

ВАЖЛИВІСТЬ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ В РОЗРОБЦІ ГУМАНОЇДНИХ РОБОТІВ

Самойленко Владислав

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: vladyslav.samoilenko@nure.ua

Анотація: У цій роботі проаналізовано роль та важливість динамічної стійкості у процесі розробки гуманоїдних роботів. Зазначено ключові відмінності між статичною та динамічною стабільністю. Проведено порівняльний аналіз класичних методів керування на основі точки нульового моменту (ZMP) та сучасних підходів модельно-прогнозуючого керування (MPC). Результати аналізу визначають необхідність інтеграції нелінійного MPC та точних математичних моделей для створення універсальних і безпечних робототехнічних систем.

Ключові слова: гуманоїдні роботи, робототехніка, динамічна стійкість, модельно-прогнозуюче керування, ZMP, LIPM.

THE IMPORTANCE OF DYNAMIC STABILITY IN THE DEVELOPMENT OF HUMANOID ROBOTS

Vladyslav Samoilenko

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky av., 14

E-mail: vladyslav.samoilenko@nure.ua

Annotation: This paper analyzes the role and importance of dynamic stability in the development of humanoid robots. The key differences between static and dynamic stability are noted. A comparative analysis of classical control methods based on the zero moment point (ZMP) and modern approaches to model predictive control (MPC) is carried out. The results of the analysis determine the need to integrate nonlinear MPC and accurate mathematical models to create universal and safe robotic systems.

Key words: humanoid robots, robotics, dynamic stability, model-based predictive control, ZMP, LIPM.

Робототехніка є галуззю, яка активно розвивається щоб автоматизувати виробничі процеси. На багатьох сучасних виробництвах вже можна зустріти маніпулятори та інші робототехнічні комплекси. Розвиток у сфері гуманоїдних роботів обумовлений необхідністю в робочій силі, під яку не потрібно налагоджувати середовище. Більшість інструментів та робочих місць налаштовані під людські параметри, тому гуманоїдні роботи можуть забезпечити функціональну сумісність з будь-яким середовищем.

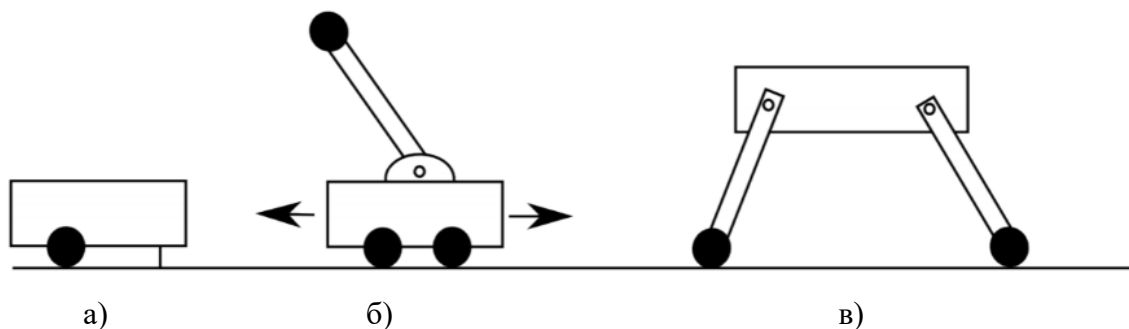
Гуманоїдна робототехніка - міждисциплінарна галузь, що охоплює механіку, електроніку, інформатику, штучний інтелект, сенсорику та приводи, стоїть на передньому краї наукових і технологічних досліджень. Завдяки прогресивним дослідженням наше розуміння структурних та функціональних аспектів гуманоїдних роботів значно просунулося. Двонога мобільність дозволяє гуманоїдним роботам ефективно орієнтуватися в людському просторі, а їхня розвинена маніпуляція та спритність роблять їх здатними виконувати складні завдання. Незважаючи на ці переваги, такі проблеми, як баланс та енергоефективність, залишаються, що робить подальші дослідження надзвичайно важливими для розкриття їхнього повного потенціалу в різних галузях.

Досягнення стабільності гуманоїдних роботів є важливим та складним завданням для розвитку цієї галузі. Одними з основних критеріїв, які висуваються до будь-якого роботу на виробництві є забезпечення безпеки людям, з якими може взаємодіяти робот та забезпечення

52

цілісності оточенню, в якому він перебуває. Це може бути забезпечено в тому випадку, якщо робот є динамічно стійким. Ця задача є складною, коли мова йде про гуманоїдних роботів через велику кількість ступенів свободи. За аналогією з суглобами людини, гуманоїдні роботи мають двигуни, які мають постійно та злагоджено працювати для забезпечення стабільності.

Розрізняють динамічну та статичну стійкість (рис. 1). Статично стійкий механізм не впаде навіть при завмиранні всіх його з'єднань. Натомість динамічно стабільний робот вимагає постійного руху та коригування центру мас для запобігання падінню, що є ключовим для крокуючих або мобільних роботів, які активно перерозподіляють вагу. Хоча динамічна стабільність бажана для швидкісних, спритних рухів, роботи повинні бути сконструйовані так, щоб вони могли легко перемикатися в статично стабільну конфігурацію.



а) статично стійкий робот; б) динамічно стійкий робот з перевернутим маятником;
в) статично та динамічно стійкий робот

Рисунок 1 – Приклади різних видів стабільності

Основа керування гуманоїдним роботом базується на традиційних методах керування, прикладом яких є метод на основі точки нульового моменту (Zero Moment Point - ZMP). ZMP (точка нульового (нахилу) моменту) або CoP (центр тиску) - це точка, в якій тангенціальні компоненти чистого контактного моменту дорівнюють нулю. У випадках компланарного контакту (тобто коли всі точки контакту лежать в одній спільній площині) умова, що ZMP знаходиться всередині опуклої оболонки точок контакту, є необхідною умовою для стійкості поверхневого контакту. Зазвичай цього недостатньо, оскільки воно нехтує обмеженням тертя (іншими словами, воно припускає, що коефіцієнт тертя достатньо великий).

Модельно-прогнозуюче керування (МРС), з іншого боку, дозволяє генерувати траєкторію в нелінійній області та повноцінно використовувати кінематичний діапазон руху та обмеження крутного моменту. Крім того, часте перепланування руху, що відображає поточний стан, робить робота більш стійким до збурень. На рисунку 1 показано класифікацію підходів до розв'язання задач МРС, тобто задачі оптимального керування (ОСКР). Крім того, МРС, спочатку розроблений для автономного водіння, знайшов застосування в управлінні ходом гуманоїдних роботів, регулюючи положення центроїда та поставу. Дослідники також досліджують різноманітні стратегії пересування, що охоплюють такі види діяльності, як ходьба, біг, підйом сходами та пересування по пересіченій місцевості.

Для двоногих роботів широко використовується МРС на основі LIPM. Ця модель є лінійною до горизонтального положення CoM та незмінною в часі, якщо CoM обмежена площиною. ZMP еквівалентна центру тиску на підшві та повинна лежати всередині опуклої оболонки області опори стопи. МРС використовується для планування траєкторії CoM, яка задовольняє це обмеження ZMP. LIPM не враховує чітко обмеження тертя на контактні сили і тому не підходить для обробки некомпланарних контактів. Центроїдальна динаміка - це

модель, що базується на рівнянні Ньютона-Ейлера для вирішення цієї проблеми та широко використовується в гуманоїдних та чотириногих роботах.

ВИСНОВКИ. Вибір між класичними методами на основі ZMP та сучасними підходами модельно-прогнозуючого керування залежить від конкретних завдань робота. Хоча LIPM забезпечує обчислювальну ефективність для ходьби по плоскій поверхні, перехід до центроїдальної динаміки та нелінійного MPC є необхідним для досягнення справжньої універсальності гуманоїдів. Саме інтеграція точних математичних моделей із гнучкими алгоритмами адаптації дозволить подолати бар'єр між лабораторними прототипами та надійними помічниками, здатними до безпечної роботи у динамічному людському середовищі.

ЛІТЕРАТУРА

1. KATAYAMA, Sotaro; MUROOKA, Masaki; TAZAKI, Yuichi. Model predictive control of legged and humanoid robots: models and algorithms. *Advanced Robotics*, 2023, 37.5: 298-315.
2. TONG, Yuchuang; LIU, Haotian; ZHANG, Zhengtao. Advancements in humanoid robots: A comprehensive review and future prospects. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2024, 11.2: 301-328.
3. Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Nevliudov, I., & Luhach, A. K. (2022). Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 3046116.
4. I. Nevliudov, V. Yevsieiev, S. Maksymova, N. Demska, K. Kolesnyk and O. Miliutina, "Object Recognition for a Humanoid Robot Based on a Microcontroller," 2022 IEEE XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Polyana (Zakarpattya), Ukraine, 2022, pp. 61-64, doi: 10.1109/MEMSTECH55132.2022.10002906.
5. Yevsieiev, V. Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0. / V. Yevsieiev, D. Gurin // Sectoral research XXI : characteristics and features : collection of scientific papers "SCIENTIA" with proceedings of the VI International Scientific and Theoretical Conference, September 8, 2023. - Chicago : European Scientific Platform, 2023. - P. 92-94.
6. Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Solyman, A. (2025). Development and investigation of vision system for a small-sized mobile humanoid robot in a smart environment. *International Journal of Crowd Science*, 9(1), 29-43.
7. Nevliudov, I. ., Yevsieiev, V. ., Maksymova, S. ., Gopejenko, V. ., & Kosenko, V. . (2025). DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL SUPPORT FOR ADAPTIVE CONTROL FOR THE INTELLIGENT GRIPPER OF THE COLLABORATIVE ROBOT MANIPULATOR. *Advanced Information Systems*, 9(3), 57–65. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.3.07>
8. Al-Sharo Y, Abu-Jassar A, Lyashenko V, Yevsieiev V, Maksymova S. A Robo-hand prototype design gripping device within the framework of sustainable development. *Indian Journal of Engineering*, 2023, 20, e37ije1673, <https://doi.org/10.54905/disssi.v20i54.e37ije1673>
9. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Pashchenko, O. and Kosenko, V. (2026) "Development of a model for synchronizing the operation of collaborative robotic manipulators in HRC scenarios", *INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND SCIENTIFIC SOLUTIONS FOR INDUSTRIES*, (2(36)), pp. 214–226. doi: 10.30837/2522-9818.2026.2.214.
10. Hamdan, M., Abu-Jassar, A., Essa, M. A. B., Maksymova, S., Yevsieiev, V., & Lyashenko, V. (2026, April). Hybrid Navigation Model of a Mobile Manipulator Robot: Combination of Global Planning and Local Dynamic Optimization. In *2026 International Conference on Artificial Intelligence for Sustainable Engineering and Innovation (AISEI)* (pp. 518-524). IEEE.