

# 環境との力学的相互作用のための足部蹴りだし機構の開発

## Design of foot mechanism that dynamically interact with environment by kicking the ground for biped walking robots

梅木健太郎 (東工大) 岡田昌史 (東工大) 岩附信行 (東工大)

\*Kentaro UMEKI, Tokyo Institute of Technology

Masafumi OKADA, Tokyo Institute of Technology

Nobuyuki IWATSUKI, Tokyo Institute of Technology

**Abstract**— To realize robot dynamics motions, it is necessary to use the dynamic interaction with environments that means the effective combination of following force, generating force and absorbing force. And it requires not only control algorithms but also mechanical design for the realization of the certain grounding to obtain the reactive force. We focus on the walking motion of the humanoid robot. In the double stance phase, the front leg ankle follows the external torque while the rear leg generates the propulsion force. In the single stance phase, the supporting leg follows the external force while the swing leg moves to absorb the impulsive force of grounding. In this paper, we propose the control algorithm to realize the walking motion using the interaction with the environment and design the tiptoe mechanism using a passive joint in order to keep the contact between the body and ground. The fundamental experiment of the force control is illustrated to shows the effectiveness of the proposed control algorithm.

**Key Words:** dynamical interaction, generating force, toe mechanism, biped walk

### 1. はじめに

歩行ロボットに見られるような移動型ロボットが数多く開発されるようになってきている。移動型ロボットは従来の産業用ロボットと異なり、静止系に固定されないため運動が不安定になりがちである。従来の研究では産業用ロボットと同様にあらかじめ決められた軌道の追従を行っており、不安定にならないための安定化コントローラを利用する人が多い [1]。この方法でロボットを制御すると、外乱に対してはロバストな運動を行うが人間の走行や跳躍のような、状態が頻繁に変化するダイナミックな運動は実現しにくい。ダイナミックな運動を実現するためには、運動制御の更なる発展が必要であり、その大きな要素として次の3つが考えられる。

1. 環境から受ける力に従う動作 (従反力)[2][3]
2. 積極的に環境へと力を与え、その反力として環境からの力を受ける動作 (反力生成)
3. 環境から受ける力を吸収する動作 (反力吸収)

従反力の実現のためには、関節のバックドライバリティが大きな要因となる。一般にロボットの関節は大きな出力トルクが要求されるため、減速比の大きなギアが用いられる。これは大きな摩擦を持ち、外力に従って関節が回転することを許容しない。この観点から、これまでにワイヤ駆動による足首機構が開発されてきた [2]。これは動滑車の原理を用いて大きな減速比を実現するもので、大きなバックドライバリティが実現されている。また参考文献 [3] では、関節に大きなバックラッシュを設け、そのすき間を制御することでフリーな状態を実現する膝関節が開発された。これにより、重力に従ったフリーな振子振動が実現されている。一方、反力生成の実現のためには、環境との力学的相互作用を確実に進行する必要がある。例えば、剛体と環境との接触は線接触になる場合が多く、作用する力の向き不安定性やすべりを生じやすい。そのため、常に環境と面接触し、確実に環境へ力を作用させる機構が必要である。

本研究では特に二足歩行ロボット運動に注目し、先に運動パターンを生成せず、推進力を得るために蹴りだし力を操作する制御法を考える。そして、その結果として歩行運動パターンを生成する。そのために、歩行ロボットにおける反力操作のアルゴリズムの設計、これを実現するための脚

部蹴りだし機構の開発の2点を中心に行う。反力操作では、従反力、反力生成、反力吸収を、前脚のトルクならい制御、力学的エネルギーに基づいた推進力制御、遊脚の着地における軌道生成に分け、特に反力生成について考える。また、脚部蹴りだし機構は、蹴りだし力の操作を困難にしていた地面との線接触状態を避けるため、つま先部分に受動対偶を有する脚部機構の開発を行う。

### 2. 環境との力学的相互作用を利用した歩行制御

#### 2.1 歩行の phase と反力操作

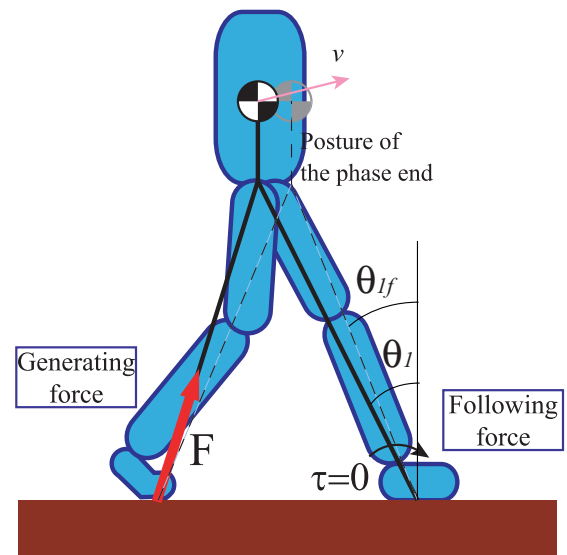


Fig.1 Model of double stance phase

歩行は、Fig.1, Fig.2 のように両脚支持期と片脚支持期の2つの phase に分けられ、それぞれ各脚の行っている働きが異なる。両脚支持期では、後脚が歩行の推進力を得る

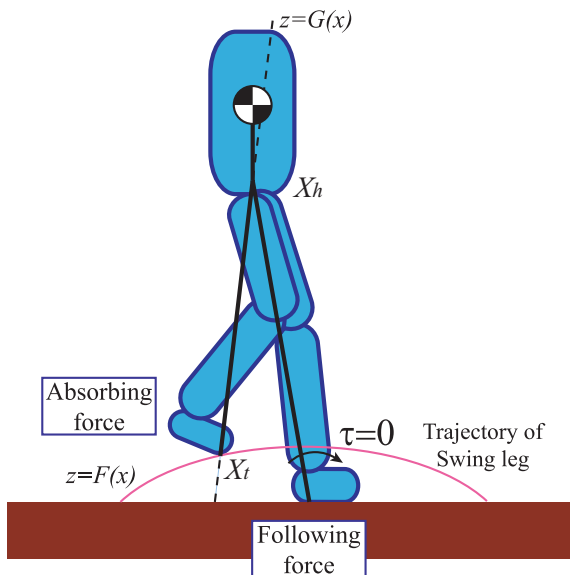


Fig.2 Model of single stance phase

ための蹴りだし力を発生し(反力生成),前脚は足首の出力トルクを0にして外力によるモーメントに従った運動を行う(従反力).これにより,後脚の蹴りだし力が前脚足首関節回りのモーメントとなり推進力を得られる.片脚支持期では,支持脚の足首出力トルクが0となり外力に従う運動を行い(従反力),遊脚は着地における衝撃を抑えるように軌道の生成を行う(反力吸収).

## 2.2 両脚支持期の歩行制御

両脚支持期では, Fig.1 のモデルに基づき,力学的エネルギーを制御目標として目標値に近づくよう後脚蹴りだし力の操作を行う. Fig.3 に示すように,力学的エネルギーの目

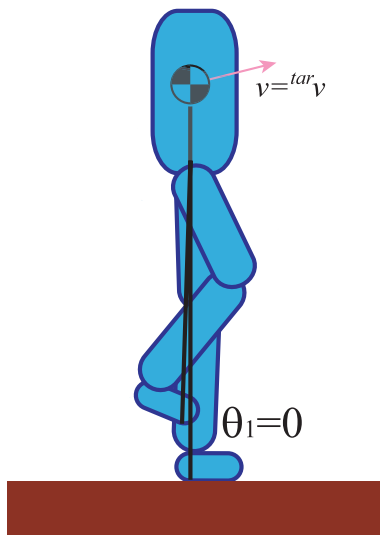


Fig.3 Model of biped walking controll algorithm

標値は片脚支持期で支持脚が鉛直の時に目標歩行速度  $^{tar}v$  を満たすための力学的エネルギーとし,これを  $^{tar}U$  と定める.ここで,両脚支持期から片脚支持期に移る時の支持脚姿勢角  $\theta_{1f}$  を与え,この姿勢に達した時に力学的エネルギーが  $^{tar}U$  へと到達するよう後脚の蹴りだし力  $^{ref}F$  を定める.蹴りだし力が行う仕事とエネルギーの増加の関係から,目

標値  $^{ref}F$  は次のように求められる.

$$^{tar}U - U = \int_{\theta_1}^{\theta_{1,f}} ^{ref}F l_1 d\theta_1 \quad (1)$$

また,前脚足首関節では,減速器等の摩擦で生じるトルク  $\tau_\mu$  を打ち消しフリーな状態を作り出す.

## 2.3 片脚支持期の歩行制御

片脚支持期において支持脚足首関節は両脚支持期の前脚と同様に減速器等の摩擦で生じるトルク  $\tau_\mu$  を打ち消しフリーな状態を作り出す.また,遊脚は Fig.2 に示すように,支持脚と  $x = x_h$  ( $X_h$  は股関節の位置) に関して対称な直線  $z = G(x)$  を通るものとし,与えた遊脚軌道  $z = F(x)$  と遊脚の描く直線  $z = G(x)$  との交点を遊脚の先端  $X_t$  として以下のように  $^{ref}l_2$  を定める.

$$^{ref}l_2 = |X_h - X_t| \quad (2)$$

## 3. 機構の設計・製作

### 3.1 二足歩行ロボット

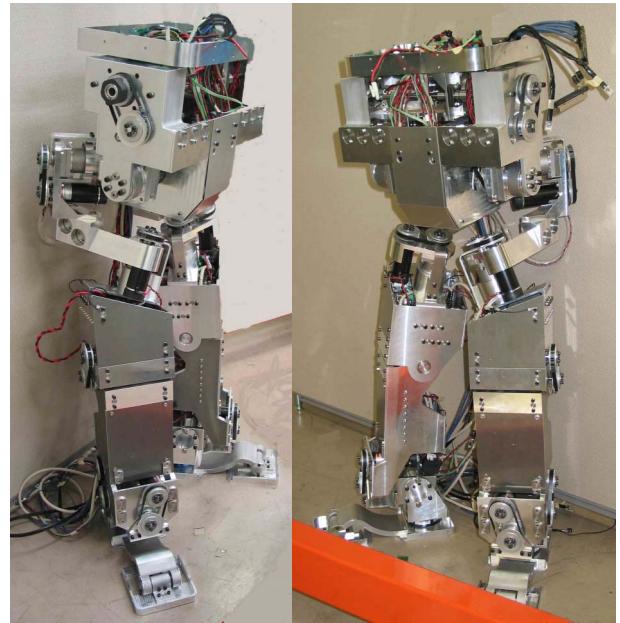


Fig.4 Overview of biped robot

本研究で設計・製作した二足歩行ロボットの全体写真を Fig.4 に示す.この二足歩行ロボットは全高約 1150[mm],全重量 15[kg],股関節 6 自由度,各脚の膝関節 1 自由度,足首関節 2 自由度の計 12 自由度を有している.股関節は,6 軸すべてが一点で交わる 2 重球面ジョイントを有しており [4],脚部の姿勢とは独立して上半身の姿勢を決定できる.本研究においては,脚部機構の設計に関して詳しい機構の特徴を後述する.

### 3.2 ハードウェア構成

二足歩行ロボットのハードウェア構成を以下に示す.上半身に制御用 PC を配置する.モータドライバは股関節に 2 つ,各脚の大腿部,下腿部にそれぞれ 1 つの計 6 つを配置し,それぞれ 2 つのモータの制御を行う.センサはモータの回転角を読み取るエンコーダ,足裏の接地状態を計測する接触センサ,足部に働く力を計測する 6 軸力センサを配置し,それぞれ制御用 PC と通信している.電源は外部から DC48V を供給し,上半身に設置した DC/DC コンバータにより各部で使用する電圧に変換する.

### 3.3 脚部蹴りだし機構の設計

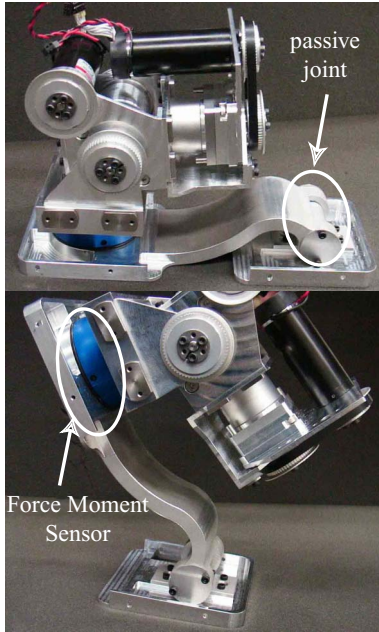


Fig.5 Mechanical design of foot

歩行の推進力を操作するための蹴りだし力制御を行うには、従来のロボットで起こっていた地面との線接触を防ぐ必要がある。その解決策として、つま先に自由度を追加する方法を考え、これには、つま先自由度にアクチュエータを取り付ける方法 [5]、復元力を持つ弾性要素を取り付ける方法 [6] などがあるが、つま先部の面接触を保つためには適度な制御を行う必要があるため今回の目的に対しては適切ではない。また、Hirose らは四足ロボットの足首に受動対偶を設け、不整地での確実な接地を達成している [7]。そこで、脚部蹴りだし機構には受動対偶からなるつま先関節を持たせることが妥当であると考え、Fig.5 に示すような足部機構を設計した。図の右側がつま先部、左側がかかと部となっており、つま先部上方に受動対偶を持ち、その回りに自由な回転を行うことで地面との間で常に面接触が保たれる。かかとには 6 軸力センサを配置して足部が受ける力を測定することを可能とした。また、蹴りだし機構のための小型・軽量化と強度の向上を目的として、設計の際に外骨格構造とするなどの工夫を各部に行った。

### 4. 実機による実験実証

2 章で提案した蹴りだし力制御アルゴリズムを実機を用いた実験で検証する。ここでは、直立したロボットが鉛直方向の蹴りだし力  $f_z$  が指令値  ${}^{ref}F_z$  に収束することを検証する。歩行における蹴りだし力は短時間のみで行われるが、ここでは一定の間  ${}^{ref}F_z$  を定期的に与えるため、脚機構の可動範囲が大きな制約となる。そこで、ロボットをばねでつるし、脚長によって  $F$  が変化するようにした。ロボットの各関節は目標角度に従うよう、ローカルに PD 制御されている。そこで、式 (1) から得られる  ${}^{ref}F$  を後脚の脚長  $l_2$  の変化量の操作により達成する。 $K$  をフィードバックゲインとして、脚長変化量の目標値  ${}^{ref}l_2$  を次の式のように与える。

$${}^{ref}\dot{l}_2 = \dot{l}_2 + K({}^{ref}F - F) \quad (3)$$

また、式 (3) と両脚支持期でそれぞれ脚長および脚長の変化量の目標値をヤコビ行列  $J$  を用いて関節角ベクトル  $\theta$  に変換し、モータ指令値とする。

$$\dot{\theta} = J^\# \dot{l}_2 \quad (4)$$

さらに、トルクならい制御により足首関節に発生させるトルクを制御するが、ここでは目標角度  ${}^{ref}\theta_M$  で与える。このとき、 ${}^{ref}\theta_M$  は PD 制御されてるとし、比例ゲイン  $K_p$ 、微分ゲイン  $K_d$ 、モータ定数  $M_C$ 、減速比  $Z$  を用いて以下のように表される。

$${}^{ref}\theta_M = \theta_M + \frac{\tau}{K_p M_C Z} + \frac{K_d}{K_p} \dot{\theta}_M \quad (5)$$

これによって、 $F$  が  ${}^{ref}F$  と一致した脚長でロボットは静止する。実験は以下の手順で行った。

直立状態の股関節 0[deg]、膝関節 0[deg]、足首関節 0[deg] を初期姿勢とし、そこから 2.5[sec] の間で実験開始位置の股関節約 12.6[deg]、膝関節 30[deg]、足首関節約 17.4[deg] へと 5 次両停留関数を用いて移動させる。実験開始位置に到達した 2.5[sec] から所望の蹴りだし力目標値を与え、制御アルゴリズムに従って力が追従できているかを測定する。実験で得られた蹴りだし力の結果を Fig.6 に示す。力の鉛直

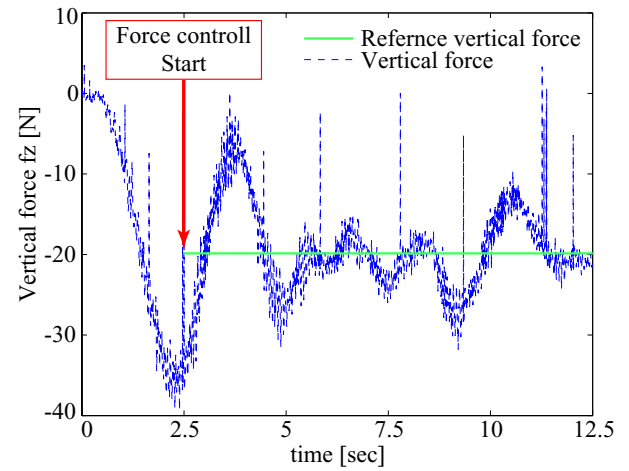


Fig.6 Result of force control exeriment

方向成分が振動しながら所望の値へと近づいていることが分かる。蹴りだし力は十分な時間が経過すると所望の値になると考えられるが、追従速度が遅いため歩行に適用するためには更なるゲインの調整が必要である。次に、Fig.7 に

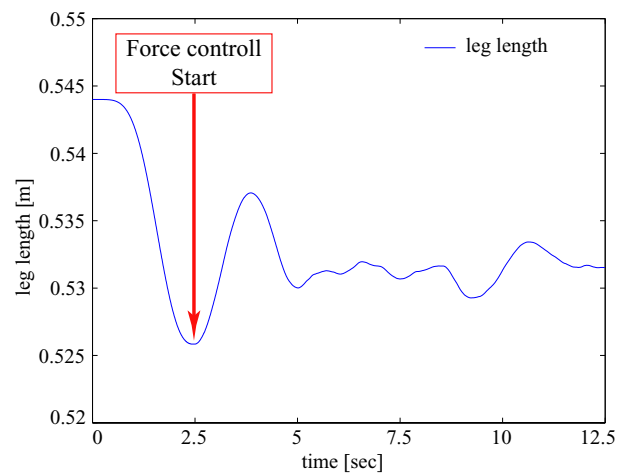


Fig.7 Generated leg length motion by force control

蹴りだし力制御の結果として生成された脚長の挙動を示す。脚長の挙動がほぼ蹴りだし力に比例していることが分かる。これにより、実機が制御アルゴリズム通りに動作を行って



いることが確認された．最後に Fig.8 に実験の様子を示す．脚長の伸縮によって，蹴りだし力の制御をしている様子が分かる．

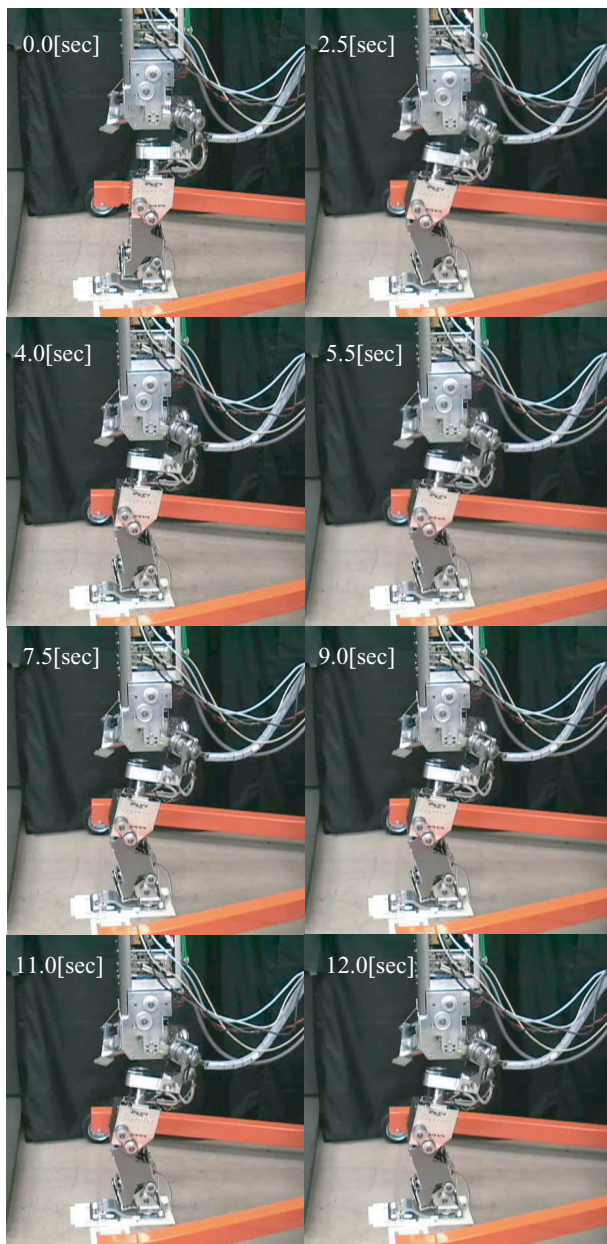


Fig.8 Time change of posture

## 5. おわりに

本研究では 2 脚歩行ロボットにおける反力制御アルゴリズムの設計と，これを実現するための脚部蹴りだし機構の開発を行い，以下の成果を得た．

1. 環境との力学的相互作用を従反力，反力生成，反力吸収の 3 つの動作に分類し，力やトルクを制御することで運動を生成するアルゴリズムを提案した．
2. 反力生成を行うため，つま先に受動対偶を有する脚部蹴りだし機構を設計・製作した．
3. 製作した 2 脚歩行ロボットを用いて，蹴りだし力操作アルゴリズムの実験検証を行い，蹴りだし力の操作が可能であることを確かめた．

## 謝辞

本研究は文部科学省科学研究補助金特定領域研究 (A03) 「力学的情報処理による記号空間と運動空間の結合設計」(研究代表者：岡田昌史) および東京工業大学挑戦的研究賞「非線形力学現象としてとらえたヒューマノイドロボットの運動生成」の支援を受けた．

## 参考文献

- [1] Y.Fujimoto and A.Kawamura: Simulation of an Autonomous Biped Walking Robot Including Environmental Force Interaction, IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION MAGAZINE, VOL.5, NO.2, JUNE 1998
- [2] 中野, 岡田, 中村: ワイヤを用いたバックドライバブルな足首駆動機構の設計, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04, 2004.6.
- [3] 岡田, 後藤, 中村: 歩行ロボットの従反力運動を実現する膝関節機構, 第 20 回日本ロボット学会学術講演会, 2002.10.
- [4] 小鹿, 岡田, 岩附: 二足歩行ロボットのための重心補正機能を有する二重球面股関節の設計, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2005, 2005.6.
- [5] 西脇, 村上, 杉原, 加賀美, 稲葉, 井上: つま先自由度を活用した人間型ロボットの歩行・全身運動能力拡大, 第 6 回ロボティクスシンポジウム, 2001.3.
- [6] 廣野, 小金澤: アクティブ/パッシブハイブリッド歩行を可能とする東海ロボ・ハビリス 1, 第 22 回日本ロボット学会学術講演会, 2004.9.
- [7] S.Hirose, K.Yoneda and H.Tsukagoshi: TITAN VII: Quadruped Walking and Manipulating Robot on a Steep Slope, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.494-500, 1997.