

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：14603

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26730137

研究課題名(和文)人の行動予測に基づく安全性指標と仮想タスク効率性を用いたロボットの安全性向上技術

研究課題名(英文)A novel safety index with a human behavior estimation for robot safety

## 研究代表者

山口 明彦(Yamaguchi, Akihiko)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・研究員

研究者番号：10625031

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：ヒューマノイドロボットのタスクを人間の安全を確保しつつ効率的に遂行するため、人間の行動予測モデルを導入することによる、安全性指標の正確さ向上に取り組んだ。さらに、安全性指標を考慮した行動計画および反射的制御の方法を探った。「人間は取りうる行動の中で最も危険なものを選択する」という仮定を置いて、人間の行動をモデル化する方法を提案した。これにより人間の行動モデルが不確かであっても最悪の場合を想定してロボットを制御できるため、人間の安全を確保できるようになった。手法は適宜、実機およびシミュレーション実験を行い検証した。

研究成果の概要(英文)：In order to execute tasks of humanoid robots while maintaining the safety of surrounding humans, we explored increasing the accuracy of a safety index by introducing an estimation model of human behaviors. In addition to this, we explored motion planning and reactive control methods that consider the safety index. We proposed to model human behaviors by assuming that humans select the most dangerous behaviors from possible selections. This model enabled the robots to maintain human safety even if we do not have accurate models of human behaviors, as we control the robot by assuming the worst cases. We verified our proposed methods with a humanoid robot and simulations.

研究分野：ロボットラーニング

キーワード：安全 安全性指標 ヒューマンロボットインタラクション ヒューマノイドロボット

## 1. 研究開始当初の背景

ヒューマノイドロボットを含むサービスロボットや生活支援ロボットが、一般家庭に進出しつつある。人間の安全性を確保するようにロボットを行動させることが必須であり、ISO の策定も最終段階である [ISO]。一方、安全要求の標準化と並行して、技術的な側面から人間の安全性を確保する研究が行われてきた [Had11, Kul07, Lac13]。安全技術の研究では、安全性（または危険性）を示す指標を定め、安全性指標を低下させないようにロボットを行動させるアプローチが主流である。具体的には以下の 2 つに大別される。(1)安全性指標を考慮した行動計画：行動を始める前に、人間の安全性を確保しながらタスクを達成する行動を計画する [Kul07, Lac13]。安全性指標はコスト関数に組み込まれる。(2)安全性指標を考慮した動作制御：与えられた目標軌道や目標位置を、人間の安全性を確保しながら実行する。人間からの仮想反力や速度を変化させるベクトル場を用いる反射的制御、コンプライアンス制御などがある [Had11]。一方、研究代表者らは、安全性指標を考慮した反射的制御を研究した [Gar2012 など]。我々が開発した非対称 VM (Velocity Moderation) は、与えられた目標軌道を、人間の安全性を確保するように速度を制限しながら追従する。非対称 VM では、人間とロボットの距離だけでなくロボットの動作方向も考慮し、効率性を向上させている。一連の研究より、我々は、(1)安全性指標の正確さは、安全の確保のみならず、タスクの遂行効率や遂行可能性を向上させる上でも重要であること、および、(2)安全に遂行できるタスクの幅を広げるため、安全性指標を考慮した動作制御手法だけでなく、安全性指標を考慮した行動計画手法との組み合わせが重要であること、を理解した。

## 2. 研究の目的

本研究では、ヒューマノイドロボットのタスクを人間の安全を確保しつつ効率的に遂行するため、人間の行動予測モデルを導入することにより、安全性指標の正確さを向上させる。さらに、安全性指標を考慮した行動計画および反射的制御の方法を探る。

本研究でもっとも力を入れる要素は、安全性指標の改良である。これまでロボットと人間の相対距離を用いた定義が一般的で、ロボットの速度や慣性も考慮する研究もあった [Kul07]。我々は、人間の行動予測モデルを導入して将来の人間とロボットの動きを考慮した安全性指標を提案することにより、指標の正確さを向上させる。

安全性指標の開発において、異なる指標を比較し、もっとも妥当なものを選択することも重要である。我々の非対称 VM を含むこれまでの反射的制御では、安全性指標と制御手法を明示的に分離して定義していない。こ

れらを分離した「一般化 VM」を開発し、異なる指標を同じ枠組みで評価できるようにする。代表的な指標を比較し、我々の指標の利点を明確にする。

さらに、安全性指標を考慮した行動計画手法を模索する。具体的には「安全性指標をコスト関数または制約関数に組み込んだ最適化問題」として定式化し、動的計画法によって最適なロボットの行動を計画する。

## 3. 研究の方法

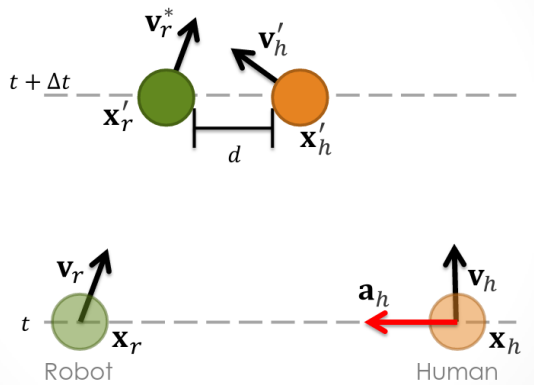
本研究は、(1)安全性指標の開発、(2)一般化 VM の開発、(3)安全性指標を考慮可能な行動計画手法の開発、および、(4)等身大ヒューマノイドロボットによる評価実験、から構成される。最も重要な課題である安全性指標の開発を中心に据え、検証のための一般化 VM の開発、および等身大ヒューマノイドロボットによる評価実験を適当な段階で実施する。また、応用として安全性指標を考慮可能な行動計画手法の開発を行う。

## 4. 研究成果

(1)安全性指標の開発：本研究が他の研究と一線を画する点は、人間の行動予測モデルを導入することである。一般に人間-ロボットインタラクションにおいて、人間の行動は最も不確かさが大きくモデル化しにくい要素である。隠れマルコフモデルなどの確率統計手法が用いられることが多いが、本研究では「人間は取りうる行動の中で最も危険なものを選択する」という仮定を置いて、人間の行動をモデル化した。つまり、これにより導出される安全性指標は最も危険な将来予測を行ったものであり、この指標に基づいて制御や行動計画を行うことで、危険性を低く見積もることを回避し、ロボットを安全に行動させられるようになる。

具体的には、現在のロボットと周囲の人間の状態（それぞれの位置・速度）およびそれぞれの行動モデルから、将来予期される物理的な接触によって生じる衝撃力をモデル化し、これに逆相関する形で安全性指標を定義した。この安全性指標を実際に使用する際、現在の状態は観測可能であり、ロボットの行動モデルも既知であるが、人間の行動モデルは未知である。そこで前述したように「人間は取りうる行動の中で最も危険なものを選択する」という仮定を置いて行動をモデル化する。つまり、人間の行動を適当なパラメータを用いてモデル化し、安全性指標を最小化する形でこれらのパラメータを求めることで、人間の行動が得られる、というものである。

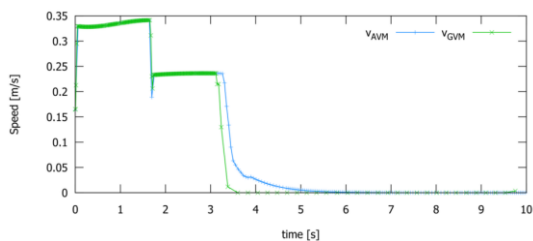
まずは理論を組み立て易いように球モデルから始め、人間およびロボットのそれぞれについて、多関節リンクモデルへと拡張した。次図は球モデルにおける計算の概要を表す。



この際、人間の行動予測は最小化（最適化）計算を含むため、実装において計算時間が課題となることがわかった。単純な実装では、ヒューマノイドロボットと人間のような複雑な状況下だと数百ミリ秒程度掛かり、制御に用いる上で困難であった。そこで我々は、離散化による探索アプローチと、勾配法を用いたアプローチを実装し、安全性指標の信頼性を維持しつつ計算速度を向上させる方法を検討した。

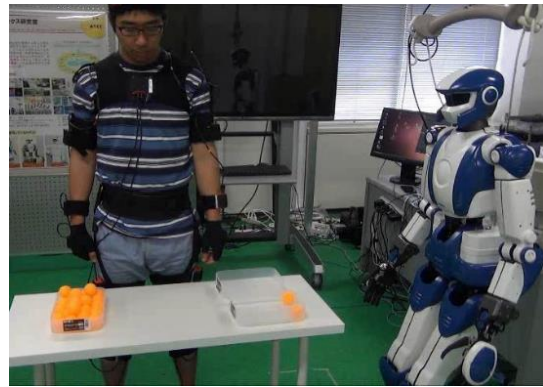
(2)一般化VMの開発：我々がこれまでに提案してきた手法、非対称VM (Velocity Moderation) を一般化する形で、アルゴリズムを導出した。具体的には、非対称VMでは安全性指標とそれを考慮した制御が陽に分離されていないので、まず安全性指標を「ロボットと周囲の人の現在の状態およびロボットの制御指令を入力すれば、その安全の度合いがスカラー量として計算される」という一般化した形に記述しなおし、一般化された安全性指標に対する制御アルゴリズムとして一般化VMを導出した。

下図は非対称VM (AVM) と、(1)で開発した安全性指標を用いた一般化VMをシミュレーション環境で比較した結果である。横軸は経過時間、縦軸はロボットの動作速度を表す。

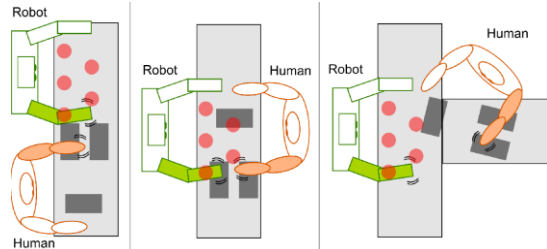


この条件では人間とロボットが互いに近づく方向に動いている。このため、より早く減速している一般化VM (GVM)の方がより安全である。このような結果が得られた理由は、(1)で述べたように、提案する安全性指標が人間の初期速度を考慮した行動予測モデルを用いているためである。

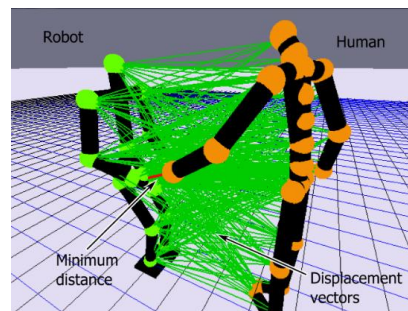
(3)等身大ヒューマノイドロボットによる評価実験：ヒューマノイドロボット HRP-4 が人間と近接してインタラクションする実験を行い、提案手法の有効性を検証する。人間の状態計測にはモーションキャプチャシステムを用いる。次図は想定する実験の様子である。



まずシミュレーション実験を行うことで、実装ミスにより人間に危害が及ぶことを可能な限り避けられるようにした。提案手法の評価実験をコントロールされた条件下で行うため、人間とロボットが日常的にインタラクションする行動シナリオを数種類考案し、シミュレーションおよび実機実験環境を構築した。下図は行動シナリオの例である。

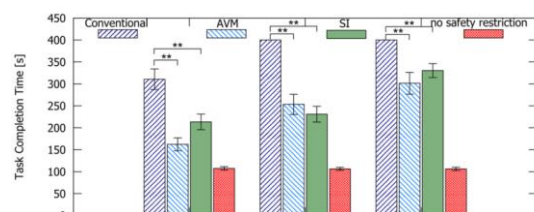


下図にシミュレーション環境の外観を示す。



このように、人間の体の各部位とロボットの体の各部位の距離を計算・可視化できるようになっており、最小距離を強調表示できる。このため安全性指標の検証が行い易い。

提案する安全性指標を用いた一般化VMと、その他の制御手法をシミュレーション上で比較した結果を以下に示す。



縦軸は各行動シナリオにおけるタスク遂行時間を示し、横軸の番号はシナリオを表す。各手法によるタスク遂行時間から、提案手法は「ある程度効率的に」タスクが遂行できていることがわかる。これは、人間の安全を確保した上で、可能な限り効率的に行動できる

ように制御しているためである。

(4)安全性指標を考慮可能な行動計画手法の開発：連続な行動（制御信号）空間を効率よく探索するため，我々は Differential Dynamic Programming [May66] (DDP) を採用した。計測およびモデル化の不確かさを考慮するため，確率的DDPを実装する。サブタスクが連続して遷移していくような，複雑なタスクにおいて，安全性指標などをコスト関数とし，行動を計画する手法の開発を行った。

以上の成果(1)～(3)は雑誌論文①および学会発表①，③，④（うち，学会発表①が安全性指標に関する主要論文），(4)は学会発表②にてそれぞれ発表を行った。

<引用文献>

[Gar2012] Garcia Ricardez, Yamaguchi, Takamatsu and Ogasawara: Asymmetric Velocity Moderation: a Reactive Strategy for Human Safety, in Proc of SSR, 56 (S7A-2), '12.

[Had11] Parusel, Haddadin and Albu-Schaffer: Modular state-based behavior control for safe human-robot interaction: A lightweight control architecture for a lightweight robot, in Proc of ICRA, Shanghai, '11.

[ISO] Robots and robotic devices-Safety requirements for personal care robots, ISO Standard 13482 (FDIS), '13.

[Kul07] Kulic et al.: Pre-collision safety strategies for human-robot interaction, Auton. Robots, vol.22, no.2, pp.149-164, '07.

[Lac13] Lacevic and Rocco: Safety-oriented path planning for articulated robots, Robotica, pp.1-14, '13.

[May66] D. Mayne: A second-order gradient method for determining optimal trajectories of non-linear discrete-time systems, International Journal of Control, vol. 3, no. 1, pp. 85-95, 1966.

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文・査読有〕（計1件）

① Gustavo Alfonso Garcia Ricardez, Akihiko Yamaguchi, Jun Takamatsu, and Tsukasa Ogasawara: “Asymmetric Velocity Moderation for Human-Safe Robot Control,” Advanced Robotics, Vol. 29, No. 17, pp. 1111-1125, 2015.  
DOI:10.1080/01691864.2015.1034173

〔学会発表〕（計4件）

① Gustavo Alfonso Garcia Ricardez, Akihiko Yamaguchi, Jun Takamatsu, and

Tsukasa Ogasawara: “Human Safety Index based on Impact Severity and Human Behavior Estimation,” in Proc. of the 2nd Int. Conf. on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE 2016), Nice, France, February 18-22, 2016.

② Akihiko Yamaguchi and Christopher G. Atkeson: “Differential Dynamic Programming with Temporally Decomposed Dynamics,” in Proc. of the 15th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids2015), pp. 696-703, Seoul, November 3-5, 2015.

③ Gustavo Alfonso Garcia Ricardez, Akihiko Yamaguchi, Jun Takamatsu, and Tsukasa Ogasawara: “Human Safety and Efficiency of a Robot Controlled by Asymmetric Velocity Moderation,” in Proc. of the 10th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction Extended Abstracts (HRI 2015), Portland, USA, March 2-5, 2015, pp. 183-184.

④ Gustavo Alfonso Garcia Ricardez, Akihiko Yamaguchi, Masahiro Yoshikawa, Jun Takamatsu, and Tsukasa Ogasawara: “Improving the Trajectory Scaling Computation of Asymmetric Velocity Moderation,” in Proc. of the 32st Annual Conference of the Robotics Society of Japan (RSJ2014), 2E2-04, Fukuoka-shi, Fukuoka, September 4-6, 2014.

〔その他〕

Human-safe robot motion generation  
<http://robotics.naist.jp/wiki/?en%2FTopics%2FHuman-safe%20robot%20motion%20generation>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山口 明彦 (YAMAGUCHI, Akihiko)  
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・研究員  
研究者番号：10625031

### (2) 研究協力者

小笠原 司 (OGASAWARA, Tsukasa)  
高松 淳 (TAKAMATSU, Jun)  
Gustavo Alfonso Garcia Ricardez