

四脚ロボットの自律歩容生成と適応

Autonomous Gait Generation and Adaptive of a Quadruped Robot

○学 古殿 幸大 (京工織大) 学 森川慎一朗 (京工織大) 正 木村 浩 (京工織大)

Kodai KODONO*, Shinichiro MORIKAWA*, Hiroshi KIMURA*

*Kyoto Institute of Technology

In order to investigate gait generation and adaptation mechanism of animals, we propose a not mathematical but physical model connecting body dynamics and sensor feedback. In our previous study, we showed that CPG (leg controller) using leg loading/unloading for the leg phase transition can integrate rhythmic motion control and posture control. In this study, we intend to make a model of split-belt gait adaptation in decerebrate cats by cerebellum using a quadruped robot Kotetsu. As a result of experiments, we showed that inter-leg coordination mechanisms (ACM, CCM) and self-inhibition mechanism (SIM) play an important role in split-belt adaptation. While comparing gaits between decerebrate cats and Kotetsu, we found that our model is still not sufficient in spite of a significant similarity. Spec. and movies of Kotetsu can be seen at <http://www.robotlocomotion.kit.ac.jp/kotetsu/index-j.html>.

Key Words: Split-belt walking, Gait adaptation of decerebrate cat by cerebellum, Quadruped robot, Inter-leg coordination mechanism

1 緒言

1.1 はじめに

四足動物が移動速度に応じて歩容¹を変化させることはよく知られているが、どのような仕組みで生成され移動速度に応じて遷移するのかについて詳細は分かっていない。上位中枢との接続を物理的に切断した除脳ネコが treadmill の速度上昇に応じて walk, trot, gallop と順次歩容を遷移させる実験結果 [1] は多くの分野の研究者の興味を強く引き付けている。このような歩容遷移に関して、Haken は「非線形力学系におけるパターンの自己組織化」とみなし、脚間位相差に着目した数理モデルを論じた [2]。

しかし、歩容が自律的に遷移していくメカニズムを、身体性やセンサーフィードバックと結びつけ、実世界での物理現象として説明する物理モデルは現在も確立されていない。今までに研究されている物理モデルとして、Ekeberg らは、「ネコの歩行中の支持脚相から遊脚相への遷移に関して、脚負荷がある閾値を上回っている限り支持脚相が延長される [3]」という知見に基づき、ネコの筋骨格を参考にした矢状面内後脚モデルを用い、交互ステッピングのシミュレーションを行った [4]。そして彼らは、「脚の除負荷情報を用いた支持脚期間の調節」が交互ステッピングの発生と安定化により重要な役割を果たしていることを示した。また、Maufroy らは、歩容が自律的に遷移していくメカニズムに関して、「支持脚から遊脚への脚相遷移に脚負荷を用いることにより姿勢制御とリズム運動制御を統合することが出来る制御器」を考案した [5]。この制御器は、CPG モデルとして脚の位相ダイナミクスを陽に扱い各脚の矢状(ピッチ)面内リズム運動を生成する。また、脚負荷情報に現れる力学的脚間相互作用を利用して、四脚ロボットの walk, pace, trot 歩容を生成することができる。

一方、歩容適応に関して、柳原は除脳ネコの一側前肢に外乱を毎歩与えることにより、歩行を継続していく過程で適応的肢間協調が生じるという小脳レベルでの学習パラダイムを発見した [6][7]。図 1-(a) のように、左前 (Left Fore, LF) のベルトのみ他のベルトの速度の約 2 倍 (LF:61cm/s, Other:36cm/s) とした split-belt² treadmill の上に、除脳ネコを歩かせたところ、時間の経過とともに歩容が変化し、歩行が安定した。この時の歩容が図 1-(b) である。ここで、前脚は LF(左前脚) が fast-leg, RF(右前脚) が slow-leg であり、(B) は split-belt 移行直後、(C) は十分な時間経過後の歩容を示している。両脚支持期間 B1(LF の離

地で終了) と B2(RF の離地で終了) に着目すると、特に B1 期間の長さに顕著な違いが見られる。図 1-(b) の (B) では B1 期間が極端に短くなっているが、(C) ではある程度の長さが確保され、体重をスムーズに移動することができる [8]。以下、この脚間協調を「遅延脚間協調」とする。また、duty 比に着目すると、慣動を受けた直後 (B), RF の duty 比が通常時 (A) と比べて増加していることが分かる。このことから、LF が通常よりも早く遊脚相に遷移したとき、対側 RF(slow-leg) の duty 比を増加させる協調がはたらいていると考えられる。以下、この脚間協調を「早期脚間協調」とする。

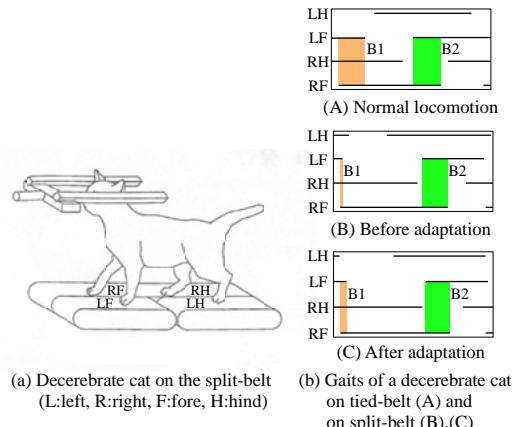


Fig.1 Gait adaptation of a decerebrate cat in split-belt walking [6].

この適応過程に関して、伊藤らは胴体部を固定した四脚ロボットを用いて、考案した数理モデルの実証を行い、適応的肢間協調が生じることを示した [9]。しかし、この実験では数理モデルを通して小脳での歩容適応メカニズムを抽象的なレベルで理解する一助となるが、本質的に「なぜ歩容適応が起こるのか」という問い合わせを与えるものではない。

小脳には背側脊髄小脳路経由で符号化された脚負荷情報と脚先位置情報が入力されている可能性 [8] を考慮すると、Maufroy らが提案した制御器は、上記の split-belt 歩行での小脳の早期脚間協調と遅延脚間協調を説明する身体モデルの基礎として適用可能と考えられる。そこで今岡らは、Maufroy らが提案した制御器を用いて、四脚ロボットを用いて左側のベルトを右側のベルトの約 1.5 倍とした split-belt treadmill 上での歩行実験を行った [10]。

¹歩容とは脚間位相差によって表される歩行パターンである。通常、低中速歩行では walk や canter、中速走行では trot や pace、高速走行では bound や gallop が現れる。

²左右のベルトの速度が違う状態を split-belt、速度が同じ状態を tied-belt と呼ぶ。

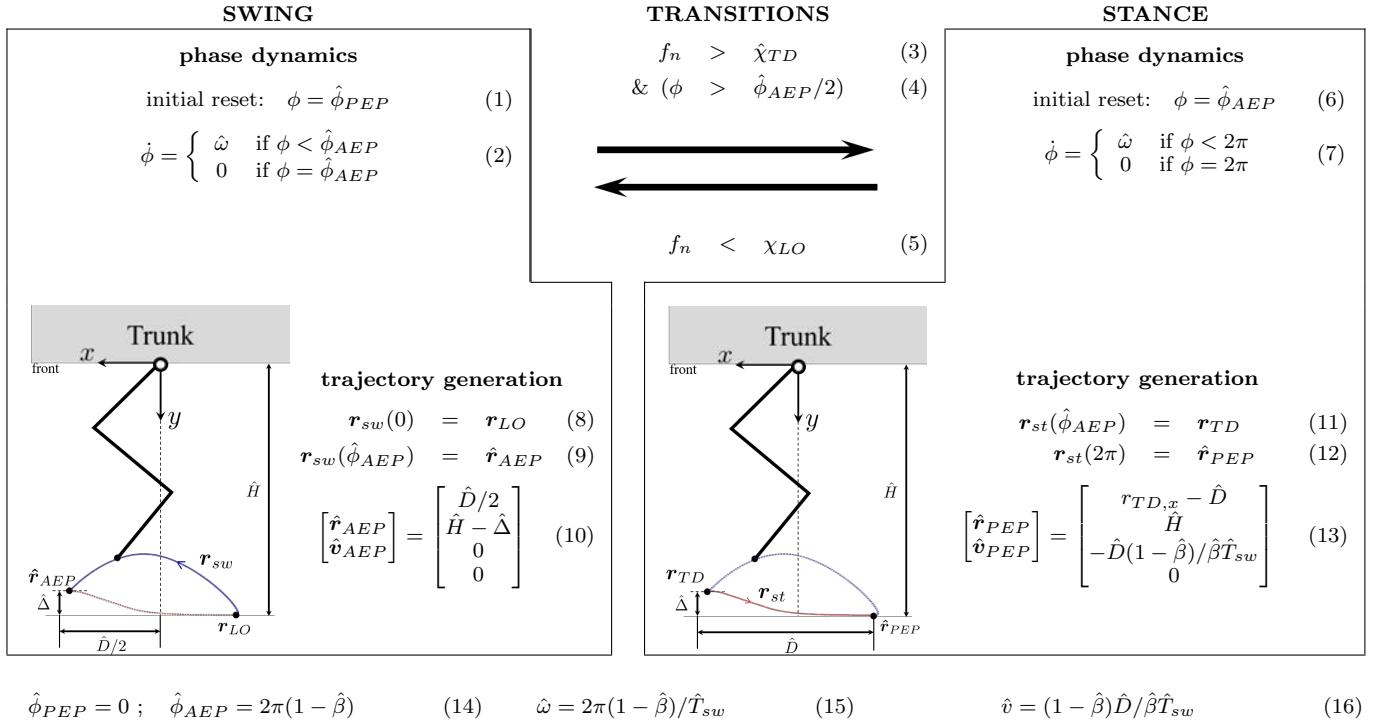


Fig.2 Leg Controller structure.

この実験から、split-belt 上において、脚負荷情報と腰関節角度情報を用いれば歩行に適応することが確認された。しかし、今岡らの実験は、LF だけでなく LH も fast-belt としていたため、除脳ネコの実験条件とは異なる。また、ロボットの拘束方法も不十分であり、除脳ネコの実験結果と比較するには問題点が多い。

これらを踏まえ、本研究では、Muafroy らが提案した制御器に新たに協調機構を加え、物理モデルを構築した。また、この物理モデルを用いて、できるだけ除脳ネコの実験設定に近づけた歩行実験を行った。この実験によって得られた歩容と除脳ネコの歩容を比較し、ネコの歩容適応のメカニズムに関して考察を行う。

なお、本稿で使用されている上付き文字、下付き文字の意味を表 1 に表す。また、以下の章で用いる上付記号 hat: $\hat{\cdot}$ 、tilde: $\tilde{\cdot}$ はそれぞれノミナルな（名目上の）値、目標値を表す。脚番号: i は省略されることがある。

Table 1 Indexes

i	leg index $\in \{LF, RF, LH, RH\}$
j	joint index $\in \{\text{hip, knee, ankle}\}$
s	side index $\in \{\text{L,R}\}$
lp	leg phase index $\in \{sw, st\}$
L^*, R^*	left, right
$*F, *H$	fore, hind
sw, st	swing, stance
LO, TD	lift off and touch down
$cntr, ipsi$	contralateral and ipsilateral
AEP, PEP	anterior extreme position, posterior extreme position

2 脚制御器

本研究におけるピッチ面内歩行制御システムは CPG モデルの構成法に基づいており、脚制御器 (leg controller, LC)[5] が各脚の運動を司る。その内部構成は図 2、数学的記述は式 (1)～(16) の通りである。各 LC は 2 つの脚相、遊脚相 (swing, sw) と支持脚相 (stance, st) を持つおり、脚相の遷移は支持脚の負荷に関する情報、脚負荷 (leg loading) を用いて形作られる。各 LC

は、一定の振幅と可変な位相: ϕ^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。脚相遷移はセンサ情報を用いて形作られるので、センサ情報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: ϕ^i に基づいて生成される。ピッチ面内における脚先位置 \mathbf{r} はあらかじめ決められた脚先のノミナルな位置と速度に基づき、目標関節角・角速度が逆運動学を用いて計算される。それぞれの目標値と現在値を用いて、関節トルク Γ_j^i は PD 制御則を用いて生成される。ただし、 ${}^{lp}K_{P_j}^i, {}^{lp}K_{D_j}^i$ はそれぞれ脚番号 i における関節番号 j での脚相 lp における P ゲイン、D ゲインである。

$$\Gamma_j^i = {}^{lp}K_{P_j}^i(\tilde{\theta}_j^i - \theta_j^i) + {}^{lp}K_{D_j}^i(\dot{\tilde{\theta}}_j^i - \dot{\theta}_j^i) \quad (17)$$

軌道上で支持脚相への遷移が想定されるときの脚先位置は $\hat{\mathbf{r}}_{AEP}$ (AEP: anterior extreme position)、実際に脚負荷により遷移が起きた位置は \mathbf{r}_{TD} (TD: touch down) で表される。同様に、遊脚相への遷移が想定されるときの脚先位置は $\hat{\mathbf{r}}_{PEP}$ (PEP: posterior extreme position)、実際に遷移が起きた位置は \mathbf{r}_{LO} (LO: lift off) で表される。また、 \hat{D} は腰関節座標からみた歩幅 (stride), \hat{H} は地面から腰関節までの高さを表している。また、前脚の接地を後脚の接地に対して遅らせるために、前脚にのみ y 軸オフセット $\hat{\Delta}$ を用いている。(後脚は $\hat{\Delta} = 0$ である。)

2.1 脚位相リセット

脚相遷移が起きたとき、脚位相 ϕ は遊脚相開始時には $\hat{\phi}_{PEP}$ に、支持脚相開始時には $\hat{\phi}_{AEP}$ にそれぞれリセットされる。その後、位相は式 (2) と式 (7) 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 duty 比 $\hat{\beta}$ から式 (14)、式 (15) を用いて計算される。

2.2 脚相遷移条件

各 LC での脚相遷移は、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 ϕ を用いた条件式: 式 (3)～(5) 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 $\hat{\chi}_{TD}$ より大きくなることにより発生する (式 (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 χ_{LO} を越えている間は発生しない (式

(5)). 閾値 χ_{LO} のノミナル値 $\hat{\chi}_{LO}$ 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。

支持脚相から遊脚相への遷移の閾値 χ_{LO} について、実験において安定な walk 歩容を実現するためには、以下の各小節で述べるような、脚位相 ϕ および他の脚の脚相を考慮した、適切な調整が必要であった。

2.2.1 ACM (Ascending Coordinate Mechanism)

walk 歩容の安定性向上のために、Maurfroy らが考案した、同側の後脚から前脚への上行性協調機構 (ACM)[5] を用いた。この協調は、前脚が後脚より先に支持脚相から遊脚相に遷移しないようにするもので、式 (18) で表される。

$$\chi_{LO} := \begin{cases} \tau_{acm} \cdot \chi_{LO}^{sF} & (\text{if } \phi^{sH} < \hat{\phi}_{acm}) \\ \chi_{LO}^{sF} + \chi_{mod} & (\text{if } \phi^{sH} \in [\hat{\phi}_{acm}; \hat{\phi}_{AEP}]) \\ -5 \text{ [N]} & (\text{if } \phi^{sH} > \hat{\phi}_{AEP}) \end{cases} \quad (18)$$

ただし、

$$\chi_{mod} = \tau_{mod}(\phi^{sH}) \cdot \hat{\chi}_{ampl} \quad (19)$$

であり、 $\hat{\phi}_{acm} = 0.5\hat{\phi}_{AEP}$ 、 $\tau_{acm} = \phi^{sH}/\hat{\phi}_{acm}$ 、 $\tau_{mod}(\phi) = (\phi - \hat{\phi}_{acm})/(\hat{\phi}_{AEP} - \hat{\phi}_{acm})$ である。また、上付き文字 sF 、 sH はそれぞれ $sF \in \{LF, RF\}$ 、 $sH \in \{LH, RH\}$ のいずれかを意味する。“:=”は右辺を左辺に代入する記号である。 -5 [N] に関しては、遷移を妨げるために負の値にしている。ACM が walk 歩容安定化や横方向外乱に対するロール面内姿勢安定化に有効なことが実験により示されている[5]。

2.2.2 CCM (Contralateral Coordinate Mechanism)

低速～中速の歩容である walk, pace, trot はすべて、前脚、後脚を問わず、対側の脚が両方同時に遊脚に遷移することはない。そのため、無理な脚相遷移を防ぐため、ACM とは異なる脚間協調 (CCM) を導入する。CCM は、

$$\chi_{LO} := \begin{cases} \chi_{LO} & (\text{if } lp^{cntr} = st) \\ -5 \text{ [N]} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (20)$$

で定義される。なお、条件式は対側脚の脚相 lp^{cntr} が支持脚相 (stance) か否かを表している。

2.2.3 SIM (Self-Inhibition Mechanism)

支持脚相から遊脚相への望まない早期の脚相変化は歩容の安定性に負の影響を与える。そのため、支持脚相に遷移後、一定期間は遊脚相に遷移しないよう χ_{LO} の値を調整する必要がある。そこで、 χ_{LO} を式 (21) のように脚位相 ϕ の関数として遊脚への遷移を調整する。

$$\chi_{LO} := g(\phi) \cdot \chi_{LO} \quad (21)$$

ここで、 $\tau_{st} = (\phi - \hat{\phi}_{AEP})/(2\pi - \hat{\phi}_{AEP})$ として、関数 g は、

$$g(\phi) = \begin{cases} 0 & (\text{if } \tau_{st} < 1/3) \\ 3 \cdot (\tau_{st} - 1/3) & (\text{if } 1/3 \leq \tau_{st} < 2/3) \\ 1 & (\text{if } 2/3 \leq \tau_{st}) \end{cases} \quad (22)$$

で定義される。この式を用いることで、支持脚期の最初の $1/3$ は遊脚に遷移せず、次第に線形に遷移しやすくなる。脚が接地した際の反発を考慮し、本実験ではすべて関数 $g(\phi)$ を用いている。ACM の働かない後脚で SIM は特に必要である。

2.2.4 χ_{LO} の決定

前脚と後脚の χ_{LO} には最初 $\hat{\chi}_{LO}$ が設定され、その後表 2 に示すように、左から順番に上記の ACM (前脚のみ)、CCM、SIM が順次適用される。ただし、ACM や CCM で $\chi_{LO} = -5 \text{ [N]}$ となつたときは、SIM は行わない。

Table 2 χ_{LO} is determined from left to right.

leg	ACM	CCM	SIM
Fore	○	○	○
Hind	×	○	○

$(\chi_{LO} = \hat{\chi}_{LO})$

3 基礎実験

3.1 ロボットと実験設定

図 3 に本研究に用いる四脚ロボット「小鉄」の外観を示す。

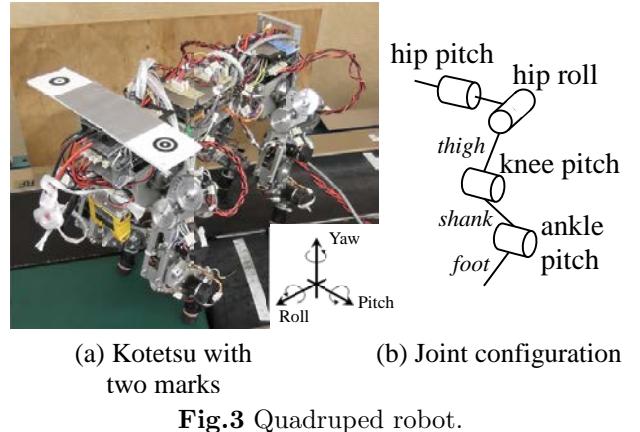


Fig.3 Quadruped robot.

本ロボットの脚は腰ロール関節・腰ピッチ関節・膝ピッチ関節・足首ピッチ関節の計 4 関節からなり、各関節はモータで駆動される。また、各脚の脚負荷を取得するため脚先に力センサを搭載し、ロボットの位置情報を計測するため、2種類のマーカをロボットに取り付けている。歩行中のロボットを上部から撮影し、マーカの位置をテンプレートマッチングにより計測することで、小鉄の水平面内位置と姿勢を算出できる。

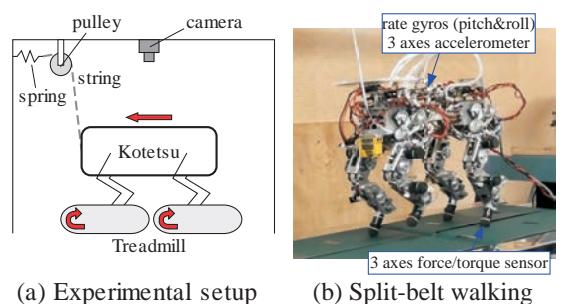


Fig.4 Experimental setup.

除脳ネコと同様の実験設定にするため、小鉄の水平面内姿勢角を拘束した状態で treadmill 上を歩行させた。拘束方法として、図 4 のように、小鉄の一端にヒモを結び、ヒモに常にテンションがかかるよう、バネ（バネ定数： $4 \times 10^3 \text{ [N/m]}$ 、計測値）がヒモを引っ張る装置を用いた。この時、ヒモによるロール運動への影響は十分に小さいとみなせる。実験条件としては、全てのベルト速度を 0.13 [m/s] に設定した tied-belt, tied-belt の状態から、LF のベルト速度のみを 0.22 [m/s] に設定した split-belt の 2 種類をそれぞれ行う。Split-belt の速度比は、除脳ネコの実験[6]での速度比とほぼ同じである。Treadmill の上部にカメラを設置し、予め小鉄に取り付けられたマーカを常時計測させる。実験の開始条件ができるだけ一定にさせるため、静止状態から treadmill が動くことによるマーカの移動をカメラで計測した時、歩行を開始させる。表 3 に今回の実験で用いたパラメータを記す。

Table 3 Parameters

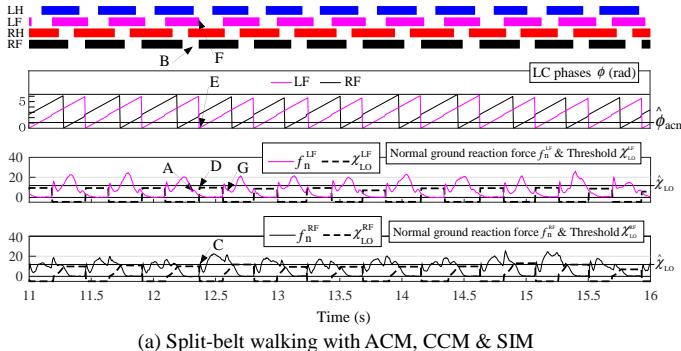
\hat{T}_{sw}	[sec]	0.20	$\hat{\beta}$	0.67
$\hat{\chi}_{LO}$	[N]	12.0	$\hat{\chi}_{TD}$	[N]
\hat{D}	[m]	0.033	\hat{H}	[m]
$\hat{\chi}_{ampl}$	[N]	15.0		

3.2 CCM の必要性

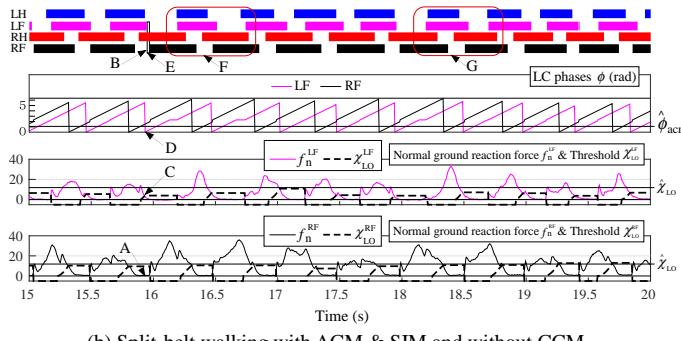
CCM の必要性を示すため, split-belt では ACM と CCM 両方用いた場合と, CCM を用いていない場合でそれぞれ実験を行った(図 5)。図 5-(a)において, A で $f_n^{LF} < \hat{\chi}_{LO}$ となったが, B で lp^{RF} は sw なので CCM がはたらくために $\chi_{LO}^{LF} = -5[N]$ となり, LO が生じない。また, C で lp^{RF} が st となり, χ_{LO}^{LF} は ACM の値となり(D), $f_n^{LF} < \chi_{LO}^{LF}$ を満たすため LO が生じる(E,F)。このことから, 歩行の安定性に CCM が関与していることが分かる。

一方, 図 5-(b)において, A で $f_n^{RF} = 0$ で $lp^{RF} = sw$ (B) であるにもかかわらず, C で $f_n^{LF} < \chi_{LO}^{LF}$ となり, LO が生じてしまい(D), LF と RF が同時に遊脚となる時期が一時的に現れ(E), 歩容はその後乱れる(F)。その後, 17[sec]あたりで歩容は安定するが、再度同様な問題が 18[sec]前後に生じ、歩容が乱れる(G)。

以上より, CCM が split-belt の歩容の安定化に貢献していることが分かる。



(a) Split-belt walking with ACM, CCM & SIM



(b) Split-belt walking with ACM & SIM and without CCM

Fig.5 The result of experiments to see the effectiveness of CCM. Gaits, phase ϕ^i and f_n^i with χ_{LO}^i of LF, RF are shown.

3.3 Split-belt 適応

小鉄を用いた定常歩行実験で, tied-belt と split-belt の歩容の比較を図 6 に示す。図 6-(b) は, 図 1-(b)-(C) の適応後に相当する。本実験では, tied-belt から split-belt への切り替え実験を行っていないため, split-belt 移行直後の早期脚間協調メカニズムについてでは今後の課題とする。

B1 (LF の離地で終了) と B2 (RF の離地で終了) の長さを比較すると, split-belt では, 除脳ネコと同様に tied-belt と比較して B1 の時間が短縮されている。B1 の時間が短縮された原因として, LF(fast-leg) が通常より早く PEP に到達することで, 離地のタイミングが通常時よりも早くなつたと考えられる。図 6-(b)

では split-belt にもかかわらず walk 歩容はほぼ安定しているが, 除脳ネコの split-belt 歩容と比較すると, 位相差と duty 比の点において, 異なる点も多い。

改めて除脳ネコの split-belt 歩容を見ると, 適応前(図 1-(b)-(B)) では LH より先に LF が遊脚となり walk 歩容が乱れているが, 適応後は正常な walk 歩容に戻っている。これは著者らが提案した ACM と同様な上行性協調機構が小脳により遅延脚間協調として行われている可能性を示している。

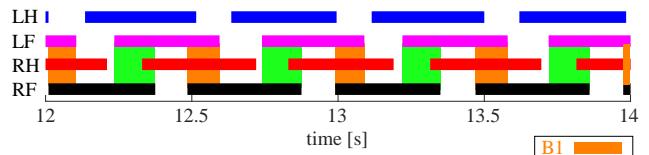
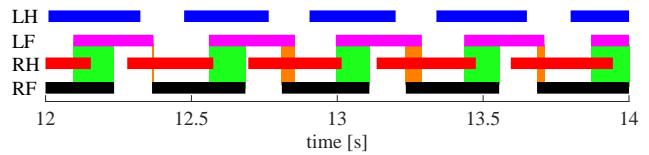
(a) Tied-belt walking ($T=0.49, \beta=0.75$)(b) Split-belt walking ($T=0.43, \beta=0.70$)

Fig.6 Compare (a)normal locomotion(tied-belt) and (b)perturbed locomotion(split-belt).

4 結言

本研究では, 除脳ネコの split-belt 歩行実験結果を身体性やセンサーフィードバックと結びつけるため, 著者らが考案した脚制御器に新たな脚間協調機構を導入して四脚ロボットの split-belt 歩容適応実験を行い, 従来の ACM に加え, CCM, SIM の有効性を確認した。除脳ネコの split-belt 歩行と比べると, 適応後の両脚支持期間 (B1) の変化において類似点が確認できたが, duty 比や脚間位相差において相違点が見られた。除脳ネコの小脳レベルでの早期脚間協調と遅延脚間協調の詳細なモデル化は今後の課題である。

参考文献

- [1] T.G. Brown, Decerebrate cat movie (1939), in Video: The basal ganglia and brainstem locomotor control edited by E. Garcia-Rill, (1989) .
- [2] H. Haken, Principles of brain functioning, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (1996) .
- [3] J. Duysens, and K. Pearson, Inhibition of flexor burst generation by loading ankle extensor muscles in walking cats. *Brain Res.*, 187, 321-32. (1980) .
- [4] O. Ekeberg and K. Pearson, Computer simulation of stepping in the hind legs of the cat, *J. of Neurophysiology*, 94(6), pp.4256-68, (2005) .
- [5] C.Maufray, H. Kimura & T. Nishikawa, Stable Dynamic Walking of the Quadruped "Kotetsu" Using Phase Modulations Based on Leg Loading/Unloading against Lateral Perturbations, *Proc. of ICRA2012*, pp.1883-1888, (2012) .
- [6] 柳原大, 歩行の適応, 生体の科学 第 45 卷 第 5 号, pp.402-403, (1994) .
- [7] 柳原大, 歩行の適応的制御に関する小脳の一酸化窒素, 運動生化学, 10, pp.11-16, (1998) .
- [8] 柳原大, 歩行の神経機構—調節系—, 身体適応- 歩行運動の神経機構とシステムモデル, シリーズ移動知 第 2 卷, オーム社, pp.63-80, (2010) .
- [9] 伊藤聰, 湯浅秀男, 羅志偉, 伊藤正美, 柳原大, 環境の変化に適応する四足歩行ロボットシステム, 日本ロボット学会誌, Vol.17 No.4, pp.595~603, (1999) .
- [10] 今岡大策, 東善之, 木村浩, 四脚ロボットの脚相調節を用いた Split-belt Treadmill 歩行における歩行適応, 知能システムシンポジウム予稿集, pp.349-354, (2011) .