

報告日： 令和 2 年 11 月 2 日  
報告者： 埼玉大学 大学院理工学研究科  
辻 俊明

## 1. 研究概要

(和文)

### (1) 課題名 (日本語)

空気圧人工筋を有する筋骨格ロボットによる連続跳躍の実現

### (2) 研究者氏名, 職名

辻俊明 埼玉大学大学院 理工学研究科 准教授

### (3) 研究概要 (日本語)

空気圧人工筋は軽量で走るロボットのアクチュエータとして適しているが, その制御帯域の低さが課題である. 本研究では, 空気圧人工筋を用いた筋骨格二足歩行ロボットを用いて, 安定した連続跳躍の実現を目指した. 制御帯域の低さを補うため, 姿勢をフィードバック制御で安定化するのではなく, 着地時の剛性の調整により跳躍方向を調整し, 安定化することを試みた. 60 回跳躍した時の姿勢と制御ゲインの関係を線形回帰分析によりマップ化した. そのマップに基づき跳躍後の姿勢の乱れが補正されるよう制御ゲインを最適化したところ, 複数回の跳躍が実現された.

### (4) キーワード

空気圧人工筋, 跳躍ロボット, 二足ロボット

(英文)

### (1) Research title

Realization of continuous jumping by a musculoskeletal robot with pneumatic artificial muscles

### (2) Name of researcher with title of position

Toshiaki Tsuji, Associate Professor, Saitama University

### (3) Summary

In the field of robot engineering, attempts to reproduce the high exercise ability of human beings are actively conducted. The purpose of the research is to realize stable continuous hopping using musculoskeletal biped robot actuated by pneumatic artificial muscle. A map based on linear regression of the hopping dynamics was generated. The control method optimizing the stiffness of legs based on the map achieved multiple times of hopping.

#### (4) Key Words

Pneumatic artificial muscle, hopping robot, biped robot

#### 2. 本研究の意義・特色

走るロボットの研究は盛んに進められているが、その主要課題の一つはいかにロボットの機構を軽量化するか、にある。空気圧人工筋は推力重量比が大きいこととばね要素を持つために跳躍のエネルギーを回生利用できることから走るロボットのアクチュエータとして有力である。しかし振動が生じやすいこととその制御帯域が低いことから制御性能に課題が残る。そこで本研究課題では帯域の低い制御で姿勢を安定化する手法を検討した。制御帯域の低さを補うため、姿勢をフィードバック制御で安定化するのではなく、着地時の剛性の調整により跳躍方向を調整し、安定化することを試みた。60回跳躍した時の姿勢と制御ゲインの関係を線形回帰分析によりモデル化した。そのモデルに基づき跳躍後の姿勢の乱れが補正されるよう制御ゲインを最適化したところ、複数回の跳躍が実現された。

#### 3. 実施した研究の具体的内容、結果

##### 跳躍ロボットの姿勢安定化

本研究課題では研究代表者らの2017年までの先行研究の成果(“Force control of a jumping musculoskeletal robot with pneumatic artificial muscles,” IROS2016) (“Frontal Posture Control of Jumping Biped Robot Using Stiffness Bias Control,” IECON2017)に基づき、着地位置制御、衝撃力制御、跳躍力制御の3種類を組み合わせることによって矢状面におけるロボットの姿勢を安定化することを目指した。理論上はこれらの3種類の組み合わせによって姿勢を安定化することができ、シミュレーションでも安定した跳躍が実現できる。しかし実際には空気圧人工筋の持つ非線形性やヒステリシス、あるいは筋骨格や接触などのモデル化誤差に起因して姿勢が乱れ、複数回の連続跳躍は難しい。そこで本研究課題ではモデル化誤差の存在下においても姿勢の乱れを補正することができるよう、数十回跳躍した時の姿勢と制御ゲインの関係を線形回帰分析によりモデル化した跳躍マップを取得した。この跳躍マップから跳躍後の姿勢が安定化される制御ゲインを導出することによってモデル化誤差の影響を補償することが可能になる。

##### 跳躍マップ

二脚のロボットはモデル化が複雑であり、両脚の着地タイミングの差や、両脚の剛性比を考慮してスタンス期（ロボットの脚先が地面と接している期間）のダイナミクスを解析することは難しい。跳躍前の胴体角度と両脚の剛性比が与えられたときの跳躍後の角度は、実際に着地・跳躍させたデータを集めることで予想できる。しかし、制御する上で、跳躍後の所望の角度を実現できる剛性を導出する必要がある。そこで、跳躍後の角度、角速度

をともにゼロに近づける剛性比の導出が必要だと言える。しかし、跳躍後の胴体角度をゼロにすることが必ずしも安定化させるとは限らない。なぜなら、それに必要な角度ゲインで跳躍させたときの TOP 期(ロボットが最も高い位置にある瞬間)の角速度に注目すると、ゼロではなく次の跳躍で大きく姿勢が乱れてしまう可能性があるからである。そこで、跳躍前後の胴体角度と角度ゲインの関係性を線形回帰分析によりマップ化することで、姿勢を安定化させる角度ゲインを設定できるようにする。角度ゲインの値によって跳躍後の角度と同様に、角速度が変化することに着目した。動力学シミュレータを用いて予備実験を行ない、角度ゲインと跳躍の角度・各速度の関係を線形モデルでマップ化した。

### シミュレーション

Open Dynamics Engine(ODE)を用いた跳躍シミュレーションを実施した。初期角度は 4 deg とし、角速度ゲイン  $k_\phi = 8000$  [N/(m · rad)] とした。また、角度ゲインを 18000, 19000 に設定すると安定した連続跳躍をすることが確認された。また、100 回の跳躍で安定したと見なした。図 1 は、TOP 期の角度が跳躍後に減少する角度ゲインの範囲は 16000 から 30000 であることを示している。また、図 2 は、角度ゲインが 15000 付近で跳躍後の角速度が減少することを示している。シミュレーションによる角度ゲインと跳躍回数関係のグラフを図 3 に示す。図 3 はこれら 2 つの条件を満たす範囲で跳躍が安定化することを示している。すなわち、数値実験上は、提案手法が有効であることを示している。

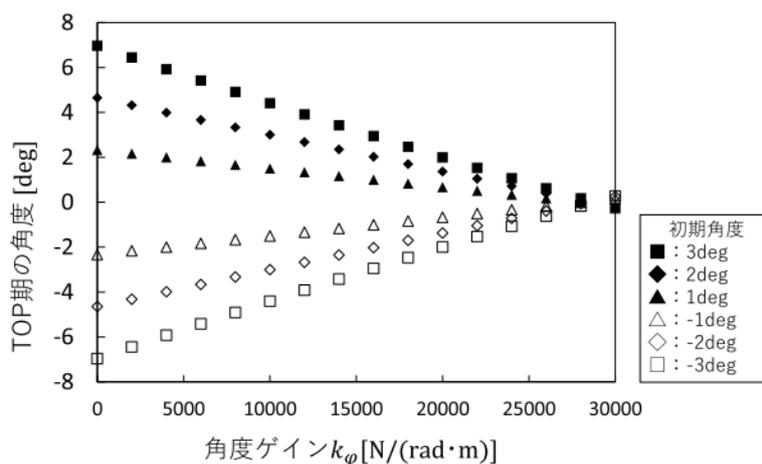


図 1 角度ゲインと TOP 期の角度の関係

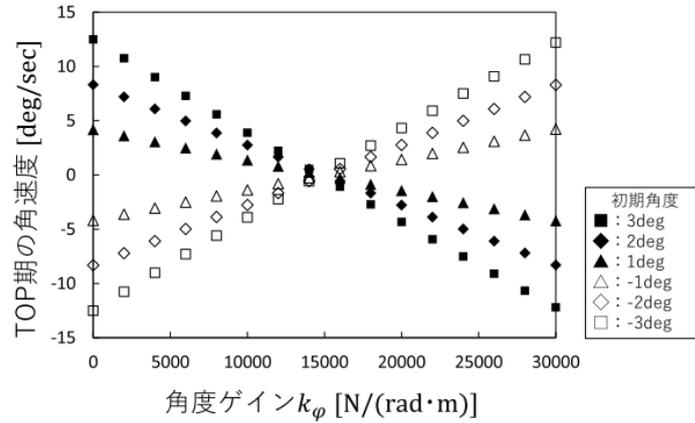


図 2 角度ゲインと TOP 期の角速度の関係

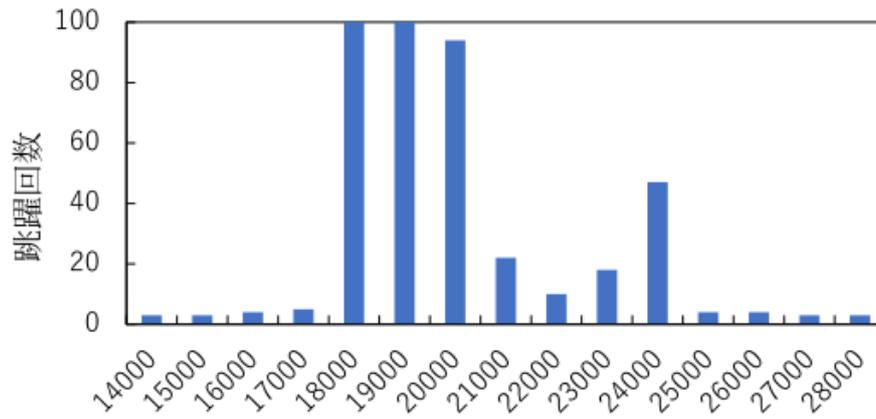


図 3 角度ゲインと跳躍回数の関係

### 実験

角度ゲインを 20500 に設定し、連続跳躍実験を行なった際の様子を 図 4 に示す。胴体角度の乱れを抑制しつつ、2 回の跳躍を達成した。1 回目の跳躍で  $z$  軸方向のモーメントが発生し、姿勢が乱れてしまっていることが分かる。その後 3 度目の着地後に跳躍力を発揮できず静止した。まず、 $z$  軸方向のモーメントが発生した理由は、左右で着地位置の  $x$  座標が異なって力の BOTTOM 期（ロボットが最も低い位置にある瞬間）の前後に姿勢が乱れてしまったと考えられる。また、それによって足先のマーカーを認識することができず、跳躍力が発揮できなかつたと考察される。また、 $y$  軸回りのモーメントが発生した理由としては、跳躍の際に重心位置の  $x$  座標がずれたことが原因と考えられるが、これは跳躍の度に着地位置目標を設定することで解決されると考えられる。

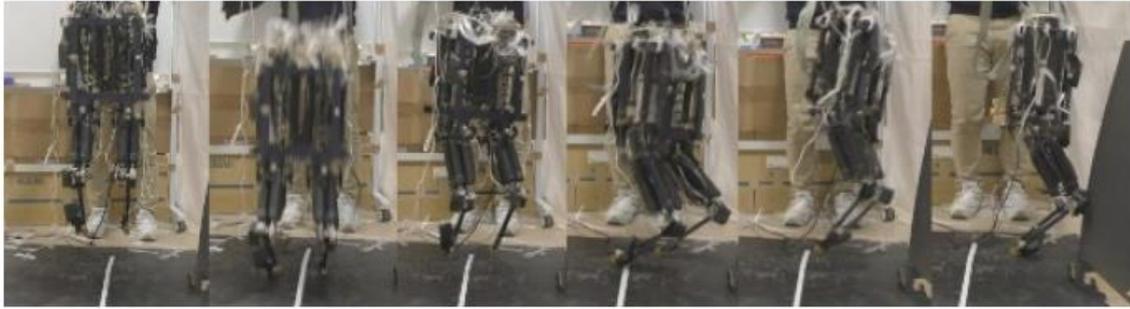


図 4 跳躍試験の様子

#### まとめ

本論文では、空気圧人工筋駆動二足筋骨格ロボットの顔面制御を提案した。二足で膝関節を有し、空気圧人工筋の非線形要素が多いロボットで跳躍動作のダイナミクスを数式化し、両脚の剛性を制御することによって、胴体角度の乱れを抑制しながら、2回の跳躍を達成した。着地位置の目標  $x$  座標を跳躍の都度に設定すれば、 $y$  軸方向のモーメント発生を抑制し、3回目以降の跳躍を達成できると考えられる。また、足首関節を有しておらず、動的安定性を持たないこのロボットで3回の着地を実現したことは、この制御の有効性を示唆している。しかし体幹を回転させる方向のモーメントでバランスを失う結果となったため、今後は  $y$  軸方向のモーメントを抑制する制御の導入を検討する。

#### 4. 本研究を実施したグループに属する主な研究者の氏名・職名

辻 俊明 埼玉大学理工学研究科・准教授  
大河原 寛 埼玉大学理工学研究科・非常勤研究員  
関野 耕平 埼玉大学理工学研究科・博士前期課程  
及川 将秀 埼玉大学理工学研究科・博士前期課程

#### 5. 研究実施時期

平成 29年 9月 1日から 31年 8月 31日まで

#### 6. 本研究に関連して発表した主な論文等

及川将秀, 関野耕平, 境野翔, 辻俊明, “二足筋骨格ロボットの跳躍マップを用いた顔面剛性比制御”, “ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018, 2P2-K03

#### 7. 内外における関連研究の状況

米国ボストンダイナミクス社が Atlas, Spot を発表するなど、脚型ロボットの性能は大きく進化している。他の組織からも跳躍、走行できるロボットが複数出ており、関連研究の

進歩は目覚ましい。ただし、人や動物に匹敵する軽量なアクチュエータを持つものはほとんど見られず、重量比の出力に関しては課題が残る。

#### 8. 今後の発展に対する希望

本研究課題はロボットの剛性を調整することによって衝突力の大きさと方向を受動的に調整可能になることを示している。帯域の低いアクチュエータでの受動的な力制御の方法論を確立すればロボットの性能がさらに進歩する余地があるため、受動性を活用した力制御理論へと発展させる予定である。