



Title	On Brainless-Robot Approach to Emergence of Motor Patterns
Author(s)	増田, 容一
Citation	大阪大学, 2019, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/72385
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (増 田 容 一)

論文題名

On Brainless-Robot Approach to Emergence of Motor Patterns
(運動パターン発現への無脳ロボットアプローチ)

論文内容の要旨

Despite the many results suggesting the universal principle in which animals select some gaits consistent with their own body and the surrounding environment, underlying mechanisms for generating the motor patterns in nature animals are still enigmatic. Motor patterns of animals are, in general, produced as a result of interaction between the brain--nerve, body, and uncertain environment. Although this interaction is quite complicated to clarify, it is challenging to identify which factor is crucial in gait generation and transition. In quest of this issue "what is the source of motor patterns?", this thesis proposes two distinct approaches based on robotics and physiology.

This thesis is composed of two parts. In Part I, we develop a quadruped robot that provides a clue to the issue: a sufficient condition for generating the animal gaits. The major contribution of this part is discovery of a new phenomenon in which an extremely simple robot exhibits various animal gaits and adaptive transition. Among them, although the robot has no sensor, microprocessor or explicit controller, the robot changes their gait from walk to gallop according to the input voltages. Moreover, the different types of brainless robots (snake and earthworm-like) generate various animal motions that suit their own body dynamics and the environments. The key of the adaptivity is an electrical passivity of low-torque DC motors which rotate each limb of the robot. When disturbance force is applied from the ground surface to the foot, load torque is applied to the motor shaft, and the torque affects the rotational speed of the motor through the electrical passivity. In the robot design, instead of considering this delay as disturbance, we exploit this external torque as a control law to adjust the phase differences between the limbs. In other words, the low-torque DC motor is a physical device that has functions of sensor, microprocessor, and actuator.

To evaluate this control strategy, we conduct some walking experiments and show that the robot exhibits the animal gaits and adaptive transition (walk to gallop) according to the input voltages. Moreover, to further investigate this characteristics of the low-torque motor, we conduct some experiments, simulations, and theoretical analysis for two fundamental systems. The experiments and simulations show a key feature that the electrical passivity of the motors generates resonant modes of the system. In Part II, we construct a physiological model showing that the interaction among the local controllers in animal muscles plays an important role for generating motor patterns. The major contribution of this part is to suggest that the fundamental basis of animal motor patterns is found in the body dynamics, and the simple reflex controllers play a role to adjust the waveforms of the body motions. This model utilizes a primitive local control in animals, called the stretch reflex, and it is based on the analytical results of the brainless walking, which is introduced in Part I. To construct the physiological model, we extract a dominant dynamics from the brainless walking in two steps. First, we construct a model based on a dominant dynamics of the brainless walking, called the DFFB (Direct Force Feedback) model. To verify this model, we show some simulations for a spring-mass system and a planar quadruped model. The DFFB model provides almost the same time response and resonant modes as the low-torque DC motor model.

Second, we focus on the other aspect of the DFFB model. The DFFB model can be considered as a rough model of the stretch reflex strategy of actual animals. When an animal muscle receives a force from the body or environment, the stretch reflex functions to maintain its current muscle length. As with the stretch reflex, the DFFB model maintains the current length of the linear actuator by decreasing the oscillation speed when the module detects the reaction force. Based on this analogy, we modify the DFFB model using the physiological knowledge, and as a result, we construct a physiological model that explain a function of the reflex chains. In the simulations, the reflex model automatically generates resonant modes without any explicit neural connection between the models. Moreover, the model adjusts these motor patterns adaptively to changes in the parameters of the body structure. From these results, we conclude that a source of pattern formation is in the body dynamics, because the physical interaction between the local stretch reflex controllers has a function to adjust the waveform of the body motion.

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (増 田 容 一)			
論文審査担当者	(職)	氏 名	
	主 査	教授	石川 将人
	副 査	教授	金子 真
	副 査	教授	大須賀 公一
	副 査	教授	細田 耕 (大学院基礎工学研究科システム創成専攻)

論文審査の結果の要旨

動物が周囲環境と力学的に調和した歩容パターンを発現するメカニズムは、多くの先行研究で取り組まれている課題である。動物の運動パターンは脳神経系、筋骨格系などの身体、不確定な環境の相互作用の結果として生じるが、その構成要素および相互作用は複雑であり、どの要素が歩容の生成および遷移において重要であるかを特定することは依然として難しい。本論文では、この「生物の運動パターンの源泉はなにか」という問題に対し、ロボティクスと生理学の知見に基づく二つのアプローチを示している。

第一部では、脚動物が歩容を生成するための条件を求めるために開発した四脚歩行ロボットについて論じている。ここでの主な貢献は、非常に単純なロボットが動物の歩行およびその適応的な遷移を達成するという新たな歩行現象を発見したことである。本ロボットはセンサ・マイクロプロセッサ・陽なコントローラを持たないにもかかわらず、入力電圧に応じて歩容を切り替えることができる。この適応性の主要因は、ロボットの各脚を回転させる低トルク DC モータの電氣的受動性にある。環境から脚に加わった外力は負荷トルクとしてモータ軸に伝えられ、電機子の特性を通してモータの回転速度に影響を与える。この負荷トルクによる位相の遅れを外乱とはみなさず、脚間の位相差を調整する制御則として活用するところに本ロボットの特徴がある。ロボットを用いた歩行実験により、入力電圧に応じて動物の歩容とその適応的な遷移 (walk から gallop へ) が達成されることを示したほか、低トルクモータの特徴を解析するために二つの基礎的なシステム (バネマス系と鉛直面内の脚運動モデル) の実験・シミュレーション・理論解析を行っている。この実験ではモータの電氣的受動性が系の共振モードを生成するという重要な性質が示されており、シミュレーションではモータのパラメータや初期状態など、パラメータ変動に対するロバスト性が調べられている。また理論解析の結果は低トルク DC モータのダイナミクスが系のエネルギーを減少させることを示唆している。

第二部では、生理学に基づくモデルを用いて、動物の筋肉に内在する局所制御則間の相互作用による運動パターンの生成について調べている。ここでの主な貢献は、身体に内在する特性である単純な伸張反射則が身体の運動パターンを整形する役割を果たしうると示したことである。その際、本論文ではまず第一部の結果と生理学に基づくモデルとを段階的に関連付けている。まず無脳歩行現象の支配ダイナミクスから DFFB (Direct Force Feedback) と呼ばれるモデルを導き、これが実生物に備わる伸長反射制御の粗視モデルとして捉えられることを示している。続いて筋特性の知見を用いて DFFB モデルを修正することで生理学的モデルを構築した。シミュレーションでは、反射モデル間の陽な神経接続を用いることなく自律的に共振モードを生成すること、また身体のパラメータの変化に適応してこれらの運動パターンを調節することを示している。

以上のように本論文は、動物の運動パターン発現について簡潔な構成要素で説明するモデルを提示し、ロボティクス・生理学の両面から、また理論・実験の両面から解析を行った学術的に意義深い論文であり、博士論文として価値あるものと認める。