

数理モデルを用いた歩様転移と移動効率に関する研究

窪谷まりあ (指導教員：郡宏)

1 はじめに

人間や動物は、歩く速度によって脚の動かし方を変える。それは脳からの伝達ではなく脚を含む体全体の相互作用と、さらに、脊髄にある神経系からのフィードバックによって行われていると考えられている。本研究では、先行研究で提案されている数理モデルを発展させ、歩様転移の性質の理解を深める。さらに、新規モデルの構築を通して、歩様転移のメカニズムと機能の解明を目指す。

本研究では、まず、先行研究の結果を再現する(図2)。図3以降は本研究のオリジナルな結果である。

2 4足歩行 CPG モデル

神経系と身体が同期するという考えのCPG (Central Pattern Generator) 制御に基づいたモデルがこれまで多数提案されている。本研究ではまず先行研究 [1] で提案された4足歩行 CPG モデルを考える。このモデルでは、各脚の位相 θ_i ($i = 1, 2, 3, 4$) を制御する神経系の発展方程式を次で与える(図1)。

$$\dot{\theta}_i = \omega - \left(\frac{m}{4} + A_{i,x}g_x + A_{i,y}g_y + A_{i,\psi}\psi \right) \cos \theta_i. \quad (1)$$

ここで、 ω は関節の動きの速さ、 m は体全体の質量、第2項の括弧内は脚にかかる荷重、 $\cos \theta_i$ は脚の位置に関する量である。係数 A は $\{A_{i,x}\} = \{-1, 1, -1, 1\}$, $\{A_{i,y}\} = \{1, 1, -1, -1\}$, $\{A_{i,\psi}\} = \{1, -1, -1, 1\}$ と与える。 g_x, g_y, ψ はそれぞれ胴体の重心の x 座標、 y 座標、腰の捻りを表す変数で、これらは次式にしたがう。

$$\begin{aligned} \dot{g}_x &= -\gamma_x \dot{g}_x - k_x g_x + \sin \theta_1 - \sin \theta_2 + \sin \theta_3 - \sin \theta_4, \\ \dot{g}_y &= -\gamma_y \dot{g}_y - k_y g_y - \sin \theta_1 - \sin \theta_2 + \sin \theta_3 + \sin \theta_4, \\ \dot{\psi} &= -\gamma_\psi \dot{\psi} - k_\psi \psi - \sin \theta_1 + \sin \theta_2 + \sin \theta_3 - \sin \theta_4. \end{aligned} \quad (2)$$

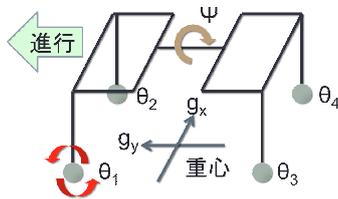


図1: 4足歩行 CPG モデルの概略

まず、先行研究 [1] の結果を再現するため、系の挙動が ω にどのように依存するかをシミュレーションで調べた。パラメーター値を $m = 2.0$, $\gamma_x = 3.0$, $\gamma_y = 4.0$, $\gamma_\psi = 2.0$, $k_x = 4.0$, $k_y = 16.0$, $k_\psi = 4.0$ とした。図2は $\omega = 0.6, 1.5$ の時の脚の位相変化である。(a) $\omega = 0.6$ のとき、各脚は同じ周期だがバラバラに動いている。この歩様を walk といい、ゆっくり歩くときの歩様である。(b) $\omega = 1.5$ のとき、左前脚と右後ろ脚、

右前脚と左後脚がペアになって、ほぼ同時に動いている。これを trot といい、早歩きするときの歩様である。また、 $\omega = 3.0$ のときは前脚、後脚がペアになってほぼ同時に動く、最速で走るとき歩様である gallop が観測された。

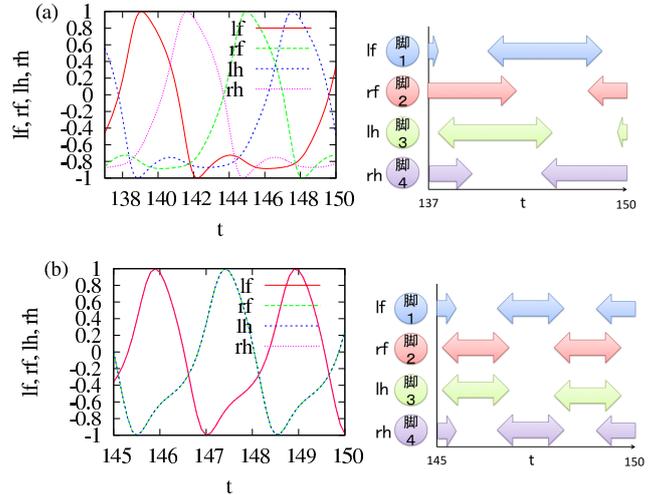


図2: 4足モデルの歩様。左: 各脚の位置を示す量 $\sin \theta_i$ の時系列。右: 各足が接地している時間帯。

次に、 ω と g_x を変化させて歩様転移を詳しく調べた。図3(左)は ω を 0.5 から大きくしていったもの、(右)は 4.0 から小さくしていったものである。一部の領域では得られる歩様が異なるヒステリシスが確認され、これは、系が双安定性を持つためである。どちらにも一部の領域では trot の代わりに右脚同士、左脚同士がペアになってほぼ同時に動く歩様である pace が観測された。

また、各歩様の最適性を調べるために、個体の平均移動速度 v の ω 依存性を調べた(図4(左))。赤い線がある初期条件から ω を大きくしていったとき、緑が小さくしていったときである。赤のほうに注目すると、小さな ω では静止した状態であるが $\omega = 0.3$ 付近から歩様 walk になり、 $\omega = 1$ 付近で trot になめらかに切り替わる(図3の $\gamma_x = 3.0$ を参照)。 ω とともに進行速度が上昇しているが、 $\omega = 2$ 付近から逆に減少を始める。つまり、trot には最適な進行速度があることがわかる。さらに、 $\omega = 2.3$ 付近で gallop に切り替わり、そこで速度が不連続に変化する。これは、trot において大きすぎる ω は歩様の安定性を損ない、gallop に転ずると考えられる。さらに gallop において、 ω を上昇させると、進行速度は上昇するが、 $\omega = 4.3$ 付近で新たな転移が起こった。この歩様はすべての脚が同時に動く不自然なものであった。また、 ω を減少させていくと歩様の転移は別のタイミングで起きた。

既存研究では、馬の移動速度と酸素消費量について各歩様に酸素消費量が最小となる速度が存在することや、馬が各歩様において最小酸素消費量のまわりで速

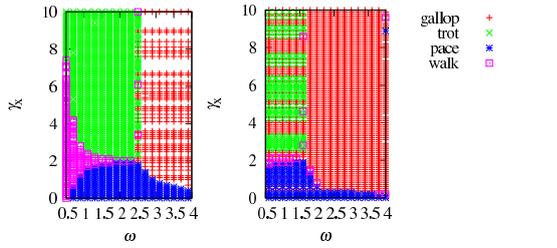


図 3: 4 足モデルの分岐図. ω を増加 (左), あるいは減少 (右) させた時に得られた歩様を表した.

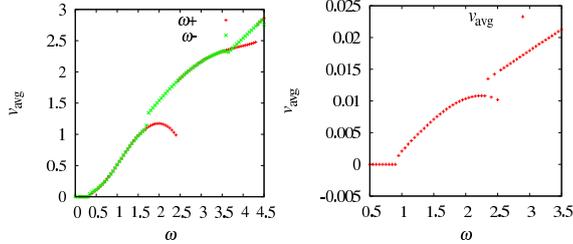


図 4: 歩様転移を表す分岐 (左:4 足歩行, 右:2 足歩行)

度を選んだことがわかっており [2], これを裏付ける結果をシミュレーションで得ることができた.

3 2 足歩行 CPG モデル

4 足歩行モデルの式をもとに, 以下の 2 足歩行モデルを作成した.

$$\dot{\theta}_1 = \omega - \left(\frac{m}{2} - g_x\right) \cos \theta_1, \quad (3)$$

$$\dot{\theta}_2 = \omega - \left(\frac{m}{2} + g_x\right) \cos \theta_2, \quad (4)$$

$$\ddot{g}_x = -\gamma_x \dot{g}_x - k_x g_x + \sin \theta_1 - \sin \theta_2. \quad (5)$$

ここではパラメータ値を $m = 2.0, \gamma_x = 1.0, k_x = 4.0$ とした. ω と v の関係をグラフにしてみると先程と同様に分岐が見られた (図 4(右)). このモデルでは, 小さな ω では停止状態が得られた. $\omega = 1$ 付近で walk に転移し, ついで, $\omega = 2.5$ 付近で両足が同時に動く歩様が得られた.

ここでは停止から walk への転移を理解するために安定性解析を行った. 停止状態 $\theta_1 = \theta_2 = \text{const}, g_x = 0$ のまわりで系を線形化する. このとき, ヤコビ行列の固有値は

$$\lambda_1 = \frac{-m\sqrt{1 - \left(\frac{2\omega}{m}\right)^2}}{2}, \quad \lambda_{2,3} = \frac{-\gamma_x}{2} \pm i\sqrt{\frac{4k_x - \gamma_x^2}{2}} \quad (6)$$

となった. 虚数解 $\lambda_{2,3}$ の実部が負であるから, λ_1 が負の実数解となる ω の範囲を求めると $\omega < \frac{m}{2}$ より $\omega < 1.0$ となった. よって, この区間では静止した状態が安定で, 歩くことができない. これによって図 4 左の停止から walk への転移が説明できた.

4 2 足歩行 KIK モデル

先程までとは異なり, CPG 制御を使わない KIK(窪谷-泉田-郡)モデル (図 5(左)) を用いてシミュレーションを行った. 式は以下である.

$$\ddot{X} = -\dot{X} - k_x X + g(\theta_1) - g(\theta_2), \quad (7)$$

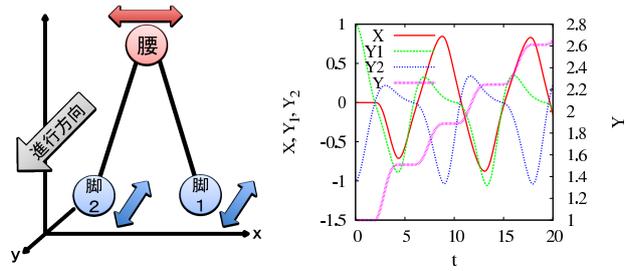


図 5: KIK モデル概略 (左), KIK モデルにおける各脚の位置 Y_1, Y_2 と腰の重心 X の移動を表示した (右).

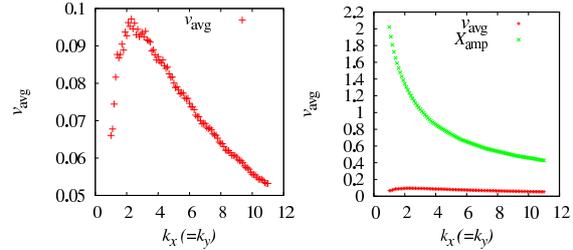


図 6: 速度 v (左) と腰の振幅 X_{amp} (右) の k_x 依存性.

$$\ddot{Y}_1 = -(m + aX)\dot{Y}_1 - k_y Y_1 + g(\theta_1), \quad (8)$$

$$\ddot{Y}_2 = -(m - aX)\dot{Y}_2 - k_y Y_2 + g(\theta_2), \quad (9)$$

$$\dot{Y} = (m + X)\dot{Y}_1 g(\theta_1) + (m - X)\dot{Y}_2 g(\theta_2). \quad (10)$$

ここで, X は腰の位置 (x 軸上), Y_1 は左脚 (脚 1), Y_2 は右脚 (脚 2) の位置 (y 軸上), Y は進んだ距離を表す. また, $g(\theta)$ は地面を踏みしめるときにかかる力を表す関数で, 各脚が接地したときに正の値を取り, 他は 0 である. 具体的には, $g(\theta) = -b \sin 2\theta$ ($\frac{\pi}{2} < \theta < \pi$), 0 (otherwise) で与える. パラメータ値は $m = 2.0, a = 1.0, b = 1.0, k_x = 1.3, k_y = 1.3$ とした. このモデルでも 2 足歩行が行われる様子を観察することができた (図 5).

パラメータ $k_x (=k_y)$ は CPG モデルでの ω の役割を果たすので k_x と平均速度 v の関係をグラフにした (図 6(左)). はじめは k_x が増加していくと速度があがり, $k_x = 1.0$ 付近では最大となり, その後減少していく. また, k_x と腰の揺れの振幅である X_{amp} の関係もグラフにすると (図 6(右)), k_x が増加していくにつれ腰の振りは小さくなっていくことが読み取れる.

5 まとめと今後の課題

どのモデルでも歩行を再現することができた. CPG モデルでは ω の値に対して効率良く速度 v が出せるように歩様が転移することがはっきりとわかった. また, KIK モデルでは CPG モデルと異なり分岐が起こらなかった. 今後は KIK モデルで walk と run の分岐が起こるようモデルを改良していきたい.

参考文献

- [1] 長澤昂ら. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2010, 2010.
- [2] Donald F Hoyt and C Richard Taylor. *Nature*, 1981.