脚先加速度情報を用いた力制御による 4脚歩行ロボットの滑り適応歩容

竹 村 裕^{*1} 出 口 将 人^{*2} 上 田 淳^{*1}
松 本 吉 央^{*1} 小笠原 司^{*1}

Slip-adaptive Walk of Quadruped Robot Based on Force Control Utilizing Acceleration Signals of the Legs

Hiroshi Takemura^{*1}, Masato Deguchi^{*2}, Jun Ueda^{*1},
Yoshio Matsumoto^{*1} and Tsukasa Ogasawara^{*1}

In this paper, we propose a new “slip-adaptive” strategy which enables a robot to walk on slippery surface. In this strategy, the gradient of the surface is estimated based on the acceleration signals measured through the accelerometer attached to each leg. A short-time force control considering the friction cone is applied to the slipping leg for slip compensation. This input consists of the position/force hybrid control of the supporting legs (i.e., a position control of kicking motion and a force control of slipping compensation). The validity of the proposed method is confirmed through the simulation and the experiment.

Key Words: Quadruped Robot, Slip-adaptive, Force Control, Dynamic Walk, Acceleration Signals

1. は じ め に

移動ロボットには大別して車輪・クローラによる移動機構を備えたものと、脚による移動機構を備えたものがある。特に脚型ロボットは、複数の足の接地状態を逐次変化させることによって移動を実現しており、すぐれた環境適応力を有する。しかし、脚による移動機構は脚が接地面に安定に接触している状態を前提に考えることが多いため、接地面において滑りが発生した場合には、様々な問題を惹起する。従来研究の多くは、滑らないことを前提に軌道計画を行うか[1][2]、あるいは、滑らないように軌道計画を行うものである[3][4]。また、4脚ロボットの各脚先に設置した光学センサを用いて滑り量を検出し、デッド・レコニングの補正に利用する研究[5]などもあるが、実際に滑ったときにどのように対処するかを論じている研究はあまり見当たらない。人は歩行中に滑りが発生したら、瞬間的に路面を押さえつけるなどの補償運動を開始して転倒回避を試みる。2, 3歩の遷移状態を経て、その環境に適応した歩容を獲得し、歩行を持続するといわれている[6][7]。多足歩行ロボットにおいては、多少の滑りが発生しても直ちに転倒する危険は少なく歩行を維

持することは可能であるが、目標地点までたどり着けなかったり、目的行動を達成できなかつたりする。また、エネルギー効率に影響を与えることは容易に考えられる。すなわち、ロボットにおいても滑りが発生した場合には何らかの補償運動が必要である。また、ロボットが摩擦の異なる環境を歩行するときには、それぞれの環境に適した歩容を行うことが望ましい。そもそも脚先の滑りは、それが路面に及ぼす力が摩擦円錐からはみ出すことにより発生する。本論文では付加的に脚先に力を加えることで、合力を摩擦円錐内に誘導し、滑りを抑える力制御による滑り適応歩容を提案する。具体的には、脚先が滑る際の脚先加速度情報より脚が接地する路面の局所的な勾配を推定し、瞬間的に路面へアクチュエータにより力を付加するというものである。シミュレーションおよび実機モデルを用いて、本提案手法の有効性を確認する。

2. 脚先力制御を用いた滑り適応歩行

2.1 滑り補償

提案する力制御を用いた滑り適応歩行の概要を Fig. 1 に示す。同図上側のループは、何らかのパターンジェネレータにより生成された歩容に追従する各軸レベルの制御ループである。下側のループが力制御ループである。このループは、脚の支持脚期間中、脚先の滑り量がある閾値を超えると得られた加速度情報から推定された路面の局所的な勾配面に対して、脚先により力を瞬間的に付加するものである。ここで $\ddot{r}$ は脚先加速度、 θ

原稿受付 2004 年 1 月 26 日

^{*1}奈良先端科学技術大学院大学

^{*2}オリンパス株式会社

^{*1}Nara Institute of Science and Technology

^{*2}Olympus Co., Ltd.

Fig. 1 Slip-adaptive walk using force control

Fig. 2 Estimating the surface gradient

と $\dot{\theta}$ は関節の角度と角速度, τ は関節トルク, J^T は胴体から各脚先への転置ヤコビアンである. 本手法は, 付加的に脚先に力を加えるために, 様々な歩容生成手法と組み合わせることが可能である.

2.2 路面の勾配推定

脚先で付加的に路面を押し付ける力を発生するのであるが, このとき力を付加する方向, すなわち, 路面の局所的な勾配が重要となる. この路面の局所的な勾配をロボットの各脚先の加速度情報から推定する. Fig. 2 に示すように脚先に生じる加速度は路面に対し平行であると仮定すると, 路面の法線ベクトルは脚先加速度に対して垂直になる. $A = [a_1, a_2, \dots, a_n]$ を観測される脚先加速度ベクトル a_i の集合, n を推定に使用するデータの数, p を推定する路面の法線ベクトル $p = [x_p, y_p, z_p]^T$ とすると式 (1) が成り立つ.

$$Ap = 0 \quad (1)$$

このとき, 推定する路面の法線ベクトル p は $A^T A$ の最小固有値に対する固有ベクトルとして求めることができる.

2.3 付加力導出と力制御

Fig. 3 に, 右後脚が滑っている場合の脚先加速度と力制御の様子を示す. なお, 本論文では以後 2 支持脚の接地点を結ぶ線を支持脚線, 路面に沿って支持脚線に垂直な線を交差線と呼ぶ. Fig. 3 を支持脚線, 交差線方向から見た図を Fig. 4(a), (b) にそれぞれ示す. このときの各パラメータは Table 1 に示す. なお, 各パラメータは各脚につき存在するが簡略のため各脚に対応する添え字は省略する.

脚先の滑りは本来二次元的で複雑なため, 本論文では支持脚線方向, 交差線方向に滑りを分配してそれぞれの方向に必要な付加力を考える. まず, 支持脚線方向の滑りは Fig. 4(a) のように滑り加速度 a_s として現れる. この滑りを押さえるために, 必要な付加力 f_s を支持脚線方向に付加する. この力は左右の

Fig. 3 Force control of supporting legs

Fig. 4 Slipping compensation

Table 1 Nomenclator

$N[N]$	Perpendicular reaction force
$F_s, F_c[N]$	Forces to the ground exerted by the leg
$a_s[m/s^2]$	Slipping acceleration along the support line
$a_c[m/s^2]$	Slipping acceleration along the cross line
$\varphi[rad]$	Angle between F_s and the normal vector
$\phi[rad]$	Angle between F_c and the normal vector
μ_d	Dynamic friction coefficient
$f_s[N]$	Additive force along the support line
$f_v[N]$	Additive force along the ground perpendicular
$f[N]$	Additive force vector $[f_s, f_v, 0]^T$
$g[m/s^2]$	Gravity
q	Joint angle vector $[\theta_p, \theta_s, \theta_t]^T$
J	Jacobian from the body to each leg

支持脚による内力となるため, 付加することは可能である. このときの滑らないための条件は, f_s と術路面法線方向への付加力 f_v を用いて式 (2) と表現できる.

$$-\mu_d(N + f_v) < F_s \sin \varphi + f_s < \mu_d(N + f_v) \quad (2)$$

一方, 交差線方向の滑りは Fig. 4(b) のように滑り加速度 a_c として現れる. このとき必要な付加力を加速度と逆向きに付加すると, 胴体の進行の妨げとなりさらなる滑りを発生するおそれがあり不適切である. よって, この場合路面法線方向に f_v 加えることで脚先に発生する合力を摩擦円錐内に誘導する. このときの滑らないための条件は, 付加力 f_v を用いて式 (3) と表現できる.

$$-\mu_d(N + f_v) < F_c \sin \phi < \mu_d(N + f_v) \quad (3)$$

また、垂直抗力 N と F_s , F_c の間には式 (4), (5) の関係が成り立つ。

$$F_s \cos \varphi = N \quad (4)$$

$$F_c \cos \phi = N \quad (5)$$

本研究では外部パラメータを用いない代わりに、滑り出す脚先を $m = \frac{N}{g}$ なる仮想的な質量を持つ物体と考える。これは、ニュートンの法則より力は $F = ma$ であり、脚先に質量がない場合力を発生させることができないためである。よって、滑り出す脚先には式 (6), (7) の力のつりあいが成り立つ。

$$F_s \sin \varphi - \mu_d N = ma_s \quad (6)$$

$$F_c \sin \phi - \mu_d N = ma_c \quad (7)$$

ここで、付加力の目標値をそれぞれ調節ゲイン k_s , k_v を用いて式 (8), (9) のようにおく。

$$f_s = -k_s ma_s \quad (8)$$

$$f_v = k_v \frac{ma_c}{\mu_d} \quad (9)$$

以上より式 (2), (3) を k_s , k_v について展開すると、最終的に式 (10)~(13) で得られる四つの連立不等式が導出される。

$$(\tan \varphi - \mu_d)k_s + (\tan \phi - \mu_d)k_v - \tan \varphi + \mu_d > 0 \quad (10)$$

$$(\tan \varphi - \mu_d)k_s - (\tan \phi - \mu_d)k_v - \tan \varphi - \mu_d < 0 \quad (11)$$

$$(\tan \phi - \mu_d)k_v - \tan \phi + \mu_d > 0 \quad (12)$$

$$-(\tan \phi - \mu_d)k_v - \tan \phi - \mu_d < 0 \quad (13)$$

これらの不等式を調節ゲイン k_s , k_v 平面において図示すると Fig. 5 が得られる。

ゲイン k_s , k_v は余分な力を発生しないためにできるだけ小さいことが望ましく、この問題は線形計画問題であることが分かる。この式中 N はセンサから得られ、 ϕ , φ は脚先が路面に及ぼす力の法線方向とのなす角であるが、およそ路面の交差線方向、支持脚線方向の傾斜角に等しいので未知のパラメータは動摩擦係数 μ_d のみである。動摩擦係数の値は足裏の構造と路面

Fig. 5 No-slip conditions (k_s , k_v gain plane)

に依存し、現実的に滑りが発生しやすい範囲はそれほど広くはない。しかも、動摩擦係数は静止摩擦係数より小さいので、実際には余裕を持った範囲になっている。つまり、滑らないための十分条件となる調整ゲイン k_s , k_v を求めることができる。また、この付加力に必要な関節トルクは以下の式 (14) より胴体から各脚先への転置ヤコビアンを用いて計算できる。

$$\tau = J^T(q) f \quad (14)$$

3. 脚先力制御アルゴリズムの検証

3.1 シミュレーション条件

本手法の有効性を確認するために、シミュレーション実験を行う。シミュレーションには MathEngine を利用して開発した三次元動力学シミュレーション環境 [8] を使用する。ロボットのモデルは実機モデルである TITAN-III [9] (Fig. 6) の値を使用する。このロボットは各 3 自由度の脚を 4 本、計 12 自由度を有する。ロボットの脚のリンクモデルと主な仕様を Fig. 7 と Table 2 に示す。前述した力制御による滑り適応歩容の有効性を確認するため、静止摩擦係数 $\mu = 0.2$ の滑りやすい傾斜角なしの平面において、提案する力制御による脚先付加力を加えた歩容と脚先の力制御を用いない歩容の 2 種類のシミュレーションを行う。ロボットは未知の路面として脚先加速度情報を基に勾配推定を行う。脚先加速度情報にはフィルタを用いてノイズの影響を削減する。ただし、フィルタの時定数は歩行周期や摩

Fig. 6 Real robot TITAN-VIII

Fig. 7 Link model of robot

Table 2 Link parameters of TITAN-VIII

Body	400×600×250[mm], 11.6[kg]
First link	100×100×100[mm], 3.0[kg]
Second link	70×70×150[mm], 0.9[kg]
Third link	40×40×200[mm], 0.5[kg]

Table 3 PID gain of each joint control

		Swing	Support
First joint	P[N/m]	15	100
	I[Ns/m]	0	1
	D[N/ms]	1.2	1.2
Second joint	P[N/m]	20	150
	I[Ns/m]	0	1
	D[N/ms]	1.5	1.5
Third joint	P[N/m]	10	120
	I[Ns/m]	0	1
	D[N/ms]	1.5	1.5

Fig. 8 Simulation of the slip-adaptive walk using force control

擦係数などにも依存して決まるので、若干のチューニングが必要である。

ここで参照したトロット歩容は歩行周期 2 [s]、歩幅は 0.15 [m] で、6 [s] 後の目標 X 座標が 0.825 [m] の直進歩行である。なお、各関節の PID ゲインは **Table 3** を用いた。これは整地歩行時には十分目標角度に追従する可能な値である。

以後本章では右前脚に関して考察する。右前脚は 0~1 [s]、2~3 [s]、4~5 [s] のとき支持脚となり、それ以外は遊脚となる。

3.2 シミュレーション結果

Fig. 8 に、脚先力制御を用いた場合の滑り適応歩行のシミュレーションの様子を示す。**Fig. 9** は右前脚に加えられた付加力、**Fig. 10, 11** はそれぞれ右前脚、胴体の移動量を示す。また、**Fig. 12, 13** は力制御なしのときと力制御ありのときの右前脚先端における加速度の推移を示す。

Fig. 10 より、右前脚は支持脚期間中である 2~3 [s]、4~5 [s] において閾値を超える滑りが発生し、**Fig. 9** に示す力が付加されたことが分かる。その結果、4~5 [s] の間では滑りの補償量は比較的小さいものの、2~3 [s] 間では滑り量が約 1/2 まで改善されており、力制御の有効性が確認できる。また、このこと

Fig. 9 Additive forces of f_s and f_v **Fig. 10** X-axis moving distances of the right front leg **Fig. 11** X-axis moving distances of the body **Fig. 12** The accelerations of the leg without force control **Fig. 13** The accelerations of the leg with force control

は **Fig. 12, 13** より加速度レベルにおいても確認できる。つまり、力制御が作用している区間 2~3 [s]、4~5 [s] において力制

Fig. 14 The experiment of the slip-adaptive walk using force control

御なしの場合、この期間が右前脚は支持脚期間であるにもかかわらず支持脚線方向、交差線方向ともに同じ方向に加速度が発生している。これはある方向に滑っていることを意味した結果になっている。一方、力制御ありの場合はこの期間中、両方向とも加速度が正負に跨って振動している。これは支持脚の滑りを抑えるため力制御が作用していると考えられる。

さらに Fig. 11 より、滑りやすい路面のため胴体の移動量は力制御なしでは目標の 40%しか到達できなかったが、力制御ありの場合は支持脚時における滑りが低減されていることから 52%に増加していることが分かる。

4. 実機モデルでの歩行実験

力制御による滑り適応歩容を実機モデル (Fig. 6) に応用して、提案手法の実現性を確認する。実機モデルには、PC (CPU: Pentium III 450 MHz, OS: RT-Linux, I/O ボード: RIF-01) とモータドライバを胴体上部、バッテリーを腹部に搭載した。すべての計算は搭載した PC により行われ、完結している。また、各脚先には加速度センサ、各脚の裏には FSR による接地センサ、胴体中心には傾斜センサ、3 軸ジャイロセンサを取り付けている。

実機モデルで用いる歩容は、シミュレーションと同じ、トロット歩容で、歩行周期 2 [s]、歩幅は 0.15 [m] で、10 秒間の直進歩行を行った。ただし、シミュレーションとは異なり歩行パターンの生成・各関節の制御は CPG (Central Pattern Generator) と反射機構により行い [10]、脚先の付加的な力はシミュレーション同様に力制御を用いる。路面は静止摩擦係数約 0.2 の滑りやすい傾斜角なしの平面である。Fig. 14 に力制御を用いた場合の実験の様子を示す。

Fig. 15 に接地した瞬間から支持動作中の右前脚四歩目の様子を示す。図中の一点差線は右前脚の脚先中心を表し、メモリ

(a) Without force control

(b) With force control

Fig. 15 Slip of the front right leg during the supporting phase

Fig. 16 The accelerations of the right front leg

の間隔は 0.1 [m] である。力制御なしの場合 (Fig. 15 (a)) では、脚先が支持動作中に徐々に後方に滑っていることが分かる。4 歩目の右前脚では 0.07 [m] ほど後方に滑っている。これに対して、力制御を用いた場合 (Fig. 15 (b)) では、脚先は支持動作中ほとんど滑ってないことが分かる。また、支持脚時の脚先加速度を Fig. 16 に示す。力制御を用いた場合には加速度が正負両方に発生しており、力制御により滑りを抑制している様子が分かる。全体的に、力制御を用いた場合の方が加速度が減少している。つまり、滑りが抑えられていることが分かる。さらに、力制御を用いない場合には、各脚が不規則に滑ってしまい、直進することが困難であった。Fig. 17 に力制御なしと力制御ありのときの胴体軌道を示す。Fig. 17 (a) のように力制御なしの場合には滑りの影響により直進移動という目標の行動を達成することができなかった。しかし、提案手法を用いると、Fig. 17 (a) に示したように目標とする直進移動を実現している。すなわち、力制御により滑りが抑えられ、結果として直進性も向上したことが観測された。

5. おわりに

本論文では、歩行ロボットの脚先加速度情報を利用し、脚先滑りを適応的に補償する手法を提案した。具体的には、脚先の加速度情報より局所的な路面勾配を推定し、この情報から路面に水平な位置制御 (蹴り出し動作) と同時に、即座に路面へ力

(a) Without force control

(b) With force control

Fig. 17 Trajectory of the body

を付加する力制御を用いた滑り適応歩容を実行するアルゴリズムを提案した。力制御により、脚先が地面に加える力を摩擦円錐内へ引き戻し、滑りを防ぐ効果がある。

本手法の検証に4脚歩行ロボット TITAN-VIII をモデルにシミュレーションを行った結果、脚先の滑りを抑えることができ、移動距離が12%向上し、本手法の有効性を確認した。また、本手法を実機モデルに応用し、実機モデルでも滑りを抑えるのに効果があることを確認した。本手法の特長は脚先加速度と脚にかかる垂直抗力のみ用いる点にあり、付加的に力を加えるために他の歩容生成手法と組み合わせることが可能である。本論文ではトロット歩容を採用したが、他の歩容についても基本的に支持脚線が定義できれば適応可能である。また、多脚ロボットに

おいても適宜支持脚線を定義すれば本手法を展開可能である。

本手法は理論的に斜面にも適応可能であり、斜面や脆弱な路面での応用が期待される。本手法は従来外乱として扱われていた滑りに対して積極的に対応する手法を提案している。さらに、滑り情報のみ利用して、路面適応歩行を実現したことは、滑り情報の重要性、歩行において脚先の水平方向性分力の重要性を示唆している。

参考文献

- [1] C.M. Chew, J. Pratt and G. Pratt: "Blind Walking of a Planar Bipedal Robot on Sloped Terrain," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.381-386, 1999.
- [2] 山口, 高西, 加藤: "路面形状に偏差のある環境における2足歩行制御—未知の凹凸路面に対する適応歩行の実現—", 日本ロボット学会誌, vol.13, no.7, pp.1030-1037, 1995.
- [3] 藤本, 河村: "床との衝突および摩擦を考慮した2足歩行ロボットの三次元運動シミュレーション", 日本ロボット学会誌, vol.15, no.6, pp.857-863, 1997.
- [4] 梶田, 谷: "実時間路面形状計測に基づく動的2足歩行の制御", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.7, pp.1062-1069, 1996.
- [5] H. Igarashi and M. Kakikura: "Slip Detection and Correction for Quadruped Robots Using Optical Sensors," Proceedings of IEEE International Conference on Advanced Robotics, pp.1026-1031, 2003.
- [6] R. Myung: "Use of backward slip to predict falls in friction test protocols," International Journal of Industrial Ergonomics, vol.32, no.5, pp.319-329, 2003.
- [7] J. You, Y. Chou, C. Lin and F. Su: "Effect of slip on movement of body center of mass relative to base of support," Clinical Biomechanics, vol.16, no.2, pp.167-173, 2001.
- [8] H. Takemura, J. Ueda, Y. Matsumoto and T. Ogasawara: "A study of a gait generation of a quadruped robot based on rhythmic control-optimization of CPG parameters by a fast dynamics simulation environment," Proceedings of 5th International Conference on Climbing and Walking Robots, pp.759-766, 2002.
- [9] 広瀬, 有川: "研究用プラットフォームとしての普及型歩行ロボット TITAN-VIII の開発", 日本ロボット学会誌, vol.17, no.8, pp.1191-1197, 1999.
- [10] 竹村, 上田, 松本, 小笠原: "神経振動子経由の左右揺動運動・姿勢反射を用いた4脚ロボットの三次元適応歩行", 日本ロボット学会誌, vol.22, no.4, pp.528-534, 2004.

竹村 裕 (Hiroshi Takemura)

1976年8月4日生。2001年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。2003年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科研究員。2004年ドイツ、カールスルーエ大学客員研究員となり現在に至る。脚式移動ロボットの研究、生体計測研究に従事。工学博士。(日本ロボット学会正会員)

出口将人 (Masato Deguchi)

1977年10月20日生。2000年名古屋大学工学部機械航空工学科機械システム工学専攻卒業。2003年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。脚式移動ロボットの研究、非線形制御の研究に従事。同年オリンパス株式会社勤務となり現在に至る。

上田 淳 (Jun Ueda)

1971 年 6 月 11 日生。1996 年京都大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了。1996～2000 年三菱電機株式会社先端技術総合研究所勤務。2002 年京都大学大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了。同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手となり現在に至る。マニピュレーションの研究に従事。工学博士。日本機械学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)

小笠原司 (Tsukasa Ogasawara)

1955 年 10 月 16 日生。1983 年東京大学大学院工学研究科情報工学専門課程博士課程修了。同年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所入所。1993～1994 年ドイツ、カールスルーエ大学客員研究員。1998 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授となり現在に至る。知能ロボットの研究に従事。工学博士。計測自動制御学会、情報処理学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)

松本吉央 (Yoshio Matsumoto)

1970 年 8 月 21 日生。1998 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。同年 4 月オーストラリア国立大学研究員。1999 年 1 月奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。2002 年 1 月同助教授となり現在に至る。ロボットビジョンおよびヒューマンインタフェースの研究に従事。工学博士。電子情報通信学会会員。

(日本ロボット学会正会員)