擬似角運動量による4足システムの低次モデルの評価および歩行制御方式の提案†

佐野 明人*・古庄 純次*

Evaluation of a Reduced Order Model of Quadruped System and Proposition of
a Walking Control Method Using Quasi-Angular-Momentum

Akihito SANO* and Junji FURUSHO*

By using a stable quantity 'Quasi-Angular-Momentum' which represent a state of quadruped walking system, we evaluated the degree of approximation of reduced order model which we derived. We also proposed a control method in which the quasi-angular-momentum is kept constant.

Key Words: quadruped robot, dynamic walking, quasi-angular-momentum, reduced order model

Fig. 1 9-link quadruped model

1. はじめに

近年、ロボットの移動手段として4足歩行が注目され、その研究が盛んに行われている^{1)~6)}。4足歩行システムは、自由度が高いため、その解析や制御則の決定が大変難しく、また歩行全体の様子を定量的に示すことが困難である。筆者らは、前報¹⁾で4足歩行システムの歩行のようすを大局的に表わす量として、擬似的な角運動量（以後、擬似角運動量と呼ぶ）を提案した。本論文では、この擬似角運動量を用いて、筆者らの提案した低次モデル²⁾の近似度の評価および一つの歩行制御方式の提案を行う。

2. 定式化

2.1 運動方程式と支持脚切換え

本論文で検討するトロット歩行では、対角線上の一对の脚が接地する。進行方向を含む地面に垂直な2次元平面内での運動を考えると、前後の2点で接地する状態では拘束条件式 $(L(\theta)=0)$ を満たす必要がある (Fig. 1 参照)。拘束条件の付加されたラグランジェの方程式より運動方程式はつぎのようになる¹⁾。

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

ここで、

† 第6回日本ロボット学会学術講演会で一部発表(1988・10)

* 岐阜大学工学部 岐阜市柳戸 1-1

* Faculty of Engineering, Gifu University, Gifu
(Received September 1, 1989)

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_9]^T, \quad S(\theta) = \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \right)^T$$

T は関節トルクを表わす8次元ベクトルであり、 Γ は前脚爪先をB点に拘束する拘束力¹⁾である。支持脚の切換え時には、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る。切換え直後の角速度 $\dot{\theta}^+$ は、切換え直前の角速度 $\dot{\theta}^-$ を用いて、つぎのように表わすことができる³⁾。

$$\dot{\theta}^+ = A^{-1}(A + GR + VU)\dot{\theta}^- \quad (2)$$

2.2 擬似角運動量 Π_{total}

筆者らは、4足歩行システムの歩行のようすを表わす状態量として、次式に示すような擬似角運動量 Π_{total} (単位は kgm^2/s) を提案した。

$$\Pi_{total} = \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 \quad (3)$$

$$\Pi_1 = \sum_{i=1}^2 L_i, \quad \Pi_2 = h \sum_{i=1}^2 P_{yi} - s \sum_{i=1}^2 P_{xi}$$

$$\Pi_3 = hQ_y - sQ_x$$

L_i は支持脚部がもつ爪先まわりの角運動量、 P_{xi} および P_{yi} はそれぞれ遊脚部がもつ x および y 方向の運動量である。 Q_x および Q_y はそれぞれ胴体がもつ x および y 方向の運動量である。 h および s は Fig. 1 に示す距離である。擬似角運動量の詳しい導出は、前報¹⁾を参照していただきたい。この擬似角運動量を変化させる要因は、重力効果 Ω_1 と支持脚腰トルク Ω_2 の二つだけである。

$$d\Pi_{total} = \Omega_{total} dt \quad (4)$$

$$Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2$$

$$Q_1 = \bar{s} m_{\text{total}} \theta, \quad Q_2 = T_2 + T_3$$

m_{total} は全質量であり, $\bar{s}$ は重力モーメントを発生させる等価的な距離¹⁾を表わしている.

3. 低次モデルの近似度評価

3.1 低次モデル

直立静止状態まわりで(1)式を線形化することによって得られる式を $z = [\theta^T, \dot{\theta}^T]^T$ とおき, つぎのように表わすことにする.

$$\dot{z} = \bar{A}z + \bar{B}T \quad (5)$$

筆者らは, 支持脚の肩および腰関節に対しては, 自由回転あるいは一定トルクを与える制御を行い, 他の関節に対しては, 局所フィードバック制御を行う制御方式を提案した²⁾. このとき, システムは倒立振子モードをもち, 重力場における自然な前進運動が可能となり, エネルギー消費の少ない歩行となる.

局所フィードバック制御される関節への入力トルクを u_1 で表わし, 局所フィードバックされない関節への入力トルクを u_2 で表わすことにする. ここで, u_1 をつぎのように表わすことにする.

$$u_1 = Kr\theta r - Kz \quad (6)$$

ただし, θr は各関節への目標値を与えるベクトルであり, $K (= [Kp, Kd])$ は局所フィードバックの係数行列である. このとき, (5)式はつぎのように書き換えられる.

$$\dot{z} = (\bar{A} - \bar{B}_1K)z + \bar{B}_1Kr\theta r + \bar{B}_2u_2 \quad (7)$$

フィードバック係数をある程度大きくすると, $\bar{A} - \bar{B}_1K$ の固有値は, 倒立振子モードに対応する 2 個の固有値, 応答の速い 12 個の固有値および 4 個の零固有値に別れる. つぎに(7)式のシステムを対角化し, さらに, その固有値に従って三つの部分に分割する.

$$z = Vx = [V_1, V_2, V_3] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

として, (7)式を座標変換して対角化するとつぎのようになる:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & 0 \\ & F_2 \\ 0 & & F_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ 0 \end{bmatrix} \theta r + \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ 0 \end{bmatrix} u_2 \quad (9)$$

ここで, x_1 は倒立振子モードに対応する 2 次の状態ベクトルであり, 低次モデルは, この支配モードを用

いてつぎのように与えられる.

$$\dot{x}_1 = F_1x_1 + G_1\theta r + H_1u_2 \quad (10)$$

元の状態は, 近似的につぎのようにして求められる.

$$\begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \doteq V_1x_1 - V_2F_2^{-1}G_2\theta r \quad (11)$$

3.2 近似度評価

得られた低次モデルが, 元の高次モデルをどの程度近似しているかを検討する. ただし, シミュレーションでは, 脚切換え後 0.2 秒間, 支持脚腰に 0.75 Nm の一定トルクを与え, その後自由回転状態にする制御則を採っている. このときの胴体速度の時間変化を Fig. 2(a) に示す. 実線は低次モデル, 破線は高次モデルを示している. Fig. 2(b) は, 同じシミュレーションにおける擬似角運動量の変化を示したものである.

胴体速度からみると, 高次モデルと低次モデルではその変化のようすが多少異なっている. これは, 遊脚の振りや支持脚膝の曲げ伸ばしなどの胴体速度への影響が低次モデルには現れないためだと考えられる. 一方, このような要因の影響を受けない擬似角運動量は, 低次モデルおよび高次モデルとも, はほぼ同じ変化を示している. 以上のことからわかるように, 擬似角運動量を指標とした場合, 提案した低次モデルは元の

(a) Velocity of body

(b) Quasi-angular-momentum

Fig. 2 Inverted-pendulum-type walking

高次モデルを大変よく近似しているといえる。

4. 擬似角運動量一定歩行

Fig. 2 に示したように、重力場を利用した動歩行では、胴体速度と擬似角運動量は、ともに下に凸の変化を示し、重力の影響を強く受けていることがわかる。

すなわち、一つの自然な歩行ではあるが、胴体速度の変動が大きいという問題がある。この歩行と一つの対比をなすのが、胴体速度を一定に保つ歩行である。

Fig. 3 は、胴体速度および地上高を一定に保った歩行における胴体速度および擬似角運動量の時間変化を示している。Fig. 3(b) からわかるように、この歩行では擬似角運動量を一旦増加させておいて、つぎに減少させるということをしており、エネルギー損失が大きい歩行であるといえる。この図には、遊脚部の擬似角運動量 Π_2 も示されているが、 Π_{total} の変化が Π_2 の変化にほぼ対応している。

これらの歩行の中間により歩行制御方式があると考えられるが、現在のところ、そのような歩行制御方式は提案されていない。そこで、本論文では、これら二

Fig. 3 Walking in which body speed is kept constant

Fig. 4 Walking in which quasi-angular-momentum is kept constant

つの歩行の中間的な歩行として、擬似角運動量を一定に保つ歩行を提案する。**Fig. 4** は擬似角運動量一定歩行における胴体速度と擬似角運動量の時間変化を示している。Fig. 2(a) との比較からわかるように、この歩行では、重力場を利用した歩行ほど胴体速度の低下が起きていないことがわかる。

また、発生トルクの絶対値の総和は胴体速度一定歩行の場合のほぼ 75% になった。Fig. 4(b) からわかるように、遊脚部の擬似角運動量 Π_2 および支持脚部と胴体部の擬似角運動量の和 $\Pi_1 + \Pi_3$ は、これらの総和 (Π_{total}) を一定に保持しながら大きく変化している。これは、遊脚の加速時期には、胴体部がもっていた運動量が遊脚側に移り、減速時期には、遊脚から胴体側に再び返されることによるものと考えられる。すなわち、擬似角運動量一定歩行では、胴体と遊脚との間の運動量交換に起因する胴体速度の変動に対しては、支持脚腰トルクを用いた補償動作を行わないため、むだなトルクの消費が避けられている。

5. おわりに

1) 擬似角運動量を指標とした場合、筆者らが提案した低次モデルは元の高次モデルを非常によく近似していることがわかった。このように、歩行システム全体のようなすを表わす量による低次モデルの評価は重要である。

2) 重力場を利用した動歩行および胴体速度と地上高を一定に保った歩行の中間的な歩行として、擬似角運動量を一定に保つ歩行を提案した。この歩行は、胴体速度の変動が比較的小さく、しかもエネルギー消費が少ない歩行である。

参考文献

- 1) 佐野, 古荘: 擬似角運動量に基づく動的4足歩行の解析, 計測自動制御学会論文集, **24**-12, 1299/1305 (1988)
- 2) 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, **54**-497-C, 209/216 (1988)
- 3) 佐野, 古荘, 岡島: 支持脚切替現象を考慮した四足歩行ロボットの動的制御, 日本機械学会論文集, **54**-508-C, 3022/3030 (1988)
- 4) 広瀬, 岩崎, 梅谷: 4足歩行機械の知能的歩容決定に関する基礎的研究, 計測自動制御学会論文集, **18**-2, 193/200 (1982)
- 5) 木村, 下山, 三浦: 四足動歩行ロボットの力学的解析, 日本ロボット学会誌, **6**-5, 367/378 (1988)
- 6) 安達, 小谷内, 中野: 自由歩容形4脚移動ロボットの開発, 第6回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 319/320 (1988)