二足歩行ロボットの重心加速度制御による踏み出し動作

学生員 鈴木 和樹* 非会員 田崎 剛*
正員 柴田 昌明**

Stepping Forward Action for Biped Robot Based on Acceleration Control of the Center of Mass

Kazuki Suzuki*, Student Member, Go Tasaki*, Non-member, Masaaki Shibata**, Member

In this paper, we propose a novel approach for stepping forward action of biped robot with minimum kicking force. In walking or starting to walk, the general biped robot kicks the ground with its own hind leg as well as human being does. The condition of the ground often restricts the gait because of stiffness, slipperiness and so on. In order to surmount the difficulty on stepping forward action, we introduce the redundant legged biped robot, which has 4 degree-of-freedom on each leg. Our robot enables to move its tip position and its center of mass (COM) position independently. Controlling COM acceleration without moving its tip position realizes the stepping forward action with little kicking force. The physical experimental results show the significant validity of the proposed approach.

キーワード：冗長脚，二足ロボット，重心加速度制御，倒立振り子モデル，非干渉統合制御

Keywords: Redundant Leg, Biped Robot, Acceleration Control of the Center of Mass, Inverted Pendulum Model, Unified Decoupling Control System

1. まえがき

本論文では，冗長構造を持つ二足歩行ロボットを用い，ロボットの重心加速度制御による両脚支持期から単脚支持期へ移行を行う踏み出し動作の新しい手法について述べる。

二足歩行ロボットの歩容についてはこれまで，さまざまな研究が報告されている。たとえば，ロボットにエネルギー消費の小さい歩行をさせるために，受動関節を持つ歩行ロボットが提案されている⁽¹⁾。ロボットに凹凸面上で安定歩行をさせるためには，倒立振り子モデルや ZMP (Zero Moment Point) を考慮した歩行をロボットに行わせる必要がある⁽²⁾。しかし，歩行時の踏み出し動作について注目している研究はあまりない。踏み出し動作に際しては，路面の固さやすべり具合などの特性を考慮する必要がある。

人間は路面の特性を高い精度で知ることなく，視覚情報から大まかな路面の特性を把握している⁽³⁾。そして，足部が接地した後に，着地路面に関する詳細な情報を取得し，その情報を基に着地路面に対する踏み出し動作を実現してい

る。これに対し，二足歩行ロボットはジャイロセンサや傾斜角センサを用いても，着地時に生じる衝撃やロボット自身の振動により，着地路面に関する詳細な情報を取得するのは難しい。

本論文では，慣性力を利用して最小限の踏み出し力で歩行する手法を提案する。脚先端から地面に強い力を加えて転倒モーメントを発生し，ロボットを前進させるのではなく，脚動作によって生じる慣性力により転倒モーメントを発生させ，踏み出し動作を実現する。この踏み出し動作では接地面に作用する力が小さいので，路面特性の影響や制約を最小限に抑えた歩行を開始・継続することができる。

慣性力は二足歩行ロボットの脚重心を制御して発生させる。我々の開発した二足歩行ロボットは冗長構造を持っているので，非干渉統合制御に基づき，腰と脚先端の相対位置を変化させずに重心の加速度を制御することができる⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。脚重心に特定の加速度指令を与えることで慣性力が生じる。これによりロボット全体の転倒モーメントが発生し，踏み出し動作が実現される。

2. ロボットの構造と制御システム

図 1 に本研究で使用するロボットとその構造を示す。表 1 はロボットの各リンクのパラメータを表している。ロボットは片脚 4 自由度，両脚で 8 自由度をもち，各関節には DC サーボモータが取り付けられている。各モータについて右脚の上から 0, 2, 4, 6 番，左脚の上から 1, 3, 5, 7 番と称

* 成蹊大学大学院工学研究科電気電子工学専攻
〒180-8633 東京都武蔵野市吉祥寺北町 3-3-1
Department of Electrical Engineering and Electronics, Graduate school of Engineering, Seikei University
3-3-1, Kichijoji-Kitamachi, Musashino, Tokyo 180-8633

** 成蹊大学工学部電気電子工学科
Department of Electrical Engineering and Electronics,
Faculty of Engineering, Seikei University

図 1 二足歩行ロボット

Fig. 1. Redundant biped robot.

表 1 ロボットのパラメータ
Table 1. Structural parameters.

	Length[m]	Mass[kg]
Link0	0.11	3.96
Link1	0.30	3.45
Link2	0.30	3.51
Link3	0.30	3.44
Link4	0.11	3.04
TOTAL	1.12	34.8

する。動作方向はサジタル平面のみを考慮しており、非拘束のガイドレールを施して左右に倒れないようにしている。

ロボットの各関節の制御指令生成には PC (Celeron 400 [MHz]) を用いた。PC からの電流指令は D/A ボードを介して DC サーボドライバへ送られる。関節動作についてはインクリメンタルエンコーダより角度情報がパルスとして PC に送られる。制御周期は 1 [ms] である。

3. 動作設計

ロボットは、小さな踏み出し力で転倒モーメントを発生させ、踏み出し動作を実現する。脚重心に特定方向の加速度を一定時間与えた後、それとは逆方向のより大きな加速度を与えると慣性力が生じる。その慣性力を利用し、転倒モーメントを発生させる。重心加速度制御は ZMP を操作していることと等価といえるが、本論文では ZMP を制御操作量として考慮してはいない。

まず、図 2 に示す前脚先端とロボットの全体重心を仮想リンクでつないだ仮想倒立振り子モデルを考える。仮想倒立振り子モデルは前脚先端を支点として回転する。M は重心の等価質量、L は仮想リンクの長さ、 ϕ は振り子の倒れ込み角度を表している。支点である前脚先端には次式の重力トルク u が作用する。

$$u = L \cdot M \cdot g \sin \phi \dots \dots \dots (1)$$

図 2 倒立振り子モデル

Fig. 2. Inverted pendulum model.

図 3 一連動作

Fig. 3. Motion of the biped robot.

一方、後脚では腰位置を変化させずに脚姿勢を変化させ、後脚重心を変位させる。ロボットの進行方向を x 軸とし、後脚重心には以下の加速度指令を与える。

Step 1 ロボットの後脚重心に x 軸方向の加速度指令 $\ddot{x}_{g1}^{cmd}$ を与えて後脚重心を加速させる。(図 3(a))

Step 2 後脚重心を前方に加速し終えた後、 $-x$ 軸方向に最初に与えた加速度指令の約 7 倍の加速度指令 $\ddot{x}_{g2}^{cmd}$ を与える (図 3(b))。このとき、後脚重心の移動方向 y 成分が負になる姿勢を用いる。

この一連の動作によってロボット全体の重心に慣性力 F を発生させる。正方向の慣性力 F は負方向の加速度指令 $\ddot{x}_{g2}^{cmd} < 0$ により発生し、次式で表される。

$$F = -M \cdot \ddot{x}_{g2}^{cmd} \dots \dots \dots (2)$$

慣性力 F によりトルク U が振り子の支点に作用する。トルク U は次式となる。

$$U = L \cdot F \cdot \cos \phi \dots \dots \dots (3)$$

$u < U$ の関係になる加速度指令 $\ddot{x}_{g2}^{cmd}$ を与えれば倒立振り子は図 3(c) のように倒れ込む。加速度指令 $\ddot{x}_{g2}^{cmd}$ の条件は次式となる。

図4 重心移動と力の作用関係

Fig. 4. Connection between move the COM and the force.

$$\ddot{x}_{g2}^{cmd} < -g \cdot \tan \phi \dots\dots\dots (4)$$

この条件を基に加速度指令を実験的に求める。

後脚重心に与える加速度指令は x 軸方向だが、ロボット全体の重心はサジタル平面内を2次元的に移動する(図4(a))。Step 1 の場合、重心加速移動の y 軸成分 $\ddot{y}_{g1}$ を考えると、足裏には後脚重心の質量 m のほかに $-y$ 軸方向の慣性力 f' が加わる(図4(b))。

$$F_1 = mg + f' \dots\dots\dots (5)$$

$$f' = -m \cdot \ddot{y}_{g1} \dots\dots\dots (6)$$

Step 2 の場合、重心加速移動の $-y$ 軸成分 $\ddot{y}_{g2}$ を考えると、足裏にはロボットの重量と y 軸方向の慣性力 f'' が加わる(図4(c))。

$$F_2 = mg - f'' \dots\dots\dots (7)$$

$$f'' = -m \cdot \ddot{y}_{g2} \dots\dots\dots (8)$$

足下に力センサを設置すれば、その慣性力と後脚重心の質量による重力 mg の合力 F_1, F_2 が測定される。力センサの値が $F_2 \leq 0$ となれば、足は地面から離れていることになる。

4. 制御理論

ロボットを動作させる制御系として、ロボットの脚先端と重心を互いに干渉せずに独立制御できる非干渉統合制御を導入する⁽⁶⁾。図5に非干渉統合制御を示す。脚先端と重心の動作に必要な参照トルク $\tau_w^{ref}, \tau_n^{ref}$ を統合して、合成参照トルク τ^{ref} を生成している。

$$\tau^{ref} = \tau_w^{ref} + \tau_n^{ref} \dots\dots\dots (9)$$

この参照トルクに基づいて加速参照値が算出される。

作業空間外乱オブザーバではロボットの姿勢制御において生じる力次元の非線形成分や外乱を推定する。そして、補償力としてフィードフォワードさせることで外乱成分を

図5 非干渉統合制御

Fig. 5. Unified decoupling control system.

抑制し、所望通りに脚先端動作を制御する。脚先端位置偏差および先端速度偏差に比例した力を参照力 F_w^{ref} とするPD制御則を使用している。脚先端位置指令を x^{cmd} 、脚先端位置を x 、先端速度指令を $\dot{x}^{cmd}$ 、先端速度を $\dot{x}$ とすると、参照力 F_w^{ref} は次式で表される。

$$\begin{aligned} F_w^{ref} &= M_{vn} \cdot \ddot{x}^{ref} \\ &= M_{vn} \cdot \{K_p(x^{cmd} - x) + K_v(\dot{x}^{cmd} - \dot{x})\} \end{aligned} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 K_p は位置ゲイン、 K_v は速度ゲインである。また、 M_{vn} は作業空間上の等価質量のノミナル値である。

零空間外乱オブザーバ部分では脚姿勢に対する干渉トルク定・補償し、所望通りに重心位置を制御する。本手法では重心加速度を制御するため、重心加速度指令を $\ddot{x}_g^{cmd}$ とし、重心の参照力 F_n^{ref} を(11)式で与える。

$$F_n^{ref} = M_{gn} \cdot \ddot{x}_g^{cmd} \dots\dots\dots (11)$$

ここで M_{gn} は零空間上の等価質量のノミナル値である。(11)式の $\ddot{x}_g^{cmd}$ には前章で述べた動作設計の Step 1, Step 2 にしたがって加速度指令を与える。

5. 実験

5.1 初期姿勢 実際に二足歩行ロボットを動作させる前に、次の3つの条件をもとにロボットの初期姿勢を検討した。

- 条件1 腰と脚先端の位置を固定したとき、後脚重心の x 軸方向の移動範囲が広い姿勢。
- 条件2 後脚重心に x 軸負方向の加速度指令を与えたとき、後脚重心の移動方向 y 成分が負になる姿勢。
- 条件3 倒立振りモデルの倒れこみ角 ϕ の初期角度がなるべく小さく、ロボットの全体重心にかかる重力トルク u が小さい姿勢。

条件1より、後脚重心の加速時間を長くとることができる。条件2より、Step 2の加速度指令を与えたとき、後脚重心の y 成分の移動方向が負方向になることで、より大き

(a) Adopted posture (b) Compared posture

図 6 後脚の初期姿勢比較

Fig. 6. Initial posture (hind leg).

表 2 関節角度

Table 2. Joint angles.

	θ_0	θ_2	θ_4	θ_6
joint angle(a)[deg]	-4.82	-41.99	70.36	-23.55
joint angle(b)[deg]	30.0	-84.0	72.0	-18.0

な転倒モーメントを得る。条件 1, 2 より後脚の初期姿勢を決め、条件 3 よりロボット全体の初期姿勢を決めた。

シミュレーションにより後脚重心の移動範囲と移動方向を調べたところ、条件 1, 2 を満たす姿勢は図 6(a) になった。図 6(a) の姿勢を図 6(b) の姿勢と比較してみる。各関節角度を表 2 に示す。それぞれの後脚重心の移動範囲は図 7 になる。姿勢 (a) の重心移動範囲が $-0.10 \sim 0.00$ [m] なのに対し、姿勢 (b) の重心移動範囲は $0.011 \sim 0.085$ [m] なので、姿勢 (a) の方が 1.4 倍の移動範囲がある。また、条件 2 については後脚重心の y 成分の移動方向が負方向となり条件を満たしていた。

次に、条件 3 を満たす前脚姿勢を検討した結果、前脚の初期姿勢は図 8 となり、各関節角度は上から $-23.90, 67.63, -59.86, 16.13$ [deg] となった。この前脚と図 6(a) の後脚の初期姿勢を組み合わせたロボット全体図が図 9 となる。倒立振子モデルの倒れこみ角度 ϕ 、仮想リンクの長さ L はそれぞれ 6.0 [deg], 0.543 [m] である。

5.2 実験方法 後脚重心の加速度指令として、はじめに x 軸方向に 3 [m/s²] の加速度を 0.75 [s] 与え、その直後 $-x$ 軸方向に 20 [m/s²] の加速度を 0.35 [s] 与えて慣性力を発生させる。前脚の第 4 関節 (θ_7) の電流値はゼロとし、自由に回転する状態にした。よって、転倒トルクが発生した後、ロボットは図 3 のように前脚の第 4 関節を中心として前方に倒れ込む。実験で用いたパラメータを表 3 に示す。各パラメータ値は実験的に求めた。

見た目だけではロボットが慣性力によって倒れているのが確認できないため、後脚の足の下に力センサを設置し、重

(a) COM position (adopted posture)

(b) COM position (compared posture)

図 7 重心移動範囲の比較

Fig. 7. Comparison of range of COM position.

図 8 前脚初期姿勢

Fig. 8. Initial posture (fore leg).

図 9 初期姿勢

Fig. 9. Initial posture.

表 3 パラメータ

Table 3. Parameter.

Jointspace Disturbance Observer Gain		40.0	
Workspace Disturbance Observer Gain		50.0	
Null-space Disturbance Observer Gain		120.0	
Nominal Value of Inertia Moment			
Hind Leg[kg·m ²]		Fore Leg[kg·m ²]	
1st. Joint	0.17	1st. Joint	0.18
2nd. Joint	0.13	2nd. Joint	0.14
3rd. Joint	0.09	3rd. Joint	0.10
4th. Joint	0.05	4th. Joint	0.05

(a) COM position (x-direction)

(b) COM position (y-direction)

図 10 後脚の重心位置

Fig. 10. COM position of hind leg.

心移動時の足裏に加わる力を計測する。これによりロボットが足を踏み込んで倒れていないことが確認できる。慣性力で倒れ込む場合には足裏に加わる力は小さい。また、ロボット全体の重心位置の x 成分が支持多角形の範囲内ならば、ロボットがバランスを崩して倒れ込んでいないことになる。

5.3 実験結果 実験はロボットを初期姿勢にしたところから開始する。実験開始後 0.5 [s], 前節で述べた加速度指令を与えたところ、ロボットは理論どおり前方に倒れ込んだ。

図 10 は重心加速度指令と腰を基準として計算した後脚重心位置の x 成分と y 成分をそれぞれ表している。図 10(a) より、実験開始後 0.9 [s], 重心が前方に移動し、 $-x$ 軸方向の加速度指令を与えると、重心が後方に移動している。図 10(b)

図 11 足裏にかかる力

Fig. 11. Force to the sole.

図 12 関節角度 (θ_7)Fig. 12. Joint angle (θ_7).

図 13 全体の重心位置

Fig. 13. Whole COM position.

より、実験開始後 1.1 [s], 重心が上方に移動し、 $-x$ 軸方向の加速度指令を与えると、重心が下方に移動している。

図 11 は力センサを用いて後脚先端にかかる力を測定した結果である。 x 軸方向の加速度指令を与えているとき、 $-y$ 軸方向の力はロボットの重量以外の加重は確認されず、踏み込み力がほとんど発生していないことがわかる。つまり、後脚が地面を踏み込んで倒れていないことがわかる。 $-x$ 軸方向の加速度指令を与えた後、慣性力が生じて倒れ込み始めたため、後脚の足裏にかかる力が小さくなっている。つまり、後脚が浮いた状態になっている。

図 12 は前脚の第 4 関節 (θ_7) の角度変化を表している。図 12 より、ロボットが倒れ始めたのは実験開始約 1.6 [s] 後と読み取れる。図 13 は前脚先端を基準として計算され

たロボット全体の重心位置の変化 (x 成分) を表したグラフである。点線で囲まれた部分は支持多角形の範囲を表している。実験開始後約 1.6 [s] でロボットが倒れて両脚支持期から単脚支持期に移行したので、支持多角形の範囲が変化している。常に全体重心が支持多角形の範囲内にあるので、ロボットはバランスを崩して倒れた訳ではないことがわかる。

6. ま と め

本研究では、二足歩行ロボットに重心加速度指令を与えることにより発生する慣性力を利用した歩行の踏み出し動作を提案した。力センサの波形より、後脚の踏み出しは最小限の力で行われた。また、ロボットの全体重心は支持多角形の範囲内にあり、バランスの崩れがロボットを倒れ込ませる原因ではないことも確認した。

さらに、重心加速度制御を用いた踏み出し動作に脚の運びと着地を考慮することで、路面の特性によらず歩行することができると考えられる。

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金を受け実施された。援助いただきましたことに謝意を表します。

(平成 15 年 10 月 23 日受付, 平成 16 年 4 月 20 日再受付)

文 献

- (1) K. Osuka: "Legged Robots and Control Scheme based on a Sense of Passive Dynamic Walking", *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.20, No.3, pp.233-236 (2002-3) (in Japanese)
大須賀公一: 「受動的歩行を規範とした歩行ロボットと制御」, 日本ロボット学誌, 20, 3, pp.233-236 (2002-3)
- (2) S. Kajita and K. Tani: "Dynamic Biped Walking Control on Rugged Terrain Using the Linear Inverted Pendulum Mode", *SICE*, Vol.31, No.10, pp.1705-1714 (1995-10) (in Japanese)
梶田秀司・谷 和男: 「線形倒立振りモードを規範とする凹凸路面上の動的 2 足歩行」, 計測自動制御学会論文集, 31, 10, pp.1705-1714 (1995-10)
- (3) J. Yamaguchi, N. Kinoshita, A. Takanishi, and I. Kato: "Development of a Biped Walking Robot Adapting to an Unknown Uneven Surface", *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.14, No.4, pp.546-559 (1996-4) (in Japanese)
山口仁一・木下 昇・高西淳夫・加藤一郎: 「路面形状に偏差のある環境に対する適応能力を持つ 2 足歩行ロボットの開発」, 日本ロボット学誌, 14, 4, pp.546-559 (1996-4)
- (4) M. Shibata, G. Tasaki, and T. Natori: "Impact Force Suppression for Redundant Legged Biped Robot Based on Unified Decoupling Control Method",

Proceedings of 2002 JIASC, Vol.1, pp.231-236 (2002) (in Japanese)

柴田昌明・田崎 剛・名取 猛: 「非干渉統合制御に基づく冗長双脚ロボットの着地衝撃力低減」, 平 14 電気学会産業応用部門大会講演文集, 1, pp.231-236 (2002)

- (5) G. Tasaki, T. Natori, and M. Shibata: "Landing impact force reduction on redundant leg biped robot by center of gravity control", The Papers of Technical Meeting on Industrial Instrumentation and Control, IEE Japan, IIC-02-15, pp.1-6 (2002) (in Japanese)
田崎 剛・名取 猛・柴田昌明: 「冗長度を有する二足ロボットの重心制御による着地衝撃力低減」, 産業計測制御研資, IIC-02-15, pp.1-6 (2002)
- (6) M. Shibata, G. Tasaki, and T. Natori: "Impact Force Suppression for Redundant Legged Biped Robot Based on Unified Decoupling Control Method", *IEEJ Trans. IA*, Vol.123, No.6, pp.703-709 (2003-6) (in Japanese)
柴田昌明・田崎 剛・名取 猛: 「非干渉統合制御に基づく冗長双脚ロボットの着地衝撃力低減」, 電学論 D, 123, 6, pp.703-709 (2003-6)

鈴木 和 樹 (学生員) 2003 年 3 月成蹊大学卒業工学部電気電子工学科卒業。同年 4 月成蹊大学工学研究科電気電子専攻修士課程入学。現在、二足歩行ロボットに関する研究に従事。

田崎 剛 (非会員) 2001 年 3 月成蹊大学工学部電気電子工学科卒業。2003 年 3 月成蹊大学工学研究科前期修士課程修了。同年 4 月三菱重工業 (株) 入社。現在に至る。在学中、二足歩行ロボットに関する研究に従事。

柴田 昌 明 (正員) 1996 年 3 月慶応義塾大学理工学研究科博士課程修了。同年 4 月より (株) 明電舎製品開発研究所。1998 年 4 月より成蹊大学工学部電気電子工学科講師。1999 年 4 月より同助教授 (現職)。博士 (工学)。二足歩行ロボット、画像処理に基づく物体認識に関する研究に従事。IEEE, 日本ロボット学会に所属。