

歩様転移を示す数理モデルの構築と解析

理学専攻 情報科学コース 窪谷まりあ (指導教員：郡宏)

1 はじめに

人間は歩くとき、地面を踏みしめ、蹴り、滞空期間を経て、再び地面を踏みしめる、という流れを片足ずつ交互に行う。つまり、歩くという運動は、片方の足が接地し、もう片方は浮遊している、という状態を繰り返す。それに対して、走るときは接地している時間が短く、そのため両脚共に浮遊している期間が存在する。このように、前進運動には複数の脚の動かし方のパターンが観測される。脚の動かし方のパターンを歩様と呼び、人間であれば walk と run、馬であれば walk, trot, pace, gallop などの歩様がある。そして、ある歩様が別の歩様に変化することを歩様転移と呼ぶ。歩様転移の発生は、脚を含む身体全体の相互作用と脊髄に局在する中枢パターン発生器 (CPG: Central Pattern Generator) からのフィードバックによるものであり、CPG は脳からの伝達なしにリズムカルな運動の出力を決定する。先行研究の様々な実験によって、歩様は移動速度に応じて転移することがわかっているが、歩様転移のタイミングを決定する要因については意見が分かれている。速度に応じてエネルギー消費量が最小となるよう歩様転移するという説 [1][2] が主流ではあるが、その結論を否定する研究も少なくない [3]。また、CPG の仕様に基づく数理モデルを用いた、シミュレーションによる歩様転移の研究も数多くなされている [4][5] が、歩様転移の発生の核を追究したものは少ない。

そこで、本研究ではシミュレーションによる歩様転移のメカニズムと機能の解明を行うため、先行研究の4足歩行 CPG 数理モデル [5] の分析と、力学モデルの構築を行った。CPG モデルの解析からは、少なくとも trot においては速度を一番効率よく出せる適切な脚の回転速度 ω が存在することがわかり、先行研究 [1] で述べられている最適速度の存在をシミュレーションによって裏付けることができた。さらに、重心と腰の捻りの各自由度は歩様転移に伴って停止または開始していることがわかった。以上より脚の回転速度 ω の値を変化させることで歩様転移が発生するのは、 ω の変化に対応できなくなった重心や腰の捻りが振動を自発的に停止(または開始)し、脚は振動する変数に駆動されてその同期パターンを変えるからではないかと考えられる。

2 モデル

本研究で提案する力学モデルでは CPG 制御は用いずに歩様転移の再現を目指す。4足歩行モデルは、 X : 左右方向の重心の位置、 Y : 上下方向の重心の位置、 Ψ : 腰の捻り、 L_i : 各脚の位置 ($i = 1, 2, 3, 4$) の7変数で構成され、その式は以下に従う。

$$\begin{aligned}\ddot{X} &= -\dot{X} - \Omega_x^2 X - X^2 \dot{X} + \epsilon(L_2 - L_1 + L_4 - L_3), \\ \ddot{L}_i &= -\dot{L}_i - \omega^2 L_i - L_i^2 \dot{L}_i \pm \mu_x X \pm \mu_y Y \pm \mu_\psi \Psi.\end{aligned}\quad (1)$$

なお、 Y, Ψ の式は X の式と類似しているので省略した。また、 L_i の発展方程式の符号は各脚 i ごとに適切に設定されているが詳細を省略する。全ての式は固有には減衰振動をするようになっており、相互作用によって定常な振動状態、すなわち歩行状態が現れる。各方程式の右辺第1項は減衰力を、第2項は復元力を、第3項は発散を防ぐために導入した非線形減衰力を表す。また、 X, Y, Ψ の式の第4項は脚からの作用を示し、例えば X は $L_1 = L_2$ かつ $L_3 = L_4$ のとき、 $L_1 = L_4$ かつ $L_2 = L_3$ のときに振動が停止するようになっている。これは、gallop と trot の歩様の際は左右方向の重心の振動が止まる効果を記述する。同様に、 Y と Ψ においても歩様にあわせて振動が止まるようになっている。また、脚も同様に重心と腰の捻りから相互作用を受ける。その効果は第4項以降で示されている。

なお、CPG モデル [5] の解析から、各歩様における振動の有無は表1となることがわかっている。

表1: CPG モデルにおける各歩様での重心・腰の捻りの振動の有無

	walk	pace	trot	gallop
左右方向の重心	振動	振動		
上下方向の重心	振動			振動
腰の捻り	振動		振動	

さらに、このモデルが生成する動きの速度 v_{avg} を次のように定義した。

$$v_{\text{avg}} = -\frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_i \dot{L}_i \right) dt \quad (2)$$

この式は、脚が接地しているときの脚の速度を積分することによって進んだ距離とし、それを観察時間 T で割ったものである。ただし、 $\dot{L}_i > 0$ のときは脚が設置してないとみなし、 $\dot{L}_i = 0$ として計算を行う。

3 シミュレーション結果

シミュレーションではパラメータ値を $\Omega_x = 2.0, \Omega_y = 4.0, \Omega_\psi = 1.0, \epsilon = 2.0, \mu_x = 5.0, \mu_y = 10.0, \mu_\psi = 8.0$ とした。すべての変数の初期条件は範囲 $[0, 0.1]$ の一様乱数で与えた。計算スキームはオイラー法(時間ステップ $h = 0.005$)である。図1の左側に重心の位置 X, Y と腰の捻り Ψ の時系列を、右側に脚の位置 L_i の時系列を表した。図に示されている通り、 ω の値が大きくなると、trot から gallop に転移した。 Ψ と Y の振動が入れ替わることで歩様転移が起こり、 X は基本的に停止している様子が見て取れる。なお、このモデルでは腰の捻りを考慮したにも関わらず、walk は観測されなかった。その原因として、このモデルでは重心と腰の捻りの振動が脚の振幅に大きく影響を与えるので、重心と捻りのうち2つ以上が振動すると、どの歩様にも当てはまらない複雑な動きをしてしまうからだと考えられる(図1(c)(d)参照)。

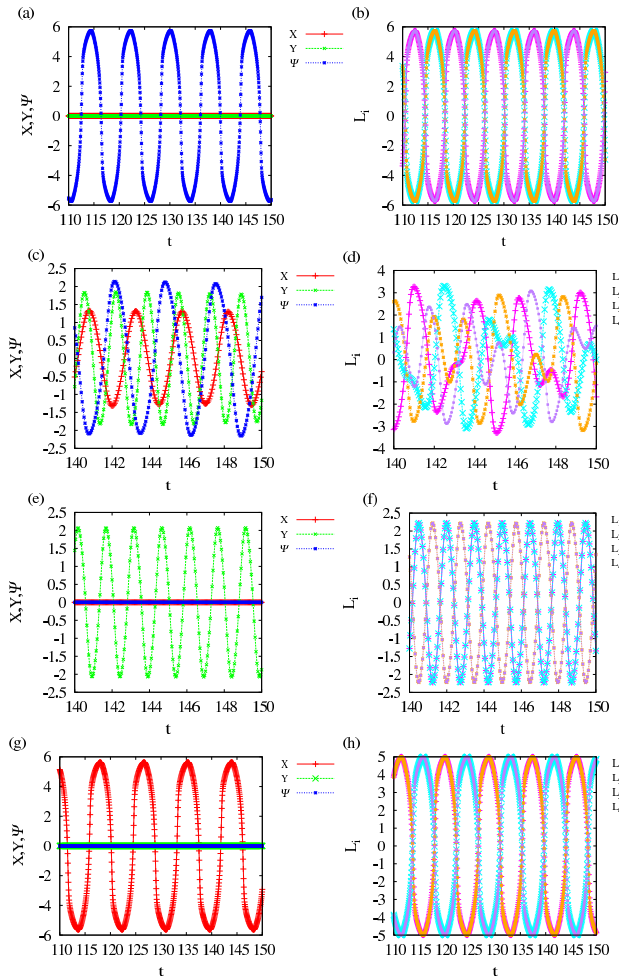


図 1: (a)(b) $\omega = 1.0$. trot.
(c)(d) $\omega = 3.5$. 歩様が崩れている。
(e)(f) $\omega = 4.5$. gallop.
(g)(h) $\omega = 0.8, \Omega_x = 1.0, \Omega_\psi = 2.5$. pace.

また、 $\Omega_x = 1.0, \Omega_\psi = 2.5$ として実行すると、trot のかわりに pace が表れ (図 1(g)(h)), ω を大きくすると gallop に転移した。

式 (3) で定義された進行速度 v_{avg} に着目すると、 X, Y, Ψ の振動停止・開始にともない、移動速度に定性的変化が生じていることがわかる。 $\omega \leq 2.0$ 辺りでは Ψ のみが振動し trot が現れるが、 $2.0 \leq \omega \leq 4.2$ 辺りでは X, Y, Ψ のうち 2 つ以上が振動して、歩様が崩れる。 $\omega \geq 4.2$ では gallop の歩様となるが、 $\omega \geq 5.5$ で全ての振動が停止し、前進しなくなった。これより、 ω の変化に伴って X, Y, Ψ の振動状態が転移し、歩様に変化する。このとき、 X, Y, Ψ のうち 2 つ以上が振動すると歩様が崩れて速度も落ちるが、適切な ω では単一変数のみが振動することにより適切な歩様に転移し、それによってより速い速度を出せていることがわかった。

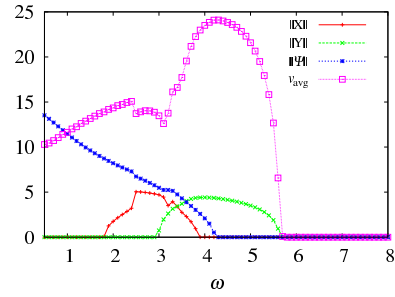


図 2: ω に対する速度と、 X, Y, Ψ の振幅。

4 まとめと今後の課題

4 足歩行 CPG モデルを解析した結果、歩様転移は脚の回転速度と重心の振動数が大きく関係していることがわかった。進行速度を調べると、歩様転移することにより速く走ることができるようになったので、このことより動物は複数の脚の動かし方のパターンを持っていると考えられる (修士論文参照)。4 足歩行 KIK モデルでは pace・trot から gallop への転移を再現することができ、さらに歩様転移によってより速い速度が出せることがわかった。

また、4 足歩行モデルの変数を減らし 2 足歩行 CPG モデルと 2 足歩行 KIK モデルを構築し解析した (修士論文参照)。2 足歩行 CPG モデルで停止状態での線形安定性解析を行った結果、停止状態から歩行状態への歩様転移は、脚の回転速度の上昇に伴い、停止状態が安定性を失うために起こることがわかった。2 足歩行 KIK モデルでは停止状態、歩行状態、同相状態を再現し、脚の回転速度と平均速度の最適性を確認できた。さらに、複素方程式からなるモデルを構築した結果、KIK モデルと同様に pace から gallop への転移を再現することができた。

今後は 4 足歩行 KIK モデルで walk を再現することと、脚の振動数に対する平均速度の最適性を確かめることを課題として、研究を進めていく。walk を再現するためには、重心と腰の捻りの振動が脚の振幅に与える影響を制御するような仕組みをモデルに取り入れることが必要であるが、KIK モデルのように純粋な力学システムでそれが可能であるかはまだわかっていない。walk が再現できた後は、平均速度の最適性を調べることで歩様転移のメカニズムを解明し、また、エネルギー消費についても何らかの関係があるかどうかを分析していきたい。

参考文献

- [1] D. F. Hoyt and C. R. Taylor. Nature (1981).
- [2] S. Nauwelaerts and P. Aerts. Journal of Zoology 258.2 (2002): 183-188.
- [3] A. Hreljac. Medicine and Science in Sports and Exercise 25.10 (1993): 1158-1162.
- [4] A. J. Ijspeert, et al. Science 315.5817 (2007): 1416-1420.
- [5] 手老篤史, 他. 第 22 回自律分散システムシンポジウム, 2010.