



Title	Study on Musculoskeletal Humanoid Robots With Anatomy Trains
Author(s)	西井, 尋紀
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/101644
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 (西井 尋紀)	
論文題名	Study on Musculoskeletal Humanoid Robots With Anatomy Trains (Anatomy Trainを有する筋骨格ヒト型ロボットに関する研究)
論文内容の要旨	
<p>How do humans control their complex musculoskeletal systems to generate various movements, including walking? Of course, the advanced processing of the brain contributes to the control of the human musculoskeletal system. However, in addition to this, other mechanisms are considered to contribute to simplifying its control. Various types of such mechanisms exist, which can be broadly classified into three categories: the reduced inputs, anatomy trains (ATs), and the external force environments. The human musculoskeletal system is expected to generate diverse movements with simple control by utilizing all three of these mechanisms.</p> <p>However, the design principle of the human musculoskeletal system enabling such control ability still needs to be clarified. I assume that musculoskeletal humanoid models, such as physical and mathematical models, are practical tools for understanding the design principle of the human musculoskeletal system. This is because humanoid models belong to the same inertia-dominated environment as humans and possess similar skeletal degrees of freedom; therefore, their design principle is assumed to apply to humans, even if the material properties of the bodies differ.</p> <p>In this study, as an initial attempt, I design physical and mathematical models that incorporate the three mechanisms and achieve quasi-passive walking with simple control. Additionally, I propose qualitative design guidelines for the models through experiments using the physical model and simulations using the mathematical model. By referring to both the physical and mathematical models proposed in this study and accumulating knowledge through their interaction, it is expected that the underlying design principle of the human musculoskeletal system can be mathematically clarified in the future, offering significant potential for related academic fields and medical applications. This dissertation is composed of five chapters and the outline of each chapter is as follows.</p> <p>In Chapter 1, as the introduction to this study, I explain the background and purpose of this study.</p> <p>In Chapter 2, I describe the design of the humanoid physical model "PEARL II." PEARL II has three types of ATs, including the superficial back line (SBL), but has no actuators. In Chapter 2, prior to walking, I experimentally demonstrate that PEARL II can passively maintain standing postures and withstand minor external disturbances. Based on this result, I explain that in behaviors with minimal posture changes, such as standing, the disadvantages of full-body mechanical constraints imposed by ATs are not problematic.</p> <p>In Chapter 3, I describe the design of the humanoid physical model "PEARL III." PEARL III has the superficial back line (SBL) on the dorsal side and monoarticular and biarticular muscles on the ventral side. Here, the areas corresponding to the hamstring of the SBL and the rectus femoris are McKibben-type pneumatic actuators. In this chapter, I discuss how the three mechanisms of reduced inputs, ATs, and the external force environment are all utilized to achieve quasi-passive walking in PEARL III, as well as the design policy for the model.</p> <p>In Chapter 4, I describe the design of the mathematical model of PEARL III. I also demonstrate that through numerical parameter exploration, the step count can be improved under the specific combinations of the values of two design parameters, the spring constant and the contraction timing of the whole-body line. Furthermore, based on the simulation results, I discuss the relationship between these parameters and the step count, and propose a tuning method for the SBL to enhance the step count in the physical model of PEARL III.</p> <p>In Chapter 5, the last chapter, I summarize this study and discuss the insights suggested by the results of this study, as well as future perspectives.</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名	(西井尋紀)
	(職)		氏名
論文審査担当者	主査	教授	大須賀公一
	副査	教授	石川将人
	副査	教授	東森充

論文審査の結果の要旨

本学位論文は、ヒトの複雑な筋骨格系の運動制御を簡単化するための身体設計原理の数理的解明を究極的な目標とし、その基礎として、物理モデルおよび数理モデルの設計ならびに歩行制御簡単化メカニズムの検討を行ったものである。本論文では、縮約入力・Anatomy Train (AT)・外力環境の3つの工夫に注目し、これらを相補的に組み合わせて活用することにより、ヒトはシンプルな制御で多様な運動を生成できるという新たな可能性を提唱している。

第2章では、ヒトの身体の物理モデル「PEARL II」の設計について述べている。PEARL IIは、Superficial Back Line (SBL) を含む3種類のATを有するが、アクチュエータは実装されていない。本章では、歩行に先立ち、PEARL IIが受動的に立位姿勢を維持し、微小外乱に耐えられることを実験的に示している。また、実験結果に基づき、立位維持のように姿勢の変化が極めて少ない運動においては、ATが全身の運動自由度を拘束することが運動の妨げにならないことを議論している。

第3章では、ヒトの身体の物理モデル「PEARL III」の設計について述べている。PEARL IIIは、背側にSBLを、腹側に単関節および二関節筋を実装しており、とりわけSBLのHamstringおよび二関節筋のRectus Femoris (RF)に相当する部位には、McKibben型空気圧アクチュエータが用いられている。本章では、制御器が主に着地や離地の瞬間に合わせて左右のSBLとRFをON/OFF的に収縮・弛緩させるだけで、PEARL IIIが傾斜面上で2次元準受動歩行を達成できることを実験的に示している。また、実験結果に基づき、外力環境を活かした受動歩行中において、収縮状態のSBLとRFが全身の運動自由度を拘束することにより、立脚期での全身の姿勢制御と体重支持が達成されることや、弛緩状態のSBLとRFが全身の運動自由度の拘束を解くことにより、遊脚期での慣性や重力に任せた受動的な地上高の確保が妨げられないことを議論している。さらに、SBLがこのような機能を発揮するためには、SBLの経路を骨格(リンク系)に沿うよう拘束するガイド機構や、RFを始めとする拮抗筋を導入する必要があるという設計指針も提案している。

第4章では、PEARL IIIの数理モデルの構築について述べている。SBLはMain LineとBranch Lineの2種類の引張材から成り、Branch Lineが張るか弛むかによってSBL全体の発揮力が異なるため、数理モデルの構築は難解であると言える。しかし、本論文では、SBLの発揮力を歩行中に起こりうるものに限定した上で場合分けすることにより、数理モデルの構築に成功している。また、Main Lineのばね定数kおよび収縮タイミング α という、SBLの動特性を決定する2つの設計パラメータの値を数値的に探索することを通して、歩数を増加させるkと α の値の組み合わせが右上がりに分布することを明らかにするとともに、体勢の崩れ方とそれまでの歩数に基づいた歩数向上のためのkと α の値のチューニング法を提案している。さらに、探索した中で最大歩数となったkと α の値の組み合わせでのシミュレーション結果を第3章の歩行実験結果と比較することを通して、数理モデルがPEARL IIIの準受動歩行の本質的な特徴を定性的に再現することを確認している。

以上のように、本論文は、縮約入力・AT・外力環境の3つの工夫がヒトの複雑な筋骨格系の歩行制御を簡単化できることを実験とシミュレーション双方から示唆するとともに、ATの幾何特性を可能な限り保持した数理モデルを構築し、さらに歩数向上のためのATの設計指針についても提案している。これらの成果は、ATがヒトの歩行に与える本質的な影響を今後理論的に解析していくための重要な基盤を形成するものである。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。