

# 能動的接触に向けた飛びつきロボットの跳躍姿勢のシミュレーション

## Jumping Posture Simulation of a Grasping Robot for Active Touch

石原 拓樹<sup>1\*</sup>      イム ユチャン<sup>2</sup>      田中 文英<sup>2</sup>  
Hiroki Ishihara<sup>1</sup>      Youchan Yim<sup>2</sup>      Fumihide Tanaka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学 知能機能システム学位プログラム

<sup>1</sup> Master's Programs in Intelligent and Mechanical Interaction Systems, University of Tsukuba

<sup>2</sup> 筑波大学 システム情報系 知能機能工学域

<sup>2</sup> Institute of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

**Abstract:** In human-robot interaction, active touch initiated by a robot is expected to influence human psychological states and intimacy. However, previous methods have been limited by robot's expressive behavior and proximity, and their effectiveness has not been sufficiently validated. This study aims to realize dynamic and intentional active touch in which a robot moves, jumps onto a human forearm, and grasps it using a jumping mechanism and soft gripper. This paper presents a visualization approach to stabilize the jumping posture within a physics-based simulation and derives guidelines for hardware development through motion analysis.

### 1 はじめに

人間の孤独感やストレスの緩和のために、コミュニケーションロボットの活用が注目されている [1]。直感的な非言語コミュニケーションは、人間のロボットに対する興味関心の向上に望ましい手法であり、これまで多くの研究が行われてきた [2]。一方、振る舞いによって人間側からの触れ合いを促す受動的なアプローチでは、しだいに飽きを感じてしまうと考えられる。そのため、ロボット側からの能動的接触により、人間の心理状態や親密感に影響を与えることが期待されている [3]。

ヒューマンロボットインタラクションにおいて、例えば、Shiomi らは、人間からロボットへの接触とロボットから人間への接触の両方が、参加者の努力の促進に有効であることを示した [4]。一方、ヒューマノイドによるソーシャルタッチを行った研究では、安心感をもたらす肯定的な印象と、予期しない不適切な行動による否定的な印象の二面性があることが示唆された [5]。しかし、これらの実験条件では、ロボットが机に置かれた状態であり、人間とロボットの距離感や動作の自由度に制約がある。

そこで、ペットの犬が自ら飼い主に飛びついて興味を惹きつけようとする愛着行動に着目した。ジャンプによる振る舞いは、動作の意図を想像させ、豊かな感情

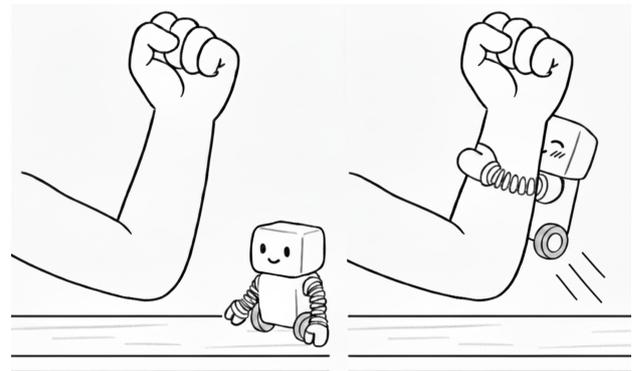


図 1: デザインコンセプト

表現と捉えられる可能性がある [6]。また、Tremoulet らは、単一の物体が画面上で動く様子に対する観測者のアニメー知覚を評価した [7]。その結果、物体の運動の速度や進行方向の変化に有意に影響を受けることを示し、運動の変化が大きいほど、意志を持った生き物らしい印象を与えることを明らかにした。そのため、運動の変化が大きい跳躍動作は、生き物らしさや意図性を高めることが期待される。これまでに動物を模倣したロボットや跳躍可能なロボットは存在するが、跳躍動作をインタラクションに応用した研究は行われておらず、人間に与える心理的影響は未検証である。

本研究では、図 1 に示すようなロボットが移動して

\*連絡先：筑波大学 知能機能システム学位プログラム  
〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1  
E-mail: hiroki.ishihara@ftl.iit.tsukuba.ac.jp

跳躍し、ソフト把持機構を用いて人間の腕に抱きつくという能動的接触を実現する。本稿では、プロトタイプロボットを用いて、跳躍姿勢の安定化を目的としたシミュレーションによる可視化を行い、動作分析を通じて実機開発に向けた指針を導出する。

## 2 関連研究

物体の躍動的な動作において、これまでの跳躍ロボットは、主に障害物乗り越えの目的で開発されてきた。例えば、望山らは、弾性体による飛び移り座屈を利用した瞬発力発生機構に関する研究を行っている。小型かつ軽量の跳躍ロボットは、約0.7sの短い周期で繰り返し階段昇降が可能である [8]。

移動ロボットによる対象物の把持において、リスの動作を基に開発されたロボット Pinto[9] は、移動して跳躍し、木に飛びつく動作が可能である。また、Roderickらは、飛行ロボットにハヤブサの脚を模した鉤爪形状の把持機構を取り付け、止まり木への着地や物体の把持を実現した [10]。しかし、これらの研究では、静的かつ頑丈な止まり木をばねや針で挟み込む機構が用いられており、人間の腕という動的かつ可変な対象物を把持する手法は確立されていない。

本研究では、人間の腕に飛びつく動作において、安全性と安定性を確保した実機開発に向けた指針を得るため、跳躍姿勢のシミュレーションを行う。

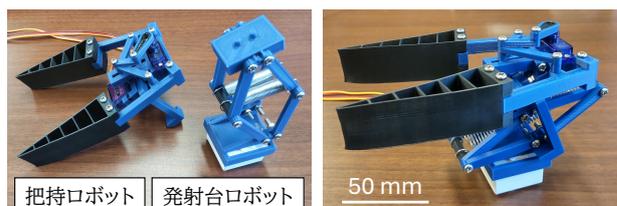
## 3 提案手法

### 3.1 プロトタイプの実機開発

本研究で提案するロボット側からの能動的接触は、ロボットが卓上から移動して跳躍し、人間の前腕に抱きつくという一連の飛びつき動作によって実現する。ロボットが自ら人間に寄り添う行動や、跳躍前の予備動作を加えることにより、意図性を高めて肯定的な印象を与える能動的接触を目指す。

本稿で提案するプロトタイプロボットを図2に示す。これは、跳躍を補助する発射台ロボットと、ソフト把持機構を持つ把持ロボットの二台一組である。移動から把持までの一体型の機構では総重量が増加し、跳躍性能の確保が困難となる。そのため、図2(a)に示すように、機能を分離して把持ロボットの軽量化を図り、初期段階として目的の動作の実現を優先した。

ロボットの本体は、PLA樹脂を用いて3Dプリンタで製作した。発射台ロボットの移動機構は、toio[11]を使用しており、発射機構は、引張コイルばねと四節リンク機構によって構成した。ばね定数は0.30 N/mm、ばねの伸び量は48 mmであった。把持ロボットは、把持



(a) 分離状態 (b) 移動状態

図2: プロトタイプロボット

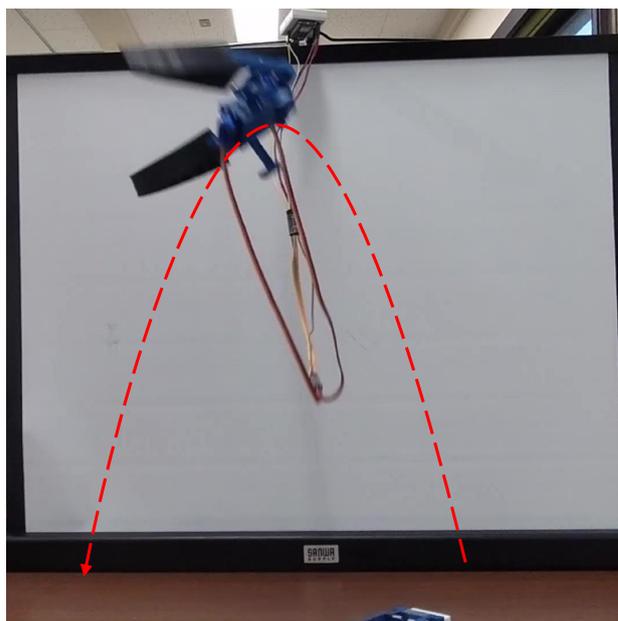


図3: 実機の跳躍の様子

時の安定性を高めるため、柔軟な硬度60AのHPフィラメントを用いて製作したソフトフィンガーが左右に取り付けられている。このフィンレイ効果による三角形状の構造 [12] は、受動的に形状変形して接触面積を大きくするため、衝突を緩和しながら人間の前腕を把持できる可能性がある。また、ばねによるエネルギーの解放とフィンガーの開閉には、それぞれ角度指定可能なサーボモータ SG92R を使用した。本システムは無線通信可能な Arduino Nano 33 BLE によって制御される。これらの把持ロボットの重量は52 gである。図2(b)に示すように、ばねを伸ばしてエネルギーを蓄積した状態で移動する。移動状態の寸法は幅57 mm、奥行き142 mm、高さ98 mmであった。

### 3.2 プロトタイプの跳躍動作の実験

本プロトタイプロボットを用いて、跳躍動作の実験を行った。使用したモータとばねの条件下における把持ロボットの跳躍の様子を図3に示す。把持ロボットは、発射台ロボットとの拘束を解除してエネルギーを解放

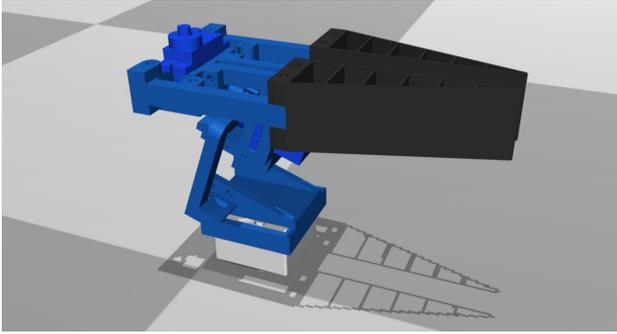


図 4: シミュレーション環境において実装したモデル

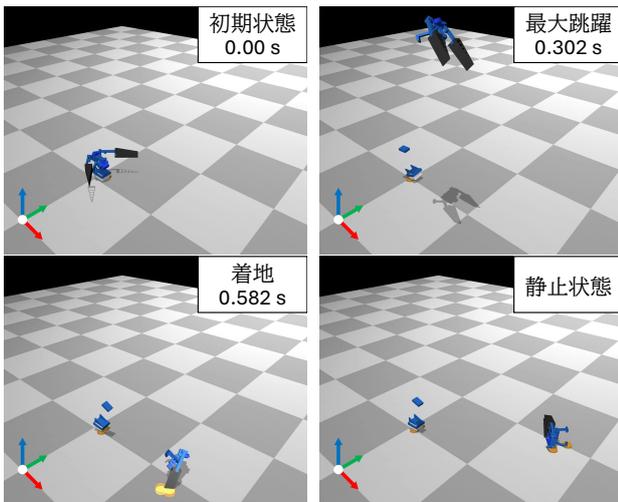


図 5: シミュレーション環境における跳躍の様子

し、発射される。人間の前腕との接触において、ユーザが卓上で肘をついた状態を想定しており、発射台ロボットの発射角度を  $70^\circ$  に固定している。人間の前腕の平均的な長さが約  $25\text{ cm}$  であることを踏まえると、それ以上の十分な跳躍高さであると考えられる。しかし、空中で姿勢が崩れており、人間の前腕への安定した飛びつきは困難であることが明らかとなった。実機の動作は高速かつ短時間であるため、実環境において、姿勢の崩れの要因や挙動を定量的に分析するには限界がある。そこで、跳躍姿勢を安定化するためにシミュレーションを導入する。

### 3.3 シミュレーションの実装

物理シミュレーション環境の構築には、物理演算や接触計算に優れた MuJoCo[13] を使用し、実機の 3D モデルを MJCF 形式に変換して可視化した。実装したモデルのシミュレーション環境のビューアを図 4 に示す。ここで、実機の把持ロボットが持つ四節リンク機構は、閉ループによる複雑な拘束条件を含むため、シミュレーションでは不安定な挙動を示す。そのため、ばね定数

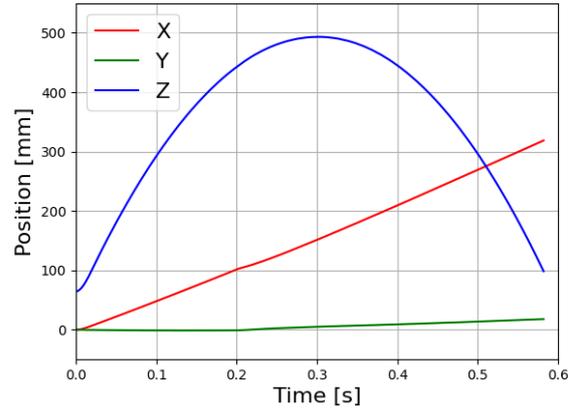


図 6: 跳躍から着地までの時間と位置

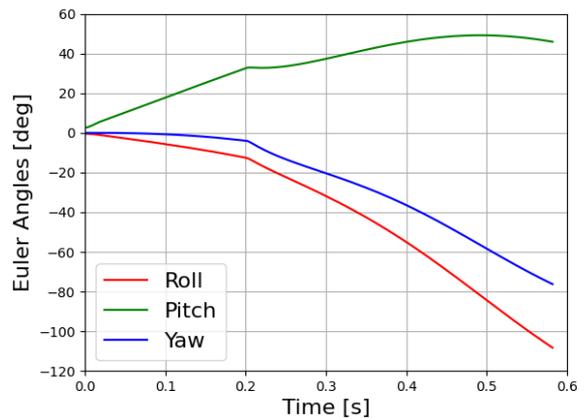


図 7: 跳躍から着地までの時間と姿勢角

や構造から算出した等価な弾性エネルギーを作用させることにより、発射を再現した。リンク機構の省略は、把持ロボットの空中における跳躍姿勢自体には影響を与えないため、分析の目的において無視できると判断した。

## 4 シミュレーションによる動作分析

### 4.1 結果

シミュレーション環境における把持ロボットの跳躍の様子を図 5 に示す。取得した把持ロボットの位置や姿勢を基に、跳躍直前の時刻  $0.00\text{ s}$  から、床との接触を着地として判定し、静止状態で終了とした。このとき、アームの開き角度は、初期状態で  $60^\circ$ 、 $0.20\text{ s}$  後に  $0^\circ$  となるように設定し、跳躍姿勢の時間変化を分析した。

第一に、把持ロボットの時間に対する位置のグラフを図 6 に示す。Z 軸方向の最大跳躍高さは  $493\text{ mm}$  であった。水平方向の飛距離は X 軸方向に  $319\text{ mm}$ 、Y 軸方向に  $18\text{ mm}$  という結果が得られた。

第二に、把持ロボットの時間に対するオイラー角のグラフを図7に示す。Y軸周りの回転であるピッチの時間変化から、空中で前傾姿勢になることが示された。また、X軸、Z軸周りの回転であるロールとヨーの時間変化から、姿勢は初期状態から90°近く傾いているといえる。

## 4.2 考察

図6より、シミュレーション環境において、実機の機構によるエネルギー損失や外乱を含まない条件下における理想の挙動を示唆している。一方、空中におけるピッチの時間変化や姿勢の崩れといった挙動は、実機の観測結果と類似している。そのため、本シミュレーション環境は実機の跳躍姿勢の安定化に向けた指針を得るための有効なモデルであると考えられる。

図7より、重量の大きいフィンガーが前方にあるため、前傾姿勢が生じたと考えられる。また、アームを閉じる動作をさせた0.20s後にグラフの傾きが変化しており、姿勢に影響を与えることが示唆された。空中で水平の姿勢を維持するため、重心のバランスを変更し、姿勢制御の最適化や実機の再設計が必要である。

## 5 今後の展望

### 5.1 強化学習の導入

把持ロボットの跳躍姿勢を安定させ、人間の前腕への把持動作を制御するため、強化学習の導入を検討している。動作分析では、アームの開き角度が跳躍姿勢に影響することが示唆された。そこで、シミュレーションにおいて、プロトタイプロボットでは固定されていた発射角度70°を変更可能とし、跳躍直前の位置、アームの初期角度や跳躍中の開閉を行動として設定する。また、人間の前腕の代わりにターゲットを配置し、ターゲットの把持直前の姿勢の水平度や把持精度などを報酬関数として設計する。これらのパラメータの最適化により、実環境において試行錯誤が困難な動作に対して、実機開発に向けた動作解析を確立することを目指す。

### 5.2 実機の再設計

シミュレーションによって得た指針を基に、プロトタイプロボットを再設計する。特に、空中における前傾姿勢を抑制するため、重心のバランスを重視し、各 부품の軽量化を図る。また、把持ロボットに姿勢制御の機構としてリアクションホイールなどを導入し、姿勢回復の機能の実装を目指す。

## 6 おわりに

本研究では、ヒューマンロボットインタラクションにおいて、ロボットが移動して跳躍し、人間の腕に抱きつくというロボット側からの能動的接触を実現する。本稿では、実環境において分析の困難な動作に対して、跳躍姿勢の安定化を目的としたシミュレーションによる可視化を行い、動作分析を通じて実機開発に向けた指針を導出した。今後は、強化学習や実機の再設計を行い、安全性と安定性を確保した飛びつきロボットの開発を目指す。

## 謝辞

本研究はJSPS 科研費23H00484の助成を受けて行われたものです。

## 参考文献

- [1] LOVOT による様々な実証実験の成果をご紹介します。<https://lovot.life/blog/article/gxy47zhrn>. (accessed 02/06/2026).
- [2] Shane Saunderson and Goldie Nejat. How Robots Influence Humans: A Survey of Non-verbal Communication in Social Human-Robot Interaction. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 11, pp. 575–608, 2019.
- [3] Christian J. A. M. Willems and Jan B. F. Van Erp. Social Touch in Human-Robot Interaction: Robot-Initiated Touches can Induce Positive Responses without Extensive Prior Bonding. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 11, pp. 285–304, 2019.
- [4] Masahiro Shiomi, Kayako Nakagawa, Kazuhiko Shinozawa, Reo Matsumura, Hiroshi Ishiguro, and Norihiro Hagita. Does A Robot's Touch Encourage Human Effort? *International Journal of Social Robotics*, Vol. 9, pp. 5–15, 2017.
- [5] Theresa Law, Bertram F. Malle, and Matthias Scheutz. A Touching Connection: How Observing Robotic Touch Can Affect Human Trust in a Robot. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 13, pp. 2003–2019, 2021.
- [6] 犬が飛びつくのはなぜ？ 犬が飛びつく心理としつけ方 | みんなのブリーダー。<https://www.min-breeder.com/magazine/16116>. (accessed 02/06/2026).

- [7] Patrice D Tremoulet and Jacob Feldman. Perception of animacy from the motion of a single object. *Perception*, Vol. 29, pp. 943–951, 2000.
- [8] Takashi Tsuda, Hiromi Mochiyama, and Hideo Fujimoto. Quick stair-climbing using snap-through buckling of closed elastica. In *2012 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS)*, pp. 368–373, 2012.
- [9] Christopher Y. Xu, Jack Yan, and Justin K. Yim. Pinto: A latched spring actuated robot for jumping and perching, 2024. arXiv:2409.09203.
- [10] W. R. T. Roderick, M. R. Cutkosky, and D. Lentink. Bird-inspired dynamic grasping and perching in arboreal environments. *Science Robotics*, Vol. 6, No. 61, p. 7562, 2021.
- [11] Sony Interactive Entertainment Inc. toio. <https://toio.io/>. (accessed 02/06/2026).
- [12] Whitney Crooks, Gabrielle Vukasin, Maev O’Sullivan, William Messner, and Chris Rogers. Fin Ray<sup>®</sup> Effect Inspired Soft Robotic Gripper: From the RoboSoft Grand Challenge toward Optimization, 2016.
- [13] Emanuel Todorov, Tom Erez, and Yuval Tassa. MuJoCo: A physics engine for model-based control. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5026–5033, 2012.