

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	人型ロボットの運動生成のためのモデル構築と解析
Title(English)	Modelling and Analysis for Humanoid Motion Generation
著者(和文)	大西祐輝
Author(English)	Yuki Onishi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12848号, 授与年月日:2024年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:三平 満司,倉林 大輔,中尾 裕也,山北 昌毅,石崎 孝幸
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12848号, Conferred date:2024/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	システム制御 システム制御	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	大西 祐輝		審査員主査： Chief Examiner	三平 満司 教授

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は、物理モデルおよび計算モデルの構築と解析を基軸として、人型ロボットの運動生成に取り組み、各章の概要は以下の通りである。

第1章「序論」では、本論文の研究背景、研究目的、および論文構成を述べる。人型ロボットの開発史を概観した後、人型ロボットを研究開発することの社会的および科学的意義について論ずる。そして、人型ロボットの運動生成における理論的・技術的課題を述べ、本論文の目的と構成を示す。

第2章「鉛直運動を許容する重心・ZMPモデルの解析と安定化制御への応用」では、ロボットの重心の3次元的な運動を統一的な方法で記述可能な線形モデルについて解析し、安定化制御への応用を図る。まず初めに、人型ロボットをマクロな視点で一つの剛体とみなし、先行研究に倣って剛体の運動方程式から重心・ZMPモデルを導出する。このモデルでは、重心まわりの角運動量変化が十分に小さいという仮定のもとで、環境からロボットの重心にはたらく外力を、ゼロモーメントポイント(ZMP)と呼ばれる空間上の一点の位置として表現する。続いて、重心の鉛直運動を表現するために、ZMPが3次元的に動く理論を参照する。この理論を適用した重心・ZMPモデルに対して、新たな物理的解釈を与える。そして、重心の3次元加速度を表す仮想的な反発点の存在や、パラメータ不変性といった、このモデルに付随する性質を明らかにする。さらに、3次元的に動くZMPと力覚センサ等によって計測されるZMPとの対応や、既存のZMPを地面上に拘束する理論体系との現象表現における等価性を示し、既存のモデルと注目するモデルが矛盾しないことを明らかにする。最後に、線形制御理論に基づいて、このモデルを用いた、人型ロボットの立位におけるバランス維持のための制御器の設計と実装の方法について論ずる。提案した制御器の有効性と実装可能性は、数値シミュレーションによって確認する。

第3章「時間軸変換を用いた幾何学的運動系列からの二足歩行運動生成」では、ロボットに与えられた幾何学的な要求と、ロボットが持つ物理的な拘束を結びつけ、動力学的整合性を担保するための手法を提案する。提案手法は、事前に幾何学的な運動系列を作成し、その運動系列に対して、物理法則を満たすような最適化計算を行うことで、ロボットによる二足歩行を実現する。幾何学的運動系列は、接地条件やロボットの姿勢といった、位置の次元のみで記述可能な幾何学的条件から設計される。この幾何学的運動系列を実行可能な運動に変換するために、システムの時間軸変換と呼ばれる、状態方程式の時間軸を伸縮する理論を応用する。システムの時間軸変換は、ロボットを支配する重心運動の状態方程式を、時間に関する微分方程式から、空間座標に関する微分方程式へと書き換える。この変換を離散化することで、幾何学的運動系列と状態方程式の紐付けが可能になる。幾何学的運動系列と空間発展の離散化モデルを用いて有限時間最適制御問題を定式化し、微分動的計画法によって解くことにより、動力学的な整合性のあるロボットの二足歩行運動を得る。最後に、提案手法によって得られた運動をシミュレータ上でロボットに追従させることで、動的な二足歩行を実現する。

第4章「有限状態機械の動的結合による複数独立タスクの即応的調停」では、ロボット自身や環境の状態をもとに、複数の有限状態機械を結合することで、多腕を持つロボットの全身運動をオンラインで生成する計算モデルを提案する。多腕を有するロボットでは、右手や左手のような複数の効果器のそれぞれに対して、タスクを与え、同時に実行させることが可能である。しかしながら、全身の運動を単一の離散状態で表現しようとする、各効果器の離散状態の組み合わせの数だけ全身の離散状態が生じ、その全てを単一の有限状態機械内で列挙するのは現実的ではない。そこで、複数のタスクの並列実行を実現するために、効果器毎に定義された複数の状態機械から、全身の有限状態機械を自動的に構築する枠組みを構築する。各効果器のタスクを自動的に階層化・並列化することにより、大規模な有限状態機械の設計コストが緩和される。提案手法においては、各タスクに優先度が割り振られている。優先度付き逆運動学のアルゴリズムによって、各効果器間のタスクを非干渉化することにより、並列実行におけるタスクの競合は回避される。その結果、実行可能なものは適宜実行するという柔軟な意思決定を導き、ある特定の効果器のタスクが妨害された場合であっても、ロボットの全身スタックを防ぐことが可能となる。動く障害物が存在する環境を模

擬したシミュレーション環境上で、双腕を有するロボットが、実行可能なタスクから順に取り組む動作を実現し、提案手法の有効性を確認する。

第5章「結論」では、本論文の内容をまとめる。そして、今後の展開について議論する。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	システム制御 システム制御	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	大西 祐輝		審査員主査： Chief Examiner	三平 満司 教授	

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This dissertation studies humanoid motion generation via modelling and analysis of robot dynamics and decision mechanisms.

First, we analyse an exact linear model that can describe arbitrary 3-dimensional motions of the centre of mass of a humanoid robot. In this model, a zero moment point (ZMP) moves 3-dimensionally to encode the total external force applied to the robot. To understand this model, we mathematically reveal some properties and compatibilities of the ZMP with preceding studies while adding new physical interpretations. Furthermore, we propose a robust controller for biped balance by utilising the properties of the model.

Second, we develop a scheme to realise dynamic robotic motion. The developed scheme consists of two procedures: design of kinematic motion series satisfying geometrical requirements and resolution of dynamical consistency through numerical trajectory optimisation. The time-scaling technique plays a key role in combining these two procedures. It transforms a robot dynamics model, represented by a differential equation with respect to the time, into a spatial differential equation. This transformation enables us to consider the dynamics in spatial domains. Finally, we demonstrate the generation of bipedal walking trajectories with extended knees and large steps in simulation.

Third, we propose a decision model that synthesises multiple finite state machines (FSMs) online to realise the parallel task execution of a multi-arm robot. The proposed model allows us to design each FSM by focusing only on a specific effector. Then an inverse kinematics-based method arbitrates all FSMs with kinetic prioritisation. The kinetic prioritisation and online synthesis framework automatically yield hierarchy and parallelism of independent task execution and prevent multi-arm robots from getting stuck. Simulation using a dual-arm upper-body humanoid shows the effectiveness in environments in which an obstacle moves dynamically.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).