Analysis of Limb Posture in Ratitae Bipedal Locomotion

正 原 敬 (同志社大) 正 横川 隆一 (同志社大) ○学 河原 史朗 (同志社大)

Kei HARA, Doshisha University, Tatara Totani 1-3, Kyoutanabeshi, Kyoto

Ryuichi YOKOGAWA, Doshisha University

Fumiaki KAWAHARA, Doshisha University

In this paper, the limb posture during the bipedal locomotion of ratitae were examined by creating simple link models based on videotapes of each bird during locomotion. The model was balanced by comparing them with photos of skeletons and using known bone length ratios. Two methods were used to determine the location of the center of mass (CM), in which both methods confirmed the same location. From these models, the exhibition of long double-leg support phases and minute CM vertical motion became apparent. The kinetics of locomotion shows similarities with models using the Linear Inverse Pendulum Method. Analysis of limb posture by the introduction of manipulability ellipsoids suggests that limb posture of both support and swing legs are advantageous for bipedal locomotion.

Key Words : Bird, Bipedal Locomotion, Inverse Pendulum, Manipulator

1. 緒言

現生動物の中で2足歩行を行うものとして、人間の他に鳥類が上げられる。特に鳥は、人間と比べて脳容量が小さいにもかかわらず、人間のように転倒の衝撃を和らげてくれるような腕を必要としない、安定した歩行運動を行うことで知られている。今まで、生物学的に鳥の脚の形態を調べた研究¹⁾や、鳥の脚のような逆関節型リンクを用いた2足歩行ロボットの研究²⁾はなされてきたが、実際の鳥の歩行安定性を定量的に評価した研究は行われていない。

そこで本研究では、鳥の歩行の2次元運動学評価を行い、その歩行特性を倒立振り子理論と比較し、歩行における鳥の脚の姿勢を評価することを目的とする。

2. 鳥の歩行モデルの作成

ビデオカメラで収めた各鳥の歩行運動をもとにモデル図を作成した。画像から読み取れない関節位置は、鳥の骨格画像と、Gatesy¹⁾が集めた骨長比データを元に推定した。重心位置は、鳥が両脚そろっている時の静止画像、また静止状態から歩行状態へ移り変わる瞬間の画像より推定した。

3. 実歩行モデルのデータ評価

Fig. 3-1 に代表的な1羽のエミューによる1歩の歩行モデルと、1歩中の脚長の変化率を示す。点線は単脚、実線は両脚支持期を示す。これより、歩行中重心の上下運動が少なく、また脚長は縮小傾向を示すことが確認できる。このように、脚長を大きく変化させることにより、重心高さがほぼ一定に保たれていると考えられる。

4. 線形倒立振り子モード

梶田⁴⁾は、単脚支持期における2足歩行ロボットをFig. 4-1 に示すような重心と支点からなる倒立振り子として扱った。単脚支持期中重心を進行方向へと進めさせる、非常にシンプルな運動機構になることを明らかにした。また重心が直線上、あるいは重心-支点間距離を一定として動くと、そのダイナミクスを線形化でき、その運動は以下に示す軌道エネルギーと呼ばれる一定値に依存する。

$$E_1 = \frac{1}{2} v_{x_s}^2 - \frac{g}{2z_s} x_s^2, \quad E_2 = \frac{1}{2} r_{1s} \dot{\theta}_{1s}^2 + g \cos \theta_{1s} \quad 1)$$

ここで、 $|x_s, v_{x_s}|$ は重心水平位置と水平速度、 $|r_{1s}, \theta_{1s}, \dot{\theta}_{1s}|$ は支点から重心までの距離、角度、角速度を示す。このように、重心が直線上を動く倒立振り子の運動パターンを二次元 Linear Inverse Pendulum Model, 略して LIPM⁵⁾と呼び、重心-支点間が一定の倒立振り子運動を IPM と呼ぶ。

Fig. 3-1 Emu leg model during a single step walk and behavior of supporting leg length.

Fig. 4-1 Model of Inverted Pendulum

Fig.4-2 にエミューの1歩から得られた軌道エネルギーの変化を示す。Fig.4-3 にこの軌道エネルギーの平均値を用いた LIPM, IPM モデルの運動を示す。点線は実歩行の重心軌道を示す。これより、単脚支持期におけるエミューの軌道エネルギーの変化率が小さく、平均軌道エネルギーを用いた倒立振り子モデルと、単脚支持期における実際のエミューの歩行運動が似ていることがわかる。

Fig. 4-2 Behavior of Trajectory Energy

Fig. 4-3 Comparison of real walk models with LIPM · IPM

5. 操作力楕円と可操作性楕円

マニピュレータの動きやすさ、操作性を判断するため、操作力楕円と可操作性楕円を求める手法が挙げられる。操作力楕円は、マニピュレータの各ジョイントに働くトルクの総計が $\| \tau \| \leq 1$ を満たすマニピュレータ先端外力 f の集合、可操作性楕円は各ジョイントの角速度の総計が $\| \dot{\theta} \| \leq 1$ を満たす先端速度 v の集合を示し、次のような形で表される。

$$f^T J(\theta) J^T(\theta) f \leq 1 \quad v^T (J^*(\theta))^T J^*(\theta) v \leq 1 \quad (2)$$

ここで、 $J(\theta)$ はマニピュレータのヤコビ行列、 $J^*(\theta)$ はヤコビ行列の擬逆行列を示す。この操作力楕円の長軸方向はマニピュレータが外力を発生させやすい方向を示すのに対し、可操作性楕円長軸方向は大きな手先速度を出しやすい方向を示す。Fig. 5-1 に示すような鳥脚姿勢モデルの Jacobi 行列は、

$$J_4(\theta) = \begin{bmatrix} J_{1x} & J_{2x} & J_{3x} & J_{4x} \\ J_{1z} & J_{2z} & J_{3z} & J_{4z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[J_{i1}, 0, J_{i2}]^T = s \times (L_i - L_1) \quad [i=1, \dots, 4]$$

と表される。なお、 $s = [0 \ 1 \ 0]^T$ 、 L_i は各関節位置を示す。

Fig. 5-1 Model of bird leg during single-support phase

Fig. 5-2a) にエミューの実歩行の単脚支持期より得られた操作力・可操作性楕円主軸を示す。点線は操作力楕円長軸、

そして鎖線は可操作性楕円長軸である。これより、操作力楕円長軸方向が実歩行の重心に働く外力方向(床反力方向)、あるいは LIPM モデルで歩行を実現させるために必要な外力方向と類似していることから、鳥の脚姿勢は歩行を実現させるために必要な外力が発生されやすい脚姿勢と考えられる。また、可操作性楕円の長軸方向は、歩行運動における重心の進行方向と近い方向に向いていることが確認できる。これより、鳥脚姿勢はスムーズな歩行運動を可能とするモデルと考えられる。よって、鳥は歩行運動が実現されやすい脚姿勢を持つと考えられる。

Fig. 5-2b) に、エミューの股関節を支点、足先を先端とした遊脚姿勢の可操作性楕円を示す。これより、遊脚姿勢前半の長軸方向は目標着地位置付近に向くのにに対し、後半は、むしろ短軸方向が着地する方向に近いことがわかる。そこで遊脚期前半は、遊脚をすばやく次の目標地点までに運び、より早く安定な両脚姿勢を取ることが可能な姿勢と考えられる。一方、可操作性楕円長軸方向は動きやすい方向を示すのに対し、短軸方向は分解能が高く、細かい作業のしやすい方向といえる。よって遊脚期後半の脚姿勢は、地面との衝突を抑えやすい姿勢と考えられる。

6. 結言

本文では鳥の歩行と倒立振り子理論による歩行を比較し、また歩行における鳥の脚姿勢を評価したところ、以下の結論を得られた。

- ・鳥の歩行における重心運動と倒立振り子歩行モデルにおける重心運動に類似性がある。
 - ・鳥の脚姿勢は歩行を実現しやすく、かつ歩行運動をスムーズにすることが可能な脚姿勢といえる。
 - ・鳥脚姿勢は着地の衝撃を和らげることが可能といえる。
- なお、本文ではエミューの解析結果のみを示したが、ダチョウやレアでも同様の結果が得られた。

a) Support phase

b) Swing phase

Fig. 5-2 Ellipsoid axis during support phase and swing phase

<参考文献>

- 1) S.M. Gatesy and K.M. Middleton, Bipedalism, Flight, and the Evolution of Theropod Locomotor Diversity, Journal of Vertebrate Paleontology, Vol.17, No.2, pp.308-329, 1997
- 2) 森直樹, 相田恒一, 水戸部和久, 那須康雄, 二足ロボットによる鳥型及び人間型歩行の実現, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.3, pp.1189-1990, 1994
- 3) 梶田秀司, 小林彬, 位置エネルギー保存形軌道を規範とする動的2足歩行の制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.23, No.3, pp.281-287, 1987
- 4) 梶田秀司, 線形倒立振り子モードを規範とする動的2足歩行ロボットの実時間制御, 機械技術研究所報告, 第171号, 1996