

## 研究終了報告書

### 「リーマン計量の合成による包摂アーキテクチャの構成」

研究期間： 2020年11月～2023年3月

研究者： 大西 祐輝

#### 1. 研究のねらい

本研究は、ロボットが人や他のロボット、あるいは状態が変化し得る道具や設備と共存する、いわば動的な環境下において、理論的な安全性や安定性を伴う運動生成のための枠組みを構築することを目指すものである。

上記の目標に対し、本研究では、包摂アーキテクチャと呼ばれるロボット制御の枠組みに注目する。包摂アーキテクチャは神経の反射を基礎とし、分解された小さなタスクを実現する生体の本能的な反射、すなわち単純な制御器の重ね合わせによって大域的に知的な振る舞いを発現させる枠組みである。包摂アーキテクチャの最大の特性は、限られた情報や計算時間の中で現実的な解を導くことにあり、従来型の制御則と比較して破綻することが少なく、その有用性は経験的に知られてきた。しかし、数理的な解析が難しく、なぜうまくいくのか、その理論的な性質は未だ明らかでない。そこで本研究では、数理を基盤とするモデルベース制御理論を起点に、微分幾何学やグラフ理論の知見を積極的に活用することで、モデルの表現力を向上させ、包摂アーキテクチャの構造を解き明かし、理論に裏付けられた設計手法を確立することを大目標とした。

包摂アーキテクチャは、古典的な人工知能の構成法としばしば対比される。しかし、包摂アーキテクチャの立場は決して対立的ではなく、昨今注目を集めている再帰的ニューラルネットワーク (RNN) とも親和し、また部分的にはチューニングされた RNN が包摂アーキテクチャと同等の振る舞いを獲得することもある。したがって本研究は、制御理論の研究でありながら、人工知能技術の説明可能性や動作の保証といった基盤となり得るものでもある。

#### 2. 研究成果

##### (1) 概要

本研究では、上述したねらいに対して、(1) リーマン多様体上での幾何学的非線形制御理論の研究、(2) 実時間制御のための情報処理の理論研究、および (3) ロボットのハードウェア・ソフトウェアの開発、の3点を基軸に研究開発を展開した。

研究項目(1)では、制御理論における解析のための道具を増やすことを目的として、抽象度の高い基礎的な理論研究に取り組んだ。具体的には、リーマン計量が与えられた多様体上において、等長性やベクトル場の位相構造、可積分性といった幾何的な性質を、不良設定な座標変換や可制御性、可安定性の解析へと応用した。また、リーマン多様体上で、自由度の高いロボットの運動学と動力学が統一的に記述できる可能性を示した。

研究項目(2)では、ロボットの実時間での運動生成を実現するための、プログラムによる実装を出口とする理論研究を実施した。実時間での運動生成では、局所的な情報を

用いて応答性の良い制御を行うと共に、非同期に大域的な情報処理を行う必要がある。本項目では、貪欲法と割り込み処理を組み合わせることによって、タスクスケジューリングを前者に組み込むことに成功した。その結果、双腕ロボットにおける、タスクの競合によるスタックの問題を解決することに成功した。

研究項目(3)では、研究用の双腕ロボットの開発と、ロボット統合開発環境 Choreonoid のミドルウェア連携機能のライブラリ開発を実施した。前者ではまず、成人女性の体格の統計データに基づいて、市販のサーボモータを用いたロボットのハードウェアを設計し、製作した。手先の力制御を可能にし、片腕7自由度、可搬1kgを実現している。続いて、イーサネットを用いたロボット内部の通信システムや電装系の開発を行い、それらの上位ソフトウェアを世界標準のロボット用ミドルウェア ROS (Robot Operating System) 上で統合した。後者では、オープンソースプラットフォームである Choreonoid と ROS の連携を実現するプラグインの開発の一部を担当した。本項目における成果物の一部は、知的財産権に関する適切な対応をしたのち、オープンソースとして順次公開する。

## (2) 詳細

### 研究項目(1)：リーマン多様体上での幾何学的非線形制御理論の研究

本研究項目では、複雑な制御系の解析を出口として、リーマン幾何学を用いた非線形制御理論の基礎的な研究を行った。以下にて、各研究トピックについて詳述する。

#### 研究トピック「リーマン幾何学に基づく一般化逆行列の解析」

ロボットを始めとする剛体系の配位空間は、解析力学の枠組みでは、慣性を計量とするリーマン多様体として扱える。そして、ロボットの姿勢から手先や重心の位置を求める順運動学と呼ばれる座標変換は、リーマン沈め込みとして定式化できる。この順運動学の逆変換である逆運動学は、一般的に不良設定問題であり、実用上は擬似逆行列を用いて得られる近似解を用いることが多い。本研究項目では、座標変換におけるリーマン距離としての等長性を考慮することで、リーマン沈め込みの局所的な逆写像を、ある局所座標系上で解析的に導出することに成功した。この逆写像は一意に定まり、その微分が *dynamically-consistent inverse matrix* と呼ばれてきた重み付き擬似逆行列の特殊な場合と一致することを示した。

さらにこの結果を用いることで、優先度付き逆運動学と呼ばれるロボット制御の基盤技術に潜む問題点を明らかにした。配位空間に一度リーマン計量を定めれば、ポテンシャルの勾配や、接ベクトル同士の内積が定まるようになる。しかし、これまでの多くの論文や書籍等において、内積や勾配の取り方が任意であるという誤った設定のもとに理論が構築されており、その結果に対する理論的正しさが何ら保証されていないことが明らかとなった。例えば、最適制御における評価関数が、既存のアルゴリズムだと厳密に最小解を得られない場合があることが明らかとなった。そしてこの問題に対し、リーマン多様体上で統一的な定式化することで理論的整合性が担保されることを示した。本成果は国内会議でいくつかのケーススタディを発表しており、現在雑誌論文に投稿準備中である。

## 研究項目(2)：実時間制御のための情報処理の理論研究

本研究項目では、ロボットが動的な環境下でも実時間で適切な運動の生成を行うためのシステム構成に関する研究を行った。以下にて、各研究トピックについて詳述する。

### 研究トピック「逐次探索と勾配降下によるオンライン運動生成」

ロボットの運動に対する数理最適化は、微分方程式による時間方向の拘束を受けるため、単純な勾配降下のみならず、時間方向の反復も必要となる。しかし、現在の計算機をもってしても、実用上そのような最適化を人型ロボットのような自由度の高いロボットに適用することは多くの技術的な課題が伴う。そのため、同様の最適性を持ちつつもより少ない計算量で運動を生成するためのアルゴリズムが求められる。

その一つの答えが、1制御周期において1回の勾配降下のみを行うという手法である。ロボットの制御のアルゴリズムは、一般的には1秒間に少なくとも数百回実行されるものである。「ロボットの動作を完全に停止して、一定時間を最適化に費やし、得られた最適解を実行する」という従来の実装方法に対し、「各実行タイミングにおいて1回勾配降下を行い、動きながら最適解に近付かせる」というのが基礎となる考え方である。この考え方自体は、1980年代に始まった人工ポテンシャル法以来、多くの改良や応用が見られた。この考え方に基づくと、短い時間で計算を実施するため、センサ値の変化を即座に制御に反映でき、環境の動的な変化にも対応することができる。

本研究トピックでは、この方法に、新たに逐次探索アルゴリズムを加えることで、離散的なスケジューリング問題も同様の枠組みで扱えることを示した。具体的には、各制御計算において、勾配計算と合わせて、与えられたタスクの優先度計算、および優先度付きキューのソートを各時刻に実施させた。これは時間の流れを考慮すれば貪欲法を実行していることとおおよそ等価になる。ただし、障害物の接近など、安全に関わる事象が発生した場合には、割り込み処理が機能し、貪欲法の解を上書きする。このアルゴリズムを、優先度付き逆運動学として知られる冗長度の非干渉化実行則と組み合わせることによって、動的な意思決定を実行する双腕マニピュレーションを実現した。本成果は国内会議および国際雑誌で発表した。



図 1. 開発した双腕ロボット

## 研究項目(3)：ロボットのハードウェア・ソフトウェアの開発

本研究項目では、複雑なタスクを実世界で実行可能な研究用ロボットと、その関連技術の開発を行った。以下にて、各研究トピックについて詳述する。

### 研究トピック「研究用双腕ロボットの開発」

比較的安価に製作可能で、各腕の可搬重量が1kg

程度あり、位置制御と力制御が共に可能な双腕ロボットを新規に開発した（図1）。各腕7自由度と腰に1自由度を有し、腕長は成人女性の統計データの平均値をもとに製作している。また、（写真では取り外されているが、）各手先に力センサを搭載しており、モータの電流値に基づく力制御が可能である。制御や通信に関するソフトウェアは新規に開発しており、目標の手先位置や手先の力などの指令は、世界標準のロボット用ミドルウェアであるROS（Robot Operating System）上の通信で、外部のソフトウェア・コンポーネントから受け取れる構成としている。

#### 研究トピック「ChoreonoidのROSプラグイン開発」

Choreonoidは、産業技術総合研究所で開発され、現在同研究所初のベンチャー企業である（株）コレオノイドがメンテナンスを行う、ロボット開発を支援するオープンソースソフトウェアである。ロボットモデルの編集機能や動力学シミュレーションなど、ロボット開発において重要な機能が統合されている。本研究トピックでは、Choreonoidが世界標準のロボット用ミドルウェアROS（Robot Operating System）と互換性を保つためのプラグインの開発に参加した。成果物は国内会議で発表を行ったほか、既にオープンソースソフトウェアとしてGithub上で公開されている。

### 3. 今後の展開

#### 【今後3年間】

2022年度下半期によりやく実機実験をする環境が整ったため、現在得られている理論的成果を順次実装して実験データを取り、論文を投稿する。また、抽象的な理論研究が主となってしまったため、社会的に有用でかつ具体的なタスクについて検討し、性能評価と性能向上を図っていく。

#### 【今後10年間】

本研究で取り組んだロボットの実時間運動生成は、計算機の爆発的な性能向上の終わりと共に、注目度が高まると考えている。また、製品に組み込む計算機の資源には限りがあるため、深層学習技術との適切な役割分担を行うことで、相乗的なロボット制御技術の発展を目指していく。本研究では、工学的な立場というよりも、むしろ汎用性の高い数理を基盤としているため、学習系の技術との理論的な統合によって新たなロボット制御のパラダイムの創出が期待できる。一方で、ロボットが実際にどのような作業をこなせると良いかという実用上の問題については、社会情勢を見ながら継続的に模索していく必要がある。

### 4. 自己評価

研究目的の達成状況としては、当初の予定よりも遅延があるものの、確実に問題解決が進んでいる。ACT-Xの研究者との交流により、研究計画の時点では考慮していなかった位相幾何学や理論計算機科学の考え方を取り込めたことは、本研究の発展に多大な良い影響があり、ACT-Xの制度を活用できたと言える。また、数理科学と計算機科学の融合によるロボット制御器のシステムティックなアーキテクチャ設計法を、双腕マニピュレーション



という事例を対象に示せたことは、短期的には自身の今後の研究方針に、長期的には今後のロボット制御のパラダイム創出に寄与し得ると考えている。

一方、コロナ禍による出校制限や、世界的な樹脂や半導体の不足の影響を受け、ロボットの開発工程が大幅に遅延した。計画より1年程度遅れたのみならず、設計変更等の工数の増大が続き、2022年度下半期にようやくロボットの完成に至った。このため、研究期間内での実験や論文投稿が十分にできなかったことが悔やまれる。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 代表的な論文（原著論文）発表

研究期間累積件数：2件

1. Yuki Onishi, Mitsuji Sampei. Priority-based State Machine Synthesis that Relaxes Behavior Design of Multi-arm Manipulators in Dynamic Environments, *Advanced Robotics*, 37(5), pp. 395-405, 2023.

有限状態機械は、ロボットに複雑な作業を行わせるための制御器の切り替え手法において最もよく使われるものの1つであるが、人型ロボットのような複雑な身体を持つロボットに適用する場合、設計が困難である。そこで、優先度付き逆運動学と呼ばれる制御手法において優先度関数を動的にし、複数の独立した（例えば腕ごとの）有限状態機械と繋ぐ手法を提案した。シミュレーション上で、提案手法が環境情報をもとにして、ロボット全身の有限状態機械を動的に構築できることを確認した。

2. 大西祐輝, 三平満司. 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. 第28回ロボティクスシンポジウム講演論文集, 2023.

優先度付き逆運動学は、人型ロボットなど冗長な自由度を持つロボットの制御における基盤技術である。本論文ではまず、その解法には任意性があるとされているものの、実際には解法を適切に選ばないと評価関数を適切に最小化できない問題があることを明らかにした。次に、リーマン多様体上で定式化することで、解法が一意に定めることを示した。最後に、これらの内容を、実際の数値計算例を通じて確認した。

### (2) 特許出願

研究期間全出願件数：0件（特許公開前のもも含む）

### (3) その他の成果（主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等）

- ・ 大西祐輝, 梶田秀司, 三平満司. リーマン計量を考慮した冗長系の微分逆運動学. 第39回日本ロボット学会学術講演会, 2021.
- ・ 大西祐輝, 田中良道, 中岡慎一郎. ロボットシミュレータ Choreonoid における ROS 連携機能の強化. 第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2021 (優秀講演賞).
- ・ ソフトウェア「choreonoid\_ros」  
(URL: [https://github.com/choreonoid/choreonoid\\_ros](https://github.com/choreonoid/choreonoid_ros))
- ・ 大西祐輝, 三平満司. 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. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022,  
2022.

