

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02124

研究課題名（和文）空間量子化ダイナミクスとリーマン計量に基づくロボットの実時間軌道生成

研究課題名（英文）Real-time motion generation based on Spatially Quantized Dynamics and Riemannian metric

研究代表者

梶田 秀司 (Kajita, Shuuji)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：90356767

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：従来、直進歩行に限定されていた空間量子化ダイナミクスを任意の曲線に沿った歩行を実現できるように理論を拡張し、膝を伸ばした大腿での曲線上の2足歩行を動力学シミュレータ上で実現した。ロボット運動学のリーマン多様体上での定式化を図り、冗長マニピュレータの逆運動学に関する新たな知見を得たほか、動的な障害物がある環境における、即応的な意思決定・運動生成についての研究を行った。研究用ロボットとして、構造部品を3Dプリンタで制作した12自由度の2足歩行ロボット、切削部品を活用した高い可搬重量をもつ脚機構および、人型ロボットの上半身として全15自由度の双腕マニピュレータの設計・開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、複雑な環境においてロボットが動力的制約と運動学的（幾何学的）制約を満たしつつ、タスクを完遂するための理論を確立するとともに、それを実験で示すことを目指した。本研究の成果として、膝を伸ばしつつ大腿で2足歩行を行える制御技術、人の腕のような冗長なマニピュレータの制御に関する新たな知見等が得られた。これらの知見は近い将来、人間の居住空間において人と同程度の速度と信頼性をもって移動し作業を行うロボットを実現するために有用なものである。さらに、本研究で試みた安価で使い勝手のよいロボットプラットフォーム構築についての知見は、今後のロボット研究の加速に寄与できると考える。

研究成果の概要（英文）：We advanced the Spatially Quantized Dynamics (SQD) theory to accommodate any given curve, enabling the simulation of bipedal walking with long strides and straight knees on curved paths; an enhancement from its initial straight path limitation. Our exploration of robot kinematics using Riemannian manifold led to fresh understanding in redundant manipulator inverse kinematics. We also explored real-time decision-making and motion generation in the presence of dynamic obstacles.

As a basis for our research, we engineered a 12-degree of freedom (DOF) biped robot with 3D printed parts. Moreover, a high payload leg structure and a 15 DOF dual-arm robot were also created, serving as modules for a humanoid robot platform.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ヒューマノイドロボット 2足歩行ロボット 制御理論

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人間の居住空間を人と同程度の速度と信頼性を持って移動できるロボットの実現はロボット工学に課せられた長年の課題である。しかし現状のロボット技術はドア通過一つをとっても人間に遠く及ばない。例えば、2015年に米国で開催された DARPA ロボティクスチャレンジ決勝戦において、ドア通過は重要なタスクの一つであったが、多くのロボットがこれに失敗した。本研究の提案者である梶田、阪口、金子もヒューマノイドロボット HRP-2 改を用いてこれにチャレンジしたが、初日にはドアレバーの把持中にシステムが暴走し転倒、二日目には成功したもののドア通過動作は環境の不確実性に脆弱で、慎重な操作が要求されたため、ドアレバー把持から通過完了までに5分以上の時間を要した。

一方、人間であれば10秒でドアを確実に通過でき、ロボットによる実行速度との差は30倍にも達する。ここから2つの学術的問いが浮かぶ。

- ・なぜ現状のロボットは人間のように素早く確実にドアを通過できないのか？
- ・なぜ人間のように多様なドアに対応できないのか？

本研究ではこの問いに応えるべく、理論と実験の二つの側面からのアプローチを試みた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ドア通過に代表される複雑な環境でのタスク実行において、ロボットが動力学的制約と運動学的(幾何学的)制約を満たしつつ、タスクを完遂するための理論を確立するとともに、それを実験で示すことにある。

その対象として、汎用性の高い2足歩行のヒューマノイドロボットを取り上げ、歩行のような動力学的な制約と、環境との幾何学的な制約を満足する制御手法を構築し、人間並みの速度と信頼性で多様なドアを通過の実現を目標とした。この例題を通じて、複雑な環境で動力学的制約と幾何学的制約を同時に満たす普遍的な制御原理を解明することによって、梯子の昇降や各種産業用ロボットなどへの応用も期待できる。

3. 研究の方法

(1) 本研究の理論面では、「空間量子化ダイナミクス」と「リーマン多様体上での制御理論」という2つの柱をベースにして研究を進めた。

「空間量子化ダイナミクス」は研究代表者らが2017年に提案した手法である。通常の制御手法がロボットの関節軌道を時間関数として扱うのに対し、この手法では代表的な空間軸(歩行であれば進行軸)の関数として表現した関節軌道を一定の空間間隔で離散化して制御則を構築する。これにより、従来難しかった膝を伸ばした大股の2足歩行や、大きな段差の階段昇降などを容易に実現することができる。

「リーマン多様体上での制御理論」はロボットの瞬間的な運動生成と制御をリーマン幾何学的な量に基づいて計算することによって、従来のポテンシャル法の問題であった多関節機構特有の収束性の悪さを改善し、複雑な環境下で高速でロバストな運動生成を可能とする技術として、近年注目されているものである。

本研究では「空間量子化ダイナミクス」を「リーマン計量による実時間軌道生成」によって拡張することにより、人間並みの速度と信頼性で多様なドアを通過可能とする制御理論の確立を目指した。

(2) 本研究の実験面では、上記の理論を適用し、さまざまなドア通過実験を行うため新たなヒューマノイドロボットの開発を目指した。研究代表者らは、研究用に数種類の成人サイズのヒューマノイドロボットを用いてきたが、運用が容易ではなく、また多発する故障により実験を妨げることが多かった。そこで、本研究の目標に合致し、学術研究に適した研究プラットフォームとして子供サイズのヒューマノイドロボットを構想した。その実現に向けて、中部大学、東京工業大学、および産業技術総合研究所で技術情報を交換しながら、中部大学と東京工業大学においてそれぞれ独立して機体の設計開発を進めた。

4. 研究成果

(1) 時空間座標変換による空間的な運動方程式の表現

空間量子化ダイナミクスをより汎用的に利用可能にするため、一般的な形での連続時間上での定式化を行った。その結果、提案時の空間量子化ダイナミクスが、制御理論のテクニックの1つである時間軸変換によって説明できることが明らかとなった。さらに、Frenet-Serretの標構と呼ばれる座標系に従った非線形な座標変換を付加することによって、3次元ユークリッド空間上のある経路(滑らかな曲線)に沿った時間軸の変換が可能となった。

(2) 曲線に沿った空間量子化ダイナミクス

上述の定式化を起点として、参照経路の幾何情報を用いた離散化手法を構築した。ここでは、連続時間・連続空間上で導入した座標を、参照経路に沿って空間的に離散化し、参照経路に直交

する（超）平面間の遷移を調べることで、遷移に必要な時間が算出できる（図1）。

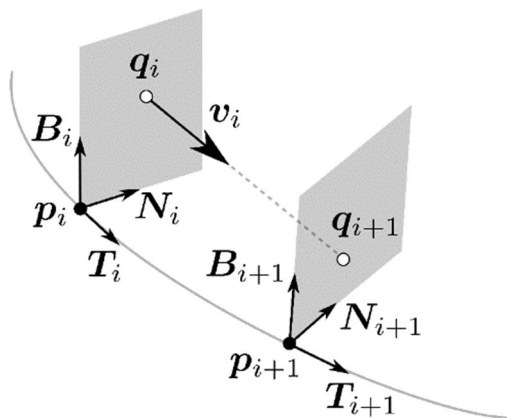


図1 曲線与えられた参照経路に沿った離散化

この手法は、研究開始前に得られていた直線に沿った空間量子化ダイナミクスを包含する一般的なクラスとなっている。一般化された離散化手法によって運動方程式を離散化することで、あらゆる滑らかな経路にそった空間量子化ダイナミクスを得られる。この手法を最適化アルゴリズムである微分動的計画法(DDP)と組み合わせ、2足歩行ロボットの動力的に安定な歩容の生成を可能とした。

生成された歩行パターンに基づく曲線上の歩行を動力学シミュレータ上で実現するため、直線歩行に限定されていた安定化制御アルゴリズムを、曲線歩行に拡張した安定化制御器を開発した。これにより動力学シミュレータ Choreonoid 上でヒューマノイドロボット HRP-2 改のモデルを用いて膝を完全に進展した一歩 50 cm の大股な曲線歩行が行えることを確認した（図2）。

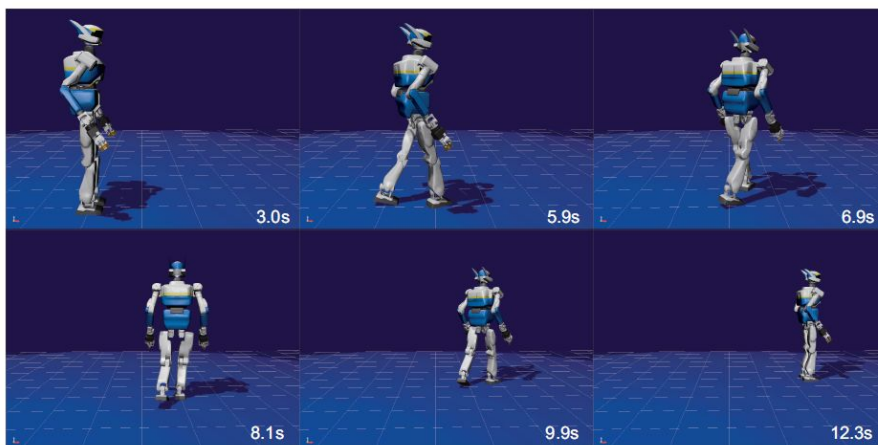


図2 膝を伸ばした大股な曲線軌道上の2足歩行（動力学シミュレーション）

(3) リーマン多様体上での運動学解析

多関節ロボットを対象として、ロボットの運動学のリーマン多様体上での定式化を図った。位相構造や等長性といった数学的な性質を陽に考慮することにより、これまで経験的・発見的に知られてきた式変形や、運動学と動力学の関連性に対して更なる説明可能性を付与した。特に、冗長なマニピュレータの逆運動学に注目すると、リーマン計量（一般化された距離の尺度）によって定まる等長性を満たす擬逆行列が一意に存在し、それが特異点近傍を除いて解析的に導出できることを示した。そして、優先度付き逆運動学においても、リーマン計量を加味しなければ、従来のアルゴリズムでは厳密な最適解に収束しない場合があることを明らかにした。

(4) 実時間運動生成のための意思決定機構

実時間運動生成のために必要な意思決定機構の研究を行った。動的な優先度を持つデータ構造（キュー）を導入し、優先度付き逆運動学のアルゴリズムに組み込むことにより、動的な障害物がある環境においても、即応的な意思決定・運動生成を実現した。さらにこの手法を応用して、分散的に設計された有限状態機械を優先度に基づいて調停することにより、双腕ロボットの全身の意思決定を行う有限状態機械を動的に構築する枠組みを提案した。優先度を記述する関数の設計にはある種のヒューリスティクスが求められるため、設計手法の確立が今後の課題となる。

(5) 研究用ロボットの開発（中部大学）

中部大学におけるロボット開発では、構造部品を 3D プリンタで制作し、市販アクチュエータ（ROBOTIS 社製 Dynamixel）とオープンソースソフトウェア（ROBOTIS Framework）を用いてシステムを構築するものとした。

はじめに簡略版のヒューノイドのモデルを設計し、Choreonoid 上でドア通過能力の評価を行った（図 5）。

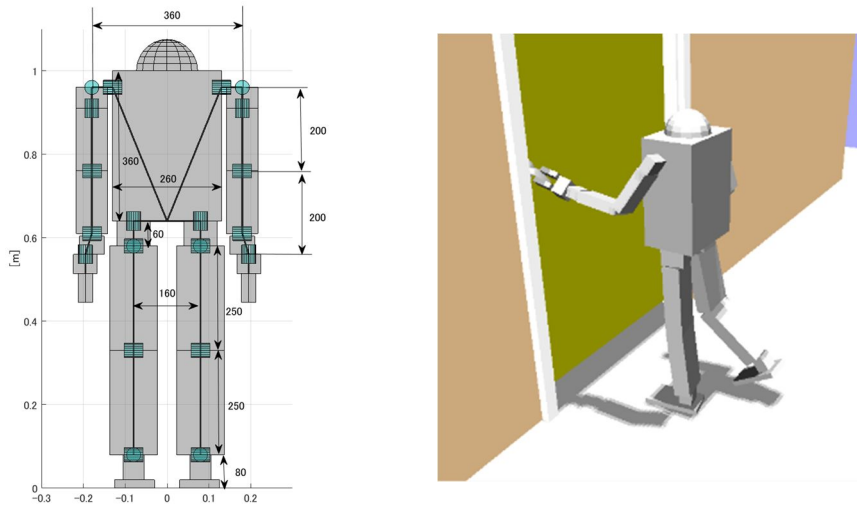


図 5 簡略版ヒューノイドロボットモデルとドア開け動作

簡略版モデルを出発点として、下半身部分を構成する「脚モジュール」について詳細な設計を進め、3D プリンタによりリンクを制作した。脚モジュールの主要な関節は、十分なトルクを確保するためにアクチュエータ 2 つを用いたダブル駆動とし、股関節、膝関節、足首関節はフルスクワットが可能な可動範囲を持つ。完成した脚モジュールは、スクワット動作などの基本的な動作が行えることを確認した（図 6）。

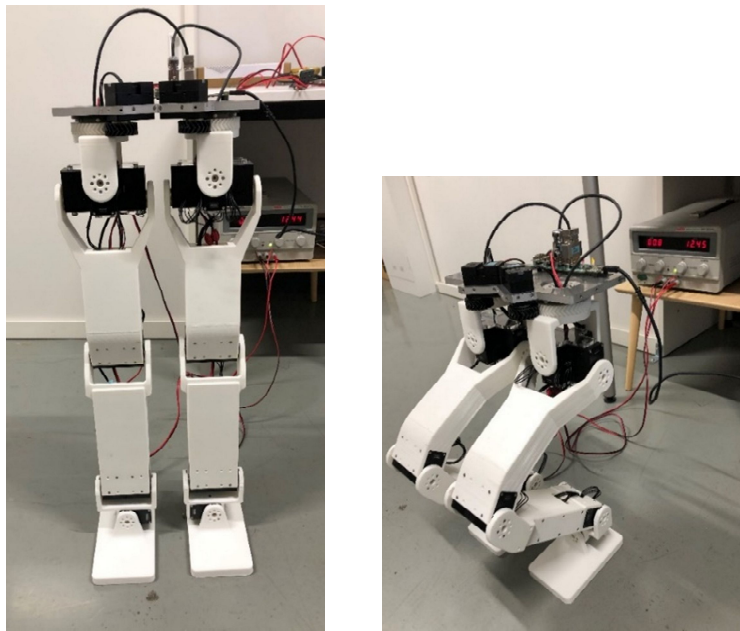


図 6 中部大学で開発した 12 自由度脚モジュールとスクワット動作

(6) 研究用ロボットの開発（東京工業大学）

東京工業大学においては、切削部品も活用し、長時間運用のためのバッテリーの搭載が可能な可搬重量を仕様とした。まず、任意モジュールと歯数をもつヘリカル歯車を製造する技術確立した。Autodesk 社の 3D CAD である Fusion 360 および Inventor 上でそれぞれデータを生成することができるようになった。そして、動力伝達機構や差動機構に関する調査、試作および評価を実施した。これらを踏まえて、脚機構（膝～足首）を試作した（図 7）。

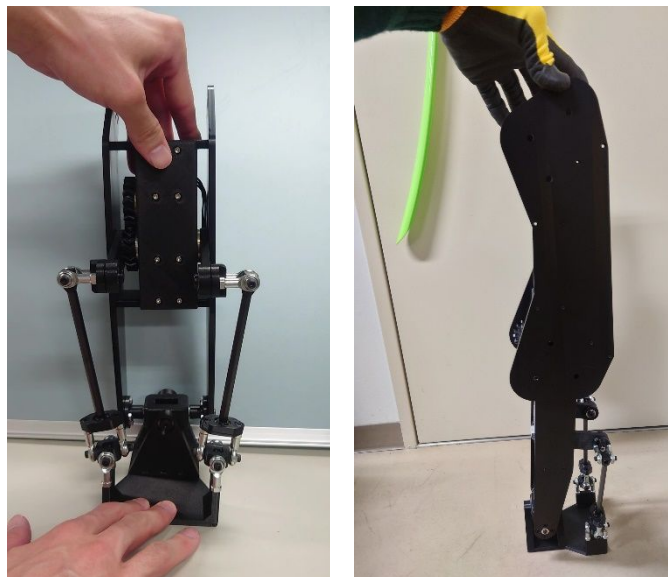


図7 東京工業大学で試作した脚機構

また、各腕7自由度、胸部1自由度を有する人型ロボットの上半身を開発した(図8)。ヘリカルギアを用いた中空軸で軸内配線可能なギアボックスを肩のY軸に、リンク機構による3軸直交関節を手首に採用している。さらに高剛性な肩甲骨関節を設け、可動域の拡大を図った。頭部にはMicrosoft社製Kinect Azureを搭載しており、前方の画像および色付き点群が取得可能である。図8には含まれていないが、手先にはLeprino社製6軸力センサを搭載し、電流制御による手先の力制御が可能な構成となっている。センサやアクチュエータの通信インターフェースはRS-422およびRS-485であり、これらの信号はイーサネットを介してPCで送受信される。



図8 東京工業大学で開発した人型ロボットの上半身

(7) 総括

本研究プロジェクトはCOVID-19のパンデミックにより大きなダメージを受け、計画で目指していた空間量子化ダイナミクスとリーマン幾何学に基づく動作計画の融合、子供サイズヒューマノイドの実現とそれによるロボスタなドア通過の実現はいずれも実現することができなかった。

一方で、空間量子化ダイナミクスによる動力学シミュレータ上の曲線歩行、リーマン多様体上での制御理論・動作計画の理解の深化、子供サイズヒューマノイドロボットの基本部分の開発において、確かな成果が得られたと我々は考えている。これらの成果を引き続き発展させることによって、数年以内に当初の目標が達成されるものと考えている。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Yuki Onishi and Mitsuji Sampei	4. 巻 Vol. 37, No. 5
2. 論文標題 Priority-based State Machine Synthesis that Relaxes Behavior Design of Multi-arm Manipulators in Dynamic Environments	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 pp. 395--405
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2023.2177122	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 大西祐輝，三平満司
2. 発表標題 タスクの階層性と並列性を両立する双腕マニピュレータの制御アーキテクチャ
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大西祐輝，三平満司
2. 発表標題 優先度付き逆運動学における評価関数の整合性の保証に向けた重み付き擬似逆行列の解析
3. 学会等名 第28回ロボティクスシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Onishi, Tatsuya Ibuki, Shuuji Kajita, Mitsuji Sampei
2. 発表標題 Spatial Dynamics Representation and Recoverable One-Degree Model Reduction for Nonlinear Systems
3. 学会等名 Third IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (MICNON) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Onishi, Shuuji Kajita, Tatsuya Ibuki, Mitsuji Sampei
2. 発表標題 Knee-Stretched Biped Gait Generation Along Spatially Quantized Curves
3. 学会等名 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大西祐輝、伊吹竜也、梶田秀司、三平満司
2. 発表標題 空間量子化ダイナミクスの拡張による 3 次元二足歩行パターンの生成
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梶田秀司、大西祐輝、阪口健、金子健二
2. 発表標題 空間量子化ダイナミクスのための自由曲線上の膝伸展2足歩行軌道計画
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大西祐輝、伊吹竜也、三平満司
2. 発表標題 状態空間上のポテンシャルとしての仮想時間の解釈
3. 学会等名 計測自動制御学会 第8回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	三平 満司 (Sampei Mitsuji) (00196338)	東京工業大学・工学院・教授 (12608)	
研究分担者	金子 健二 (Kaneko Kenji) (10356800)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・上級主任研究員 (82626)	
研究分担者	伊吹 竜也 (Ibuki Tatsuya) (30725023)	明治大学・理工学部・専任講師 (32682)	
研究分担者	阪口 健 (Sakaguchi Takeshi) (80357095)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員 (82626)	

	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
研究協力者	大西 祐輝 (Onishi Yuki)	東京工業大学・工学院・博士後期課程学生 (12608)	

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
---------	---------