













- International Journal of Humanoid Robotics, 41(3): 201-220. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.03.004>
- Kajita S, Hirukawa H, Haradra K, Yokoi K, 2014. Introduction to Humanoid Robotics. Springer Berlin Heidelberg, Germany.
- Kuo AD, 2007. The six determinants of gait and the inverted pendulum analogy: A dynamic walking perspective. *Human Movement Science*, 26(4): 617-656. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2007.04.003>
- Li THS, Kuo PH, Chen LH, Hung CC, Luan PC, Hsu HP, Chang CH, Hsieh YT, Lin WH, 2022. Fuzzy Double Deep Q-Network-Based Gait Pattern Controller for Humanoid Robots. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 30(1): 147-161. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2020.3033141>
- Massah BA, Sharifi KA, Salehinia Y, Najafi F, 2012. An open loop walking on different slopes for NAO humanoid robot. *International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors*, 41: 296-304. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.176>
- Park HY, Kim JH, Yamamoto K, 2022. A New Stability Framework for Trajectory Tracking Control of Biped Walking Robots. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(10): 6767- 6777. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3139909>
- Pratt J, Carff J, Drakunov S, Goswami A, 2006. Capture point: A step toward humanoid push recovery. *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, p. 200-207. <https://doi.org/10.1109/ichr.2006.321385>
- Xie H, Zhao X, Sun Q, Yang K, Li F, 2020. A new three-dimensional gravity compensated inverted pendulum model and ADAMS simulation for biped robot with heterogeneous legs. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34(1): 401-412. <https://doi.org/10.1007/s10073-020-011239-4>
- Yamamotoa K, Kuniokab T, Nishihara T, 2020. Survey on model-based based motion control for humanoid robots. *Advanced Robotics*, 34 (21-22): 1353-1369. <https://doi.org/10.1080/01691862.2020.18376>

## Electronic supplementary materials

Data S1

## 中文概要

**题目:** 基于 CP-ZMP-COM 动力学的双足机器人质心轨迹规划及抗扰动控制

**目的:** 通过对成人行走过程中矢状面与冠状面内质心轨迹的分析, 本文探索双足机器人自由、灵活行走的步态规划方法, 并实现对其受意外外力干扰下

的稳定行走。

**方法:** 在基于线性倒立摆模型的双足机器人运动控制中, 质心、零力矩点和捕获点是实现双足机器人稳定行走的重要因素。1. 通过对矢状面与冠状面内质心运动轨迹的分析, 建立双足机器人 CP-ZMP-COM 动力学模型, 由此计算期望的双足机器人质心、零力矩点和捕获点, 进而提出一种改进的双足机器人质心轨迹规划方法; 2. 提出双足机器人在矢状面与冠状面内协调的抗扰动反馈补偿控制方法, 对双足机器人质心和捕获点位置进行反馈补偿, 使双足机器人质心和捕获点轨迹能够在后续支撑接触时逼近理想位置; 3. 通过小型双足机器人样机及仿真模型, 对改进的双足机器人质心轨迹规划方法及抗扰动反馈补偿控制方法进行仿真与实验验证。

**结论:** 改进的双足机器人质心轨迹规划方法可用于实现小型双足机器人横行、斜行及原地转圈等灵活行走, 且基于所提抗扰动反馈补偿控制方法, 小型双足机器人受随机脉冲外力下横行、斜行及原地转圈时仍能保持稳定而不摔倒。

**关键词:** 双足机器人; CP-ZMP-COM 动力学; 质心轨迹规划; 反馈补偿控制