

MuJoCo: A Physics Engine for Model-Based Control

https://www.researchgate.net/publication/261353949_MuJoCo_A_physics_engine_for_model-based_control

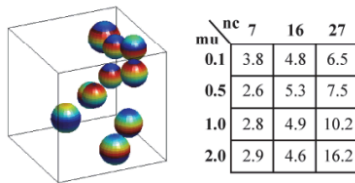


Fig. 1. Left: the algorithm is tested on a system consisting of several balls moving inside a cube. Right: average number of Newton-like iterations as a function of the number of contacts n_c and the friction coefficient μ .

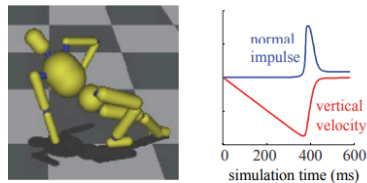


Fig. 2. Left: Rendering of a humanoid (used for testing) in the MuJoCo interactive 3D GUI. Right: a ball-drop test of the convex contact solver. Note how the contact impulse is smoothed, and yet there is no penetration.

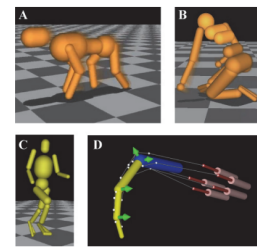


Fig. 3. Illustration of projects where we have used MuJoCo for control synthesis and modeling. A,B are from [9]. C is from [3]. D is from [13].

0. Introduction

- 강화학습(RL)과 로보틱스 연구에서 정확하고 빠른 물리 시뮬레이터 필요성 증가
- 기존 엔진(Bullet, ODE 등)은 계산 효율성이나 안정성에 한계 존재
- MuJoCo(Multi-Joint dynamics with Contact)는 연속적이고 미분 가능한 물리 시뮬레이션을 목표로 개발됨

1. Overview

- MuJoCo는 로보틱스, RL, 제어 연구에 최적화된 물리 엔진(physics engine)
- rigid body dynamics, contact dynamics, friction 모델을 빠르고 안정적으로 처리
- 수학적으로 깔끔한 formulation 덕분에 미분 기반 최적화 및 모델 기반 제어에 유리

2. Challenges

- 기존 엔진들은 불연속적인 접촉 처리로 인해 최적화에 취약
- 실시간 시뮬레이션과 고차원 로봇 모델을 동시에 다루기 어려움
- 로보틱스 연구자들이 필요로 하는 정밀성·속도·확장성을 만족시키기 힘들

3. Design & Architecture

- 수학적 기반: Lagrangian formulation 활용 → 연속적이고 미분 가능한 시스템
- contact dynamics: convex optimization 기반 처리
- 효율성: C언어로 구현되어 고성능 연산 가능
- 사용자 친화적 인터페이스 제공 → XML 기반 모델 정의, 다양한 로봇 구조 지원

4. Use Cases

- 로봇 제어 및 강화학습 실험 환경으로 활용 (팔, 다리, 전신 로봇 등)
- 모델 기반 RL 연구에서 policy gradient, optimal control 알고리즘 실험 가능
- 물리적 상호작용(접촉, 마찰) 포함된 복잡한 환경 실험에 사용

5. Impact

- RL과 로보틱스 연구에서 표준 시뮬레이터 중 하나로 자리 잡음
- 이후 OpenAI, DeepMind, Berkeley RL 연구 그룹 등에서 활발히 채택
- MuJoCo 기반 환경은 OpenAI Gym, DeepMind Control Suite 등에 통합됨
- 모델 기반 제어 연구뿐 아니라 최근 심층강화학습 연구의 핵심 인프라로 자리매김

6. Insight

- MuJoCo는 단순한 물리 엔진을 넘어, 미분 가능한 동역학 시뮬레이터라는 점에서 차별화됨
- RL 연구에서 모델 기반 접근법 발전을 가능하게 함
- 향후 연구 방향: GPU 가속, 대규모 병렬화, 더 복잡한 로봇 모델 지원