

四脚ロボットを用いた視床ネコの split-belt 適応歩行の構成論的理解

-小脳レベルでの適応過程を考慮した視床ネコモデルの提案と検証-

○古殿幸大（京工繊大） 木村浩（京工繊大）

1. はじめに

四足動物は歩行時に摂動を受けると、歩容を変化させて摂動に適応する。この歩容適応の詳細なメカニズムはいまだ不明な点が多い。下位中枢神経系レベルでの歩容適応メカニズムを明らかにするため、Yanagiharaらは視床ネコを用いた split-belt treadmill 歩行実験を行った [1] (図 1)。

視床ネコは左前のベルト速度のみ他のベルト速度のおよそ 1.7 倍に設定した split-belt treadmill 上で、歩容を変化させて split-belt に適応することができる (split-belt 適応)。この適応過程に関して、タイムスケールの異なる 2 種類の適応過程が見られる。Tied-belt (図 2-A) から split-belt (図 2-B) に切り替わった直後、fast-leg の支持脚期間が減少し (図 2-D)、遊脚期間が増加する (図 2-E)。他方、slow-leg の支持脚期間は変化せず (図 2-F)、遊脚期間のみ減少する (図 2-G)。このような適応過程を「early adaptation」と定義する。その後、split-belt の歩行を継続するうちに (図 2-C)、両脚支持期間 B1 が増加し (図 1-(B))、歩容が安定となる。以下、この適応過程を「late adaptation」とする。Yanagihara らは、小脳が late adaptation において重要な役割を果たしていると主張している [1]。

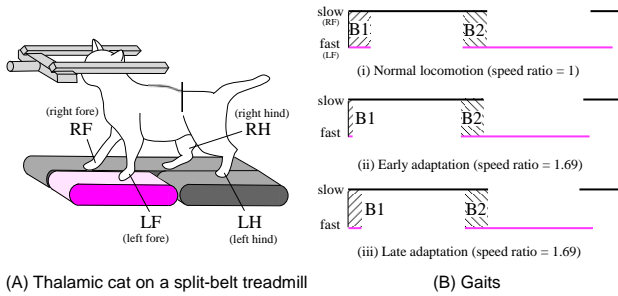


図 1 (A) 視床ネコの split-belt 歩行. (B) 視床ネコの両脚支持期間の変化. それぞれ [1] より筆者らが加筆・作成.

この split-belt 適応過程を構成論的に理解するため、現在までに様々な研究 [2, 3, 4] が行われてきた。Aoi らは位相リセットを用いた非線形位相ダイナミクスを基礎とする制御器を提唱した [2, 3]。この制御器を二脚 [2] および四脚ロボット [3] に搭載し、構成論的モデルによる split-belt 適応を実現している。他方、筆者らは視床ネコの split-belt 適応過程を感覚-運動レベルで構成論的に理解することを目指している。先行研究 [4] では四脚ロボットを用いた視床ネコモデルを提案し、split-belt

適応を一部実現した。しかし、遊脚・支持脚期間の変化は視床ネコの歩容と異なり、構成論的モデルとして不十分である。そこで、脊髄および小脳適応のメカニズムを見直し、四脚 split-belt 適応においてそれぞれの適応メカニズムがどのように寄与しうるか、感覚-運動レベルで構成論的に理解することを本稿の目的とする。はじめに、先行研究 [5] で提唱した脊髄ネコモデル (S+CAS モデル) に小脳の適応過程を組み込み、新たな視床ネコモデルを提案する。その後提案モデルによる四脚 split-belt treadmill 歩行実験ならびに得られた結果の評価を通して、モデルの妥当性を検証する。

本稿において、上付記号 $\hat{\cdot}$, $\bar{\cdot}$, $\tilde{\cdot}$ はそれぞれ変数のノミナル値, 計測値, 目標値を表す。また、脚番号: i は省略されることがある。

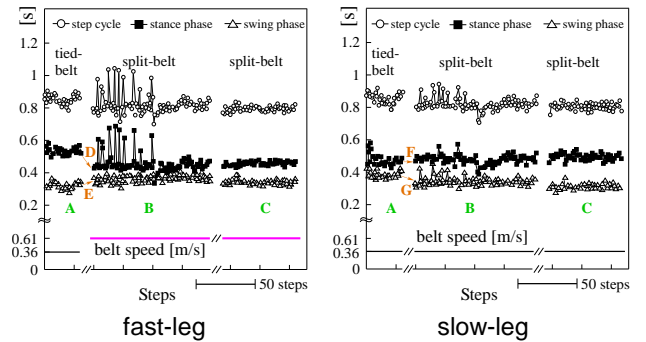


図 2 視床ネコの split-belt 歩行における歩行周期、遊脚・支持脚期間の変化. [1] より一部加筆.

2. 視床ネコモデルの提案

視床ネコの四脚 split-belt 適応を構成論的に理解するため、脊髄ネコモデルとしての S+CAS モデル (図 3) を基礎とした新たな構成論的モデルを提案する。なお、脊髄ネコモデルおよび S+CAS モデルの詳細については、本講演会で発表予定の [5] を参照のこと。

2.1 反応を起動するための脚先速度条件

本稿では、phasic stretch response をより適切に引き起こさせるため、遊脚期間調整機構の式 ([5] の式 (2)) に脚先速度 \bar{v}_{xlo} の条件式を加え、以下のように変更する。

$$G(i, g) = \begin{cases} g \cdot (r_{xs} - \bar{r}_{xlo}^i) & \text{if } (r_{xs} - \bar{r}_{xlo}^i) > 0 \\ & \& (v_{xs} - \bar{v}_{xlo}^i) > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

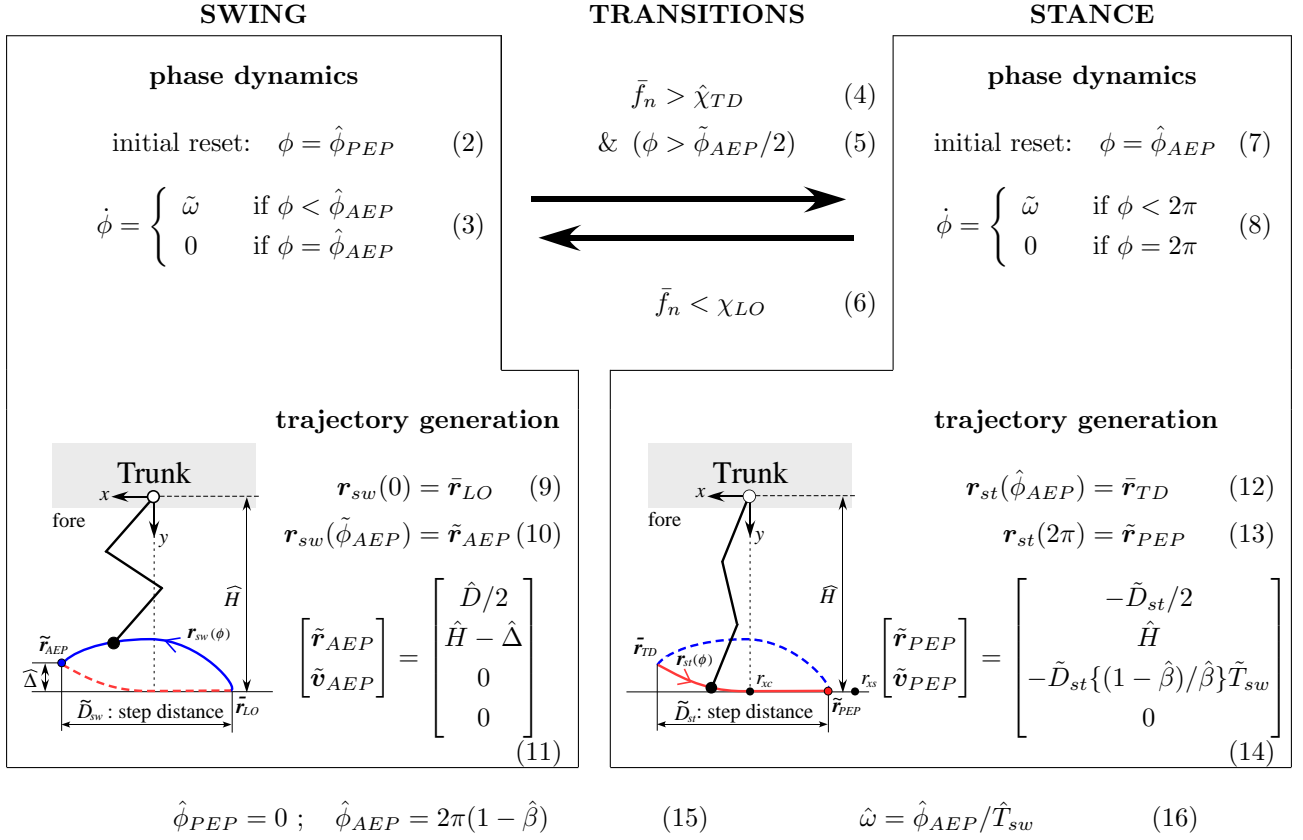


図 3 脚制御器 (leg controller, LC) [6]. \mathbf{r} , \mathbf{v} はそれぞれ脚の位置・速度ベクトルを表す. 各脚における遊脚・支持脚相の脚先軌道 \mathbf{r}_{sw} , \mathbf{r}_{st} は LC の位相 ϕ^i に基づいて決定される.

ただし, $v_{xs}(= -0.122 \text{ [m/s]})$ は閾値であり, \bar{v}_{xlo}^i は離地 (lift-off, LO) 時における脚先速度である. これは, 脚先の接地 (touch-down, TD)・離地位置 ($\bar{\mathbf{r}}_{TD}^i$)・離地位置 ($\bar{\mathbf{r}}_{LO}^i$)_x ならびに計測支持脚期間 \bar{T}_{st}^i を用いて

$$\bar{v}_{xlo}^i = -\{(\bar{\mathbf{r}}_{TD}^i)_x - (\bar{\mathbf{r}}_{LO}^i)_x\}/\bar{T}_{st}^i \quad (17)$$

より計算される. LO 位置の条件式と脚先速度の条件式が両方成立したときに, response が発生するよう設計する.

2.2 運動学習

小脳の長期適応過程として運動学習に着目する. 本稿は先行研究 [4] にない, step distance の修正・記憶機構を運動学習として提案する.

$$\tilde{D}[n]^i = \begin{cases} \tau \bar{D}^i[n-1] + (1 - \tau) \tilde{D}^i[n-1] & \text{if } |\bar{D}^i[n-1] - \tilde{D}^i[n-1]| > \varepsilon_D \\ \bar{D}^i[n-1] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

ただし, $\tilde{D}[n]$, $\bar{D}[n]$ はそれぞれ n ステップ目の目標・計測 step distance を表す. また, $\tau(= 8 \times 10^{-5})$ は重み係数で $\varepsilon_D(= 0.01 \text{ [m]})$ は許容差である.

S+CAS モデルにおいて, 各脚の運動は脚制御器 (図 3) により決定される. 計測脚負荷 \bar{f}_n が閾値 χ_{LO} を下回ったとき, 支持脚相から遊脚相への遷移が行われる

(式 (6)). 本稿では, 式 (18) に応じて閾値 χ_{LO} を以下の式で再定義する.

$$\chi_{LO}^i = \begin{cases} \hat{\chi}_{LO} \cdot (r_{xc} - \bar{r}_x^i)/(\tilde{D}[n]^i/2) & \text{if } lp^{cntr} = st \\ -5 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

2.3 脊髓・視床ネコモデルの定義

S+CAS モデルを用いて四脚 split-belt 歩行を行うと, slow-leg において不適切な phasic stretch response が発生し, roll 運動が不安定となり歩行途中で転倒した. そこで, 転倒を防ぐために不適切な response を抑制する必要がある. そこで, S+CAS モデルに脚先速度の条件 (式 (1)) を組み込んだ脊髓ネコモデルを新たに提案する.

また, 小脳適応メカニズムを考えるため, 脊髓ネコモデルに運動学習機構を組み込んだ視床ネコモデルを新たに提案する. 本稿では, 運動学習として先行研究 [4] と同様に step distance の修正・記憶 (式 (18)) を仮定する.

3. 四脚 split-belt 歩行実験

3.1 実験条件

新たに提案した脊髓ネコモデルと視床ネコモデルをそれぞれ用い, 四脚 split-belt 歩行実験を行う (図 4). 実験条件として, 視床ネコの歩行実験 [1] を参考に左

右のベルト速度比を設定する．先行研究 [4] と同様に左前脚を fast-leg, 残りの脚を slow-leg とし, 速度比を $SR = 1.6$ とする．はじめに tied-belt で歩行させた後, split-belt に手で切り替えて歩行を継続させる．

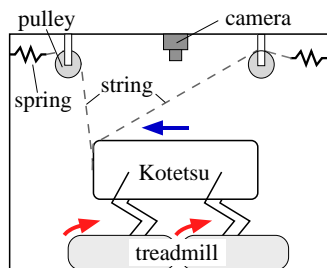


図 4 四脚 split-belt 歩行実験の模式図 [4]. 図 1-(A) にならぬ, ロボットの前部はヒモにより拘束されている．

3.2 結果

はじめに, 脊髄ネコモデルの実験結果を図 5-(A) に示す. Split-belt に切り替えてしばらくすると歩容が乱れるが, 転倒せずに歩行を継続する．その後, 30 秒以降は歩行周期の変動が小さくなる一方で, 各脚の遊脚期間は tied-belt の歩行時とほぼ同じとなる．次に, 視床ネコモデルの実験結果を図 5-(B) に示す. 脊髄ネコモデルと同様に, split-belt に切り替えると歩容が乱れるが転倒せずに歩行を継続する．その後, 38 秒以降は歩行周期の変動が小さくなり, fast-leg (slow-leg) の遊脚期間はそれぞれ tied-belt のときより増加する (減少する)．

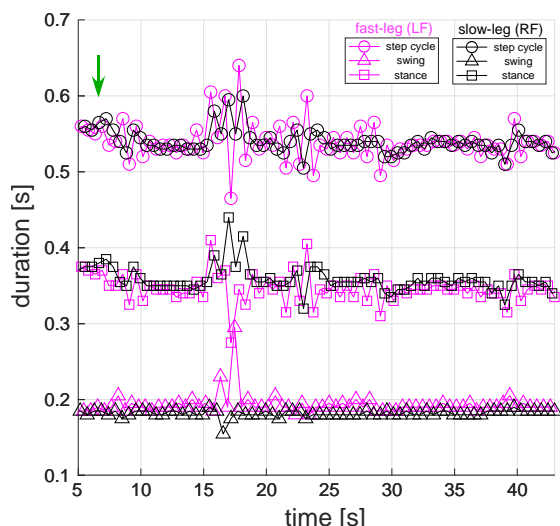
ここで, 小脳の適応過程が late adaptation に寄与しているか検証するため, 脊髄ネコモデルおよび視床ネコモデルの LO 位置および脚先速度に着目する．脊髄ネコモデル, 視床ネコモデルそれぞれの LO 位置ならび

に脚先速度を図 6 に示す．両脚支持期間に着目すると, 両モデルともに split-belt に切り替わってから B1 期間が減少する．このとき, 両モデルともに fast-leg および slow-leg の LO 位置両方が後方に移動する．しかし, 脚先速度の条件式 (1) を満たしていないため, slow-leg では phasic stretch response が引き起こされない．一方, fast-leg で phasic stretch response が引き起こされると, 一時的に両脚支持期間 B1 が増加する．脊髄ネコモデルでは変動が小さくなった 30 秒以降, 両脚支持期間 B1 は tied-belt 上歩行のときより小さい．他方, 歩幅運動学習モデルでは変動が小さくなった 38 秒以降, 両脚支持期間 B1 は tied-belt 上歩行のときとほぼ同じである．ただし, phasic stretch response が常に引き起こされている．

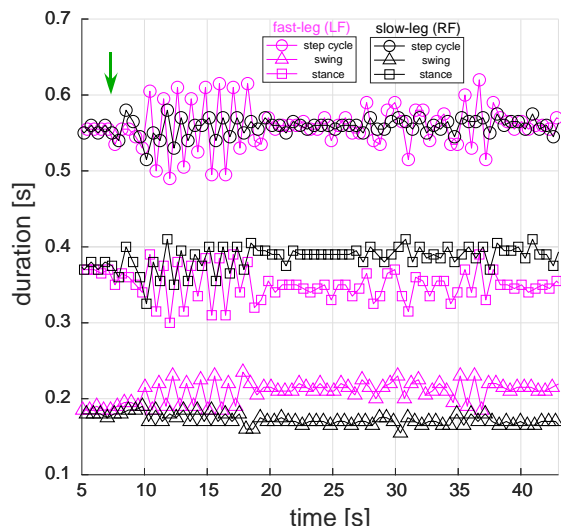
4. 議論

初めに, 四脚 split-belt 歩行実験と phasic stretch response の関係について議論する．四脚 split-belt 歩行において slow-leg の離地が遅れ, LO 位置が tied-belt 上歩行のときより後方に移動するケースが見られる．四脚 split-belt 歩行で転倒を防ぐためには, 遊脚期間調整機構に脚先速度の条件式を加えるなど, fast-leg と slow-leg を区別して fast-leg にのみ適切な phasic stretch response を発生させることが重要である．

次に, 四脚 split-belt 歩行における運動学習について議論する．本稿で用いた脊髄ネコモデルは小脳の適応過程を仮定していないが, split-belt 上で歩行周期の変動が抑えられる．しかし, 両脚支持期間 B1 が回復していないことから, 視床ネコの late adaptation とは明らかに異なる．他方, 視床ネコモデルでは split-belt 上で歩行周期の変動が抑えられた時, 両脚支持期間 B1 は tied-belt のときとほぼ同じ値である．ところで, phasic stretch response が起きると両脚支持期間 B1 が増加する．視床ネコモデルにおいても, 歩容安定時は常に response がはたらいっている．そのため, 両脚



(A) spinal cat model



(B) thalamic cat model

図 5 (A) 脊髄ネコモデルおよび (B) 視床ネコモデルによる四脚 split-belt 歩行の歩行周期, 遊脚・支持脚期間の変化．緑の矢印は tied から split に切り替わった時刻を指す．

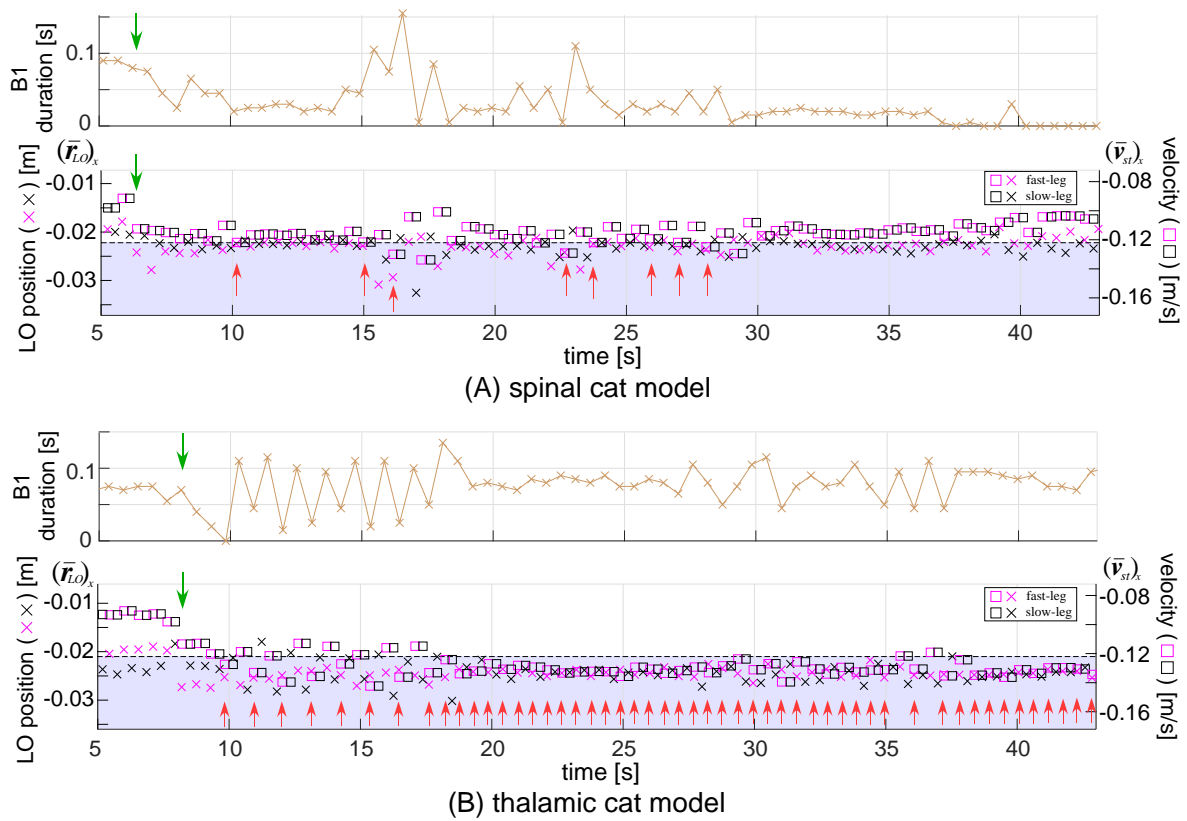


図 6 (A) 脊髄ネコモデルおよび (B) 視床ネコモデルによる四脚 split-belt 歩行の両脚支持期間 B1 および LO 位置 (×)・脚先速度 (□) の変化. 点線は閾値 r_{xs} , v_{xs} を表す. 緑の矢印は tied から split に切り替わった時刻を指す. 赤矢印は response の条件を満たしたステップを指す.

支持期間 B1 の増加および歩容安定メカニズムが脊髄適応によるものなのか,あるいは小脳適応によるものなのかを評価することができない. Late adaptation における両脚支持期間 B1 の増加を小脳適応メカニズムで説明するためには, step distance とは異なる新たな運動学習機構を検討する必要がある.

5. 結言

本研究は視床ネコの split-belt 適応を構成論的に理解するため,筆者らの先行研究を元に四脚ロボットを用いた新たな脊髄ネコモデルおよび視床ネコモデルを提案した.

提案モデルを用いた四脚 split-belt 歩行実験から,脚先速度の条件式によって split-belt における不要な phasic stretch response が抑制され,歩行時の転倒を防ぐことが分かった. また,視床ネコモデルにおいて脊髄ネコモデルではみられなかった, split-belt 上歩行時における両脚支持期間 B1 の増加が見られた. しかし, phasic stretch response でも両脚支持期間 B1 が増加できるほか,視床ネコモデルにおいても response がほぼ常に起こっている. そのため,運動学習の効果を評価することができなかった. 今後, late adaptation における小脳の適応メカニズムを説明可能な,新たな運動学習機構を提唱し,視床ネコの split-belt 適応をより構成論的に理解することを目指す. 本稿に関連する動画が <http://www.robotlocomotion.kit.ac.jp/kotetsu/index-j.html> で公開されている.

謝 辞 本研究は JSPS 科研費 JP19K12169 ならびに JP21J23064 の助成を受けたものです.

参 考 文 献

- [1] D. Yanagihara et al.: "A new learning paradigm: adaptive changes in interlimb coordination during perturbed locomotion in decerebrate cats," Neuroscience Research, vol.18, pp. 241–244, 1993.
- [2] S. Fujiki et al.: "Adaptation mechanism of interlimb coordination in human split-belt treadmill walking through learning of foot contact timing: a robotics study," J. of Royal Soc. Interface, vol. 12, DOI:10.1098/rsif.2015.0542, 2015.
- [3] S. Aoi et al.: "Fast and slow adaptations of interlimb coordination via reflex and learning during split-belt treadmill walking of a quadruped robot.," Front. in Robot. & AI, 8, 697612, 2021.
- [4] K. Kodono and H. Kimura: "Split-belt adaptation model of a decerebrate cat using a quadruped robot with learning," Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems. Springer, pp. 217–229, 2020.
- [5] 古殿幸大, 木村浩: "四脚ロボットを用いた視床ネコの split-belt 適応歩行の構成論的理解-CPG と反射・反応から構成される脊髄ネコモデルの提案と検証-", 第 40 回日本ロボット学会学術講演会 (発表予定), 2022.
- [6] C. Maufroy et al.: "Integration of posture and rhythmic motion controls in quadrupedal dynamic walking using phase modulations based on leg loading/unloading" Auto. Robot. vol. 28, pp. 331–353, 2010.