

## 論文内容の要旨

博士論文題目

**Human-Safe and Robot-Efficient Control  
for Close-Proximity Human-Robot Interaction**  
(ヒューマン・ロボット・インタラクションのための  
安全かつ効率的な制御手法に関する研究)

氏名 GARCIA RICARDEZ Gustavo Alfonso

### (論文内容の要旨)

ロボット分野の研究が進むにつれて、人間とロボットのインタラクションにおいて物理的な近接の機会が増えており、ロボットが周囲の人間に危害を加えないことを保証することは重要な課題である。ロボットが人間の近くで動作する際に、ロボットに人間との安全性を考慮させる技術が必要となる。本論文では、人間とロボットとの安全性といった未解決問題に対してヒューリスティックと解析的な解法を提案する。ヒューリスティックを用いた解法は人間の安全性の概念に基づいており、解析的な解法は物理的な測定に基づいて提案をされている。ヒューマン・ロボット・インタラクション(HRI)の中の衝突前の状況で、提案手法は人間にぶつかるリスクと潜在的な人間への傷害を減らすことができる。人間への安全を考慮することは重要であるが、提案手法では安全性とロボットの動作効率の両立を目的としている。ヒューリスティックな解法のために、人間に対して安全な動作を実施するロボットシステムのコントローラとして、Asymmetric Velocity Moderation (AVM) を提案する。人間との衝突を回避するために、AVMではロボットと人間との複数点間の距離と両者の動作の方向を考慮する。AVMは、非対称速度制限を用いることで安全性と効率を両立を解決する。非対称速度制限は、人間に向かって動作する場合に速度を制限し、人間から離れる場合には速度を制約しない手法である。ロボットが人間に極めて近い場合に、ロボットを人間から離す方法として Withdrawal を提案する。Withdrawalは、人間と人間が同じ領域に同時に近付こうとしているときに腕を引き抜くような反射的な反応の動作を、ロボットに適用する方法である。解析的な方法では、人間の行動の推定と衝突の程度に基いた、ロボットにおける人間との安全性の定量化する方法を開発する。安全の指標では、最も危険な状況や、人間に対して衝突が起こりうる状況で障害の程度を推定する。GVMと呼ぶ手法により、ロボットの動作効率に関する影響を最小限に抑える一方で、人間との安全のための制約に適合するようにロボットの速度を調整する。HRIや危険な状況において、人間サイズのヒューマノイドロボットを用いた実機と動力学シミュレータを用いた実験を通じて、提案手法が高効率を保ち人間の安全性を保証できることを示す。

(論文審査結果の要旨)

本研究は、人間とロボット間の安全のための評価、制御、および、衝突回避の手法を提案している。人間とロボット間の安全性は、人間の危険の概念と物理モデルに基づいた提案手法により、ロボットの動作の速度を調整することで保たれる。提案手法は、ヒューマノイドロボットや衝突が起こり得ないタスクに応用可能である。本論文の主な成果は、以下に要約される。

1. 提案された評価方法は、人間とロボットの状態とロボット制御入力における人間の安全性を瞬時に客観的に測定する。まず、人間とロボットとの動きの方向および距離から人間の安全性を評価している。この評価は危険に関する人間の概念に基づく直感的な評価となる。それに、衝突における負傷可能性と衝突の確率から物理モデルに基づいて評価されている。
2. 提案されたコントローラは許容限度を超える潜在的な傷害を避けるためにロボットの速度を調整する。さらに、コントローラのモジュール化の効果により、他の研究者によって発展された評価指標をコミュニティ内で共有可能となっている点は評価できる。
3. 提案された反射的な反応はバーチャルモデルに基づく衝突回避方法である。この方法では人間の反応のように、反射的にエンドエフェクタを人間から離して移動することが可能となる。
4. 被験者と人間サイズのヒューマノイドロボット HRP-4 を用いた実験を行って、人間の安全性と効率の点で提案手法と従来手法の比較を行っている。目的とするタスクのために人間の安全性を確保しながら、動作の効率を維持できる手法を提案し、実験によりその検証を行っている。

以上のように、本論文はヒューマン・ロボットインタラクションにおける知的ロボットの安全性の向上に大きく貢献している。よって本論文は、博士（工学）の学位論文としての価値があるものと認める。