

氏 名	こどの こうだい 古殿 幸大
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 1 1 1 8 号
学位授与の日付	令和 6 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学 位 論 文 題 目	4 脚ロボットと環境との相互作用を通じた脚間協調モデルの 提案と検証
審 査 委 員	(主査)教授 射場 大輔 教授 増田 新 教授 澤田 祐一

論文内容の要旨

4 脚ロボットの自律歩容生成は重要な課題の一つである。この課題を達成するため、動物の歩容生成メカニズムを参考に制御器を構築する方法が注目されている。動物は身体と環境との相互作用を通して歩容を生成すると考えられている。このメカニズムを参考に制御器を構築することで、周囲の環境が変化したとき、目標歩容パターンを与えなくてもロボットと環境との相互作用を通して脚の位相を自律的に調整し、適応することが期待される。本研究では脊髄レベル、すなわち、上位中枢指令を仮定せず脚からの感覚情報に基づき脚を動かすメカニズムに焦点を当てている。特に従来の位相情報に基づく脚間ネットワークを組み込まずに脚間協調モデルをどのように構築することで、環境変化に対し 4 脚ロボットが適応できるかについてシミュレーションや実機実験を通して検証している。

本論文は 9 章から構成されている。第 1 章は緒言であり、研究の背景、これまでに行われてきた 4 脚ロボットの歩容生成や適応実験に関する先行研究について説明し、本研究の目的について述べている。

第 2 章ならびに第 3 章では視覚誘導を用いて左右のベルト速度が異なる **split-belt** 上をロボットに歩行させる先行実験について述べている。これまでにヒトを含めた様々な **split-belt** 実験が行われているほか、この実験により、ロボットに定常的な外乱を与えることが可能であることが知られている。ロボットによる **split-belt** 実験を行うため、先行研究では脚制御器の脚間協調機構として対側脚が遊脚相の間は自身の離地動作を妨げる相互抑制ネットワークを導入していた。これにより、各ステップで脚負荷交代が常に行われ、**split-belt** 上でも転倒することなく歩行を継続できることが示されている。他方、相互抑制ネットワークにより **fast-leg** の脚先軌道の最後端がより後方に移動し、脚の過伸展のリスクが高まる等の問題が生じる。この問題を解決するため、相互抑制ネットワークの代わりとして脚間協調機構を新たに提案する必要があると結論付けている。

第 4 章では、新たな脚間協調機構を提案するための生物学的知見として、除脳ネコ実験などの結果を基に提案された脚相遷移モデルに着目し、感覚情報ならびに脚間協調をどのように脚制御器に組み込めばよいか考察を行っている。結果、**split-belt** 適応を実現するうえで、腰伸展や屈曲

情報を離地動作タイミング決定の条件式に組み込むこと、ならびに交差性伸展反射に似た挙動が有効であると推測している。

第 5 章では、4 章で述べた生物学的知見に基づき構築された脚相遷移モデルについて説明し、そのモデルに用いられる屈筋活性度の脚制御器への実装について述べている。このモデルにより、脚間協調機構を新たに加えなくても脚負荷交代を通した脚間協調により、後 2 脚および 4 脚の基本歩容生成が実現できることを簡易歩容計算とシミュレーションにより示している。

第 6 章ならびに第 7 章では、slow-leg ならびに fast-leg に外乱を加えたときの脚制御器による split-belt 適応について論じている。簡易歩容計算、シミュレーション、ならびにロボット実験を通して、Slow-leg の離地動作タイミングを妨げるような外乱に対しては、脚間協調機構を加えなくても脚負荷交代を通した変則的な位相調整により double steps と呼ばれる歩容が生成され、split-belt 適応が可能であることが示された。他方、fast-leg の離地動作タイミングを早めるような外乱に対しては、脚負荷交代がうまく行われなことを示した。また交差性伸展反応 (CAS) を組み込んだ脚間協調機構を提案し、過伸展リスクを抑えながら脚間位相差を適切に保ち、split-belt 適応が可能であることを示した。

第 8 章では、これまで述べた内容を基に以下の考察を行った。身体と環境との相互作用を通し歩容生成する制御器を用いる場合、split-belt に適応するためには脚負荷だけでなく腰伸展や屈曲情報を脚制御器に組み込むこと、ならびに脚負荷交代を通した脚間協調が働き続けるような脚間協調モデルを用いることが有効であると結論付けた。第 9 章は結言であり、本論文のまとめならびに今後の展望に関して述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文では、環境との相互作用が歩容生成の主となる 4 脚ロボット制御器に着目し、外乱に適応するための脚間協調モデルの提案と検証について述べられている。外乱を与える実験として、ヒトや動物の左右脚間協調を調べるために用いられる、左右ベルト速度が異なる split-belt 実験に焦点を当てている。環境との相互作用を通し上位中枢指令なしで適応した事例として脊髄ネコを用いた後 2 脚 split-belt 実験において、片方のベルト速度を上昇させたときと低下させたときで異なる歩容が生成されることに着目し、それぞれの適応においてどのような脚間協調モデルが有効となるか提案し、4 脚ロボットを用いた検証を行っている。

まず、本研究では陽に脚間協調機構を組み込まなくても左右の脚間位相差が逆位相に保たれる「非明示的脚間協調モデル」に着目している。これは、脚負荷情報を基に各脚の脚相遷移タイミングを決定することで、脚負荷交代を通し脚間協調が非明示的に働くモデルである。この非明示的脚間協調モデルにより、陽に脚間協調機構を組み込まなくても、脊髄ネコで見られるベルト速度低下に伴い左右のステップ数が 1:2 の関係となるような split-belt 適応を実現できることを、シミュレーションならびにロボット実験を通して示した。他方、ベルト速度を上昇させる split-belt においては、この非明示的脚間協調モデルでは適応に不十分である。そのため、本研究で提案するような、脚がベルトにより大きく後方に引っ張られたときに対側脚の接地を早め、脚負荷交代を行いやすくする交差性伸展反応 (CAS) を組み込んだ脚間協調機構が必要となることを示した。

また、この脚間協調機構は後 2 脚だけでなく 4 脚での split-belt 実験においても、その有効性が確認されている。

従来の split-belt 適応を説明するための、神経生理学的知見に基づいた脚間協調モデルでは、左右脚が同時に遊脚相となることを防ぐ強い脚間協調機構が組み込まれている。他方、本研究で得られた結果は環境との相互作用を考慮することで、先行研究のような強い相互抑制を組み込まなくても split-belt に適応できることを意味する。このように本研究は、split-belt 適応を説明する神経生理学知見に基づく従来研究のモデル以外でも、環境との相互作用という新たな視点で split-belt 適応が実現できることを示しており、工学的にも非常に価値のある研究である。

本論文に関して以下に示す学術論文 4 編が公表されており、内 3 編の筆頭著者が申請者である。
査読付き論文

- (1) 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, 古殿幸大, 木村浩, 日本機械学会論文集, 86 巻 (882 号), p.19-00316, 2020.
- (2) Split-belt Adaptation Model of a Decerebrate Cat Using a Quadruped Robot with Learning, Kodono Kodai and Kimura Hiroshi, Biomimetic and Biohybrid Systems: 9th International Conference, Living Machines 2020, Freiburg, Germany, July 28-30, Proceedings (LNAI 12413), pp. 217-229, 2020.
- (3) Evaluation of Gait Generation in Quadrupedal Legged Locomotion with Changing Anterior/Posterior Extreme Positions, Kodono Kodai and Kimura Hiroshi, Biomimetic and Biohybrid Systems: 11th International Conference, Living Machines 2022, Virtual Event, July 19-22, 2022, Proceedings (LNAI 13548), pp. 157-168, 2022.
- (4) 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 脚歩行・走行遷移のシミュレーション—, 木村浩, Maufroy Christophe, 古殿幸大, 日本ロボット学会誌, 採録可。

なお、次の論文は査読中であり、第 7 章の基礎となっている。

- (5) 脚負荷パターン変化に基づき位相調整する脚制御器の適応能力向上のための脚間協調機構の提案 (4 脚ロボットを用いた後 2 脚 split-belt treadmill 上歩行実験), 古殿幸大, 日本機械学会論文集, 査読中。