4 足歩行ロボットの動的制御方式に関する一考察

古 莊 純 次*・佐 野 明 人*・岡 島 羊 佑*

A Consideration on a Dynamic Control Method for Quadruped Walking Robots

Junji FURUSHO*, Akihito SANO* and Yosuke OKAJIMA*

There are many kinds of control methods for quadruped walking robots. In this paper, we deal with a walking control method in which the robot system can utilize the gravity effect very skillfully and the energy for walking can be saved. Using computer simulation, we studied the walking controlled by this method from some aspects such as, the mean walking speed, the variation of walking speed, the stability. It is shown that the step width and the bending angle of the knee joints at the touchdown are important factors for the walking control.

Key Words: quadruped walking robot, dynamic walking, trot, hierarchical control

1. はじめに

本研究では4足歩行ロボットを制御する際の重要な要因について検討し、それらの要因が歩行にどのような影響を与えるかについて解析する。解析は、進行方向を含む地面に垂直な2次元平面内の運動について行う。歩行様式としては、比較的高速な歩行が可能であるトロット歩行（デューティ比は0.5とする）について研究する。

歩行とは、重力場を巧みに利用した移動形態であり、その制御方式としては、種々の方法が考えられる。本研究ではつぎのような制御方式を採用した場合について検討する。遊脚の全関節および支持脚の膝については局所フィードバックを行い適当な目標値を与えて制御し、支持脚腰については自由回転とする。このようにすると、倒立振子モードが現れ、重力場における自然な前進運動が可能となる。

この制御方式を用いると、ロボットの運動エネルギーは、重力場の影響により、自然に増減を繰返し、歩行はエネルギー損失の少ないものとなる。実際の歩行制御においては、状況に応じて種々の制御方式を組み

合せて制御が行われると考えられる。本研究で議論する制御方式も、4足歩行ロボットの一つの基本的な制御方式である。そこで、現在各方面で進められている歩行ロボットの開発のためにも、その性質を明らかにしておくことは重要であると考えられる。

2. 運動方程式および支持脚切り換えの式

対角線上の一对の脚が接地しているトロット歩行において、ロボットは Fig. 1 に示すように2点で接地する。進行方向を含む地面に垂直な2次元平面内でのロボットの運動を考えると、1点で着地している状態では9自由度システムだが、2点で接地する状態では拘束条件式を満たす必要があるので7自由度システムになる。B点における拘束条件 ($w(\theta)=0$) の付加されたラグランジェの運動方程式よりロボットの運動はつぎのように表わされる²⁾。

$$A(\theta)\ddot{\theta} + B(\theta)\dot{\theta} + g(\theta) = U^T(\theta)\Gamma + DT \quad (1)$$

ここで、

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_9]^T, \quad U(\theta) = \frac{\partial w}{\partial \theta}$$

$$\Gamma = -(UA^{-1}U^T)^{-1}[\dot{U}|U]\left\{\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ -A^{-1}(B\dot{\theta} + g) \end{bmatrix}\right.$$

$$\left. + \begin{bmatrix} 0 \\ A^{-1}D \end{bmatrix} T\right\}$$

$$T = [T_1, T_2, \dots, T_8]^T$$

支持脚の切り換え時には、一種の衝突現象が起こる。そこで、この現象を表わすのにラグランジェの衝突方程式を用い、切り換え後の各リンクの角速度を求

Fig. 1 Quadruped walking system

* 岐阜大学工学部 岐阜市柳戸 1-1

* Faculty of Engineering, Gifu University, Gifu

(Received September 25, 1987)

(Revised January 12, 1988)

Fig. 2 Exchange of supporting legs

める³⁾.

まず Fig. 2 のようにモデル化をし、ロボットの状態を $\mathbf{z} = [\theta_1, \dots, \theta_9, x, y]$, 衝撃力を $\mathbf{p} = [p_x, p_y]$, $\mathbf{q} = [q_x, q_y]$ と表わす. この図において支持脚の交換は, 遊脚であった脚 II, 脚 IV が同時に着地し, この二つの脚が着地したと同時に, それまで支持脚であった脚 I, 脚 III が遊脚になることによって行われる. その着地した脚 II, 脚 IV の先端を着地点に拘束する条件式をそれぞれ $\mathbf{f}_p(\mathbf{z}) = \mathbf{0}$, $\mathbf{f}_q(\mathbf{z}) = \mathbf{0}$ とする. その両辺を時間で微分すると次式が成り立つ.

$$E_p \dot{\mathbf{z}}^+ = \mathbf{0}, E_q \dot{\mathbf{z}}^+ = \mathbf{0} \quad (2)$$

ここで, $E_p = (\partial \mathbf{f}_p / \partial \mathbf{z})$, $E_q = (\partial \mathbf{f}_q / \partial \mathbf{z})$ である. また, 添え字の + は着地直後, - は着地直前を表わすことにする.

つぎにラグランジェの衝突方程式を導入する.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{z}}} \right)_{\mathbf{z}=\mathbf{z}^+} - \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{z}}} \right)_{\mathbf{z}=\mathbf{z}^-} = E_p^T \mathbf{p} + E_q^T \mathbf{q} \quad (3)$$

ここで, T は運動エネルギーであり, $T = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{z}}^T \mathbf{A} \dot{\mathbf{z}}$ と表わせるので, 上式はつぎのようになる.

$$\mathbf{A} \dot{\mathbf{z}}^+ - \mathbf{A} \dot{\mathbf{z}}^- = E_p^T \mathbf{p} + E_q^T \mathbf{q} \quad (4)$$

(2), (4) 式を用いれば, 着地直後の角速度は, 着地直前の角速度を用いて, つぎのように表わすことができる.

$$\dot{\theta}^+ = \mathbf{G} \dot{\theta}^- \quad \mathbf{G}: 9 \times 9 \text{ 行列} \quad (5)$$

3. シミュレーション解析および考察

前章で得たモデルを用いてシミュレーションを行う. 歩行システムのパラメータとしては, 筆者らが現在研究中のロボット¹⁾の値を用いる (Table 1 参照). 各関節における局所フィードバックの制御則としては, 比例微分制御とする. ただし, 1 章で述べたように支持脚の腰関節は自由回転とする.

各関節に対する目標値の与え方はつぎのようす

Table 1 Values of parameter of the walking system

	Body	Upper part of leg	Lower part of leg
Mass (kg)	18.6	2.650	0.860
Length (m)	0.73	0.250	0.250
Moment of inertia (kg·m ²)	1.00	0.025	0.009

る. 遊脚は地上高を十分に取ながら振り出し, 着地する前に目標値を固定する. 遊脚膝は曲げた状態 (角度 ϕ) で着地し衝撃を和らげる. 支持脚膝は着地直後の曲がった状態 (角度 ϕ) から伸ばし始め, まっすぐになったところで固定する.

目標値関数を種々に変えてシミュレーションを行い歩行の様子がどのように変化するかを調べた. その結果, 特に着地時の膝の曲げ角 ϕ と歩幅 W_{step} が大きな影響を与えることがわかった. さらに, 着地直前に至るまでの途中の軌道の影響についても検討した. しかし, 滑らかにある一定の位置まで変化させるには, その軌道はさほど変えられず, 歩行に大きな影響を与えないことが計算機シミュレーションより確認できた. そこで, 歩行に影響を及ぼす要因としてはつぎの二つにしようことができた.

- 1) 歩幅 W_{step}
- 2) 膝の曲げ角 ϕ

これらの要因について Fig. 3 のように 16 通りの組み合わせを考え, 歩行シミュレーションを行った. Fig. 3 の ○印は安定な歩行が可能な組み合わせであり, ●印は速度が足らずに継続歩行ができない組み合わせである. この二つの要因がどのように歩行に影響するかをつぎの二つの指標を用いて解析する.

- 1) 平均歩行速度 V_{mean}
- 2) 速度変動率 $\lambda = (V_{\text{max}} - V_{\text{min}}) / V_{\text{max}}$

ここで, V_{max} はボディの最大速度, V_{min} はボディの最小速度である. λ が小さいほど滑らかな歩行である.

Fig. 4 に ϕ , W_{step} と V_{mean} , λ の関係を示す. 図からつぎのことがわかる.

- 1) 歩幅 W_{step} が広がるほど, 平均歩行速度は遅くなり, 速度変動率は大きくなる (ϕ = 一定).
- 2) 膝の曲げ角 ϕ が大きくなるほど, 平均歩行速度は速くなり, 速度変動率は小さくなる (W_{step} = 一定).

つぎに, 金子ら⁴⁾の提案している無次元数を導入し

Fig. 3 W_{step} and ϕ used in the computer simulation

Fig. 4 The variation of V_{mean} and λ as a function of ϕ and W_{step}

て、以上の結果が、一般の4足歩行ロボットに適用できるようにする。ただし、各リンクの質量比については Table 1 のロボットにほぼ近いものとする。 ϕ , λ はもともと無次元数なので、 V_{mean} , W_{step} をつぎのように無次元化する。

$$F_r = V_{mean}/\sqrt{gL}, \quad \Pi_3 = W_{step}/L$$

ここで、 F_r はフルード数⁴⁾であり、 L は脚節長である。Fig. 4 には、 F_r や Π_3 も記入されているので、種々の脚節長 L をもつロボットに対して V_{mean} , λ を求めることができる。

最後に歩行システムの安定性について考える。1歩区間におけるロボットの代表速度として、 i 歩目の着地直前におけるボディ速度を採用し、 V_i とおく。このシステムは Fig. 3 の○印で示す範囲では安定であるため、 V_i が定常値 $\bar{V}$ からずれても、何歩か進むと、ほぼ元の定常値 $\bar{V}$ に戻る。定常値 $\bar{V}$ からのずれを ΔV_i とおくと、 ΔV_i が微小な範囲では、つぎのステップにおける定常値からのずれ ΔV_{i+1} はつぎのように与えられる。

$$\Delta V_{i+1} = \alpha \Delta V_i \quad \alpha: \text{定数} \quad (6)$$

この α が $|\alpha| < 1$ の範囲にあれば、システムは安定である。 α の絶対値が 0 に近いほど収束が速いので、安定性がよいといえる。Table 2 に各歩行における α の値を示す。表からわかるように、着地時の膝の曲げ角 ϕ を大きくするほど安定性がよくなっている。

Table 2 Degree of stability, α

$W_{step}(m)(\Pi_3)$	$\phi(\text{rad})$			
	0.23	0.33	0.43	0.53
0.30(1.2)	×	×	×	0.65
0.25(0.1)	×	×	0.74	0.73
0.20(0.8)	×	0.82	0.75	0.71
0.15(0.6)	0.83	0.78	0.73	0.69

4. おわりに

重力場を利用した一つの歩行制御方式についてシミュレーションを行い検討した。その結果、この制御方式では、遊脚が着地する際の膝の曲げ角 ϕ 、および歩幅 W_{step} が重要な要因であることがわかった。これらの二つの要因が、平均歩行速度、速度変動率および安定性にどのように影響を与えるかを解析した。

参考文献

- 1) 王, 古荘, 岡島: 階層制御構造による4足歩行ロボットの動的制御, 日本機械学会論文集 (C), 54-497, 209/216 (1988)
- 2) 日本ロボット学会誌: 2足歩行ロボット特集号, 1-3, 日本ロボット学会 (1983)
- 3) 宮崎, 川村, 有本: 2足歩行運動時の撃力効果, パイオメカニズム学会学術講演会予稿集, 87/88 (1982)
- 4) 金子, ほか: エネルギー効率の観点からみた歩行機械の相似性に関する基礎研究, 日本ロボット学会誌, 3-3, 207/219 (1985)