

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420171

研究課題名(和文) リミットサイクル規範高速移動2足歩行ロボットの機構と制御

研究課題名(英文) Mechanism and control of bipedal fast locomotion robots based on limit cycle reference

研究代表者

山北 昌毅 (Yamakita, Masaki)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：30220247

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：2脚ロボットの走行制御に関して、イナータと揺動質量を付加したロボットの走行に関する実験的検証のため、実験用ロボットの設計を行い製作のための準備を行った。実際の設計に当たっては、床の凹凸など予期せぬ環境の不確実性に対処して、ロボット本体を壊すことなく走行を実現することが必要となるため、モータと関節の間に弾性要素をもつSEA機構を導入した。また、SEA機構を搭載した2脚ロボットに有効な走行制御手法を提案し、有効性を数値シミュレーションにより確認した。

研究成果の概要(英文)：For a study of bipedal running robots, we have designed and prepared of construction of a running robot with inerters and wobbling mass. In the design of the robot, SEA (Series Elastic Actuator) mechanism was introduced to overcome uncertainties of environment. A control method for robots with SEAs was also proposed and the validity of the method was confirmed by numerical simulations.

研究分野：制御工学

キーワード：2脚ロボット イナータ 揺動質量

1. 研究開始当初の背景

申請者らは、図1のように、2足歩行ロボットの足首などにイナータと呼ばれる慣性調整装置(はずみ車)とバネなどの粘弾性要素を導入することで、高効率で速い歩行が可能であることを示してきた。また、その時の支持脚の圧力中心が、歩行が効率的に生成される円弧足を持つ場合の歩行機の ROS (Roll Over Shape) の軌道とほぼ同じものとなることを数値的並びに解析的に示した。

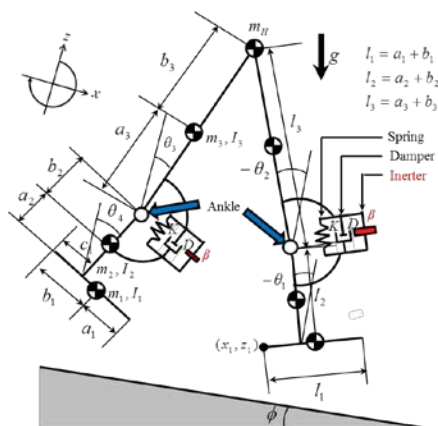


図1 足首にインピーダンスを持つロボット

一方、図2に示すような円弧足を持つロボットに対して、SLIP (Spring Loaded Inverted Pendulum) モデルを模擬するように制御を行うことにより、高効率で高速な走行が実現できることを示している。定量的には、走行スピードは 15.7[km/h](4.36[m/s])と高速であり、いままで報告されている Grizzle らの歩行ロボットの速度よりも非常に早い。また、SR(Specific Registance)と呼ばれる移動効率の指標は0.68であり、非常に高速であるにもかかわらず、ホンダの2足歩行ロボット ASIMO の1.6に比べて2倍以上のエネルギー効率を持っていることを示している。この結果は数値シミュレーションであるので、実際のロボットでは不確定要素などのために全く同じような性能が得られない可能性があるが、提案している機構のロボットと制御手法によりそれに近い特性が得られる可能性は大いにあると考えられる。

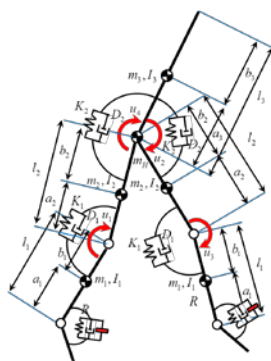


図2 円弧足を持つロボットモデル

2. 研究の目的

世界最高速で高効率な2足走行ロボットを実現する。従来の我々の研究では、円弧足を持つロボットに、SLIP(Spring Loaded Inverted Pendulum)モデルを用いた制御を施すことにより、数値シミュレーションにより高効率高速2足走行ロボットが実現可能であることを示している。また、揺動質量を付加することにより高速で安定度の高い歩行が可能であることも示している。これら結果に基づき、高速で安定度の高い走行に拡張を行いプロトタイプロボットを製作する。制作したロボットを用い、実際にそのような高効率で高速な2足走行ロボットの実現が可能であることを示し、高効率高速走行ロボットの実現の基礎を築くことが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 高効率高速な走行が実現できることが示されている図2に示すような円弧足を持つ2足歩行モデルを、円弧足と同等な特性が得られることが示されている足首インピーダンスを図3のように変更したものを考え、数値シミュレーションにより円弧足の場合と同等な特性が得られることを確認する。

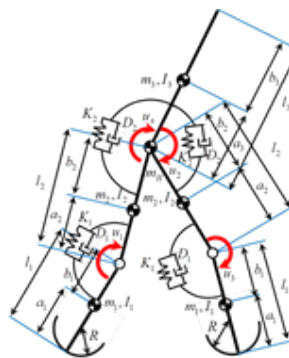


図3 平面足とインピーダンスを持つモデル

(2) シミュレーションの性能の確認と並行して、プロトタイプ実験システムの設計を行う。設計は上記数値シミュレーションの結果を反映して順次更新する。

(3) 平成26年度に準備したプロトタイプ実験機の図面を完成し、実際に実験ロボットを製作し、トレッドミル上で走行を行い目的の性能が得られるかを量的に評価する。評価項目は次の通り。

- (i) 走行速度
- (ii) SR (Specific Registance)
- (iii) FN (Fluid Number)

また、床面の凹凸に対しての走行安定性についても評価を行う。

更に、足首のインピーダンスパラメータの最適化などで機構の改良を行い、走行の各フェーズでの制御則の改良を行い効率の改善、走行速度の向上を目指す。更に、人間の機構を模した2関節筋を導入するために干渉駆動を用い、干渉駆動型イナータを導入することも試み、その効果を解析する。

#### 4. 研究成果

- (1) 図3のような平面足とインピーダンスに加えて、イナータを搭載したロボットの性能に関して数値シミュレーションを行い、文献1. では ASIMO の性能と比較を行い次のような結果を得た。

	ASIMO	提案ロボット
SR 値	1.6	1.28
F 値	0.66	0.95

この結果より、提案ロボットの走行スピードやエネルギー効率が ASIMO よりも優れていることを示した。また、文献2.-7. では同様なロボットの不整地に対する走行のロバスト性を調べ、イナータを付加したことによりロバスト性が向上することを示した。また、文献揺動質量という機構を搭載することにより、走行スピードが向上し、エネルギー効率も改善されることを示した。文献8. では、従来数値シミュレーションで用いてきたロボットのサイズが多き過ぎることから、小型化した際に有効なパラメータを決定している。

- (2) 上記の結果を利用して、実験用ロボットの設計を行った。当初は数値シミュレーションで用いていたような機構のロボットを設計していたが、設計した大きさのロボットを駆動するためには高トルクのアクチュエータを使用する必要があり、ギアを用いたアクチュエータを使用する必要があった。しかし、ギアを用いたアクチュエータでは衝撃力などに対する耐故障性の特性が当初の設計では十分でないことが分かり、アクチュエータを直列弾性アクチュエータ (Serial Elastic Actuator) を用いるように設計変更を行った。その変更を加えて設計を行ったものが図4並びに図5に示すものである。

SEA を用いたロボットでは、当初提案していた制御則をそのまま用いることはできず、新しい制御系を導出する必要があった。そのため、文献10. では従来の SLIP モデルを用いた制御則の利点を生か

しつつ、SEA を用いたロボットに適用することのできる新しい制御則を提案し、その有効性を数値シミュレーションにより示している。



図4 SEA の機構とそれを用いた走行ロボット

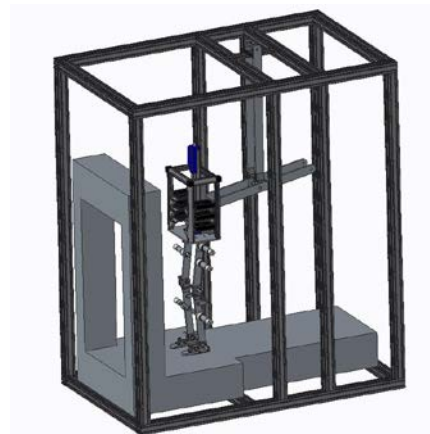


図5 設計した実験装置の全体図

- (3) 当初の計画では、制作した実験用ロボットを用いて、下記の性能を

- (i) 走行速度
- (ii) SR (Specific Resistance)
- (iii) FN (Fluid Number)

実験的に評価する予定であったがロボットの製作が遅れたために実験的に優位性を評価を行うことができていない。製作したSEAを用いたロボットに対するイナータや揺動質量の走行性能に対する効果や走行速度などの優位性を評価していきたい。

#### 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 件)

[学会発表] (計 10 件)

1. D.N.Thanh, T.Hayashi, M.Yamakita: High speed running of flat foot biped robot with inerter using SLIP model, Proc. of AIM2015 (2015)
2. T.Hayashi, M. Yamakita: Robust Analysis of Biped Walking on Uneven Terrain Using Output Zeroing Controls, Proc. of Robio 2015 (2015)
3. 高野、山北 : 足首にイナーターを持つ歩行ロボットに対する揺動質量の効果、SI2015(2015)
4. R.Takano, M.Yamakita, Q.Zhu: Analysis of Biped Running with Rotational Inerter, Proc. of ROBIO 2016 (2016)
5. 高野,花澤, 山北 : 回転型イナータの適用部位の違いによる 2 足移動ロボットの移動性能変化, 第 3 4 回日本ロボット学会 学術講演会予稿集 (2016)
6. R.Takano, M.Yamakita: Sequential-contact bipedal running based on SLIP model through zero moment point control, Proc. of AIM2017(2017)
7. Y.Hanazawa, R.Takano, M.Yamakita: Inerter Effects for Running Robots with Mechanical Impedance, Proc. of ROBIO (2017)
8. H. Sasaki, M. Yamakita: Study on Mechanism and Control of High Efficiency Running Biped Robot, SICE 2017 (2017)
9. R.Takano, M.Yamakita: Robust Constrained Stabilization Control Using Control Lyapunov and Control Barrier Function in the presence of Measurement Noises, Proc. of CCTA 2018(2018)
10. C.Junho, R.Takano, M.Yamakita: Approximated Model Matching Control for Running Robots with SEA Actuators, Proc. AIM2018(2018)

[その他]

<http://www.ac.ctrl.titech.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山北昌毅 (Yamakita, Masaki)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号 : 30220247