

# 四脚ロボット”小鉄”による脚の加負荷・除負荷に基づく位相調節を用いた四脚動歩行における姿勢とリズム運動制御の統合

京都工芸繊維大学 ○ 西川 朋宏 , モフロア クリストフ , 木村 浩

## Posture and Rhythmic Motion Controls in a Quadruped using Phase Modulations based on Leg loading/Unloading by the quadruped robot “Kotetsu”

○ Tomohiro NISHIKAWA, Christophe MAUFROY and Hiroshi KIMURA ,  
Kyoto Institute of Technology

We intend to show the basis of a general legged locomotion controller with the ability to integrate both posture and rhythmic motion controls. We show that the proposed method has resistance ability against lateral perturbations to some extent, but that an additional ascending coordination mechanism between ipsilateral legs is necessary to withstand perturbations decreasing the rolling motion amplitude. In this paper, we report the result of experiments using a newly constructed quadruped robot “Kotetsu”. Details of trajectory generation and movies can be seen at: <http://robotics.mech.kit.ac.jp/kotetsu>

### 1 はじめに

脚式の動歩行の制御に関する伝統的な手法は Zero Moment Point (ZMP) 規範制御とリミットサイクル規範制御に大別される。ZMP 規範制御は 2 足歩行や 4 足歩行における姿勢制御と低速歩行に効果的であるがエネルギー消費の観点から中・高速歩行には適していない。対照的に、システムのナチュラルダイナミクスを用いるリミットサイクル規範制御による運動生成はエネルギー効率の面では優れているものの、安定な動歩行が実現できる歩行周期に上限が存在する。

リミットサイクル規範の手法に基づき、Central Pattern Generator (CPG) [1] と反射から成る神経系を用いた鉄犬で不整地における 4 脚動歩行は実現された [2]。しかし、CPG レベルでの位相調節と反射とがそれぞれ安定性にどれほど貢献しているのかは明確ではなかった。さらに、周期の増加が胴体の前頭面内運動を大きくし、前頭面の姿勢を不安定にするため長い歩行周期での動歩行は実現されていない。

通常、4 足歩行動物は長くて細い胴体を持っており、また対側の脚が同時に遊脚になることはない。そのため、矢状面での姿勢は容易に安定化され、前頭面の姿勢制御、つまり胴体の横(ロール)方向の運動の制御が主な問題となる [3]。前頭面内運動の安定化は歩行サイクル中の脚の支持脚相と遊脚相の期間をそれぞれ調節する位相調節によって達成される。

我々の先行研究 [4] では、脚相の遷移に関して脚の加負荷・除負荷情報を用いた 3D シミュレーションを行うことで以下のことを示した。

- 矢状面における各脚のリズム運動は生成された。ローカルな脚の加負荷・除負荷情報は現在の脚相(遊脚なのか支持脚なのか)と胴体の全体的な姿勢の両方を反映するため、我々の手法は矢状面における脚のリズム運動と前頭面における胴体の姿勢制御を陽な脚間協調機構なしに、同時に行うことができる。
- 提案した手法は横方向の揃動に対して陽な脚間協調機構なしでもある程度の抵抗力を有しているが、前頭面内運動の振幅を減少させる揃動に対しては同足間での上行性協調機構が必要である。前庭情報を用いた踏み出し反射なしに、我々の制御システムは長い周期や不整地での低速の動歩行が可能である。これはこれまでの研究 [2] では実現されていない。
- 脚間協調を含むリズム運動制御や姿勢制御との統合は重力場での胴体の力学と脚式歩行の特徴を利用することで達成される。

本論文では、シミュレーションの結果と比較するために新しく作成した 4 脚ロボット”小鉄”を用いた初期実験の結果を報告する。

### 2 四脚ロボット ”小鉄”

4 脚ロボット”小鉄”を Fig.1 に示す。各脚はそれぞれ、大腿、脛、そして足の 3 つの部分によって構成されており、ピッチ軸方向に回転する腰、膝、足首関節を持っている。それぞれの足の先端には法線方向床反力  $f_n$  を計測するために力センサが取り付け

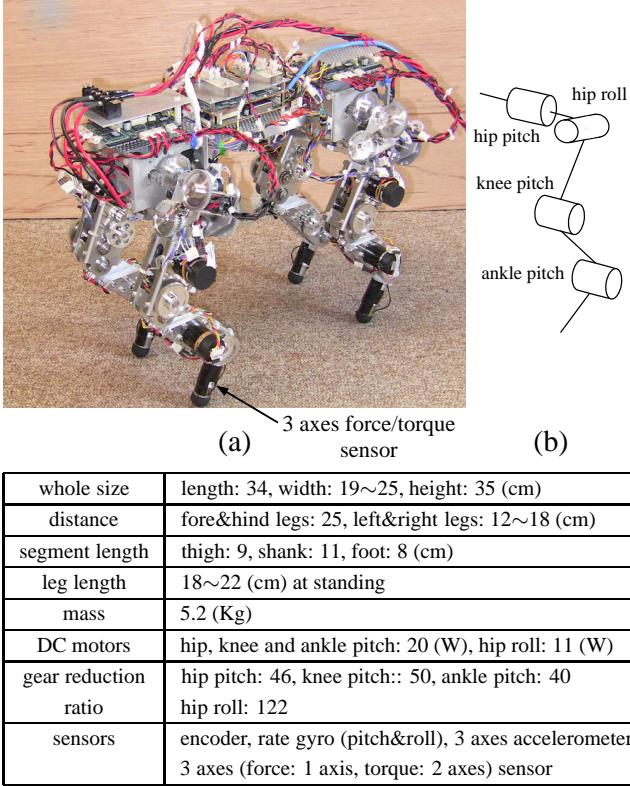


Figure 1: Kotetsu. Upper: photo and joint configuration. Lower: specifications. Kotetsu is not self-contained, and it is tethered by power and LAN cables. But the motion of Kotetsu is very little disturbed by cables.

られている。センサ依存による適応的な制御を実現するために、加えて、不整地適応性やエネルギー効率、最大速度などの動歩行の性能は機械設計に大きく依存することから”小鉄”の設計のコンセプトは以下に示すように鉄犬と同様である。

- 素早い動作と反応のために高出力アクチュエータを用い、脚の慣性モーメントを小さくする。
- ピッチ軸関節の受動的なコンプライアンスを高めるために低摩擦、高バックドライブアビリティを確保する必要性から各ギアの減速比を小さくする。
- 衝突をやわらげるために脚の先端の質量を小さくする。
- 不整地適応性を高めるために脚先の接地面積を小さくする。

先行研究におけるシミュレーションモデルにおいては、前頭面内の姿勢制御において脚の加負荷・除負荷に基づく位相調節の効果を調べるために脚にロール軸回りの関節を持たせなかった。しかし、今後の発展のために小鉄は各脚にロール関節を有している。そのため、本論文においてはシミュレーションの結

果と比較できるよう、実験時には全てのロール関節を機械的に固定している。それでも、動歩行中、前頭面内運動は脚のリズミックな矢状面内運動の一連の動作のなかで自然に発生する。

それは、二脚支持期に倒立振子と同様の力学システムが現れるためである。

歩容は脚のピッチ運動中の脚間位相差 ( $\gamma \in [0, 1]$ ) で特徴づけられる歩行パターンである。低・中速歩行域において、イヌやネコのような中型の哺乳類は主にウォークを用いる。 $\gamma^{cntr}$  と  $\gamma^{ipsi}$  はそれぞれ対側、同側間の脚間位相差を表し、ウォークは  $\gamma^{cntr} = 0.50$ ,  $\gamma^{ipsi} \approx 0.25$  で特徴づけられる。本研究では小鉄を用いて、ウォークを生成するための制御手法について考える。

### 3 脚の加負荷・除負荷情報に基づく位相調節

上付記号 hat:  $\hat{\cdot}$ , bar:  $\bar{\cdot}$ , tilde:  $\tilde{\cdot}$  はそれぞれノミナルな(名目上の)値、実際の値(センサによる計測値)、目標値を表す。

#### 3.1 単一脚コントローラ

##### 3.1.1 概要

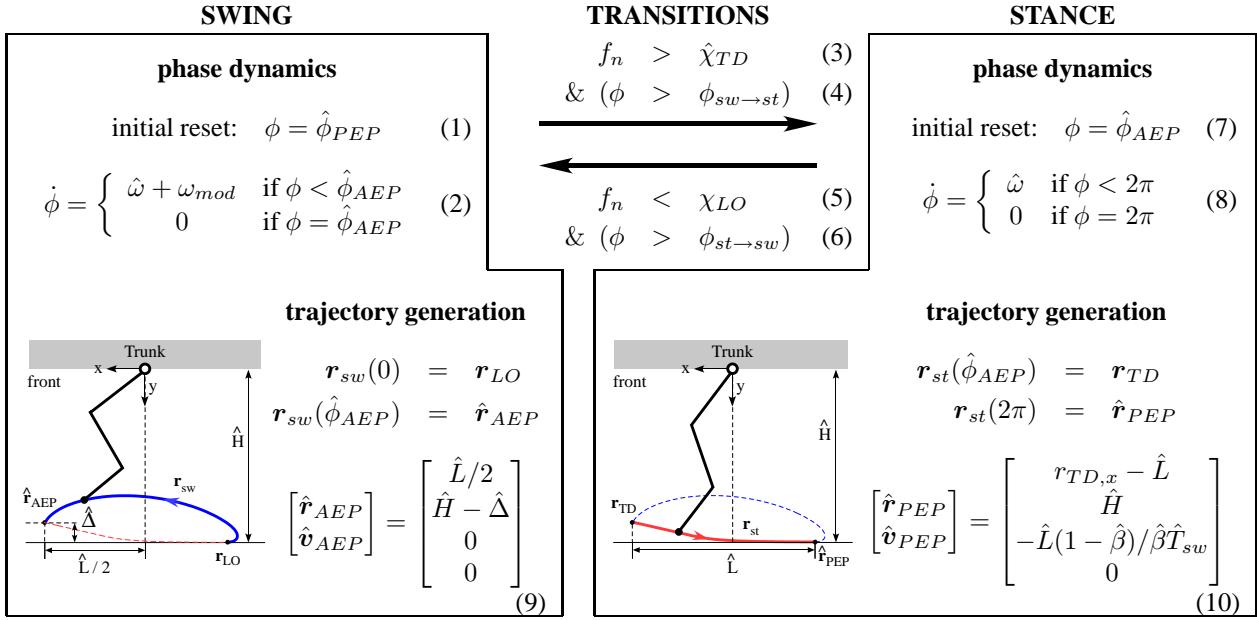
我々の制御システムは CPG モデルの構成法に基づいており、脚制御器 (leg controller, LC) といわれる制御器が各脚の運動を司る。その内部組織を Fig.2 で表し、数学的記述は eq.(1) ~ (13) である。各 LC は 2 つの位相、遊脚相 (swing,  $sw$ ) と支持脚相 (stance,  $st$ ) を持つており、それらの間での遷移はセンサによる支持脚の負荷に関する情報、脚負荷 (legloading) を用いて形作られる。

各 LC は、一定の振幅と可変な位相:  $\phi^i$  を持った簡単な振動子に関連付けられる。ただし、 $i$  は脚番号である [5], [6]。振動子を含むこのような表現は、目標軌道生成の過程と脚間位相関係の定義を簡潔にするために導入された。しかしながら、脚相遷移はセンサフィードバックを用いて形作られるので、センサフィードバックは歩行リズムに大きな影響を与える。

脚先の軌道は、LC の現在の位相:  $\phi^i$  に基づいて生成される。そのためにいくつかの脚先位置  $r$  が定義される必要がある。遊脚相から支持脚相へ遷移することが想定されるときの脚先位置は  $\hat{r}_{AEP}$  (AEP: anterior extreme position), 実際に遷移が起きた位置は  $r_{TD}$  (TD: touchdown) で表される。同様に、支持脚相から遊脚相へ遷移することが想定されるときの脚先位置は  $\hat{r}_{PEP}$  (PEP: posterior extreme position), 実際に遷移が起きた位置は  $r_{LO}$  (LO: liftoff) で表される。

##### 3.1.2 位相力学

脚相遷移が起きたとき、位相  $\phi$  は遊脚相開始時に eq.(1) の  $\hat{\phi}_{PEP}$  に、支持脚相開始時には eq.(7) の  $\hat{\phi}_{AEP}$  に、それぞれリセットされる。



$$\hat{\phi}_{PEP} = 0; \quad \hat{\phi}_{AEP} = 2\pi(1 - \hat{\beta}) \quad (11) \quad \hat{\omega} = 2\pi(1 - \hat{\beta})/\hat{T}_{sw} \quad (12) \quad \begin{bmatrix} \phi_{sw \rightarrow st} \\ \phi_{st \rightarrow sw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{AEP}/2 \\ \phi_{AEP} + (\pi/2) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Figure 2: Leg Controller structure. The foot trajectories are expressed in the Cartesian coordinate system fixed to the trunk and centered at the hip joint (\*<sub>x</sub> and \*<sub>y</sub> refer respectively to the x and y coordinates, while  $r$  and  $v$  are the position and speed vectors).

その後、位相は eq.(2) と eq.(8) に示される最大値に達するまで、 $\hat{\omega}$ の一定割合で増加する。 $\hat{\phi}_{AEP}$ ,  $\hat{\phi}_{PEP}$ ,  $\hat{\omega}$ は、ノミナルな遊脚期間  $\hat{T}_{sw}$  とノミナルなデューティ比  $\hat{\beta}$  から eq.(11) と eq.(12) を用いて計算される。

### 3.1.3 脚先の軌道生成と関節 PD 制御

各脚のステップサイクルで脚先の目標軌道は、測定された初期位置( $r_{LO}$  または  $r_{TD}$ )とノミナルな最終位置( $\hat{r}_{AEP}$  または  $\hat{r}_{PEP}$ )の間で、遷移時の速度の連続性を保証しながら計算される。胴体の腰関節部に固定された 2 次元座標系で軌道の  $x$  と  $y$  方向のノミナルな速度成分は位相  $\phi$  を用いて計算・パラメータ化され、脚先のノミナルな位置はそれら速度の時間積分によって得られる。各脚相でのノミナルな速度成分の決定方法について以下に簡単に述べる。詳細は Maufroy (2009a) に述べられている。

遊脚相においては、AEP 時のノミナルな速度はスムーズな接地のために 0 に設定される。さらに、途中の軌道は脚先のクリアランスを十分に保つ必要がある。運動の生成には、離地時の速度の連続性を保証し、かつ、必要ならば AEP の垂直座標オフセットを与えることができるよう修正されたサイクロイド軌道を用いる。このオフセット  $\hat{\Delta}$  は、前脚の接地を同側の後脚の接地に対して遅れさせる役割を持つ。後脚の  $\hat{\Delta}$  は通常ゼロに設定されている。

支持脚の  $y$  方向の速度成分  $v_{st,y}$  については、支持脚相への遷移は脚先が地面に接地した直後に起こるので、初期速度は 0 に設定される。その後の  $v_{st,y}$

については、各種のパターンを試した結果、支持脚開始後に十分大きく、後に十分速くゼロに収束する限り同様の結果が導かれた。支持脚の  $x$  方向の速度成分  $v_{st,x}$  については、初期の一一定加速期間を除いて支持脚期間中は一定値を与える。eq.(10) に示すように PEP 時の  $x$  方向速度はゼロではない。従って、たとえ  $\phi$  が  $2\pi$  に達しても、軌道は速度の時間積分で生成されるので脚先の後方への運動は続き、必要なならばステップ幅がノミナルな値  $\hat{L}$  よりも大きくなることもあり得る。

脚先のノミナルな位置と速度に基づき、目標関節角と角速度( $\tilde{\theta}_j^i$  と  $\dot{\theta}_j^i$ , ここで添字  $j$  は関節番号)が、逆運動学を用いて計算される。脚は 3 つのセグメントから構成されているので、膝関節角度と足首関節角度が等しくなるように拘束する。このとき大腿と足は平行となる。このような直立て 3 セグメントからなる 4 足哺乳類型の支持脚がパンタグラフのように動作するとき、矢状面内姿勢制御が簡略化されることが報告されている (Fischer and Blickhan 2006)。

関節トルク  $\Gamma_j^i$  は、次式のは PD 制御則を用いて生成される。

$$\Gamma_j^i = K_{Pj,p}^i(\tilde{\theta}_j^i - \theta_j^i) + K_{Dj,p}^i(\dot{\tilde{\theta}}_j^i - \dot{\theta}_j^i) \quad (14)$$

### 3.1.4 遷移条件

各 LC での遊脚相と支持脚相の間の遷移は、脚先の力センサによって測定される垂直床反力  $f_n$ (脚負荷)と位相  $\phi$  を用いた条件式: eq.(3)~(6) により形作

られる。遊脚相から支持脚相への遷移は、脚先の地面への接触が検出されること、すなわち脚負荷が0より大きくなることにより発生する(eq.(3))。一方、支持脚相から遊脚相への遷移は、脚負荷がある閾値を越えている間は発生しない(eq.(5))<sup>[7]</sup>。ノミナルな脚負荷の閾値 $\hat{\chi}$ は、機械モデルの全重量の4分の1よりもわずかに小さい値に設定される。

位相:  $\phi$ に基づく条件: eq.(4), (6)は、ある脚相からもう一方の脚相への望まない早期の遷移を防ぐ役割を果たす。例えば、eq.(4)はLCの脚相が遊脚相へ遷移したのち実際の離地が発生して $f_n$ が0になるまでの十分な時間を保証し、eq.(6)はLCの脚相が支持脚相へ遷移したのち $f_n$ が十分に増加する時間を保証する。

### 3.2 上行性協調機構

我々のシミュレーションによる先行研究において、LC間で陽な脚間協調が働いていない場合、前頭面内運動の振幅を減少させるような横方向からの摂動はリズミックなピッチ運動と前頭面内での姿勢制御との間で衝突を引き起こすことを示した。そのため、そのような衝突を回避しシミュレーションの有効性を確認するために言及されている次の2点を備えたACMが必要になる。

- 後脚が遊脚の間 $\phi^{sH}$ (ただし $s$ はRまたはL)が増加している時、前脚が支持脚から遊脚への遷移するための力の閾値 $\chi_{LO}^{sF}$ は線形に増加する。
- 次のステップの前脚の遊脚相の割合は減少する。

一方、小鉄を用いた実験において時々、前脚が同側の後脚よりも先に支持脚相から遊脚相へ遷移されるのが確認された。このような相遷移の不規則性の原因に関して、以下の2点が考えられる。

1. 小鉄でのPゲインの調整範囲はシミュレーションにおけるそれよりも狭いため、結果として生じた歩容がペースに移った。
2. 小鉄の胴体の重心が中心よりもわずかに後方にあるため、前脚の脚の加負荷が同側の後脚のものよりも小さくなつた。

この問題を解決するために、今回我々は、次式に示すような上行性協調機構(Ascending Coordination Mechanism: ACM)を導入した。

$$\chi_{LO}^{sF} = \begin{cases} -5(N) & \text{if } \phi^{sH} \in [\hat{\phi}_{AEP}; \hat{\phi}_{PEP}] \\ \hat{\chi}_{LO}^{sF} \cdot \phi^{sH} / \hat{\phi}_{acm} & \text{if } \phi^{sH} \in [\hat{\phi}_{PEP}; \hat{\phi}_{acm}] \\ \hat{\chi}_{LO}^{sF} + \chi_{mod} & \text{if } \phi^{sH} \in [\hat{\phi}_{acm}; \hat{\phi}_{AEP}] \end{cases} \quad (15)$$

$$\chi_{mod} = \frac{\phi^{sH} - \hat{\phi}_{acm}}{\hat{\phi}_{AEP} - \hat{\phi}_{acm}} \cdot \hat{\chi}_{ampl}$$

$$\omega_{mod}^{sF} = \begin{cases} \frac{\phi^{sH} - \hat{\phi}_{acm}}{2(\hat{\phi}_{AEP} - \hat{\phi}_{acm})} \cdot \hat{\omega} & \text{if } \phi^{sH} \in [\hat{\phi}_{acm}; \hat{\phi}_{AEP}] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

この式は後脚が支持脚相または遊脚相の前半のときは、同側前脚の支持脚相から遊脚相への遷移を抑え、後脚が遊脚相後半のときは、同側前脚の閾値を線形に増加させることで支持脚相から遊脚相への遷移を促すことを意味している。また、遊脚相の割合を調整させるためeq.(2)の $\omega_{mod}$ をeq.(16)のように設定する。

### 3.3 対側脚間協調機構

本研究において、歩行中の小鉄の胴体左側面部に右方向の摂動を加える実験を行った。その際、摂動を加えるタイミングによって対側の脚が同時に遊脚となり転倒することがあった。

そこで、前述の上行性の脚間協調機構に加えて、次のように閾値を設定することで対側の脚が遊脚である間、支持脚相から遊脚相への遷移を抑制する対側脚間協調機構も加えた。

$$\chi_{LO} = -5(N) \quad \text{if } \phi^{ctr} \in [\hat{\phi}_{PEP}; \hat{\phi}_{AEP}] \quad (17)$$

ここで、eq.(15)とeq.(17)内で与えられている-5という値には大きな意味はなく、負の値であれば構わない。

## 4 位相調節に基づく歩容生成と姿勢制御

### 4.1 脚負荷移動メカニズム

各脚のピッチ運動の結果、歩行中に脚負荷は支持脚間を移動する。そのメカニズムには主に以下の2種類がある。

- 「脚負荷の前方向への移動」は、支持脚接地点に対する胴体の前進運動に関係づけられる。このメカニズムは、後方の支持脚から前方の支持脚への脚負荷の移動をもたらす。

• 「脚負荷の横方向への移動」は、支持脚接地点に対する胴体の横方向運動に関係づけられる。脚負荷の前方向への移動は、運動が矢状面内に拘束されている時でも現れる。一方、脚負荷の横方向への移動は、矢状面内の脚運動と前頭面内の胴体運動の間に相互作用があるとき、すなわち、3次元歩行のみ現れる。従って、3次元歩行において各脚の負荷は、各脚の矢状面内運動(歩容)と胴体の前頭面内運動(姿勢)を関係づける重要な情報である。

ここで、各脚制御器(LC)は脚相遷移条件に脚の加負荷と除負荷を用いていること、そして、ここで述べたように歩行中には前方向と横方向の脚負荷の移動が発生することにより、LC間の直接の結合無しでも身体の運動を通してLC間の協調が発生し、結果として安定な歩容が生成される。

## 4.2 対側脚間交互ステッピングの発現

対側脚間交互ステッピングの発現メカニズムについて説明する。右前後脚が遊脚であるとき、倒立振子と同様な力学系は重力によって発生するモーメントにより左前後脚の接地点を結ぶ軸まわりに回転し始め、胴体の前頭面内運動 ( $\dot{\theta}_{roll} > 0$ ) と横方向運動が生じる。右遊脚の接地後、胴体の前頭面内運動と横方向運動は左脚から右脚への脚負荷の横方向移動を引き起こす。次に、左脚の脚負荷  $f_n$  は徐々に減少し、閾値  $\chi$  よりも小さくなつた(除負荷)時に左脚の LC において遊脚相への遷移が起こる。 $\dot{\theta}_{roll} < 0$  となつたとき、同様な現象の流れがもう一方の側において生じる。結果として以上が周期的に繰り返され、4 個の LC・4 脚のピッチ運動・胴体の前頭面内運動・脚負荷の横方向移動の間に相互引き込みが発生し、対側脚間交互ステッピングが発現する。

## 4.3 同側脚間位相差の調節

前脚と後脚の LC で同一のパラメータ値を用いている場合は、同側位相差  $\gamma^{ipsi}$  が 0.1 を超えないことが分かった。従って、 $\gamma^{ipsi} \simeq 0.25$  のウォーク歩容を実現するためには、前脚のステッピングを同側の後脚のステッピングより相対的に遅れさせるための付加的なメカニズムが必要である。これは、オフセット  $\hat{\Delta}$ (eq.(9)) を用いたノミナルな AEP 脚先位置  $y$  座標の調節により、前・後脚の支持脚相の開始時期を操作することで達成される。

## 4.4 前頭面内の姿勢安定化

脚の加負荷・除負荷情報に基づく位相調整による姿勢安定化のメカニズムを Fig. 3 に示す。最初にモデルに右から左方向に摂動が与えられた場合について考えると、胴体の前頭面内運動は非対称になり、その結果、歩行中にモデルは左方向に傾く。言い替えると、摂動が与えられたとき、1 周期の間での胴体ロール角 ( $\theta_{roll}$ ) の平均値は負になる ( $\langle \theta_{roll} \rangle_k < 0$ )。平均値  $\langle * \rangle_k$  の定義は [4] で与えられている。前頭面内運動の非対称性は脚負荷の非対称性を生じさせ、左脚の負荷の平均値  $\langle f_n^{L*} \rangle_k$  は右脚のそれ  $\langle f_n^{R*} \rangle_k$  よりも大きくなる。 $f_n$  は支持脚相から遊脚相への遷移の調整に使われる所以、左脚での  $\langle f_n \rangle_k$  の増加は支持脚相の延長を、右脚での  $\langle f_n \rangle_k$  の減少は支持脚相の短縮をもたらす。結果として、左脚の実際のデューティ比は増加し右脚のそれは減少する ( $\bar{\beta}_k^{L*} > \bar{\beta}_k^{R*}$ ) ので、 $\langle f_n \rangle_k$  の非対称性はさらに増加していく。よって、デューティ比の自動調節を通して、前頭面内運動の非対称性をキャンセルするような重力によるモーメントが  $\langle \theta_{roll} \rangle_{k+1}$  を 0 に戻すように働き、前頭面内での姿勢安定化に貢献する。もちろん、反対方向に胴体の前頭面内運動の非対称性を起こす摂動に対しても同じ論議が成り立つ。

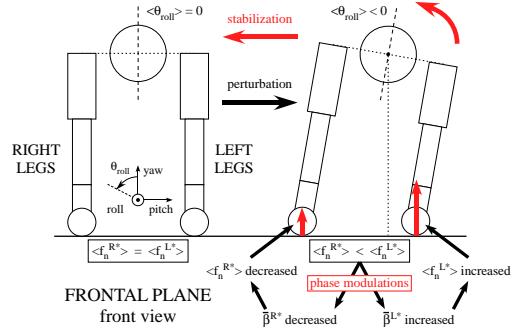


Figure 3: Stabilization mechanism provided by the phase modulations based on leg unloading information.

## 5 実験結果

Section 3 で示した制御手法を用いることで、我々は小鉄の安定な動歩行を実現したが、横方向からの摂動に對抗するためには Section 3.2 で述べた機構が必要になる。

Fig. 4 は ACM がある場合の実験結果を示したものである。小鉄が歩行している間に、力積が  $0.56[\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}]$  の摂動を、小鉄の胴体左側面部に加える実験を ACM がある場合とない場合で行った。その結果、ACM がない場合は摂動が加わったあと転倒したが、ACM がある場合は安定な動歩行を持続することができた。

今回  $\hat{\chi}_{LO}$  は  $12\text{N}$  に設定している。また摂動は歩行開始から  $6.93$  秒後に加わっている。これは左前脚が遊脚相から支持脚相に遷移したのとほぼ同じタイミングである。ACM がない場合にも同様のタイミングで摂動を加えた。

このタイミングで横方向の摂動が加わると、右脚から左脚への横方向への脚負荷の移動が妨げられる。しかし、後脚から前脚への前方向への脚負荷の移動は起こる。その結果、右前脚の負荷が閾値よりも小さくならず、支持脚相から遊脚相への遷移が起こらないという現象が生じ、脚負荷情報に基づく矢状面内と前頭面内の運動の協調が乱れ、転倒する。

しかし、ACM を実装すると、摂動が加わった後、後脚の脚相の状態に基づき、 $\chi_{LO}^{RF}$  を上昇させることで、支持脚相から遊脚相への遷移を促すことが可能となる。Fig. 4 から、右前脚において摂動が加わった後のステップでは ACM の効果により、 $\chi_{LO}^{RF}$  がノミナルな閾値として設定した  $12\text{N}$  よりも大きな値を取り、支持脚相から遊脚相への遷移が促されていることがわかる。この結果、小鉄は安定に歩行を続けることができた。

## 6 考察

### 6.1 パラメータ調整への依存性

センサフィードバックに強く依存する手法の主な欠点は、システムの性能が身体の機械的特性と環境

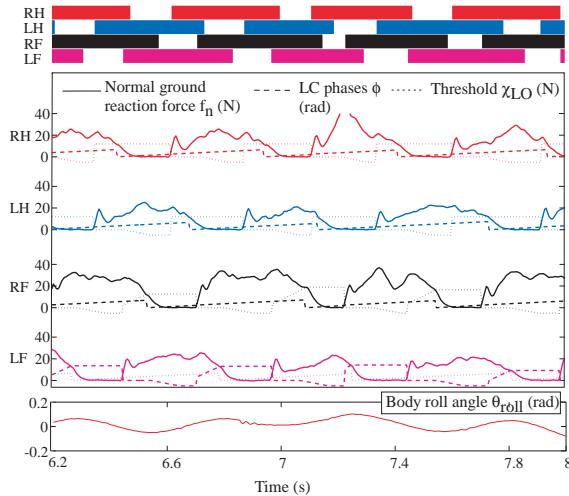


Figure 4: Result of the experiment. The top figure shows the gait (solid lines mean the stance phase). The middle figure shows leg loading ,LC phase and threshold to liftoff of every leg. The bottom figure shows rolling motion.

との相互作用により依存することである。我々のシステムでは、歩行パターンが  $\hat{T}_{sw}$  と  $\hat{\beta}$  により調整されるとき、モータ指令生成レベルでいくつかのパラメータが調節される必要があった。これは適切なパラメータ調節が再度必要になるという理由で、異なった機械モデルへの制御手法の適用を複雑にする。しかし、調節すべきパラメータの数は限られており、 $\gamma^{ipsi}$  の値が指標となってパラメータ調節は半ば自動化されるので、これは重大な困難とはならない。

## 6.2 力センサの計測値

今回我々は脚負荷の情報として脚先に取り付けられた力センサの値を用いた。しかし、この方法だと地面の材質や脚の接地角等の違いにより脚への力のかかり方が変わってしまうことが考えられる。また接地の際に衝突が起こるため、力自体を正確に計測することは困難である。この問題を解決するために、力の値ではなく、値の変化のパターンにより脚相を変化させる方法を検討している。

## 6.3 踏み出し反射の導入

歩行中の支持脚期間には、それ以上延長することができない限界が常に存在する。このような支持脚期間の上限は、身体の物理的限界により決まる最大歩幅によって最終的に与えられ、歩行速度の増加につれて減少する。すなわち、Section 4.4 で述べられた姿勢安定化メカニズムは支持脚期間の調節に依存するので、摂動に対する制御システムの抵抗能力は歩行速度とともに減少する。さらに、制御システムが抵抗できる横方向摂動の大きさにも上限が存在する。例えば、同側の 2 脚支持期で質量中心の投影点

が支持脚接地点によって作られる線を超えてしまえば、ここで提案した制御システムは転倒を防ぐことはできない。

この限界を克服するために、汎用的な脚式移動制御器は、現在の支持脚相に影響する位相調整に加えて、次の支持脚相に影響することが可能な他の安定化メカニズムを実装する必要がある。このようなメカニズムとして広く用いられているものとして、前庭情報を用いた踏み出し反射 (Miura and Shimoyama 1984; Raibert 1986; Kimura et al. 1990&2004&2007; Fukuoka et al. 2003) がある。我々は次の発展として当然このような手法の導入を検討している。

## 7 おわりに

今回我々は、姿勢制御とリズム制御を統合し歩行速度によって一つの制御手法から他の手法へと連続的に切替える能力を有した汎用的な脚式移動の制御器の基礎を示した。また、横方向の摂動に対しての ACM の必要性を確認した。今後の展望としては ACM による横方向の摂動に対する抵抗力の上限を確かめること、そして提案した制御器の正当性の検証のために様々な歩行速度を実現することを考えている。

## 8 謝辞

本研究の一部は科研費・特定領域研究「移動知」：領域番号 454 の助成を受けて行われました。

## References

- [1] Orlovsky, G. N., Deliagina, T. G., & Grillner, S. (1999). *Neural control of locomotion*. Oxford Univ. Press, New York.
- [2] Kimura, H., Fukuoka, Y. & Cohen, A. H. (2007). Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on natural ground based on biological concepts. *Int. J. of Robotics Research*, 26(5), 475-490.
- [3] Karayannidou, A., Zelenin, P. V., Orlovsky, G. N., Sirota, M. G., Beloozerova, I. N. and Deliagina, T. G. (2009). Maintenance of Lateral Stability During Standing and Walking in the Cat, *J. of Neurophysiol.*, 101, 8-19.
- [4] Maufroy, C., Kimura, H. & Takase, K. (2009). Stable dynamic walking of a quadruped via phase modulations against small disturbances. In *Proc. of ICRA 2009*, 4201-4206.
- [5] Tsujita, K., Tsuchiya, K. & Onat, A. (2001). Adaptive gait pattern control of a quadruped locomotion Robot. In *Proc. of IROS2001*, 2318-2325.
- [6] Aoi, S. & Tsuchiya, K. (2006). Stability analysis of a simple walking model driven by an oscillator with a phase reset using sensory feedback. *IEEE trans. on Robotics* 22(2), 391-397.
- [7] Ekeberg, O. & Pearson, K. (2005). Computer simulation of stepping in the hind legs of the cat: an examination of mechanisms regulating the stance-to-swing transition. *J. of Neurophysiology*, 94(6), 4256-68.