走行するサラブレッドの遊脚期における振動数の調整

松本拓也^{1†}, 太田 憲², 仰木裕嗣², 高橋敏之³, 間 弘子³, 湯川治敏⁴

¹慶應義塾大学 SFC 研究所, ²慶應義塾大学, ³日本中央競馬会, ⁴愛知大学

要旨: 歩容は各肢の振動数と位相差で記述でき, 多くの歩容に関する研究は各肢の振動数が一致している前提で, 主に位相差の制御を議論してきた. しかし, サラブレッドのように前後肢の構造に差があり固有振動数が異なる場合, 歩容を実現するためには振動数を一致させる制御も必要である. そこで本研究は, サラブレッドの四肢の振動数を調整するメカニズムを明らかにするため, 各肢を合成振子として扱いダイナミクスの観点から前後肢の運動を比較した. 実験ではトレッドミル上を走るサラブレッドをモーションキャプチャで計測し, エネルギーに基づいた解析を行い, 後肢は主に回転トルクでスイングするのに対し, 前肢は後肢に比べ固有振動数が低いいためトルク発揮と共に振子長の短縮も行い, よりエネルギーを増加させ振動を加速させることを明らかにした. 以上より, サラブレッドは各肢の力学的差異を補償しながら, 各肢の振動数を調整して走行していることが示唆された.

キーワード: サラブレッド, 歩容, 可変モーメント振子モデル, 振動数, エネルギー変化率, モーションキャプチャ

1. はじめに

歩容は, 各肢の運動を振動現象として捉えれば振動数と位相差で記述できるが, 動物は同一振動数の拘束下で運動しており位相差のバリエーションが運動パターンを決定するため, CPG (Central Pattern Generator) を用いた多脚ロボットや動物の歩容生成に関する多くの研究では, 各肢の振動数が一致している前提で位相差の制御を中心に脚間協調メカニズムを議論している¹⁾. 特にロボットやシミュレーションを用いた研究では, 各肢の構造が均一であることを前提として, CPG 間の結合の仕方によって脚間協調を実現しようとしており, これらの研究は自律的, 安定的な歩容生成を実現しているものの, 結合の仕方に強く依存する CPG の設計は試行錯誤的に実現されるだけで, その設計理論もいまだ確立されていない²⁾.

ところが, 特に動物の肢においては, 骨格が非対称で駆動力などに前後差があることが多く, サラブレッドでも前後肢で質量や駆動力に差があり, 各関節の屈伸方向と運動における役割も異なるため, 制御を行わなければ前後肢の振動数は一致しにくい状態にある. また, 馬体は 500 kg 近い質量を有し, 高速走行する場合は各肢の運動にダイナミクスが強く影響するため, 前後肢の力学的差異が顕在化する. したがって, 歩容を実現するためにはそもそも各肢の振動数を一致させる制御も行う必要がある.

そこで本研究は, トレッドミル上で運動するサラブレッドを計測し, 走行中の肢の遊脚期の運動をダイナミクスの観点から前後で比較し, 各肢の振動数を調整するメカニズムを明らかにすることを目的とする. 一般にウマの肢は 5 リンクモデルで扱われるが, 各肢の運動を振動現象として考察するため, 本研究では多リンク機構をひとつにまとめて合成振子とみなしその運動を解析する. またエネルギーに基づいた解析を行い, エネルギーの変化から振動に影響をおよぼす要素を検討する.

2. 可変モーメント振子モデル

本研究では遊脚期中の各肢の運動を, 肩関節または股関節を回転軸とした合成重心の振子運動とみなし, 一つの合成振子とするモデルによって肢全体のダイナミクスを検討する. なお, 回転軸から合成重心までの距離 (モーメントアーム) と合成重心回りの慣性モーメントが変化することから, 本モデルを「可変モーメント振子モデル」と呼ぶ.

2.1 振子モデルの運動方程式

各肢は 5 つのセグメント ($n = 1, \dots, 5$) で構成され (図 1a), セグメント n の質量を m_n , 重心位置ベクトルを $\mathbf{x}_{g,n}$, 重心回りの慣性テンソルを $\mathbf{I}_n$, 角速度を $\boldsymbol{\omega}_n$ とする. 各慣性パラメータは Buchner らによる回帰式を用いて算出し³⁾, 5 つのセグメントから合成振子を形成する (図 1b). 合成振子の全質量を M , 合成重心の位置ベクトルを $\mathbf{X}_g$, 合成重心回りの合成慣性テンソルを $\mathbf{I}_g(t)$ とする. なお, $\mathbf{I}_g(t)$ は平行軸の定理によって各セグメントの慣性テンソルの和として得られるが, 合成重心の位置ベクトル $\mathbf{X}_g$ と各セグメントの重心位置ベクトル $\mathbf{x}_{g,n}$ との相対的な位置に依存するため, 時間で変化する.

2016 年 3 月 11 日受付 2016 年 12 月 26 日受理

[†] 〒 252-0882 神奈川県藤沢市遠藤 5322

慶應義塾大学 SFC 研究所

松本 拓也

図1 一般的な5リンクモデル(a)と可変モーメント振子モデル(b)

次に合成振子のダイナミクスを考える。本研究はサラブレッドをトレッドミル上で走行させたが、ここではいったんトレッドミルの速度を基に固定地面での走行に拡張し考察する。実験はトレッドミルの速度が一定時の定常な走行を計測したため、一定な走速度ベクトル $\bar{v}$ を仮定する。計測した振子の回転軸の位置ベクトルを x_0 とすると、地面走行に拡張した場合の回転軸の位置ベクトル $\hat{x}_0$ 、速度ベクトル $\hat{\dot{x}}_0$ は

$$\hat{x}_0 = x_0 + \bar{v}t \quad (1)$$

$$\hat{\dot{x}}_0 = \dot{x}_0 + \bar{v} \quad (2)$$

となる。また、走速度 $\bar{v}$ が一定のため加速度ベクトル $\hat{\ddot{x}}_0$ は

$$\hat{\ddot{x}}_0 = \ddot{x}_0 \quad (3)$$

となる。ここで、回転軸 x_0 と合成重心 X_g を結ぶ位置ベクトルから計算される合成振子の運動学的な合成角速度ベクトルを $\bar{\Omega}$ と定義し、振子の長さを $r(t) = |X_g - x_0|$ 、長軸方向の単位ベクトルを e_r とすると、地面走行に拡張した場合の合成重心位置ベクトル $\hat{X}_g$ は

$$\hat{X}_g = \hat{x}_0 + r e_r \quad (4)$$

と表せ、速度ベクトル $\hat{\dot{X}}_g$ は

$$\hat{\dot{X}}_g = \hat{\dot{x}}_0 + \dot{r} e_r + \bar{\Omega} \times r e_r \quad (5)$$

となり、式(3)から加速度ベクトル $\hat{\ddot{X}}_g$ は

$$\hat{\ddot{X}}_g = \hat{\ddot{x}}_0 + \ddot{r} e_r + 2\bar{\Omega} \times \dot{r} e_r + \dot{\bar{\Omega}} \times r e_r + \bar{\Omega} \times (\bar{\Omega} \times r e_r) \quad (6)$$

となる。振子の回転軸 x_0 に作用する外力を F 、重力加速度ベクトルを g とすると、式(6)から並進の運動方程式

$$M(\hat{\ddot{X}}_g - g) = F \quad (7)$$

は走速度 $\bar{v}$ に依存しないことを示している。

次に回転の運動方程式を考える。ここで合成振子は変形する振子であり、振子の重心回りの全角運動量

$$L = \sum_{n=1}^5 \{I_n \omega_n + m_n(x_{g,n} - X_g) \times \dot{x}_{g,n}\} \equiv I_g \Omega \quad (8)$$

はまとめて合成慣性テンソル $I_g(t)$ と動力学的な合成角速度ベクトル Ω の積で表すことができる。これより、先に定義した $I_g(t)$ の逆行列を用いて、振子の動力学的な合成角速度ベクトル Ω は

$$\Omega = I_g^{-1} L \quad (9)$$

と表すことができ、回転軸回りのトルクを τ とすると、回転の運動方程式は

$$I_g \dot{\Omega} + \dot{I}_g \Omega + \Omega \times I_g \Omega = \tau - r e_r \times F \quad (10)$$

となり、同様に走速度 $\bar{v}$ に依存しないことが示された。

以上より、走速度が一定な場合、振子のダイナミクスの計算は走速度に依存しないため、トレッドミル上の走行の動力学解析も地面走行と同様に扱うことが可能であることが示された。ただし、並進の運動方程式では運動学的な角速度 $\bar{\Omega}$ を、回転の運動方程式では動力学的な角速度 Ω を用いていることに留意されたい。

2.2 振子モデルのエネルギー変化率

振子のエネルギーの時間変化率（以後エネルギー変化率と呼ぶ）を導出し、それによって振動数の変化に影響をあたえる要素を示す。振子の力学的エネルギーを

$$E \equiv \frac{1}{2} M \hat{\dot{X}}_g^T \hat{\dot{X}}_g + \frac{1}{2} \Omega^T I_g \Omega - M g^T \hat{X}_g \quad (11)$$

と定義し、時間微分すると

$$\dot{E} = M(\hat{\ddot{X}}_g - g)^T \hat{\dot{X}}_g + \dot{\Omega}^T I_g \Omega + \frac{1}{2} \Omega^T \dot{I}_g \Omega \quad (12)$$

となる。なお T はベクトルと行列の転置を表す。上式に運動方程式(7)、(10)を代入し、重心の速度式(5)を考慮すると

$$\begin{aligned} \dot{E} &= F^T \hat{\dot{x}}_0 + F^T (\dot{r} e_r) + F^T (\bar{\Omega} \times r e_r) + \tau^T \Omega \\ &\quad - (r e_r \times F)^T \Omega - \frac{1}{2} (\dot{I}_g \Omega)^T \Omega - (\Omega \times I_g \Omega)^T \Omega \\ &= F^T \hat{\dot{x}}_0 + F^T (\dot{r} e_r) \\ &\quad + \tau^T \Omega + (r e_r \times F)^T (\bar{\Omega} - \Omega) - \frac{1}{2} \Omega^T \dot{I}_g \Omega \end{aligned} \quad (13)$$

を得る。このエネルギー変化率は、仕事率に相当する合成振子に作用する外力のベクトルと速度ベクトルとの内積の総和によって運動の状態を記述している。このように、エネルギーに基づいて議論することで、効率よいエネルギー供給方法などを運動の状態、すなわち力と速度や、その方向からも議論することができる⁴⁾。

ここで、改めて走速度 $\bar{v}$ に注目すると、式(13)は第1項 $F^T \hat{\dot{x}}_0 = F^T (\dot{x}_0 + \bar{v})$ のみ $\bar{v}$ に依存する。このうち $F^T \bar{v}$ は走行として振子が速度 $\bar{v}$ で平行移動することに寄与し、振子の振動へは貢献しない。よって本研究では $\bar{v} = 0$ とし

$$\begin{aligned} \dot{E} &= F^T \dot{x}_0 + F^T (\dot{r} e_r) \\ &\quad + \tau^T \Omega + (r e_r \times F)^T (\bar{\Omega} - \Omega) - \frac{1}{2} \Omega^T \dot{I}_g \Omega \end{aligned} \quad (14)$$

を用いる。こうして、振子の振動数の変化について走速度をキャンセルしたエネルギー変化率で議論し、その変化に影響をあたえる要素を浮き彫りにした。式(14)第1項は回転軸

の並進運動によるエネルギー変化率, 第2項は振子の伸縮によるエネルギー変化率, 第3項は回転軸回りのトルクによるエネルギー変化率, 第4項は回転軸に作用する力のモーメントによるエネルギー変化率, 第5項は合成重心回りの慣性モーメントの変化によるエネルギー変化率を表す。

以上より, 本研究では振動数の変化はエネルギー変化率で議論できると考え, 式(14)に従い各肢のエネルギー変化率を要素に分けることで振動数を調整するメカニズムを考察する。

3. 方法

3.1 実験方法

健康なサラブレッド4頭(4-7歳, 480-560 kg)を用い, トレッドミル上の走行運動をモーションキャプチャ (Vicon MX シリーズ, Vicon Motion Systems Ltd. カメラ16台) を用いて500 Hzで計測した。試技は右手前のキャンター(肢の運動は, 左後肢→右後肢→左前肢→右前肢の順に行われた)で, トレッドミル速度12 m/sでの定常走行時の運動を4から5周期分連続して計測した。

反射マーカは前肢の各関節中心に6点, 後肢の各関節中心に6点の四肢で計24点貼付した。また背面には, 正中線推定のため脊椎に沿ってキ甲, 背部2点, 腰部, 尻部に計5点貼付した(図2a)。

3.2 解析方法

サラブレッドの肩・肘関節および股・膝関節の関節中心位置を3次的に推定するモデルは一般に知られていないため, 本研究では各肢の運動が矢状面内で行われると仮定し解析した(図2b)。各肢の運動には位相差があり解析対象となる遊脚期のタイミングが異なるが, すべての肢が同一の矢状面上を運動すると仮定するため, 左後肢の遊脚期開始から右前肢の遊脚期終了における5点の背面マーカの鉛直方向を除いた位置座標を用い, 最小二乗法で正中線を推定した。そして,

図2 実験におけるマーカ貼付位置 (a) と矢状面への投影 (b)

正中線の進行方向を正とした x 軸, 鉛直方向上向きを正とした y 軸, xy 平面(矢状面)に直交する z 軸で矢状面座標系を定義し, 各マーカの位置座標を矢状面座標系に座標変換し, z 成分を定数とした。

また, 本研究では立脚期を含む後方スイング局面は除き, 動力学的な合成角速度 Ω の z 成分を Ω_z と定義し, 代表的な1周期分の前スイング局面($\Omega_z \geq 0$)を解析区間とした。

4. 結果

以下の解析では4頭とも同様の傾向が見られ, 定常走行中は各馬の各周期間のばらつきも少ないため, ここでは, 被験馬のうち代表的な一頭(6歳, 560 kg)のうちの1周期分の実験結果を示す。

4.1 各肢の固有振動数

各肢について, スイング開始時の振子長 r と回転軸回りの合成慣性モーメントの値を用いて, 合成振子の固有振動数 f を計算した(表1)。この結果より, 後肢に比べ前肢の値が低く, 歩容を実現するために特に前後で振動数を調整する必要があることが示唆された。

4.2 振子のエネルギー変化率

図3に, 式(14)に基づいた各肢のエネルギー変化率を示す。各グラフでは遊脚期が出現する順にa左後肢(LH), b右後肢(RH), c左前肢(LF), d右前肢(RF)とし, 運動の様子を表すスティックピクチャを付した。

結果を前後肢で比較すると, 前肢(LF, RF)はスイング前半に振子の伸縮によるエネルギー変化率 $F^T(\dot{r}e_r)$ の増加がみられるが, 後肢(LH, RH)に比べ回転軸回りのトルクによるエネルギー変化率 $\tau^T\Omega$ の変化が小さかった。一方, 後肢は振子の伸縮によるエネルギー変化率 $F^T(\dot{r}e_r)$ がほぼゼロだったが, 回転軸回りのトルクによるエネルギー変化率 $\tau^T\Omega$ の変化は前肢よりも大きかった。特にスイング後半では, 前肢ではほぼ変化のなかった回転軸の並進運動によるエネルギー変化率 $F^T\dot{x}_0$ 及び回転軸に作用する力のモーメントによるエネルギー変化率 $(re_r \times F)^T(\Omega - \Omega)$ によるエネルギー増加が生じており, それと呼応するように $\tau^T\Omega$ の変化も大きくなっている。

次に結果を左右の肢で比較すると, 左肢(LH, LF)はスイングの前半で $F^T\dot{x}_0$ の増加がみられるが, 右肢(RH, RF)はほぼみられない。その代わりに, $\tau^T\Omega$ によるエネルギー増加は左肢よりも右肢の方が大きかった。

4.3 振子長の変化とトルクの変化によるエネルギー変化率

図4に, 各肢について式(14)第2項 $F^T(\dot{r}e_r)$ を構成する

表1 各肢の固有振動数

	左前肢	右前肢	左後肢	右後肢
f [Hz]	0.611	0.605	0.647	0.645

図3 各合成振子のエネルギー変化率
四肢のエネルギー変化率を、式(14)に基づき要素に分けて示した。
各グラフの示す値は以下の通り。

$\cdots \cdots F^T \dot{x}_0$ $-\cdots- F^T(\dot{r}e_r)$ $\text{—} \tau^T \Omega$
 $-\cdot-\cdot- (re_r \times F)^T(\bar{\Omega} - \Omega)$ $\text{—} -1/2 \Omega^T I_g \Omega$

振子長の時間変化率 $\dot{r}$ と外力の長軸方向成分 $F^T e_r$ を示す。前肢は、 $\dot{r}$ がスイング前半で大幅に負となり $F^T e_r$ も同時に負になったことで、 $F^T(\dot{r}e_r)$ としてエネルギーの増加が生じた。このエネルギー増加は、特にスイング開始時に他の項と比べ最も大きな値を示した(図3c, d)。一方後肢は、 $\dot{r}$ の変化が前肢と比べ小さく、 $F^T(\dot{r}e_r)$ としての変化も小さかった(図3a, b)。

図5に、各肢について式(14)第3項 $\tau^T \Omega$ を構成する振子の回転軸回りのトルク τ のz軸成分 τ_z と角速度 Ω のz軸成分 Ω_z を示す。すべての肢で τ_z がスイングとともに正から負の値へと変化し、 $\tau^T \Omega$ としてスイング前半にエネルギーを増加させ後半に減少させた。ただし、前肢に比べ後肢ではスイング後半に τ_z がより大きく負となり、 $\tau^T \Omega$ はより大きくエネルギーが減少した(図3a, b)。

5. 考察

エネルギー変化率式(14)の各項の性質を力ベクトル部分と速度ベクトル部分に分けて考える。第1項 $F^T \dot{x}_0$ では、遊脚期中の肢は離地しているため、回転軸に作用する外力 F は胴体とその他の部位の運動に強く拘束され、回転軸の速度 $\dot{x}_0$ も同様に並進運動を直接制御することは難しいという意味で、ここではそれらの内積である $F^T \dot{x}_0$ も受動的に変化していると考え。第2項の $F^T(\dot{r}e_r)$ における振子長の時間変化率 $\dot{r}$ は、 r が振子の回転軸から合成重心位置までの距離であり、その変化は肢の各セグメントの重心位置に依存するため、合成振子モデルの運動方程式(10)において陽に表れない他の関節トルクによって制御される。したがって、ここでは $F^T(\dot{r}e_r)$ の変化はそれら遠位側の関節トルクによる $\dot{r}$ の制御によって能動的に行われていると考える。第3項の $\tau^T \Omega$ も、回転軸回りのトルク τ により直接制御が可能のため、その変化は能動的と考える。第4項 $(re_r \times F)^T(\bar{\Omega} - \Omega)$ は、力のモーメント $re_r \times F$ 、 $\bar{\Omega} - \Omega$ 共に直接制御するアクチュエータがないため、項全体として受動的に変化していると考え。第5項 $-1/2 \Omega^T I_g \Omega$ は、図3よりいずれの肢においても他の項と比較して値が小さいため以降の議論では省略する。

以上より、式(14)第2項 $F^T(\dot{r}e_r)$ および第3項 $\tau^T \Omega$ が能動的に振子のエネルギーを変化させると考え、以降はこの二項

図4 各肢の振子長の時間変化率および回転軸に作用する外力と振子の長軸方向の単位ベクトルの内積

図5 回転軸回りのトルクのz軸成分および角速度のz軸成分

に注目し振動数を調整するメカニズムを考察する。

図4の結果より、前肢はスイング前半に振子長 r を短縮させることで $F^T(re_r)$ としてエネルギーを増加させ、 $\tau^T\Omega$ によるエネルギー増加と共にスイングを加速させていることが示唆された。この制御は、パラメータである振子長を変化させ振動を励起させるという点でパラメータ励振現象⁵⁾を利用した歩行制御に似ている。一方、後肢では、 $F^T(re_r)$ としてのエネルギー変化が小さかったため、能動的なエネルギーの増減は $\tau^T\Omega$ を中心に行っていることが示唆された。

前肢の $F^T(re_r)$ によるエネルギー増加をもたらす振子長の短縮は肢を折りたたむ動作に相当し、合成振子モデルの運動方程式(10)には陽に表れない遠位側の関節トルクによって特に制御される。一方で、後肢は式(10)の回転軸回りのトルク τ によるエネルギーの増減が支配的であった。これらの結果は、肢のスイングを最も近位の関節トルクを中心に行うか、遠位側の関節トルクまで含めて用いるかという制御方式の違いを表しており、各肢の遊脚期における動力源が後肢は根元の股関節トルク、前肢は根元より遠位側の肘関節トルクである事実にも合致する^{6,7)}。したがって、サラブレッドは各肢の異なる位置に配置された動力源による異なる制御方策によって、固有振動数の差異を調整していると考えられる。

また前後肢ともに、 $F^T\dot{x}_0$ 及び $(re_r \times F)^T(\bar{\Omega} - \Omega)$ の変化を補償するように $\tau^T\Omega$ を変化させていたことに注目すると、馬全体の系からみれば拘束力 F を介して立脚期にある肢の運動が遊脚期にある肢に作用し、歩容に影響を及ぼしていると考えられる。多くの多脚歩行のモデルでは、各肢のCPG間の結合のみを考慮して設計し、力学が形成するリズムよりもCPGによるリズム形成に重きを置いている感がある。しかし、本研究結果はウマが他の部位からのダイナミクスの影響を考慮しながら歩容を形成していることを示唆しており、歩容が異なれば肢の接地するタイミングも変わり $\tau^T\Omega$ のパターンも変わると考えられる。

6. まとめ

本研究では、別々に振動している多リンク機構の振動現

象を巨視的に観察するため、可変モーメント振子モデルを導入し、サラブレッドの各肢を合成振子として扱った。この解析により、前後肢の固有振動数が異なるため、各肢の振動数を一致させる制御も考慮する必要があることを示した。

また、振子の力学的エネルギーの時間微分は、振子に作用する外力とその力ベクトルが作用する位置の速度ベクトルとの内積で記述される仕事率と等価になることから、本研究のようにエネルギー変化率に基づいて解析することで、各ベクトルの方向も考慮しながら、歩容の状態に応じたエネルギー供給の戦略を明らかにすることができる。これにより、固有振動数の高い後肢は回転軸回りのトルクを中心にエネルギーを供給するが、固有振動数の低い前肢は振子長の伸縮によってエネルギー供給を行いながらスイングを加速させていることが明らかとなった。この結果は、サラブレッドの各肢の動力源となる関節トルクの違いを反映している。さらに、回転軸に働く拘束力 F による他の部位からのダイナミクスの影響を考慮しながら歩容を形成していることが示唆された。

以上より、多脚動物(ウマ)の歩容形成を考える上で肢の非対称性は無視できず、動物(ウマ)は各肢の差異を補償しながら歩容を実現していると考えられる。

参考文献

- 1) 伊藤宏司：身体知システム論—ヒューマンロボティクスによる運動の学習と制御, 139-166, 共立出版, (2005).
- 2) 大脇大, 石黒章夫：ミニマルなCPGモデルから探る四脚動物の脚間協調メカニズム, 計測と制御, 54(4), 272-277, (2015).
- 3) Buchner, H. H. F., Savelberg, H. H. C. M., Schamhardt, H. C. and Barneveld, A.: Inertial properties of dutch warmblood horses, Journal of Biomechanics, 30(6), 653-658, (1997).
- 4) Yamazaki, N., Ohta, K. and Ohgi, Y.: Mechanical energy transfer by internal force during the swing phase of running, Procedia Engineering, 34, 772-777, (2012).

- 5) 浅野文彦, 羅志偉: パラメータ励振に基づく伸縮脚ロボットの動的歩行制御, 日本ロボット学会誌, 23(7), 910-918, (2005).
- 6) Clayton, H. M., Hodson, E. and Lanovaz, J. L.: The forelimb in walking horses: 2. Net joint moments and joint powers, Equine Veterinary Journal, 32(4), 295-299, (2000).
- 7) Clayton, H. M., Hodson, E., Lanovaz, J. L. and Colborne, G. R.: The hindlimb in walking horses: 2. Net joint moments and joint powers, Equine Veterinary Journal, 33(1), 44-48, (2001).
- 8) 植村隆志, 小金澤鋼一, 加藤達郎, 田中靖久, 笠井妙美: 可変モーメントアームをもつ振り子モデルによる鉄棒運動の解析, 東海大学総合経営学部紀要, (1), 57-63, (2008).

松本拓也 (まつもと たくや)

2015 年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士課程修了。主としてサラブレッドのバイオメカニクス的研究に従事。(バイオメカニズム学会正会員)

Frequency control of equine limbs movement during the swing phase of the canter

Takuya MATSUMOTO^{1†}, Ken OHTA², Yuji OHGI²,
Toshiyuki TAKAHASHI³, Hiroko AIDA³ and Harutoshi YUKAWA⁴

¹ Keio Research Institute at SFC, ² Keio University, ³ Japan Racing Association, ⁴ Aichi University.

Abstract : Most studies of gait control focus phase difference control of limbs using a homogeneous model to realize various gait patterns. However, most animals including Thoroughbred horses have different natural frequencies in fore- and hindlimbs. Therefore, in order to achieve locomotion, frequencies of limb movement must be controlled so that they are kept constant. The aim of this study was to clarify frequency control mechanisms in equine limbs during swing phase. In this study, we measured limbs movements of 4 Thoroughbred horses cantering on the treadmill. An energy-based analysis was carried out using variable moment pendulum model. In hindlimbs, the energy source for swing is mainly the torque of rotation axis. On the other hand, forelimbs motion is caused by the pendulum extension/contraction in addition to the torque. Our results show that Thoroughbred horses choose appropriate energy generating strategy properly so as to compensate for asymmetry between fore- and hindlimb dynamics.

Key Words : Thoroughbred, Gait, Variable moment pendulum model, Frequency of limb, Rate of energy change, Motion capture

Received Mar. 11, 2016 Accepted Dec. 26, 2016

[†] Takuya MATSUMOTO

Keio Research Institute at SFC,
5322 Endo, Fujisawa, Kanagawa, 252-0882, JAPAN,