット制御学ハンドブック, pp.664-667, 近代科学社, 2017

### 〔その他〕

ホームページ: 東京大学 石川妹尾研究室 <http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

展示: 二足走行ロボット, 国際ロボット展2017

報道: 日経産業新聞「速く走れる2足ロボ 東大 前傾姿勢を可能に 瞬発力高めたモーター 高速カメラで動き認識」2017.12.15. 他多数

## 6. 研究組織

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。