

4脚ロコモーションのリズムと歩容の生成原理

木村 浩 (京都工芸繊維大学)

Principle of Quadrupedal Legged Locomotion

Hiroshi KIMURA (Kyoto Institute of Technology)

Keywords: Emergence, Rhythm&gait, Leg phase switching, Self-excited oscillations, Spatiotemporal leg load pattern

1 はじめに

脊髄ネコ・後2脚実験 (Forssberg 1980) でトレッドミル・ベルト速度上昇時に観察される左右逆位相・歩行から逆位相・走行を経て同位相・走行までの遷移は、上位指令のない脊髄・感覚-運動機能によるロコモーションパターン創発であると考えられる。本稿ではこの実験の構成論的理理解¹を試みる。構成論的理理解の対象は、除脳ネコ歩容遷移における神経システムの働きではなく、リズムと歩容の生成という物理現象の創発メカニズムである。上付記号 hat: ^, bar: -, tilde: ~, check: ~ はそれぞれ変数のノミナル値、計測値、目標値、正規化値を表す。脚番号: i は省略されることがある。関連する動画が WEB 上で公開されている [1]。

2 脚式ロコモーションの原理とは？

2.1 脚相切替

左右各後脚 (LH, RH) の運動は、遊脚 (SW) 相と支持脚 (ST) 相からなる。sw-to-st 切替が着地 (TD), st-to-sw 切替が離地 (LO) である。非定常ロコモーションにおいても Fig.1: (a) に示すステップサイクルの組を考え両ステップサイクルとよぶ。 T_{sw}^i , T_{st}^i を脚 i の SW 相、ST 相の期間とすると、ステップサイクル期間: $T_{sc}^i (= T_{sw}^i + T_{st}^i)$, デューティ比: $\beta^i (= T_{st}^i / T_{sc}^i)$ となる。 $k-l$ 脚間の正規化された TD 時位相差: $\Delta t_{TD}^{k,l}$ は、両ステップサイクル内での TD 時刻を t_{TD}^i とし、以下で計算される。

$$\Delta t_{TD}^{k,l} = (t_{TD}^k - t_{TD}^l) / T_{sc}^{ave} \quad k, l \in \{LH, RH\} \quad (1)$$

ここで、 $T_{sc}^{ave} = (T_{sc}^{LH} + T_{sc}^{RH}) / 2$ は両ステップサイクルでの T_{sc} 平均である。 Δt_{TD} を TD 時・脚間位相差とよぶ。LO 時・脚間位相差: Δt_{LO} も同様に定義される。通常、リズムは周波数 ($1/T_{sc}$) とデューティ比で、歩容は Δt_{TD} の脚間組み合わせで定義される。この定義では、

¹要素自身と要素間のダイナミクスを定義したモデルを構成し、モデルと環境との相互作用の力学シミュレーションや実験により創発現象を模擬する。そして、結果として現れた時空間パターンの生成や遷移の過程を、数理的に解析する、もしくは、詳細に分析することで、創発現象の背後にあるメカニズムの理解を目指す。

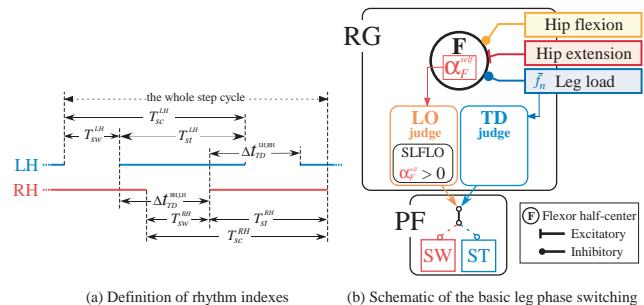


Fig. 1 Rhythm indexes and Leg phase switching in CPG

リズムと歩容は全脚の脚相切替の繰り返しとして現れる時空間パターンの一部となる。本稿では、さらに AEP と PEP (anterior and posterior extreme positions) も時空間パターンに含めて考察する。

脚相の切替が重要であることは、初期のロボット脚式ロコモーション研究において、静的に不安定な1脚 (Raibert 1984) や竹馬型2脚 (Miura and Shimoyama 1984) の動的な安定化が、主に脚相切替の繰り返しによる偏差の減衰と TD 時の初期値設定により行われたことで、はっきりと示されている。本稿では、制御器の SW 相への切替 (LO タイミング) の決定に着目し、リズムと歩容の生成と遷移について考える。

2.2 感覚-運動機能と脚間協調

現在、4脚動物のロコモーションにおいて関節の屈筋と伸筋の交替活動が、脊髄・中枢性パターン生成器 (Central Pattern Generator, CPG) により生成されることは広く認められている。CPG は交替活動を司るリズム生成器 (Rhythm Generator, RG) と複数筋活動の共働を司るパターン形成部 (Pattern Formation, PF) に分けられる。

感覚フィードバックがリズムに与える影響について、ST 相で「腰 (関節後方) 伸展と脚徐負荷が LO を促進する」ことが知られている (Pearson 2008)。この知見に基づき、Ekeberg と Pearson は、重力下で直立した脚と胴体を持つネコモデルを用いた三次元後2脚シミュレーションにおいて、4 状態 (TD, ST, LO, SW) 遷移機械として働く RG への感覚情報として腰伸展と脚徐負荷を用

い、左右 RG 間ネットワークなしで安定なリズムと逆位相歩行が生じること、腰伸展のみでは不安定であることを見た (Ekeberg 2005)。

筆者は、この RG モデルに以下の理由から「神経系・身体と環境の相互作用」による創発の可能性を見出した (Maufroy 2010)。

- 脚式ロコモーションの本質である脚相の切替、TD と LO のタイミング判定を司る、
- 脚式ロコモーションの安定性にとって重要なセンサ情報を LO タイミング判定に用いている。

2 番目の理由の意味は、腰伸展・増加は RG の LO タイミングが近いこともしくは幾何学的限界が近いことを示している点で、不十分な脚徐負荷での LO は胴体のロール・ピッチ運動に影響を与えて状態を不安定にする点で明らかである。本稿では、この RG モデルをさらに発展させて「リズムと歩容の創発」に適用する。

リズムと歩容は各脚の LO タイミングが脚間協調の影響を受けて最終的に決まる。脊髄ネコ実験 (Grillner 1978) において手動で片脚の腰伸展を変化させて LO を起こしたときに、ベルト上の対側脚は ST 相とは限らず SW 相でも相当数観察されたことは、左右 RG 間協調が抑制性とは限らないことを示している。また、別の実験 (Forssberg 1980) でベルト速度上昇に伴い左右逆位相から同位相に遷移した結果は、上位指令なしでは左右 RG 間協調が興奮性である可能性を示している。

2.3 脚負荷パターン

創発においては、環境との相互作用、具体的には脚先に働く反力をしっかり見る必要がある。さらに、上記の脊髄・感覚-運動機能を用いるならば ST 相後半の LO タイミング決定で脚負荷は大きな役割を果たす。したがって、脚式ロコモーションでの脚負荷時間パターン (Geyer 2006) についてある程度知っておくことは、重要である。

Fig.2: (a) & (b) に示された健常イヌの歩行と走行時のパターン (Fischer 2013) はそれぞれ 2 つまたは 1 つのピークを持ち、ここでは M 型とベル型とよぶ。歩行での脚負荷パターンは複雑であるが、一般に移動速度上昇にともなって第一ピークの方が第二よりも高くなり、M の谷が深くなる。walk では ST 相の最終盤で左右対側脚 TD による脚徐負荷が LO を促す。走行での脚負荷パターンは比較的簡単で、ST 相の前半に蓄えられたバネ保存エネルギーが後半に運動エネルギーに変換される過程でベル型パターンが現れる。ベル型パターンは他脚とは関係なしに ST 相後半での脚負荷の確実な減少を保証しており、LO タイミング判定を早める余地がある。これが本稿の左右同位相への遷移で重要な点である。

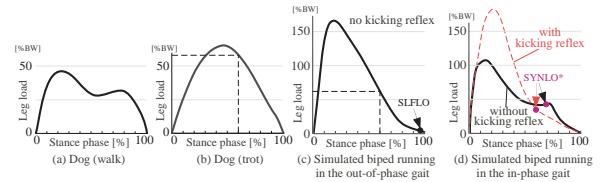


Fig. 2 Leg load patterns normalized by body weight (BW)

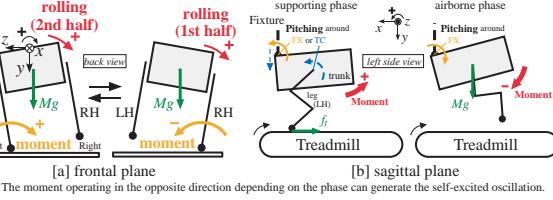


Fig. 3 Self-excited oscillation in the frontal or sagittal plane

2.4 脚相切替からリズムと歩容の創発へ

胴体を持つ後 2 脚モデルにおいて、各脚の脚相切替は 2 つの片脚支持期・両脚支持期・両脚遊脚期という 4 つの状態を生じ、脚相によって反対方向に働く重力モーメント (Fig.3) または重力が復元力として働くため、3 種類の自励振動が発生する。すなわち、胴体のロール振動 (歩行時) とピッチ振動・上下振動 (走行時) である。これらの胴体振動の (角) 加速度または (角) 減速度は、各脚の脚負荷の増減に大きな影響を与える。ここで、脚負荷が脚相切替に大きな影響を与えるとき、脚負荷の時間・空間パターンはそれぞれリズムと歩容を支配する。

このような「脚相切替と胴体自励振動および脚負荷時空間パターン間の相互作用」が、「脚式ロコモーション・創発現象の背後にあるメカニズム」であることを、拘束器つき後 2 脚ロボット・シミュレーション [1] により示す。

3 口コモーション制御器

2 つの脚制御器と脚間協調器から構成される。脚制御器は CPG と関節駆動部 (Output Motor Stage, OMS) からなる。CPG の概要 (Fig.4) において、RG は SW 相 (図左) と ST 相 (図右) という二つの脚相を持つ。RG の主な役割は脚相切替の判定である。これを TD または LO タイミング判定とよぶ。

RG は脚相切替決定時に PF の状態を切替え、脚の *sw* または *st* でのステッピング運動を起動する。PF は各脚相での脚先目標軌道を生成する。ピッチ面内で胴体に固定された腰関節に原点をおく *x-y* 座標系で脚先位置 $\mathbf{r} = [x \ y]^T$ と速度 \mathbf{v} が定義され、表記 $(*)_x$ はベクトル \mathbf{r} の *x* 座標値を表す。OMS は関節 PD 制御として実装されている。結果として、脚はピッチ面内でステッピングを行う。

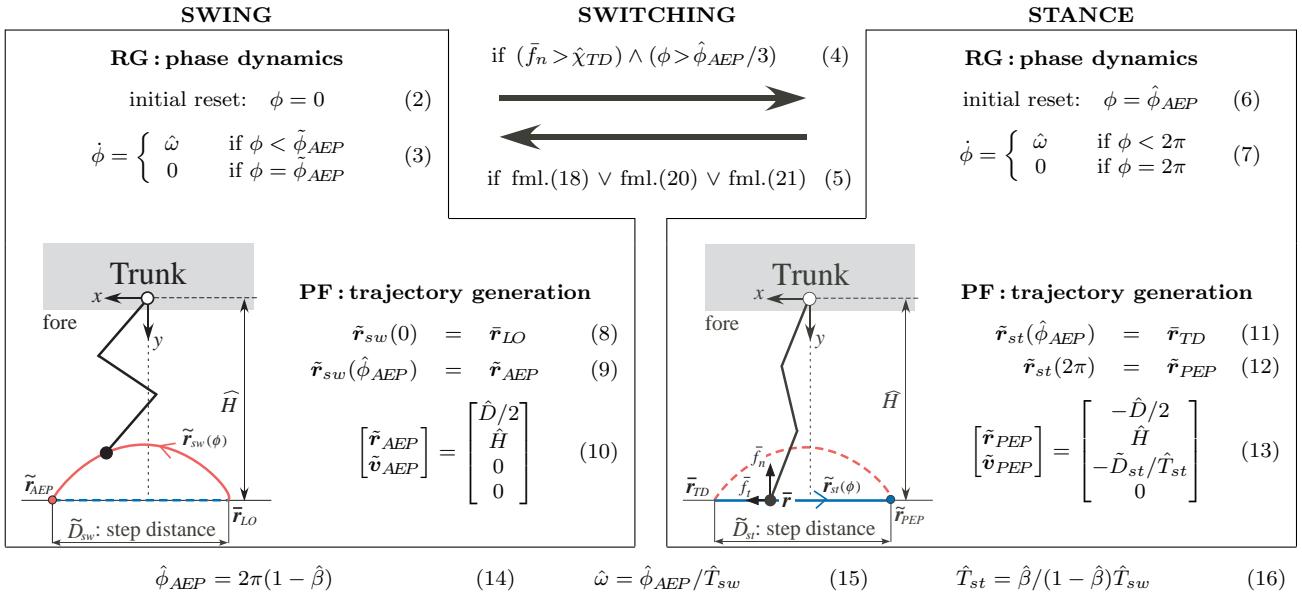


Fig. 4 Overview of a CPG

3.1 脚相切替モデルと FHC 活性度

脚相切替モデルを Fig.1: (b) に示す。図中の **F** は屈筋 FHC(Flexor Half-Center)を表している。簡略化のため伸筋 EHC は用いていない。RG は脚負荷 \bar{f}_n を用いて TD タイミング判定を行う。一方、RG の FHC が行う LO タイミング判定はかなり複雑である。

FHC には腰屈曲と腰伸展および脚負荷が興奮性または抑制性の感覚情報として入力される (Frigon 2017)。LO タイミング判定 (Ekeberg 2005) を参考にして、これら感覚情報のみで決まる脚 i の「FHC 活性度 α_F^i 」を新たに提案する。高い FHC 活性度は、自脚の LO タイミング決定を必ず起こし、他脚の LO タイミング決定を促進または抑制する可能性がある。

α_F^i は、脚先位置の x 座標値 $(\bar{r}^i)_x$ と脚負荷 \bar{f}_n^i という計測値を用いて、次式で定義される。

$$\begin{aligned} \alpha_F^i = & -\max(\bar{r}_{flx}^i, 0)/(\hat{D}/2) + \max(\bar{r}_{ext}^i, 0)/(\hat{D}/2) \\ & + C_{frc}\{\hat{\chi}_{LO} - \min(\bar{f}_n^i, \mu\hat{\chi}_{LO})\}/\hat{\chi}_{NM} \end{aligned} \quad (17)$$

ここで、 $\bar{r}_{flx}^i (= (\bar{r}^i)_x)$ 、 $\bar{r}_{ext}^i (= -\bar{r}_{flx}^i)$ は計測される腰屈曲と腰伸展であり、ノミナルな歩幅 \hat{D} と脚負荷 $\hat{\chi}_{NM}$ は正規化パラメータである。また、LO タイミング判定のための重要なパラメータとして $\hat{\chi}_{LO}$ は脚負荷の閾値を設定し、 $C_{frc}(> 0)$ は腰屈曲や伸展と脚負荷の相対的な重みを設定する。右辺の項を前から順に、腰屈曲項・腰伸展項・脚負荷項とよぶ。

式 (17)において、 α_F^i と脚先 x 座標値の関係について説明するとき腰屈曲と腰伸展を使い分けるため、 \max 関数を用いて $(\bar{r}^i)_x$ を \bar{r}_{flx}^i と \bar{r}_{ext}^i に分けている。またデータ

タグラフの見易さのため、TD 後に \bar{f}_n^i が増加したとき α_F^i が極端に小さな負の値にならないように、 \min 関数とパラメータ μ を用いて脚負荷項の下限を設定している。腰伸展と脚徐負荷の進行は、FHC 活性度を増加させる方向に働く。これは 2.2 節で述べた LO を促進する脊髄・感覚-運動機能を定式化したものに他ならない。

RG は自身 (self) の FHC 活性度: α_F^{self} を用いて LO タイミング判定を行い、以下の条件が満たされたとき自身の脚相の SW 相への切替を決定する。この LO タイミング決定を SLFLO、この式を SLFLO 条件とよぶ。

$$\alpha_F^{self} > 0 \quad (18)$$

3.2 RG の実装

TD タイミング判定の条件式 (4) は、計測される脚負荷 \bar{f}_n と閾値 $\hat{\chi}_{TD}$ を比較する不等式と LO 後に早期の ST 相への切替を回避するための ϕ の不等式の論理積となっている。LO タイミング判定式 (5) は、SLFLO 条件式 (18) と、3.4.1 項で述べられる 2 つの相互 LO 促進条件式の論理和となっている。

ノミナル値である \hat{T}_{sw} と $\hat{\beta}$ を与えたとき、他のパラメータのノミナル値は式 (14)～(16) により計算される。RG は内部変数としてステップサイクル内での位相を表す変数 $\phi(0 \sim 2\pi)$ を持つ。脚相切替時に、 ϕ は式 (6) と式 (2) により、各脚相の初期値 $\hat{\phi}_{AEP}$ と 0 にそれぞれリセットされる (Tsujita 2001)。 ϕ は、式 (3) と式 (7) により各脚相で $\hat{\omega}$ を積分して単調増加するが、それぞれの上限値 $\hat{\phi}_{AEP}$ と 2π に達した場合には、式 (4) または式

(5) が成立するまで脚相切替は生じないため、上限値にとどまり続ける。すなわち、RG は固有周波数を持たない 2 状態遷移機械として振る舞う。

3.3 PF と OMS の実装

PF は RG から脚相 (leg phase: $lp \in \{sw, st\}$) と位相 ϕ を受け取り、脚先目標軌道を生成する [1]。軌道の初期値や終端目標値は、Eq's.(8)~(13) により設定される。

PF は脚先目標軌道 $\tilde{r}(\phi)$ から関節 j の目標角度 $\tilde{\theta}_j$ と角速度 $\dot{\tilde{\theta}}_j$ を逆運動学より計算して、駆動部 (OMS) に送る。駆動部は各関節で、計測した角度 $\bar{\theta}_j$ と角速度 $\dot{\bar{\theta}}_j$ を用いて次式の PD 制御を行い、トルク Γ_j をアクチュエータから出力する。ここで、 ${}^{lp}K_P^j$, ${}^{lp}K_D^j$ は、脚相 lp , 関節 j での PD ゲインである。

$$\Gamma_j = -{}^{lp}K_P^j(\bar{\theta}_j - \tilde{\theta}_j) - {}^{lp}K_D^j(\dot{\bar{\theta}}_j - \dot{\tilde{\theta}}_j) \quad (19)$$

3.4 脚間協調と感覚-運動機能の追加

3.4.1 FHC 活性度に基づく相互 LO 促進

力学的相互作用のなかで左右の RG 脚相と脚負荷パターンを同位相に遷移させるために、上述のロコモーション制御器に明示的な RG 間協調を追加する。

FHC 活性度: $\alpha_F^i, i \in \{LH, RH\}$ はダイナミクス全体の現在の状態をある程度表しているが、SLFLO 条件では自脚の状態しか考慮していない。そこで、各 RG は脚間協調器経由で対側 (contralateral) 脚の α_F^{cntr} を受け取り、現在の状態に適合しながら SLFLO 条件より先に成立する LO タイミング判定条件と他の条件との論理和により LO タイミング判定をすることとする。そのために同位相歩容遷移では、対側脚 α_F^{cntr} が高いときは自脚 α_F^{self} が低くても LO 可能という「興奮性の RG 間協調」としての LO タイミング判定条件を追加する。これを「相互 LO 促進 (Mutual LO Promotion, MLP)」とよぶ。以下、「トリガ」と「同期」それぞれのための LO タイミング判定式を RG に導入する。

ベルト速度: V_b 上昇直後の数ステップサイクル内で、ST 相の脚での α_F^{self} の明らかな増加は、このあとさらに自脚の脚徐負荷が進む可能性示している。一方、SW 相の対側脚で同時に観察される α_F^{cntr} の大きな正の値は、自脚の早期 LO により SW 相前半にある対側脚との次の TD 時・脚間位相差: $\Delta\check{t}_{TD}$ が一時的に 0 に近づく可能性を示している。式 (20) に示すように、この 2 つの α_F の状態を不等式で表し、その論理積で LO タイミング判定条件を構成する。この条件での LO タイミング決定を **TRNLO** とよび、同位相遷移への「トリガ」とする。

一方、対側脚が ST 相後半にあるとき両脚で同一の LO タイミング判定条件を用いることで、LO 時・脚間位相差: $\Delta\check{t}_{LO}$ が 0 に近づく可能性がある。この「同期」のための条件式 (21) での LO タイミング決定を **SYNLO** とよぶ。特に、両脚での同時 SYNLO を **SYNLO*** とよぶ。式 (21) には、脚間協調器の同期活性度: σ (詳細 [1]) を用いて SYNLO を制御する条件が追加され、不等式の論理積となっている。

$$(\alpha_F^{cntr} > a_{trn}^{cntr}) \wedge (\alpha_F^{self} > a_{trn}^{self}) \quad (20)$$

$$(\sigma > \sigma_0) \wedge (\alpha_F^{cntr} > a_{syn}) \wedge (\alpha_F^{self} > a_{syn}) \quad (21)$$

$$a_{trn}^{self} < a_{syn} < 0 < a_{trn}^{cntr} \quad (22)$$

ここで、閾値パラメータ a_{trn}^{cntr} , a_{trn}^{self} , a_{syn} の大小関係は、式 (22) で表される [1]。

結局、本制御器では LO タイミング判定条件として 3 つが導入され、式 (5) においてこれらの条件の論理和で LO タイミング判定が行われる。まとめると、SLFLO は自明な LO 判定、TRNLO は $\Delta\check{t}_{TD}$ を一時的に 0 に近づける LO 判定、SYNLO は $\Delta\check{t}_{LO}$ を 0 に近づけて安定化する LO 判定を意味する。

3.4.2 キック反射

信頼できる LO タイミング判定のために重要なベル型脚負荷パターンの形成のために、腱でのエネルギー再生機構を ST 相足首関節 (AP) での反射により実装しキック反射とよぶ。計測される足首関節角: $\bar{\theta}_{AP}^i$ と初期静止値: $\bar{\theta}_{AP}^o$ の差: $\Delta\bar{\theta}_{AP}^i (= \bar{\theta}_{AP}^i - \bar{\theta}_{AP}^o)$ を用いて、 $\Delta\bar{\theta}_{AP}^i > \theta_{AP}^{trg}$ のときキック反射トルクは以下となる。ここで、 θ_{AP}^{trg} は ST 相でキック反射を発動させるための閾値であり、 k_{kck} はキック反射の P ゲインを調節するパラメータである。

$$\Delta\Gamma_{AP}^i = -k_{kck} \times {}^{st}K_P^{AP}(\Delta\bar{\theta}_{AP}^i - \theta_{AP}^{trg}) \quad (23)$$

4 同位相走行への遷移

Fig.5 と 6 の副図番 (a) をそれぞれ (a) と (a') で示す。時刻 6 s でベルト速度: V_b を 0.42 m/s に切り替えたシミュレーションの結果を Fig.5 に示す。(a) において LH の ST 相に 1st から 4th まで番号をつける。1st ST 相後半からはっきりとした胴体ピッチ振動が発生し、その振動数はリズム周波数と同一である。一方、過渡期を経て 3rd ST 相からロール運動はほぼ消えている。

- ベルト速度増加直後に LH の脚先は後方に強く引っ張られ: (e: A), 胴体ピッチ角は大きく増加 (前傾) して振動を始める: (b: B)。結果、ピッチ振動の角減速度のため脚負荷は急速に減少する: (f: C)。

- (f) に示されるキック反射は、 2nd ST相では LH: (R) で起動され、 3rd 以降では両脚: (R) で起動され、 4th 以降で両脚の脚負荷パターンはベル型に近づく。

Fig.6において、 1st から 4th の各 ST相での腰伸展、 脚負荷、 FHC 活性度を LO タイミング決定条件・時刻や実 (real)LO 時刻と一緒に (a)~(d) に示す。

- (a) では同位相走行遷移時 ($V_b=0.3$ m/s) のパターンが破線で表示されており、 ST相である LH では途中から違いが見られ、 素早く実 LO が発生するので、 この結果として、 LH において LO タイミング判定条件式 (20) が成立して、 同位相時の SLFLO より早くに TRNLO により SW相に切替える。 この早期 LO のため次の跳躍期 (a) は長く、 両脚とも r_{AEP} に到達する十分な時間があり、 TRNLO による両脚の同時 TD が 2nd ST相で一時的に達成された (b)。
- (b) で LH は RH に対してわずか 4ms 遅れて TD したために、 ST相でのパターンは両脚間でかなり違ったものになる。 RH では脚徐負荷が早いので、 α_F^{RH} は素早く立ち上がって早くに 0 に達して SLFLO が発生し、 その後速やかに LO する。 反対に α_F^{LH} の立ち上がりは遅いが、 キック反射による早い脚徐負荷のおかげで LO タイミング判定条件式 (21) が成立し、 RH の SLFLO に少し遅れただけで SYNLO が発生する。 しかし、 この時点での脚負荷はまだ大きいので、 実 LO はかなり遅れる。
- (c) で両脚のキック反射発生にもかかわらず脚負荷パターンの後半に長い平坦部が現れているが、 α_F のパターンが近いため SYNLO* が発生して、 比較的早い脚徐負荷のため実 LO もほぼ同時に生じる。
- (d) で両脚のベル型脚負荷パターンのため SYNLO* 後すぐに両脚で実 LO が生じ、 同位相・遷移が達成された。 以降は、 安定したリズムと歩容が両脚キック反射と SYNLO* の発生とともに繰り返される。

Fig.2: (d) に、 同位相走行時の脚負荷パターンをキック反射なしとありの場合について示す。 キック反射なし逆位相走行・片脚支持期の脚負荷パターン (c) と比較して、 同位相走行・キック反射なし (d: 実線) では、 両脚支持期であるためピークは小さく、 ST相後半での素早い徐負荷がない。 結果として、 SYNLO* 後の徐負荷が遅れ、 実 LO まで時間がかかることから、 この LO タイミング判定はその後の胴体ピッチ運動に大きな影響を与える不適切なものになる。 キック反射あり (d: 破線) では、 (c) と比較してピークは同程度でより早く脚徐負荷が進

んだ形のベル型となる。 結果として、 SYNLO* 後に素早く実 LO が発生するので、 この LO タイミング判定は適切なものになる。 これがキック反射による脚負荷パターンの成形 (shaping) の意味である。

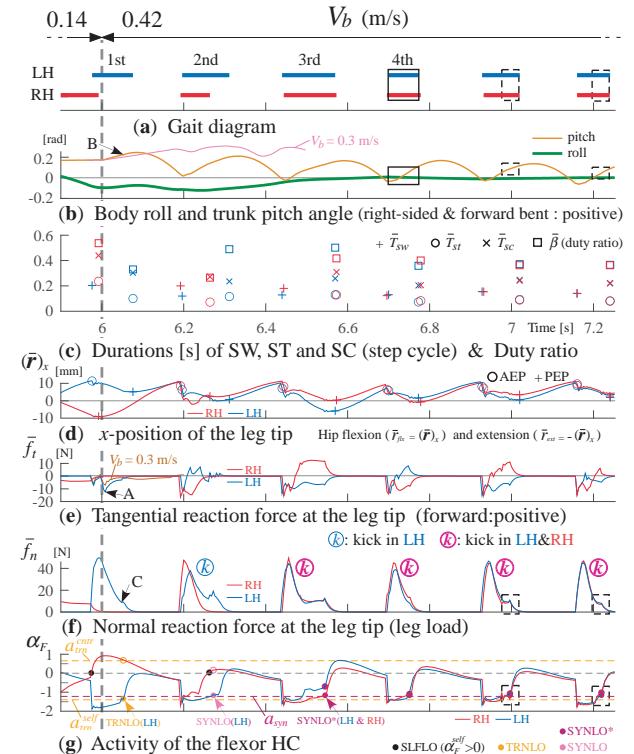


Fig. 5 From out-of-phase walking to in-phase running

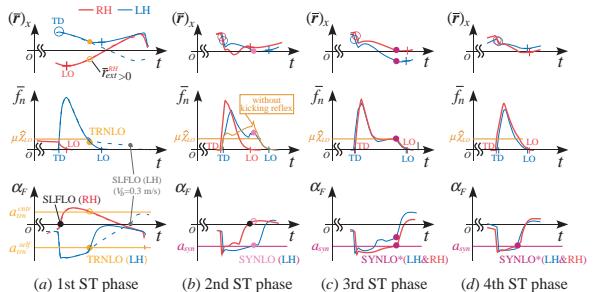


Fig. 6 Change of hip extension, leg load, and FHC activity

5 考察

5.1 統計データ

上述の脚制御器では PF や OMS でのベルト速度適応が未実装のため、 Fig.5: (d) で PEP が V_b 上昇時に前方に移動する問題点があった。これを不十分ながら改善したロコモーション制御器 [1] を用い、 すべてのパラメータを固定して、 V_b 切替の 6s 後から 12s 間のデータからリズム指標と TD 時・脚間位相差: $\Delta \bar{t}_{TD}$ および AEP & PEP の平均値と標準偏差を求めた結果を Fig.7 に示す。

逆位相走行・遷移は $V_b=0.3$ m/s で生じ、 キック反射は 0.38 m/s から起動され、 0.42 m/s で相互 LO 促進が

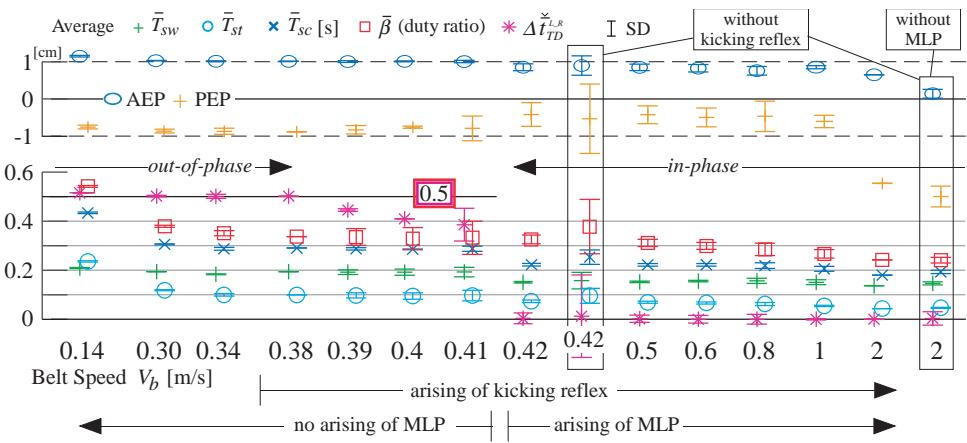


Fig. 7 Statistical data on the indexes of rhythm and gait according to the elevation of the belt speed

起動された結果として同位相遷移が生じた。逆位相での歩行と走行時にはリズム周波数はロール振動数と一致し、逆位相走行時には2倍周波数のピッチ振動が発生する。同位相走行時には、ロール振動は消え、リズム周波数はピッチ振動数と一致する。このことを「逆位相ではロール振動が同位相ではピッチ振動がリズム周波数を規定している」と分かり易く表現しておく。

Fig.7において、 \bar{T}_{sw} は逆-同位相遷移時に比較的大きく減少するが、その後は V_b 上昇に対して大きな変化はない。一方、 V_b 上昇に対して早期LOが進行するため \bar{T}_{st} は減少し、結果として \bar{T}_{sc} 、 $\bar{\beta}$ も減少する。

$V_b=0.38$ m/sまですべての指標の変動は小さい。その後PEPの前方移動に伴い変動が増加するためベルト速度不適応が変動原因の一つと考えられるが、0.42 m/sでの同位相遷移後は変動が減少することから、逆位相走行ではロールとピッチの振動の干渉により変動が発生しやすいと考えられる。さらに、0.39~0.41 m/sで徐々に $\Delta\ddot{t}_{TD}^{L,R}$ が低下していることは、相互LO促進やキック反射も含めた力学系での遷移前の「臨界ゆらぎ(Haken 1996)」であるとも考えられるが、「双安定性(Aoi 2013)」が観察されるかどうかも含めて今後の検討課題である。

5.2 相互LO促進とキック反射の意味

相互LO促進とキック反射を個々にオンオフしたときのシミュレーション結果をTable 1にまとめた。0.14 m/sから V_b への切替後に安定な走行が現れるまでの時間とその歩容、各指標の平均と標準偏差を求め、性能を4段階で評価している。○はすみやかに(2,3ステップ)安定な走行へ遷移した場合、○は安定な走行への遷移に時間がかかった場合、△はリズムが少し不安定で $\Delta\ddot{t}_{TD}$ の変動が大きかった場合、×は安定な走行が生成されなかつた場合を表す。マークに*がついている場合は、Fig.7に対応するデータが示されている。[a]の2 m/sと[b]の

Table. 1 Summary of the rhythm and gait generation

	MLP	Kicking Reflex	Vb m/s			
			0.3	0.42	...	2
[a]	off	off	○*	△	×	○*
			out-of	out-of		in
[b]	on	off	○*	△*	→○↓	○
			out-of	in		
[c]	on	on	○*	○*	○*	○*
			out-of	in		

0.42 m/sのデータを、Fig.7の実線枠にそれぞれ示す。

この結果を用いて、相互LO促進とキック反射の意味と関係についてまとめる。[a]において2 m/s以上であれば、支持脚に働く大きなベルト後方引張り力によって拡大したピッチ振動の角減速度により、ST相後半に十分な脚徐負荷が発生して脚負荷パターンはベル型となる。これを「ピッキング効果」とよぶ。結果、同位相への遷移(Fig.7:右端実線枠)が自然発生する。相互LO促進がある場合には、[b,c]の比較で示されるように、高 V_b になるまでは不十分なピッキング効果を補って徐負荷を促進するためにキック反射が必要となる。4章において述べた「キック反射なし非ベル型脚負荷パターンでのSYNLO*の不適切性」は、[b]の△*(Fig.7:左実線枠)に大きな変動としてはっきりと示されている。[c]において、相互LO促進とキック反射の相互作用で、広い V_b 範囲で変動の小さいパターンへの素早い遷移が可能となった。

6 おわりに

「脚相切替と胴体自励振動および脚負荷時空間パターン間の相互作用」の結果として、拘束器つき後2脚ロボットのリズムと歩容が、トレッドミル・ベルト速度の広い範囲で創発することが示された。

参考文献

- [1] <http://www.robotlocomotion.kit.ac.jp/index-j.html>