

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K12169

研究課題名(和文)ネコの歩行における小脳による歩容適応メカニズムの四足ロボットを用いた構成論的理解

研究課題名(英文) Constructive understanding of the gait adaptation mechanism through the cerebellum in the cat locomotion using a quadruped robot

研究代表者

木村 浩 (Kimura, Hiroshi)

京都工芸繊維大学・その他部局等・教授

研究者番号：40192562

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：歩容適応研究では左右ベルト速度が異なるトレッドミル(スプリット)がよく用いられる。除脳(視床)ネコでは脊髄と小脳レベルでの適応がみられ、それぞれ早期、遅延適応と呼ばれる。従来の数理モデルではなく腰伸展または脚徐負荷情報による遊脚相遷移という感覚運動機能を中心とした「脊髄ネコモデル」に、歩幅学習機能を付加した「視床ネコモデル」を構成し、歩容適応を姿勢安定化の観点から説明した。さらに高速ベルト側伸展脚の対脚で遊脚期間を短縮する「交差性伸展反射」を導入し、スプリットで着地時左右位相差が0.5に保たれること、低速スプリットで速度低高脚1:2歩容が現れる脊髄ネコ実験を四脚ロボット実験により再現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

4脚ロボットの自律歩容適応・遷移において脚間協調は重要である。本研究は最終的に、従来の上位指令による歩容切替ではなく感覚運動機能のみによる自律分散的な歩容適応・遷移を目指している。本研究は左右脚間協調に焦点を絞って、そのメカニズムを考察した。結果として、歩容適応では胴体姿勢安定化のために着地タイミング決定が重要であることが分かった。さらに、歩容遷移とは両脚支持期において胴体を含む系全体の力学的安定性を保ちながらどちらの脚が先に離地するかという離地タイミング決定問題に帰着できることが明らかになった。このような知見は、4脚ロボットの感覚情報に基づく自律制御における複雑度の低減に貢献する。

研究成果の概要(英文)：In the split-belt locomotion of a decerebrate (thalamic) cat, the adaptation at the level of the spinal cord and the cerebellum is observed. Each adaptation is named "early" and "late." We proposed the "spinal cat model" based on sensorimotor functions using hip extension and leg unloading for the transition from the stance to swing phase of a leg. By the "thalamic cat model" with the additional step distance learning function, we explained the mechanism in such gait adaptation in view of the posture stabilization. We also employed the "crossed extension reflex", where the swing phase duration of a leg contralateral to the leg with hip extension by the fast belt is shortened. By applying this model to a quadruped robot, we realized that the relative phase difference on the touch down between legs became 0.5 in the normal split-belt, and that the gait of 1:2 step cycles on slow and fast belts was induced in the slow split-belt. Such gaits resembled those observed in spinal cats.

研究分野：知能ロボット

キーワード：interlimb coordination split-belt adaptation sensorimotor function spinal cat hip extension leg unloading gait transition

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

4脚ロボットの自律歩容適応・遷移において脚間協調は重要である。本研究は、従来の上位指令による歩容切替ではなく感覚運動機能のみによる自律分散的な歩容適応・遷移を目指している。4脚動物を参考にして、脚間協調メカニズムを考える。トレッドミル上コモーションで前後や左右のベルト速度が異なる場合をスプリットベルトとよび、脚間協調メカニズムを調べるときに多く用いられてきた。自発歩行能力を有する除脳ネコ(視床ネコ)をトレッドミル上で歩行させノーマルベルトから左右スプリットベルトに切替えたとき、直後に高速ベルト上の脚で支持脚期間の低下が、対側の低速ベルト上の脚で遊脚期間の低下が見られ、結果2つある両脚支持期の一方向の期間が極端に短くなる。そして、しばらくすると脚間位相差の調整が行われ、短くなった両脚支持期間がある程度回復する。これは両脚支持期間での左右脚間のスムーズな体重移動のための適応であり、前頭面内姿勢安定化に貢献している(Yanagihara et al. 1993)。前者を早期適応、後者を遅延適応とよび、それぞれ、脊髄レベルの運動生成・反射と小脳レベルの運動学習による適応と考えられている(Fujiki et al. 2015)。

### 2. 研究の目的

視床ネコ・スプリットベルト適応を従来の数値モデル(Ito et al. 1998)ではなく、感覚運動機能モデルを用いて説明し、ネコの左右脚間協調メカニズムの構成論的理解を図る。さらに、得られた左右脚間協調メカニズムの知見を4脚ロボット制御器に適用して、歩容適応・遷移のための感覚情報に基づく自律制御における複雑度の低減を図る。

### 3. 研究の方法

従来の除脳ネコを用いた神経生理学実験で得られた知見を参考にして、感覚情報として腰伸展および脚徐負荷情報を用い、運動機能として脚の支持脚相から遊脚相遷移への切り替えを行う感覚運動機能(Ekeberg et al. 2005; Maufray et al. 2010)を中心とした「脊髄ネコモデル」を提案する(図1)。さらに、小脳の長期抑圧を参考にした歩幅学習機能を付加した「視床ネコモデル」を構成する。これらのモデルを用いて4脚ロボット(Maufroy et al. 2012)のスプリットベルト適応実験を行い(図2)、提案した構成論的モデルの妥当性を評価する。

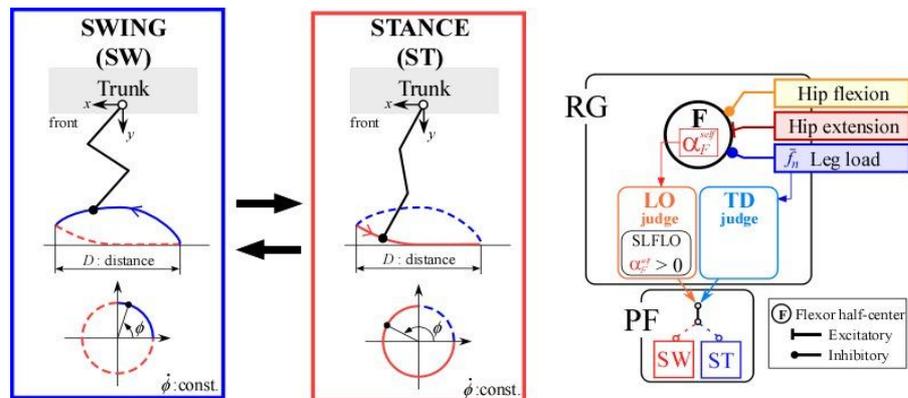


図1 (左)脚制御器と脚相遷移, (右)感覚情報と脚相遷移

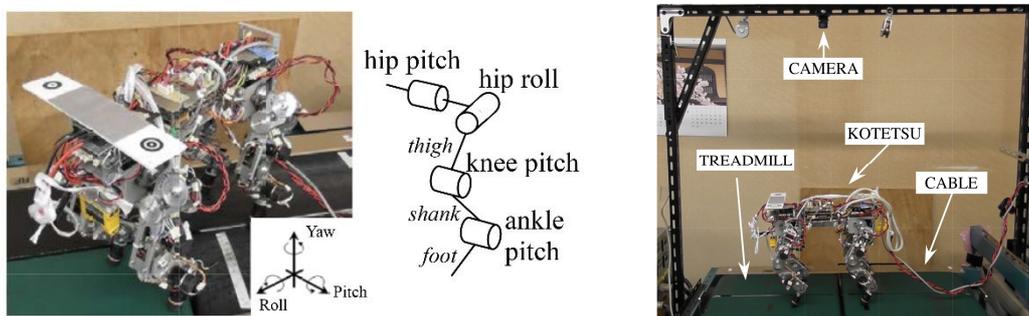


図2 (左)4脚ロボット「小鉄」, (右)スプリットベルト実験

#### 4. 研究成果

まず脊髄ネコモデルを用いて4脚ロボットのスプリットベルト適応実験を行った(図3, 図4-(a)). 最初はノーマルベルトで歩行を開始し, 途中で左前脚のベルト速度を1.7倍に切替えた結果を図4-(b)に示す. 切替え直後に高速ベルトにより後方に伸展した脚(LF)の両脚支持脚期間が短くなり(E), 左右体重がスムーズに行われていない(H). 感覚情報を用いた漸化式による歩幅学習機能を付加した視床ネコモデルを用いた結果を図4-(c)に示す. 切替え直後(G)は脊髄ネコモデルの場合と同様に短い両脚支持脚期間(E)で左右体重はスムーズでない(G)が, 学習の結果として脚間位相差が調整され(F), スムーズな体重移動が行われた(H).

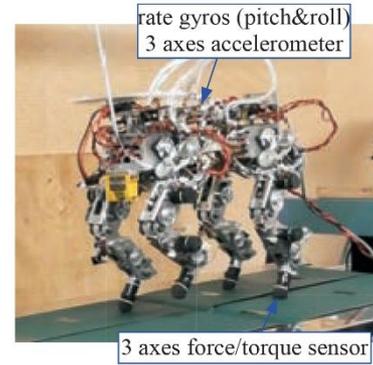


図3 歩行中の小鉄

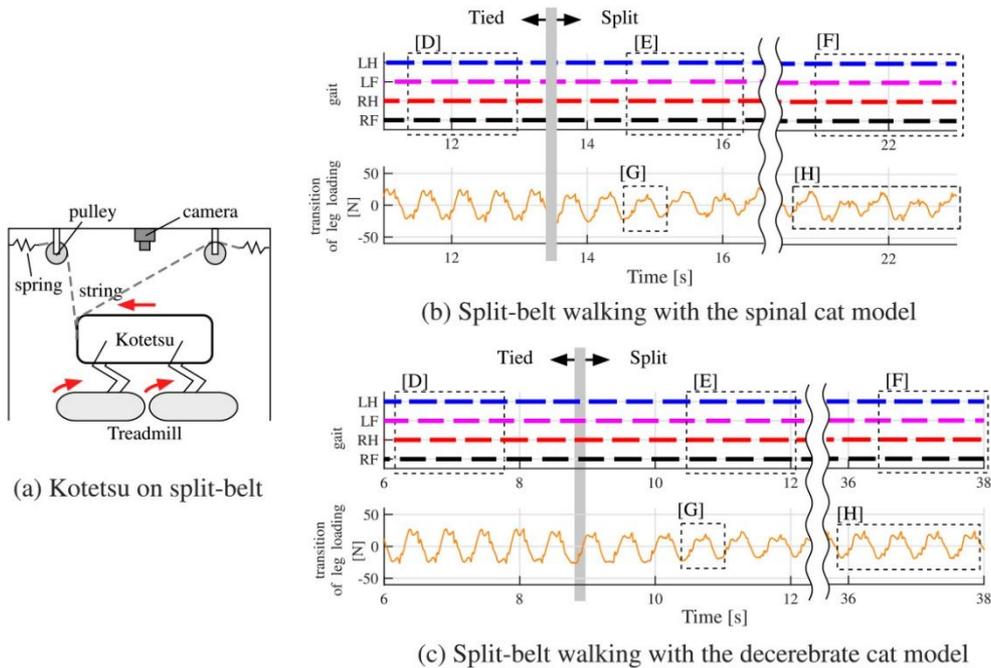


図4 (a) 4脚ロボットのトレッドミル上ロコモーション. (b) 脊髄ネコモデルを用いた実験結果. (c) 視床ネコモデルを用いた実験結果. (a)(b)ともに途中でノーマルベルト(Tied)からスプリットベルト(Split)に切り替わっている. 歩容線図と左右前脚間・脚負荷(体重)移動が示されている. LH: 左後, LF: 左前, RH: 右後, RF: 右前.

しかし, 切替え後の低速ベルト上の対側脚の遊脚期間の短縮が不十分であるなど, 脊髄ネコモデルに不十分な点があると考えた. そこで, 脳幹経由の上位指令や小脳による調節を受けない脊髄ネコ・後2脚スプリットベルト実験(Frigon 2017)の結果を参考にして, 脊髄ネコモデルの改善を図ることにした. 脊髄ネコでは, スプリットベルトによる摂動を受けたとき, 離地(L0)時左右脚間位相差  $l_0$  はベルト速度比で変化するが, 着地(TD)時左右脚間位相差  $td([0, 1])$  は0.5に保たれる. 提案した脊髄ネコモデルに, 「交差性伸展反射」を参考にして, 高速ベルト側伸展脚の対脚で遊脚期間を短縮するCAS(Contralateral Adjustment of the Swing phase duration)を導入して行った実験結果を図5に示す. 左図と比較してCASを導入した右図ではスプリットベルト切替え後しばらくして  $td$  が0.5に戻り, 結果として前頭面内運動(b, Roll motion)と左右脚負荷(d, Leg loading)の左右差が減少していることが分かる. 当然の結果であるが, 低速ベルト脚で遊脚期間の低下が見られた. すなわち, 視床ネコの早期適応を脊髄ネコモデルを用いて再現することができた. 結論として, 歩容適応において胴体姿勢安定化のために着地タイミング決定が重要であることが分かった.

低速ベルトの速度が極端に遅い脊髄ネコ・後2脚スプリットベルト実験(Frigon 2017)では, 速度に応じて1:2歩容が現れる. これは低速ベルト脚の1ステップサイクル内に高速ベルト脚が2ステップサイクルを見せる特殊な歩容である. ただし,  $td$  は0.5には保たれない. CASを導入しない脊髄ネコモデルを用いて実験を行った結果を図6に示す. ノーマルベルト(Tied)では通常の1:1歩容を見せているが, 左後脚(LH)のベルト速度を下げたスプリットベルト(Split)にしたとき1:2歩容に自律的に遷移した. これは, 両脚支持期において, 腰伸展と脚負荷から構成される屈筋活性度: F(e, Flexor activity)を用いた離地タイミング決定で, 高速ベルト脚が後から着地したにもかかわらず主に腰伸展の効果で低速ベルト脚よりも先に離地が決定されたからである. 結論として, 歩容遷移において両脚支持期でどちらの脚が先に離地するかという離地タイミング決定が重要であることが分かった.

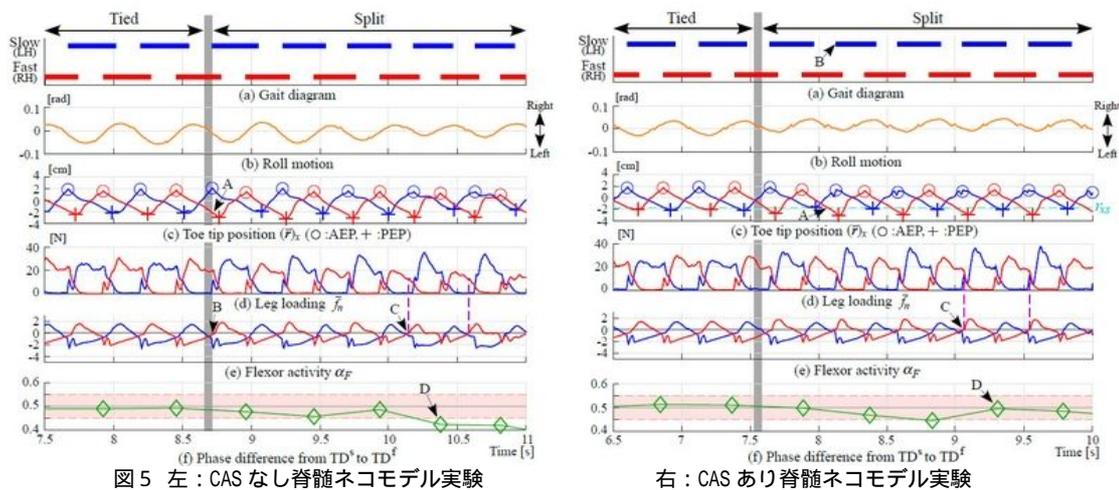


図5 左：CASなし脊髄ネコモデル実験

右：CASあり脊髄ネコモデル実験

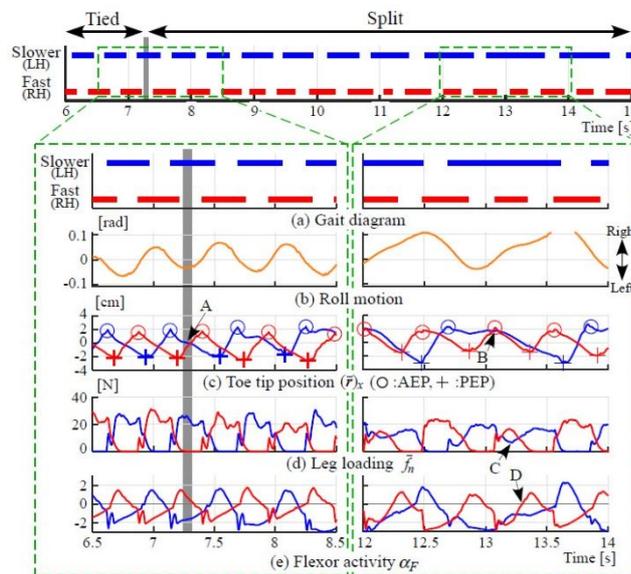


図6 低速スプリットベルト実験

まとめとして、本研究は左右脚間協調に焦点を絞って、そのメカニズムを考察した。結果として、歩容適応では胴体姿勢安定化のために着地タイミング決定が重要であることが分かった。さらに、歩容遷移とは両脚支持期において胴体を含む系全体の力学的安定性を保ちながらどちらの脚が先に離地するかという離地タイミング決定問題に帰着できることが明らかになった。このような知見は、4脚口ポットの感覚情報に基づく自律制御における複雑度の低減に貢献する。

1. Yanagihara, D., Udo, M., Kondo, I., Yoshida, T.: A new learning paradigm: adaptive changes in interlimb coordination during perturbed locomotion in decerebrate cats. *Neurosci. Res.* **18**, 241–244 (1993)
2. Ito, S., Yuasa, H., Luo, Z., Ito, M., Yanagihara, D.: A mathematical model of adaptive behavior in quadruped locomotion. *Biol. Cybern.* **78**, 337–347 (1998)
3. Fujiki, S., Aoi, S., Funato, T., Tomita, N., Senda, K., and Tsuchiya, K.: Adaptation mechanism of interlimb coordination in human splitbelt treadmill walking through learning of foot contact timing: a robotics study. *J. Roy. Soc. Interface* **12**(110), 20150542 (2015).
4. Ekeberg, O., Pearson, K.G.: Computer simulation of stepping in the hind legs of the cat: an examination of mechanisms regulating the stance-to-swing transition. *J. Neurophysiol.* **94**(6), 4256–4268 (2005)
5. Maufroy, C., Kimura, H., Takase, K.: Integration of posture and rhythmic motion controls in

quadrupedal dynamic walking using phase modulations based on leg loading/unloading. *Auton. Robot.* **28**, 331–353 (2010)

6. Maufroy, C., Kimura, H., Nishikawa, T.: Stable dynamic walking of the quadruped “Kotetsu” using phase modulations based on leg loading/unloading against lateral perturbations. In: *Proceedings of ICRA*, pp. 1883–1888. IEEE, Saint Paul (2012)
7. Frigon, A., et al.: Left-right coordination from simple to extreme conditions during split-belt locomotion in the chronic spinal adult cat. *J. Physiol.* **595**(1), 341–361 (2017)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 木村 浩, モフロア クリストフ, 古殿 幸大	4. 巻 8
2. 論文標題 リズムと歩容を自律生成する4脚ロボット制御器 - ネコ・後2脚步行-走行遷移のシミュレーション -	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 掲載可
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 KODONO Kodai, KIMURA Hiroshi	4. 巻 1
2. 論文標題 Evaluation of Gait Generation in Quadrupedal Legged Locomotion with Changing Anterior/Posterior Extreme Positions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Biomimetic and Biohybrid Systems, 11th Int. Conf., Living Machines	6. 最初と最後の頁 157-168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-20470-8_17	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 KODONO Kodai, KIMURA Hiroshi	4. 巻 1
2. 論文標題 Split-Belt Adaptation Model of a Decerebrate Cat Using a Quadruped Robot with Learning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biomimetic and Biohybrid Systems, 9th Int. Conf., Living Machines	6. 最初と最後の頁 217-229
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-64313-3_21	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 古殿幸大, 木村浩	4. 巻 86
2. 論文標題 Treadmill 上を動歩行する四脚ロボットの視覚誘導システムの構築	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 p. 19-00316
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.19-00316	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 木村浩
2. 発表標題 4脚口コモーションのリズムと歩容の生成原理
3. 学会等名 自律分散システム・シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 古殿幸大, 木村浩
2. 発表標題 ネコの歩容遷 移・適応の感覚-運動レベルでの構成論的理解 - 脊髓モデルの検証-
3. 学会等名 自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 古殿幸大, 木村浩
2. 発表標題 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検証-
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 KODONO Kodai, KIMURA Hiroshi
2. 発表標題 Evaluation of a constructive spinal cat model for early adaptation in split-belt locomotion of thalamic cats utilizing a quadruped robot
3. 学会等名 The 10th International Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古殿幸大, 木村浩
2. 発表標題 ノミナルな着地・離地位置の変化に基づいた四脚基本対称歩容生成の構成論的理解
3. 学会等名 自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古殿幸大, 木村浩
2. 発表標題 四脚ロボットを用いた除脳ネコのsplit-belt歩行における歩容適応モデルの提案
3. 学会等名 ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古殿幸大, 木村浩
2. 発表標題 四足ロボットを用いた脊髄ネコモデルの脚負荷遷移に着目した挙動解析
3. 学会等名 JSMEロボティクスメカトロニクス講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>ロコモーション・パターン創発研究の現状と今後の展望  <a href="http://www.robotlocomotion.kit.ac.jp/RSJ-J-2023.html">http://www.robotlocomotion.kit.ac.jp/RSJ-J-2023.html</a></p>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------