バネ質点系を用いた準受動歩行ロボットにおける蹴り出し力を利用した歩容制御

Gait Control by using the Ground Reaction Force for a Powered Passive Walking Robot with Spring Mass Systems

○ 佐藤正隆*, 佐々木駿*, 水戸部和久*, 菊池武士*
 ○ Masataka Sato*, Shun Sasaki*, Kazuhisa Mitobe*, Takehito Kikuchi*

*山形大学

Yamagata University*

キーワード 準受動歩行(Powered passive dynamic walking), バネ質点系(Spring Mass Systems), ZMP(Zero Moment Point), 蹴り出し力(Ground Reaction Force)

連絡先: 〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-6 山形大学 工学部 機械システム工学科 水戸部研究室 水戸部和久, Tel.: (0238)26-3230, E-mail: mitobe@yz.yamagata-u.ac.jp

1. 緒言

受動歩行ロボットは重力や慣性力を利用し, アクチュエータを持たずに緩やかな斜面を下 り歩く.その特性を利用しつつアクチュエータ によりエネルギを追加することで,平地を歩行 する準受動歩行ロボットがある[1].これらはエ ネルギ効率に優れる一方で,歩行の安定性が初 期状態に大きく依存する点や,外乱に対するロ バスト性などが課題である.そこで,受動歩行 の利点を残しつつエネルギを追加し,継続した 歩行が可能なアクチュエータの選定や制御方 法の研究が必要である.

準受動歩行ロボットの制御手法の一つに足 首関節にモータを付け駆動する方式や足裏を 使った蹴り出しの手法がある.例として,ロボ ットの左右方向への変位が無いと仮定したモ デルを用いて受動歩行のエネルギ特性を解析 し,支持脚の角速度を変化させることでエネル ギ補填する研究[3]や,ZMPの制御を行うため の足首トルクの制御を受動歩行の歩容生成メ カニズムに組み込んだ研究[4]がある.これまで 足首駆動型や脚蹴り出しを利用した研究の多 くは,矢状面における二次元平面内の運動解析 により行われている.

歩行現象を動力学シミュレーションする際

に動力学エンジン Open Dynamics Engine (ODE)[5]を用いることで、リンク構成の変更検 討など、ロボットの機構変更に関する比較がシ ミュレーション上で容易に可能となる. ODE は、近年ではロボティクス研究で多く使用され、 研究ツールとしての ODE 定量評価を行った研 究もある[6].本研究では蹴り出し制御機構の実 機開発の前段階として ODE を利用している.

本研究で開発したバネ質点系の振動を利用 して歩行する準受動歩行ロボットは、左右方向 のZMP制御を行い継続した歩行ができるが[7]、 一歩の間に前後に回転する脚の角度は人間に 比べ小さく、歩幅、歩行速度が小さい。

本稿では、足に作用する床反力を操作する蹴 り出し制御を用いて歩容を変化させ、歩幅を増 大することを目的とする.蹴り出し制御を用い た歩行の検証を ODE によるシミュレーション を用いて行う.歩容の解析には支持脚の姿勢角 および角速度の位相平面を用いて考察する.蹴 り出し制御方法について述べると共に、蹴り出 し力を追加した条件での継続した歩行を可能 にするための、脚の重心位置調整と脚角度の最 大値制限について論じる.最後に ODE による 実機の再現性を確認するため、実機と実機を再 現した ODE のモデルの歩容を比較する.

2. バネ質点系振動を用いた準受動歩行

2.1. ロボットの構成

本研究では Fig. 1 に示すようにバネ質点系を 用いて歩行する 2 足歩行ロボットを扱う. ロボ ットは Fig. 2 に示すように中央にあるサーボモ ータ 1 つを動力とし,左右に取り付けたバネ質 点系と,腰関節と膝関節のある 2 本の脚,円弧 の脚裏を持つ. ロボットは幅 830mm,高さ 400mm,錘を含めた総重量 1.55kg である. バ ネ質点系はバネ定数約 30N/m のゴムひもと 0.5kg の錘で構成され,ロボット中央のサーボ モータを用いて加振する. 腰関節は進行方向に 垂直な軸周りの自由度に加え,平行な軸方向に 対してはゴムを用いて剛性のある回転自由度 を与えた. 脚裏には曲率半径 600mm の円弧を 設けた.歩行速度は約 60mm/s である.



Fig. 1 Powered Passive Walking Robot



Fig. 2 Mechanism of the spring mass system

2.2. 遊脚相の生成と振り出し

Fig. 3に示すようにバネ質点系の振動に合わせて ZMP 位置が変化すると共に、脚のつけ根周りのモーメントは増大することで脚が回転し遊脚相が生成される.

ロボットは初期状態で前傾姿勢になっている ため、重力により遊脚が振り子のように前へ振 られる現象を利用して遊脚の振り出しを行う.



Fig. 3 Lateral motion and the ZMP position

3. 蹴り出し制御

3.1. 蹴り出し制御について

両脚支持期において後方の足が地面から受ける反力を入力とし、矢状面におけるロボットの制御を行った.以下ではこのような入力方法を"蹴り出し"と呼ぶことにする.蹴り出し力の作用点は**Fig.4**に示すように脚の延長線上と足底ラインの交点とした.モデルにおいて、この点は地面に接触していないが、足裏に蹴り出し力を発生する機構の付加を想定している.蹴り出し力は両脚支持期において矢状面上の力として作用し、力の向きは鉛直方向とする.

支持脚を本稿 "3.2.支持脚のモデル化と位 相平面の解軌道" に示すようにモデル化し,矢 状面における支持脚の鉛直軸からの回転角度 θ の-50deg から+50deg までの角度とその角速度 の位相平面と解軌道を Fig. 5 に示す. エネルギ の増減が無いときモデルは図の解軌道に沿っ て運動する. さらに, θ が-50deg から+50deg において角速度が大きくなるほど角速度の増 減が小さくなる.

バネ質点系は遊脚と支持脚の切り替え周期 が一定であるため、支持脚の角速度が大きい歩 行ほど歩行速度は速い.そこで蹴り出しにより エネルギを追加し各サイクルにおける支持脚 の初期角速度を増大させることで歩行速度と 歩幅を増大させる.すなわち、蹴り出しにより 位相平面においてより角速度の大きな解軌道 へと移動させる.

本研究では歩行をサイクルと捉え,サイクル の始まりは両脚支持になった瞬間とした.蹴り 出し力は両脚支持期において,目標とする初期 角速度を得られるまで与えた.



Fig. 4 Kick force and model



Fig. 5 Energy addition. stance leg angle and angle velocity for orbit of phase plane

3.2. 支持脚のモデル化と位相平面の解軌 道の算出

本研究では、蹴り出しの考察をするためと、 蹴り出しによる歩容への効果についてシミュ レーション結果を評価するために、矢状面にお ける支持脚の角度 θ とその角速度 ω の位相平面 を用いた.その算出法を以下に示す.

運動モデルは、**Fig. 6**に示すように、弾性を 有する足首関節と、平坦な足底を用いた簡単な モデルを用いた.受動歩行においては、円弧足 と同様の効果が足首バネと扁平足によって得 られることが報告されている[8].モデルの運動 方程式は式(1a)と(1b)で表され、位相平面の解 軌道方程式は式(2a)と(2b)のように算出した. 各式の積分定数*C*にそれぞれ等しい値を代入し て求めた解軌道は **Fig. 7** で表される.モデルに 用いたパラメータは実機に従い、胴体部分の質 量は胴体部分の質量に加えバネ質点系の錘を 合わせて m[kg](=2)、脚の長さl[m](=0.35)、バ ネ定数 k[N/m]は円弧足の曲率半径r[m](=0.6)を用いてk = 2mgrとし[8]、脚の延長線と支持 多角形の端までの幅をロボット後方まで、すな

わち踵までの距離h₁[m](=0.03),前方まで,す なわち爪先までが*h*,[m](=0.07)である. Fig. 6 (a), (c) において $\left(\theta < -\sin^{-1}\left(\frac{h_1}{l}\right), \theta > \sin^{-1}\left(\frac{h_2}{l}\right)\right)$ の範囲にθがある. 運動方程式は $ml^2\ddot{\theta} = mal\sin\theta$ (1a)となるため $\ddot{\theta} = \dot{\omega} = \frac{g}{l}\sin\theta, \ \dot{\theta} = \omega$ より, θ-ω位相平面における解軌道は $\frac{1}{2}\omega^2 = -\frac{g}{l}\cos\theta + C_1$ (2a)ここで、C₁は初期値に依存する積分定数. Fig. 6 (b) において $\left(-\sin^{-1}\left(\frac{h_1}{l}\right) < \theta < \sin^{-1}\left(\frac{h_2}{l}\right)\right)$ の範囲にθがある. 運動方程式は $ml^2\ddot{\theta} = mal\sin\theta - k\theta$ (1b)となるため $\ddot{\theta} = \dot{\omega} = \left(\frac{g}{l} - \frac{k}{ml^2}\right)\sin\theta, \quad \dot{\theta} = \omega$ より, θ-ω位相平面における解軌道は

$$\frac{1}{2}\omega^2 = -\frac{g}{l}\cos\theta - \frac{\kappa}{ml^2}\theta^2 + C \qquad (2b)$$

ここで、
$$C_2$$
は初期値に依存する積分定数.



Fig. 6 Simplified stance leg model



Fig. 7 Stance leg motion on the phase plane

3.3. 支持脚の目標初期角速度

両脚支持状態において、後方の足が地面を蹴る鉛直力の制御により、支持脚の角速度を変更する. 両脚支持期の直後での目標角速度 ω_0 を $\omega_0' = \omega_a + \omega_v$ とした.

 ω_{g} はロボットが後方に転倒することを防ぐ ため、重心投影点を脚裏の支持多角形内へ移動 させるためのエネルギを与える項である. ω_{g} の算出には、Fig. 6 (a), (c)のモデルを用いて Fig. 8 に示すように支持脚が初期角度 θ から、重心 投影点が脚裏の支持多角形内の踵側の端に存 在する角度 sin⁻¹($\frac{h_{l}}{l}$)まで変化するときの重心

高さ変化を見込み,重心の位置エネルギ変化量 に対応する運動エネルギから求める式(3)を用 いた.

ω, は, 歩行中に変更の無い一定値である. 継続した歩行が可能な値をシミュレーションから決定した.

$$\omega_g = \sqrt{\frac{2}{l}g\left(\cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{h_l}{l}\right)\right) - \cos\theta\right)} \quad (3)$$



Fig. 8 Angular velocity control for fall-prevention

3.4. 遊脚の振り角度の増大

遊脚の振り角度を増大させるため、脚の後方 に錘を取り付け、脚の重心位置を後方へ移動し た.これにより遊脚を前方に振るための支点周 りに発生する重力によるモーメントが大きく なる.なお、遊脚が地面に接触した瞬間の脚の 振り角度が支持脚の角度となる.

3.5. 脚関節角度の制限による発散防止

脚角度の発散を防ぐために**Fig.9**に示すよう に脚の最大角度を制限した.制限の有無による 脚角度の時間変化を比較したシミュレーショ ン結果を **Fig. 10**に示す.発散を防いでいるこ とが確認できる.



Fig. 9 Leg angle limitation



(a)Leg angle with limitation





4. シミュレーション方法

本研究では ODE(Open Dynamic Engine)に よりロボットを Fig. 11 に示すようにモデル化 し, 蹴り出し制御の追加をシミュレーションし た. 歩行の様子を Fig. 12 に示す.

本ロボットは横方向への棒の先端に周期的 な力が作用することで,ZMP 制御を行う.こ の力はバネ質点系の振動により発生すること を想定している.ロボット軸端に発生する力は 式(4)により与えた.軸端右に発生する力の大き

さが F_{SP} , 軸端左では F_{SP} , である.

$$F_{SP_l} = \sin(\frac{2\pi}{T}t)\frac{m_Sg}{2} + \frac{m_Sg}{2}$$

$$F_{SP_{r}} = \sin(\frac{2\pi}{T}t + \pi)\frac{m_{s}g}{2} + \frac{m_{s}g}{2} \quad (4)$$

ここで, *T* [s]はバネ質点系の振動周期, *m*_s [kg]はバネ質点系に用いた錘の質量である. 実機の腰関節に用いたゴム剛性を再現するた め,前額面上における脚の回転角度に比例した モーメント反力を追加した.



Fig. 11 The robot model on ODE



Fig. 12 Simulation result by ODE

5. シミュレーション結果

5.1. 一歩の脚角度と歩幅

シミュレーションによる歩行の結果と、その 際のロボットのパラメータを**TABLE1**に示す. なお条件を変えた3種類の結果を示し、さらに Condition No.4 に蹴り出し制御の無い実機での 実験結果を示した.それぞれの条件において 30s 以上の継続した歩行が可能である. **TABLE1**の Condition No.3 は、蹴り出しの無い 実機をシミュレーションで再現した結果であ る.なお、シミュレーションにおける積分の刻 み時間を10msとし、ロボットの脚長*I=*350mm, 蹴り出し力の大きさは10N とした.

Fig. 13 に蹴り出しの有無による脚角度の時間変化の比較を示す. これは **TABLE 1** の Condition No.1 と No.3 の比較である. なお **Fig. 13 (a)**には蹴り出しのタイミングも記述した. 蹴り出しによって脚の角度変化量は増大した ことが確認でき,蹴り出しによって歩幅と歩行 速度が増大したと言える.

| Condition No. | 1 | 2 | 3 | 4(Experiment) |
|----------------------|------|------|---------|---------------|
| Angle of | | | | |
| initial ankle | | | | |
| θ_i [deg] | 5.0 | 4.0 | 2.5 | 2.5 |
| Limitation | | | | |
| ofangle | | | | |
| θ_l [deg] | ±10 | ±6 | ± 3 | ±3 |
| Distance of mass | | | | |
| <i>d</i> [mm] | 150 | 140 | 0 | 0 |
| Mass added | | | | |
| to the leg | | | | |
| m_l [kg] | 0.1 | 0.1 | 0 | 0 |
| Added angular | | | | |
| velocity | | | | |
| ω_{v} [deg/s] | 5.00 | 1.25 | 0 | 0 |
| Walk speed | | | | |
| v_{AVE} [mm/s] | 264 | 153 | 60 | 67 |
| Average stride | | | | |
| s[mm] | 139 | 81 | 31 | 35 |

TABLE 1 Simulation result and condition





(b)Without kick motion (Condition3) Fig. 13 Leg angle and kick timing

5.2. θ-ω位相平面

歩行開始からの経過時間 10s-30s における支 持脚の $\theta \omega$ の位相平面を**Fig. 14**に示す. 矢印 は時間経過による軌跡の向きを表す. ω の急増 大は,遊脚から支持脚へと切り替わった直後に おこる.各サイクルにおける $\theta \ge \omega$ の初期値 終わり値が蹴り出しをしているときに増大し ていることがわかる.なお,両脚支持状態にお いて ω が急増大し,単脚支持状態からは ω の大 きな増減がなく θ が増大している.

単脚支持状態における軌跡は支持脚のみの モデルから得た位相平面軌道 **Fig.5**と類似とな っていることから,本モデルの妥当性を確認し た.



(a) With kick motion(Condition1)



(b) Without kick motion(Condition3) Fig. 14 Comparison of the trajectory on the phase plane with limitation and without limitation

5.3. 蹴り出しのタイミング

遊脚が地面についた瞬間からその脚は支持 脚に切り替わるとする.蹴り出しと脚の接地の タイミングを **Fig. 15** に示す.



Fig. 15 Kick timing (Condition1)

5.4. シミュレーションと実機の比較

ODE によるシミュレーションの有効性を確 かめるため、蹴り出しの無い場合のシミュレー ションに与えた初期値と同じ条件で行った実 機での脚角度の時間変化の実験結果を Fig. 16 に示す. Fig. 13 (a) のシミュレーションに比べ ばらつきはあるものの、脚角度の変位幅やタイ ミングはおおよそ一致していることから、ODE によるシミュレーションは実機実験を再現し ていることを確認した.





6. 結言

本研究ではバネ質点系の振動を利用した準 受動歩行ロボットに鉛直方向の蹴り出し力と, 脚の重心調整,脚角度制限を用いることで,歩 幅が増大することと,三次元上での歩行が可能 であることを ODE のシミュレーションを用い て確認した.

支持脚の姿勢角および角速度の位相平面を 用いて蹴り出し制御を考察した. 実機と、実機を再現した ODE のモデルの脚 角度の時間変化や歩幅を比較し、 ODE シミュ レーションにより実機の再現が可能であるこ とを確認した.

今後の課題として、1.実機での蹴り出し制御 を実現するために蹴り出し制御手法をより簡 略化する.2.蹴り出し制御により歩行速度を増 大した場合の、転倒に対する安全性を高めるた めに、姿勢評価手法を取り入れる.3.バネ質点 系の周期が一定であるという特性を蹴り出し 制御に活かし、遊脚の周期と脚の振り周期の関 係に基づいて、蹴り出し力の設定方法を見出す ことが挙げられる.

参考文献

[1] S.H.Collins, A. Ruina, R.L. Tedrake and M.
Wisse: "Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers", Science, Vol.307, pp.1082-1085, 2005

[2] 池俣 吉人, 佐野 明人, 藤本 英雄,: "平衡点の 大域的安定化原理に基づくロバストな受動歩行",

日本ロボット学会誌, vol.26. No.2, pp.178-183, 2008

[3]秋元俊成,松元明弘: "蹴り足による足首駆動型 準受動歩行機械の開発", 第 56 回講習会 73 巻 733 号 pp.125-130,2007

[4]浅野文彦, 羅志偉, 山北昌毅, : "受動歩行を規範 とした2足ロボットの歩容生成と制御", 日本ロボ ット学会誌 Vol. 22 No. 1, pp.130-139, 2004

[5] "Open Dynamics Engine", <u>http://www.ode.org/</u> [6] 遠藤玄,有川敬輔,広瀬茂男,: "研究ツールと しての Open Dynamics Engine の定量評価 -4 脚歩 行機械 TITAN-VIII 実機歩行との比較-",第28回 日本ロボット学会学術講演会, AC3D-4, 2010

[7] 後藤 篤祉, 木田 智晃, 水戸部 和久,: "バネ-質点系による ZMP 制御およびその準受動歩行ロボ ットへの応用", 日本ロボット学会誌 Vol. 22 No. 1, pp.130-139, 2004

[8] M. Wisse, D. G. E. Hobbelen, R. J. J. Rotteveel, S. O. Anderson, and G. J. Zeglin.: "Ankle springs instead of arc-shaped feet for passive dynamic walkers", IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, (2006), pp. 110-116. 2006